

Linee guida per l'utilizzo dei dati interferometrici satellitari ai fini dell'interpretazione del comportamento strutturale delle costruzioni

a cura di

Andrea Prota

Marco Savoia

Felice Carlo Ponzo



<https://doi.org/10.57580/RELUIS.LGDS>

Prima edizione

ISBN 979-12-80212-27-6

Doppiavoce

Napoli

www.doppiavoce.it

© 2025 ReLUIS

Tutti i diritti riservati.

È vietata ogni riproduzione.

Indice

<i>Prefazione</i>	7
1. Introduzione	11
1.1. Premessa	11
1.2. Oggetto ed obiettivi del documento	12
1.3. Sviluppi futuri	13
2. Nozioni fondamentali per la corretta interpretazione del dato interferometrico	17
2.1. Premessa	17
2.2. Immagini radar satellitari	18
2.3. Satelliti e sensori disponibili	26
2.3.1. ERS-1/2 ed ENVISAT	27
2.3.2. Costellazione COSMO-SkyMed	28
2.3.3. Costellazione Sentinel-1	29
2.4. Interferometria SAR differenziale da satellite	29
2.4.1. Principi di base	29
2.4.2. Lo srotolamento della fase interferometrica	33
2.5. Principali tecniche DInSAR multi-temporali	36
2.5.1. Tecnica PSInSAR TM	38
2.5.2. Tecnica SBAS-DInSAR	38
2.5.3. Tecnica SqueeSAR TM	39
2.5.4. Tecnica StaMPS	40
2.5.5. Tecnica TomoSAR	40
2.6. Dati restituiti dall'interferometria satellitare	41
2.6.1. Tipologia del dato fornito	41
2.6.2. Coerenza, definizioni e impatto sulla interpretazione	42
2.6.3. Distribuzione spaziale dei punti di misura	42
2.6.4. Precisione e accuratezza delle misure	44
2.7. Strumenti digitali di supporto all'interpretazione dei dati interferometrici	46
2.7.1. Prodotti cartografici da telerilevamento aereo e satellitare	46
2.7.2. Prodotti ottenuti da rilievi o telerilevamento on-site	51
2.8. Rappresentazioni grafiche dei dati restituiti dall'interferometria satellitare	52
2.8.1. Rappresentazioni su diagrammi	52
2.8.2. Rappresentazioni su mappe	53
2.9. Sintesi del capitolo e aspetti chiave	55
2.10. Riferimenti	56
3. Elaborazione dei risultati dell'interferometria satellitare nel campo delle costruzioni esistenti	61
3.1. Premessa	61
3.2. Utilizzo dei dati di un singolo dataset	62

3.3. Utilizzo dei dati dei due dataset ascendente e discendente	66
3.3.1. Ricampionamento temporale	68
3.3.2. Ricampionamento spaziale	70
3.4. Tecniche di interpolazione spaziale	71
3.4.1. Metodi deterministici	72
3.4.2. Metodi stocastici	73
3.5. Elaborazione dei dati nel dominio della frequenza	75
3.5.1. Analisi nel dominio congiunto tempo-frequenza	77
3.5.2. Analisi di entropia spettrale	78
3.6. Integrazione dei dati SAR con reti GNSS	80
3.7. Possibili criticità in fase di elaborazione dei dati	81
3.8. Sintesi del capitolo e aspetti chiave	83
3.9. Riferimenti	84
4. Interpretazione del comportamento strutturale attraverso l'utilizzo dei dati satellitari	87
4.1. Premessa	87
4.2. Azioni e loro effetti sulle costruzioni	87
4.2.1. Azioni legate all'interazione "attiva" terreno-struttura	87
4.2.2. Azioni indotte da movimenti del sottosuolo indipendenti dalla costruzione	90
4.2.3. Azioni delle acque	94
4.2.4. Azione sismica	95
4.2.5. Altre azioni sulle strutture	96
4.3. Il supporto della ricostruzione dell'assetto geologico del sottosuolo per l'utilizzo dei dati satellitari	97
4.4. Criticità nella fase di interpretazione dei dati satellitari	101
4.5. Riferimenti	102
5. Edifici ordinari e di importanza strategica in muratura	107
5.1. Stato dell'arte	107
5.2. Danni che possono interessare le strutture	112
5.2.1. Azioni legate alle deformazioni dei terreni	112
5.2.2. Azioni delle acque	117
5.2.3. Azione sismica	122
5.3. Riferimenti	125
6. Edifici ordinari e di importanza strategica in calcestruzzo armato	127
6.1. Stato dell'arte	127
6.2. Danni che possono interessare le strutture	129
6.2.1. Azioni legate alle deformazioni dei terreni	129
6.2.2. Azioni delle acque	130
6.2.3. Azione sismica	131
6.2.4. Altre azioni sulle strutture	132
6.3. Riferimenti	133
7. Infrastrutture rilevanti (ponti, viadotti, gallerie)	137
7.1. Stato dell'arte	137
7.2. Danni che possono interessare le strutture	142
7.2.1. Azioni legate alle deformazioni dei terreni e azioni delle acque	142

7.2.2. Azione sismica	144
7.2.3. Altre azioni e variazioni termiche	145
7.3. Riferimenti	146
8. Opere di interesse storico-monumentale ed aree archeologiche	149
8.1. Stato dell'arte	149
8.1.1. Architetture distribuite su una superficie (chiese, teatri, palazzi, ville)	150
8.1.2. Architetture distribuite su aree vaste (aggregati, monasteri, fortezze, aree archeologiche)	154
8.1.3. Architetture a prevalente sviluppo orizzontale (acquedotti, ponti, mura, archi)	160
8.2. Danni che possono interessare le strutture	165
8.2.1. Architetture puntuali (colonne, ruderi, elementi in oggetto)	165
8.2.2. Architetture a prevalente sviluppo verticale (campanili, torri, ciminieri)	166
8.2.3. Architetture a prevalente sviluppo orizzontale (acquedotti, ponti, mura, archi)	170
8.2.4. Architetture distribuite su una superficie (chiese, teatri, palazzi, ville)	175
8.2.5. Architetture distribuite su aree vaste (aggregati, monasteri, fortezze, aree archeologiche)	178
8.2.6. Architetture del XX secolo	181
8.3. Riferimenti	182
9. Utilizzo dell'interferometria satellitare per il monitoraggio strutturale – Considerazioni generali	189
9.1. Premessa	189
9.2. Interferometria satellitare per il monitoraggio strutturale: limiti e potenzialità	189
9.3. Sistemi di monitoraggio on-site	190
9.3.1. Monitoraggio dinamico o vibrazionale	191
9.3.2. Monitoraggio strutturale mediante tecniche di GNSS (Global Navigation Satellite System)	194
9.3.3. Monitoraggio strutturale con fibre ottiche	195
9.3.4. Monitoraggio strutturale con radar terrestri	195
9.4. Riferimenti	197
10. Casi studio	201
10.1. Inquadramento geologico dei siti dei casi studio	201
10.1.1. Riferimenti	203
10.2. Caso studio n. 1 – Edificio in muratura (Roma)	204
10.2.1. Breve descrizione del caso studio	204
10.2.2. Dati di base del caso studio	204
10.2.3. Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici	205
10.2.4. Interpretazione dei dati interferometrici e discussione	212
10.3. Caso studio n. 2 – Complesso Torri Stellari in calcestruzzo armato (Roma)	214
10.3.1. Breve descrizione del caso studio	214
10.3.2. Dati di base del caso studio	214
10.3.3. Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici	217
10.3.4. Interpretazione dei dati interferometrici e discussione	222
10.3.5. Riferimenti	223

10.4. Caso studio n. 3 – Ponte Morandi alla Magliana (Roma)	225
10.4.1. Breve descrizione del caso studio	225
10.4.2. Dati di base del caso studio	225
10.4.3. Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici	226
10.4.4. Interpretazione dei dati interferometrici e discussione	231
10.5. Caso studio n. 4 – Complesso del San Michele a Ripa Grande (Roma)	233
10.5.1. Breve descrizione del caso studio	233
10.5.2. Dati di base del caso studio	234
10.5.3. Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici	236
10.5.4. Interpretazione dei dati interferometrici e discussione	242
10.5.5. Riferimenti	243
10.6. Caso studio n. 5 – Ponte della Musica “Armando Trovajoli” (Roma)	244
10.6.1. Breve descrizione del caso studio	244
10.6.2. Dati di base del caso studio	245
10.6.3. Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici	250
10.6.4. Interpretazione dei dati interferometrici e discussione	251
10.6.5. Riferimenti	254
10.7. Caso studio n. 6 – Ponte Palatino (Roma)	256
10.7.1. Breve descrizione del caso studio	256
10.7.2. Dati di base del caso studio	256
10.7.3. Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici	257
10.7.4. Interpretazione dei dati interferometrici e discussione	263
10.7.5. Riferimenti	264
11. Conclusioni	265
12. Appendice 1: la procedura SBAS-DInSAR applicata all'area studio di Roma	267
12.1. Premessa	267
12.2. Procedure di analisi	268
12.3. Risultati delle elaborazioni SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale con dati CSK sull'area di Roma	269
12.4. Tipologia del dato fornito	275
12.5. Riferimenti	276
<i>Gruppo di lavoro</i>	277

Prefazione

L'interferometria radar satellitare è uno strumento di osservazione della Terra estremamente potente, ma anche molto delicato nel suo uso in contesti pratici. Chi dovrebbe utilizzarne i risultati sa in generale poco di come tali risultati siano ottenuti e dei loro limiti intrinseci, così come chi ne detiene la tecnologia e le conoscenze sa poco delle caratteristiche degli oggetti distribuiti sulla superficie terrestre osservati, e se e quali diagnosi si possano ottenere dai risultati dell'interferometria.

Riportando il problema allo scopo di queste linee guida, si può dire, in estrema sintesi, che l'interferometria satellitare ci consente di misurare spostamenti e velocità di spostamenti di porzioni di costruzioni (edifici, opere monumentali, serbatoi, etc.), di infrastrutture (strade, ferrovie) e di opere infrastrutturali (ponti, viadotti, etc.), a intervalli relativamente lunghi (giorni, settimane, mesi), con precisione e accuratezza nei limiti che la tecnologia consente riguardo sia all'entità dello spostamento misurato, sia all'individuazione del punto o dell'area a cui lo spostamento è associato. La conoscenza di tali spostamenti nel tempo, che può riportarsi anche a diversi anni addietro, può essere un elemento importantissimo per valutare lo stato di salute delle strutture e delle infrastrutture e la sua tendenza, ma potrebbe anche risultare totalmente insignificante se non si possiede la chiave interpretativa di cosa tali spostamenti/velocità possano rappresentare in termini di comportamenti strutturali.

Alcuni casi rappresentativi, derivanti dalla personale esperienza diretta, possono far comprendere l'importanza della conoscenza del comportamento delle strutture nell'interpretazione diagnostica e, dunque, la necessità di mettere in campo in sinergia le competenze dell'interferometria satellitare e dell'ingegneria strutturale.

Ad esempio, la semplice osservazione di un progressivo abbassamento negli anni di un tetto in legno di recente realizzazione potrebbe far pensare a un problema statico della struttura di copertura, mentre è più probabilmente da attribuire ad una non perfetta stagionatura delle strutture lignee al momento della posa in opera, e all'accentuazione dei fenomeni deformativi viscosi. Dunque, un problema di importanza trascurabile per la sicurezza dell'opera, ma che può destare preoccupazione se non si conosce il comportamento del legno come materiale strutturale. Analogamente, l'osservazione di spostamenti di costruzioni su un arco temporale di pochi mesi potrebbe essere dovuta alle normali variazioni

termiche a carattere stagionale, che possono indurre spostamenti orizzontali e/o verticali, in relazione alla morfologia della costruzione e ai tipi di materiali che la costituiscono. Per contro, abbiamo assistito a gravi danni, se non collassi, di costruzioni che non avevano mostrato in precedenza spostamenti significativi rilevabili mediante interferometria.

Dunque, dobbiamo porci una serie di domande del tipo:

- le misure interferometriche satellitari possono essere davvero utili a valutare il comportamento strutturale nel tempo?
- Quali caratteristiche debbono avere tali misure, e dunque quali sensori, quali tecnologie interferometriche sono più efficaci e utili alla diagnosi strutturale?
- Quali comportamenti strutturali si possono effettivamente individuare con l'interferometria satellitare e monitorare nel tempo per poter effettuare una diagnosi utile?
- L'interferometria satellitare, adeguatamente interpretata, è da sola in grado di consentire una diagnosi corretta?
- Quali azioni complementari o successive di monitoraggio, modellazione e indagini in sito sono necessarie per arrivare a una diagnosi strutturale corretta?

È evidente che se da un lato gli esperti delle tecnologie interferometriche satellitari sono indispensabili per definire che tipo di misura si può ottenere e come ottimizzare tale misura, individuando il sensore migliore e la tecnica di elaborazione più adatta al problema specifico, è altrettanto evidente che per formulare una diagnosi sullo stato di salute delle costruzioni si richiedono inevitabilmente conoscenze e competenze proprie dell'ingegneria strutturale. Occorre, in altre parole, conoscere il comportamento dei diversi tipi di costruzione per capire se e quali storie di spostamenti e/o velocità possano essere effettivamente utilizzati per una diagnosi strutturale, ed eventualmente integrare i dati interferometrici con altri approfondimenti in sito effettuati con altre tecniche, e con altri tipi di monitoraggio che utilizzano strumenti installati direttamente sulla struttura.

Dopo aver maturato una serie di esperienze positive sull'uso dell'interferometria satellitare in ambiti attinenti prevalentemente alle geoscienze (effetti cosismici, fenomeni vulcanici, movimenti franosi, subsidenze, etc.), il Dipartimento della Protezione Civile, anche a seguito di alcune proposte applicative dell'interferometria satellitare come strumento predittivo di futuri possibili collassi strutturali prive di fondamento scientifico, ha inteso promuovere e finanziare, nell'ambito delle convenzioni con il Consorzio Interuniversitario ReLUIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale) in sinergia con l'Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (CNR-IREA), un'attività specifica volta all'approfondimento delle tematiche dell'interferometria satellitare e del-

le possibili concrete applicazioni allo studio del comportamento strutturale delle costruzioni, per giungere alla redazione di linee guida sull'argomento.

Da qui scaturiscono le presenti Linee Guida, la cui ambizione è di fornire una risposta alle domande sopra formulate, così da definire un percorso corretto per un uso appropriato e ottimale dell'interferometria satellitare nella valutazione dei comportamenti delle costruzioni e, quando possibile, del loro stato di salute, anche, ove necessario, ridimensionando aspettative eccessive rispetto a uno strumento di monitoraggio che, correttamente utilizzato e interpretato, può fornire un prezioso ausilio alla diagnosi strutturale.

Mauro Dolce

Presidente del Consorzio interuniversitario ReLUIS

1 INTRODUZIONE

1.1 PREMESSA

L'elevata vulnerabilità del patrimonio infrastrutturale, edilizio e monumentale italiano e l'esigenza di un maggior controllo della sicurezza di strutture e infrastrutture strategiche ubicate in zone potenzialmente sensibili, ha spinto la ricerca ad approfondire gli studi per la messa a punto di tecniche sempre più avanzate per il monitoraggio strutturale alle diverse scale, da quella territoriale fino a quella del singolo edificio o infrastruttura.

A questo riguardo, negli ultimi anni ha ricevuto molta attenzione la possibilità di utilizzare dati acquisibili da satelliti per il monitoraggio di fenomeni fisici a scala territoriale. L'utilizzo di immagini RADAR (*R*Adio *D*etection *A*nd *R*anging) satellitari, più specificatamente di immagini Radar ad Apertura Sintetica (*S*ynthetic *A*perture *R*adar, SAR), e di tecniche di interferometria differenziale (che utilizzano coppie di immagini, prima e dopo l'evento) ha anche fornito, a valle di eventi catastrofici quali ad esempio eventi sismici, misure di spostamenti su ampia scala che hanno consentito di ricostruire i movimenti della crosta terrestre e quindi di elaborare, sempre a scala territoriale, mappe di danneggiamento potenziale, utili alla Protezione Civile per la definizione delle azioni da intraprendere nelle prime fasi dell'emergenza sismica. Tecniche avanzate di interferometria differenziale (quali ad esempio le tecniche descritte al paragrafo 2.5) hanno anche consentito di superare i limiti dell'uso dei singoli interferogrammi, ottenendo storie di spostamento in lassi temporali della durata di anni e, quindi, le velocità medie degli spostamenti, che possono interessare ampie aree, anche costruite, o comunque sensibili.

Recentemente, grazie al numero crescente di satelliti, alla maggior risoluzione delle immagini radar, alla più elevata frequenza di campionamento data dal tempo di rivisitazione dei satelliti, ed al notevole sviluppo degli algoritmi e delle tecniche per l'elaborazione di tali immagini, le tecniche di monitoraggio satellitare sono sempre più spesso pensate come possibile supporto al monitoraggio nel campo delle infrastrutture e, in generale, del costruito. Al momento, le potenzialità di tali tecniche appaiono di sicuro interesse, anche se le modalità di elaborazione dei dati e di interpretazione degli stessi devono essere necessariamente molto diverse quando si passa dalla scala territoriale a quella della singola opera o manufatto. Sono infatti subito evidenti i vantaggi collegati alla disponibilità di dati di spostamento e di velocità media di spostamento (nel documento a volte indicati con un unico termine "deformazioni generalizzate") di aree ampie di territorio nelle quali sono collocate opere civili di interesse, senza presenza a terra di strumentazioni. Vanno però comunque precisati i limiti di tali misure in relazione all'esigenza di ottenere informazioni strutturali rilevanti.

Infine, la possibilità di utilizzare anche serie storiche precedenti (per tempi dell'ordine di una decina d'anni) consente di inserire le misure effettuate in un certo lasso di tempo in un quadro temporale molto più ampio, che può fornire informazioni anche su trend di spostamento stagionali o comunque ciclici che possono in molti casi essere del tutto naturali e non indicatori di effetti sulle strutture. In altri casi, invece, variazioni rispetto ai trend stagionali possono indicare fenomeni di danneggiamento in atto sulla struttura.

Al momento non sono sistematici i casi di applicazione delle tecniche di rilevamento satellitare al monitoraggio di strutture o infrastrutture civili, ma i primi risultati appaiono certamente significativi e meritano di essere oggetto di una specifica ricerca. Ovviamente, i dati ottenibili dal rilievo satellitare sono effettivamente utilizzabili per il monitoraggio di singole opere, se i punti di misura (punti che hanno una risposta adeguatamente coerente durante il periodo di osservazione, si vedano i paragrafi 2.5 e 3.1 per una definizione dettagliata) sono in numero e posizione tale da consentire una valutazione di spostamenti significativi per la struttura/infrastruttura di interesse, e se la precisione raggiungibile nel rilievo degli spostamenti è tale da consentire di valutare con sufficiente accuratezza spostamenti differenziali, che possono originare nella struttura/infrastruttura possibili danneggiamenti o comunque problemi di sicurezza. Da tenere presente che, poiché le misure di spostamento ottenute sono relative nello spazio (rispetto a un punto di riferimento scelto) e nel tempo (rispetto all'istante della prima immagine SAR utilizzata nella procedura interferometrica), gli spostamenti reali (con cui valutare ad esempio il livello di danno di una struttura) possono essere effettivamente stimati solo se le misure di spostamento sono integrate da misure on-site.

Stante la frequenza del passaggio di un satellite su una specifica area (variabile da pochi giorni a qualche settimana, in base alla costellazione di satelliti utilizzata e all'intervallo temporale analizzato), deve essere anche evidenziato che possono essere colti gli effetti di fenomeni comunque di tipo lento, con movimenti che devono essere rapportati alla scala dei mesi o degli anni.

Un altro interessante campo di applicazione delle tecniche di rilevamento satellitare è quello dell'ingegneria forense. Infatti, grazie alla disponibilità di lunghe serie temporali di spostamento, la suddetta tecnica si può rivelare uno strumento utile per compiere analisi retrospettive, così da poter accertare eventuali responsabilità nel caso di danni provocati da azioni antropiche.

Non c'è dubbio che il rilievo di spostamenti in vari punti di una struttura/infrastruttura possa fornire informazioni molto utili per evidenziare possibili situazioni meritevoli di approfondimento, ma anche che, al fine di associare i movimenti rilevati a scenari di danno potenziale, sia necessario, dunque, che siano disponibili informazioni sulle caratteristiche strutturali delle opere e indicazioni sulla relativa risposta alle azioni, anche con il supporto di modelli strutturali. Tale circostanza delinea chiaramente l'esigenza di integrazione e supporto alle misure di origine satellitare con misure tradizionali acquisite sul terreno (misure on-site), siano esse di tipo topografico (ad esempio misure di spostamento utilizzando rilevatori *Global Navigation Satellite System* (GNSS) che consentono di aumentare significativamente la precisione degli spostamenti misurati con le tecniche avanzate di Interferometria Differenziale, ma anche misure a specifico carattere strutturale di tipo statico (mediante ad esempio inclinometri sulle infrastrutture da ponte), o di tipo dinamico (misure di tipo accelerometrico).

Le potenzialità derivanti dall'utilizzo integrato dei dati acquisiti direttamente sulle strutture monitorate con quelli acquisiti via satellite sono infatti rilevanti nel caso di strutture e infrastrutture sensibili ai movimenti. La capacità dei sistemi di monitoraggio basati su dati satellitari di operare con continuità, indipendentemente dalle condizioni atmosferiche, può garantire un controllo costante e accurato diventando, pertanto, un utile strumento per gli enti che svolgono funzioni di controllo degli edifici e delle infrastrutture. Grazie alla tecnologia SAR e l'utilizzo di dati ad elevata risoluzione spaziale ed alta frequenza di campionamento è, infatti, possibile tenere sotto osservazione movimenti alle diverse scale, da quelli a scala territoriale, quali ad esempio la subsidenza, i movimenti franosi, i cedimenti fondali, fino a movimenti a scala più piccola, quali movimenti di edifici che possono condurre a condizioni critiche tali da determinare situazioni di rischio.

Tale obiettivo pone problematiche molto diverse in funzione della tipologia di opera, sia essa un edificio, una infrastruttura, o un'area costruita, e dei tipi di parametri che devono essere controllati per evidenziare il raggiungimento di potenziali livelli di attenzione.

1.2 OGGETTO ED OBIETTIVI DEL DOCUMENTO

L'obiettivo principale del presente documento è quello di esaminare le potenzialità e i limiti dell'utilizzo di misure di spostamento derivate dall'interferometria satellitare come strumento utile ai fini di diagnostica e monitoraggio strutturale. A tale fine, il documento affronta sia gli aspetti relativi alle caratteristiche dei dati ottenuti da tecniche avanzate di interferometria differenziale satellitare, sia quelli relativi alla loro interpretazione in relazione all'impiego nell'ambito del monitoraggio strutturale, identificandone potenzialità e criticità. I contenuti delle presenti Linee Guida sono organizzati come segue.

Nel **Capitolo 2** viene presentata un'ampia panoramica sulle caratteristiche delle misure di spostamento ottenute mediante l'interferometria satellitare. In particolare, dopo un'introduzione sulle caratteristiche delle immagini radar satellitari e delle costellazioni di satelliti utilizzate per la loro acquisizione, vengono descritti i principi di base dell'interferometria radar satellitare, seguiti da una breve descrizione delle principali tecniche avanzate di analisi interferometrica per la ricostruzione delle serie temporali di spostamento degli oggetti a terra. Successivamente viene presentato un approfondimento sulla tipologia dei dati ottenuti a valle del processo interferometrico e sulle possibili modalità in cui possono essere visualizzati, rappresentati e analizzati, anche facendo uso di eventuali dati ancillari disponibili (ad esempio, prodotti cartografici o dati ottenuti da rilievo in sito). I contenuti presentati in questo capitolo hanno lo scopo di fornire le nozioni fondamentali per favorire un corretto utilizzo dei dati interferometrici, sia in termini di una loro successiva ulteriore elaborazione, sia ai fini del loro impiego per l'interpretazione del comportamento strutturale.

Il **Capitolo 3** presenta alcune delle principali tecniche e modalità di elaborazione che possono essere effettuate sui dati ottenuti dall'interferometria satellitare, al fine di ricavare le misure e le informazioni di maggior interesse per le attività di diagnostica e monitoraggio strutturale. Particolare attenzione viene rivolta agli approcci per la determinazione delle componenti di spostamento e di velocità media di spostamento lungo le direzioni coordinate Est-Ovest e Verticale (mentre praticamente nessuna informazione è ottenibile per la componente orizzontale Nord-Sud, essendo il sensore molto poco sensibile alla misura della componente del moto in tale direzione), essenziali per una corretta interpretazione dei fenomeni deformativi osservati. A tale fine risulta necessario il ricorso a tecniche di ricampionamento spaziale e/o temporale dei dati interferometrici. Successivamente, vengono presentate alcune tra le principali tecniche di analisi del segnale per lo studio delle serie temporali di spostamento ottenute dall'interferometria. Tali approcci consentono di ricavare informazioni importanti, che risultano spesso rilevanti al fine di un'efficace interpretazione strutturale delle misure fornite. Il capitolo si conclude evidenziando alcune criticità e aspetti rilevanti che possono essere riscontrati in fase di elaborazione successiva dei dati interferometrici. Da sottolineare come la finalità dei **Capitoli 2 e 3** sia quella di fornire indicazioni ai non specialisti per un utilizzo consapevole dei risultati del processo di valutazione degli spostamenti interferometrici, processo particolarmente complesso, consentendo in questo modo una proficua interazione tra tecnici con diverse competenze.

Nel **Capitolo 4**, l'attenzione è rivolta ai concetti generali utili all'interpretazione dei risultati dell'interferometria ai fini del monitoraggio strutturale delle costruzioni esistenti. Gli effetti sulle costruzioni, in termini di spostamenti rilevabili mediante l'utilizzo dei dati interferometrici, vengono analizzati criticamente, anche in funzione delle differenti tipologie di azioni che possono costituire la causa. Successivamente vengono discussi gli aspetti e le criticità generali per la corretta interpretazione strutturale delle misure ottenute dall'interferometria satellitare, focalizzando l'attenzione su quelli comuni a tutte le tipologie di opere.

Le peculiarità relative ad ogni specifica tipologia strutturale vengono analizzate e discusse in dettaglio nei capitoli successivi. In particolare, il **Capitolo 5** è dedicato agli edifici in muratura, il **Capitolo 6** agli edifici in calcestruzzo armato e il **Capitolo 7** alle infrastrutture viarie. Per ciascuna tipologia strutturale viene presentata una breve disamina delle applicazioni riportate nella letteratura tecnica e scientifica in cui i dati interferometrici sono stati utilizzati per il monitoraggio di opere appartenenti a tale tipologia. Vengono quindi discussi i principali danni che possono interessare le strutture appartenenti alla specifica tipologia strutturale ed i possibili approcci per la loro diagnosi mediante l'utilizzo delle misure interferometriche, anche combinate con dati ottenuti da monitoraggio tradizionale. Il **Capitolo 8**, dedicato alle opere di interesse storico-monumentale e alle aree archeologiche, riprende la stessa struttura dei tre capitoli precedenti riadattata alle peculiarità specifiche di tale categoria di opere comprendenti tipologie strutturali molto diverse tra loro.

Il **Capitolo 9** propone quindi una sintesi ordinata dei principali aspetti riguardanti l'utilizzo delle misure ricavate dall'interferometria satellitare ai fini del monitoraggio strutturale, individuando sia le potenzialità che i limiti della tecnica, ed illustrato come tecniche di monitoraggio on-site possano essere utilizzate per ottenere misure sul campo, fondamentali per meglio inquadrare il fenomeno deformativo che può interessare la costruzione in esame. Inoltre, allo scopo di favorire la comprensione delle problematiche connesse all'utilizzo di misure di origine satellitare, al **Capitolo 10** vengono esposti alcuni casi studio relativi a tipologie strutturali di interesse, evidenziando come gli obiettivi del monitoraggio e le valutazioni sulla sicurezza possano essere differenti, in funzione delle caratteristiche strutturali principali, delle condizioni al contorno e della eventuale disponibilità di misure on-site. Tali casi studio sono inquadrati anche dal punto di vista geologico-geotecnico, a scala territoriale, aspetto fondamentale per interpretare storie di spostamento protratte nel tempo. Alcune considerazioni conclusive sono infine riportate al **Capitolo 11** mentre l'**Appendice** del documento riassume le principali caratteristiche dei dati interferometrici utilizzati per lo svolgimento delle analisi e degli esempi riportati in queste Linee Guida, riguardanti l'area di Roma nell'intervallo temporale 2011-2019.

1.3 SVILUPPI FUTURI

Il campo dell'elaborazione dei dati satellitari, della loro interpretazione ed utilizzo per il monitoraggio delle strutture è attualmente in grande evoluzione per la rilevanza che potrà avere in futuro nella gestione della sicurezza del

territorio e delle opere dell'uomo, e la ricerca in questo campo si sta indirizzando in varie direzioni. A questo riguardo, Reluis ha attivato uno specifico gruppo di lavoro costituito da 17 unità di ricerca sul tema *WP6 – Monitoraggio e dati satellitari*, che sta approfondendo l'affidabilità di diverse tecniche di elaborazione dei dati attualmente disponibili e la rilevanza dei dati acquisibili come supporto al monitoraggio di differenti tipologie di costruzioni.

Tra le direzioni di ricerca attualmente di maggiore interesse si citano le seguenti.

Utilizzo di differenti tecniche di telerilevamento - Oltre alle tecniche interferometriche multitemporali utilizzabili per il monitoraggio di fenomeni deformativi superficiali, un'ulteriore possibilità è offerta dalle tecniche di telerilevamento satellitare che riguardano le misure di *change detection (optical imagery)*, che hanno l'obiettivo di monitorare le variazioni spaziali nei rapporti tra edifici, strutture e terreni. Ad esempio, tali misure possono essere utilizzate per identificare le variazioni del tessuto urbano dovute a interventi antropici (lavori nel sottosuolo, attività di origine criminale etc.) o a dissesti - e quindi monitorare le conseguenze di questi sugli edifici circostanti - ovvero per individuare e monitorare le strutture sepolte sotto la superficie (applicazioni particolarmente efficaci e in espansione di queste rilevazioni possono riguardare il monitoraggio delle aree archeologiche, così come, nelle fasi di emergenza post evento, per consentire la definizione di una cartografia speditiva mirata all'immediata organizzazione dei soccorsi).

Inoltre, si possono utilizzare dati meteorologici quali umidità e temperatura dell'aria e del suolo, livello delle particelle in sospensione, etc. Questi parametri possono infatti fornire utili elementi per la valutazione del degrado dei siti e per la programmazione di interventi di manutenzione.

Un possibile sviluppo della ricerca considera la possibilità di integrare tali tecniche con quelle interferometriche, al fine di combinare opportunamente dati complementari utilizzabili per una migliore comprensione del comportamento strutturale.

Definizione di soglie di potenziale allarme – L'osservazione continua nel tempo di vaste aree può consentire già oggi la valutazione delle deformazioni superficiali del territorio, fornendo agli enti preposti alla gestione del rischio, un nuovo valido strumento di prevenzione e controllo, particolarmente utile, ad esempio, nel caso di infrastrutture di grandi dimensioni anche non direttamente raggiungibili (e.g. viadotti, opere di sostegno di versanti, ma anche dighe). Come trattato nel presente documento, le tecniche satellitari presentano una grande potenzialità nel fornire informazioni utili anche per lo studio di opere situate in ambienti urbanizzati, compresi gli edifici di interesse strategico.

I sistemi di allerta precoce consistono, in sintesi, nel prevedere il raggiungimento di condizioni critiche di fenomeni già in atto, prevenire situazioni di danno e/o di disagio, anticipare specifici fenomeni potenzialmente dannosi e nell'implementare una serie di azioni di risposta atte ad affrontare, a seconda del caso, l'emergenza che si presenta.

I dati e i prodotti forniti dai sistemi satellitari, opportunamente elaborati ed integrati con i dati ottenuti con tecniche di monitoraggio on-site, possono rappresentare, dunque, un valido e importante strumento per condurre studi sulle cause e sui fenomeni precursori dei disastri ambientali e per migliorare la capacità di monitoraggio e di valutazione dei danni nel caso di fenomeni quali frane, alluvioni, terremoti.

Risulterebbe a questo scopo di grande interesse poter disporre di valori di soglie predefinite di spostamento, o meglio ancora di spostamento differenziale, che consentano di attivare eventuali procedure di allarme o comunque di monitoraggio *on-site* nel caso in cui tali valori vengano superati. Tali soglie devono essere calibrate in funzione della tipologia di struttura (tipologia costruttiva e materiale) e ciò sarà possibile nel prossimo futuro approfondendo, sia dal punto di vista sperimentale che numerico, quali livelli di spostamento possano essere specificamente correlati a danni di diversa entità.

Integrazione tra monitoraggio satellitare ed on-site – Sono particolarmente promettenti tecniche e protocolli operativi per l'integrazione delle informazioni acquisite via satellite con quelle ricavate on-site con tecnologie di monitoraggio tradizionali non distruttive e a bassa invasività. Ciò al fine di consentire il monitoraggio in modo permanente dello stato di salute di strutture ed infrastrutture, nonché di beni di rilevanza culturale, programmarne

la manutenzione straordinaria e valutare eventuali danni o potenziali criticità nel caso di eventi eccezionali quali terremoti, movimenti franosi, dissesti causati da alluvioni, etc.

Ad esempio, tecniche di monitoraggio dinamico sono utilizzate per studiare l'evoluzione del danno strutturale che si traduce generalmente in una variazione delle caratteristiche dinamiche della struttura, quali i periodi propri, i fattori di smorzamento viscoso equivalente e le deformate modali. Analizzando opportunamente la variazione di tali caratteristiche è possibile stabilire se nel sistema sia presente un danneggiamento, valutarne l'entità e in molti casi localizzarlo.

Al tema del monitoraggio *on-site* è dedicato uno specifico paragrafo del capitolo 9 del presente documento.

La possibilità di integrare dati satellitari con dati ricavati direttamente da reti di monitoraggio installate su strutture e infrastrutture apre nuovi scenari per la corretta e più efficace gestione di eventuali emergenze dovute a fenomeni antropici e/o naturali. A titolo di esempio, con riferimento ai beni di interesse storico, i dati raccolti dai satelliti possono essere ulteriormente integrati con quelli presenti nella banca dati basata sui sistemi informativi del MIBAC (Carta del Rischio, Vincoli in Rete, ecc.) al fine di fornire utili informazioni per il monitoraggio e la manutenzione programmata del patrimonio culturale (palazzi, chiese, siti archeologici, oggetto questi oggi di una particolare attenzione da parte della società).

2 NOZIONI FONDAMENTALI PER LA CORRETTA INTERPRETAZIONE DEL DATO INTERFEROMETRICO

2.1 PREMESSA

La possibilità di rilevare gli spostamenti della superficie terrestre avvenuti a seguito di fenomeni deformativi lenti e di monitorare la loro evoluzione nel tempo, in qualunque ora del giorno e della notte e indipendentemente dalle condizioni atmosferiche, rappresenta un'opportunità di fondamentale importanza a supporto delle attività di controllo e salvaguardia del territorio naturale e del costruito.

Negli ultimi decenni le tecniche di telerilevamento radar da satellite sono divenute sempre più consolidate ed utilizzate nell'ambito dell'Osservazione della Terra (OT), grazie alla capacità di osservare e studiare regioni anche molto estese della superficie terrestre attraverso la propagazione e l'interazione delle onde elettromagnetiche con oggetti posti anche a notevole distanza dall'osservatore, mediante l'utilizzo di sensori remoti. Il vantaggio indiscusso del telerilevamento, in particolare di quello satellitare, è principalmente legato alla capacità di effettuare osservazioni remote con elevata copertura spaziale (anche milioni di km²) e temporale (le frequenze di rivisitazione dei sensori variano da poche ore fino a qualche settimana), con un irrilevante impatto ambientale e limitati costi di monitoraggio, se rapportati all'estensione dell'area analizzabile o al periodo di osservazione, rispetto ai metodi tradizionali *on-site*. Inoltre, a differenza dei metodi *on-site* che permettono di effettuare misure solo dopo la messa in posa dello strumento in un sito d'interesse, nel caso di sistemi di telerilevamento satellitare si ha la possibilità di sfruttare gli ingenti archivi di dati esistenti relativi ad una stessa scena a terra, collezionati in un intervallo di tempo di qualche anno, o comunque precedente al verificarsi di un dato evento, rendendo pertanto possibile la ricostruzione dell'evoluzione nel passato di un fenomeno sotto osservazione.

Nel panorama dei vari sensori satellitari operanti nelle diverse bande di frequenza dello spettro elettromagnetico, un ruolo di primaria importanza per l'OT è ricoperto dai sensori attivi Radar ad Apertura Sintetica (*Synthetic Aperture Radar*, SAR), sensori a microonde (lunghezze d'onda da 1cm a 1m) che permettono di misurare il segnale elettromagnetico retrodiffuso (o *backscattered*) dalla superficie terrestre, dipendente sia dalla geometria di acquisizione sia dalle caratteristiche elettromagnetiche e geometriche della scena osservata, per ricavare immagini SAR ad alta risoluzione spaziale (da alcuni metri a qualche decina di centimetri). Il SAR trova largo impiego nelle applicazioni di telerilevamento, grazie al vantaggio di essere indipendente dalla presenza di una sorgente luminosa esterna e dalle condizioni meteorologiche, e proprio grazie a questa flessibilità, negli ultimi trent'anni si è avuta una notevole spinta verso uno sviluppo continuo di tecnologie basate sull'utilizzo di diverse immagini SAR acquisite in un certo intervallo di tempo per l'analisi delle deformazioni dell'ambiente naturale e antropizzato. Tra queste, nel presente capitolo, particolare attenzione è volta alla tecnica Interferometria SAR Differenziale (DInSAR) e ai suoi algoritmi multi-temporali, finalizzata all'analisi e al monitoraggio degli spostamenti del costruito, attraverso la generazione di mappe spazialmente dense di velocità media di spostamento e relative serie storiche di spostamento per ogni punto coerente e alla scala della singola infrastruttura o edificio, a partire da un gran numero di immagini collezionate su un'area di interesse in un arco temporale di diversi anni.

Il presente capitolo contiene una sintesi delle principali caratteristiche dei sistemi di telerilevamento SAR satellitari e delle tecniche multi-temporali di Interferometria SAR satellitare che consentono di rilevare, analizzare e monitorare nel tempo le deformazioni del suolo e delle strutture. Fra l'altro, si segnala che un numero significativo di tali tecniche (vedi, paragrafo 2.5) sono originariamente frutto delle attività di ricerca svolte da Università ed Enti di Ricerca del Sistema Pubblico Nazionale, come nel caso del Politecnico di Milano e del Consiglio Nazionale delle Ricerche, e le relative pubblicazioni scientifiche, che ne descrivono le caratteristiche principali, vantano ormai migliaia di citazioni nella letteratura scientifica. L'obiettivo del capitolo è quello di fornire le nozioni fondamentali per un corretto utilizzo dei dati interferometrici, sia in termini di una loro successiva ulteriore elaborazione, sia ai fini del loro impiego per l'interpretazione del comportamento strutturale.

Inizialmente, viene presentato un breve excursus sulle caratteristiche delle immagini SAR e dei principali sensori e costellazioni SAR satellitari, sviluppati a partire dal 1992 dalle varie Agenzie Spaziali Europee e caratterizzati da diverse risoluzioni spaziali, lunghezze d'onda, tempi di rivisitazione, copertura spaziale. Successivamente, vengono

illustrati i principi alla base dell'Interferometria SAR differenziale e vengono descritte alcune delle principali tecniche multi-temporali DInSAR avanzate, finalizzate alla generazione di serie temporali di spostamento e di mappe di velocità media di spostamento. Infine, viene presentato un approfondimento sulla tipologia dei dati ottenuti a valle del processo interferometrico e sulle possibili modalità in cui possono essere visualizzati, rappresentati e analizzati, anche facendo uso di eventuali dati ancillari disponibili (ad esempio, prodotti cartografici o dati ottenuti da rilievo on-site).

2.2 IMMAGINI RADAR SATELLITARI

Il telerilevamento o *remote sensing* è definito come l'insieme di tutte le tecniche che permettono di osservare e studiare regioni della superficie terrestre attraverso l'interazione di onde elettromagnetiche con oggetti posti anche a notevole distanza dall'osservatore. Il vantaggio indiscusso del telerilevamento, che ne ha determinato il grande successo nel campo dell'OT, è principalmente legato alla capacità di effettuare osservazioni remote con elevata copertura sia spaziale (anche decine di migliaia di km²) sia temporale (frequenze di rivisitazione dei sensori da poche ore fino a decine di giorni). Questo determina un impatto ambientale praticamente nullo e limitati costi di monitoraggio, se rapportati all'estensione dell'area analizzabile o al periodo di osservazione, rispetto ai metodi tradizionali *on-site*, che invece forniscono misure molto accurate ma richiedono un accesso diretto a luoghi, a volte di difficile raggiungimento per condizioni climatiche ed ambientali avverse (es. calotte polari, crateri vulcanici, aree in frana).

I sensori utilizzati nelle diverse tecniche di telerilevamento possono essere classificati in passivi o attivi in base al loro principio di funzionamento: i primi sfruttano la radiazione elettromagnetica naturale emessa dai corpi o quella irradiata dal sole e riflessa dagli stessi, in assenza di un trasmettitore del segnale; i sensori attivi, invece, sono dotati di un sistema trasmettente e uno ricevente (antenna) mediante i quali, con l'invio di un opportuno segnale, "illuminano" la zona di interesse e registrano le informazioni retrodiffuse dalla scena (Elachi, 1988). Tra i sensori di telerilevamento attivo, i più usati per il monitoraggio dei parametri bio-geofisici della superficie terrestre sono i sistemi RADAR (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging) satellitari (Franceschetti e Lanari, 1999). Il radar è un sistema di telerilevamento attivo che lavora nel campo delle microonde (lunghezze d'onda che vanno tipicamente da 1 m a 1 mm, corrispondenti a frequenze da circa 300 MHz fino a 300 GHz), nel quale il segnale elettromagnetico viene emesso da un'antenna trasmettente ed illumina i vari bersagli della scena osservata; il segnale incidente viene in parte assorbito dall'area illuminata, in parte riflesso e per un'altra aliquota re-inviato verso il satellite (segnale retrodiffuso) dove viene registrato dall'antenna ricevente, come riportato schematicamente in Figura 2-1. Gli echi registrati dall'antenna ricevente verranno poi convertiti in formato digitale e trasformati successivamente, mediante una opportuna elaborazione, in un'immagine radar. La caratteristica principale di questi sensori è quella di essere indipendenti dalla presenza di altre sorgenti luminose, come ad esempio il Sole, quindi possono essere usati in qualunque ora del giorno e della notte; inoltre, sfruttando il campo di frequenze delle microonde, possono essere usati praticamente in qualunque condizione climatica, riducendo l'impatto delle nubi o della nebbia, permettendo così un monitoraggio continuo e totale, adatto a tracciare, ad esempio, mappe topografiche, rilevare la rugosità del terreno o misurare la deformazione del suolo (Franceschetti e Lanari, 1999).

I sistemi satellitari radar più comunemente utilizzati per applicazioni di monitoraggio della superficie terrestre ruotano attorno alla Terra su un'orbita quasi polare (satelliti con orbite eliosincrone, definite come orbite geocentriche con valori di altezza e inclinazione tali da garantire che il satellite sorvoli lo stesso punto della superficie terrestre alla medesima ora solare locale) ad un'altitudine compresa tra 500 e 800 km sopra la superficie terrestre. Viaggiano su traiettorie leggermente inclinate rispetto ai meridiani (con angoli di pochi gradi), percorrendo metà dell'orbita dal polo Nord al polo Sud (orbita discendente) e metà dal polo Sud al polo Nord (orbita ascendente), Figura 2-2. Durante il volo lungo la loro orbita, i sensori radar montati sul satellite emettono segnali elettromagnetici lungo una direzione chiamata linea di vista del satellite (*line of sight*, *LOS*), all'interno una certa banda di frequenza e acquisiscono gli echi retrodiffusi, registrati come ritardi di tempo e, quindi, come distanze tra i punti a terra e il sensore. Tali informazioni vengono successivamente processate attraverso procedure che elaborano l'insieme degli echi digitali registrati, fino ad ottenere un'immagine della zona osservata. La combinazione del moto dei satelliti lungo la propria orbita con il moto rotatorio della Terra attorno al suo asse

consente di ottenere immagini radar della stessa area in diversi istanti temporali. Il tempo impiegato dal satellite per ripassare sulla stessa area è chiamato “tempo di rivisitazione” (*Revisit Time*, RT).

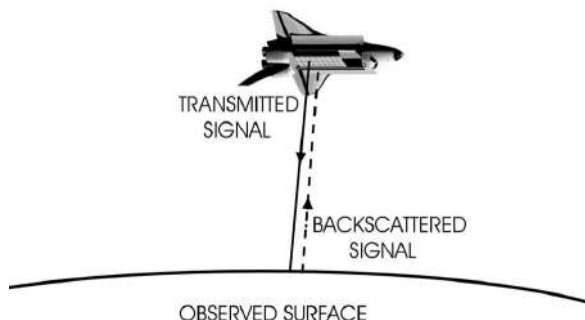


Figura 2-1 – Schema del principio di funzionamento di un sistema di telerilevamento attivo (Franceschetti e Lanari, 1999).

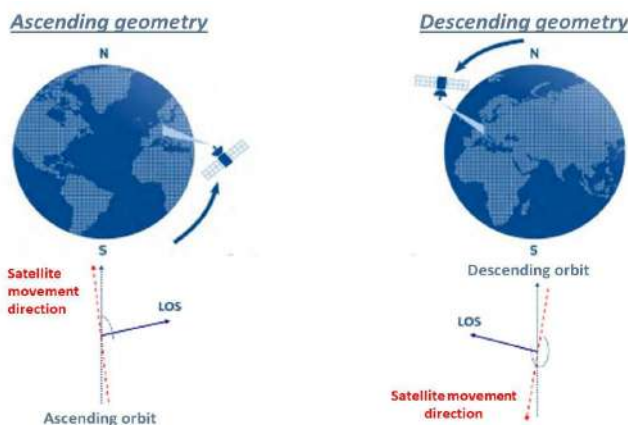


Figura 2-2 – Schema di acquisizione di immagini satellitari da orbite ascendenti e discendenti.

I sistemi radar viaggiano lungo la direzione di volo (*flight direction*) e inviano segnali elettromagnetici che investono la superficie terrestre in una zona, denominata *footprint*, avente una determinata estensione nelle due direzioni parallela e ortogonale alla linea di volo del satellite. In Figura 2-3 è riportato a titolo d'esempio lo schema della geometria di acquisizione di un satellite radar, che può essere riferito ad un sistema di coordinate cilindriche (x, r, θ). In particolare, la coordinata x è chiamata *azimuth* – AZ, il cui asse coincide con la linea di volo del satellite, la quale forma un angolo ϕ (solitamente di pochi gradi, detto *heading angle*) con la direzione dei meridiani. La coordinata r è chiamata *slant range* (o semplicemente *range* – RG), e rappresenta la distanza tra il sensore e il punto a terra lungo la LOS, ossia lungo la direzione di puntamento del radar in cui vengono emessi e registrati i segnali elettromagnetici che incidono sugli oggetti (*target*) presenti nell'area illuminata. La terza coordinata θ , detta *off-nadir o look angle*, è l'angolo formato tra la verticale e la linea di vista, variabile a seconda del tipo di satellite e della modalità con cui opera (circa 23° per i sensori ERS, $15^\circ - 45^\circ$ per i sensori COSMO-SkyMed, si veda anche paragrafo 2.3). La caratteristica vista direzionale dei sistemi radar rispetto alla direzione di volo (*side-looking view*) consente di superare l'ambiguità destra/sinistra di possibili oggetti (*target*) che si trovano alla stessa distanza dal sensore (*punti equirange*) (Franceschetti e Lanari, 1999).

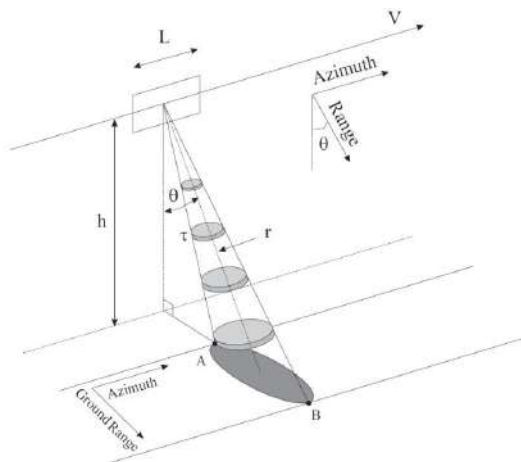


Figura 2-3 – Schema della geometria di acquisizione di un satellite radar (Usai, 2001).

La proiezione a terra della direzione *range* è denominata *ground range*, mentre il *footprint* è caratterizzato dalla dimensione detta *Swath Width* (ossia la distanza a terra tra i punti A e B, corrispondenti alle posizioni a terra in corrispondenza del *near-range* e *far-range*, rispettivamente, si veda Figura 2.3). In Figura 2-4 è mostrata una rappresentazione schematica di una sezione lungo la direzione di volo della geometria di acquisizione. È opportuno osservare che la scala adottata in Figura 2-4 deforma le reali proporzioni dell'angolo compreso tra la linea *far-range* e la linea *near-range*; la variazione di tale angolo, infatti, pur essendo direttamente legata all'estensione dell'area coperta nella reale configurazione di misura, può essere considerata sufficientemente piccola in alcuni casi tale da rendere rilevante il solo angolo θ valutato a centro scena (calcolato al *mid-range*) ai fini della descrizione del sistema.

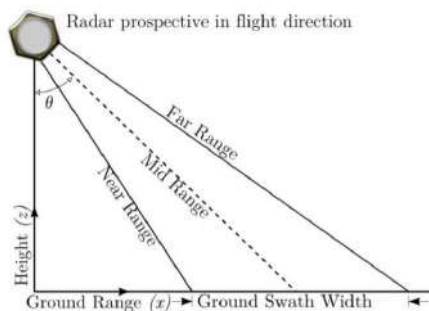


Figura 2-4 – Rappresentazione schematica della geometria di acquisizione side-looking del radar lungo il piano del range, ripresa e modificata da Velotto, 2016. Sezione ortogonale alla direzione di volo (*azimuth*) con l'indicazione del footprint a terra (*ground swath width*) e dell'angolo θ a centro scena. La variazione di θ tra *near* e *far range* è amplificata nello schema per ragioni di semplificazione nella descrizione.

A valle dell'elaborazione del dato rilevato dall'antenna e relativo ad una determinata area (tale operazione è talvolta denominata focalizzazione del dato grezzo (Franceschetti e Lanari, 1999) viene generata una immagine radar, costituita da pixel definiti nelle due direzioni *azimuth* e *slant range*, chiamate tipicamente coordinate radar.

Si definisce risoluzione in *range* Δr la minima distanza, misurata in *slant range*, che devono avere due oggetti a terra affinché il radar li possa vedere come distinti, quindi “risolti”, ed ha la seguente espressione:

$$\Delta r = c \cdot \frac{\tau}{2} \cong \frac{c}{2\Delta f} \quad (1)$$

È evidente dall'equazione (1) che la risoluzione in *range* dipende dalla velocità della luce c e dalla durata dell'impulso τ , dove il fattore 2 tiene conto del percorso di andata e ritorno dell'onda elettromagnetica. A sua volta, la durata dell'impulso può essere espressa come l'inverso della banda del segnale elettromagnetico Δf . Per ottenere alti valori di risoluzione in *range* è necessario, perciò, un segnale ad ampia banda, che si traduce in un impulso di breve durata. D'altro canto, poiché durante la propagazione il segnale elettromagnetico è soggetto a fenomeni di attenuazione, deve poter essere trasmesso con una significativa potenza ottenibile attraverso impulsi di durata non troppo limitata. La necessità di avere quindi al contempo un impulso con ampia banda, per migliorare la risoluzione, e di durata non troppo limitata, in grado di fornire una significativa potenza, conduce all'utilizzo del *chirp* (segnale nel quale la frequenza varia linearmente con il tempo), che permettono di avere ampie bande e durate sufficientemente estese (Franceschetti e Lanari, 1999).

Similarmente al caso del *range*, due punti sono considerati distinti in *azimuth* se non si trovano entrambi all'interno del fascio d'antenna (*beam*). La risoluzione in *azimuth* Δx è legata, perciò, alla larghezza del fascio d'antenna, attraverso questa espressione:

$$\Delta x = r \cdot \frac{\lambda}{L} \quad (2)$$

dove r è la distanza sensore-target, λ la lunghezza d'onda del segnale trasmesso, L la lunghezza dell'antenna montata a bordo del satellite, e dove $\frac{\lambda}{L}$ rappresenta l'estensione angolare (in realtà la porzione nei 3dB) del fascio d'antenna in *azimuth* (Figura 2-5). L'equazione (2) riporta la risoluzione in *azimuth* nel caso di un Radar ad Apertura Reale (*Real Aperture Radar*, RAR), che è proporzionale alla distanza tra sensore e target (quindi dipende dalla quota di volo e dall'angolo di *off-nadir*) ed alla lunghezza d'onda e inversamente proporzionale alla lunghezza fisica dell'antenna; in questo caso, non è possibile ottenere tipicamente una risoluzione particolarmente "spinta" in *azimuth* (nel caso di sensori radar ad apertura reale satellitari le risoluzioni sono dell'ordine delle decine di km), che risulta pertanto notevolmente peggiore anche della risoluzione in *range* (ordine dei m). Alla lunghezza d'onda delle microonde, non è quindi tipicamente consigliabile l'impiego del sistema RAR su piattaforme satellitari, se si desidera ottenere un'elevata risoluzione spaziale.

Un modo per superare questa limitazione consiste nell'utilizzare i sistemi Radar ad Apertura Sintetica (*Synthetic Aperture Radar*, SAR), che utilizzano il movimento dell'antenna lungo la linea di volo del satellite per migliorare la risoluzione spaziale nella direzione *azimuth*, lasciando invariata la risoluzione in *range* rispetto al RAR, senza aumentare le dimensioni dell'antenna fisica, utilizzando il concetto di "antenna sintetica". L'idea di fondo è che l'oggetto che stiamo osservando si trovi nel fascio d'antenna per un determinato tempo, e che il radar possa osservarlo più volte e da più posizioni diverse lungo la linea di volo. In sostanza, un'antenna di dimensioni contenute si sposta lungo la direzione di volo in una serie di posizioni successive, da ognuna delle quali l'antenna trasmette un impulso e riceve la sua eco di ritorno. L'antenna col suo movimento sintetizza quindi un array d'antenne (array sintetico), cioè un allineamento di antenne elementari di lunghezza L lungo la direzione di volo. Questo significa che attraverso il movimento e l'elaborazione del segnale viene "sintetizzata" un'apertura di antenna estremamente più grande di quella reale, Figura 2-6 (Franceschetti e Lanari, 1999).

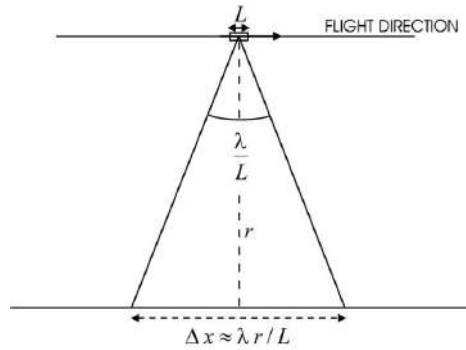


Figura 2-5 – Risoluzione in azimuth di un Radar ad Apertura Reale (RAR), da Franceschetti e Lanari, 1999.

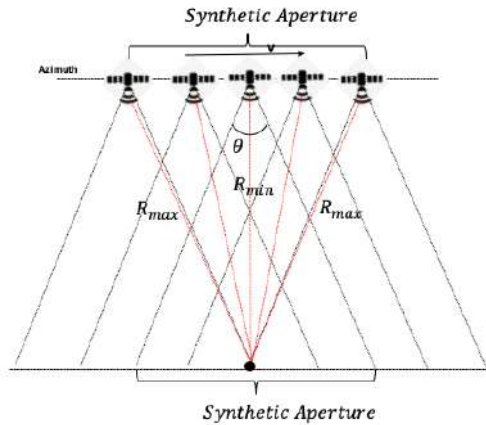


Figura 2-6 – Rappresentazione della apertura sintetica.

Si segnala che per quanto riguarda un sensore SAR gli echi retrodiffusi dalla scena sono registrati coerentemente, vale a dire in modulo e fase, e un sofisticato processo d'elaborazione effettuato sull'insieme degli echi ricevuti produrrà l'immagine SAR della superficie rilevata, la cui risoluzione in *azimuth* risulta essere pari a:

$$\Delta x = \frac{L}{2} \quad (3)$$

Si noti che nella equazione (3), rispetto alla (2), è scomparsa la dipendenza dalla lunghezza d'onda del segnale, ma soprattutto dalla distanza r del sensore dalla superficie osservata; inoltre l'equazione (2) va interpretata come segue: qualora diminuisse la lunghezza dell'antenna reale in *azimuth*, il suo fascio d'antenna si allargherebbe e quindi aumenterebbe l'estensione della apertura sintetica, consentendo pertanto di migliorare la corrispondente risoluzione spaziale.

L'aumento di risoluzione ottenibile con il SAR implica una imprescindibile fase di elaborazione del dato ricevuto. Tale fase, come anticipato, viene spesso denominata *Focalizzazione* (Franceschetti e Lanari, 1999) e conduce, a partire dal dato grezzo registrato dal sensore, alla generazione di un'immagine complessa detta Single Look Complex (SLC), Figura 2-7.

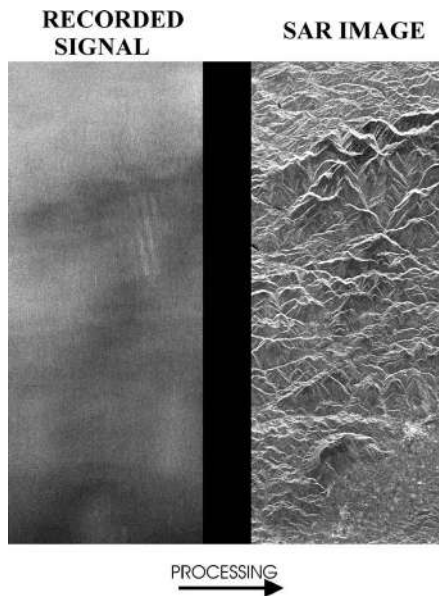


Figura 2-7 – Esempio di generazione a partire da un dato grezzo (recorded signal) di un'immagine SLC (SAR image).

Un'immagine SAR è quindi rappresentata in formato digitale, attraverso una matrice di $n \times m$ pixel in coordinate radar caratterizzati da un modulo o ampiezza E e da una fase φ , che contengono l'informazione legata ai segnali retrodiffusi dalla scena a terra (alternativamente i pixel possono essere rappresentati facendo riferimento, per ciascuno, alla parte reale e la parte immaginaria del segnale relativo all'immagine SAR). Il SAR, dunque, fornisce *immagini coerenti*: il modulo contiene informazioni sull'intensità del segnale retrodiffuso, legata alla riflettività della scena, e la fase, invece, dipende dalle caratteristiche geometriche ed elettromagnetiche della scena osservata e dalla distanza tra il sensore ed i target a terra.

In termini analitici, l'espressione di un'immagine complessa $\hat{\gamma}(x', r')$ è legata alle due coordinate generiche x' e r' , rispettivamente *azimuth* e *range*, che in prima approssimazione si può semplificare e scrivere (Franceschetti e Lanari, 1999):

$$\hat{\gamma}(x', r') \approx \gamma(x', r') \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(x', r') \right] \quad (4)$$

$\gamma(x', r')$ è la riflettività della scena, la quale è una quantità complessa che caratterizza la risposta elettromagnetica della scena alla illuminazione radar e la cui ampiezza rappresenta l'informazione tipicamente utilizzata per visualizzare, in formato bidimensionale, le immagini SAR.

Il termine $\frac{4\pi}{\lambda} r(x', r')$ dell'equazione (4) rappresenta la componente dell'informazione di fase che è direttamente proporzionale al valore di r . Quest'informazione è utilizzata per la generazione di prodotti chiamati interferogrammi, che saranno meglio descritti più avanti, di fondamentale importanza per lo studio delle modifiche, in termini di spostamento, avvenute tra due immagini relative ad una zona d'interesse.

Nell'ampiezza delle immagini SAR, rappresentate mediante livelli di grigio, troviamo aree più chiare e più scure: maggiore è il livello di luminosità, maggiore è la capacità di riflettere l'impulso proveniente dal radar, da parte dei diversi target nella scena osservata, e quindi l'ampiezza della riflettività.

Questa proprietà dipende da molti fattori, quali ad esempio le caratteristiche della geometria di osservazione e quelle dei segnali trasmessi. Molto rilevanti sono però anche le caratteristiche fisiche e geometriche della scena illuminata; infatti, tanto più rugosa è la superficie, tanto più l'immagine apparirà con un maggiore livello di luminosità. Superfici piate, come strade ed autostrade, hanno invece una bassissima retrodiffusione, e sono

nettamente distinguibili nell'immagine radar, perché appaiono molto scure. La vegetazione normalmente è abbastanza scabra ed appare tipicamente uniformemente grigia; superfici inclinate verso il sensore, come ad esempio le pareti di montagne, mostrano una maggiore retrodiffusione rispetto alle superfici con pendenze in direzione opposta al radar, e nelle immagini sono molto chiare. Per quanto riguarda le costruzioni, gli edifici e le strade di città, il segnale emesso dal radar spesso ha la possibilità di essere riflesso più volte, e di tornare indietro poco indebolito, per cui questa forte retrodiffusione fa in modo che l'immagine risulti molto chiara, in presenza di queste superfici (Figura 2-8).

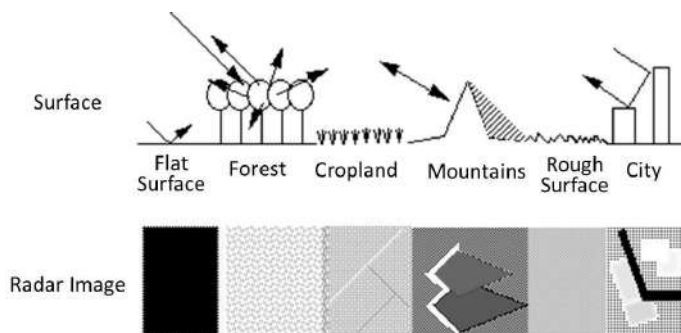


Figura 2-8 – Esempi di riflettività della scena osservata.

Risulta pertanto evidente da quanto detto che, in generale, quando si visualizza un'immagine SAR essa risulta differente, anche geometricamente, da una omologa immagine ottica. Nell'interpretazione delle immagini ottenute mediante sensori SAR, è perciò estremamente importante comprendere gli effetti che tale sistema introduce e che lo differenziano, in modo sostanziale, dai più familiari sistemi ottici. In molte applicazioni, infatti, le immagini SAR sono caratterizzate da alcune distorsioni geometriche, dovute al fatto che l'antenna non “guarda” la scena verticalmente, ma lateralmente rispetto al nadir. Tali distorsioni devono quindi essere tenute nel dovuto conto quando si effettua l'interpretazione di una immagine radar. Un primo effetto è ben descritto in Figura 2-9 nella quale ancora una volta la scala delle altezze è deformata per esaltare l'angolo di apertura del sensore radar di cui alla Figura 2-4. In particolare, in Figura 2-9 è mostrata, a parità di risoluzione (o equivalentemente della dimensione del pixel) in *slant range* (Δr), la variazione nel passaggio dal *near* al *far range* della risoluzione in *ground range* (Δy), anche in assenza di topografia: si osserva chiaramente che la proiezione a terra Δy è maggiore nel caso di punti prossimi al *near range*, minore nel caso in cui si operi nell'intorno del *far range*, essendo quindi la risoluzione generalmente peggiore in *near range* rispetto al *far range* (Franceschetti e Lanari, 1999).

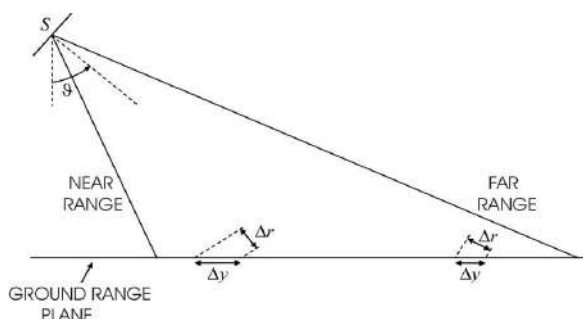


Figura 2-9 – Configurazione geometrica del sistema SAR: variazione della geometria *slant range* (Δr) e *ground range* (Δy) (Franceschetti e Lanari, 1999).

Un'ulteriore sorgente di distorsione è costituita dalla morfologia e dalla pendenza del terreno che generano sul piano $AZ - RG$ delle deformazioni prospettiche comunemente denominate *foreshortening*, *layover* e *shadowing*, rappresentate schematicamente in Figura 2-10 e qui di seguito brevemente descritte (Franceschetti e Lanari, 1999):

- *Foreshortening*:
corrisponde in generale ad un effetto di dilatazione o di compressione del pixel (o, equivalentemente, della dimensione della cella di risoluzione), a seconda che si abbia la pendenza del terreno α maggiore o minore di 0° misurata rispetto al piano orizzontale, come schematizzato in Figura 2-10a; oltre a questo effetto si può osservare anche una maggiore luminosità dei pixel compressi in quanto l'energia del segnale di ritorno è molto elevata, essendo legata al contributo di un grande numero di oggetti riflettenti. Man mano che la pendenza α si avvicina a θ , ossia il terreno diventa perpendicolare alla LOS (definito in letteratura anche come limite di *layover*), la distanza compressa si riduce sempre di più e la luminosità aumenta sempre di più. Questo effetto è particolarmente evidente nelle immagini SAR di zone montuose in cui si vede il versante esposto alla vista del satellite molto compresso e luminoso, Figura 2-11.
- *Layover*:
rappresenta un caso estremo di *foreshortening* ed avviene nelle zone in cui la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo θ ; considerando ad esempio la montagna schematizzata in Figura 2-10b, la parte più in alto (punto b) si trova ad essere più vicina al satellite e quindi viene rappresentata in coordinate radar in una posizione errata, ossia rovesciata in *slant range* rispetto alla parte più in basso (punto a). Pertanto, l'ordine di apparizione degli elementi nell'immagine radar è opposto all'ordine reale a terra.
- *Shadowing*:
alcune zone non vengono illuminate dall'impulso *emesso* dal radar, in quanto schermate da altre zone (sono cioè in "ombra"), Figura 2-10c.

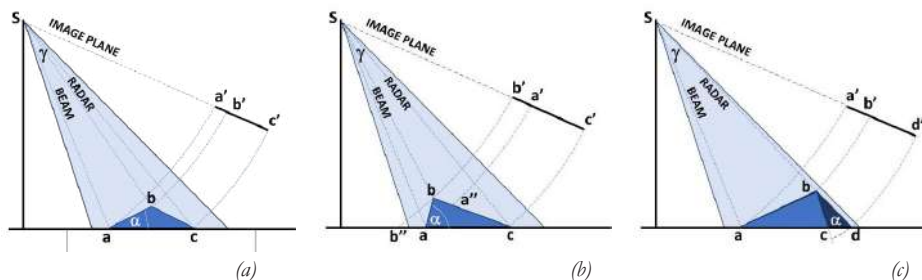


Figura 2-10 – Deformazioni geometriche legate alla conformazione altimetrica del terreno (a) *Foreshortening*; (b) *Layover*; (c) *Shadowing*. Ripresa e modificata da (Olmsted, 1993).

Si sottolinea che gli effetti delle distorsioni geometriche nelle immagini SAR cambiano però notevolmente a seconda dell'angolo di vista θ al quale il sensore satellitare opera. Un esempio a tal riguardo è riportato in Figura 2-12, dove sono raffigurate due immagini SAR relative alla stessa scena a terra (Monte Etna) ma acquisite da sensori satellitari con angoli di vista (*look angle*) differenti, rispettivamente 23° (Figura 2-12a) e 40° (Figura 2-12b). Una presentazione sintetica delle diverse tipologie di sensore SAR satellitari maggiormente utilizzati è riportata nel successivo paragrafo 2.3.

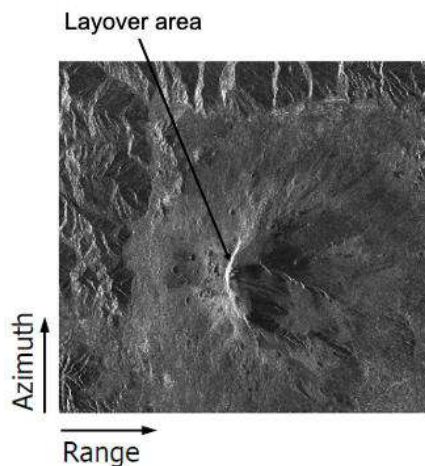


Figura 2-11 – Immagine SAR da satellite ERS (orbita ascendente) del monte Etna. La direzione slant range è orizzontale e il sensore radar riprende la scena volando a sinistra dal basso verso l'alto lungo la direzione di azimuth e acquisisce l'immagine da near range (sinistra) a far range (destra).

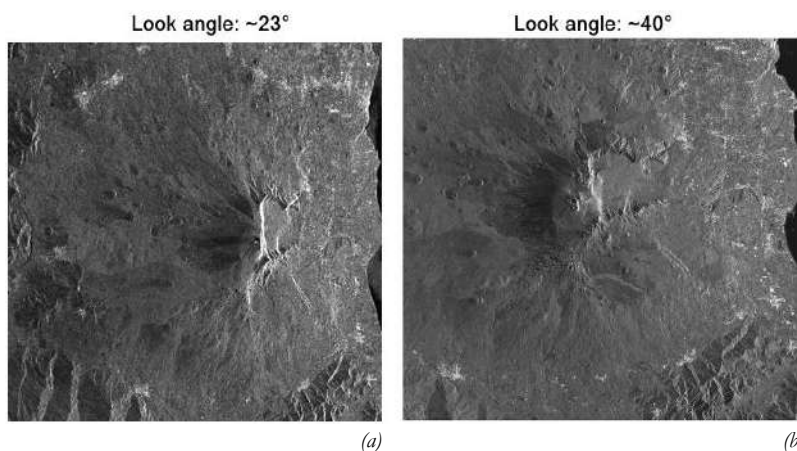


Figura 2-12 – Effetti dei diversi angoli di vista delle immagini SAR nelle distorsioni geometriche: (a) Angolo di vista di 23°; (b) Angolo di vista di 40°.

2.3 SATELLITI E SENSORI DISPONIBILI

Nel corso degli ultimi trent'anni il panorama dei satelliti per l'OT si è arricchito di numerosi sensori dotati di caratteristiche diverse in termini di risoluzioni spaziali, lunghezze d'onda, tempi di rivisitazione, copertura spaziale, ecc. In Figura 2-13 è riportata un'immagine che mostra in forma schematica i sensori che hanno operato e/o continuano ad essere operativi a partire dal 1991, con una macro-classificazione rispetto all'estensione dell'area illuminata a terra (*swath*) ed ai tempi di rivisitazione.

Nel seguito si descrivono brevemente le principali caratteristiche dei sensori SAR ampiamente utilizzati attualmente per analisi interferometriche (discusse nel seguito, si veda paragrafo 2.4): i satelliti ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT, sviluppati dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA), la costellazione COSMO-SkyMed di prima generazione (CSK) e di seconda generazione (CSG), sviluppata dall'Agenzia Spaziale Italiana in cooperazione con il Ministero della

Difesa, e la costellazione Sentinel-1 (S-1), sviluppata dall'Agenzia Spaziale Europea nell'ambito del Programma Europeo Copernicus.

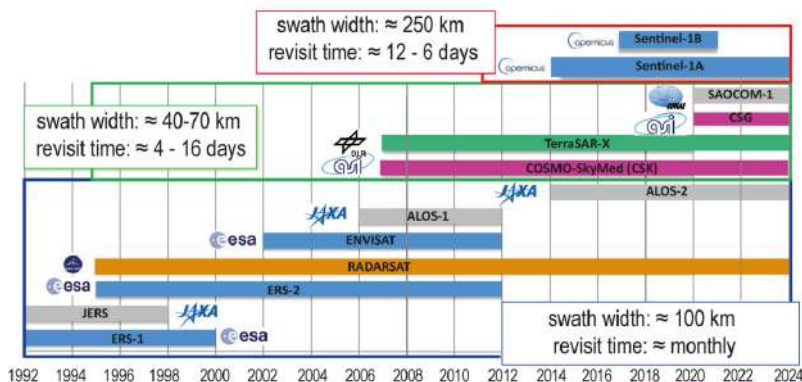


Figura 2-13 – Principali sensori SAR satellitari che hanno operato a partire dal 1991 e/o continuano ad essere operativi.

2.3.1 ERS-1/2 ed ENVISAT

I tre satelliti ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT sono stati sviluppati dall'ESA. Il primo dei tre, ERS-1 (*European Remote Sensing satellite*), ha operato dal 17 luglio 1991 al 10 marzo 2000, superando ampiamente il tempo di vita previsto. ERS-1 trasportava una schiera di strumenti per l'osservazione di diversi parametri ambientali della Terra (acqua, terra, ghiaccio e atmosfera), tra i quali un sensore SAR, operante in banda C (lunghezza d'onda pari a 5.6 cm), che acquisiva immagini con un tempo di rivisitazione sulla stessa area a terra pari a 35 giorni.

Il 21 aprile 1995 ESA ha lanciato in orbita un secondo satellite, ERS-2, gemello del primo, che ha operato fino al 5 settembre 2011. ERS-2 condivideva la stessa orbita (quasi) polare di ERS-1, ma con uno sfasamento temporale di 24 ore; in questo modo la stessa scena a terra veniva osservata a distanza di un giorno dai due satelliti ed ogni 35 giorni dal singolo satellite.

Successivamente, ESA ha sviluppato e messo in orbita un terzo satellite, ENVISAT (Environmental Satellite), che, come i suoi predecessori ERS-1 ed ERS-2, era caratterizzato, tra i vari strumenti di misura montati a bordo, da un sensore SAR operante in banda C (lunghezza d'onda pari a 5.6 cm) e da un tempo di rivisitazione pari a 35 giorni. ENVISAT ha operato dal 1° marzo 2002 all'8 aprile 2012. In Figura 2-14 è mostrato uno schema semplificato dell'intervallo di rivisitazione dei sensori ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT.

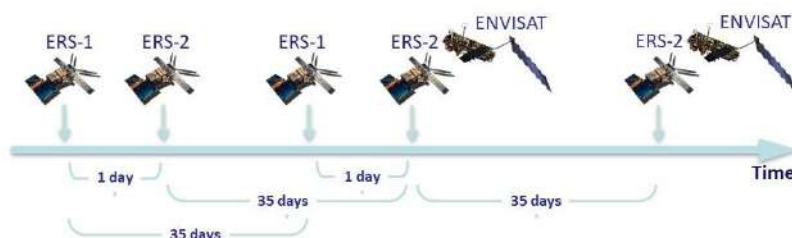


Figura 2-14 – Tempi di rivisitazione dei satelliti ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT.

In generale, i tre satelliti dell'ESA acquisivano primariamente in modalità *Stripmap* con una risoluzione spaziale di circa 5 m lungo la direzione *azimuth* e circa 20 m in ground range. L'area illuminata a terra aveva un'estensione di circa 100 km lungo il *range* ed i dati venivano acquisiti lungo orbite (*track*) sia ascendenti, sia discendenti. Per soli

fini di disseminazione e fruizione, ciascun *track* veniva suddiviso in porzioni (*frame*) di pari dimensioni, in modo tale da avere per ogni frame un'area a terra di circa 100km x 100km.

2.3.2 Costellazione COSMO-SkyMed

La costellazione COSMO-SkyMed (*Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation*, spesso chiamata CSK), sviluppata da ASI in cooperazione con il Ministero della Difesa, è la prima missione di OT concepita per scopi duali, civili e militari.

La costellazione, originariamente costituita da 4 satelliti identici, dotati di un sensore SAR operante in banda X (lunghezza d'onda pari a 3.1 cm), è stata realizzata in forma graduale: il primo satellite è stato lanciato il 7 Giugno 2007, il secondo il 9 dicembre dello stesso anno; il terzo satellite è partito il 25 ottobre del 2008, il quarto il 5 novembre 2010. I satelliti COSMO-SkyMed sono attualmente tutti operativi ad eccezione del terzo (denominato CSK3), il quale, dopo una procedura di *deorbiting* iniziata a Maggio 2022, è stato spento definitivamente nel mese di Ottobre 2022. In ogni caso, con l'approssimarsi del limite di vita operativa dei 4 satelliti COSMO-SkyMed di prima generazione (CSK), a dicembre 2019 e gennaio 2022 sono stati lanciati in orbita i primi due dei quattro satelliti della costellazione COSMO-SkyMed di seconda generazione (denominata CSG), destinata a garantire l'operatività con gli attuali satelliti CSK. Grazie a questi nuovi sensori, è possibile andare in continuità con il programma CSK, ottenendo anche un miglioramento in termini di qualità delle immagini e delle funzionalità operative.

L'intervallo di rivisitazione per ciascun satellite della costellazione CSK e CSG è pari a 16 giorni; lo sfasamento temporale tra i satelliti è tale da consentire, in condizioni di piena operatività dei quattro satelliti CSK di prima generazione, di osservare la stessa scena a terra mediamente ogni quattro giorni. In Figura 2-15 è riportato uno schema semplificato dello scenario relativo ai tempi di rivisitazione dell'intera costellazione CSK (operante a partire dal 2007) e dell'attuale costellazione CSG (operativa dal 2019).

I satelliti CSK e CSG sono stati progettati per acquisire in diverse modalità; le più utilizzate sono: *Stripmap* HIMAGE, caratterizzata da una risoluzione spaziale di circa 3m x 3m (lungo la direzione *azimuth* e *range*) e *swath* di circa 40 km lungo il *range*; *Spotlight*, con una risoluzione spaziale inferiore ad 1 m e con uno *swath* di circa 10 km x 10 km (lungo il *range* e l'*azimuth*).

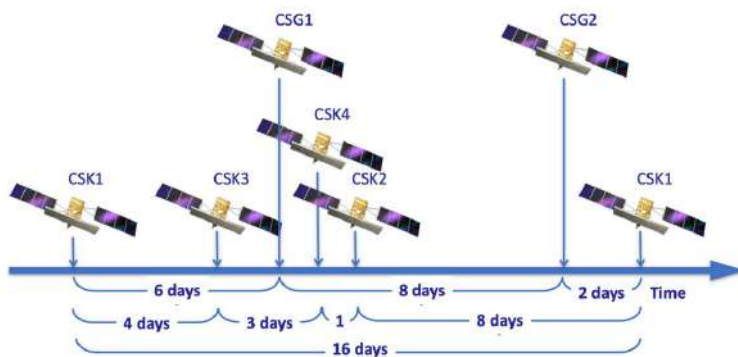


Figura 2-15– Tempi di rivisitazione dei satelliti della costellazione COSMO-SkyMed di prima generazione (CSK) e di seconda generazione (CSG). Si ricorda che a partire da Ottobre 2022 il satellite CSK3 non è più operativo.

Si segnala infine che dal 2009 è attivo il programma *Map Italy*, un piano di acquisizione sistematica dei dati CSK e CSG nella modalità *Stripmap* HIMAGE, relativi all'intero territorio italiano, che è stato definito dall'ASI e dal Dipartimento della Protezione Civile e viene implementato con il supporto della società e-GEOS. L'archivio *Map Italy* rappresenta oramai un elemento assolutamente unico per la gestione di emergenze e per il monitoraggio del territorio nazionale.

2.3.3 Costellazione Sentinel-1

La costellazione Sentinel-1 inizialmente era costituita da 2 satelliti operanti anch'essi lungo orbite (quasi) polari con installato a bordo di ciascuno un sensore SAR operante in banda C (lunghezza d'onda pari a 5.56 cm). Il primo satellite, Sentinel-1A (S-1A) è stato messo in orbita il 3 aprile del 2014; il secondo satellite, Sentinel-1B (S-1B), gemello del primo, è stato lanciato il 25 aprile 2016 ma sfortunatamente, a causa di un problema al sistema di alimentazione elettronica dei suoi strumenti radar, non è più operativo a partire da Dicembre 2021. L'intervallo di rivisitazione sulla stessa scena è pari a 12 giorni per il singolo satellite della costellazione; tale intervallo era sceso a 6 giorni con la piena operatività del secondo satellite, ossia dal 2016 al 2021, ma a partire da tale data non abbiamo più potuto beneficiare di immagini acquisite da Sentinel-1B. Al momento, Sentinel-1A rimane pienamente operativo (con tempi di rivisita di 12 giorni) e sono in vigore piani per il lancio di un nuovo satellite denominato Sentinel-1C (presumibilmente nel 2024), che opererà in continuità con l'attuale Sentinel-1A. La Figura 2-16 illustra in maniera schematica l'intervallo di rivisitazione dell'intera costellazione.

I satelliti della costellazione Sentinel-1 sono stati progettati per acquisire sulle terre emerse in modalità TOPS (*Terrain Observation by Progressive Scans*), che permette di collezionare immagini nella modalità di acquisizione *Interferometric Wide Swath* (IWS), con una risoluzione spaziale di circa 15 m lungo l'azimut e circa 4 m lungo la direzione range. L'area illuminata al suolo (*slice*) ha un'estensione di circa 200 km (lungo l'*azimut*) x 250 km (lungo il *range*).

La costellazione Sentinel-1 acquisisce in modalità programmata con l'obiettivo di generare robusti archivi di immagini su estese porzioni di superficie terrestre per programmi di monitoraggio a lungo termine; inoltre, opera con una politica di accesso ai dati completamente *free&open*, consentendo in tal modo la costituzione (ed il relativo accesso) di un vastissimo archivio di dati SAR (<https://scihub.copernicus.eu/>).

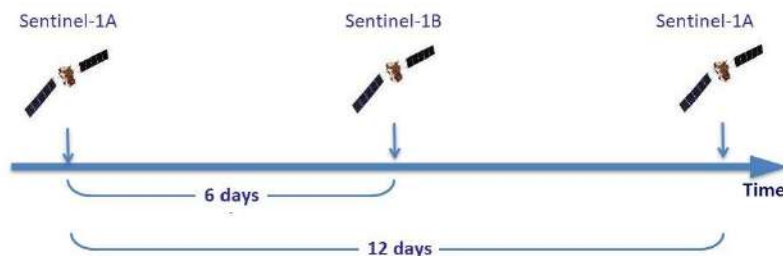


Figura 2-16 – Tempi di rivisitazione dei satelliti della costellazione Sentinel-1. Si ricorda che a partire da Dicembre 2021 Sentinel-1B non è più operativo.

2.4 INTERFEROMETRIA SAR DIFFERENZIALE DA SATELLITE

2.4.1 Principi di base

L'Interferometria SAR differenziale (DInSAR, *Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry*) è una tecnica di telerilevamento alle microonde che consente di estrarre informazioni sullo spostamento degli elementi presenti sulla superficie terrestre e/o della superficie terrestre stessa (Rosen et al., 2000) (Figura 2-17). La tecnica DInSAR, sfruttando la differenza di fase tra due immagini SAR, acquisite dal satellite sulla stessa area in tempi diversi (ed eventualmente anche da due posizioni orbitali leggermente diverse), dopo la rimozione della topografia media della scena a terra ricavata da un modello digitale del terreno (DEM o DTM, si veda paragrafo 2.7), consente di ricavare la misura della componente dello spostamento, in termini di avvicinamento o allontanamento dal sensore e proiettata lungo la linea di vista del sensore. Il tempo intercorso tra le due acquisizioni viene definito *baseline temporale*, la distanza tra le due posizioni lungo l'orbita del satellite durante le due acquisizioni prende il nome di *baseline spaziale* (che è nulla qualora il satellite riesca a descrivere esattamente la stessa orbita nei due passaggi). Una delle due immagini viene scelta come riferimento e prende il nome di *master* (tipicamente corrisponde all'immagine

acquisita prima nel tempo), mentre l'altra viene denominata *slave*. La differenza di fase (o fase interferometrica) misurata è intesa come variazione della fase dell'immagine *slave* rispetto all'immagine *master* di riferimento. Inoltre, le misure di spostamento ricavabili dall'analisi interferometrica sono di tipo differenziale sia nel tempo sia nello spazio. Infatti, gli eventuali spostamenti misurati sono calcolati rispetto alla data dell'immagine *master* (*Reference Date*) e rispetto ad un pixel (*Reference Point*), scelto in una zona ritenuta stabile o di deformazione nota.

La differenza di fase $\Delta\varphi$ tra due immagini SAR dà luogo al cosiddetto *interferogramma* o *frange interferometriche*:

$$\Delta\varphi(x', r') = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r(x', r') + \Delta\varphi^{\text{rumore}}(x', r') \quad (5)$$

dove λ è la lunghezza d'onda del segnale trasmesso/ricevuto, e per ogni pixel (x', r') , Δr rappresenta la differenza di distanza sensore-bersaglio tra la prima e la seconda immagine e $\Delta\varphi^{\text{rumore}}$ è il segnale del rumore.

Si segnala altresì che da ora in poi si ometteranno, al fine di semplificare le notazioni usate, le generiche coordinate (x', r') del pixel. L'interferogramma è un'immagine bidimensionale nel piano *range* e *azimuth* rappresentato con una serie di frange (in quanto la fase interferometrica è arrotondata, cosiddetta *wrapped phase*), i cui valori sono compresi fra $-\pi$ e $+\pi$.

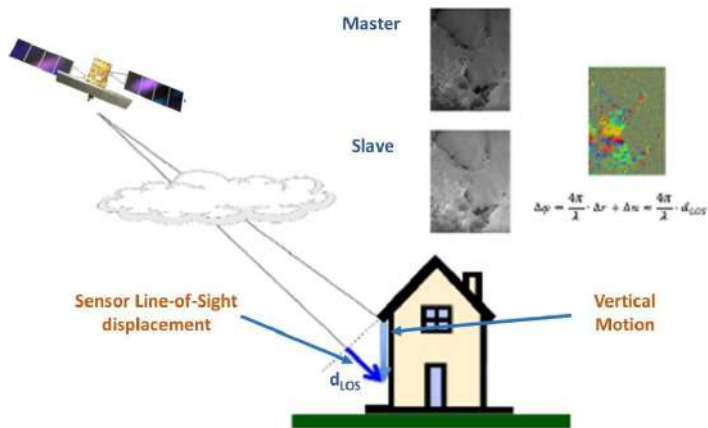


Figura 2-17 – Schema relativo al principio base dell'Interferometria.

In Figura 2-18 è riportato un esempio di interferogramma, ottenuto considerando due immagini SAR acquisite dai sensori della costellazione CSK il 4 ed il 12 aprile 2009 lungo orbite ascendenti; tale interferogramma mostra la presenza di numerose frange interferometriche che rivelano le deformazioni superficiali co-sismiche associate al terremoto che ha colpito la città de L'Aquila il 6 aprile 2009. A ciascuna frangia corrisponde un ciclo completo di fase (pari a 2π), identificato da un'escursione completa della scala di colori (da rosso a viola).

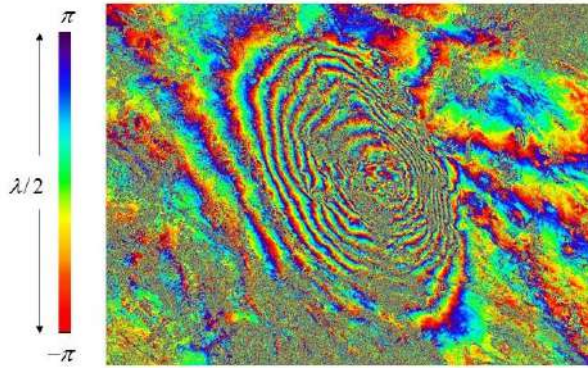


Figura 2-18 – Interferogramma co-sismico relativo al terremoto che ha colpito la città di L'Aquila il 6 aprile 2009 ed ottenuto con immagini SAR COSMO-SkyMed acquisite il 4 ed il 12 aprile 2009 lungo orbite ascendenti.

In Figura 2-19 è riportato il classico esempio di scenario DInSAR, nel piano ortogonale alla direzione *azimuth*, in cui tra i due passaggi del sensore, avvenuti agli istanti t_1 e t_2 e da posizioni leggermente diverse (baseline spaziale b tra le immagini SAR1 e SAR2) si è verificato uno spostamento superficiale la cui proiezione lungo la linea di vista del sensore è pari a d_{LOS} .

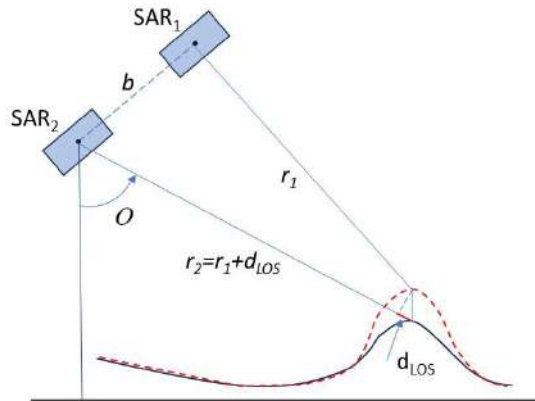


Figura 2-19 – Scenario DInSAR nel piano ortogonale alla direzione di volo (*azimuth*). SAR₁ e SAR₂ indicano la posizione del sensore SAR nei due passaggi avvenuti negli istanti di tempo t_1 e t_2 , e tra i quali si verifica una deformazione del suolo (linea rossa tratteggiata). r_1 ed r_2 indicano la distanza sensore-bersaglio rispettivamente agli istanti t_1 e t_2 , θ l'angolo di vista del sensore, b la distanza tra le due orbite (baseline spaziale) lungo cui avvengono le due acquisizioni e d_{LOS} (linea rossa continua) lo spostamento avvenuto, nell'intervallo di tempo t_1 - t_2 (baseline temporale) e misurato lungo la linea di vista del sensore.

L'espressione della differenza di fase $\Delta\varphi$ riportata nell'equazione (5) può essere scomposta nelle sue principali componenti. Infatti, $\Delta\varphi$ è la somma di diversi contributi di fase e può essere espressa come segue:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi^{\text{spostamento}} + \Delta\varphi^{\text{topografia}} + \Delta\varphi^{\text{atmosfera}} + \Delta\varphi^{\text{res_orbite}} + \Delta\varphi^{\text{rumore}} \quad (6)$$

dove $\Delta\varphi^{\text{spostamento}}$ è il segnale di deformazione corrispondente allo spostamento avvenuto tra le due acquisizioni SAR; $\Delta\varphi^{\text{topografia}}$ è il segnale di topografia residua della scena osservata rispetto a un sistema di riferimento globale e dipende dalla baseline dell'interferogramma e dalla quota del punto; $\Delta\varphi^{\text{atmosfera}}$ è il segnale dovuto a

possibili disomogeneità atmosferiche tra le due acquisizioni SAR che introducono ritardi spuri nel segnale; $\Delta\varphi^{res_orbite}$ rappresenta i residui di fase dovuti all'inaccurata conoscenza delle orbite descritte dal satellite durante le acquisizioni; ed, infine, $\Delta\varphi^{rumore}$ è il segnale legato al rumore di decorrelazione, e.g. decorrelazione spaziale, causata da una eccessiva distanza - baseline spaziale - tra le orbite percorse dal satellite durante le due acquisizioni; decorrelazione temporale, causata dal cambiamento delle proprietà elettromagnetiche della scena a terra (ad esempio per effetto di eventi meteorologici che hanno modificato le caratteristiche della scena tra i due passaggi - una nevicata, il passaggio di una nuvola - ovvero per effetto di altre modifiche della scena, quali un campo che viene arato, l'effetto di un incendio) soprattutto nel caso di acquisizioni lontane tra loro nel tempo.

A causa del fatto che in orbite successive il satellite non ripercorre esattamente la stessa traiettoria sull'orbita, la differenza di fase legata alla distanza satellite - sensore $\Delta\varphi$ contiene informazioni sia sullo spostamento degli oggetti a terra sia sulla topografia dell'area (Burgmann et al., 2000). Tenendo conto della distanza tra le orbite effettivamente percorse dal satellite durante l'acquisizione delle immagini (baseline perpendicolare), la fase topografica è calcolata per ogni punto della griglia di riferimento SAR a partire dalla distanza sensore-target tra le due immagini, stimata sfruttando la conoscenza di precise informazioni orbitali e di un accurato Modello Digitale del Terreno (DEM) esterno.

La componente di fase associata allo spostamento dei punti della scena a terra $\Delta\varphi^{spostamento}$ è ricavata attraverso la rimozione di questo contributo di fase associato alla topografia media della scena (cosiddetto "interferogramma sintetico") dalla fase originaria della coppia interferometrica, eq. (6). Il risultato di questa rimozione porta alla generazione di quello che genericamente viene chiamato "interferogramma differenziale", ossia un interferogramma arrotolato dove l'informazione di ciascun punto è principalmente legata allo spostamento avvenuto nell'intervallo di tempo tra le due acquisizioni.

A partire dall'interferogramma differenziale, supponendo di non avere residui di fase topografica e di poter trascurare, sotto opportune considerazioni, i contributi di fase dovuti all'atmosfera, agli errori orbitali e al rumore, la differenza di fase misurata $\Delta\varphi$ è costituita dal solo contributo $\Delta\varphi^{spostamento}$ legato alla variazione della distanza tra sensore e bersaglio Δr associata allo spostamento dei punti nell'intervallo di tempo tra le due immagini, misurata lungo la LOS del sensore, e può essere ragionevolmente espressa come:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi^{spostamento} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \cdot d_{los} \quad (7)$$

Invertendo la relazione (7) si può ottenere la misura dello spostamento avvenuto lungo la LOS d_{LOS} :

$$d_{LOS} \approx \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

Dall'equazione (8) discende che ad una variazione di fase di 2π (ossia un'intera frangia interferometrica) corrisponde uno spostamento lungo la LOS di $\lambda/2$. Inoltre, si osserva che lo spostamento che si vuole misurare risulta essere direttamente collegato alla fase interferometrica, di cui, però, se ne conosce originariamente solo una determinazione principale (i valori di fase appartengono all'intervallo $]-\pi, \pi[$). Pertanto, è necessaria un'operazione detta di srotolamento della fase (*Phase Unwrapping*), applicata alla fase interferometrica calcolata direttamente dalle coppie di immagini SAR, che consente di recuperare la variazione di fase assoluta (passando dalle cosiddette fasi "arrotolate" alle fasi "srotolate"). L'accuratezza con cui è possibile misurare gli spostamenti superficiali è pari ad una frazione della lunghezza d'onda alla quale opera il sensore SAR; lavorando nel campo delle microonde (lunghezze d'onda tipicamente di alcuni cm) è, pertanto, possibile raggiungere accuratissime anche di pochi millimetri.

Grazie alla capacità di generare mappe degli spostamenti del suolo ad elevata densità spaziale e con costi relativamente limitati, l'Interferometria SAR è stata applicata con successo per misurare una larga varietà di processi naturali ed antropici, come eventi sismici, instabilità (*unrest*) vulcaniche, frane sismo-indotte e fenomeni di subsidenza. Nonostante ciò, una grande limitazione della tecnica DInSAR "convenzionale", basata sull'analisi di singoli interferogrammi, è dovuta all'accuratezza con la quale è possibile separare efficacemente il contributo di fase legato alla deformazione della scena a terra da quelli legati agli errori del DEM utilizzato per la compensazione

della fase topografica, agli errori dovuti all'inaccuratezza delle informazioni orbitali e alle variazioni delle condizioni atmosferiche tra le acquisizioni, difficili da compensare in assenza di modelli atmosferici affidabili.

Inoltre, la qualità dei risultati è intrinsecamente limitata, a volte del tutto compromessa, in relazione alle sorgenti rumorose (intrinseche agli interferogrammi stessi) legate alle caratteristiche geometriche tipiche della configurazione DInSAR (decorrelazione spaziale), ed ai cambiamenti delle caratteristiche elettromagnetiche (riflettività) dei target a terra nell'intervallo di tempo di osservazione del fenomeno (decorrelazione temporale). La presenza di neve e di zone vegetate o i cambiamenti climatici e meteorologici sono tutte cause di fenomeni di decorrelazione temporale, i cui effetti sono ridotti in presenza di centri urbani e rocce esposte, caratterizzati da una risposta del segnale radar costante nel tempo, e diminuiscono utilizzando lunghezze d'onda più grandi (ad esempio banda L invece di banda X (Tabella 2-1). Un altro fattore che limita fortemente l'applicabilità della tecnica Interferometria SAR per lo studio delle deformazioni superficiali è legato alla presenza delle distorsioni geometriche discusse nel paragrafo 2.2, che possono inficiare significativamente la qualità degli interferogrammi generati.

Tabella 2-1. *Larghezze di Bande utilizzate dai sistemi radar (standard IEEE)*

Bande dei sistemi radar	Intervallo di frequenze [GHz]	Intervallo di lunghezze d'onda [cm]
Banda L	1-2	30-15
Banda C	4-8	7.5-3.75
Banda X	8-12	3.75-2.4

2.4.2 Lo srotolamento della fase interferometrica

Lo srotolamento della fase interferometrica o *Phase Unwrapping* (PhU) è un problema oggetto di studio in varie discipline e rappresenta uno dei punti di maggiore criticità nel trattamento del dato SAR interferometrico. In particolare, il PhU consiste in una serie di operazioni finalizzate alla ricostruzione della fase assoluta φ , associata nell'ambito DInSAR allo spostamento avvenuto nell'intervallo temporale tra le due acquisizioni SAR analizzate, a partire dalla fase interferometrica differenziale misurata φ_m (spesso rappresentata anche usando il simbolo $\langle \varphi \rangle_w$); quest'ultima viene anche spesso definita "fase arrotolata" perché è ristretta all'intervallo $]-\pi, \pi]$, come mostrato pittoricamente nel caso monodimensionale di un segnale campionato assunto con variazione lineare, presentato in Figura 2-20. Pertanto, l'obiettivo del PhU è quello di ricavare il numero intero di multipli di 2π da sommare alla fase arrotolata φ_m per ricostruire la fase assoluta φ .

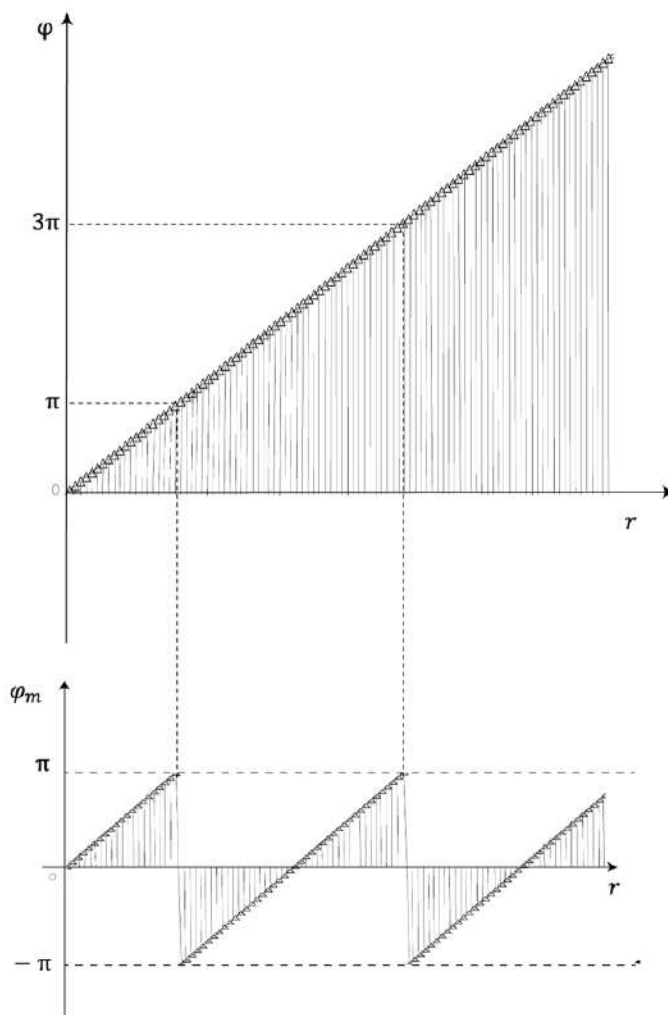


Figura 2-20 – Esempio di confronto tra la fase assoluta φ di un segnale campionato, che viene assunto con variazione lineare, e la sua versione “arrotondata” (misurata) φ_m ; per semplicità viene mostrato il caso di un segnale monodimensionale, i cui campioni sono stati evidenziati per renderne più immediata l'individuazione.

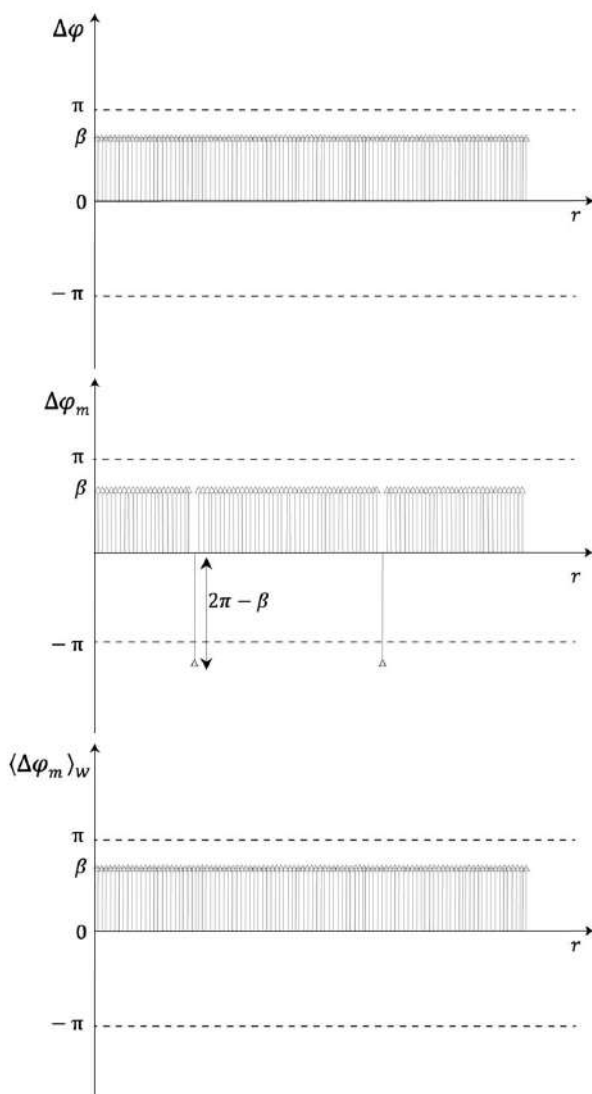


Figura 2-21 –Esempio di ricostruzione della variazione della fase assoluta $\Delta\varphi$ del segnale campionato mostrato in Figura 2-20, a partire dalla variazione della sua fase “arrotondata” (misurata) $\Delta\varphi_m$.

Tipicamente, l'operazione di PhU si basa, nell'ambito DInSAR, sull'assunzione che tra pixel coerenti adiacenti la variazione di fase assoluta $\Delta\varphi$ non ecceda, in modulo, il valore π , e può quindi essere stimata direttamente dalla variazione della fase misurata $\Delta\varphi_m$, ristretta nell'intervallo $]-\pi, \pi]$, come mostrato pittoricamente in Figura 2-21 (Fornaro et al., 1996; Fornaro et al., 1997). Una volta stimato il gradiente della fase assoluta, quest'ultima può essere ricostruita grazie alla integrazione della stima del suo gradiente; ciò però vale a meno di un valore costante della fase che è relativo al pixel a partire dal quale si effettua l'integrazione, denominato tipicamente *Reference Point* (paragrafo 2.4). Quanto detto vale però solo nel caso ideale in cui siano assenti variazioni spaziali della fase molto

rapide ed effetti legati al rumore (decorrelazione) del segnale di fase, perchè in tal caso le frange interferometriche si presentano tutte molto ben distinte e quindi risulta valida l'assunzione suddetta, secondo cui la variazione di fase assoluta tra pixel adiacenti è inferiore, in modulo, a π . Purtroppo, però, nei casi reali, a causa di rapide variazioni spaziali della fase interferometrica e/o della presenza di rumore negli interferogrammi caratterizzati da bassi valori di coerenza, il problema del PhU può risultare notevolmente complicato. Pertanto, sono numerosi gli algoritmi che sono stati proposti per mitigare tali criticità. Essi risultano basati su strategie, sia globali sia locali, di stima ed integrazione delle variazioni di fase rilevate a partire dalla fase arrotondata (Fornaro et al., 1997, Ghiglia, and Romero, 1994). Uno di questi algoritmi, che risulta particolarmente diffuso, è basato su un approccio denominato di Minimizzazione del Flusso di Costo, in inglese Minimum Cost Flow (MCF) (Costantini et al., 1998). In tal caso vengono esclusi dall'operazione di PhU i pixel dell'interferogramma analizzato che sono caratterizzati da bassi valori di coerenza; pertanto, tale approccio opera solo sui punti relativi alla griglia sparsa dei pixel con elevati valori di coerenza (quindi con valori di fase che possono essere ritenuti particolarmente affidabili), che vengono connessi tra loro tramite una rete spaziale a maglia triangolare, costruita applicando una triangolazione di Delaunay (Figura 2-22). In tal caso la soluzione viene ottenuta sfruttando l'analogia tra il problema del PhU e quello della minimizzazione di un flusso di costo di una rete che schematizza la triangolazione suddetta. Esistono, inoltre, approcci avanzati basati sull'algoritmo MCF, denominati Extended Minimum Cost Flow (Pepe and Lanari, 2006), che permettono di estendere tale approccio di PhU a sequenze multi-temporali di interferogrammi DInSAR, come nel caso dell'algoritmo mostrato in (Pepe and Lanari, 2006). Tale soluzione è particolarmente appropriata per quanto riguarda la tecnica denominata SBAS, acronimo di *Small Baseline Subset*, uno degli approcci DInSAR multi-temporali maggiormente diffusi, i quali vengono descritti brevemente nel paragrafo successivo.

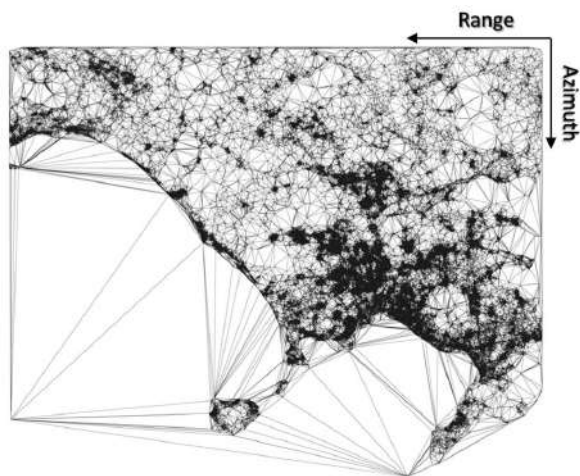


Figura 2-22 – Esempio di rete spaziale a maglia triangolare (nella griglia azimuth e range), generata applicando una triangolazione di Delaunay.

2.5 PRINCIPALI TECNICHE DInSAR MULTI-TEMPORALI

Per superare le limitazioni della tecnica DInSAR “convenzionale”, l'interesse della comunità scientifica si è concentrato sempre più verso lo sviluppo di tecniche DInSAR avanzate multi-temporali, capaci di fornire informazioni accurate sulla distribuzione spaziale e sull'evoluzione temporale degli spostamenti superficiali avvenuti nell'area d'interesse durante un certo periodo, attraverso la generazione di serie temporali di spostamento e di mappe di velocità media di spostamento. Tali approcci si basano sull'utilizzo di grandi dataset, costituiti da decine (a volte centinaia) di immagini SAR relative alla stessa area e di altrettanti interferogrammi differenziali, che sono opportunamente combinati per ricavare informazioni sull'evoluzione temporale degli spostamenti superficiali. Nonostante la notevole complessità algoritmica e i tempi di calcolo decisamente più lunghi rispetto

alle tecniche interferometriche “classiche” (analisi di un solo/pochi interferogrammi), l’informazione ottenuta negli approcci multi-temporali utilizzando un gran numero di immagini e di interferogrammi porta ad un notevole miglioramento della accuratezza delle misure di spostamento, grazie alla stima dei possibili contributi atmosferici delle immagini e degli errori topografici e grazie all’utilizzo di tecniche per lo srotolamento della fase, basate su algoritmi che sfruttano contemporaneamente informazioni di fase interferometrica nello spazio e nel tempo.

Negli ultimi 20 anni sono state sviluppate numerose tecniche DInSAR multi-temporali, che si differenziano principalmente per il tipo di target con cui lavorano e per il criterio di selezione degli interferogrammi, che possiamo raggruppare in due grandi categorie: gli approcci *Persistent Scatterer Interferometry* (tecniche PSI) e *Small Baseline* (tecniche SB). In particolare, le tecniche PS lavorano con interferogrammi a piena risoluzione spaziale (*single look*), ossia interferogrammi che non hanno subito alcuna operazione di media spaziale; all’interno della cella di risoluzione si assume la presenza di un solo scatteratore dominante (i.e., un unico *Persistent Scatterer*, nel seguito PS o punto di misura) ritenuto coerente per tutto l’intervallo di tempo di osservazione. Tale assunzione vale solo per un piccolo insieme di PS cosiddetti “persistenti”, la cui risposta elettromagnetica “persiste” nel tempo, ossia la cui informazione di fase è preservata in tutti gli interferogrammi differenziali, indipendentemente dai valori di baseline delle coppie scelte, restando praticamente immuni agli effetti di decorrelazione spaziale e temporale. Ciò permette di poter lavorare anche con baseline spaziali e temporali molto grandi, senza imporre alcun vincolo sulle separazioni massime tra le orbite di acquisizione delle immagini. Le tecniche PSI spesso fanno uso di interferogrammi generati senza alcun vincolo sulle baseline rispetto ad un’unica immagine *master* comune al dataset. Ciò permette di utilizzare un numero minimo d’interferogrammi dai quali si ottiene un problema determinato, la cui soluzione consiste nel risolvere un sistema in $N-1$ incognite ed $N-1$ equazioni, essendo N il numero di immagini SAR analizzate. Di contro, tali approcci, a causa dell’utilizzo di interferogrammi a grande baseline che sono affetti da decorrelazione, sono caratterizzati da limitate densità spaziali dei punti rilevati, soprattutto nel caso di analisi interferometriche effettuate su aree vegetate e rurali caratterizzate da un ridotto numero di scatteratori dominanti.

Infine, si sottolinea che lo srotolamento della fase interferometrica, passo decisamente critico nella catena di elaborazione DInSAR avanzata, avviene considerando dei modelli lineari che schematizzano l’andamento degli spostamenti nel tempo; pertanto, le tecniche PSI non risultano adatte per l’analisi di fenomeni deformativi fortemente non lineari.

Le tecniche SB, invece, si basano sull’assunzione di *scattering* spazialmente distribuito all’interno della cella di risoluzione, per cui è possibile osservare anche scatteratori cosiddetti “distribuiti”; ciò porta come immediato vantaggio che la densità dei punti (nel seguito denominati anch’essi punti di misura o PS) che possono essere rilevati nelle analisi interferometriche con tecniche SB aumenta notevolmente rispetto alle tecniche PSI. D’altra parte, i target distribuiti sono molto più sensibili agli effetti di decorrelazione spaziale e temporale rispetto a quelli dominanti, per cui non si può prescindere da un’accurata selezione degli interferogrammi differenziali da usare per lo srotolamento della fase. Pertanto, le tecniche SB si differenziano dalle tecniche PSI, perché in questo caso viene imposto un criterio nella scelta delle coppie interferometriche utilizzate basato sulla minimizzazione delle baseline spaziali e temporali. Ciò consente di limitare i problemi di decorrelazione, direttamente legati ai valori di baseline degli interferogrammi, incrementando la densità dei punti coerenti considerati analizzabili. Ovviamente, la selezione delle coppie interferometriche a piccola baseline porta alla necessità di non poter più considerare un’unica immagine *master* per tutto il dataset (come nelle tecniche PSI), ma di avere più immagini *master*, con il maggiore svantaggio di dover eventualmente gestire sottoinsiemi (*subset*) di interferogrammi ottenuti da tecniche SB separati da larghe baseline. In questo caso, i subset sono tra loro indipendenti e le informazioni di spostamento ricavate per ogni subset singolarmente devono essere opportunamente combinate tra loro per ricavare le serie temporali di spostamento relative all’intero dataset; in caso contrario, si è costretti a ridurre il numero delle immagini da considerare per le analisi.

Infine, le tecniche SB operano tipicamente (ma non esclusivamente) a una risoluzione spaziale ridotta attraverso un’operazione di media complessa (denominata *multi-look*) sugli interferogrammi, per aumentare il rapporto segnale-rumore delle fasi interferometriche. Se da un lato questo comporta una perdita in termini di risoluzione spaziale, dall’altro permette di aumentare la densità dei punti rilevati anche in presenza di aree rurali o poco urbanizzate, consentendo di preservare le potenzialità dei sistemi SAR satellitari di effettuare analisi

interferometriche a larga scala con limitati costi del monitoraggio; ciò rende questi approcci particolarmente adatti all'analisi di fenomeni deformativi in aree spazialmente estese, dovuti a processi sia naturali come eventi sismici e attività vulcaniche, sia antropici, come fenomeni di subsidenza e di dissesto idrogeologico. Più recentemente, le tecniche SB sono state estese ad analisi interferometriche multi-scala, basate sull'utilizzo di interferogrammi a piena e a media risoluzione spaziale, per identificare scatteratori sia dominanti sia distribuiti.

Di seguito, sono brevemente riportate alcune tra le più diffuse tecniche avanzate multi-temporali di Interferometria SAR satellitare, che sono oggetto di numerosissime citazioni nella letteratura scientifica:

- Tecnica PSInSARTM
- Tecnica DInSAR – SBAS
- Tecnica SqueeSARTM
- Tecnica StaMPS (Stanford Method for *Persistent Scatterers*)
- Tomografia SAR (TomoSAR)

Ovviamente però l'analisi seguente non può certamente essere considerata esaustiva delle numerosissime tecniche DInSAR multi-temporali sviluppate negli ultimi 25 anni, fra le quali ricordiamo anche gli approcci denominati: IPTA (Interferometric Point Target Analysis, Werner et al., 2003), SPINUA (Stable Point INterferometry over Un-urbanised Areas, Bovenga et al., 2004), CPT (Coherent Pixels Technique, Blanco-Sanchez et al., 2008) e PSP (Persistent Scatterer Pairs, Costantini et al., 2009).

2.5.1 Tecnica PSInSARTM

La tecnica PSInSARTM è una tecnica *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) (Ferretti et al., 2000; Ferretti et al., 2001), nata nel 1999 con lo sviluppo ed il brevetto dell'algoritmo PSInSARTM da parte del Politecnico di Milano e la concessione in licenza a TRE, successivamente diventata TRE Altamira (TRE, 2020). Questa tecnica si basa sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito dai diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*), è in sostanza immune dagli effetti di decorrelazione temporale e pertanto mostra caratteristiche ideali per le osservazioni interferometriche. I *Permanent Scatterers* sono bersagli radar identificati dal satellite sulla superficie terrestre mediante un complesso algoritmo di elaborazione numerica dei segnali che si distinguono per il fatto di possedere un'elevata stabilità della risposta elettromagnetica nel tempo. I *Permanent Scatterers* corrispondono tipicamente ad elementi già presenti al suolo, quali porzioni di manufatti - edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici - oppure elementi naturali - affioramenti rocciosi, accumuli di detrito - (Regione Liguria, 2020; TRE, 2008).

L'elaborazione dei *Permanent Scatterers* segna il passaggio da un'analisi per coppie di immagini, tipica dell'interferometria differenziale classica (DInSAR), ad un'analisi multi - immagine dell'intero dataset disponibile sull'area di interesse. Tra le N immagini SAR disponibili viene individuata una unica immagine *master*, mentre tutte le altre, identificate come *slave*, vengono confrontate sempre con l'immagine *master* generando complessivamente $(N - 1)$ interferogrammi (Regione Liguria, 2020).

La stima della componente atmosferica è uno dei punti di forza della tecnica PSInSARTM ed è effettuata basandosi sull'analisi di un sottoinsieme di punti. Essendo il contributo atmosferico variabile lentamente nello spazio, esso viene esteso a tutto l'insieme dei punti dell'area con un opportuno processo di interpolazione ed eliminato dalla fase interferometrica (TRE, 2020).

Per quanto riguarda la precisione delle misure fornite, considerando un set di dati di almeno 40 immagini che coprono un periodo di 2 anni, un punto di misurazione situato a meno di 1 km di distanza dal punto di riferimento (*Reference Point*) ha un errore di ± 1 mm/anno sulle misure della velocità media di spostamento e di ± 5 mm sulle misure dello spostamento (Regione Liguria, 2020; TRE, 2008).

2.5.2 Tecnica SBAS-DInSAR

La tecnica DInSAR denominata SBAS, acronimo di *Small Baseline Subset*, è stata sviluppata dai ricercatori dell'Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA) del CNR nel 2002 (Berardino et al., 2002). Tale approccio si basa su un'appropriata combinazione di un gran numero di coppie interferometriche ottenute a

partire da dati SAR acquisiti da orbite sufficientemente vicine (piccole baseline spaziali) e con ridotti tempi di rivisitazione sulla stessa scena (piccole baseline temporali). Queste caratteristiche consentono di minimizzare gli effetti di rumore (decorrelazione spaziale e temporale), in modo tale da massimizzare il numero di punti coerenti - dal punto di vista elettromagnetico - per unità di area per i quali si riesce a fornire una misura affidabile degli spostamenti. A partire dall'opportuna elaborazione di tali coppie interferometriche, è possibile generare mappe di velocità media di spostamento spazialmente dense con estensione di diverse centinaia di migliaia di km² e, per ogni punto coerente, è possibile anche seguire l'evoluzione temporale dello spostamento avvenuto nel periodo di interesse attraverso la generazione di serie temporali di spostamento. Ciò si ottiene attraverso l'inversione di un sistema lineare sovradeterminato, con M interferogrammi e N incognite (i.e. le fasi associate alle acquisizioni), con $M > N$; nel caso di presenza di più subset separati da grandi baseline, il sistema può essere risolto applicando il metodo della Decomposizione ai Valori Singolari (*Singular Value Decomposition*, SVD), un algoritmo matematico che permette di trovare una soluzione ai minimi quadrati con vincolo di norma minima di un sistema lineare che non abbia rango pieno, e quindi non ammetta un'unica soluzione ai minimi quadrati. L'approccio SBAS-DInSAR permette di preservare le caratteristiche di ampia copertura spaziale tipiche dei sistemi satellitari, generando prodotti avanzati DInSAR con accuratezze di $\pm 1-2$ mm/anno sulle misure di velocità media di spostamento e di ± 5 mm sulle misure di spostamento (Casu et al., 2006; Bonano et al., 2013).

Il suo punto di forza risiede nella capacità di effettuare analisi degli spostamenti a diverse scale di risoluzione spaziale (approccio a due scale), producendo serie temporali di spostamento a scala sia regionale sia locale (Lanari et al., 2004; Manunta et al., 2008; Bonano et al., 2012). L'analisi alla scala regionale (analisi a media risoluzione spaziale) permette di ricavare informazioni medie sugli spostamenti relativi ad aree che si estendono per alcune migliaia di chilometri quadrati (risoluzione media di circa 30-100 m), ed è particolarmente utile per analisi di fenomeni naturali quali eventi sismici, vulcanici, subsidenze ed estrazione di petrolio e gas; l'analisi alla scala locale (analisi a piena risoluzione spaziale) consente di indagare nel dettaglio aree sensibili sfruttando la piena risoluzione del sensore (da 3 a 10 m circa), al fine di rilevare pattern deformativi anche molto localizzati spazialmente che mostrano uno spostamento relativo rispetto a quello medio del terreno. Tale analisi è particolarmente adatta allo studio di dettaglio delle deformazioni di strutture antropiche, come quelle che interessano singoli edifici, infrastrutture critiche (Lanari et al., 2004; Lanari et al., 2020) o frane, rappresentando un valido strumento a supporto delle attività di controllo e salvaguardia del territorio sia naturale sia antropizzato.

È utile osservare che l'approccio SBAS-DInSAR a due scale spaziali necessita, come punto di partenza, dell'informazione di spostamento medio del suolo, generato dall'analisi alla scala regionale, il quale viene opportunamente sottratto dagli interferogrammi a piena risoluzione spaziale per isolare la sola componente ad alta frequenza, che deve essere successivamente elaborata per estrarre il segnale di spostamento ad alta risoluzione spaziale.

2.5.3 Tecnica SqueeSAR™

La tecnica SqueeSAR™ (Ferretti et al., 2011) è un'evoluzione della tecnica PSInSAR™ brevettata da TRE Altamira in collaborazione con il Politecnico di Milano (TRE, 2008). L'analisi delle deformazioni superficiali si ottiene mediante la stima degli spostamenti di bersagli radar già presenti al suolo e visibili da satellite, sia puntiformi PS, sia spazialmente distribuiti DS (*Distributed Scatterers*). I bersagli puntiformi PS corrispondono generalmente a parti di edifici, strutture antropiche e rocce esposte mentre i bersagli distribuiti DS corrispondono a porzioni di terreno poco vegetate dove la risposta radar è omogenea seppur ridotta rispetto ai bersagli puntiformi, (TRE, 2020; Regione Liguria, 2020; TRE, 2008).

Nella tecnica SqueeSAR™ *Standard* alcune fasi dell'elaborazione dei dati sono realizzate in modo semiautomatico per consentire un'estensione areale maggiore, mentre nella tecnica SqueeSAR™ *Advanced* è previsto il costante intervento di personale specializzato in ogni fase del processo di elaborazione, così da massimizzare il contenuto informativo ricavabile dai dati. Ciò si traduce nella restituzione di tutti i possibili punti di misura radar satellitari con informazione significativa (TRE, 2008).

Per quanto riguarda la precisione delle misure fornite questa tecnica le specifiche sono sostanzialmente consistenti con quelle riportate per la tecnica PSInSAR™.

2.5.4 Tecnica StaMPS

La tecnica StaMPS (Hooper et al., 2004), acronimo di *Stanford Method for Persistent Scatterers*, è stata inizialmente sviluppata presso la Stanford University. Sviluppi successivi delle tecniche StaMPS e StaMPS/MTI hanno avuto luogo presso la University of Iceland, la Delft University of Technology e la University of Leeds. La tecnica StaMPS implementa un metodo DInSAR *Persistent Scatterers* (PS), sviluppato per operare anche in territori non antropizzati e/o interessati da deformazioni in regime non stazionario. La tecnica StaMPS/MTI (*Multi-Temporal DInSAR*) rappresenta un'estensione della tecnica StaMPS, includendo le metodologie *Small Baseline* e *combined multi-temporal DInSAR* (Hooper et al., 2013). Al fine di migliorare l'affidabilità in aree non urbane, la tecnica StaMPS si basa su una correlazione spaziale delle fasi interferometriche, per la ricerca di pixel caratterizzati da una ridotta variazione di fase. Inoltre, per la loro identificazione, non è richiesta una conoscenza preliminare della variazione nel tempo della velocità di spostamento (Hooper et al., 2007). La tecnica prevede una prima selezione dei pixel basandosi sull'analisi della loro ampiezza, attraverso la valutazione dell'indice di dispersione di ampiezza (Ferretti et al., 2001). Successivamente, viene effettuata una selezione finale valutando una stima della stabilità di fase di ciascun candidato pixel, attraverso una *phase analysis* (Hooper et al., 2007). L'approccio StaMPS fornisce buoni risultati in caso di velocità di spostamento basse rispetto al campionamento temporale (Dehghani et al., 2013).

2.5.5 Tecnica TomoSAR

La Tomografia SAR – TomoSAR- (Fornaro et al., 2014) è una tecnologia di processing che estende il metodo PSI per l'analisi dei pixel alla piena risoluzione del dato SAR. La tecnica introduce il concetto di focalizzazione o *imaging*, che permette di ottenere immagini ad alta risoluzione spaziale, in quota nel contesto del SAR e dell'Interferometria SAR multi-passaggio. Rispetto alle tradizionali tecniche interferometriche, la Tomografia SAR sfrutta la disponibilità di passaggi multipli e ripetuti del sensore sulla stessa area per realizzare un'antenna virtuale lungo la direzione perpendicolare all'orbita del sensore (*range*), al fine di migliorare la capacità del sistema SAR di discriminare in quota i bersagli al suolo (3D *imaging*) (Fornaro et al., 2003). La tecnica effettua una sorta di “radar scanner” da satellite che, sintetizzando un'antenna dell'ordine di chilometri lungo la direzione di *range* (fisicamente irrealizzabile), permette di ricostruire il profilo tridimensionale della scena illuminata. Il principio di *imaging* in quota della Tomografia SAR è sfruttato per risolvere il problema di *layover*, descritto nel paragrafo 2.2. L'*imaging* in quota permette di “entrare” all'interno della cella di risoluzione delle immagini SAR per analizzare la distribuzione della retrodiffusione elettromagnetica e quindi rilevare la presenza di bersagli a quote diverse ma alla stessa distanza. Inoltre, in analogia alle tecniche interferometriche DInSAR, la Tomografia SAR sfrutta la diversità temporale dei dati acquisiti per implementare anche una funzione di misura dello spostamento attraverso l'*imaging* 4D (spazio + velocità) di ciascuno dei bersagli rilevati (Fornaro et al., 2009). Il dominio dell'*imaging* può essere ulteriormente esteso (*imaging* 5D) per monitorare anche i piccoli movimenti indotti dalla dilatazione termica delle strutture (Fornaro et al., 2013; Reale et al., 2013).

L'implementazione della Tomografia SAR alla massima risoluzione spaziale del dato permette di ottenere, grazie all'utilizzo dell'informazione di ampiezza, una più accurata stima dei parametri di interesse (tipicamente quota e spostamento) rispetto ad algoritmi interferometrici analogamente operanti alla massima risoluzione ma basati su approcci di tipo *Permanent Scatterer* (Ferretti, 2001). L'elaborazione tomografica multidimensionale permette, quindi, di localizzare nello spazio e di misurare nel tempo lo spostamento di ciascun elemento a terra che retrodiffonde il segnale SAR. L'informazione è restituita tipicamente in forma di una “nuvola” di punti (*point cloud*) georeferenziati (per ciascun punto sono fornite le 3 coordinate spaziali Est, Nord e Quota) che sono associati agli elementi maggiormente riflettenti.

L'elaborazione completa prevede un approccio a doppia scala spaziale, analogamente a quanto originariamente introdotto in (Lanari et al., 2004): il primo blocco, che opera con un set di interferogrammi mediati spazialmente, è costituito dall'elaborazione a bassa risoluzione implementata attraverso algoritmi di tipo Small-Baseline. Tali operazioni sono finalizzate a stimare e compensare (calibrare) gli errori di fase introdotti dalla propagazione in atmosfera del segnale radar, ma anche a stimare le componenti di spostamento non lineare a bassa risoluzione spaziale. Queste due componenti forniscono gli input necessari per la fase di calibrazione dei dati necessaria per l'implementazione della tecnica TomoSAR a piena risoluzione spaziale. La Tomografia SAR a piena risoluzione è

implementata come descritto in (Fornaro et al., 2009), basata sull'utilizzo di un *Beamforming filter*, che misura la correlazione del vettore delle fasi misurate con un modello di fase che tiene conto dei parametri geofisici d'interesse.

2.6 DATI RESTITUITI DALL'INTERFEROMETRIA SATELLITARE

2.6.1 Tipologia del dato fornito

I risultati ottenuti dall'elaborazione interferometrica multi-temporale a piena risoluzione spaziale sono le mappe spazialmente estese di velocità media di spostamento e le serie temporali di spostamento per ogni punto coerente della scena e relativi all'intervallo temporale considerato nell'analisi interferometrica.

Per ogni punto di misura viene generalmente fornita la serie temporale degli spostamenti lungo la linea di vista del sensore (LOS), la velocità media di spostamento annuale lungo la stessa direzione, le coordinate geografiche (latitudine e longitudine) e la quota (solitamente rispetto a un riferimento globale) dei punti rispetto a un sistema di riferimento globale (e.g. WGS84). Ogni PS è associato ad un'area della superficie che dipende dalla misura della cella di risoluzione del dato SAR elaborato a piena risoluzione spaziale. Ad esempio, nel caso di utilizzo di dati ERS/ENVISAT, la cella di risoluzione è dell'ordine di 5x20m nelle direzioni *azimuth* e *range*; nel caso di dati CSK nella modalità Stripmap, la cella di risoluzione è di circa 3x3m; nel caso Sentinel-1 (modalità TOPS), la risoluzione è di circa 15x4m. Sono disponibili per ciascun PS, inoltre, i coseni direttori della direzione della LOS, che permettono di identificare univocamente le componenti del versore LOS a cui fa riferimento il valore di spostamento fornito lungo le tre direzioni Est-Ovest (East-West, nel seguito E-W o E) Nord-Sud (North-South, nel seguito N-S o N) Verticale.

Infine, per ciascun punto viene fornito solitamente anche un parametro che indica la qualità e/o l'affidabilità dell'informazione di spostamento relativa a tale punto, usualmente denominato coerenza. Tale parametro, tuttavia viene valutato in modo differente a seconda della tecnica di analisi interferometrica che viene impiegata. Occorre perciò interpretare con attenzione i suoi valori, in funzione del significato specifico che tale parametro ha secondo la tecnica utilizzata (per dettagli fare riferimento al paragrafo 2.6.2).

A fini pratici e per poterne facilitare l'importazione in un software GIS, i prodotti interferometrici possono essere restituiti agli utenti finali come file ASCII strutturati, eventualmente suddivisi in matrici più piccole relative a sottoporzioni del dato originario ma contenenti ciascuna le stesse informazioni per la corretta interpretazione del dato DInSAR. Ciascuna matrice viene visualizzata come un quadrante, dove sono contenuti i punti per i quali è presente l'informazione in tale area. La suddivisione del database in quadranti ha solamente lo scopo di ridurre l'onere computazionale della procedura di elaborazione con cui viene effettuata l'analisi interferometrica. Nel caso siano disponibili più database, uno relativo all'orbita ascendente ed uno relativo all'orbita discendente, la suddivisione in quadranti nei due database può essere differente.

Si sottolinea, come già anticipato nei paragrafi precedenti, che tutte le misure fornite sono differenziali, ossia ottenute come differenza tra il valore registrato nel punto in esame e quello del *Reference Point*, fissato a priori e generalmente selezionato in un'area coerente dal punto di vista elettromagnetico e assunta stabile, ovvero nella quale vengono assunti nulli gli spostamenti. Inoltre, tutte le misure hanno un riferimento temporale corrispondente alla data della prima acquisizione.

La selezione del *Reference Point* durante l'elaborazione interferometrica è un procedimento che richiede particolare attenzione: la scelta dell'area coerente è legata al fatto che in questo modo vengono limitate le possibili fonti di rumore (effetti di decorrelazione) che potrebbero inficiare la qualità dei risultati.

La distanza del punto di riferimento dall'area di interesse può influenzare la precisione delle misure di spostamento e velocità media per quell'area. In generale, quindi, quanto più il punto di riferimento è prossimo al sito ove si vogliono operare le valutazioni, tanto più le misure saranno precise. In alcune tecniche si specifica che i valori forniti sono validi, con le precisioni indicate, solo ad una prefissata distanza dal punto di riferimento.

Un ulteriore aspetto da considerare è la stabilità del punto di riferimento: infatti, nel caso in cui tale punto sia soggetto a spostamenti nel tempo, le misure di spostamento associate a ciascun PS del dataset potrebbero essere soggette a una errata sottostima/sovrastima del segnale di spostamento reale; pertanto, le serie temporali di spostamento dei punti del dataset dovranno essere depurate sottraendogli quella del punto di riferimento. Se

viceversa il punto di riferimento è un caposaldo stabile dove non c'è presenza di spostamento lungo tutto l'arco temporale, questo problema non si verifica.

2.6.2 Coerenza, definizioni e impatto sulla interpretazione

Come detto precedentemente, per ciascun punto di misura viene fornito un parametro che contiene un'informazione sulla qualità e/o l'affidabilità della misura di spostamento relativa a tale punto, usualmente denominato *coerenza temporale*. La definizione di tale parametro è strettamente legata alla specifica tecnica DInSAR multi-temporale utilizzata e al tipo di elaborazione interferometrica, pertanto non è possibile fornire una sua definizione univoca.

In molti approcci di tipo PSI (Ferretti et al., 2001; Ferretti et al., 2011), la coerenza temporale è un indice che misura la corrispondenza tra il movimento del punto di misura e un certo modello analitico scelto a priori.

Facendo riferimento all'approccio SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale (Lanari et al., 2004; Bonano et al., 2012), la coerenza temporale è invece un parametro che fornisce una stima, per ogni singolo punto di misura, della qualità delle serie temporali di spostamento, attraverso la valutazione della similarità tra il segnale deformativo arrotondato di partenza e il modello di fase adottato. Il valore della coerenza temporale è compreso tra 0 (nessuna similarità) e 1 (similarità massima) e i risultati DInSAR vengono selezionati sulla base di questo valore. In particolare, i pixel caratterizzati da un valore di coerenza più basso di una certa soglia, stabilita in base ad alcuni criteri specifici dell'analisi interferometrica, sono considerati non affidabili e vengono pertanto scartati nell'elaborazione SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale. La soglia di coerenza temporale viene selezionata empiricamente sulla base delle caratteristiche del dataset e dei sensori da elaborare, ad esempio il numero delle immagini SAR disponibili, l'estensione temporale dell'intero dataset SAR, la regolarità nel tempo delle acquisizioni, la presenza di eventuali "buchi" di acquisizioni dovuti a possibili malfunzionamenti di alcuni sensori, il tipo di area che si sta osservando (area urbana o area naturale con vegetazione), il tipo di dato che si è scelto. La soglia di coerenza non ha, quindi, un valore univoco nell'approccio interferometrico identificato, ma varia da elaborazione ad elaborazione. A titolo di esempio, nel caso di un dataset CSK composto da un centinaio (o anche più) di immagini SAR, acquisite con regolarità e senza buchi temporali significativi su un'area urbana (ad esempio una grande città come Roma o Milano) in un periodo di circa 10 anni, possiamo considerare una soglia di coerenza di 0.35 per i prodotti SBAS-DInSAR.

2.6.3 Distribuzione spaziale dei punti di misura

Osservando la rappresentazione su mappa dei punti di misura ottenuti con tecniche interferometriche multi-temporali a piena risoluzione spaziale, geocodificata e sovrapposta ad un'immagine ottica o ad una mappa cartografica, si può notare come essi siano tipicamente distribuiti su una griglia sparsa e addensati in prossimità di bersagli o strutture antropiche, quali edifici, infrastrutture, centri storici.

Dalla rappresentazione di questi ultimi su un supporto cartografico, è abbastanza comune identificare alcune aree prive di punti di misura. A titolo di esempio, si riportano in Figura 2-23 e Figura 2-24 due esempi di distribuzione spaziale dei punti di misura ottenuti dall'elaborazione interferometrica multi-temporale SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale dei dataset ascendenti (punti di misura rossi) e discendenti (punti di misura verdi) per l'area di Roma, dove sono state indicate con un riquadro rosso due zone caratterizzate dall'assenza di punti di misura. Si sottolinea che, in generale, i punti dei due dataset ascendenti e discendenti non sono coincidenti e possono avere una distribuzione spaziale anche significativamente diversa, che dipende principalmente dal diverso punto di osservazione del satellite lungo le due orbite di acquisizione e dai differenti angoli di vista.



Figura 2-23 – Esempio di distribuzione spaziale dei punti di misura ottenuti dall'elaborazione interferometrica multi-temporale SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale di due dataset ascendenti (punti di misura rossi) e discendenti (punti di misura verdi) in un'area del centro storico di Roma. Il rettangolo rosso identifica un'area dove non sono stati rilevati punti di misura (Talledo et al., 2022).



Figura 2-24 - Esempio di distribuzione spaziale dei punti di misura ottenuti dall'elaborazione interferometrica multi-temporale SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale di due dataset ascendenti (punti di misura rossi) e discendenti (punti di misura verdi) in un'area a Sud-Ovest di Roma. Il rettangolo rosso identifica un'area dove non sono stati rilevati punti di misura (Talledo et al., 2022).

Le motivazioni alla base di tali osservazioni non risultano sempre univocamente identificate. La mancanza di punti di misura è presumibilmente legata alla quasi totale assenza di oggetti sufficientemente retrodiffondenti all'interno dell'area di interesse, Figura 2-23, in generale dovuta alla presenza di effetti di decorrelazione temporale (Zebker and Villasenor, 1992), come nel caso di superfici piatte e di aree soggette a significative variazioni temporali delle proprietà di *backscattering*, come ad esempio nel caso di aree vegetate o marine (si veda anche paragrafo 2.2). In altri casi, invece, l'assenza di punti di misura non risulta giustificabile con tali motivazioni (e.g., Figura 2-24), ma piuttosto va attribuita alla presenza di fenomeni tempo-varianti di deformazione delle strutture, di ampiezza significativa rispetto alla lunghezza d'onda del segnale radar utilizzato, la cui ricostruzione attraverso l'utilizzo degli algoritmi DInSAR multi-temporali più diffusi in letteratura risulta attualmente inefficace, con una conseguente diminuzione dei valori del parametro di coerenza temporale.

Nel caso delle infrastrutture come quelle rappresentate in Figura 2-24, le citate deformazioni tempo-varianti possono essere associate alla risposta delle strutture a variazioni di temperatura localizzate, legate alle condizioni ambientali e di irraggiamento, ovvero a condizioni di carico rilevante associato alla presenza e/o al passaggio di autoveicoli (Sandoli et al., 2024). Tali circostanze possono compromettere la corretta identificazione dello spostamento complessivo associato a singole strutture o a parti di esse.

2.6.4 Precisione e accuratezza delle misure

La precisione dei risultati forniti dalle tecniche interferometriche riguarda essenzialmente tre aspetti distinti: la georeferenziazione dei punti di misura, la determinazione delle velocità medie annuali di spostamento e la determinazione dei valori di spostamento che compongono le serie temporali. Si riportano di seguito alcune considerazioni su tali aspetti per alcune delle tecniche introdotte nel paragrafo 2.5.

2.6.4.1 Tecnica PSInSARTM

Per quanto riguarda la tecnica PSInSARTM si riportano in Tabella 2-2 i valori di precisione associati ad una deviazione standard (1σ) con l'ipotesi di un dataset costituito da almeno 40 immagini e una distanza dal punto di riferimento inferiore a 2 km, per il caso di dataset derivanti da satellite ERS. In particolare, la operazione di georeferenziazione è distinta in due passaggi successivi: inizialmente si effettua una trasformazione di coordinate dalle coordinate SAR alle coordinate geografiche (e.g. GCS WGS 84), successivamente si effettua un allineamento dei PS sul supporto cartografico scelto mediante traslazione rigida. Per quanto riguarda il primo passaggio, il posizionamento del PS in direzione N-S risulta affetto da un errore con distribuzione di tipo uniforme compresa tra ± 2 m, mentre in direzione E-W risulta affetto da un errore con distribuzione normale a valor medio nullo e deviazione standard pari a circa 6 m (Figura 2-25).

Tabella 2-2. Precisione delle misure (1σ) per tecnica PSInSARTM con ipotesi di dataset di 40 immagini e distanza dal punto di riferimento inferiore a 2 km

Posizionamento del punto in direzione N-S	± 2 m
Posizionamento del punto in direzione E-W	± 6 m
Posizionamento del punto in quota (ellissoidica)	± 1.5 m
Velocità annua media di spostamento	± 1 mm/anno
Misure differenziali di spostamento	± 5 mm

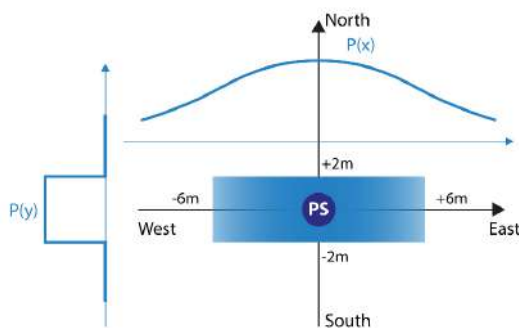


Figura 2-25 – Schematizzazione degli errori di posizionamento del PS, ripresa e riadattata da (TRE, 2008).

Per quanto riguarda la precisione sulla valutazione degli spostamenti dei PS, è utile ricordare che le principali cause che concorrono a degradare la stima di tali misure sono il disturbo atmosferico e il rumore di decorrelazione. Come accennato in precedenza, l'errore dovuto a tali fenomeni di disturbo tende a ridursi all'aumentare del numero di acquisizioni a disposizione. È importante notare come non sia possibile fornire una legge generale di propagazione dell'errore ed è necessario fare riferimento ai parametri di qualità (coerenza e deviazione standard) che vengono forniti per ogni PS. L'incertezza sulla velocità media annua è rappresentata in termini di deviazione standard per ogni PS, e tale valore dipende dalla distanza del singolo PS dal punto di riferimento (all'aumentare della distanza dal punto di riferimento aumenta la deviazione standard). Tuttavia, se si considerano due punti PS vicini tra loro,

la loro velocità relativa ha invece una incertezza contenuta e inferiore a 1 mm/anno e risulta indipendente dalla distanza dal punto di riferimento. L'incertezza sulla serie di spostamenti è compresa tra ± 5 mm (si veda anche paragrafo 2.5.1).

2.6.4.2 Tecnica SBAS-DInSAR

Fatto salvo le distorsioni geometriche di cui si è parlato nel paragrafo 2.2 dovute alla tipica configurazione *side-looking* del radar (Franceschetti e Lanari, 1999), la georeferenziazione dei punti SAR è principalmente legata alla trasformazione del sistema di riferimento (da griglia radar a griglia geografica) e al ricampionamento della griglia geografica di output dei dati.

In particolare, se si analizzano localmente (in modo tale da poter trascurare gli effetti delle distorsioni suddette) le operazioni da effettuare per una corretta geolocalizzazione in pianta dei punti di misura, bisogna prima di tutto effettuare una trasformazione dalla griglia SAR (coordinate *azimuth* e *range*) alla griglia geografica (latitudine e longitudine) in un sistema di riferimento globale, e.g. WGS84). Un esempio di tale trasformazione è riportato in Figura 2-26, dove la griglia rossa (corrispondente alla griglia dell'immagine Master utilizzata come riferimento per le operazioni di registrazione di tutte le immagini del dataset interferometrico e dipendente dalla risoluzione dei dati CSK di partenza) rappresenta la griglia radar di partenza nel caso di un dataset CSK acquisito in modalità Stripmap, mentre la griglia nera è la griglia geografica di output (coordinate geografiche espresse in latitudine e longitudine), con una spaziatura regolare che dipende dal campionamento della griglia di uscita, ossia dalle cifre significative utilizzate per la sua rappresentazione.

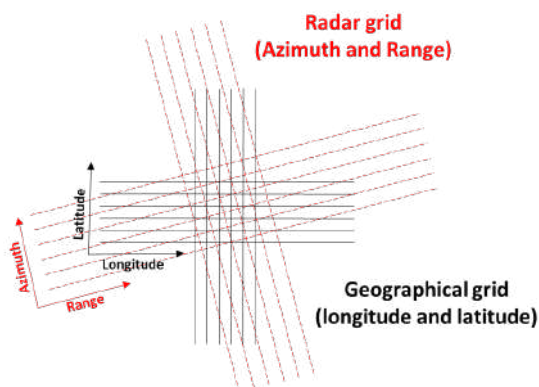


Figura 2-26 – Effetto della trasformazione dalla griglia SAR (coordinate *azimuth-ground range*) alla griglia geografica di output (latitudine e longitudine) durante l'operazione di geocodifica dei punti di misura.

Un particolare aspetto che influisce sulla precisione nella geolocalizzazione dei punti di misura in pianta è legato alla stima di topografia residua rispetto al DEM utilizzato nell'elaborazione interferometrica. Infatti, la precisione del posizionamento in pianta del punto di misura dipende dalla qualità della ricostruzione della quota di ciascun punto rispetto al sistema di riferimento globale, che a sua volta dipende dall'accuratezza della stima della componente di fase topografica residua rispetto al DEM utilizzato nel processing interferometrico.

Per quanto riguarda la tecnica SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale (Lanari et al., 2004; Bonano et al., 2012) si riportano in Tabella 2-3 i valori di precisione corrispondenti ad una deviazione standard (1σ) nel caso di elaborazione di un dataset CSK (con oltre 100 immagini) a piena risoluzione spaziale (circa 3mx3m nella griglia in *ground range*) e angolo di vista (*look angle*) medio di circa 33°.

Tabella 2-3. Precisione delle misure (1σ) per la tecnica SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale applicata a dati COSMO-SkyMed con look angle di circa 33°

Posizionamento del punto in direzione N-S	$\pm 1 - 2 \text{ m}$
Posizionamento del punto in direzione E-W	$\pm 2 - 3 \text{ m}$
Posizionamento del punto in quota	$\pm 1 - 2 \text{ m}$
Velocità annua media di spostamento	$\pm 1 - 2 \text{ mm/anno}$
Misure differenziali di spostamento	$\pm 5 - 10 \text{ mm}$

Pertanto, nel caso di un dataset interferometrico CSK con risoluzione di circa $3 \times 3 \text{ m}$, è possibile assumere che la precisione nel posizionamento del punto di misura (una deviazione standard) sia di circa $1\text{-}2 \text{ m}$, $2\text{-}3 \text{ m}$ e $1\text{-}2 \text{ m}$ in direzione N-S, E-W e Verticale, rispettivamente.

È importante sottolineare, però, che essendo le misure interferometriche differenziali, cioè calcolate rispetto al *Reference Point*, l'incertezza nel suo posizionamento ha un impatto diretto su tutti i punti del dataset. Di conseguenza, tutti i punti possono essere affetti da una *bias* rigido corrispondente ad una traslazione rigida, lungo tutte e tre le direzioni dello spazio, dei punti di misura. Questo errore può essere compensato facendo uso di strumenti a terra come *corner reflectors* in corrispondenza dei quali sia stata installata una stazione GPS.

Infine, per quanto riguarda la precisione delle misure di spostamento dei punti di misura ottenuti (Tabella 2-3), l'approccio SBAS-DInSAR permette di ottenere una precisione di $\pm 1\text{-}2 \text{ mm/anno}$ sulle misure di velocità media di spostamento e di $\pm 5 \text{ mm}$ sulle singole misure di spostamento (Casu et al., 2006; Bonano et al., 2013; Manunta et al., 2019), si veda anche paragrafo 2.5.1.

2.7 STRUMENTI DIGITALI DI SUPPORTO ALL'INTERPRETAZIONE DEI DATI INTERFEROMETRICI

Nel presente paragrafo vengono introdotti alcuni prodotti cartografici e topografici che possono essere adoperati per facilitare l'utilizzo e l'interpretazione dei dati interferometrici e, in particolare, l'interpretazione della posizione dei punti di misura. Sono analizzate due categorie di prodotti:

- Strumenti cartografici derivati da telerilevamento aereo e satellitare;
- Prodotti derivati da rilievi o telerilevamento on-site.

Questi sono prodotti utili per confrontare la posizione dei punti di misura rispetto a quella di altre entità. Occorre però sottolineare che ciascuno di questi prodotti è caratterizzato da una diversa precisione. Tra quelli considerati, soltanto i rilievi on-site effettuati con stazione totale o GPS permettono di ottenere dati georeferenziati con una precisione sufficiente per essere assunti come elementi di riferimento.

2.7.1 Prodotti cartografici da telerilevamento aereo e satellitare Ortofoto e immagini georiferite

Le ortofoto sono elaborazioni di immagini rilevate da sensori posti su aereo o satellite che hanno subito un raddrizzamento dal punto di vista geometrico in modo da diventare delle proiezioni ortogonali. Esse possono essere utilizzate come carte geografiche poiché georiferite, cioè riferite ad una specifica estensione entro un sistema di riferimento geografico o cartografico. Numerosi enti pubblici e privati forniscono ortofoto del territorio italiano o anche solo immagini (riprese oblique e non trattate per diventare proiezioni ortogonali) comunque trattate in modo da diventare carte geografiche. Offrono servizi di questo tipo il Geoportale Nazionale, Bing Maps Portal, Google Maps, Google Earth. Molti sono gli operatori che offrono servizi di tipo commerciale in questo settore e propongono immagini o ortofoto anche con risoluzioni a terra molto elevate: ad esempio ora è possibile raggiungere risoluzioni di pochi cm. In Figura 2-27 vengono mostrate due mappe realizzate con i servizi del Geoportale Nazionale (ortofoto) e di Bing Maps Portal (immagine georiferita).

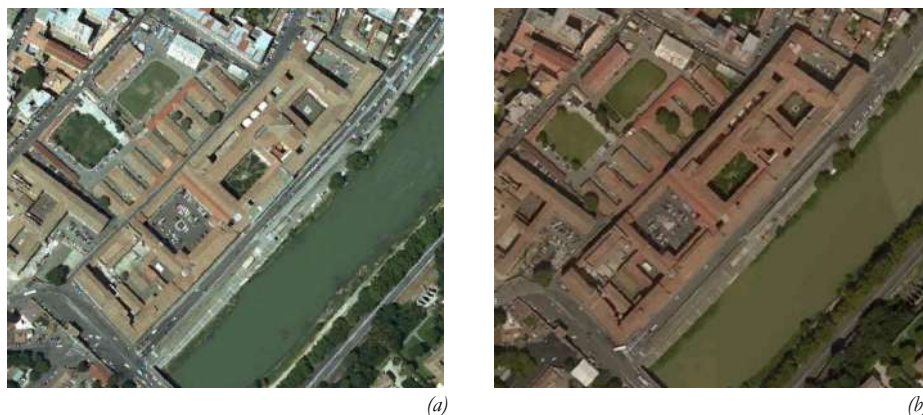


Figura 2-27 – Esempio di ortofoto ed immagini utilizzabili come mappe: Complesso di San Michele a Ripa Grande, Roma rappresentato da: (a) Ortofoto 2012 disponibile al servizio WMS del Geoportale Nazionale; (b) Immagine presente nelle mappe Bing Aerial Maps fornite da Bing Maps Portal.

Mappe tematiche:

Esistono diverse mappe tematiche che forniscono informazioni georeferenziate utili all'analisi e alla gestione del territorio e che possono essere affiancate alle misure di velocità e spostamento fornite dall'interferometria satellitare. Ad esempio, il servizio WMS del Geoportale Nazionale (WMS-Geoportale, sito web) fornisce dati e mappe utili all'identificazione del rischio idrogeologico, idraulico, sismico e all'analisi dei processi deformativi che interessano il territorio, come ad esempio il catalogo frane.

Quote planimetriche, altimetriche e volumetriche di edifici

Le regioni italiane realizzano prodotti cartografici fin dagli anni settanta e nel tempo hanno adottato regole e tecnologie differenti. Negli ultimi decenni hanno realizzato prodotti di cartografia digitale abbastanza simili fra loro perché uniformi agli indirizzi ed alle regole tecniche definite in sede sovregionale (IntesaGIS, CISIS), nazionale (Agenzia per l'Italia Digitale o AGID) e comunitaria (INSPIRE). La carta tecnica principale attualmente prodotta dalle regioni è il database geotopografico, che è realizzato secondo le specifiche di contenuto previste da AGID. Il database geotopografico (DBGI), di cui fanno parte CTR (Carta Tecnica Regionale) e CTRN (Carta Tecnica Regionale Numerica), prevede la descrizione del territorio nei principali aspetti naturali e antropici attraverso classi di elementi ai quali vengono associati degli attributi alfanumerici: ogni classe contiene elementi dello stesso tipo, per ciascun elemento vengono definite proprietà geometriche (la collezione delle coppie di coordinate) e lo stato rispetto agli attributi alfanumerici; proprietà geometriche e attributi vengono utilizzate per rappresentare gli aspetti del territorio o per produrre ulteriori artefatti. Alcune di queste classi di elementi si prestano a produrre artefatti utili per il confronto con il dato interferometrico. Esse riguardano: le informazioni geodetiche, le infrastrutture di viabilità, gli immobili ed i manufatti, l'idrografia. Si tratta, in particolare, di classi di elementi per i quali vengono specificati, oltre alla quota planimetrica, la quota altimetrica ed eventuali altri riferimenti che possono essere utilizzati per eseguire operazioni di modellazione. Fra queste classi di elementi va ricordata in particolare quella relativa alle unità volumetriche: per questi elementi sono note sia le quote planimetriche e altimetriche (nelle geometrie) sia la quota dell'estrusione (negli attributi). È così possibile ottenere una schematizzazione del volume dell'edificio attraverso prismi ottenuti estrudendo nella direzione verticale l'ingombro in pianta di ciascuna porzione di edificio. Rappresentazioni simili si possono ottenere costruendo manualmente i prismi ricavando le altezze degli edifici da altre fonti, come per esempio il servizio Google Earth. Negli ultimi anni iniziano ad essere disponibili modelli tridimensionali di volumetria degli edifici di intere città secondo diversi formati, tra i quali si cita CityGML (City Geography Markup Language) che, basato su XML, rappresenta uno standard internazionale

la modellazione e l'interscambio di dati 3D su città. In particolare, CityGML rappresenta un information model comune per la rappresentazione di oggetti urbani tridimensionali.

Alternativamente, nel caso in cui sia necessaria una descrizione più accurata dell'ingombro tridimensionale del manufatto, è possibile ottenere ricostruzioni ad elevato grado di dettaglio attraverso un rilievo con laser-scanner, come discusso nei paragrafi successivi.

In Figura 2-28 è illustrato un confronto sulla rappresentazione del volume di un edificio realizzata con dati provenienti da fonti differenti. Il volume in Figura 2-28 (b) è stato ottenuto usando i dati presenti nel database geotopografico realizzato dalla Regione Lazio nel 2014, mentre quello in Figura 2-28 (c) è stato costruito ricavando le altezze da Google Earth. Si nota una incongruenza nel volume al centro del cortile interno, che deve essere corretta. In generale i dati forniti da database geotopografico sono sufficientemente corretti, ma un controllo da parte dell'utente è comunque consigliato, almeno per i manufatti di principale interesse nell'analisi. Le precisioni relative all'ingombro in pianta degli edifici sono diverse a seconda del prodotto cartografico da cui sono ricavati. Tali prodotti sono spesso stati realizzati per scopi differenti e con differenti livelli di accuratezza, l'accuratezza è piuttosto uniforme per tipologia di prodotto cartografico ma è specificata nel capitolato (e nel protocollo di collaudo) con il quale viene affidata la realizzazione della carta. In prevalenza i database geotopografici sono realizzati per produrre cartografia in scala 1:5000 e l'accuratezza delle coordinate planimetriche è di $\pm 1\text{m}$ mentre quella relativa alla quota altimetrica è in genere compresa fra $\pm 1,5$ metro e ± 2 metri. In ogni caso è opportuno verificare l'accuratezza delle due quote dichiarata nei capitolati di esecuzione dei lavori.

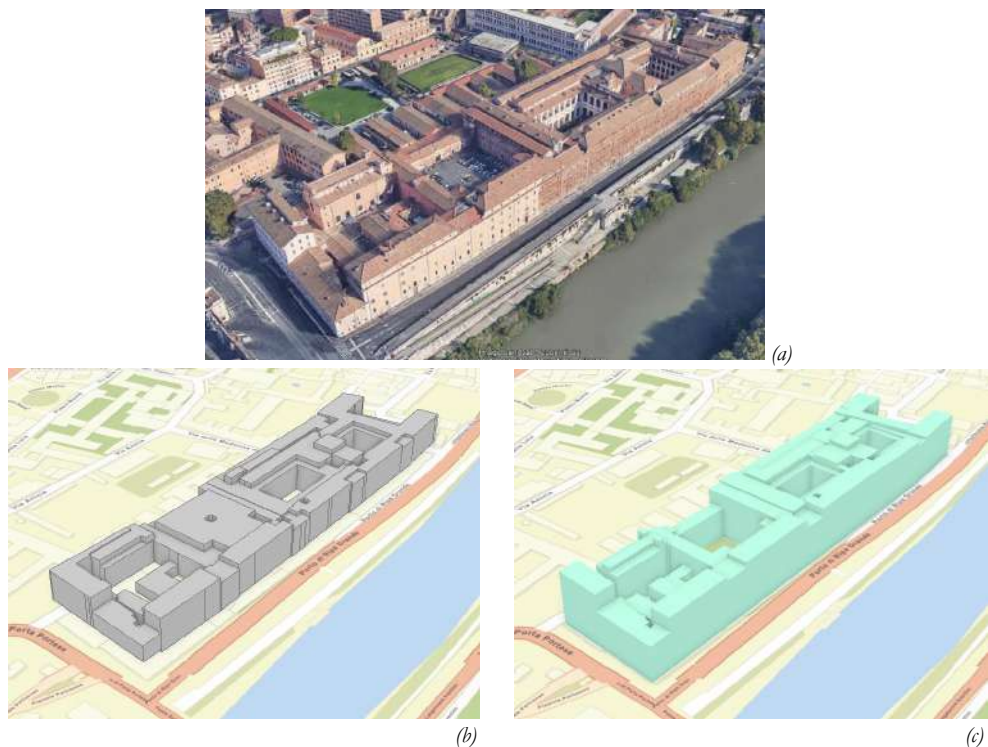


Figura 2-28 – Esempio di rappresentazione tridimensionale di un edificio: Complesso di San Michele a Ripa Grande, Roma rappresentato da: (a) Servizio Google Earth; (b) Schematizzazione a prismi con dati ricavati dal database geotopografico della Regione Lazio del 2014; (c) Schematizzazione a prismi con dati ricavati da Google Earth.

Modelli digitali di elevazione (DEM)

I *modelli digitali di elevazione* (DEM, Digital Elevation Model) sono prodotti che permettono di rappresentare l'elevazione dei punti di una certa area, considerando o meno la presenza degli edifici e della vegetazione. In particolare, si parla di *modelli digitali del terreno* (DTM, Digital Terrain Model) quando viene descritto l'andamento della superficie terrestre senza alcun elemento che si eleva dal livello del terreno. Quando invece il modello di elevazione include anche la presenza di edifici, vegetazione, o qualsiasi altro elemento che si eleva dal livello del terreno, si parla di *modello digitale di superficie* (DSM, Digital Surface Model), McGlone, 2007. La maggior parte dei DEM a scala regionale sono prodotti a partire dai dati ottenuti da scansione laser aerea (ALS), LiDAR (*Light Detection And Ranging*) o fotogrammetria aerea. Questa classe di DEM è caratterizzata da risoluzioni elevate (5m in pianta) e buone precisioni dei valori dell'elevazione (1 – 2m) (Thenkabail, 2015). I DEM realizzati a scala globale permettono di descrivere l'intera superficie terrestre, ma risentono di una precisione e di una risoluzione inferiori (Thenkabail, 2015). Alcuni esempi sono il DEM derivato dal progetto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) USGS, sito web, il DEM ASTER – GDEM (NASA-JET, sito web) e il DEM realizzato dalla missione TanDEM-X, sito web. Un DEM realizzato a scala europea è quello prodotto dal progetto Copernicus (EU-DEM v1.1, sito web). Nella Tabella 2-4 ripresa da Thenkabail (2015), sono riportate le risoluzioni e le precisioni nella definizione della quota di alcuni DEM disponibili.

Tabella 2-4. Risoluzione e precisione di alcuni DEM disponibili, ripresa da Thenkabail (2015).

DEM	Risoluzione spaziale	Precisione verticale assoluta
ALS	< 1 m x 1 m	< 1 m
Airborne InSAR DEMs (e.g. NextMap)	5 m x 5 m	< 2 m
ASTER GDEM V2 and World30	30 m x 30 m	< 20 m
SRTM DTED-1	90 m x 90 m (3 arcsec)	< 30 m
SRTM DTED-2	30 m x 30 m (1 arcsec)	< 18 m
TanDEM-X DEM; WorldDEM	12 m x 12 m (0.4 arcsec)	< 10 m

In alternativa ai prodotti già realizzati, è possibile generare un DEM a partire da un gruppo di punti quotati, ricavando una superficie interpolante che descrive l'andamento dell'elevazione in una zona. Per alcune zone del territorio nazionale sono disponibili pacchetti di dati che descrivono l'andamento del terreno per punti quotati, spesso definiti con precisioni analoghe a quelle usate per la creazione dei prodotti della CTR/CTRn.

I DEM sono usualmente forniti attraverso uno dei seguenti formati:

- Immagini raster
- Reti triangolari irregolari (TIN, Triangulated irregular networks)

I formati raster sono i più diffusi e hanno il vantaggio di essere leggeri e agevoli da utilizzare. Infatti, contengono unicamente un'informazione di elevazione su un reticolo di pixel di dimensioni costanti, McGlone, 2007. Le rappresentazioni TIN sono costituite da vertici posizionati nello spazio uniti da linee rette, a formare una superficie costituita da elementi triangolari. Rispetto alle immagini raster, le rappresentazioni TIN permettono una descrizione più efficiente della superficie terrestre, in quanto la maglia si infittisce nelle zone ad andamento più complesso e si allarga in quelle ad andamento più uniforme. Per contro, per ciascun punto del reticolo sono fornite le tre coordinate spaziali necessarie a individuarlo. I valori dell'elevazione sono ormai definiti quasi esclusivamente rispetto a un riferimento globale, di tipo geoidico o ellissoidico. Utilizzando un DEM abbinato alla visualizzazione dei punti di misura si ha il vantaggio di avere una indicazione di dove è il livello del terreno. Occorre tenere presente però che ciascun DEM è caratterizzato da una certa risoluzione e precisione. In Figura 2-29 è presentato il confronto tra due DEM utilizzati per descrivere la superficie del terreno in una zona di Roma. In Figura 2-29(a) è rappresentata la condizione in cui non viene utilizzato un DEM. I risultati di Figura 2-29(b) sono ottenuti utilizzando il DEM SRTM 1 arc-sec, avente risoluzione di circa 30mx30m e incertezza delle quote inferiore a 18m. Nell'immagine di sinistra si nota come tale precisione non sia sufficiente a descrivere correttamente l'orografia della zona. La Figura 2-29(c) è stata ricavata utilizzando un DEM costruito a partire da un set di punti quotati

disponibile tra i prodotti della CTRN della Regione Lazio. La risoluzione è di 5m x 5m e la precisione in quota è la medesima degli altri prodotti CTRN, pari a $\pm 2\text{m}$. La rappresentazione della superficie del terreno è migliore rispetto a quella ottenuta con il DEM SRTM. In generale, occorre tenere in considerazione che la superficie descritta da un DTM non può essere assunta a priori come l'esatta posizione del livello del terreno, ma è necessario adottare una tolleranza legata alla precisione con cui sono definiti i valori di elevazione.

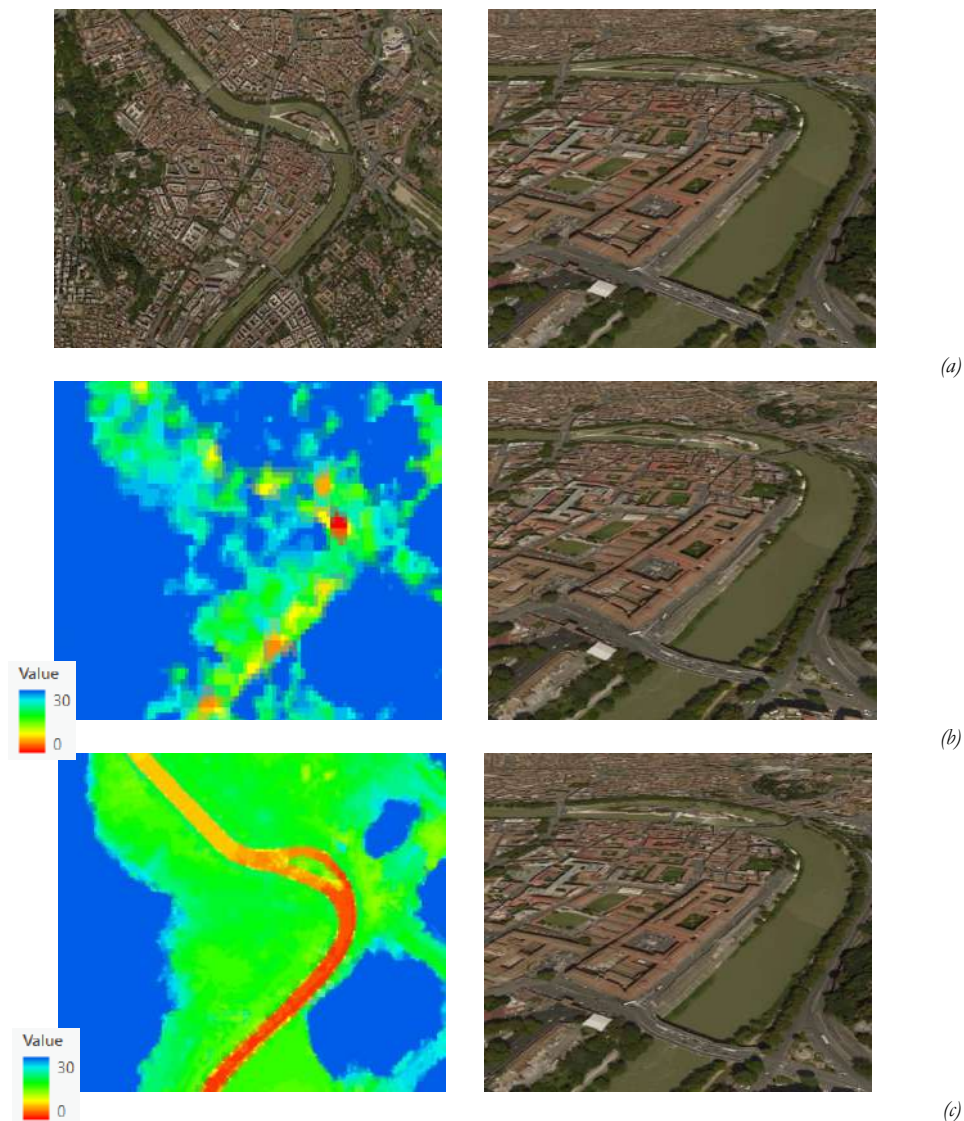


Figura 2-29 – Esempio di confronto fra due DTM per la rappresentazione del terreno nella zona del complesso San Michele a Ripa Grande, Roma. Nelle immagini a sinistra è rappresentato l'andamento delle quote del terreno secondo una scala di colori; a destra è illustrata la superficie del terreno ottenuta, in vista assometrica: (a) vista in assenza di un DTM (da Google Earth); (b) vista utilizzando il DEM SRTM 1 arc-sec; (c) vista utilizzando un DTM generato da un pacchetto di punti quotati con risoluzione 5m x 5m fornito dalla Regione Lazio.

2.7.2 Prodotti ottenuti da rilievi o telerilevamento on-site

I metodi tradizionali per il rilievo on-site di edifici, con una storia ormai consolidata da decenni, sono quelli che prevedono l'utilizzo di strumenti quali il teodolite o la stazione totale. Questi strumenti, nelle varie versioni più o meno evolute, hanno sostanzialmente la caratteristica di ottenere pochi punti nello spazio con una precisione elevatissima, pochi millimetri, su una distanza anche di qualche chilometro. Il numero di punti è stabilito dall'operatore che individua, nell'oggetto da rilevare, le informazioni necessarie per poi ottenere una rappresentazione in grado di soddisfare il livello di dettaglio richiesto. I prodotti elaborati possono essere principalmente bidimensionali, con l'individuazione di piante, prospetti o sezioni, o tridimensionali con l'obiettivo di valutare principalmente il volume del fabbricato da rilevare.

I metodi più avanzati di rilievo, in tempi recenti resi molto più accessibili rispetto a qualche anno fa, utilizzano strumenti con sensori laser scanner. Tali strumenti consentono il rilevamento tridimensionale di oggetti a scale e risoluzioni differenti in modo automatico, creando superfici quasi continue dell'oggetto rilevato. Alcuni esempi di restituzione di questi metodi sono riportati in Figura 2-30.



Figura 2-30 – Esempi di restituzione dei risultati ottenuti da rilievo laser scanner: (a) Laser Scanning Palazzetto dello Sport, Roma (React Studio); (b) Viadotto dell'industria sul fiume Basento, (Candela et al., 2020).

Il prodotto generato dal laser scanner è una “nuvola di punti”, anche con informazioni sul colore rilevato, che interconnesse con più stazioni consentono di restituire in modo molto dettagliato un modello tridimensionale completo. La mole di dati ottenuti è chiaramente molto importante e quindi per eseguire certe elaborazioni occorre una dotazione hardware adeguata. Inoltre, alcuni dati devono essere correttamente interpretati per via della possibile presenza di zone d'ombra durante il rilievo, di problemi legati alla rifrazione di alcuni elementi o della possibilità che oggetti e/o persone possano trovarsi, e quindi essere rilevati, in posizioni differenti nelle varie stazioni. A fronte di queste problematiche, comunque facilmente superabili, il rilievo laser scanner rimane il metodo più avanzato, completo e preciso disponibile e con la tecnologia GPS è ad oggi possibile geolocalizzare e referenziare le nuvole di punti in un sistema DEM.

2.8 RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE DEI DATI RESTITUITI DALL'INTERFEROMETRIA SATELLITARE

Le rappresentazioni grafiche possono essere fatte sia per le grandezze dirette (es. spostamenti lungo la LOS) che per grandezze derivate che si ottengono a valle di elaborazioni (es. spostamenti lungo la verticale). Per il dettaglio di come si ottengono le grandezze derivate si veda il capitolo 0.

2.8.1 Rappresentazioni su diagrammi

Vi sono diverse tipologie di rappresentazioni possibili su diagramma dei dati restituiti dal processo interferometrico, sia 2D che 3D. Di seguito si riportano alcuni possibili esempi relativi alla rappresentazione delle grandezze dirette, non elaborate.

Esempi di rappresentazioni su diagramma di grandezze derivate, per le quali si rimanda al capitolo 0, possono essere:

- Serie temporale dello spostamento lungo la verticale
- Rappresentazione nel dominio delle frequenze
- Entropia nel tempo, etc.

Si riportano di seguito alcuni esempi di rappresentazioni su diagramma di grandezze dirette.

L'andamento degli spostamenti lungo la LOS nel tempo è rappresentabile per ciascun punto attraverso un grafico che riporta in ascissa le date di acquisizione e in ordinata l'entità dello spostamento (i.e. diagramma della serie di spostamento del punto di misura, si veda ad esempio Figura 3-9a).

La velocità media annua di spostamento viene valutata come la pendenza della retta di regressione lineare della funzione spostamento. Per associare un grafico di questo tipo a ciascun punto è necessario utilizzare un software dotato di uno strumento adeguato che fornisca tale rappresentazione (ad esempio, plugin PSViewer di QGIS, TRE toolbar per ArcGIS).

Altre possibili rappresentazioni su diagramma sono ad esempio rappresentazioni vettoriali delle velocità medie lungo la LOS, come ad esempio riportato in Figura 2-31.

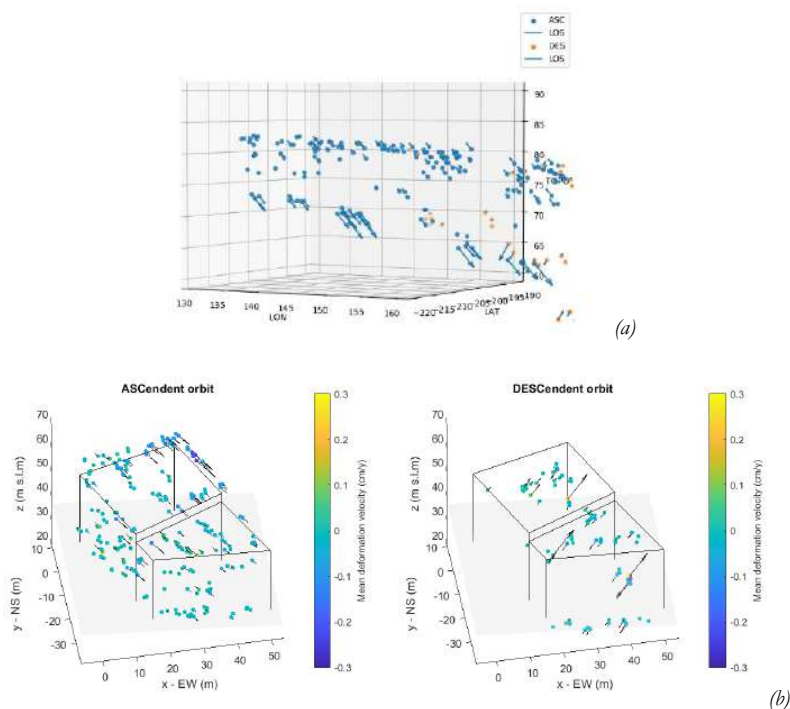


Figura 2-31 – Esempi di rappresentazione di vettori di velocità lungo la LOS: (a) acquedotto Claudio, Roma; (b) edificio in muratura, Roma.

2.8.2 Rappresentazioni su mappe

In questo paragrafo vengono descritte le principali possibili rappresentazioni su mappa delle informazioni fornite per i punti di misura. Si tratta di mappe (con vista 2D e/o 3D) che si possono realizzare plottando il valore di una variabile puntuale (ad esempio tramite una scala di colori, tramite vettori, etc.) per un set di punti.

Ad esempio per le grandezze dirette si possono rappresentare:

- Mappe di velocità media di spostamento lungo la LOS
- Mappe di spostamento lungo la LOS (per un determinato istante temporale)
- Mappe della coerenza

mentre per le grandezze derivate (si veda capitolo 0):

- Mappe di gradiente di spostamento (per un determinato istante temporale)
- Mappe dell'entropia spettrale

Per ciascuna variabile visualizzata nelle mappe (velocità media lungo la LOS, spostamento lungo la LOS in un dato istante, etc.) è necessario definire la scala di colori convenzionale che si utilizza. A titolo di esempio, la scelta dell'intervallo di valori tra cui visualizzare la scala di velocità necessita di particolare attenzione in quanto bisogna tenere conto della precisione delle velocità medie, si veda il paragrafo 2.6.4. Tale aspetto è da considerare anche nella sensibilità della scala scelta nel caso di scale graduate discrete in quanto ogni singola classe discreta è caratterizzata da un intervallo di velocità media che è selezionato dall'utente: intervalli troppo ridotti possono non

essere compatibili con la precisione dei dati SAR, mentre intervalli troppo elevati potrebbero non essere sufficienti per analizzare i fenomeni deformativi delle strutture a cui si è interessati.

Nel visualizzare i punti ottenuti dall'interferometria assieme agli strumenti digitali di supporto è inoltre necessario tenere conto degli errori di posizione, si veda il paragrafo 2.6.4.

In Figura 2-32 è riportato un esempio di rappresentazione della velocità media lungo la LOS visualizzando punti contenuti in diversi quadranti (Area di Roma con elaborazione SBAS-DInSAR, si veda Appendice 1).

In Figura 2-33 è riportato un esempio di rappresentazione della coerenza per un quadrante, mentre in Figura 2-34 sono riportate le mappe di coerenza per uno specifico quartiere e per un singolo edificio.

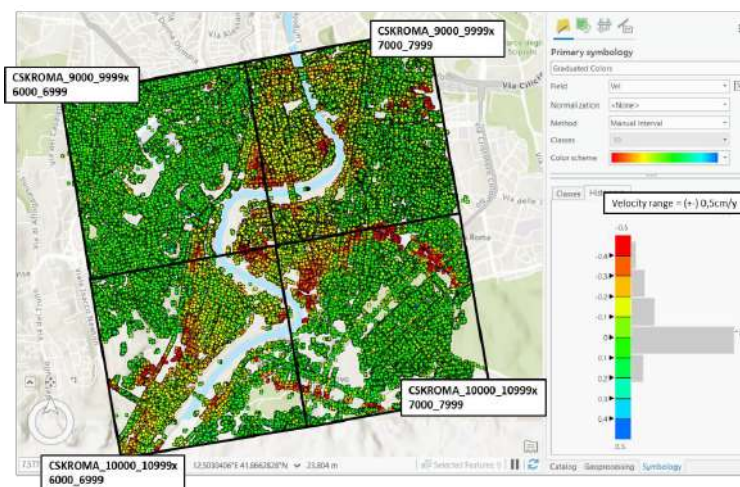


Figura 2-32 – Esempio di rappresentazione della velocità media lungo la LOS visualizzando punti contenuti in quadranti adiacenti (Area di Roma con elaborazione SBAS-DInSAR, Appendice 1),

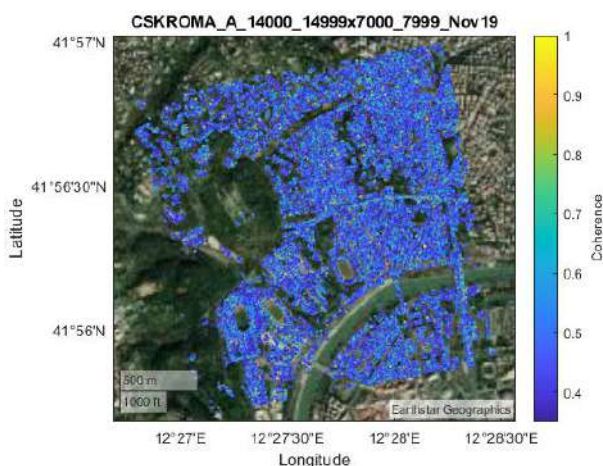


Figura 2-33 – Esempio di rappresentazione della coerenza a scala territoriale,

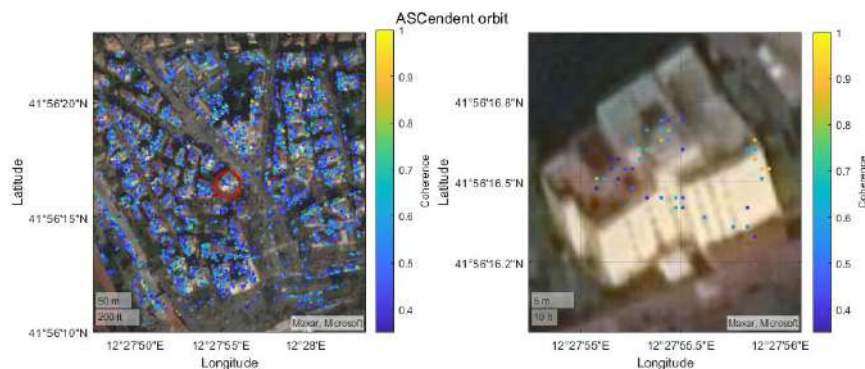


Figura 2-34 – Esempio di rappresentazione della coerenza a scala quartiere ed a scala edificio.

2.9 SINTESI DEL CAPITOLO E ASPETTI CHIAVE

Il presente capitolo è dedicato a fornire un quadro sintetico degli aspetti più significativi relativi ai dati SAR (*Synthetic Aperture Radar*) da satellite e alle tecniche multi-temporali di Interferometria SAR satellitare, essenziali per un utilizzo consapevole, da parte anche di utenti non specialisti in Interferometria SAR satellitare, dei dati restituiti da tali tecniche (e.g. serie temporali di spostamento, mappe di velocità media di spostamento). Il fine è la corretta valutazione del fenomeno deformativo in esame e l'interpretazione del comportamento delle strutture e delle costruzioni.

Il SAR è un sistema attivo a microonde capace di acquisire immagini della superficie terrestre sia di giorno che di notte, con qualunque condizione atmosferica. Le immagini SAR sono rappresentate nelle coordinate *azimuth* e *range* che rappresentano, rispettivamente, la direzione di volo e la direzione di vista, solitamente ortogonale alla direzione di volo (cfr. paragrafo 2.2). La risoluzione spaziale di un'immagine SAR satellitare è di pochi metri in entrambe le direzioni e dipende dalla banda del segnale elettromagnetico trasmesso e dalla lunghezza dell'antenna utilizzata.

Essendo un sistema *side-looking*, il SAR è affetto dalle distorsioni geometriche, denominate *foreshortening*, *layover* e *shadowing*, che rendono geometricamente differente un'immagine SAR dalla sua omologa immagine ottica, per dettagli su questi fenomeni si rimanda al paragrafo 2.2, ed in particolare alla Figura 2-10.

I sensori SAR maggiormente utilizzati per applicazioni civili a partire dal 1992 sono: ERS-1/2, ENVISAT, COSMO-SkyMed e Sentinel-1. È stato recentemente lanciato il primo satellite della costellazione COSMO-SkyMed *Second Generation*, in continuità con la prima generazione COSMO-SkyMed, che andrà a potenziare enormemente i sistemi disponibili dell'Agenzia Spaziale Italiana.

L'interferometria SAR differenziale (DInSAR) consente di estrarre informazioni sullo spostamento degli elementi presenti sulla superficie terrestre e/o della superficie terrestre stessa. La tecnica DInSAR, sfruttando la differenza di fase tra due immagini SAR, acquisite dal satellite sulla stessa area in tempi diversi (*baseline temporale*) e da posizioni orbitali leggermente diverse (*baseline spaziale*), consente di ricavare la misura dello spostamento, in termini di avvicinamento o allontanamento dal sensore. La differenza di fase tra due immagini SAR dà luogo al cosiddetto interferogramma o frange interferometriche, un'immagine bidimensionale nel piano *range* e *azimuth* rappresentata con una serie di frange. L'accuratezza con cui è possibile misurare gli spostamenti superficiali è pari ad una frazione della lunghezza d'onda, eq. (8), alla quale opera il sensore SAR (alcuni cm), per cui è possibile raggiungere teoricamente accuratezze nella valutazione di spostamenti anche di pochi millimetri, che tuttavia richiedono lunghe e complesse fasi di elaborazione.

Per superare le limitazioni della tecnica DInSAR "convenzionale", sono state sviluppate tecniche DInSAR avanzate multi-temporali, capaci di fornire informazioni accurate sull'evoluzione temporale degli spostamenti superficiali, attraverso la generazione di serie temporali di spostamento e di mappe di velocità media di spostamento. Tali approcci si basano sull'utilizzo di grandi dataset, costituiti spesso da centinaia di immagini SAR e di interferogrammi differenziali relativi alla stessa area, che sono opportunamente combinati per ricavare

informazioni sull'evoluzione temporale degli spostamenti superficiali. Nonostante la notevole complessità algoritmica e i tempi di calcolo decisamente più lunghi, l'informazione ottenuta negli approcci multi-temporali porta ad un notevole miglioramento dell'accuratezza delle misure di spostamento.

Le tecniche DInSAR multi-temporali possono essere raggruppate in due grandi categorie: le tecniche *Persistent Scatterer Interferometry* (tecniche PSI) e *Small Baseline* (tecniche SB). Nelle tecniche PSI si assume la presenza di un solo scatteratore dominante (i.e., un unico *Persistent Scatterer*, nel seguito PS o punto di misura) ritenuto coerente per tutto l'intervallo di tempo di osservazione. Le tecniche PSI generalmente fanno uso di interferogrammi generati senza alcun vincolo sulle baseline temporali e spaziali. Le tecniche SB, invece, si basano sull'assunzione di *scattering* spazialmente distribuito all'interno della cella di risoluzione, portando come immediato vantaggio che la densità dei punti che possono essere rilevati nelle analisi interferometriche con tecniche SB aumenta notevolmente rispetto alle tecniche PSI. Al fine di limitare le sorgenti di rumore, nelle tecniche SB viene imposto un valore massimo nelle baseline spaziali e temporali delle coppie interferometriche utilizzate, limitando così i problemi di rumore (decorrelazione).

I prodotti di un'analisi interferometrica multi-temporale sono la serie temporale degli spostamenti lungo la linea di vista del sensore (LOS) per ogni punto di misura affidabile, la velocità media di spostamento annuale lungo la stessa direzione, le coordinate geografiche (latitudine e longitudine) e la quota dei punti rispetto a un sistema di riferimento globale (e.g. WGS84). Ogni punto di misura è associato ad un'area della superficie che dipende dalla misura della cella di risoluzione del dato SAR elaborato a piena risoluzione spaziale. Sono disponibili per ciascun punto, inoltre, i coseni direttori della direzione LOS, che sono utili per valutare le componenti di spostamento e velocità media lungo le tre direzioni E-W, N-S e Verticale. Infine, per ciascun punto viene fornito solitamente anche un parametro che indica la qualità e/o l'affidabilità dell'informazione di spostamento relativa a tale punto (*coerenza temporale*), il cui valore è compreso tra 0 (massimo rumore) e 1 (assenza di rumore). I punti di misura affidabili sono selezionati sulla base del proprio valore di coerenza temporale, imponendo una soglia minima di tale parametro.

Tutte le misure fornite sono differenziali, ossia ottenute come differenza tra il valore registrato nel punto in esame e quello del *Reference Point*, fissato a priori e generalmente selezionato in un'area assunta stabile, nella quale vengono assunti nulli gli spostamenti. Inoltre, tutte le misure hanno un riferimento temporale corrispondente alla data della prima acquisizione.

La precisione dei risultati forniti dalle tecniche interferometriche riguarda essenzialmente tre aspetti distinti: la georeferenziazione dei punti di misura, la determinazione delle velocità medie annuali di spostamento e la determinazione dei valori di spostamento che compongono le serie temporali. Tali precisioni possono variare da tecnica a tecnica. Tipicamente, la precisione delle misure di posizione dei punti di misura è dell'ordine dei metri sia in pianta che in quota, mentre la precisione della velocità media di spostamento è dell'ordine di 1 mm/anno, e quella delle misure di spostamento è dell'ordine dei pochi millimetri (per ulteriori dettagli si rimanda al paragrafo 2.6.4).

2.10 RIFERIMENTI

Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383.

Bing Maps Portal, (2020). <https://www.bingmapsportal.com/> (accessed March 30, 2020).

Blanco-Sánchez P., Mallorquí J.J., Duque S., Monells D. (2008). The Coherent Pixels Technique (CPT): An Advanced DInSAR Technique for Nonlinear Deformation Monitoring. In: Camacho, A.G., Díaz, J.I., Fernández, J. (eds) *Earth Sciences and Mathematics. Pageoph Topical Volumes*. Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8907-9_10.

Bonano M., Manunta M., Marsella M., Lanari R. (2012). Long-term ERS/ENVISAT deformation time-series generation at full spatial resolution via the extended SBAS technique. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 4756–4783.

- Bonano M., Manunta M., Pepe A., Paglia L., Lanari R. (2013). From previous C-band to new X-band SAR systems: Assessment of the DInSAR mapping improvement for deformation time-series retrieval in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51, 1973–1984.
- Bovenga F., Nutricato R., Refice A., Guerriero L., Chiaradia M. (2004). SPINUA: A Flexible Processing Chain for ERS / Envisat Long Term Interferometry, *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium (ESA SP-572)*. 6-10 September 2004, Salzburg, Austria.
- Burgmann R., Rosen P. A., Fielding E. J. (2000). Synthetic Aperture Radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 169 - 209.
- Candela G., Demartino C., Marmo F., Monti G. (2020) Geometrical survey of shell and spatial structures using UAV photogrammetry: applicative examples, *IWSS2020 1st Italian Workshop on Shell and Spatial Structures*, 25th – 26th June 2020 – WEB MEETING.
- Casu F., Manzo M., Lanari R. (2006). A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 102(3-4), 195-210.
- CityGML 3.0: New Functions Open Up New Applications. (2020). *PFG Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88, 43-61.
- Colesanti C., Wasowski J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88(3-4), 173-199.
- Costantini M., Falco S., Malvarosa F., Minati F., Trillo F. (2009). Method of persistent scatterer pairs (PSP) and high resolution SAR interferometry," *2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Cape Town, South Africa, pp. III-904-III-907, doi: 10.1109/IGARSS.2009.5417918.
- Dehghani M., Zoej M.J.V., Hooper A., Hanssen R.F., Entezam I., Saatchi S. (2013). Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 157–170.
- E-Geos - Orthophotos capabilities, (2020). <https://www.e-geos.it/#/hub/hubCapabilities/capability/capability-orthophoto> (accessed October 20, 2020).
- Elachi, C. (1988), *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*, IEEE Press, New York
- ESA. (2020). ESA Earth Online. Tratto da Radar Courses: https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-co-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses/content-3/-/asset_publisher/mQ9R7ZVkg5P/content/radar-course-3-slant-range-ground-range
- ESA. (2020, Ottobre 21). Copernicus EU-DEM v1.1. Tratto da <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1>.
- EU-DEM v1.1 - Copernicus Land Monitoring Service, (n.d.). <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1> (accessed October 21, 2020).
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202–2212.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novati F., Prati C., Rocca F., Rucci A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3460–3470.
- Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C. Rocca F., Massonet D. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, ESA Publications, TM-19.
- Fornaro G. Franceschetti G., Lanari R., Sansosti E., Tesauro M. (1997). Global and local phase-unwrapping techniques: a comparison, *J. Opt. Soc. Am. A* 14, 2702-2708.

- Fornaro G., Franceschetti G., Lanari R. (1996). Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 3, pp. 720-727, doi: 10.1109/36.499751.
- Fornaro G., Lombardini F., Pauciullo A., Reale D., Viviani F. (2014). Tomographic Processing of Interferometric SAR Data: Developments, applications, and future research perspectives, *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(4), 41-50.
- Fornaro G., Lombardini F., Serafino F. (2005). Three-dimensional multipass SAR focusing: experiments with long-term spaceborne data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(4), 702-714.
- Fornaro G., Reale D., Serafino F. (2009). Four-Dimensional SAR Imaging for Height Estimation and Monitoring of Single and Double Scatterers, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1).
- Fornaro G., Reale D., Verde S. (2013). Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10, 677-681.
- Fornaro G., Serafino F. (2006). Imaging of single and double scatterers in urban areas via SAR tomography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(12), 3497-3505.
- Fornaro G., Serafino F., Soldovieri F. (2003). Three-dimensional focusing with multipass SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 507-517.
- Franceschetti G., Lanari R. (1999), *Synthetic Aperture Radar Processing*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Ghiglia D.C., Romero L.A. (1994). Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transform and iterative methods. *J. Opt. Soc. Am. A* 11, 107-117.
- Hooper A., Bekaert D., Spaans K. (2013). *StaMPS/MTI Manual Version 3.3b1* School of Earth and Environment University of Leeds, Leeds, United Kingdom.
- Hooper A., Segall P., Zebker H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, *Journal of Geophysical Research*, 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763.
- Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B., (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical Research Letter*, 31(23), 611-615.
- Lanari R., Reale D., Bonano M., Verde S., Muhammad Y., Fornaro G., Casu F., Manunta M. (2020). Comment on "Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: the Morandi bridge, Genoa, Italy by Milillo et al., (2019)". *Remote Sensing* 12(24), 4011. doi:10.3390/rs12244011
- Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorquí J.J., Berardino P., Sansosti E. (2004). A small baseline approach for investigating deformations on full resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 1377-1386.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. (2015). *Remote sensing and Image interpretation*, 7th edition, John Wiley & Sons.
- Manunta M., De Luca C., Zinno I., Casu F., Manzo M., Bonano M., Fusco A., Pepe A., Onorato G., Berardino P., De Martino P., Lanari R. (2019). The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57, 6259-6281.
- Manunta M., Marsella M., Zeni G., Sciotti M., Atzori S., Lanari R. (2008) Two-scale surface deformation analysis using the SBAS-DInSAR technique: a case study of the city of Rome, Italy, *International Journal of Remote Sensing*, 29(6), 1665-1684. DOI: 10.1080/01431160701395278.
- Mazzanti P., Bozzano F., Brunetti A., Esposito C., Martino S., Prestininzi A., Rocca A., Mugnozza G. S. (2015). Terrestrial SAR interferometry monitoring of natural slopes and man-made structures. In: Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P.T., Luino, F. (eds). *Engineering Geology for Society and Territory*. Volume 5, 189-194. Springer International Publishing Switzerland. ISBN 978-3-319-09047-4.

- McGlone J.C. (2017) Photogrammetric Products. In: Shekhar S., Xiong H., Zhou X. (eds) Encyclopedia of GIS. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-17885-1_982.
- Mohammed O. I., Saeidi V., Pradhan B., Yusuf, Y. A. (2014). Advanced differential interferometry synthetic aperture radar techniques for deformation monitoring: A review on sensors and recent research development. *Geocarto International*, 29(5), 536-553.
- NASA-JPL. Jet Propulsion Laboratory, ASTER - GDEM, (n.d.). <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (accessed October 21, 2020).
- Olmsted (1993), Scientific SAR User's Guide, Alaska Satellite Facility, University of Alaska Fairbanks.
- Pepe A., Lanari R. (2006). On the Extension of the Minimum Cost Flow Algorithm for Phase Unwrapping of Multitemporal Differential SAR Interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44:9, 2374-2383, doi: 10.1109/TGRS.2006.873207.
- Reale D., Fornaro G., Paucillo A. (2013). Extension of 4-D SAR Imaging to the Monitoring of Thermally Dilating Scatterers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51, 5296–5306.
- Regione Liguria website (2020). Nota sintetica per la comprensione del dato satellitare PSInSAR™ e SqueeSAR™, http://www.cartografiarl.regione.liguria.it/RiskNat/doc/NOTA%20SINTETICA_PSInSAR.pdf.
- Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodríguez E., Goldstein R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE*, 88(3), 333–382.
- Sandoli A., Petracca E., Rainieri C., Fabbrocino G. Operation of interferometric SBAS-DInSAR data for remote structural monitoring of existing bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 29(11). <https://doi.org/10.1061/JBENF2.BEENG-6850>.
- TanDEM-X Science service system, Zent. Dtsch. Cent. Für Luft- Und Raumfahrt - Ger. Aerosp. Cent. (n.d.). <https://tandemx-science.dlr.de/> (accessed October 21, 2020).
- Thenkabail P.S. editor. (2015). Remotely sensed data characterization, classification, and accuracies. CRC Press. doi:10.1201/b19294. ISBN 9781482217865.
- TRE Sensing the Planet, PSInSAR™ - Manuale d'uso, Luglio 2008.
- TRE website (2020), <https://site.tre-altamira.com/insar/> (accessed October 30, 2020).
- Usai S. (2001). A new approach for long term monitoring of deformations by differential SAR interferometry, DUP Science, Delft University, ISBN 90-407-2189-0
- USGS, Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global, (n.d.). doi:10.5066/F7PR7TFT.
- Velotto D. (2016). Oil spill and ship detection using high resolution polarimetric X-band SAR data. Munchen, DE: TUM.
- Werner C., Wegmüller U., Strozzi T., Wiesmann A. (2003). Interferometric point target analysis for deformation mapping", *Proc. IGARSS*, vol. 7, pp. 4362-4364, Jul. 21–25.
- Wikipedia website (2020), https://en.wikipedia.org/wiki/Interferometric_synthetic-aperture_radar/ (accessed October 30, 2020).
- WMS-Geoportale. Servizio WMS - Geoportale Nazionale, (n.d.). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/> (accessed October 20, 2020).

3 ELABORAZIONE DEI RISULTATI DELL'INTERFEROMETRIA SATELLITARE NEL CAMPO DELLE COSTRUZIONI ESISTENTI

3.1 PREMESSA

I dati interferometrici, come riportato nel capitolo precedente, sono generalmente rappresentati in termini di punti che hanno una risposta particolarmente coerente durante il periodo di osservazione (i.e., punti di misura, ovvero *Persistent Scatterers* - PS, si veda paragrafo 2.5). Tipicamente i punti di misura sono rappresentati da parti di edifici, da strutture metalliche, e in generale da elementi artificiali o naturali la cui risposta elettromagnetica non vari significativamente tra acquisizione ed acquisizione (si vedano anche paragrafi 2.2 e 2.6). Il numero di punti di misura in zone urbane varia a seconda del sensore utilizzato con densità dell'ordine di 100-400 punti/km² in caso di utilizzo di sensori in banda C (ERS/ENVISAT), fino ad arrivare a 8000 punti/km² in caso di utilizzo di sensori in banda X (COSMO-SkyMed), si veda anche paragrafo 2.6.3. Per ogni singolo punto di misura vengono fornite la posizione, il trend medio di spostamento e l'intera serie temporale di spostamento come spiegato in dettaglio nel capitolo precedente.

Quanto presentato consente quindi di sviluppare valutazioni su singoli punti. Più complesso è certamente il tema dell'analisi e della conseguente valutazione dello stato attuale di opere di ingegneria civile come infrastrutture ed edifici, le quali hanno una geometria assai variabile e, soprattutto per la loro consistenza e natura strutturale, pongono problematiche di congruenza tra i cinematismi delle varie parti non agevolmente separabili dalla tipologia costruttiva e dai materiali impiegati.

A questo scopo l'integrazione delle informazioni di più punti di misura consente di avere una visione di insieme che riduce le incertezze delle singole letture. Questo concetto viene approfondito nel presente capitolo che tratta il tema dell'utilizzo e dell'elaborazione dei risultati dei dati interferometrici, illustrando tecniche per la creazione di mappe di velocità e/o di spostamento continue particolarmente utili per valutazioni a livello strutturale e geotecnico.

In particolare, vengono discusse le informazioni che possono essere desunte dall'analisi di un singolo dataset (ascendente o discendente), paragrafo 3.2, e successivamente viene analizzato il problema della combinazione delle misure provenienti da entrambi i dataset, paragrafo 3.3. Questo al fine di associare a ciascun tipo di analisi il corrispondente livello di informazione desumibile anche in relazione all'obiettivo delle analisi stesse (per ampie zone, mappe di velocità lungo la LOS che possono segnalare fenomeni in atto, etc.).

La necessità di operare ricampionamenti spaziali e/o temporali viene affrontata in termini generali all'interno del paragrafo 3.3. Nel successivo paragrafo 3.4 viene approfondito il tema del ricampionamento spaziale mediante interpolazione, descrivendo le principali tecniche ed i loro possibili utilizzi con un solo dataset (ad es. per coprire eventuali zone d'ombra, se pur in questo caso sia necessario porre attenzione al risultato che si ottiene, soprattutto per zone d'ombra di ampiezza significativa, potendo tale risultato non essere ben correlato con il fenomeno reale eventualmente in atto), ovvero con entrambi i dataset. In questo secondo caso si ha infatti la possibilità di combinare i valori di velocità o spostamento in tutti i punti della griglia di interpolazione. A tal proposito si ricorda che, come premesso nel paragrafo 2.5, i punti di misura dei due dataset difficilmente coincidono e spesso non sono neppure vicini tra loro. Di conseguenza, in molti casi la possibilità di utilizzare i dati provenienti da entrambi i dataset richiede un'operazione preliminare, quale l'interpolazione o la tecnica del sotto – campionamento, al fine di poter disporre delle due informazioni in uno stesso punto. Vengono infine riportate alcune considerazioni sui possibili vantaggi e svantaggi dell'utilizzo di tecniche di interpolazione deterministiche e stocastiche.

È importante sottolineare come la tecnica di elaborazione da utilizzare e la tipologia di informazione ottenibile possa essere sostanzialmente differente in funzione della tipologia di struttura (edificio, ponte, edificio alto, etc.) e del suo orientamento spaziale (es. un ponte orientato N-S o E-W si possono ottenere informazioni sui fenomeni deformativi significativamente differenti), per dettagli fare riferimento ai capitoli specifici.

Nell'ultima sezione del capitolo si discutono alcuni aspetti sulla possibilità di eseguire interpolazioni 3D. Nel paragrafo 3.7, infine vengono esaminate criticamente le prestazioni delle varie metodologie presentate ed esaminati

i limiti e le criticità delle quali si deve tener conto per un'applicazione consapevole e razionale dei dati satellitari di natura interferometrica in relazione allo specifico problema e alla sua natura, geotecnica o strutturale.

3.2 UTILIZZO DEI DATI DI UN SINGOLO DATASET

In generale, l'analisi dei dati ottenuti dall'elaborazione di una singola orbita (dataset ascendente o discendente) può fornire informazioni preliminari in relazione a fenomeni deformativi in atto, sebbene sia ben noto che, a partire dalle misure di deformazione di un singolo dataset, non è possibile trarre considerazioni definitive. Infatti, le informazioni di un singolo dataset forniscono le componenti di spostamento e di velocità media di spostamento lungo una sola direzione (la LOS, ovvero la direzione congiungente il sensore con il bersaglio a terra).

La percentuale di spostamento reale rilevabile dal dato satellitare dipende dalla direzione dello spostamento reale stesso e dall'angolo di incidenza della linea di vista con la superficie terrestre.

Quest'ultima, come riportato al paragrafo 2.2, è definita dall'angolo di inclinazione dell'orbita Φ (heading angle) e dall'angolo θ (off-nadir o look-angle), come riportato in Figura 3-1 e Figura 3-2.

Interessante sottolineare che, anche considerando lo stesso satellite e la stessa modalità di acquisizione, i valori di questi angoli possano assumere valori leggermente differenti tra i diversi pixel di una stessa area. Di conseguenza le informazioni sulla LOS sono fornite per ogni PS appartenente al singolo dataset.

In termini di misura di deformazione generalizzata δ , che può rappresentare sia uno spostamento, sia la velocità media di spostamento, il valore misurato lungo le LOS Ascendente e Discendente (LOS A/D) può essere espresso in termini di componenti lungo le direzioni E-W, N-S e Verticale (rispettivamente E, N e U):

$$\begin{aligned}\delta_{LOS,A} &= \delta_E \cdot c_{E,A} + \delta_N \cdot c_{N,A} + \delta_U \cdot c_{U,A} \\ \delta_{LOS,D} &= \delta_E \cdot c_{E,D} + \delta_N \cdot c_{N,D} + \delta_U \cdot c_{U,D}\end{aligned}\quad (9)$$

dove ($c_{E,A/D}$, $c_{N,A/D}$, $c_{U,A/D}$) sono i coseni direttori degli angoli $\alpha_{E,A/D}$, $\alpha_{N,A/D}$, $\alpha_{U,A/D}$, tra le direzioni E-W, N-S e verticale e le LOS,A/D rispettivamente, come mostrato in Figura 3-1. Essi rappresentano le componenti dei versori delle direzioni delle LOS ascendente e discendente, rispettivamente indicati dai simboli: $i_{LOS,A}$ e $i_{LOS,D}$, ed espressi in funzione della direzione della LOS secondo le ben note relazioni:

$$(10)$$

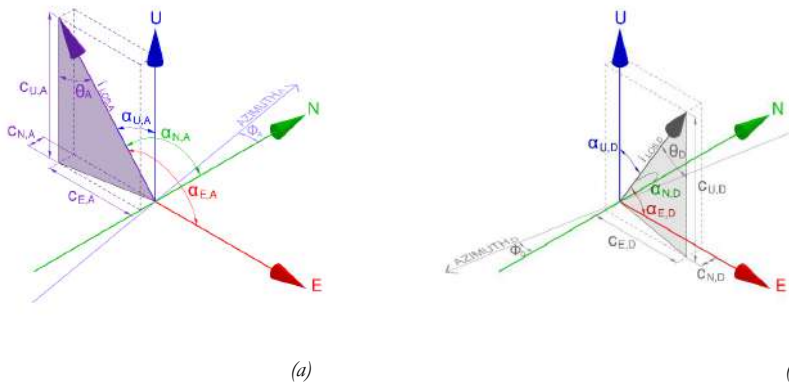


Figura 3-1 – Geometria di acquisizione del satellite: (a) orbita ascendente – ASC; (b) orbita discendente – DES, (Talledo et al., 2022).

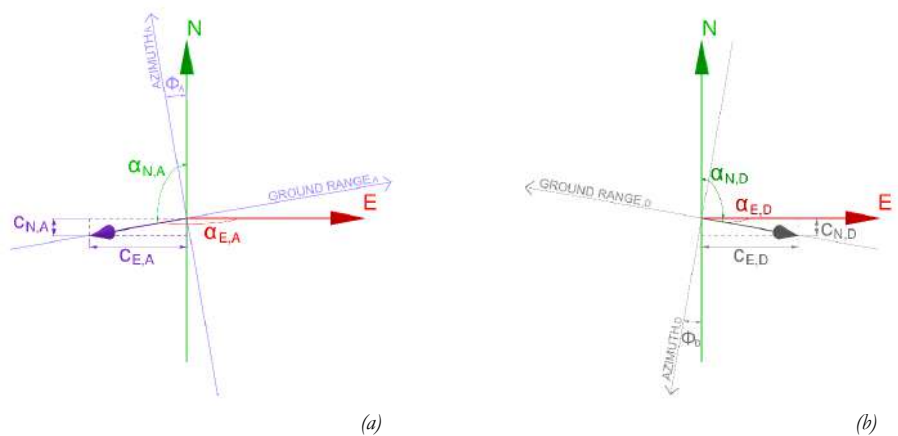


Figura 3-2 – Vista dall’alto della geometria di acquisizione del satellite: (a) orbita ascendente – ASC; (b) orbita discendente – DES, (Talledo et al., 2022).

Dall’equazione (9) si osserva come la quota di spostamento (ovvero di velocità media di spostamento) rilevabile lungo la LOS dipende dai valori dei coseni direttori. A titolo di esempio la Tabella 3-1 riporta i valori dei coseni per le direzioni LOS e, quindi, la percentuale di deformazione rilevabile dal satellite (analisi di sensibilità della tecnica) rispetto alle direzioni N-S, E-W e alla verticale dei satelliti ERS1/2 e ENVISAT-ASAR, del satellite RADARSAT-1-2 e del satellite COSMO-SkyMed in modalità Stripmap (Sansosti et al., 2014). Tale analisi mette in luce come gli spostamenti in direzione verticale siano rilevati quasi integralmente nelle diverse geometrie di acquisizione analizzate, gli spostamenti orizzontali in direzione E-W solo parzialmente mentre in direzione N-S sono praticamente non rilevati con entrambe le linee di vista. Una conseguenza è che usualmente nelle rappresentazioni ci si può riferire con buona approssimazione ad un piano verticale – Est, rispetto al reale piano contenente la verticale e la LOS. Questa assunzione è spesso utilizzata nelle analisi eseguite utilizzando i dati DInSAR.

Tabella 3-1. Valutazione della sensibilità degli strumenti nelle diverse direzioni

Satellite	ERS1/2	ENVISAT-ASAR	RADARSAT-1/2	COSMO-SkyMed
Modalità di acquisizione	Stripmap	Stripmap	Stripmap	Stripmap
$\Phi [^\circ]^*$	8.5	8.5	8.6	7.86
$\theta [^\circ]**$	23	15 - 45	20-50	20-60
$c_E [\%]$	38.6	25.6 – 69.9	33.8 – 75.7	33.9 – 85.8
$c_N [\%]$	5.8	3.8 – 10.5	5.11 – 11.4	4.7 – 11.8
$c_U [\%]$	92.1	96.6 – 70.7	93.9 – 64.3	93.9 – 50

* dal portale ESA EO (<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/>)

**da Sansosti et al., 2014

In sintesi, quanto più la direzione del vettore di spostamento reale, ovvero di velocità media di spostamento reale, si discosta dalla direzione della linea di vista, tanto minore è la componente rilevata dal satellite (cfr. Figura 3-3, per il caso di velocità media di spostamento). Come condizione limite, nel caso in cui la direzione dello spostamento (o della velocità media) reale sia perpendicolare alla LOS, la componente misurata dal sensore risulta essere nulla (Figura 3-3c). Per tale motivo, è importante notare come una indicazione di elevato spostamento lungo la LOS sia certamente segnale di un processo deformativo in atto; viceversa, una indicazione di basso spostamento lungo la LOS non è garanzia della assenza di fenomeni deformativi in atto.

Per convenzione, alle misure di spostamento o di velocità in avvicinamento o in allontanamento dal satellite si assegnano rispettivamente segno positivo e negativo.

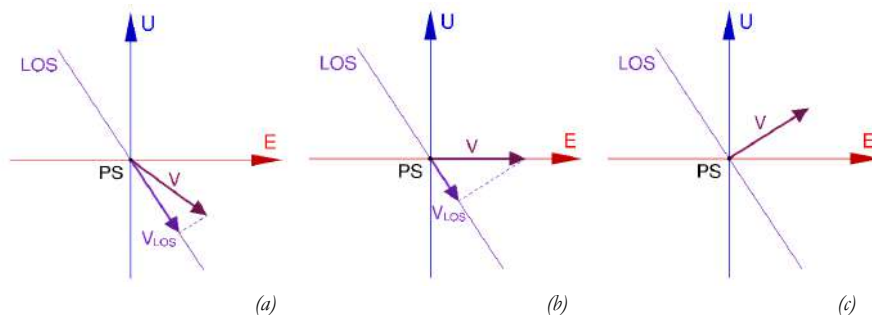


Figura 3-3 – Variabilità della componente di velocità media misurata in funzione della direzione della velocità media reale: (a)-(b) Velocità reale con componente parallela alla LOS; (c) Velocità reale ortogonale alla LOS, (Talledo et al., 2022).

È interessante inoltre notare come l'utilizzo di un singolo dataset possa fornire indicazioni significative al fine di determinare il vettore di spostamento reale, quando usato in associazione a dati derivanti da studi preesistenti o da tecniche di monitoraggio tradizionale applicate on-site, come ad esempio livellazione ottica o misure GPS. In particolare, se è nota la direzione di deformazione del fenomeno in esame è possibile ricavare l'intensità dello spostamento lungo tale direzione, a partire dalla proiezione misurata lungo la LOS del satellite. Nello studio di alcune tipologie di fenomeni di dissesto si può ipotizzare che la principale componente di spostamento assuma particolari direzioni; ad esempio, nel caso di fenomeni di scivolamento del terreno si può ipotizzare che la direzione dello spostamento reale coincida con la direzione di massima pendenza del versante, oppure nel caso di fenomeni di subsidenza si può ipotizzare che la direzione principale di spostamento sia verticale. Assunzioni di questo tipo devono comunque essere adottate con molta cautela, non sono operazioni generalizzabili e devono essere valutate caso per caso.

Infine, va sottolineato come la distribuzione spaziale dei punti di misura, come già spiegato in precedenza, non sia omogenea spazialmente. Per tale motivo, al fine di facilitare l'interpretazione dei fenomeni deformativi in atto ed estendere le informazioni sugli spostamenti anche su aree prive di bersagli radar, le misure puntuali di spostamento sui bersagli radar possono essere interpolate mediante appositi algoritmi di interpolazione spaziale, implementati in ambiente GIS, di tipo deterministico (quali ad esempio *Triangulated Irregular Network* – TIN, *Inverse Distance Weighted* – IDW, ecc.) o di tipo geostatistico (quale ad esempio le tecniche di tipo *Kriging*). Mentre i metodi di tipo deterministico non sono in grado di cogliere la struttura spaziale dei dati, i metodi di tipo geostatistico si basano sul *fitting* di modelli spaziali ai dati. Una descrizione più puntuale dei metodi di interpolazione spaziale è riportata nel paragrafo 3.4. È tuttavia molto importante tenere in considerazione che tali operazioni di interpolazione possono essere effettuate solo in aree in cui la densità e la distribuzione dei punti di misura siano tali da poter essere considerati rappresentativi dell'area stessa e la tipologia del fenomeno deformativo analizzato sia caratterizzata da una distribuzione spaziale degli spostamenti correlata nello spazio. Questo significa che particolare attenzione va posta nella definizione dell'area da utilizzare per la procedura di interpolazione, soprattutto quando movimenti di porzioni diverse del sito esaminato possono non essere effettivamente correlate tra loro. Un esempio tipico di questa situazione è il caso della deformazione di un impalcato da ponte, che potrebbe non essere correlata al processo deformativo del terreno circostante. Un'altra questione nella scelta dell'area da considerare è legata all'effetto *shadowing*, per cui spesso i punti di misura nelle immediate vicinanze dell'edificio si hanno soltanto dal lato esposto alla vista del satellite. Questo aspetto è evidenziato in Figura 3-4, dove è riportata la distribuzione dei punti dei dataset ascendente e discendente nell'area del complesso del San Michele a Ripa Grande a Roma. Di conseguenza, quando si vogliono interpolare le misure di spostamento di una zona attorno ad uno specifico edificio è fondamentale selezionare un'area sufficientemente vasta per avere una quantità di punti tale da consentire l'utilizzo di tale tecnica evitando di dover fare estrapolazioni.

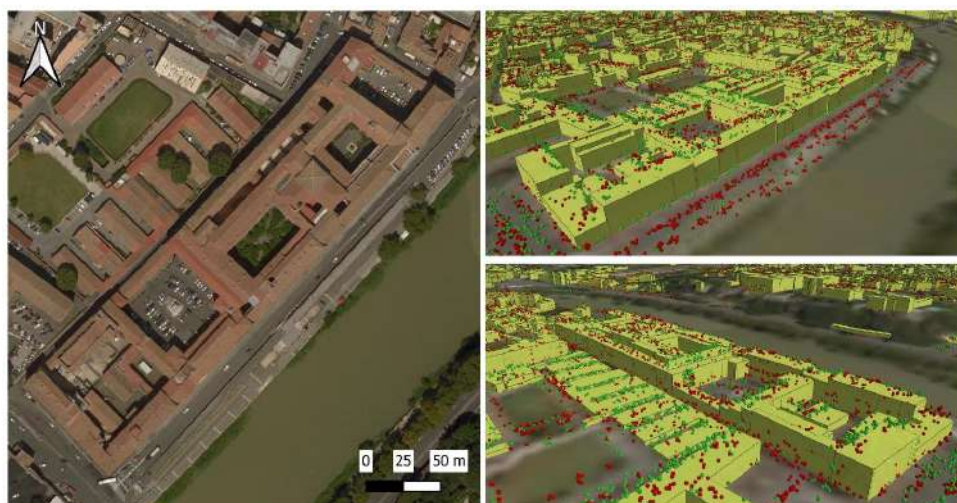


Figura 3-4 – Distribuzione dei punti di misura del dataset ascendente (rosso) e discendente (verde) per il complesso del San Michele a Ripa Grande in Roma, (Talledo et al., 2022).

Un ulteriore esempio è presentato in Figura 3-5 che mostra la distribuzione dei punti dei dataset ascendente e discendente nell'area del complesso del Corviale a Roma. In questo caso, oltre al problema legato all'effetto *shadowing*, si può osservare come il numero dei punti di misura nell'area attorno all'edificio sia molto limitato. Questo fatto rende l'utilizzo delle tecniche di interpolazione un tema critico: vanno adottate particolari cautele, poiché i risultati che si ottengono nelle aree inizialmente prive di punti di misura, ed ottenuti mediante estrapolazioni di fatto (e non interpolazioni), possono rappresentare dati meno affidabili degli altri.



Figura 3-5 – Distribuzione dei punti di misura del dataset ascendente (rosso) e discendente (verde) per l'edificio del Corviale in Roma, (Talledo et al., 2022).

3.3 UTILIZZO DEI DATI DEI DUE DATASET ASCENDENTE E DISCENDENTE

Nel caso in cui, nell'area in esame, siano disponibili i risultati delle elaborazioni interferometriche effettuate in entrambe le geometrie ascendente e discendente, si ha un aumento della quantità e della qualità delle informazioni desumibili sui fenomeni deformativi in atto.

Già solo l'osservazione della distribuzione delle deformazioni generalizzate lungo le LOS, ad esempio in termini di velocità medie di spostamento, ottenute in orbita ascendente ($V_{LOS,A}$) e discendente ($V_{LOS,D}$), permette di analizzare il fenomeno deformativo in atto. Considerando ad esempio il caso di velocità (V) reale verticale (in direzione U) riportata schematicamente in Figura 3-6a, si può osservare come il segno della misura di spostamento rilevata dal satellite sia concorde in entrambe le geometrie di acquisizione: nel caso di abbassamento in entrambe le geometrie si leggeranno valori negativi (allontanamento dal satellite), mentre nel caso di sollevamento in entrambe le geometrie si leggeranno valori positivi (avvicinamento al satellite). Inoltre, nel caso in cui l'angolo di incidenza sia uguale per entrambe le geometrie ascendente e discendente, il modulo del vettore di velocità lungo la LOS sarà uguale in entrambi i casi. Considerando invece il caso di velocità (V) reale orizzontale (in direzione E-W), riportato schematicamente in Figura 3-6b, si può osservare come le misure delle due geometrie abbiano segno discorde e, nel caso di uguale angolo di incidenza, uguale modulo. Questo è dovuto al fatto che in una geometria il satellite rilevi un avvicinamento mentre nell'altra geometria il satellite rilevi un allontanamento.

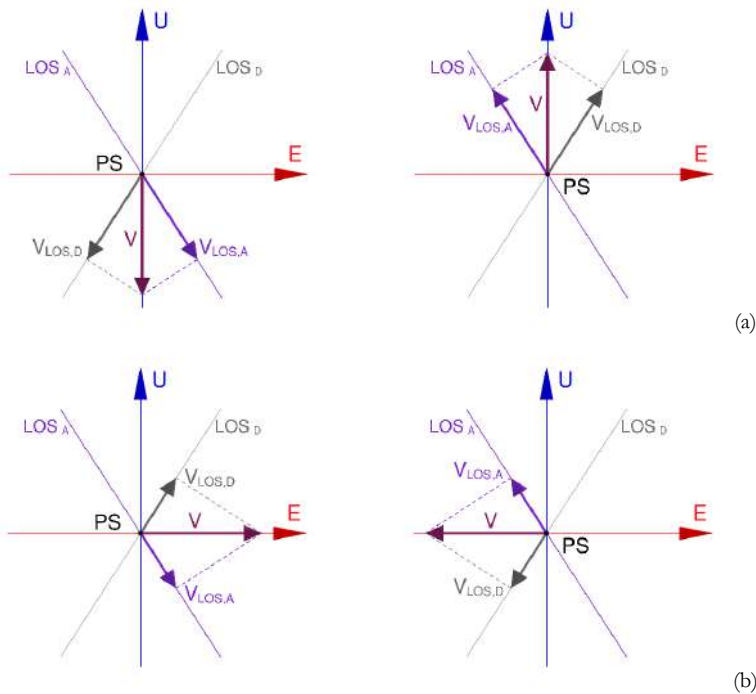


Figura 3-6 - Esempio di scomposizione del vettore di velocità media di spostamento reale in geometria ascendente e discendente. a) velocità verticale; b) velocità orizzontale, (Talledo et al., 2022).

Un primo confronto quindi dei valori di velocità di spostamento nelle due geometrie consente di individuare a prima vista se il fenomeno investigato sia caratterizzato da componenti del moto anche in direzione orizzontale (caso di valori di velocità $V_{LOS,A}$ e $V_{LOS,D}$ con segno opposto). Per questa ragione è consigliabile, quando si rappresentano mappe di velocità in termini di dati sia ascendenti che discendenti, utilizzare una simbologia diversa

per i due dataset così da non confondere i due tipi di informazione, come riportato in Figura 3-7, laddove con un rombo sono riportati i dati di velocità discendenti e con un tondo quelli ascendenti.

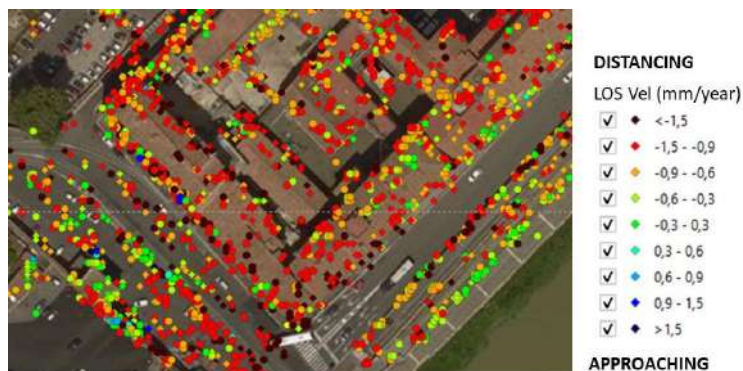


Figura 3-7 - Esempio del complesso del San Michele a Roma. Il simbolo a rombo si riferisce al dataset discendente, il simbolo circolare si riferisce al dataset ascendente.

È interessante notare inoltre come sia possibile combinare i due dataset al fine di poter stimare la direzione del vettore di spostamento nel piano Est-Verticale (non potendo risalire invece a componenti di spostamento in direzione N-S per ragioni intrinseche del sistema). Infatti, da un punto di vista ingegneristico sarebbe molto interessante poter studiare il profilo delle componenti verticale ed orizzontale del vettore velocità, per poter predire un eventuale danno legato ad esse o correlare un danno sopravvenuto ad uno spostamento che, come si potrebbe leggere, sia stato prevalentemente diretto lungo una delle due direzioni.

Il problema della composizione di spostamenti e di velocità medie di spostamento dei due dataset viene risolto da un punto di vista geometrico.

Si consideri uno stesso target a cui sono associate le corrispondenti deformazioni generalizzate (spostamenti o velocità media) $\delta_{LOS,A}$ e $\delta_{LOS,D}$ rilevate dal satellite in orbita ascendente e discendente, rispettivamente (Figura 3-8). Da sottolineare come tale condizione si verifichi nella realtà molto raramente, ad esempio quando si tratti di un punto riflettente artificiale (es. *corner reflector*), o nei casi in cui si tratti di un punto visibile allo stesso modo da entrambe le orbite. In generale per poter disporre dei valori di velocità per entrambe le orbite in uno stesso punto è necessario utilizzare tecniche di ricampionamento spaziale (es. tecniche di interpolazione, di sottocampionamento, di *clustering*, etc.).

Volendo determinare le componenti del vettore di deformazione generalizzata nelle tre direzioni E, N e verticale, noti i vettori in direzione LOS,A e LOS,D ($\delta_{LOS,A}$ e $\delta_{LOS,D}$), le incognite del sistema formato dalle due equazioni della (9) sono tre (δ_E , δ_N e δ_U) e quindi il sistema risulta non risolvibile.

Come anticipato al paragrafo 3.2, a causa dell'inclinazione dell'orbita rispetto ai meridiani terrestri e della modalità di acquisizione del segnale caratterizzata dalla vista del satellite laterale ed inclinata, si ha che il sensore durante una data acquisizione risulta molto poco sensibile alla misura della componente del moto nella direzione orizzontale N-S. Pertanto, la deformazione generalizzata in direzione N-S può essere trascurata (assumendo $\delta_N = 0$) commettendo un errore limitato e consentendo di risolvere il precedente sistema, ottenendo quindi una stima attendibile delle componenti del moto δ_E , in direzione E, e δ_U in direzione verticale.

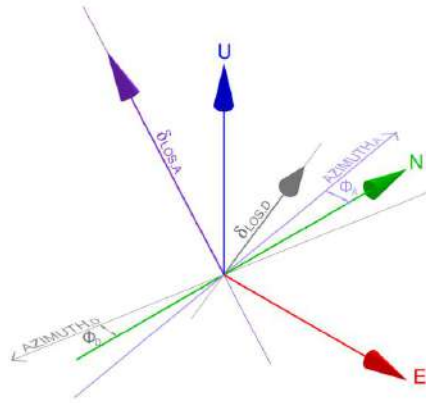


Figura 3-8 – Schematizzazione delle geometrie di acquisizione e delle direzioni lungo cui scomporre il vettore velocità (Talledo et al., 2022).

Noti i coseni direttori del satellite al momento dell'acquisizione nelle due rispettive geometrie e ipotizzando che lo spostamento in direzione N-S sia nullo, è possibile dunque calcolare le componenti verticale ed orizzontale in direzione E-W, del vettore di deformazione generalizzata reale attraverso il seguente sistema:

$$\begin{cases} \delta_{LOS,A} \cong \delta_E \cdot c_{E,A} + \delta_U \cdot c_{U,A} \\ \delta_{LOS,D} \cong \delta_E \cdot c_{E,D} + \delta_U \cdot c_{U,D} \end{cases} \quad (11)$$

in cui δ_U e δ_E sono le incognite da ricavare.

È importante ricordare che la condizione per cui le due geometrie di acquisizione identifichino esattamente lo stesso punto di misura non è praticamente mai verificata. Per tale motivo, nella maggioranza dei casi, per poter effettuare la composizione del moto descritta precedentemente è necessario procedere a un ricampionamento spaziale ed eventualmente temporale dei dati ottenuti nelle due geometrie di acquisizione.

3.3.1 Ricampionamento temporale

Il ricampionamento temporale è necessario nel caso si vogliano studiare processi deformativi in atto in termini di spostamento in un preciso istante temporale. Esso permette inoltre di ottenere un comune inizio delle misure per i dataset ascendente e discendente, oltre che dati ad intervalli di tempo costanti. Il ricampionamento temporale può essere effettuato in post-processing attraverso diverse tecniche numeriche, come interpolazioni polinomiali (tipicamente lineari o cubiche) oppure tramite interpolazioni *spline*. Queste ultime approssimano la serie temporale degli spostamenti dividendo la finestra in più sotto-intervalli e adottando per ciascuno di essi funzioni polinomiali di grado basso, raccordando i vari tratti attraverso l'imposizione di vincoli sulle derivate delle estremità di ogni sotto-intervallo. Per segnali aventi tempo di campionamento non uniforme è doveroso considerare che il teorema di Nyquist afferma che un segnale (teoreticamente per segnali a banda limitata), può essere ricostruito in maniera fedele a partire dal tempo di campionamento medio, e la frequenza di campionamento associata deve essere superiore al doppio della banda utile. Nel caso in cui si vogliano stimare valori di spostamento in finestre per le quali vi sono ampie mancanze di dati, è possibile utilizzare tecniche di analisi del segnale e modelli analitici quali modelli autoregressivi. A titolo di esempio, i modelli ARX (modelli autoregressivi con ingresso esogeno) sono capaci di predire il valore più probabile di spostamento tenendo in conto della presenza di effetti esterni che ne influenzano l'andamento, quali la temperatura o il livello di falda nel terreno. In Figura 3-9 è riportato un esempio di ricampionamento temporale. In Figura 3-9a si riportano le serie temporali dei due punti di misura, che sono sufficientemente vicini per essere combinati. In Figura 3-9b si osserva il ricampionamento della serie temporale del punto di misura in geometria ascendente rispetto agli istanti di acquisizione del punto in geometria discendente. Le serie ricampionate vengono sovrapposte a quelle originali, raffigurate con colori più chiari. In questo modo si

ottiene che le due serie temporali sono riferite agli stessi istanti temporali, in modo da poter successivamente procedere alla combinazione degli spostamenti, ovvero al calcolo delle componenti di spostamento E-W e Verticale per ciascun istante temporale. Nella serie temporale ascendente, il primo periodo è stato tagliato in modo da avere lo stesso punto di partenza per entrambe le serie temporali di spostamento. Nel caso di taglio della parte iniziale dei dati, è necessario sottrarre alla serie temporale rimanente lo spostamento misurato al momento del taglio, si veda Figura 3-9c. Se lo studio dei processi deformativi in atto è effettuato in termini di velocità di spostamento media, il ricampionamento temporale può essere in molti casi evitato (nello specifico quando l'istante di inizio delle misurazioni nelle due geometrie non sia troppo diverso), osservando come la velocità media di spostamento sia poco influenzata da pochi punti di misura in una serie temporale lunga e coerente nel tempo.

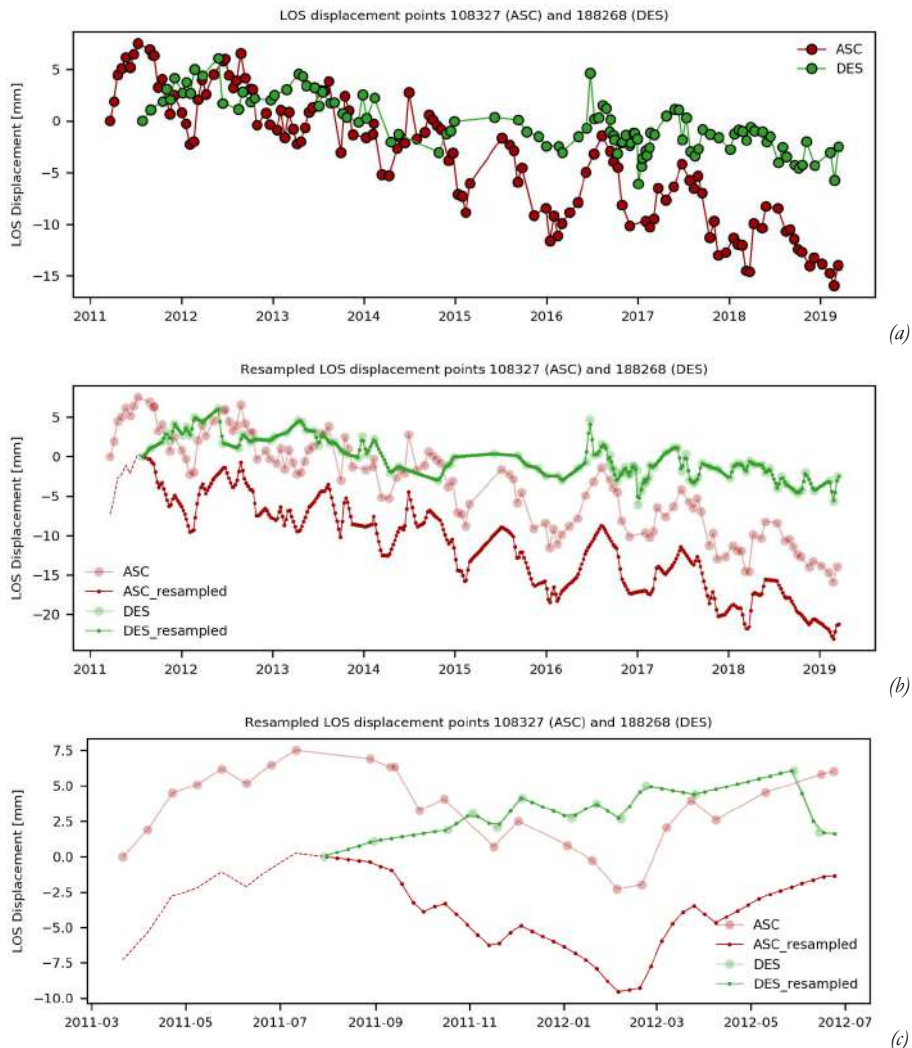


Figura 3-9 – Esempio di ricampionamento temporale per due punti sufficientemente vicini nei dataset ascendente e discendente: (a) serie temporali originali degli spostamenti; (b) serie temporali ricampionate con una frequenza di campionamento di 1 settimana; (c) ingrandimento della zona iniziale delle serie temporali di spostamento ricampionate; (Complesso del San Michele a Roma); (Talledo et al., 2022).

3.3.2 Ricampionamento spaziale

Le tecniche di ricampionamento spaziale possono essere impiegate per ottenere un insieme di punti referenziati spazialmente, cui sono associate le informazioni sugli spostamenti lungo la LOS per entrambe le geometrie di acquisizione, al fine di eseguire combinazioni successive. Le fasi di ricampionamento e combinazione possono essere eseguite sia in spazio raster, ad esempio con metodi di interpolazione (come indicato per il singolo dataset nel paragrafo 3.2 e descritto in dettaglio nel paragrafo 3.4) o tecniche di sotto-campionamento su griglia regolare (*grid-subsampling*) e.g. TRE (2020), sia in spazio vettoriale, ad esempio con approcci dove si combinano i punti più vicini (*nearest neighbors*) ovvero con tecniche di *clustering* (e.g. Zhu et al., 2018), dove i punti vengono raggruppati secondo classi omogenee. Queste classi possono contenere punti rappresentativi di uno stesso elemento strutturale ovvero caratterizzati da un comportamento omogeneo per spostamento. La categorizzazione può essere eseguita o manualmente o secondo algoritmi di Machine Learning. Lavorare con tecniche di interpolazione ha il vantaggio di fornire mappe continue, sebbene sia più difficile dar conto della natura tridimensionale dei dati DInSAR e sia più complesso combinare le serie di spostamento. Nelle tecniche di sotto-campionamento su griglia regolare l'area di interesse viene suddivisa in celle di ricampionamento quadrate di dimensione scelta arbitrariamente; ad ogni cella (che rappresenta un punto di misura sintetico) viene assegnata una velocità di spostamento pari alla media dei valori di velocità dei punti di misura che ricadono nella cella (come riportato schematicamente in Figura 3-10).

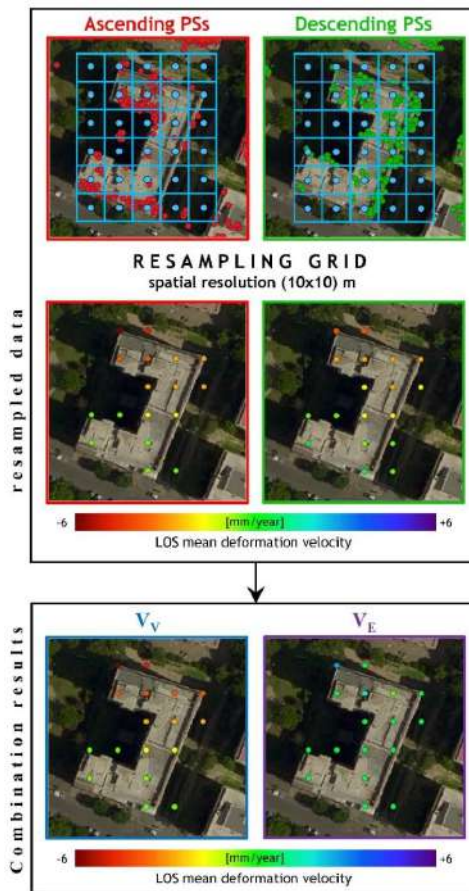


Figura 3-10 – Rappresentazione schematica di composizione dei dataset ascendenti e discendenti mediante sotto-campionamento in griglie regolari (Talledo et al., 2022).

Le operazioni di interpolazione spaziale introducono alcune incertezze dovute alle fasi di rasterizzazione dei dati, in particolare a causa di mancanza di dati in zone di *shadowing* o *layover* (come spesso accade in zone urbane dove la geometria stessa degli edifici può oscurare parte di essi alla vista del satellite) o zone di decorrelazione (come zone significativamente vegetate).

Un approccio alternativo riguarda la possibilità di combinare direttamente i moti nelle due geometrie di acquisizione usando le grandezze vettoriali con un approccio basato sui più vicini vettori (*nearest neighbor vector approach*) prima di ogni operazione di rasterizzazione (Foumelis, 2016). Gli approcci *nearest neighbors* combinano punti appartenenti ai dataset ascendente e discendente, sufficientemente vicini tra loro, nello spazio vettoriale senza alcun processo di rasterizzazione, evitando le incertezze associate. La distanza tra i punti da poter considerare come coppia da poter combinare è un valore da definire. Lavorare nello spazio vettoriale consente di tenere facilmente conto della posizione effettiva dei punti nello spazio e di combinare le storie di spostamento ai fini del calcolo delle componenti dello spostamento verticale e orizzontale E-W.

3.4 TECNICHE DI INTERPOLAZIONE SPAZIALE

Prima di procedere con la presentazione delle varie tecniche di interpolazione spaziale, è necessario sottolineare l'importanza di uno studio attento della struttura dei dati a disposizione. In particolare, è opportuno perseguire un'analisi preliminare delle possibili correlazioni spaziali tra gruppi di punti, in modo da evitare una significativa influenza delle suddette correlazioni locali sui risultati delle operazioni. Inoltre, è più significativo dal punto di vista strutturale selezionare le zone di interpolazione in funzione degli schemi statici delle costruzioni considerate nonché dei loro potenziali cinematismi. Questo con lo scopo di evitare la generazione di elaborazioni potenzialmente prive di significato dal punto di vista dell'ingegneria strutturale.

Un'interpolazione spaziale di dati SAR che ricadono in una certa area ha come obiettivo l'assegnazione di un valore anche a punti non campionati. Mediamente i punti vicini hanno valori simili tra loro, al di là di qualche possibile eccezione che possa causare una discontinuità di valori, e una buona interpolazione deve poter cogliere tali corrispondenze.

Le mappe continue che si ottengono a seguito dell'applicazione di tecniche di interpolazione dei dati risultano di più immediata e semplice lettura rispetto ai singoli dati SAR, soprattutto nel caso debbano essere utilizzate da professionisti meno esperti nelle tecniche di monitoraggio mediante dati satellitari.

Con riferimento ad un edificio, l'interpolazione spaziale dei punti può essere eseguita a quota terreno e, in certi casi, anche a diverse quote, ad esempio al livello della copertura. Il confronto tra le mappe delle componenti di velocità a diverse quote può essere utile al fine di riconoscere eventuali differenziali di spostamento variabili con l'altezza, soprattutto in termini di *drift* orizzontale. È da sottolineare, però, come l'esecuzione di una interpolazione di dati in quota possa comportare alcuni problemi, fornendo di fatto risultati non rappresentativi. Infatti, non è detto che, ad esempio, il tetto di un edificio presenti una adeguata distribuzione di punti appartenenti ai due dataset sull'intera superficie, ma può capitare che un lato presenti punti di misura ascendenti e l'altro punti di misura discendenti. In questo caso applicare le tecniche di interpolazione non è consigliato poiché di fatto ne risulterebbe una estrapolazione, piuttosto che una interpolazione. L'utilizzo delle tecniche di interpolazione deve essere limitato all'interno dell'involuppo convesso (*convex hull*) dei punti.

Si fa inoltre notare che la scelta dei punti da selezionare per effettuare l'interpolazione spaziale deve essere tarata in base alla scala alla quale si vuole effettuare l'analisi. Ciò significa che, per analisi a larga scala, la scelta dei punti può essere massimizzata prescindendo dalle loro posizioni in quota, mentre per un'analisi di dettaglio che abbia come obiettivo la lettura degli spostamenti che interessano la singola costruzione, è necessario selezionare i punti in relazione al grado di correlazione spaziale del fenomeno nonché al suo schema statico ed ai suoi potenziali cinematismi. A questo proposito è interessante notare come metodi più avanzati di interpolazione, come i metodi di *kriging*, tengano conto della correlazione spaziale delle deformazioni nell'esecuzione della interpolazione.

Nel seguito vengono introdotte le principali tecniche di interpolazione spaziale, la maggior parte delle quali possono essere eseguite utilizzando alcuni dei numerosi software GIS disponibili (e.g. QGIS, 2020; ArcGIS, 2020). Esistono due principali categorie di metodi di interpolazione: deterministici e geostatistici (e.g. Davis, 1975; Mitas and Mitasova, 1999). Nei metodi deterministici il legame fra punti vicini è espresso da una legge esplicita i cui

parametri hanno significato fisico. Un esempio di tecnica di interpolazione deterministica è la distanza inversa ponderata (*Inverse Distance Weighted*, IDW), che crea superfici da punti misurati in base all'estensione della somiglianza. Nei metodi geostatistici (o stocastici), il legame fra punti vicini è espresso da un legame statistico, che non necessariamente ha un significato fisico. Un esempio sono le tecniche di *Kriging*.

In funzione del numero dei punti e della loro distribuzione su una data area, i metodi di interpolazione si possono suddividere anche in locali e globali. I locali tengono conto solo di un certo numero di punti nell'intorno del punto in cui si vuole stimare il valore. I globali, invece, utilizzano tutte le informazioni a disposizione per la stima di tutti i valori del modello e prevedono oneri computazionali elevati. Nel primo caso, una variazione di un dato di input influenza l'output solamente all'interno della finestra di indagine locale, mentre nel secondo caso una variazione di un singolo dato di input influenza l'intera superficie di output (Figura 3-11).

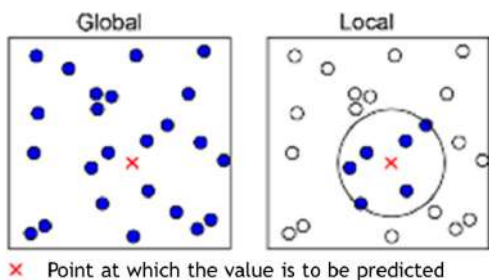


Figura 3-11 – Confronto tra punti considerati nei metodi di stima globale e nei metodi di stima locale.

Non è possibile indicare quale sia il metodo di interpolazione più appropriato in assoluto per le diverse applicazioni pratiche di utilizzo dei dati satellitari, a causa della complessità e dell'eterogeneità dei dati satellitari stessi, e della presenza di rumori o discontinuità nelle acquisizioni. Tuttavia, è importante valutare quale metodo sia più adatto in funzione della tipologia di dato disponibile e del tipo di risultato che si vuole ottenere.

3.4.1 Metodi deterministici

Di seguito vengono descritti alcuni tra i metodi di interpolazione deterministici più utilizzati: *Inverse Distance Weighting* (IDW), *Triangulated Irregular Network* (TIN) e *Spline*.

Nel metodo IDW, il valore in un punto viene stimato calcolando una media dei valori dei punti più vicini, pesati in base alla distanza dal punto stesso entro un intorno di ricerca (Figura 3-12). I pesi sono proporzionali all'inverso della distanza tra il punto misurato e la posizione di previsione, elevata ad un esponente, in genere assunto pari a 2. All'aumentare della distanza, i pesi diminuiscono con velocità legata all'esponente. Per esponente pari a 0, non si ha decremento del peso con l'aumento della distanza e la predizione risulterà uguale alla media dei punti campionati che si trovino nell'intorno di ricerca. Al contrario, maggiore è l'esponente, tanto maggiore sarà la velocità di riduzione dei pesi: per valori dell'esponente significativamente elevati, solo i punti nell'immediata vicinanza influenzano il valore predetto. In alternativa, i punti più vicini da considerare si possono fissare in numero, con un approccio del tipo *nearest neighbors*, nel caso di punti disposti in maniera irregolare; ovvero si può definire una finestra mobile in forma e dimensioni che contenga i punti da considerare. Se i dati non presentano direzioni preferenziali, è consigliabile considerare punti in un intorno circolare della posizione in cui si vuole prevedere il valore. Il numero di punti da considerare si sceglie in base alla precisione che si richiede, tenendo conto che all'aumentare del numero di punti aumenta anche il carico computazionale. Per limitare il numero di punti considerati per il calcolo si fissano alcune "barriere", ossia elementi lineari oltre i quali i punti non vengono presi in considerazione per la stima. La presenza di tali limiti fa sì che l>IDW si collochi tra i metodi di stima locale. L>IDW ha il vantaggio di essere un metodo di stima molto rapido. Tuttavia, la superficie di interpolazione che ne risulta è strettamente legata alla funzione peso usata ed al numero di punti scelti per la stima, e risente della presenza di trend globali e clusters nei dati. La tecnica IDW è un interpolatore esatto, cioè prevede un valore identico al

valore misurato in una posizione campionata. I valori previsti non possono essere maggiori o minori del massimo e del minimo valore misurato, rispettivamente. Uno dei limiti dell'IDW, comune per altro a tutti i metodi deterministici, può essere identificato nel fatto che non fornisce errori standard di previsione.

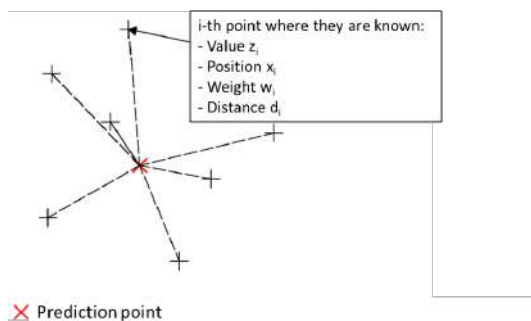


Figura 3-12 – IDW: l'influenza sulla stima è data dalla distanza del punto in cui si vuole prevedere il valore, rispetto al punto i -esimo.

La tecnica TIN è un metodo di interpolazione locale che realizza una maglia triangolare, in cui i punti campionati costituiscono i vertici della maglia, preservando così la precisione del dato di partenza. Il valore di un punto interno ad un qualsiasi triangolo viene calcolato con interpolazione lineare dei vertici del triangolo. È un metodo generalmente veloce, ma non molto accurato. Risulta molto efficace dove ci sono variazioni dei valori da interpolare in piccoli spazi. Nell'applicare questa tecnica ai punti SAR è necessario porre una particolare attenzione legata al fatto che la triangolazione di Delaunay non è applicabile nei casi in cui vi sia più volte lo stesso punto, (i.e. punti multipli, ovvero punti con la stessa posizione planimetrica e diversa quota). Software come Matlab, ad esempio, cancellano i punti multipli (quindi rischiando di perdere informazioni in modo non controllato). È quindi necessario controllare come questa tecnica sia implementata nei diversi software (eliminando punti, facendo una media nei punti multipli, etc.). Spesso, infatti, nell'elaborazione dei dati SAR può capitare di avere punti con la stessa X e Y (questo avviene ad esempio nella tecnica SBAS-DInSAR che fa ricadere punti diversi nella griglia di campionamento e a diverse quote, si veda Appendice 1).

La tecnica *Spline* (e.g. Ahlberg et al., 1967; Greville, 1969) esegue una stima dei valori attraverso funzioni matematiche definite localmente e opportunamente raccordate. I parametri che costituiscono il metodo *Spline* sono: il tipo di processo di fitting, che può creare una superficie continua o una superficie più rugosa; il peso, che definisce la forma della curva; il numero di punti attorno alla cella utilizzati nel fitting della curva. L'uso di funzioni *Spline* nell'interpolazione spaziale offre il vantaggio di utilizzare pochi punti alla volta. Anche *Spline* di basso grado sono sufficienti per interpolare la superficie in modo abbastanza accurato, perché vengono mantenute tutte le importanti caratteristiche su piccola scala. È un metodo esatto, che restituisce superfici molto smussate, di minima curvatura. Tra gli svantaggi associati a questa tecnica rientra il problema che non è adatta a grandezze che presentano forte variabilità nello spazio; inoltre, introduce anomalie in aree con assenza di dati di input.

3.4.2 Metodi stocastici

Alla categoria dei metodi stocastici appartiene il *Kriging*, in tutte le sue forme (e.g. Wackernagel, 2003; Cressie, 1993). Le tecniche di *Kriging*, introdotte nei paragrafi precedenti insieme alle limitazioni e alle avvertenze che vanno considerate quando l'attenzione è rivolta a singole opere di ingegneria civile, sono tecniche di modellizzazione che utilizzano informazioni sull'autocorrelazione spaziale dei valori misurati, al fine di stabilire numericamente quanto i valori di un certo attributo nei punti campionati siano simili fra loro, a seconda della reciproca distanza. Tali tecniche presumono che almeno alcune delle variazioni spaziali osservate nei fenomeni possano essere modellate da processi casuali con autocorrelazione spaziale.

Il *Kriging* è un interpolatore ottimale, molto vantaggioso dal punto di vista teorico, che fornisce anche una stima dell'errore. Tuttavia, la tecnica è più complessa ed onerosa rispetto ad altri metodi di interpolazione, a parità di dati di input e della finestra di ricerca e necessita l'utilizzo di software di calcolo che eseguano l'interpolazione a partire dai dati inseriti dall'utente (ad esempio QGIS o ArcGIS).

Una delle ipotesi base del *Kriging* è che la variabile da interpolare sia spazialmente omogenea, ossia vari in modo continuo tra un punto e il seguente, quindi punti lontani non sono dipendenti statisticamente, ma punti vicini sono spazialmente correlati. Pertanto, prima di applicare un metodo di *Kriging*, è necessario studiare il comportamento spaziale del fenomeno da interpolare al fine di identificare aree a comportamento omogeneo, che vanno identificate e studiate a parte.

La variabilità spaziale dei dati è quantificata tramite il semivariogramma calcolato empiricamente dai dati puntuali iniziali. Si suppone di poter dividere il segnale (correlato) dal rumore (incorrelato) attraverso la conoscenza della funzione di covarianza del segnale. I dati "empirici" del variogramma devono essere interpolati con una funzione "modello" che possiede determinati requisiti. Le più utilizzate sono le funzioni sferica, esponenziale, lineare, gaussiana, etc., Figura 3-13. I parametri delle funzioni che si usano per modellizzare il variogramma empirico possono venire stimati con diverse procedure, quali i minimi quadrati pesati, ovvero il *restricted maximum likelihood*.

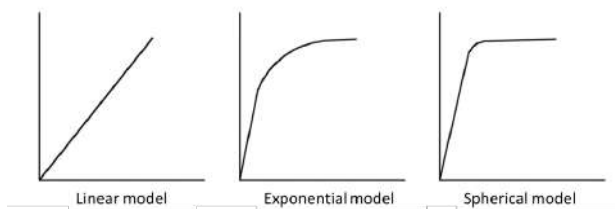


Figura 3-13 – Funzioni “modello” di semivariogramma.

Dopo avere studiato la variabilità spaziale dei dati e averla quantificata tramite il semivariogramma calcolato empiricamente a partire dai dati iniziali (e poi interpolato con una opportuna funzione) si passa alla procedura del *Kriging*. Con la procedura del *Kriging* si esegue una stima lineare di minima varianza, in una posizione nella quale il valore della variabile da stimare è incognito. Le ipotesi alla base della procedura sono stazionarietà del processo stocastico e ergodicità del processo stocastico.

A seconda delle ipotesi alla base, è possibile utilizzare diversi tipi di *Kriging*, tra cui i maggiormente diffusi sono:

- *Kriging Semplice*;
- *Kriging Ordinario*;
- *Kriging Universale*;
- *Kriging Empirico Bayesiano* (EBK).

Nei metodi di *Kriging*, la variabile di interesse $Z(s)$ è scomposta, in ogni posizione di stima (s), in una media deterministica $\mu(s)$ ed un errore casuale autocorrelato $\varepsilon(s)$:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (12)$$

I diversi tipi di *Kriging* si basano su variazioni di questa formula.

Quando la media è una costante incognita, il *Kriging* si definisce *Ordinario*. È un metodo di previsione semplice e flessibile, ma non sempre è ragionevole assumere che la media sia costante. È una tecnica adatta a dati che sembrano avere un'unica tendenza. Un suo limite consiste nel fatto che tale metodo non è adeguato per i dataset in cui si riscontra la presenza di più di un trend o di bruschi cambiamenti nei valori dei dati.

Quando la media è completamente nota, che sia costante o meno, il *Kriging* si definisce *Semplice*. Essendo nota la media, è noto anche l'errore casuale autocorrelato, dunque la stima dell'autocorrelazione sarà migliore rispetto al caso in cui l'errore viene stimato. Quando la media è una funzione deterministica e i coefficienti della regressione sono incogniti, il *Kriging* si definisce *Universale*.

Il *Kriging Empirico Bayesiano* (EBK) è un metodo di interpolazione geostatistica che automatizza gli aspetti più difficili della costruzione di un modello di *Kriging*, richiedendo una modellazione interattiva minima. Rispetto ad altri metodi di analisi, nell'EBK gli errori standard di previsione vengono valutati con maggiore accuratezza. L'EBK consente previsioni accurate di dati moderatamente non stazionari e di piccoli set di dati.

In un EBK è necessario definire tre parametri che non compaiono in altri metodi di *Kriging*: il numero massimo di punti in ciascun sottoinsieme, al crescere del quale aumenta il tempo necessario per eseguire la procedura; il fattore di sovrapposizione tra i sottoinsiemi, cioè il numero medio di sottoinsiemi in cui cadrà ciascun punto; infine, il numero di semivariogrammi che verranno simulati per ciascun sottoinsieme. Il tempo di elaborazione è maggiore rispetto ad altri metodi di *Kriging*, ed aumenta rapidamente all'aumentare del numero di punti di input, della dimensione del sottoinsieme o del fattore di sovrapposizione, oltre che con l'applicazione di una trasformazione. All'aumentare del numero di punti e/o del numero di simulazioni le previsioni diventano più precise. I parametri del semivariogramma, che definisce come la somiglianza tra i punti diminuisca con la distanza, nell'EBK sono stimati utilizzando la *restricted maximum likelihood* (REML). A causa delle limitazioni computazionali della REML per insiemi di dati di grandi dimensioni, i dati di input vengono prima divisi in sottoinsiemi sovrapposti di una dimensione specificata. In ogni sottoinsieme, poi, i semivariogrammi sono stimati nel modo seguente: inizialmente viene stimato un semivariogramma a partire dai dati nel sottoinsieme. Utilizzando questo semivariogramma come modello, i nuovi dati vengono simulati incondizionatamente in ciascuna delle posizioni di input nel sottoinsieme. Un nuovo semivariogramma viene stimato a partire dai dati simulati. Questi ultimi due passaggi vengono ripetuti un numero specificato di volte. In ogni ripetizione, il semivariogramma stimato nel primo passaggio viene utilizzato per simulare una nuova serie di dati nelle posizioni di input e i dati simulati vengono utilizzati per stimare un nuovo semivariogramma. Questo processo crea un gran numero di semivariogrammi per ciascun sottoinsieme. Per ciascuna posizione in cui si vuole prevedere il valore, la previsione viene calcolata utilizzando una nuova distribuzione di semivariogrammi generata da un campionamento basato sulla probabilità di singoli semivariogrammi dagli spettri di semivariogramma nelle vicinanze del punto. Ad esempio, se una posizione di previsione ha vicini in tre diversi sottoinsiemi (come specificato dal quartiere di ricerca), la previsione verrà calcolata usando alcuni semivariogrammi simulati da ciascuno dei tre sottoinsiemi; questi semivariogrammi sono scelti probabilisticamente in base ai loro valori di probabilità.

L'EBK non fa sì che i dati seguano una media complessiva, i valori che si discostano dalla media hanno la stessa probabilità di aumentare quanto lo sono di ridursi.

L'EBK può essere eseguito con diversi tipi di semivariogrammi: lineare, esponenziale, *thin plate spline*. La chiave per ottenere risultati affidabili è scegliere il semivariogramma che più si avvicina al comportamento del fenomeno. Ogni semivariogramma presenta vantaggi e svantaggi. Quando si sceglie un semivariogramma, è necessario tenere conto del tempo di calcolo e della flessibilità del modello (la capacità di adattarsi con precisione a una vasta gamma di set di dati).

Il tecnico che voglia applicare una tecnica di interpolazione stocastica può fare affidamento su diversi software nei quali è necessario definire solo i parametri di input.

3.5 ELABORAZIONE DEI DATI NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA

Premesso che al paragrafo 3.3.1 è già stata trattata l'analisi dei dati nel dominio del tempo, nel seguito in maniera duale si discute l'analisi dei dati nel dominio della frequenza e, per estensione, in quello congiunto tempo-frequenza. Prima di iniziare la trattazione è tuttavia doveroso ricordare al lettore che ogni tipo di elaborazione di dati, che nel presente paragrafo viene effettuata con tecniche che ricorrono all'analisi nel dominio della frequenza, ma ciò è vero in generale anche per le tecniche che trovano le loro basi nel dominio del tempo e in altri domini (e.g. tempo-scala/risoluzione), è subordinato al trattamento o ai trattamenti preliminari atti a rendere gli stessi dati sfruttabili per il singolo fine.

Si ricorda che, nel caso specifico, in realtà il dato di spostamento lungo la LOS deriva da un trattamento della misura effettuata dal radar sintetico, e dunque esso sarà subordinato alle limitazioni di quel trattamento, e.g. processi di *smoothing* e regolarizzazione, ipotesi di autocorrelazione dei dati ed esistenza all'interno dei data-set, etc. (ipotesi che dovranno essere verificate per capire se il dato è realmente sfruttabile per fini strutturali).

Dunque, assunte queste ipotesi compatibili con gli utilizzi strutturali (almeno in un primo momento), è necessario elencare alcune problematiche che si potrebbero incontrare durante l'ulteriore trattamento del dato di spostamento lungo la LOS:

- Il data-set di spostamenti lungo la LOS si riferisce a un campione elevato di punti (dell'ordine della decina di milioni di punti) e un'azione doverosa dovrebbe concentrarsi sull'eliminazione di tutti quei punti sorti da artefatti di elaborazioni precedenti o di quei punti poco significativi per analisi successive (e.g. punti che ricadono su pali della luce, etc.). Questa operazione, che può essere svolta solamente con tecniche automatiche vista la numerosità dei dati, potrebbe comportare l'eliminazione dal data-set di alcuni punti effettivamente utili e significativi per le analisi successive o potrebbe essere non totalmente efficace e produrre data-set con rimanenze di punti parassita. Per utilizzare i dati di spostamento lungo la LOS in modo affidabile e robusto queste operazioni devono essere effettuate in modo preliminare. Se non applicate a tutto il data-set, dovrebbero essere implementate per l'area di studio sulla quale si vogliono utilizzare le tecniche di analisi nel dominio della frequenza, del tempo e in altri domini.
- Il data-set di spostamenti lungo la LOS presenta un elevato numero di *missing-points*. Questo determina un tempo di campionamento non uniforme e dunque la necessità di ricorrere a tecniche di ricampionamento e interpolazione temporale nel caso si volessero rielaborare i dati. Si pensi ad esempio a una semplice operazione di gradiente (temporale) numerico per ottenere i profili di velocità lungo la LOS. Un divario eccessivo fra due dati consecutivi potrebbe comportare, ad esempio, una sottostima della velocità per un certo *range* temporale (intendendo qui come velocità il gradiente dello spostamento, e non la pendenza della regressione lineare del dato di spostamento, che sarà tuttavia dipendente dalle operazioni di ricampionamento e interpolazione, soprattutto nel caso i dati presentino forti tendenze non lineari). Il ricampionamento, inoltre, potrebbe modificare il contenuto in frequenza dei segnali. A tal proposito un'azione consigliata è quella di ricampionare i segnali al tempo di campionamento medio, ciò permetterebbe, secondo Nyquist la ricostruzione fedele di segnali con campionamento non uniforme. Ovviamente tutte queste operazioni possono avere ripercussioni sulle elaborazioni successive.
- Il data-set di spostamenti lungo la LOS è influenzato da tutta una serie di variabili ambientali e operative (*Environmental and Operational Variations* – EOVs) la cui natura è per ora oggetto di studio. Dunque, i risultati dei processamenti saranno influenzati dalla natura di queste variazioni che dovrebbero essere considerate per ottenere stime affidabili e robuste. Un elenco non esaustivo di potenziali azioni, naturali e antropiche, che potrebbero modificare il dato di spostamento lungo la LOS sono:
 - Eventi rari: come terremoti, alluvioni, uragani, incendi, crolli catastrofici del sottosuolo, ecc.
 - Eventi periodici: come piogge, nevicate, variazioni di temperatura, variazioni di umidità relativa e pressione atmosferica, variazioni delle condizioni del suolo dovute a fattori ambientali, ecc.
 - Eventi persistenti: come cedimenti, vento, traffico veicolare e altre vibrazioni antropiche, effetto dei moti di marea e altri fenomeni a bassissima frequenza che agiscono sulla terra, ecc.
- L'elaborazione dei dati è poi soggetta a limitazioni di natura statistica. Il campione temporale dei dati di spostamento lungo la LOS evidenzia una numerosità pari a circa un centinaio di valori per singola sequenza temporale. Ciò è dovuto principalmente a una bassa durata temporale delle registrazioni se comparata con il tempo di campionamento medio delle stesse registrazioni. Se da un lato la durata del segnale è vincolata dallo scorrere del tempo, dall'altro il tempo di campionamento medio è un dato non modificabile a posteriori. Dunque, è doveroso sottolineare che tutte le tecniche nate per applicazioni strutturali (che solitamente si affidano a campioni con pluri-centinaia, migliaia o decine di migliaia di valori per storia temporale) potrebbero risultare instabili, e poco affidabili, se applicate ai data-set di spostamento lungo la LOS. Ciò è vero anche perché con sequenze relativamente corte (basso rapporto durata/tempo di campionamento) è difficile riconoscere dei pattern stabili e determinare l'insorgenza di anomalie (del segnale) nel periodo di osservazione. Sicuramente il tentativo di ridurre il tempo di campionamento e stabilizzare il suo valore è una di quelle azioni su cui si potrebbe investire con sforzi futuri.
- Il data-set di spostamenti lungo la LOS presenta una localizzazione incerta (su una maglia dell'ordine di 3 x 3 m). Ciò è in contrasto con ogni tipo di tecnica utilizzata comunemente nel monitoraggio strutturale.

Con le tecniche comunemente usate infatti, il punto di acquisizione su cui è installato un sensore rimane stabile nel tempo. Nel caso dei dati satellitari il punto può subire una variazione di posizione e quindi aggiungere incertezza al dato temporale di partenza, incertezze che non sono comunemente prese in considerazione dalle tecniche tradizionali.

L'elenco, non esaustivo, delle problematiche di elaborazione vuole dunque essere un campanello di allarme sul fatto che ogni tipo di elaborazione successiva sarà soggetta alle già menzionate problematiche / limitazioni, incluse le tecniche nel dominio del tempo, frequenza, tempo-frequenza, etc.

Molte serie temporali, comprese quelle costituite da dati interferometrici satellitari, mostrano comportamenti periodici anche molto complessi. A tal riguardo, l'analisi nel dominio della frequenza fa leva su una famiglia di tecniche che consentono di studiare le caratteristiche di periodicità delle serie. Questa analisi, detta anche spettrale, implica la trasformazione dei dati dal dominio del tempo, dove vengono naturalmente osservati e registrati, al dominio della frequenza. Ciò si realizza attraverso una trasformazione ortogonale, che preserva l'energia (o la norma) del segnale.

I dettagli tecnici dell'analisi spettrale si trovano in molti testi, ad esempio un riferimento classico è quello di Priestly (1981). In breve, la covarianza delle serie temporali viene rappresentata da una funzione nota come densità spettrale. La relazione tra la funzione di densità spettrale e la sequenza di autocovarianze, che è riassunta nel teorema di Wiener-Khinchine, fornisce un collegamento tra l'analisi nel dominio del tempo e quella nel dominio della frequenza. La sequenza delle autocovarianze può essere ottenuta dalla trasformata di Fourier della funzione di densità spettrale e la funzione di densità spettrale è, al contrario, la trasformata di Fourier dell'autocovarianza.

La densità spettrale può essere stimata utilizzando uno strumento noto con il nome di periodogramma, che è la correlazione tra le serie temporali e le funzioni seno/coseno alle diverse frequenze. All'aumentare della lunghezza della serie, il periodogramma è approssimativamente indipendente per frequenze distinte (Shumway e Stoffer, 2017). Questa indipendenza può essere migliorata, così come la qualità visiva e l'interpretabilità della rappresentazione, applicando una finestra rettangolare mobile che dà luogo al periodogramma di Bartlett o con finestre diverse, che applicano una sorta di media mobile ponderata (se la finestra mobile è gaussiana si trova il celebre periodogramma di Welch).

Tuttavia, l'analisi in frequenza, come la trasformata di Fourier, è raramente adatta per l'elaborazione di serie non stazionarie o di quelle il cui contenuto di frequenza cambia nel tempo. Una possibile contromisura sarebbe quella di suddividere la serie in segmenti temporali più piccoli e analizzare il contenuto in frequenza di ogni singola frazione. Per un'analisi multirisoluzione esiste ad esempio la trasformazione *wavelet* con la possibilità di dilatazione e traslazione delle onde come funzione di base della trasformazione (Aubry e Jaffard, 2003). Ancora più generale ed efficace per l'analisi di comportamenti non-stazionari e anomalie delle serie temporali è l'analisi nel dominio congiunto tempo-frequenza, di cui al paragrafo successivo.

Vi sono poi analisi che sfruttano il dominio del tempo (e.g. *sample entropy*), della frequenza (e.g. *spectral entropy*) e del dominio congiunto tempo-frequenza (e.g. *instantaneous spectral entropy*) di più nuova concezione nel campo del monitoraggio strutturale, e basano i loro concetti sulla definizione di una grandezza della teoria dell'informazione: l'entropia. Essa rappresenta la misura di informazione media del segnale e viene utilizzata per stimare la complessità dei segnali. L'uso dell'entropia spettrale nel campo dello *Structural Health Monitoring* si basa sull'ipotesi che la presenza di danneggiamento incrementi la complessità del sistema (Farrar et al., 2010). Il concetto di complessità è stato meglio spiegato per il campo del monitoraggio strutturale da (West et al., 2019), fornendo metodi per quantificare il suo valore, appoggiandosi per esempio a note definizioni provenienti dalla teoria dell'informazione (Donajkowski et al., 2020). Fra le varie definizioni, molto interessanti ed emergenti per le applicazioni del monitoraggio sono quelle basate sulle distribuzioni in frequenza o entropie spettrali (Amiri e Modarres, 2014; Das e Leung, 2018; Lin e Chien, 2019; Ceravolo et al., 2019).

3.5.1 Analisi nel dominio congiunto tempo-frequenza

La rappresentazione di un segnale può essere altresì effettuata in un dominio congiunto tempo-frequenza, che corrisponde a mappe bidimensionali di energia istantanea spettrale del singolo segnale, che nel caso specifico è rappresentato da uno spostamento lungo la LOS o da sue proiezioni e derivazioni. Esistono diversi modi per

definire un'energia istantanea spettrale cui corrispondono altrettante rappresentazioni in tempo-frequenza (Cohen, 1989; Boashash, 1990). Il modo più noto e intuitivo per definire una rappresentazione tempo-frequenza è quello di introdurre una finestra temporale (*running window*) ed effettuare una semplice *Fast Fourier Transform* (FFT) in funzione del tempo, su cui la finestra di analisi è centrata. Il diagramma di densità di energia che ne risulta, detto spettrogramma, è spesso rappresentato in modalità contour o mesh, dove gli assi del piano di riferimento sono il tempo e il periodo (inverso della frequenza), Figura 3-14. Il grafico viene comunemente costruito a valle della rimozione di media e trend del segnale. Ogni grafico si riferisce a un punto monitorato (contraddistinto da valore di longitudine, latitudine e altezza topografica) e può essere costruito sia per orbite ascendenti che discendenti.

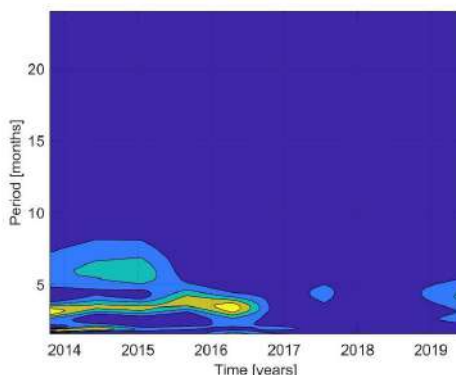


Figura 3-14 – Esempio di spettrogramma di spostamento LOS.

3.5.2 Analisi di entropia spettrale

In generale, l'entropia spettrale può essere utilizzata per determinare quanto un segnale si avvicina alla condizione di rumore bianco. Nel caso in cui il segnale derivi da un sistema meccanico, tuttavia, la lettura dell'output da un sistema di monitoraggio determina intrinsecamente la presa in conto di due fattori: (i) perturbazioni esterne e (ii) il filtro operato dal sistema. Tanto più una perturbazione esterna assume un comportamento non stocastico, tanto inferiore sarà il valore di entropia spettrale. Dato un segnale generico, proveniente o meno da un sistema strutturale, l'entropia spettrale viene calcolata a partire dalla trasformata di Fourier del segnale stesso, nel caso si ricerchi una stima dell'entropia dell'intero segnale, o dal suo spettrogramma, nel caso si sia interessati a una stima istantanea dell'entropia. L'entropia spettrale può essere stimata attraverso diverse definizioni fornite dalla teoria dell'informazione.

Assumendo la definizione di Shannon (Shannon, 1948) si ottiene la *Shannon Spectral Entropy* (SSE). In questo caso, assunto con $x(t)$ un generico segnale nel tempo, calcolata la trasformata di Fourier del segnale $X(f)$, è possibile valutare lo spettro di potenza come $S(f) = |X(f)|^2$, dove t e f indicano rispettivamente il tempo e la frequenza. Calcolato lo spettro di potenza del segnale, la SSE tratta il suo valore normalizzato come una distribuzione di probabilità delle frequenze del segnale. Per ulteriori dettagli si rimanda alla letteratura specifica (Pan et al., 2009; Sharma e Parey, 2016; Shen et al., 1998; Vakkuri et al., 2004).

Ai fini dell'applicazione di SSE a dati satellitari di tipo interferometrico (es. spostamenti lungo la LOS) l'entropia spettrale può essere rappresentata e interpretata agevolmente mediante l'uso di mappe. Indifferentemente dall'orbita scelta, la mappa rappresenta come l'entropia varia sul territorio, definendo un valore di colore per ogni punto caratterizzato da longitudine, latitudine e altezza topografica. Siccome è possibile che due o più punti abbiano stessa longitudine e latitudine ma diversa altezza topografica, la mappa è utile per rappresentare vaste aree in quanto gli errori di sovrapposizione (se pur limitati dall'uso di trasparenze) vengono mascherati dalla distribuzione spaziale della variabile. Ciò che si ottiene è quindi una mappa colorata in funzione di longitudine e latitudine. È possibile ottenere mappe per un arco temporale così come per ogni istante di osservazione. In questo

secondo caso, al monitoraggio della variabile in funzione dello spazio si aggiunge la possibilità di controllare come l'entropia su un territorio varia nel tempo. La mappa può essere rappresentata in funzione di immagini satellitari o altri *background*, tra i quali risulta molto utile quello topografico, in grado di evidenziare, tra l'altro, le infrastrutture viarie, Figura 3-15.

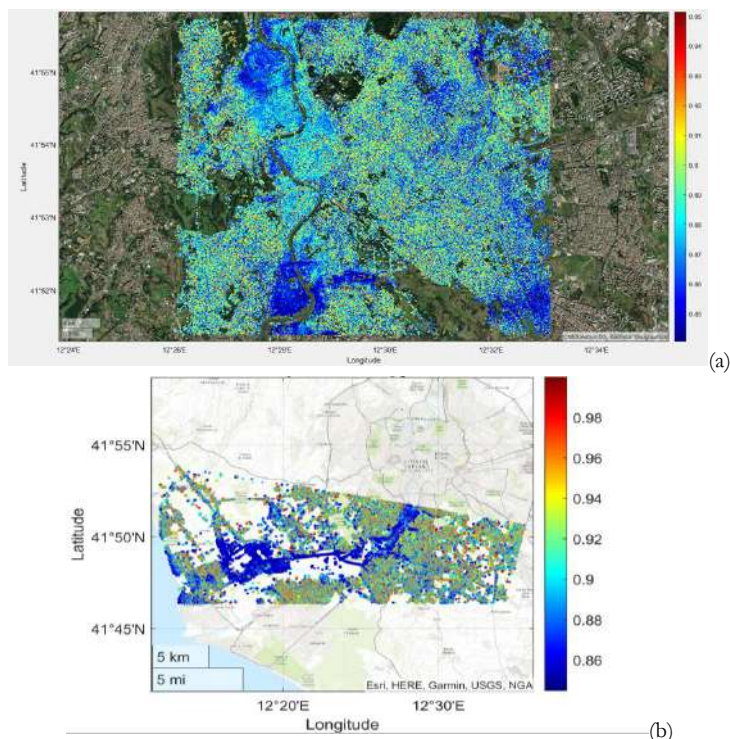


Figura 3-15 – Esempio di rappresentazione di entropia spettrale di spostamento lungo la LOS: (a) *background* satellitare; (b) *background* topografico. Le immagini si riferiscono all'entropia media nella finestra di osservazione dei dati provenienti dalle orbite discendenti.

Oltre all'utilizzo di mappe, l'entropia spettrale può essere rappresentata anche mediante diagrammi in funzione del tempo o di altre variabili. In questo caso, l'andamento dell'entropia spettrale nel tempo rappresenta in ordinata il valore di entropia del segnale analizzato (quantità adimensionale), normalizzata all'entropia del corrispettivo rumore gaussiano calcolato per segnali discreti. In ascissa riporta invece le date di acquisizione di un particolare campione, Figura 3-16. Ogni grafico è associato a un valore di latitudine, longitudine e altezza topografica, così che l'andamento si riferisce a uno specifico punto osservato da satellite. Sovrapposto al grafico dell'entropia si rappresentano, con segmenti orizzontali, i valori medi di entropia calcolati su finestre temporali aventi medie sensibilmente diverse fra di loro. L'intersezione tra la congiungente dei segmenti rappresentanti i valori medi a tratti e la linea rappresentante il valore di entropia spettrale fornisce un *changing point*, ossia un punto (istante temporale) a seguito del quale lo spettro del segnale osservato ha cambiato le sue caratteristiche di dispersione attorno alle frequenze fondamentali. I *changing points* sono utili per rilevare anomalie nel segnale nella finestra temporale di osservazione (ad esempio, *novelty detection*), intendendo per anomalia un evento raro (ossia con occorrenza limitata) nel periodo di osservazione. L'entropia spettrale può essere calcolata in funzione delle bande dello spettro che si vogliono analizzare. Risulta utile, ad esempio, separare la rappresentazione dell'entropia nelle componenti alte e basse dello spettro. L'entropia *high-pass* darà dunque informazioni su come variano le

componenti in frequenza superiori a una certa frequenza di *cut-off*, al contrario l'entropia *low-pass* darà informazioni su come variano le componenti in frequenza inferiori alla stessa frequenza di *cut-off*. In caso di scomposizione dell'entropia in *high-pass* e *low-pass*, le medie a tratti e i *changing points* si riferiscono alla componente *high-pass*, essendo la componente *low-pass* tendenzialmente più stabile e associata a fenomeni lenti.

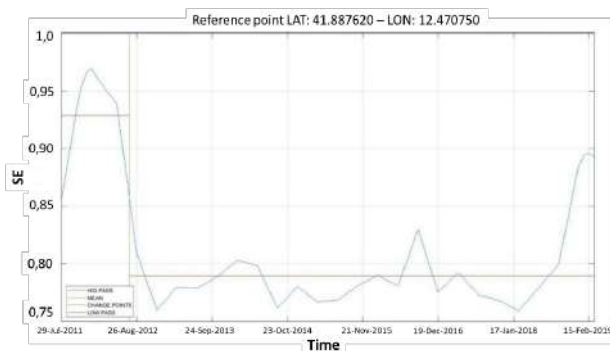


Figura 3-16 – Esempio di diagramma di entropia spettrale nel tempo.

Un secondo diagramma riguardante le grandezze entropiche è il diagramma a dispersione, Figura 3-17. In questo diagramma si riportano due variabili temporali, la prima in ascissa e la seconda, rappresentate l'entropia spettrale, in ordinata. La particolarità del grafico è che invece di riferirsi a un unico punto monitorato da satellite (contraddistinto da longitudine, latitudine e altezza topografica), rappresenta l'andamento di un sistema (ad esempio, un edificio). Un esempio di variabile riportata in ascissa è l'energia del segnale. Al diagramma di dispersione viene sovrapposta una linea di regressione di un modello definito a priori. Le curve di dispersione possono riferirsi a un intero arco temporale o essere raffigurate in funzione del tempo, ricorrendo a stime istantanee dell'entropia spettrale. In quest'ultimo caso si otterrebbe una nuvola di punti in uno spazio tridimensionale, dove la terza dimensione è rappresentata dal tempo. I valori in ascissa e ordinata possono essere raffigurati in un piano bi-logaritmico per facilitarne la lettura.

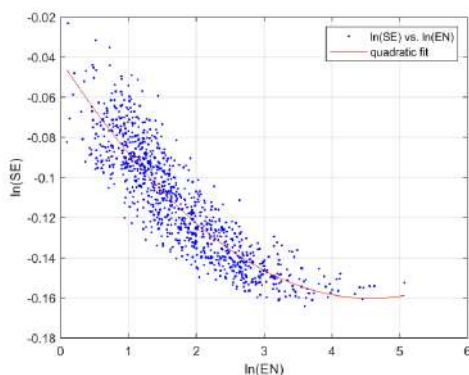


Figura 3-17 – Esempio di diagramma di dispersione entropia spettrale-energia del segnale in scala bi-logaritmica.

3.6 INTEGRAZIONE DEI DATI SAR CON RETI GNSS

Come ampiamente descritto nelle sezioni precedenti, il risultato ottenibile dalla interferometria SAR è estremamente interessante perché consente di stimare con ottima risoluzione spaziale le deformazioni del territorio a partire da alcune condizioni al contorno iniziali che però costituiscono anche un limite della tecnica stessa. Le

mappe di deformazioni derivanti dall'interferometria SAR sono infatti sempre riferite ad un punto di riferimento assunto stabile e quindi non in movimento.

A questo riguardo, è possibile migliorare la qualità dei dati ottenibili dall'interferometria satellitare integrando altre tipologie di misura. Nell'ambito della geodesia spaziale, la tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) ha subito una evoluzione in termini di prestazioni tale da diventare de facto la tecnologia principe per il posizionamento di precisione, con riferimento a ricevitori capaci di acquisire le fasi portanti dei segnali inviati dalle differenti costellazioni e, attraverso una elaborazione particolarmente sofisticata, consente di stimare posizioni con precisione fino a pochi millimetri. Per raggiungere tali precisioni sono stati definiti sistemi di riferimento sempre più precisi ed accurati che ora costituiscono standard internazionali. Ovviamente la posizione stimata con tali precisioni è quella dell'antenna che ha acquisito i dati. Non solo sul territorio nazionale ma in generale in tutto il globo antropizzato sono state installate reti di stazioni GNSS permanenti che acquisiscono con regolarità i dati e che risultano una base efficace per finalità di monitoraggio.

È dunque facile intuire come DInSAR e GNSS possano essere per molti versi complementari e, laddove sono presenti stazioni GNSS permanenti, è possibile considerare questi dati per riallineare le risultanze dell'interferometria e riportarla su sistemi di riferimento ben definiti, a vantaggio di una migliore comprensione del contenuto informativo degli interferogrammi.

Esistono studi sulle modalità di combinazione dei dati e il principale problema è legato al fatto che non sempre in corrispondenza dell'antenna GNSS è presente un PS da utilizzarsi per la calibrazione. Certamente però la comunità scientifica è allineata sul fatto che la combinazione delle due tecnologie sia quella che porterà in futuro i maggiori benefici nelle tematiche sopra indicate.

È anche possibile accoppiare dispositivi passivi retroriflettenti a stazioni permanenti GNSS, ma tali dispositivi devono essere opportunamente dimensionati a seconda della lunghezza d'onda del segnale del satellite che devono riflettere. Tale aspetto è potenzialmente critico in quanto le lunghezze d'onda nel corso degli anni si sono sempre modificate per migliorare le prestazioni dei sistemi.

3.7 POSSIBILI CRITICITÀ IN FASE DI ELABORAZIONE DEI DATI

In questo paragrafo vengono riportate alcune considerazioni su possibili criticità e/o problematiche che possono verificarsi nella fase di elaborazione delle misure satellitari per scopi di monitoraggio ed analisi strutturale. Inizialmente, si propone un focus sui fenomeni e sulle criticità che hanno un impatto sulle scelte effettuate dall'utente finale nell'ambito dell'elaborazione dei risultati interferometrici.

Un primo limite del dato SAR, come più volte ribadito, risiede nel fatto che la componente dello spostamento (ovvero della velocità media) restituito è diretta lungo la LOS (cfr. Figura 3-3). Di conseguenza, nel caso peggiore in cui lo spostamento reale fosse perpendicolare alla LOS, la misura ottenuta dall'esame dei dati SAR risulterebbe nulla. Tale aspetto assume una particolare rilevanza nei casi in cui le elaborazioni si basino solo su informazioni da un dataset (ascendente o discendente). Infine, a causa del fatto che la LOS di entrambe le orbite ascendenti e discendenti è sostanzialmente contenuta nel piano verticale E-W, in generale non si possono stimare le componenti di spostamenti/velocità in direzione N-S.

Una ulteriore considerazione riguarda l'estensione dell'area sulla quale produrre mappe di interpolazione. Essa può essere molto diversa in funzione dello scopo che si vuole perseguire. È possibile, ad esempio, studiare aree vaste (analisi a larga scala) ai fini di protezione civile, per individuare le zone più a rischio da poter indagare successivamente più nel dettaglio.

In questo caso, si può fare ricorso a metodi di interpolazione globali. Qualora, invece, si vogliano creare mappe di velocità media o di spostamento con riferimento ad un singolo manufatto o piccoli agglomerati, è preferibile utilizzare metodi di stima locali, in quanto l'utilizzo di tutti i valori del dataset può falsare le previsioni. Il metodo di stima locale più semplice da implementare per ottenere una mappa di previsione è l'IDW. Quando, invece, si vogliono ottenere stime più precise di funzione e di errore, usualmente conviene adottare una tecnica di interpolazione geostatistica (e.g. *Kriging*).

I dati SAR sono uno strumento potente per la ricostruzione della storia di spostamento di un manufatto; a partire dalla sua costruzione, potendo far emergere eventuali cedimenti strutturali, se occorsi, o palesando le benefiche

conseguenze di eventuali interventi di consolidamento. Tale ricostruzione può essere eseguita mediante una attenta elaborazione delle serie storiche di spostamento di punti che sono collocati sul manufatto stesso, tenendo anche in conto di cambi di trend, ad esempio attraverso regressioni lineari a tratti. In alcuni casi, tuttavia, l'utilizzo delle serie temporali complete potrebbe portare a interpretazioni errate delle informazioni di spostamento associate ai punti di misura coerenti (paragrafo 2.6.2), oppure a informazioni differenti a seconda del tipo di approccio interferometrico multi-temporale utilizzato per l'analisi delle deformazioni del costruito (ad esempio, approcci interferometrici di tipo PSI oppure approcci di tipo *Small Baseline* - SB). Un caso particolare riguarda il caso di edifici o manufatti demoliti durante il periodo di monitoraggio SAR. Per maggiore chiarezza, in Figura 3-18 viene riportato un esempio di distribuzione delle immagini (e dei corrispondenti interferogrammi differenziali rappresentati da linee che collegano coppie di immagini) che vengono utilizzati per l'elaborazione interferometrica avanzata nel caso di approcci PSI e approcci SB, che possono portare ad avere informazioni differenti relative allo spostamento dei punti di misura ottenuti. In particolare, in Figura 3-18 sono mostrati gli schemi di rappresentazione nel piano baseline temporale/baseline perpendicolare della distribuzione delle immagini (e dei relativi interferogrammi) utilizzati nell'elaborazione DInSAR multi-temporale in approcci di tipo PS (a sinistra) o approcci *Small Baseline* (a destra). In tali immagini sono indicate sull'asse delle ascisse le baseline temporali, mentre in quello delle ordinate le corrispondenti baseline perpendicolari; inoltre, i rombi neri rappresentano le immagini mentre le linee nere continue che connettono i vari rombi rappresentano gli interferogrammi differenziali utilizzati. Come già riportato nel paragrafo 2.5.1, gli approcci PS sono caratterizzati dal fatto di lavorare con una *master* unica e dalla mancanza di vincoli sulle baseline massime da utilizzare nel dataset interferometrico; ciò permette di lavorare con un numero minimo di interferogrammi ottenuti tra la stessa immagine *master* e tutte le altre immagini (Figura 3-18a). Invece, gli approcci SB (Figura 3-18b) sono approcci *multi-master*, per cui si ottiene un numero ridondante di interferogrammi che devono rispettare un vincolo sulle baseline spaziali e temporali, in modo da poter limitare gli effetti di decorrelazione e massimizzare la coerenza (paragrafo 2.6.2). Inoltre, in Figura 3-18 è rappresentata una linea rossa tratteggiata che indica un evento quale ad esempio un crollo, oppure un processo di demolizione. In tale caso, con riferimento ai punti di misura afferenti a tale manufatto, il processo interferometrico potrebbe fornire risultati errati ma valori di coerenza tuttavia ancora elevati. In particolare, nel caso in cui il crollo/demolizione della struttura interessi un piccolo numero di interferogrammi rispetto all'intero dataset utilizzato (ad esempio, i periodi pre- e post- evento hanno durata significativamente diversa), si corre il rischio di considerare coerenti anche punti di misura evidentemente rumorosi. Di conseguenza, è possibile che anche dopo la demolizione dell'edificio alcuni punti di misura continuino a rispondere in maniera coerente e di conseguenza essi siano presenti nel dataset, come se l'edificio fosse sempre rimasto presente.

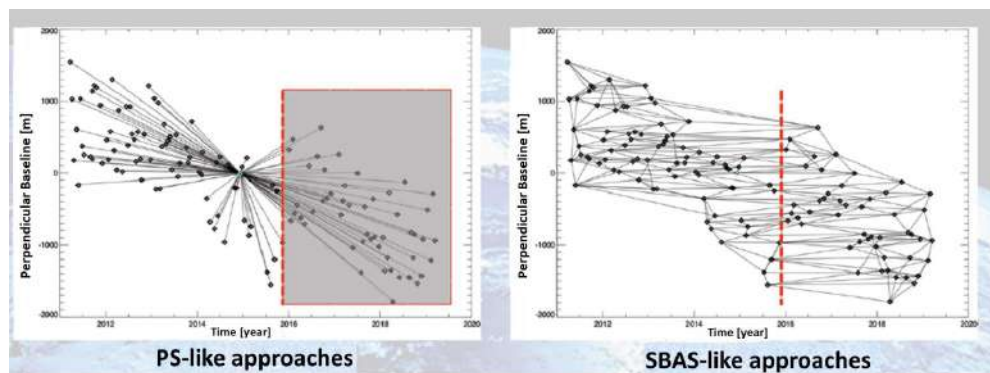


Figura 3-18 – Approccio SBAS vs approccio PS.

3.8 SINTESI DEL CAPITOLO E ASPETTI CHIAVE

In questo paragrafo viene riportata una sintesi degli aspetti principali trattati nel capitolo, con particolare riferimento all'utilizzo dei risultati dell'interferometria satellitare nel campo strutturale. Si sono analizzati i dati interferometrici, generalmente rappresentati in termini di punti di misura con una risposta sufficientemente coerente durante il periodo di osservazione. Tipicamente, i punti di misura rappresentano parti di edifici, di strutture metalliche, e in generale di elementi artificiali o naturali, la cui risposta elettromagnetica non vari significativamente tra acquisizione ed acquisizione. Per ogni singolo punto di misura vengono quindi fornite la posizione, l'intera serie temporale di spostamento ed il trend medio di spostamento come spiegato in dettaglio nel capitolo 0.

Per una corretta valutazione dello stato attuale di opere di ingegneria civile come infrastrutture ed edifici, è necessario integrare le informazioni ottenute da più punti di misura, in modo da avere una visione di insieme che riduca le incertezze delle singole letture. Per tale motivo, l'utilizzo e l'elaborazione dei risultati dei dati interferometrici deve essere effettuata utilizzando specifiche tecniche che tengano conto del maggior numero possibile di punti di misura per consentire una interpretazione dei dati ai fini del comportamento strutturale il più affidabile possibile (cfr. capitolo 0 e successivi).

Utilizzando i dati provenienti da un singolo dataset (ascendente o discendente) è possibile ottenere informazioni preliminari per quanto riguarda le deformazioni in atto, anche se tali informazioni risultano di fatto parziali, rappresentando solo la componente di spostamento lungo la LOS: è evidente, quindi, come una assenza di spostamento lungo la LOS non possa escludere a priori la presenza di un processo deformativo nelle direzioni ortogonali alla LOS (per ulteriori dettagli si veda il paragrafo 3.2). Qualora invece si abbiano a disposizione, per la struttura o l'area in esame, i risultati interferometrici per entrambi i datasets (ascendente e discendente), è possibile combinare le loro informazioni al fine di determinare le componenti del moto in direzione verticale ed orizzontale E-W. Si ricorda tuttavia, come dettagliato al capitolo 0, che praticamente nessuna informazione è ottenibile per la componente orizzontale N-S, essendo il sensore radar molto poco sensibile alla misura della componente del moto in tale direzione.

Per effettuare la combinazione delle informazioni (in termini di spostamento, ovvero di velocità media di spostamento) bisogna tenere in conto due aspetti: 1) nella realtà i punti di misura nei due datasets non sono mai gli stessi; 2) neppure i tempi di campionamento sono gli stessi per i due datasets. Mentre il primo aspetto risulta sempre di cruciale importanza e deve quindi essere affrontato prima di ogni ulteriore elaborazione, il secondo aspetto risulta rilevante soltanto nel caso in cui si vogliano combinare le informazioni delle serie di spostamento, mentre è di scarsa rilevanza nel caso in cui si operi solo sulle velocità medie (ovvero i trend medi delle serie temporali di spostamento). Il primo problema si può affrontare adottando opportune tecniche di ricampionamento spaziale, quali ad esempio tecniche di interpolazione, di sottocampionamento su griglia regolare, di *clustering* ovvero mediante approcci di combinazione di punti sufficientemente vicini. Il secondo problema, invece, necessita di un ricampionamento temporale in modo da definire lo stesso istante iniziale dell'analisi e lo stesso passo di campionamento (preferibilmente uniforme) per i due datasets. Per maggiori dettagli su questi aspetti si rimanda ai paragrafi 3.3 e 3.4.

È possibile, inoltre, fare riferimento a tecniche di elaborazione nel dominio della frequenza o nel dominio tempo-frequenza. Tali tecniche consentono di studiare serie temporali (come quelle rappresentate dai dati interferometrici) con comportamenti periodici anche molto complessi, trasformando i dati dal dominio del tempo, dove vengono naturalmente osservati e registrati, al dominio della frequenza. Per ulteriori approfondimenti su tali tecniche si rimanda al paragrafo 3.5.

È importante poi ricordare che le misure ottenute mediante analisi interferometrica sono misure relative nello spazio e fanno riferimento ad un punto particolare (*Reference Point*) che viene assunto come stabile (i.e. con spostamento nullo per tutta la durata della serie temporale, si veda capitolo 0). È possibile, qualora lo spostamento del punto di riferimento sia non nullo ma noto, ad esempio da misure mediante reti GNSS, elaborare le serie di spostamento dei diversi punti di misura sommando ad esse lo spostamento noto del punto di riferimento.

Infine, alcune ulteriori criticità che possono emergere nell'utilizzo dei dati interferometrici, che devono essere conosciute per una consapevole e razionale elaborazione e conseguente interpretazione dei dati interferometrici, possono essere così elencate (per approfondimenti si rimanda al paragrafo 3.7):

- Particolare attenzione deve essere posta quando si adottano tecniche di interpolazione spaziale, soprattutto per quanto riguarda la scelta dell'area di interpolazione e la selezione dei punti da interpolare: nei casi in cui lo studio riguardi aree vaste (analisi a larga scala) si può fare riferimento a metodi di interpolazione globali selezionando tutti i punti di misura (indifferentemente dal fatto che essi siano afferenti a zone di terreno o a parti di edifici o di infrastrutture); quando invece lo studio riguardi singoli manufatti, è preferibile fare riferimento a metodi di stima locali, in quanto potrebbero essere in atto fenomeni deformativi localizzati del terreno, e considerare quindi tutti i valori del dataset potrebbe falsare le previsioni locali. In quest'ultimo caso, bisogna prestare attenzione alla selezione dei punti (appartenenti al solo edificio, al solo terreno, ovvero ad entrambi), in relazione alla correlazione spaziale dei processi deformativi in atto sul terreno e sul manufatto al fine di una corretta interpretazione del comportamento strutturale (si veda capitolo 0 e successivi).
- Le serie temporali possono evidenziare modifiche del trend medio di spostamento: in tali casi è possibile che il riferimento ad un trend medio dell'intera storia di spostamento possa portare a interpretazioni errate, e risulta preferibile fare riferimento ad altre tecniche di interpolazione come ad esempio interpolazioni lineari a tratti o interpolazioni mediante altre funzioni.
- Nei casi in cui i manufatti subiscano trasformazioni importanti durante il periodo di analisi (e.g. manufatti demoliti o demolizioni parziali, sopraelevazioni, costruzioni di nuove porzioni di edificio/manufatto) è possibile che, a seconda della tecnica interferometrica utilizzata, si abbiano punti di misura posizionati su porzioni del manufatto che erano presenti soltanto in una parte del periodo analizzato. Per tali punti il processo interferometrico potrebbe fornire risultati errati, anche se i valori di coerenza rimangono abbastanza elevati e quindi, apparentemente, il risultato sembrerebbe affidabile. Per esempio, nel caso di un crollo/demolizione della struttura, è possibile che anche dopo il crollo/demolizione alcuni punti di misura continuino a rispondere in modo coerente e di conseguenza essi siano presenti nel dataset come se il manufatto fosse sempre rimasto presente. In tali casi, può essere utile ri-effettuare il processo interferometrico nei due periodi pre- e post-evento in modo da limitare tali errori.

3.9 RIFERIMENTI

- Ahlberg J. H., Nilson E. N., Walsh J. L. (1967). The theory of splines and their applications. Academic Press, New York. <https://cds.cern.ch/record/222864>.
- Amiri M., Modarres M. (2014). An entropy-based damage characterization. *Entropy*, 16(12), 6434–6463.
- ArcGIS (2020). www.esri.com (accessed October 30, 2020).
- Boashash B. (1993). Time-frequency signal analysis. In: S. Haykin. Editor. *Advances in Spectral Analysis*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Ceravolo R., Lenticchia E., Miraglia G. (2019). Spectral entropy of acceleration data for damage detection in masonry buildings affected by seismic sequences. *Construction and Building Materials*, 210, 525–539.
- Cigna F. (2010). Applicazione di tecniche interferometriche radar avanzate per la mappatura rapida e il monitoraggio dei dissesti idrogeologici. PhD Thesis, Università di Firenze.
- Cohen L. (1989). Time-frequency distributions-a review. *Proceedings of the IEEE*, 77(7), 941-981.
- Cressie N.A.C. (1993) *Statistics for spatial data*, John Wiley & Sons. ISBN 9780471002550.
- Das A. K., Leung C. K. Y. (2018). Power spectral entropy (PSE) as a qualitative damage indicator. *Proceedings of the 9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM-2018)*, Manchester, 10–13.
- Davis J.C. (1975). *Interpolation and approximation*. Dover Publication, New York. ISBN 978-0486624952.

- Donajkowski H., Leyasi S., Mellos G., Farrar C. R., Scheinker A., Pei J.-S., Lieven N. A. J. (2020). Comparison of Complexity Measures for Structural Health Monitoring. In: Zhu M. Editor. *Model Validation and Uncertainty Quantification*. Vol. 3, 27–39. Springer, Cham. ISBN 978-3-030-48778-2.
- Farrar C., Park G., Worden K. (2010). Complexity: A new axiom for structural health monitoring?. In: Casciati F., Giordano M. (eds). *Proc. of 5th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Sorrento, Italy.
- Foumelis M. (2016). Vector-based approach for combining ascending and descending persistent scatterers interferometric point measurements. *Geocarto International*, 33(1), 1-40.
- Greville T.N.E. (editor) (1969). *Theory and applications of spline functions*. Proceedings of an advanced seminar at University of Wisconsin, Madison, October 7-9, 1968, Academic press- New York.
- Lin T.-K., Chien Y.-H. (2019). Performance evaluation of an entropy-based structural health monitoring system utilizing composite multiscale cross-sample entropy. *Entropy*, 21(1), 41.
- Mitas L., Mitasova H. (1999). Spatial Interpolation. In: P. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, D.W. Rhind (eds). *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. 481-492. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-73545-8.
- Pan Y. N., Chen J., Li X. L. (2009). Spectral entropy: a complementary index for rolling element bearing performance degradation assessment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(5), 1223–1231.
- QGIS (2020). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org/it/site/> (accessed October 30, 2020).
- Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3), 379–423.
- Sharma V., Parey A. (2016). A review of gear fault diagnosis using various condition indicators. *Procedia Engineering*, 144, 253–263.
- Shen J., Hung J., Lee L. (1998). Robust entropy-based endpoint detection for speech recognition in noisy environments. *Fifth International Conference on Spoken Language Processing*.
- Talledo D., Miano A., Bonano M., Di Carlo F., Lanari R., Meda A., Mele A., Prota A., Saetta A., Stella A. (2022). Satellite radar interferometry: potentiality and limitations for structural assessment and monitoring, *Journal of Building Engineering*, 46, 103756.
- TRE website (2020), <https://site.tre-altamira.com/insar/> (accessed October 30, 2020).
- Vakkuri A., Yli-Hankala A., Talja P., Mustola S., Tolvanen-Laakso H., Sampson T., Viertiö-Oja, H. (2004). Time-frequency balanced spectral entropy as a measure of anesthetic drug effect in central nervous system during sevoflurane, propofol, and thiopental anesthesia. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, 48(2), 145–153.
- Wackernagel H. (2003). *Multivariate geostatistics. An introduction with applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-44142-7.
- West B. M., Locke W. R., Andrews T. C., Scheinker A., Farrar C. R. (2019). Applying concepts of complexity to structural health monitoring. In: Niezrecki C., Baqersad J. (eds). *Structural Health Monitoring, Photogrammetry & DIC*. Volume 6, 205–215. Springer International Publishing.
- Zhu M., Wan X., Fei B., Qiao Z., Ge C., Minati F., Costantini M. (2018). Detection of building and infrastructure instabilities by automatic spatiotemporal analysis of satellite SAR interferometry measurements. *Remote Sensing*, 10, 1816.

4 INTERPRETAZIONE DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE ATTRAVERSO L'UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI

4.1 PREMESSA

Il tema dell'interpretazione del comportamento strutturale, a valle dell'elaborazione dei dati satellitari condotta come descritto nel precedente capitolo, è di fondamentale importanza, anche in relazione alle tipologie di azioni i cui effetti sulle strutture sono effettivamente monitorabili con le tecniche interferometriche. A questo riguardo, il presente capitolo dettaglia le possibili diverse tipologie di azioni, individuando quelle i cui effetti sulle strutture possono efficacemente essere monitorati attraverso l'utilizzo dei dati satellitari. È infatti evidente che i dati satellitari, la cui frequenza dipende dal passaggio del satellite sull'area di interesse e varia da pochi giorni a qualche settimana (si veda anche paragrafo 1.1), forniscono buoni risultati nel caso dell'osservazione di fenomeni in lenta evoluzione, mentre risultano ad oggi meno efficaci per la valutazione di fenomeni la cui evoluzione può avere una breve durata.

Nel corso della propria vita utile, le costruzioni interagiscono innanzitutto con il contesto geologico ed ambientale nel quale sono realizzate. Le costruzioni sono pertanto soggette non solo alle azioni come classificate nei capitoli 2 e 3 delle Norme Tecniche delle Costruzioni 2018 (NTC 2018), ma anche ad ulteriori azioni indotte sulla struttura da fenomeni ambientali, meteorologici e di instabilità del sottosuolo, indipendenti dalla presenza della struttura stessa e che comunque possono generare spostamenti nella struttura rilevabili anche con la tecnica interferometrica. Pertanto, al fine di ottenere una visione d'insieme delle azioni che possono determinare movimenti monitorabili attraverso interferometria satellitare, è importante conoscere da un lato le caratteristiche della struttura, e dall'altro anche il contesto geologico del sottosuolo ed il contesto ambientale nel quale è inserita la costruzione stessa.

Infine, è evidente che la fase di interpretazione del comportamento strutturale attraverso l'analisi di dati satellitari è una attività complessa in quanto, se condotta in modo non corretto o anche con riferimento ad un orizzonte temporale non idoneo, potrebbe portare ad errate valutazioni del comportamento strutturale. Per tale motivo, nell'ultima parte del capitolo vengono discussi in dettaglio le principali criticità insite nella suddetta fase di interpretazione del comportamento strutturale, che integrano quanto già riportato nel paragrafo 3.7 in merito ai potenziali limiti della fase di interpretazione dei dati stessi.

4.2 AZIONI E LORO EFFETTI SULLE COSTRUZIONI

Si riporta di seguito una schematica classificazione delle azioni che possono determinare spostamenti (verticali/subverticali o orizzontali) nelle costruzioni civili inclusi gli edifici ordinari, strategici e a carattere monumentale (Augenti, 2009). Le azioni possono essere di varia natura, ovvero determinate da cause naturali, antropiche, o loro combinazione, ed interessare diversi ambiti spaziali passando da una scala territoriale a quella della singola costruzione.

4.2.1 Azioni legate all'interazione "attiva" terreno-struttura

Il sistema fondale di una costruzione interagisce inevitabilmente con il sottosuolo, e le azioni conseguenti possono essere suddivise in diverse categorie.

Una prima categoria è relativa al cedimento della fondazione, ovvero l'abbassamento verticale, assoluto o relativo, del piano di posa della fondazione di una struttura (o di una parte di essa) a causa del cedimento del terreno sottostante per effetto dei carichi verticali agenti sulla struttura stessa (Figura 4-1). L'abbassamento della fondazione è l'integrale del cedimento dei diversi strati di terreno indotto proprio dal carico della sovrastruttura trasferito ai diversi strati del sottosuolo attraverso la fondazione. Il cedimento al di sotto di una costruzione può non essere uniforme, ed in questo caso i cedimenti differenziali indotti sulla costruzione possono condurre a danneggiamenti della costruzione stessa nel caso in cui quest'ultima sia particolarmente rigida (ad esempio una costruzione in muratura), o a cinematismi di roto-traslazione rigida della struttura che possono portare al dissesto dell'opera ponendo problemi sia di utilizzo che, nei casi più gravi, anche di sicurezza (Burland e Wroth, 1975).

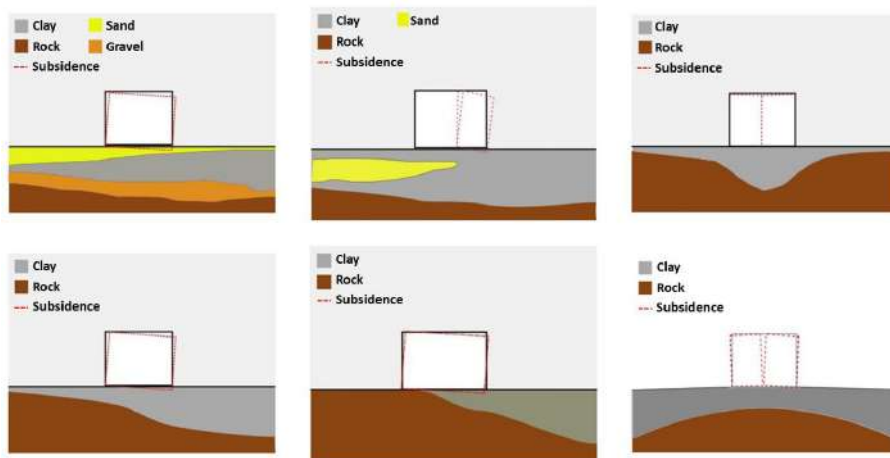


Figura 4-1 – Esempi di cedimenti non uniformi cui può essere soggetta una struttura.

Il cedimento del sottosuolo può essere distinto in una componente di consolidazione primaria ed in una componente secondaria (Terzaghi e Peck, 1967). La durata del processo di consolidazione primaria dipende da numerosi fattori e può portare a cedimenti dell'ordine dei centimetri nell'arco temporale di diversi anni (Figura 4-2a), mentre la componente secondaria che dipende dalle successive deformazioni viscosi dello scheletro solido, usualmente comportano cedimenti di minore entità. Nel caso di costruzioni di recente realizzazione, qualora l'entità dei cedimenti sia dell'ordine centimetrico, tale processo di abbassamento tempo-dipendente è apprezzabile anche attraverso *time series* di monitoraggio interferometrico (Figura 4-2b, c, d).

Limitandosi ai cedimenti causati dal peso della sovrastruttura che insiste sul terreno fondale, eccessivi cedimenti possono essere causati da:

- eccessivo carico trasmesso dalla struttura o variazione del carico della struttura non adeguatamente mitigato;
- mancato consolidamento del piano di posa;
- inadeguato dimensionamento della fondazione o delle proprietà meccaniche della fondazione;
- infiltrazioni di acque propagate nel piano di posa (cfr. paragrafo 4.2.3).

Alcune tra le cause sopra elencate possono portare ad una capacità portante non adeguata del sistema terreno - fondazione con conseguente dissesto del sistema fondale e con l'insorgenza di danni più o meno importanti alla struttura sovrastante.

Il monitoraggio attraverso interferometria satellitare può essere di ausilio nell'individuazione di tale negativa contingenza, in quanto consente di rilevare l'andamento nel tempo degli spostamenti della sovrastruttura, e pertanto l'insorgenza di trend anomali nel tempo (e.g., Bozzano et al., 2018; Chen et al., 2012; Stramondo et al., 2008), si veda anche Figura 4-2.

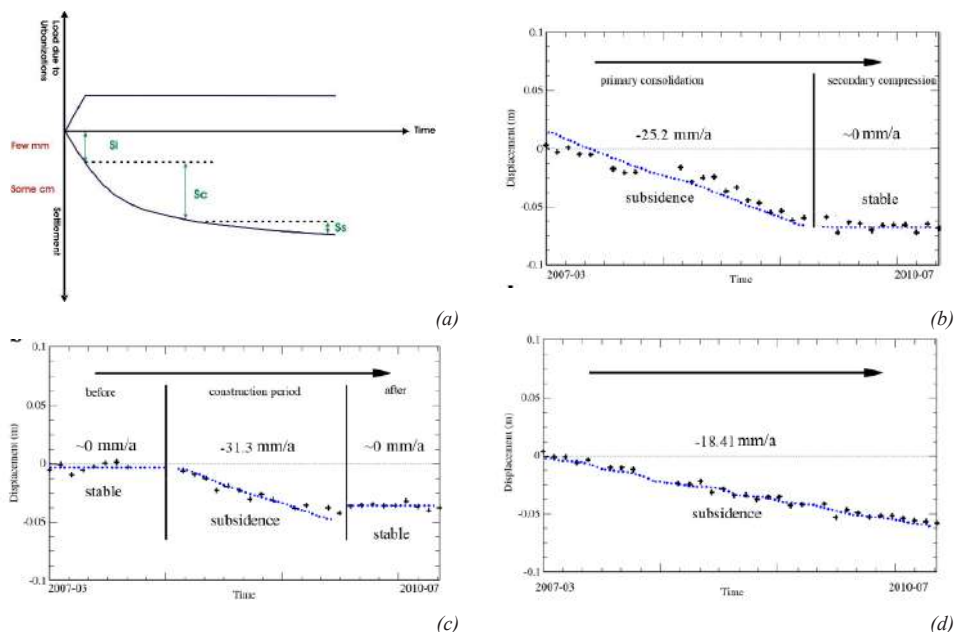
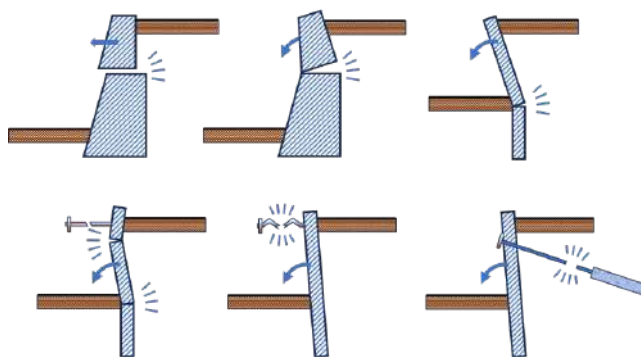


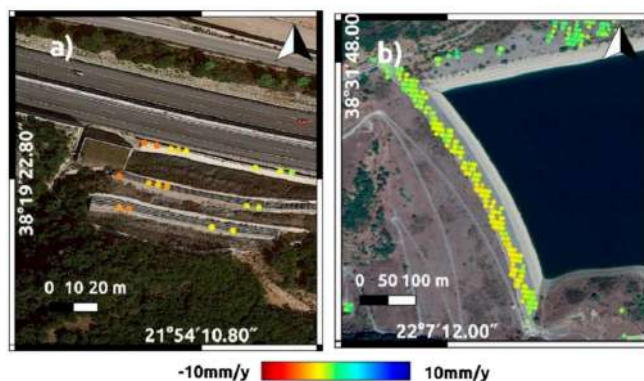
Figura 4-2 – (a) Evoluzione dei cedimenti da consolidazione nel tempo (Stramondo et al., 2008). Esempi di utilizzo dei dati interferometrici satellitari per l'individuazione di (b) effetti della consolidazione primaria e secondaria; (c) cedimenti del terreno in fase di realizzazione di un'opera, e (d) cedimenti del terreno legati ad altri fattori, quali subsidenza (confronta paragrafo 4.2.2) (Chen et al., 2012).

Una seconda categoria di problemi di interazioni terreno-struttura riguarda l'esecuzione di scavi e sbancamenti. Infatti, la rimozione di terreno può produrre una drastica riduzione del carico limite, ancor più se lo scavo è approfondito ad una quota inferiore a quella del piano di posa della fondazione.

Infine, una terza categoria riguarda le sovraspinte indotte dal terreno sulle fondazioni o loro parti, oppure sulle opere di contenimento che possono attivare spinte impreviste tali da causare il ribaltamento delle strutture (Figura 4-3). Anche in questo caso, gli spostamenti del terreno ed i conseguenti effetti sulle strutture sono con prevalente componente nel piano orizzontale e di dimensione centimetrica, e possono essere rilevati mediante le tecniche interferometriche.



(a)



(b)

Figura 4-3 – (a) Esempi di collasso di muri di sostegno e paratie; (b) Esempi di utilizzo delle tecniche interferometriche satellitari per il monitoraggio di opere di sostegno varie e dighe (Papoutsis et al., 2020).

4.2.2 Azioni indotte da movimenti del sottosuolo indipendenti dalla costruzione

I processi geologici che avvengono nel sottosuolo possono interagire con le costruzioni soprastanti, determinando azioni di vario genere che si ripercuotono passivamente sulle strutture di fondazione determinando spostamenti della sovrastruttura, anche rilevabili, e potenziali danno nel caso di spostamenti differenziali significativi.

Tali azioni possono interessare estese porzioni di territorio, coinvolgendo anche le strutture e infrastrutture che gravitano su di esse, oppure possono riguardare aree circoscritte e quindi anche una singola costruzione o un aggregato.

Parallelamente a questa distinzione spaziale, i fenomeni che avvengono nel sottosuolo possono essere classificati in processi generati da cause naturali e processi generati da cause antropiche. Talvolta, il medesimo fenomeno può essere generato e/o amplificato dalla combinazione di fattori naturali e antropici.

Nel seguito sono brevemente descritti alcuni processi, prevalentemente naturali ma anche indotti da attività antropiche, che possono interagire, attraverso le fondazioni, con le (sovr)strutture: *i*) i movimenti verticali di abbassamento e sollevamento della superficie topografica (subsidenza), *ii*) le frane, e *iii*) gli effetti sismici secondari quali frane, liquefazione ed addensamento dei terreni.

Subsidenza

I movimenti di abbassamento verticale della superficie topografica vengono genericamente indicati con il termine *subsidenza* (Figura 4-4), indipendentemente dalla causa, dal suo sviluppo spaziale ed evoluzione temporale, dalla velocità di spostamento e dalle alterazioni ambientali che ne conseguono (<https://www.isprambiente.gov.it>). Questo processo può coinvolgere territori di estensione variabile, anche molto vasti, ed è causato da fattori naturali quali principalmente la compattazione di sedimenti per effetto di carichi litostatici (e.g., D'Amico et al., 2020; Del Ventisette et al., 2015), gli abbassamenti del livello di falda nel sottosuolo (e.g., Botey e Bassols et al., 2021; Bozzano et al., 2015; Galloway e Burbey, 2011) e, secondariamente, da fenomeni a più ampia scala quali quelli relativi ad esempio alla dinamica dei sistemi vulcanici (e.g., D'Auria et al., 2015) ed alla tettonica (e.g., Baldi et al., 2009). Per quanto attiene agli spostamenti della superficie topografica legati all'evoluzione tettonica di un'area, questi possono avere componente prevalentemente verticale, oppure orizzontale, la possibilità di essere rilevati attraverso interferometria satellitare dipende anche dalla entità di spostamento e/o dalla velocità con cui essi avvengono che devono superare le soglie di rilevabilità (cfr. capitolo 0 di questo documento).

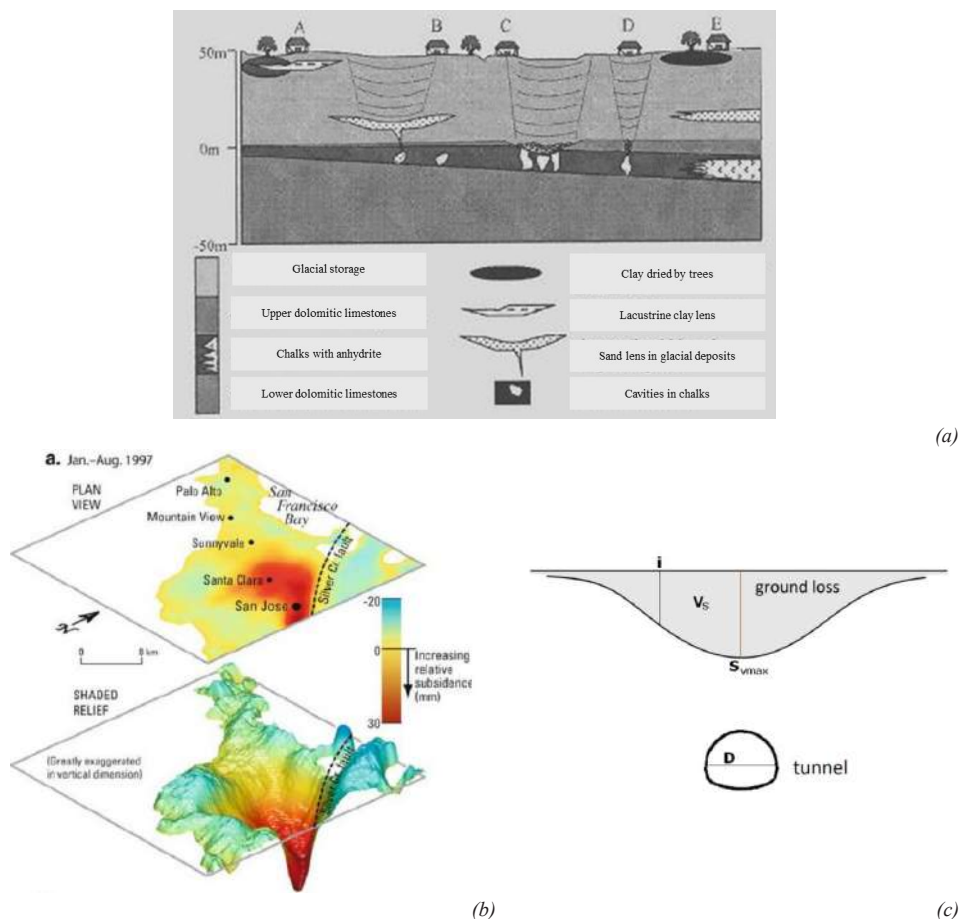
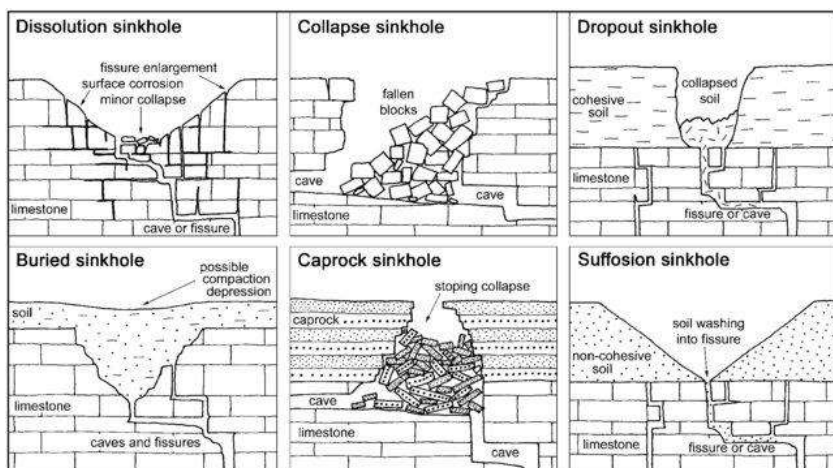


Figura 4-4 – (a) Schema concettuale di meccanismi di subsidenza in gessi (Lamont-Black et al., 2002). (b) Mappa di cedimenti dovuti alla subsidenza ottenibile da dati interferometrici satellitari (Galloway and Hoffmann, 2007). (c) Schema di deformazione del piano campagna dovuta alla realizzazione di uno scavo (Kontogianni e Stiros, 2020).

La subsidenza può essere ulteriormente aggravata o innescata da azioni antropiche quali l'eccessivo sfruttamento nel sottosuolo di falde acquifere (e.g., de Wit et al., 2021; Herrera et al., 2009; Tosi et al., 2013), l'estrazione di idrocarburi (e.g., Manzella et al., 2018), oppure l'estensiva urbanizzazione e industrializzazione di un'area suscettibile (e.g., Rosi et al., 2016; Solari et al., 2016; Tosi et al., 2002). In ambito urbano, la subsidenza può essere causata anche dalla costruzione di gallerie, superficiali o poco profonde (e.g., Antonielli et al., 2021; Kontogianni e Stiros, 2020; Milillo et al., 2018; Scoular et al., 2020).

In taluni contesti, si assiste all'alternarsi nel tempo di movimenti di abbassamento e sollevamento della superficie topografica indotti, ad esempio, da oscillazioni cicliche dei livelli piezometrici per cause naturali (oscillazioni stagionali delle pressioni dell'acqua) (e.g., Ferrario et al., 2015; Nappo et al., 2020), cicli di imbibizione ed essiccamento di terreni superficiali con elevato contenuto di minerali espandibili (Meisina et al., 2006), oppure ancora quelli causati da sistemi vulcanici in evoluzione quali il ben noto fenomeno vulcanico del bradisismo dei Campi Flegrei (e.g., Avallone et al., 1999; D'Auria et al., 2015; Lanari et al., 2004; Troise et al., 2018), oppure ancora quelli indotti da cicli ripetuti di iniezione di gas nel sottosuolo (Rucci et al., 2013).

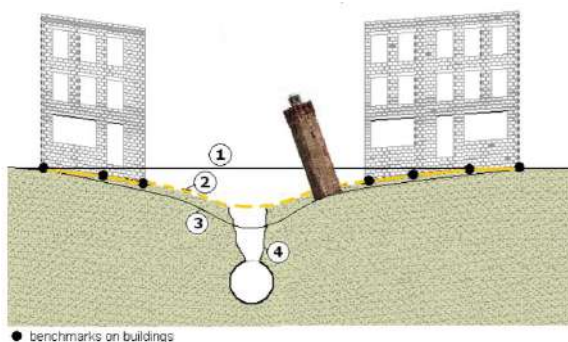
La subsidenza di settori di estensione relativamente limitata può essere segno “premonitore” di fenomeni di collasso repentini del sottosuolo noti con il termine *sinkholes* (Figura 4-5). Trattasi di sprofondamenti rapidi del terreno sotto forma di depressioni circolari, causati principalmente dal crollo di cavità carsiche sotterranee (<https://ingvambiente.com>). La presenza di un substrato di rocce solubili coperto da depositi alluvionali con basse proprietà geomeccaniche costituisce il fattore naturale predisponente questo tipo di collasso (e.g., Galve et al., 2015; Waltham e Fookes, 2003). *Sinkholes* possono anche verificarsi a causa del collasso di cavità realizzate dall'uomo, fenomeni accaduti sia in antichità sia in tempi più recenti anche in ambito urbano (cave in sotterraneo, depositi, acquedotti, fognature, drenaggi ecc.) (e.g., Esposito et al 2021; Kontogianni e Stiros, 2020; Orhan et al., 2021; Theron e Engelbrecht, 2018).



(a)



(b)

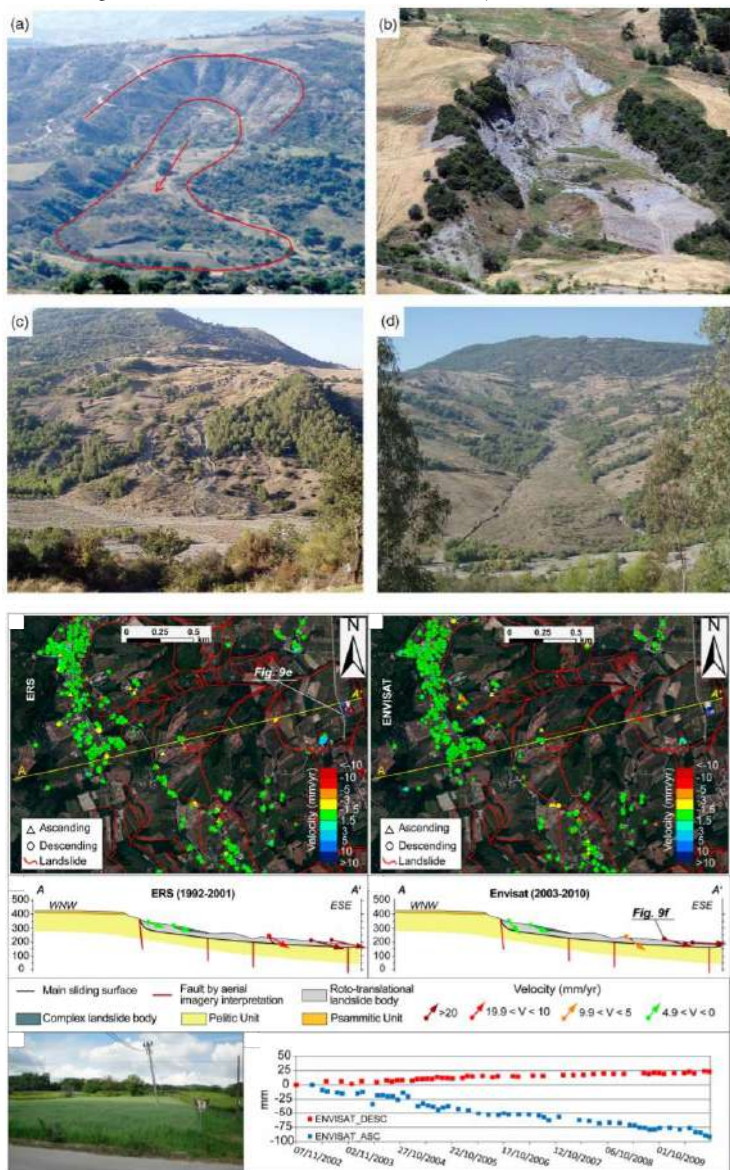


(c)

Figura 4-5 – (a) Classificazione dei *sinkholes* rispetto al meccanismo di collasso del terreno e alla natura del materiale coinvolto (Waltham e Fookes, 2003). (b) Esempi di *sinkholes* in ambito urbano e rurale (Kontogianni e Stiros, 2020; Orhan et al., 2021). (c) Deformazione del piano campagna e collasso a seguito della costruzione di una galleria in ambito urbano (Kontogianni e Stiros, 2020).

Frane

Le frane producono il movimento lungo un versante di una massa di roccia, terra oppure detrito (Figura 4-6) secondo cinematismi che possono essere classificati in modo diverso (Cruden e Varnes, 1996; Hungr et al., 2014).



(e)

Figura 4-6 – (a)-(d) Esempi di frane: movimenti complessi, scivolamento rotazionale, colata detritica e colamento (Conforti et al., 2014). (e) Esempio di rilievo degli spostamenti di frane attraverso l'uso di dati interferometrici satellitari (Bozzano et al., 2017).

L'attivazione o riattivazione di una frana, per cause naturali e/o antropiche, può causare spostamenti con componenti verticale ed orizzontale delle costruzioni che gravitano sull'area coinvolta dal movimento gravitativo.

Tali spostamenti sono rilevabili anche attraverso monitoraggio interferometrico, principalmente quelli correlati ad alcune tipologie di frana quali ad esempio scivolamenti rotazionali e traslazionali, colamenti e movimenti complessi relativamente lenti (e.g., Bovenga et al., 2012; Bozzano et al., 2017; 2020; Calvello et al., 2017; Del Ventisette et al., 2014; Miano et al., 2021; Moretto et al., 2017; Nappo et al., 2019; Raspini et al., 2017; Solari et al., 2020).

Effetti sismici secondari

In occasione di eventi sismici, è possibile osservare spostamenti indotti da effetti secondari del sisma sul sottosuolo, quali frane, liquefazione ed addensamento dei terreni. Tali spostamenti possono avere evidentemente effetti su costruzioni che insistono sulle aree coinvolte da questi fenomeni. Questi spostamenti sono considerati effetti secondari del sisma in quanto non dipendono dallo scuotimento indotto sulla costruzione dal sisma, ma da processi indotti sui terreni dallo scuotimento stesso (Fan et al., 2019). In particolare, tali fenomeni possono essere frane indotte dal sisma sui versanti, la liquefazione di terreni granulari fini che possono causare instabilità delle fondazioni delle costruzioni fino al collasso, o addensamento di terreni granulari sciolti che si può tradurre in un abbassamento del piano fondale e di eventuale fagliazione superficiale.

4.2.3 Azioni delle acque

Le conseguenze indotte dalle azioni delle acque possono manifestarsi in maniera differente a seconda dell'origine delle acque, della loro quantità e degli effetti che esse producono sulle strutture investite (Augenti, 2009 e 2012).

Analogamente al caso precedente, le acque possono provocare azioni a scala territoriale o azioni dirette sulle costruzioni. Per quanto riguarda gli effetti su larga scala, si è già accennato in precedenza come azioni antropiche, quali il prelievo di acque dal sottosuolo, possano indurre fenomeni di subsidenza di un territorio.

Le acque dei corsi fluviali possono causare fenomeni di scalzamento delle fondazioni di pile da ponte, più o meno accentuati, o di spostamento delle spalle degli stessi. Tali fenomeni possono essere improvvisi, e causare crolli di ponti durante eventi di piena, anche senza segni premonitori, oppure di più lunga durata quando, ad esempio nel caso di pile in alveo fluviale, l'erosione avviene gradualmente sotto la fondazione della pila. In questo secondo caso, dati da interferometria satellitare possono essere in grado di registrare movimenti della sovrastruttura del ponte in direzione verticale (cedimenti) oppure orizzontale (conseguenti a rotazioni della pila).

Per quanto riguarda invece le azioni alla scala dell'edificio, una prima categoria di azioni che può avere effetti sugli edifici è costituita dalle infiltrazioni. Indipendentemente dalla loro natura (reti di irrigazione o antincendio, reti fognarie per la raccolta e lo smaltimento delle acque reflue bianche e nere), ai soli fini della indicazione dei possibili effetti e dunque dei dissesti che possono indurre sugli edifici, la discriminante essenziale è costituita dal fatto che le acque risultino in pressione o meno. La differenza è sostanziale perché l'acqua in pressione (acque potabili o antincendio) si diffonde rapidamente (in poche ore o pochi giorni) nel terreno con effetti erosivi e demolitivi, producendo cavità anche di grandi dimensioni. Un ruolo fondamentale per il propagarsi dell'evento e delle sue conseguenze è costituito dalla natura e caratteristiche del sottosuolo e dall'esistenza di "recapiti" nei quali possano essere trasportati i materiali sciolti. Le acque possono pervenire da fratture presenti nel materiale costituente la tubazione idrica sottostante la pavimentazione stradale o dai giunti di estremità, oppure dal collettore fognario eventualmente danneggiato, oppure possono avere origine dal sovraccarico idraulico conseguente ad abbondanti piogge. Ad esempio, nel caso dei collettori antichi in centri storici, dimensionati per portate nettamente inferiori a quelle attuali, i manufatti possono andare "in pressione" e danneggiarsi, riversando le acque nel terreno circostante. I sintomi e gli effetti dei cedimenti differiscono al variare della tipologia di fondazione e della tecnologia di costruzione.

Le infiltrazioni possono derivare anche da precipitazioni meteoriche, come i nubifragi. Le acque meteoriche possono infiltrarsi nel sottosuolo:

- attraverso le sconnessioni della pavimentazione stradale per effetto dell'occlusione delle caditoie;
- attraverso convogliamento diretto delle caditoie pluviali nel sottosuolo, per mancanza di recapito nel collettore fognario comunale.

Una seconda categoria è costituita dagli allagamenti, intesi come infiltrazioni che assumono dimensione macroscopica, ovvero fuoriuscite d'acqua che diventano consistenti per volume e diffusione, i cui effetti possono

essere del tutto diversi. In tal caso i cedimenti possono assumere dimensioni tali da coinvolgere intere costruzioni, ma l'azione delle acque può produrre anche effetti demolitori con conseguenze difficilmente prevedibili. Spesso tali fenomeni si manifestano attraverso la comparsa di voragini che rappresentano solamente la parte visibile del processo, che risulta però di ridotta entità rispetto al suo complesso. Indagini più approfondite evidenziano, quasi sempre, l'esistenza di vere e proprie caverne di grande ampiezza, articolazione e diffusione. Una caratteristica precipua di tali fenomeni è, infatti, quella di produrre effetti dannosi anche a notevole distanza dalla sorgente, in dipendenza dei percorsi preferenziali trovati dall'acqua nel suo defluire verso vie di minore resistenza. Anche in questo caso, i fenomeni descritti sono associati ad uno stato deformativo che si sviluppa alla scala dell'edificio e che potrebbe essere rilevato tramite lo strumento dei dati satellitari.

4.2.4 Azione sismica

Le azioni sismiche sono originate da assestamenti della crosta terrestre, provocati dallo spostamento improvviso di masse rocciose nel sottosuolo. Tale spostamento è generato dalle forze di natura tettonica che agiscono costantemente all'interno della crosta terrestre provocando una lenta deformazione fino al raggiungimento del carico di rottura con conseguente liberazione di energia elastica in una zona interna della Terra detta ipocentro, tipicamente localizzato in corrispondenza di fratture preesistenti della crosta (faglie).

I sismi provocano accelerazioni a livello del suolo che causano danni alle strutture, e spostamenti residui della superficie terrestre dopo il sisma, detti spostamenti cosismici (ovvero, la deformazione istantanea e permanente causata dal terremoto), spesso dell'ordine di decine di cm in direzione verticale ed orizzontale. Le deformazioni cosismiche di una zona della superficie terrestre associate ad un terremoto sono rilevabili attraverso un interferogramma ottenuto confrontando due immagini rispettivamente pre e post sisma come già ben esemplificato alla Figura 2-18 di queste linee guida per il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009. Gli spostamenti "asismici" lungo faglie possono essere esaminati attraverso serie temporali di spostamento ricostruite con tecniche di interferometria SAR multitemporale (Cetin et al., 2014).

A spostamenti residui elevati corrisponde un effetto significativo dell'azione sismica e potenziali danni alle strutture, ma non sono un segnale diretto di danneggiamento in quanto non indicano necessariamente l'occorrenza di spostamenti differenziali sulle strutture. In linea di principio, infatti, è possibile determinare, sempre utilizzando la stessa tecnica, l'occorrenza di spostamenti su specifiche strutture, ma la determinazione di spostamenti differenziali di punti di una struttura può essere difficoltosa in quanto di 1-2 ordini di grandezza inferiori rispetto allo spostamento cosismico. Pertanto, ferma restando la validità delle misure di deformazione causate dal sisma sulla superficie terrestre, e considerato il livello di ricerca fin qui raggiunto, la stima del danneggiamento strutturale rilevato tramite tecniche SAR deve essere supportata da valutazioni e giudizi di tipo ingegneristico che tengano conto delle caratteristiche tipologico-strutturali della costruzione in esame. In ogni caso le tecniche SAR possono risultare efficaci nel definire l'estensione delle aree potenzialmente interessate da edifici danneggiati e/o crollati a seguito di eventi sismici.

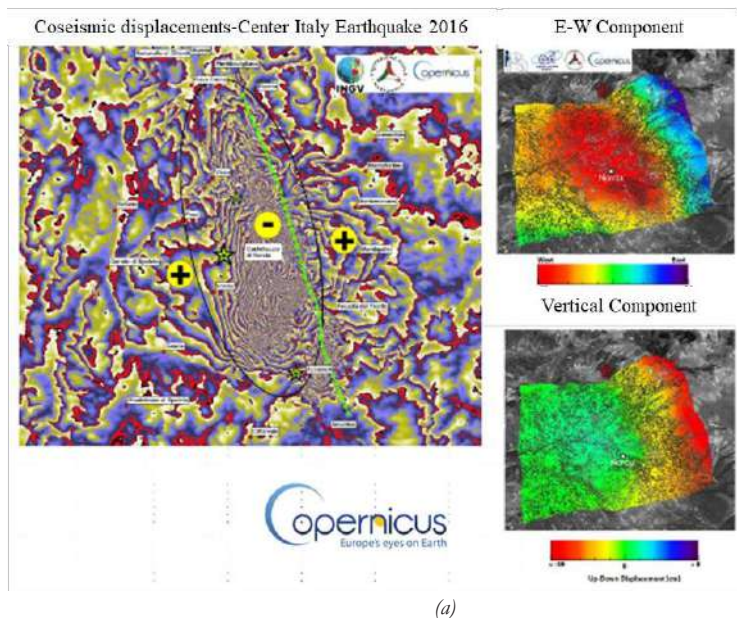


Figura 4-7 – Spostamenti cosismici ottenuti attraverso l'elaborazione dei dati della costellazione satellitare Sentinel-1 (da portale Copernicus) relativi all'evento del centro Italia del 2016. (a) Interferogramma differenziale, ogni frangia rappresenta uno spostamento di circa 3 cm (+ indica avvicinamento al sensore lungo la LOS, - allontanamento dal sensore lungo la LOS). (b) mappe delle componenti E-W (in alto) e verticale in basso dello spostamento cosismico.

4.2.5 Altre azioni sulle strutture

Di grande rilevanza, nel contesto delle presenti Linee Guida, è determinare quali effetti delle azioni sulle costruzioni possono essere rilevati con le tecniche dell'interferometria satellitare. Come ampiamente discusso in precedenza, possono essere determinati spostamenti conseguenti ad azioni improvvise (siano esse ad esempio cedimenti del sottosuolo, effetti di piene fluviali, azioni sismiche, azioni eccezionali in genere) mediante interferogrammi ottenuti confrontando due immagini prima e dopo l'evento, purché abbiano una dinamica spaziale e temporale tale da risolvere l'ambiguità di fase attraverso le tecniche di *Phase Unwrapping* (si veda paragrafo 2.4). Tuttavia, di maggiore interesse al fine delle presenti Linee Guida è la capacità di queste tecniche di rilevare spostamenti differenziali variabili nel tempo sulle strutture, al fine di divenire un effettivo supporto al monitoraggio strutturale.

A tale riguardo, è necessario innanzitutto distinguere spostamenti sulle strutture che conseguono al normale comportamento elastico delle stesse dagli spostamenti che invece possono indicare la possibile insorgenza di un danno.

Tra gli spostamenti che conseguono al normale comportamento delle strutture, si annoverano i seguenti.

Spostamenti derivanti dal comportamento elastico

Gli spostamenti elastici sono trascurabili in genere negli edifici, ma possono essere invece significativi per strutture da ponte particolarmente flessibili, in particolare in corrispondenza degli impalcati, che possono essere soggetti a spostamenti assoluti di ampiezza fino a qualche cm al passaggio di traffico pesante o per l'azione del vento. In questi casi, poiché l'immagine satellitare è colta nel preciso istante del passaggio del satellite, ma non sono noti il tipo di carichi agenti in quel preciso istante e la loro entità, lo spostamento dei *Persistent Scatterers* da un transito del satellite a quello successivo è difficilmente utilizzabile ai fini dell'individuazione di eventuali anomalie di comportamento. Nel caso in cui tali spostamenti siano significativi, essi possono inoltre portare alla perdita di coerenza tra le varie immagini radar e quindi addirittura alla perdita del dato.

Spostamenti derivanti da deformazioni termiche

Le variazioni termiche possono indurre, per certe strutture, deformazioni che fanno parte del normale comportamento delle strutture e quindi non indicano l'insorgenza di danneggiamenti. Tali deformazioni sono tipicamente ad andamento ciclico, ad intervallo stagionale o anche giornaliero. Sono particolarmente soggette a deformazioni termiche le strutture in acciaio (per le quali ad esempio si possono rilevare deformazioni cicliche in direzione verticale), ma anche strutture molto snelle quali ad esempio le torri storiche in muratura, la cui deformazione relativa di una parete rispetto alle altre per effetto del riscaldamento può provocare spostamenti orizzontali della sommità con andamento ciclico, fino a dare origine ad una vera e propria "rotazione" della torre stessa nell'arco di una giornata.

Fenomeni lenti: ritiro e fenomeni viscosi

Alcuni tipi di materiali sono soggetti a deformazioni lente nel tempo, di tipo anelastico, quali il ritiro (deformazione in assenza di carico) o le deformazioni viscosi (in presenza di carico). Ciò accade in particolare per le strutture in calcestruzzo armato e le strutture in legno. Gli effetti delle deformazioni lente sono più rilevanti nelle strutture snelle, ad esempio le coperture o gli impalcati da ponte, per le quali una deformazione lenta differenziale sulle due facce (ad esempio intradosso ed estradosso) può causare una inflessione dell'elemento stesso, che può essere dell'ordine di cm.

Chiaramente, rivestono maggiore interesse nel monitoraggio delle strutture i movimenti al contrario conseguenti a un malfunzionamento delle strutture stesse, che pertanto possono essere un segnale premonitore dell'insorgenza di un danneggiamento. A tale scopo, è chiaramente necessario riuscire a distinguere, in una serie temporale, il contributo elastico derivante dai fenomeni sopra citati da quello potenzialmente anelastico indice di danno, e ciò può essere fatto unicamente, allo stato attuale, esaminando serie temporali di una certa lunghezza e disponendo, possibilmente, anche di dati on-site (quali la temperatura in corrispondenza dell'opera). Per tutti questi motivi, allo stato attuale l'analisi interferometrica di dati satellitari può essere un importante ausilio per il monitoraggio delle strutture (consentendo anche di analizzare dati indietro nel tempo), evidenziando potenziali situazioni di attenzione, ma non può da sola rappresentare un sistema di *early warning* per la gestione della sicurezza attiva di un'opera, sia essa un edificio o una infrastruttura.

4.3 IL SUPPORTO DELLA RICOSTRUZIONE DELL'ASSETTO GEOLOGICO DEL SOTTOSUOLO PER L'UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI

Ai fini di una robusta interpretazione del dato interferometrico satellitare, è fondamentale la conoscenza dell'assetto geologico del sottosuolo con cui interagisce la costruzione, oltre che della tipologia di azioni cui la costruzione è soggetta (vedi paragrafo 4.2).

Per avere un quadro conoscitivo dell'assetto geologico del sottosuolo dell'area di interesse, si ricorre al rilevamento geologico di sito generalmente integrato da sondaggi geognostici. La rappresentazione dell'assetto geologico di un'area può essere bidimensionale (2D), ovvero attraverso una carta geologica che schematizza in 2D la realtà tridimensionale, corredata da sezioni geologiche interpretative, oppure direttamente tridimensionale (3D), ovvero con l'ausilio di modelli 3D del sottosuolo che rappresentano più realisticamente un assetto.

Le ricostruzioni 2D e 3D del sottosuolo di un'opera permettono una più esaustiva interpretazione del dato interferometrico satellitare. Ad esempio, dal confronto tra mappe di velocità/spostamento derivate dai dati interferometrici e le carte geologiche è possibile ricondurre, in analisi ad ampia scala, cluster di punti PS con diversi intervalli di velocità alla distribuzione spaziale di diverse litologie presenti nel sottosuolo (e.g., Bozzano et al., 2020; Meisina et al., 2008; Milone e Scepi, 2011; Nappo et al., 2020 – Figura 4-8).

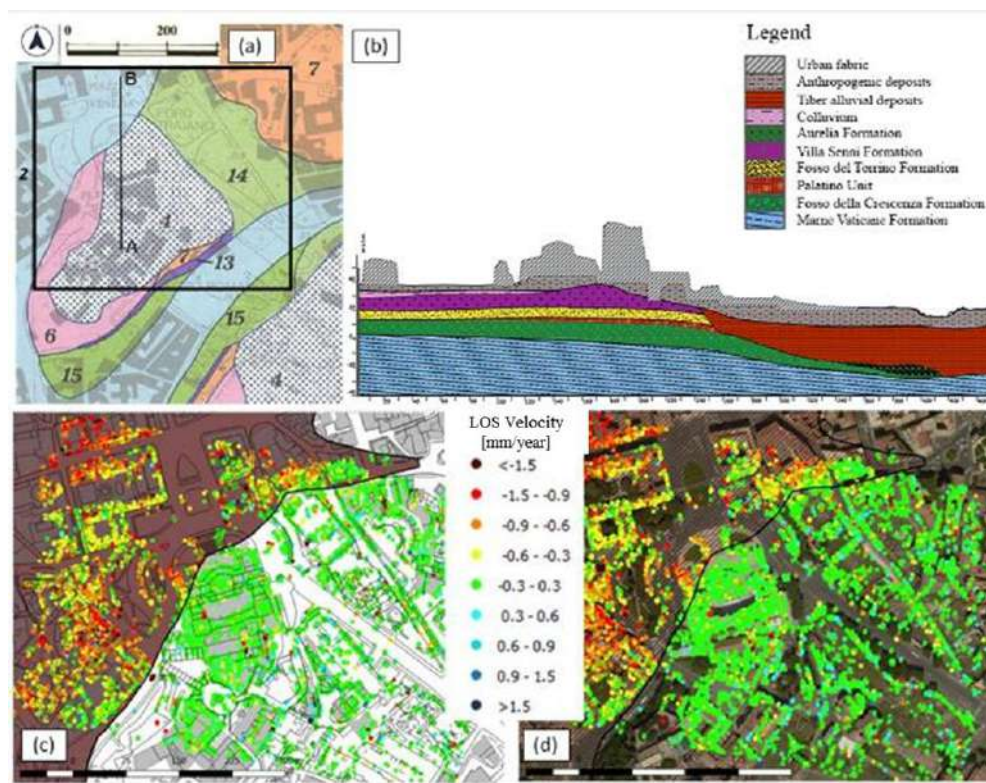


Figura 4-8 – Esempio di correlazione tra cluster di PS con diversa velocità di spostamento e litologie differenti. (a) Carta geologica del centro storico di Roma (fonte ISPRA) nell'area di Piazza Venezia (modificata da Marra e Rosa, 1995): 2 – Depositi alluvionali recenti ed attuali; 4 – Formazione Aurelia; 6 – Tufo lionato; 7 – Piroclastiti di ricaduta dei Monti Sabatini; 13 – Unità del Palatino; 15/14 – Unità del Paleotevere 2 (Formazione di Fosso della Crescenza); il riquadro nero evidenzia l'area rappresentata in (c) e (d). (b) Sezione geologica lungo la traccia AB in (a) (Bozzano et al., 2020). (c) e (d) Distribuzione delle velocità registrate dal satellite Cosmo-SkyMed in orbita ascendente e discendente rappresentati sulla Carta Tecnica Regionale ed immagine satellitare orto-rettificata (modificato da Bozzano et al., 2020); si noti come i PS evidenziano velocità di spostamento negative maggiori in corrispondenza dell'area in cui nel sottosuolo sono presenti depositi alluvionali recenti compressibili (2 in Figura (a) e colore marrone in (c) e (d)) rispetto alla restante area in cui nel sottosuolo sono presenti formazioni geologiche ascritte al bedrock rigido.

Analogamente, le sezioni geologiche possono supportare l'interpretazione “qualitativa” delle distribuzioni di velocità di spostamento registrati in superficie dai dati interferometrici, che possono essere correlati con le variazioni di spessore di strati con diverse proprietà geomeccaniche (e.g., Nappo et al., 2021; Peduto et al., 2017; Tosi et al., 2009 - Figura 4-9).

Per analisi di carattere più quantitativo, è possibile confrontare le deformazioni della superficie topografica rilevate dai dati interferometrici satellitari con le deformazioni simulate da modelli numerici 2D (e.g., Catalão et al., 2016; Lopez-Vinielles et al., 2021).

Laddove la densità di informazioni 1D (ad esempio, verticali di sondaggio) sia sufficiente, è possibile derivare anche un modello 3D dell'assetto geologico del sottosuolo (e.g., Bozzano et al., 2018; Calderhead et al., 2011; Ponzo et al., 2021) che consente di visualizzare nello spazio successioni stratigrafiche più o meno complesse apprezzandone anche i relativi rapporti geometrici (Figura 4-10).

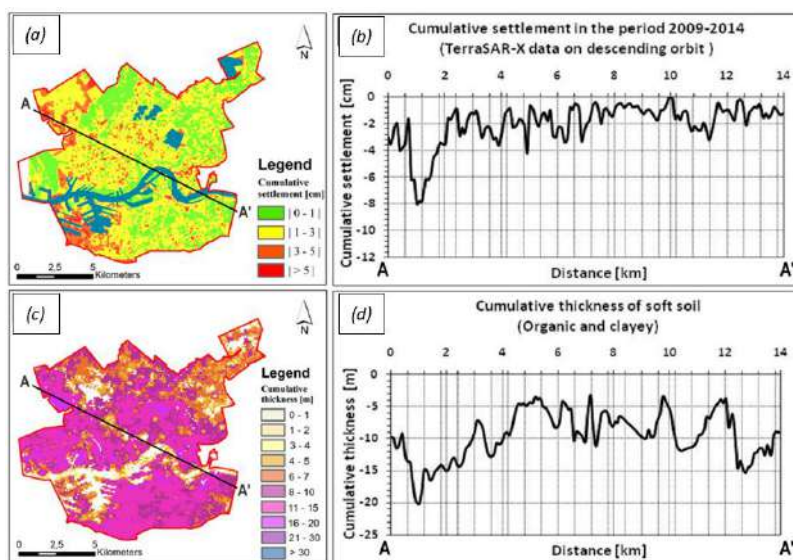


Figura 4-9 – Esempio di correlazione qualitativa tra (a)-(b) il cedimento registrato sulla superficie topografica dai dati interferometrici satellitari e (c)-(d) lo spessore delle litologie a più elevata compressibilità (e.g., torbe e argille) cui è associato il cedimento (modificato da Peduto et al., 2017).

I modelli geologici 3D possono avere un diverso grado di conformità con la realtà rappresentata, funzione della combinazione della complessità di quest'ultima e della densità di informazioni disponibili. Ciononostante, tali modelli possono rappresentare aree di diversa estensione e consentire analisi dalla scala di dettaglio ad una scala più ampia. Un ulteriore utilizzo di tali modelli geologici 3D è l'integrazione con i modelli strutturali delle costruzioni oggetto di indagine (e.g., Miano et al., 2022; Ponzio et al., 2021 – Figura 4-11). L'integrazione dei modelli può avvenire in ambiente BIM (Building Information Modeling) al fine di effettuare delle analisi più avanzate del complesso costruzione – sottosuolo e delle interazioni tra di essi (Figura 10-24).

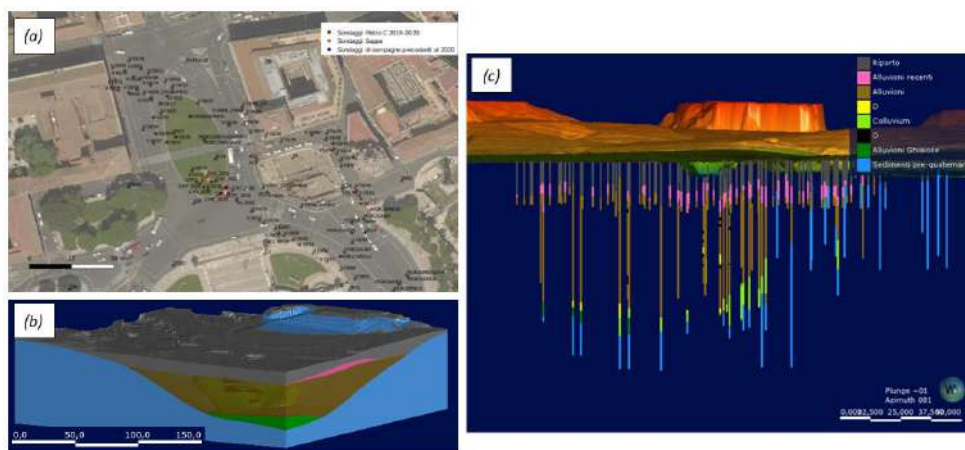


Figura 4-10 – Esempio di modellazione 3D dell'assetto geologico di Piazza Venezia (Roma) derivante da circa 193 sondaggi geognostici 1D (dati non pubblicati). (a) Localizzazione delle verticali di sondaggio. (b) Modello geologico 3D. (c) Visualizzazione 3D della superficie topografica sovrapposta alle verticali di sondaggio utilizzate per realizzare il modello geologico.

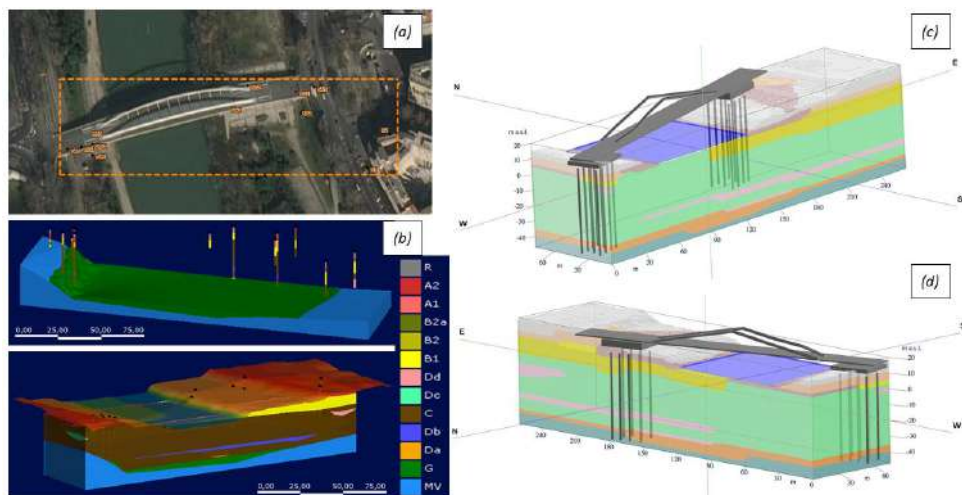


Figura 4-11 – Esempio di integrazione tra modello geologico e modello strutturale del Ponte della Musica (Roma) (integrato da Ponzio et al., 2021). (a) Localizzazione delle verticali di sondaggio. (b) Fasi di ricostruzione del modello geologico: dalle verticali di sondaggio al modello 3D. (c) - (d) Vista del modello geologico 3D (in trasparenza rispetto al modello in (b)) integrato con il modello semplificato del ponte; da notare che gli elementi verticali ivi rappresentati costituiscono i pali di fondazione delle spalle del ponte.

Infine, va ricordato che i processi geologici del sottosuolo possono evolvere con un andamento deformativo non-lineare nel tempo legato alla natura stessa del processo geologico, come i processi di consolidazione, oppure al verificarsi di improvvise accelerazioni o inneschi esterni di tali processi, come i movimenti verticali di abbassamento e sollevamento della superficie topografica per decremento/incremento delle pressioni dell'acqua nel sottosuolo, oppure l'innesco di un movimento di versante a causa di variazioni del regime di flusso delle acque sotterranee o di interventi antropici. Tali evenienze possono essere tentativamente interpretate in fase di post-processing dei dati interferometrici satellitari mediante l'analisi delle serie temporali di spostamento (e.g., Bozzano et al., 2015; 2018; Cigna et al., 2011; Nappo et al., 2020; Tosi et al., 2009). Qualora le serie temporali mostrino un andamento “anomalo” dello spostamento al suolo, ovvero bruschi “salti” nel trend di spostamento (Figura 4-12), questo deve suonare come un campanello di allarme ed essere seguito da una più attenta e dettagliata analisi del contesto geologico, geomorfologico, idrogeologico ed ambientale (Bozzano et al., 2015) in cui l'opera è realizzata.

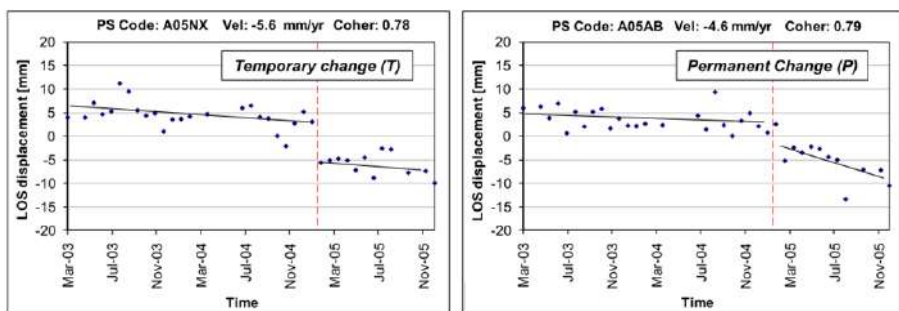


Figura 4-12 – Esempio di un “anomalo” trend di spostamento al suolo derivato da dati interferometrici satellitari (modificato da Cigna et al., 2011).

4.4 CRITICITÀ NELLA FASE DI INTERPRETAZIONE DEI DATI SATELLITARI

In questo paragrafo vengono sinteticamente descritte alcune criticità che possono emergere durante l'utilizzo dei dati interferometrici satellitari ai fini dell'interpretazione del comportamento strutturale delle costruzioni. In particolare, si farà riferimento a possibili criticità comuni a tutte le tipologie strutturali, mentre criticità nel caso di specifiche tipologie di strutture (edifici in muratura e calcestruzzo armato, infrastrutture, opere monumentali ed aree archeologiche) saranno trattate nei relativi capitoli.

Un primo aspetto da evidenziare, in termini di interpretazione del comportamento strutturale, riguarda la selezione dei punti di misura (*Persistent Scatterers* - PS) da considerare in funzione delle analisi da svolgere (analisi a larga scala o alla scala dell'edificio, si veda anche paragrafo 3.4). L'utilizzo di tutti punti a disposizione può, infatti, non essere sempre la scelta più opportuna, ma deve essere valutato caso per caso, a seconda del grado di correlazione spaziale dei fenomeni deformativi a livello di terreno e di costruzione (si pensi ad esempio agli spostamenti dell'impalcato di un ponte, non necessariamente correlati a quelli del terreno sottostante).

Partendo dalla considerazione generale che conviene sempre utilizzare il maggior numero di PS possibile al fine di minimizzare le incertezze legate alla singola lettura, è necessario riflettere sulla differente interpretazione, qualora si usino singoli PS, rispetto all'adozione di tecniche di interpolazione che includano un numero superiore di punti di misura. In relazione a questo ultimo aspetto, è necessario avere ben chiare le condizioni di applicabilità delle diverse tecniche di ricampionamento spaziale ed i loro limiti, al fine di evitare di incorrere in possibili errate interpretazioni di un fenomeno deformativo (si veda paragrafo 3.3.2 per dettagli). Inoltre, si evidenzia come, per applicare correttamente le tecniche di interpolazione, sia necessario raggiungere un adeguato livello di conoscenza del sistema strutturale in analisi, in modo da evitare di utilizzare dati provenienti da punti appartenenti a porzioni di struttura con differente comportamento (ad esempio, unità strutturali di edifici separate da giunti strutturali o nel caso di ponti con campate aventi comportamento strutturale significativamente differente).

Un ulteriore aspetto di grande rilevanza, che può causare errate interpretazioni dei dati, è legato al fatto che tutte le misure satellitari di spostamento sono di tipo differenziale e quindi sono di fatto misure relative sia nel tempo - rispetto all'istante iniziale - che nello spazio - rispetto al punto di riferimento. Di conseguenza, tutte le analisi, o monitoraggi strutturali, basate sugli spostamenti, sono relative chiaramente al periodo di osservazione e non si riferiscono all'intera storia pregressa dell'edificio. Ad esempio, gli spostamenti cumulati, essendo questi riferiti all'istante iniziale dell'osservazione satellitare, non possono essere direttamente utilizzati come misura dello spostamento effettivo della costruzione, a meno di non integrarli con informazioni di dettaglio sullo stato deformativo della costruzione e del terreno fino all'istante iniziale. Particolare attenzione va quindi posta laddove si vogliano fare previsioni future o analisi retrospettive ed è, quindi, sempre buona norma integrare i dati satellitari con informazioni specifiche ricavabili da campagne di indagini in sito.

Infine, particolare attenzione va sempre posta nell'interpretazione del dato "spostamento" ad un certo istante della storia temporale, che non può essere utilizzato come valore deterministico, ma deve sempre essere interpretato da punto di vista statistico. In generale è fondamentale osservare il trend di spostamento per poter correttamente interpretare il singolo dato di spostamento nei singoli istanti. Il valore zero assunto per lo spostamento dell'istante iniziale deve essere sempre considerato affetto dallo stesso errore di tutte le altre misure.

Una volta ottenuta con sufficiente affidabilità una stima degli spostamenti della costruzione in esame, è possibile adottare formulazioni empiriche o semi-empiriche per correlare tali spostamenti a specifici potenziali livelli di danno. Inoltre, integrando tali informazioni con le proprietà meccaniche dei materiali attraverso il processo di conoscenza descritto delle norme, è possibile utilizzare la storia di spostamenti come input per valutazioni strutturali di tipo numerico, da eseguirsi, ad esempio, mediante modellazione agli elementi finiti.

A questo riguardo, nei capitoli seguenti saranno approfondite le tipologie di danno più frequenti per strutture realizzate con differenti tecnologie e materiali e discussa la possibilità di rilevare tali danni con tecniche di tipo interferometrico.

4.5 RIFERIMENTI

- Antonielli B., Sciortino A., Scancella S., Bozzano F., Mazzanti P. (2021). Tracking deformation processes at the Legnica Glasgow Copper District (Poland) by Satellite InSAR—I: Room and Pillar Mine District. *Land*, 10, 653. doi:10.3390/land10060653.
- Augenti N. (2009). Crolli e dissesti strutturali: Stato dell'arte e prospettive. Atti del Convegno IF CRASC '09, Napoli, 2-4 Dicembre 2009.
- Augenti N. (2012). Dissesti dovuti a rotture di reti idriche e fognarie. Atti del Convegno IF CRASC '12, Pisa, 15-17 Novembre 2012.
- Avallone A., Zollo A., Briole P., Delacourt C., Beauducel F. (1999). Subsidence of Campi Flegrei (Italy) detected by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 26, 2303–2306. doi: 10.1029/1999GL900497.
- Baldi P., Casula G., Cenni N., Loddo F., Pesci, A. (2009). GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 288, 204–212. doi: 10.1016/j.epsl.2009.09.023.
- Berardi R., (2013). *Fondamenti di Geotecnica*. Città Studi Edizioni. De Agostini Scuola SpA – Novara.
- Botey i Bassols J., Vázquez-Suñé E., Crosetto M., Barra A., Gerard P., (2021). D-InSAR monitoring of ground deformation related to the dewatering of construction-sites. A case study of Glòries Square, Barcelona. *Engineering Geology*, 286, 106041, doi:10.1016/j.enggeo.2021.106041.
- Bovenga F., Wasowski J., Nitti D.O., Nutricato R., Chiaradia M.T., (2012). Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sensing of Environment*, 119, 272–285. doi:10.1016/j.rse.2011.12.013.
- Bowles J. E., (1991). *Fondazioni Progetto e Analisi*, McGraw-Hill, Milano. ISBN 8838606226.
- Bozzano F., Carabella C., De Pari P., Discenza M. E., Fantucci R., Mazzanti P., Miccadei E., Rocca A., Romano S., Sciarra N., (2020). Geological and geomorphological analysis of a complex landslides system: the case of San Martino sulla Marruccina (Abruzzo, Central Italy). *Journal of Maps*, 16(2), 126-136, doi: 10.1080/17445647.2019.1702596.
- Bozzano F., Ciampi P., Del Monte M., Innocia F., Luberti G.M., Mazzanti P., Rivellino S., Rompatò M., Scancella S., Scarscia Mugnozza G. (2020). Satellite a-dinsar monitoring of the Vittoriano Monument (Rome, Italy): Implications for Heritage Preservation. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 20, 5–17. doi:10.4408/IJEGE.2020-02.O-01.
- Bozzano F., Esposito C., Franchi S., Mazzanti P., Perissin D., Rocca A., Romano E. (2015). Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: The Acque Albule Plain case study. *Remote Sensing of Environment*, 168, 219–238. doi:10.1016/j.rse.2015.07.010.
- Bozzano F., Esposito C., Mazzanti P., Patti M., Scancella S. (2018). Imaging multi-age construction settlement behaviour by advanced SAR interferometry. *Remote Sensing*, 10, 1137. doi:10.3390/rs10071137.
- Bozzano F., Mazzanti P., Perissin D., Rocca A., De Pari P., Discenza M.E. (2017). Basin scale assessment of landslides geomorphological setting by advanced InSAR analysis. *Remote Sensing*, 9, 267. doi:10.3390/rs9030267.
- Burland J.B., Wroth C.P., (1974). Settlement of buildings and associated damage. *Settlement of Structures. Proceedings of the Conference of the British Geotechnical Society*, 611–764. <https://www.researchgate.net/publication/248646701>.
- Calderhead A.I., Therrien R., Rivera A., Martel R., Garfias J. (2011). Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources*, 34, 83–97. doi:10.1016/j.advwatres.2010.09.017.
- Calvello M., Peduto D., Arena L., (2017). Combined use of statistical and DInSAR data analyses to define the state of activity of slow-moving landslides. *Landslides*, 14, 473–489. doi:10.1007/s10346-016-0722-6.

- Catalão J., Nico G., Lollino P., Conde V., Lorusso G., Silva C. (2016). Integration of InSAR analysis and numerical modeling for the assessment of ground subsidence in the city of Lisbon, Portugal. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 9, 1663–1673. doi:10.1109/JSTARS.2015.2428615.
- Cetin E., Cakir Z., Meghraoui M., Ergintav S., Akoglu A. M. (2014). Extent and distribution of aseismic slip on the Ismetpas a segment of the North Anatolian Fault (Turkey) from Persistent Scatterer InSAR, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15, 2883–2894, doi:10.1002/2014GC005307.
- Chen F., Lin H., Zhang Y., Lu Z., (2012). Ground subsidence geo-hazards induced by rapid urbanization: implications from InSAR observation and geological analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 935–942. doi:10.5194/nhess-12-935-2012.
- Cigna F., Del Ventisette C., Liguori V., Casagli N. (2011). Advanced radar-interpretation of InSAR time series for mapping and characterization of geological processes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 865–881. doi:10.5194/nhess-11-865-2011.
- Conforti M., Muto F., Rago V., Critelli S. (2014). Landslide inventory map of north-eastern Calabria (South Italy), *Journal of Maps*, 10(1), 90-102, doi: 10.1080/17445647.2013.852142.
- Cruden D., Varnes D., (1996). Landslides: Investigation and Mitigation. Chapter 3 - Landslide Types and Processes. Transportation Research Board. ISBN 030906208X.
- D'Amico F., Gagliardi V., Bianchini Ciampoli L., Tosti F., (2020). Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges. *NDT & E International*, 115, 102291.
- D'Auria L., Pepe S., Castaldo R., Giudicepietro F., Macedonio G., Ricciolino P., Tizzan, P., Casu F., Lanari R., Manzo M., Martini M., Sansosti E., Zinno I., (2015). Magma injection beneath the urban area of Naples: a new mechanism for the 2012–2013 volcanic unrest at Campi Flegrei caldera. *Sci. Rep.* 5, 13100. doi: 10.1038/srep13100.
- de Wit K., Lexmond B.R., Stouthamer E., Neussner O., Dörr N., Schenk A., Minderhoud P.S.J., (2021). Identifying Causes of Urban Differential Subsidence in the Vietnamese Mekong Delta by Combining InSAR and Field Observations. *Remote Sensing*, 13, 189. doi:10.3390/rs13020189.
- Del Ventisette C., Righini G., Moretti S., Casagli N., (2014). Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 238–246. doi:10.1016/j.jag.2014.02.008.
- Del Ventisette C., Solari L., Raspini F., Ciampalini A., Di Traglia F., Moscatelli M., Pagliaroli A., Moretti S., (2015). Use of PSInSAR data to map highly compressible soil layers. *Geol. Acta*, 13.
- Esposito C., Belcecchi N., Bozzano, Brunetti A., Marmoni G.M., Mazzanti P, Romeo S., Cammilozzi F., Cecchini G., Spizzirri M. (2021) Integration of satellite-based A-DInSAR and geological modeling supporting the prevention from anthropogenic sinkholes: a case study in the urban area of Rome, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12:1, 2835–2864, doi: 10.1080/19475705.2021.1978562
- Fan X.M., Scaringi G., Korup O., West A.J., van Westen C.J., Tanyas H., Hovius N., Hales T.C., Jibson R.W., Allstadt K.E., Zhang L.M., Evans S.G., Xu C., Li G., Pei X.J., Xu Q., Huang R.Q. (2019). Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts. *Reviews of Geophysics*, 57, 421–503, ISSN: 8755-1209, doi: 10.1029/2018RG000626.
- Ferrario M.F., Bonadeo L., Brunamonte F., Livio F., Martinelli E., Michetti A.M., Censi Neri P., Chiessi V., Comerci V., Höbig N. (2015). Late Quaternary environmental evolution of the Como urban area (Northern Italy): A multidisciplinary tool for risk management and urban planning. *Engineering Geology*, 193, 384–401. doi:10.1016/j.enggeo.2015.05.013.
- Galloway D. L., Burbey, T. J. (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeol. J.* 19, 1459–1486. doi: 10.1007/s10040-011-0775-5.
- Galloway D.L., Hoffmann J., (2007). The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 15(2006-11-30). doi: [10.1007/s10040-006-0121-5](https://doi.org/10.1007/s10040-006-0121-5).

- Galve J.P., Castañeda C., Gutiérrez F., Herrera G. (2015). Assessing sinkhole activity in the Ebro Valley mantled evaporite karst using advanced DInSAR. *Geomorphology*, 229, 30–44. doi:10.1016/j.geomorph.2014.07.035.
- Herrera G., Fernández J.A., Tomás R., Cooksley G., Mulas J., (2009). Advanced interpretation of subsidence in Murcia (SE Spain) using A-DInSAR data - Modelling and validation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 647–661. doi:10.5194/nhess-9-647-2009.
- Hungr O., Leroueil S., Picarelli L., (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194. doi:10.1007/s10346-013-0436-y.
- Kontogianni V., Stiros S.C., (2020). Ground loss and static soil–Structure Interaction during Urban Tunnel Excavation: Evidence from the Excavation of the Athens Metro. *Infrastructures*, 5, 64. doi:10.3390/infrastructures5080064.
- Lamont-Black J., Younger P.L., Forth R.A., Cooper A.H., Bonniface J.P. (2002). A decision-logic framework for investigating subsidence problems potentially attributable to gypsum karstification. *Engineering Geology*, 65, 205–215.
- Lanari R., Berardino P., Borgström S., Del Gaudio C., De Martino P., Fornaro G., Guarino S., Ricciardi G.P., Sansosti E., Lundgren P. (2004). The use of IFSAR and classical geodetic techniques for caldera unrest episodes: application to the Campi Flegrei uplift event of 2000. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133, 247–260. doi: 10.1016/S0377-0273(03)00401-3.
- López-Vinielles J., Fernández-Merodo J.A., Ezquerro P., García-Davalillo J.C., Sarro R., Reyes-Carmona C., Barra A., Navarro J.A., Krishnakumar V., Alvioli M., Herrera G. (2021). Combining satellite insar, slope units and finite element modeling for stability analysis in mining waste disposal areas. *Remote Sensing*, 13. doi:10.3390/rs13102008.
- Manzella A., Bonciani R., Allansdottir A., Botteghi S., Donato A., Giamberini S., Lenzi A., Paci M., Pellizzone A., Scrocca D., (2018). Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy. *Geothermics*, 72, 232–248. doi:10.1016/j.geothermics.2017.11.015.
- Marra F., Rosa C. (1995). Stratigrafia e assetto geologico-strutturale dell'area romana. *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*, pp 50-112.
- Meisina C., Zucca F., Fossati D., Cerianic M., Allievi J., (2006). Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the Oltrepo Pavese. *Engineering Geology*, 88, 240–259.
- Meisina C., Zucca F., Notti D., Colombo A., Cucchi A., Savio G., Giannico C., Bianchi M. (2008). Geological interpretation of PSInSAR Data at regional scale. *Sensors*, 8, 7469–7492. doi:10.3390/s8117469
- Miano A., Mele A., Calcaterra D., Di Martire D., Infante D., Prota A., Ramondini M. (2021): The use of satellite data to support the structural health monitoring in areas affected by slow-moving landslides: a potential application to reinforced concrete buildings. *Structural Health Monitoring*, 1–23. DOI: 10.1177/1475921720983232.
- Miano A., Di Carlo F., Mele A., Giannetti I., Nappo N., Rompato M., Striano P., Bonano M., Bozzano F., Lanari R., Mazzanti P., Meda A., Prota A.E., Scarascia Mugnozza G. (2022). GIS integration of DInSAR measurements, geological investigation and historical surveys for the structural monitoring of buildings and infrastructures: an application to the Valco San Paolo urban area of rome. *Infrastructures*, DOI:10.3390/infrastructures7070089.
- Milillo P., Giardina G., DeJong M.J., Perissin D., Milillo G., (2018). Multi-temporal InSAR structural damage assessment: The London crossrail case study. *Remote Sensing*, 10, 287.
- Milone G., Scepi G. (2011). A clustering approach for studying ground deformation trends in Campania Region through PS-InSARTM time series analysis. *Journal Applied Science*, 11, 610–620. doi:10.3923/jas.2011.610.620.
- MIT Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. 2018. Italian Code for Structural Design, *Norme Tecniche per le Costruzioni*, D.M. 17/1/2018, (GU Serie Generale n.42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8) (In Italian).

- Moretto S., Bozzano F., Esposito C., Mazzanti P., Rocca A., (2017). Assessment of Landslide Pre-Failure Monitoring and Forecasting Using Satellite SAR Interferometry. *Geosciences*, 7, 36. doi:10.3390/geosciences7020036.
- Nappo N., Ferrario M.F., Livio F., Michetti A.M. (2020). Regression analysis of subsidence in the como basin (northern Italy): new insights on natural and anthropic drivers from InSAR data. *Remote Sensing*, 12, 2931. doi:10.3390/rs12182931.
- Nappo N., Peduto D., Mavrouli O., van Westen C.J., Gullà, G., (2019). Slow-moving landslides interacting with the road network: Analysis of damage using ancillary data, in situ surveys and multi-source monitoring data. *Engineering Geology*, 260, 105244. doi:10.1016/j.enggeo.2019.105244.
- Nappo N., Peduto D., Polcarì M., Livio F., Ferrario M.F., Comerci V., Stramondo S., Michetti A.M. (2021). Subsidence in Como historic centre (northern Italy): assessment of building vulnerability combining hydrogeological and stratigraphic features, Cosmo-SkyMed InSAR and damage data. *Int. J. Disaster Risk Reduction*, 56, 102115. doi:10.1016/j.ijdr.2021.102115.
- Orhan O., Oliver-Cabrera T., Wdowinski S., Yalvac S., Yakar M. (2021). Land Subsidence and Its Relations with Sinkhole Activity in Karapınar Region, Turkey: A Multi-Sensor InSAR Time Series Study. *Sensors*, 21, 774. doi: 10.3390/s21030774.
- Papoutsis I., Kontoes C., Alatza S., Apostolakis A., Loupasakis C., (2020). InSAR Greece with parallelized persistent scatterer interferometry: a national ground motion service for big Copernicus Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 12, 3207, doi:10.3390/rs12193207
- Peduto D., Nicodemo G., Maccabiani J., Ferlisi S. (2017). Multi-scale analysis of settlement-induced building damage using damage surveys and DInSAR data: A case study in The Netherlands. *Eng. Geol.* 218, 117–133. doi:10.1016/j.enggeo.2016.12.018.
- Ponzo F.C., Iacovino C., Ditommaso R., Bonano M., Lanari R., Soldovieri F., Cuomo V., Bozzano F., Ciampi P., Rompatò M. (2021). Transport infrastructure SHM using integrated SAR data and on-site vibrational acquisitions: “Ponte Della Musica–Armando Trovajoli” case study. *Applied Sciences*, 11, 6504. doi:10.3390/app11146504.
- Raspi F., Bardi F., Bianchini S., Ciampalini A., Del Ventisette C., Farina P., Ferrigno F., Solari L., Casagli N., (2017). The contribution of satellite SAR-derived displacement measurements in landslide risk management practices. *Natural Hazards*, 86, 327–351. doi:10.1007/s11069-016-2691-4.
- Rosi A., Tofani V., Agostini A., Tanteri L., Stefanelli C. T., Catani F., Casagli N., (2016). Subsidence mapping at regional scale using persistent scatterers interferometry (PSI): the case of Tuscany region (Italy). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 328–337. doi: 10.1016/j.jag.2016.07.003.
- Rucci A., Vasco D. W., Novali F. (2013). Monitoring the geologic storage of carbon dioxide using multicomponent SAR interferometry. *Geophysical Journal International*, 193, 1, 197–208.
- Scouler J., Ghail R., Mason P., Lawrence J., Bellhouse M., Holley R., Morgan T. (2020). Retrospective InSAR Analysis of East London during the Construction of the Lee Tunnel. *Remote Sensing*, 12, 849. doi:10.3390/rs12050849.
- Solari L., Ciampalini A., Raspi F., Bianchini S., Moretti S., (2016). PSInSAR Analysis in the Pisa Urban Area (Italy): A Case Study of Subsidence Related to Stratigraphical Factors and Urbanization. *Remote Sensing*, 8, 120.
- Solari L., Del Soldato M., Raspi F., Barra A., Bianchini S., Confuorto P., Casagli N., Crosetto M. (2020). Review of Satellite Interferometry for Landslide Detection in Italy. *Remote Sensing*, 12, 1351. doi:10.3390/rs12081351.
- Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M., (2008). Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3160–3172.
- Terzaghi K., Peck R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.

Theron A., Engelbrecht J. (2018). The role of earth observation, with a focus on SAR interferometry, for sinkhole hazard assessment. *remote sensing*, 10, 1506. doi:10.3390/rs10101506.

Tosi L., Carbognin L., Teatini P., Strozzi T., Wegmüller U. (2002). Evidence of the present relative land stability of Venice, Italy, from land, sea, and space observations. *Geophysical Research Letters*, 29, 3-1–3-4.

Tosi L., Teatini P., Strozzi T., (2013). Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. *Scientific Reports*, 3, 2710.

Tosi L., Teatini P., Carbognin L., Brancolini G. (2009). Using high resolution data to reveal depth-dependent mechanisms that drive land subsidence: The Venice coast, Italy. *Tectonophysics*, 474, 271–284. doi:10.1016/j.tecto.2009.02.026.

Waltham A.C., Fookes P.G., (2003). Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, 101–118.

5 EDIFICI ORDINARI E DI IMPORTANZA STRATEGICA IN MURATURA

5.1 STATO DELL'ARTE

L'utilizzo di dati satellitari per la diagnosi strutturale degli edifici esistenti in muratura e la loro integrazione con i sistemi di monitoraggio ordinari costituiscono campi di applicazione emergenti. I contributi di letteratura riportati nel seguito rappresentano, a titolo esemplificativo, i principali ambiti di studio affrontati dalla ricerca. Essi coinvolgono lo studio della risposta strutturale di edifici in muratura e la valutazione del danno occorso a seguito dell'interazione con fenomeni naturali – fra gli altri, quelli di consolidamento e subsidenza del terreno, i movimenti franosi lenti, gli eventi sismici – e con fenomeni antropici – le attività di costruzione in superficie e quelle sotterranee di scavo.

Un recente contributo tratta l'utilizzo dei dati di interferometria satellitare DInSAR nel supportare l'analisi del danneggiamento degli edifici fondati su suoli altamente comprimibili (Nicodemo et al., 2017). L'analisi condotta nella ricerca riguarda un quartiere densamente urbanizzato del comune di Schiedam, nei Paesi Bassi. L'area è caratterizzata dalla presenza di edifici in muratura fondati su strati alternati di argilla soffice e torba, sovrapposti al sottostante strato sabbioso. In particolare, sono stati valutati i cedimenti differenziali di oltre 300 edifici in muratura sulla base dei rilevamenti SAR della costellazione Terra SAR-X, avvalorando l'affidabilità delle misure satellitari attraverso un set indipendente di misure topografiche on-site. Un esteso rilievo delle lesioni osservate sugli edifici (Figura 5-1a) ha permesso di stabilire una correlazione tra l'ampiezza del cedimento differenziale e il livello di danno strutturale occorso (Figura 5-1b), differenziandolo per ciascuna tipologia di fondazione (superficiale o su pali). I risultati evidenziano, come atteso, un generale incremento del livello di danno (fino a moderato) all'aumentare dei cedimenti differenziali dedotti dai dati interferometrici, confermandone l'utilità nel monitoraggio delle strutture a larga scala e nelle valutazioni di danneggiamento alla scala dell'edificio. Considerazioni sulla rappresentatività di ulteriori parametri di intensità del cedimento e la proposta di curve empiriche di fragilità sono riportati in Peduto et al. (2019).

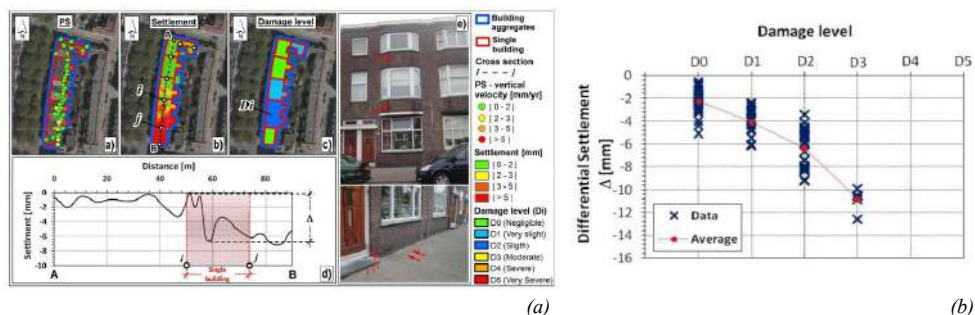


Figura 5-1 – (a) Stima del cedimento differenziale da dati SAR e rilievo del quadro del danno su edifici in muratura; (b) relazione tra ampiezza del cedimento differenziale e livello di danno occorso nel caso di fondazioni superficiali (Nicodemo et al., 2017).

Un secondo utilizzo dei dati DInSAR ha interessato lo studio degli effetti di fenomeni di subsidenza – legati al ritiro delle falde sotterranee – su edifici in muratura antichi situati nell'area urbana di Sarno (Cascini et al., 2006). Sono stati analizzati i dati delle costellazioni ERS-1/2 nell'intervallo temporale 1992-2002, convalidati con dati geodetici. In Figura 5-2 è riportato il confronto fra i cedimenti del suolo relativi alle misure di livellamento e derivanti dall'elaborazione dei dati SAR. Gli ulteriori dati resi disponibili da misure sul campo indicano che esiste una forte correlazione tra la quantità di acque sotterranee pompate e il livello della falda acquifera e, a sua volta, tra questo e i tassi di cedimento.

L'osservazione su larga scala della risposta strutturale degli edifici ha evidenziato, nella zona investigata, la propensione al danneggiamento più marcata per gli edifici antichi in muratura caratterizzate da fondazioni superficiali, rispetto a edifici più recenti in calcestruzzo armato. In particolare, sulla base delle evidenze

sperimentali, l'articolo evidenzia la possibilità di identificare le direzioni degli assi di rotazione degli edifici soggetti a cedimenti differenziali e moti rigidi di ribaltamento, sulla base delle direzioni dei gradienti di spostamento estratti dai dati SAR (ortogonali rispetto alle prime). Queste considerazioni incoraggiano l'implementazione di modelli geotecnici di subsidenza, in cui la calibrazione dei parametri costitutivi può essere supportata da un approccio integrato, sfruttando consolidate tecniche di monitoraggio on-site e il supporto fornito dalle analisi dei dati SAR.

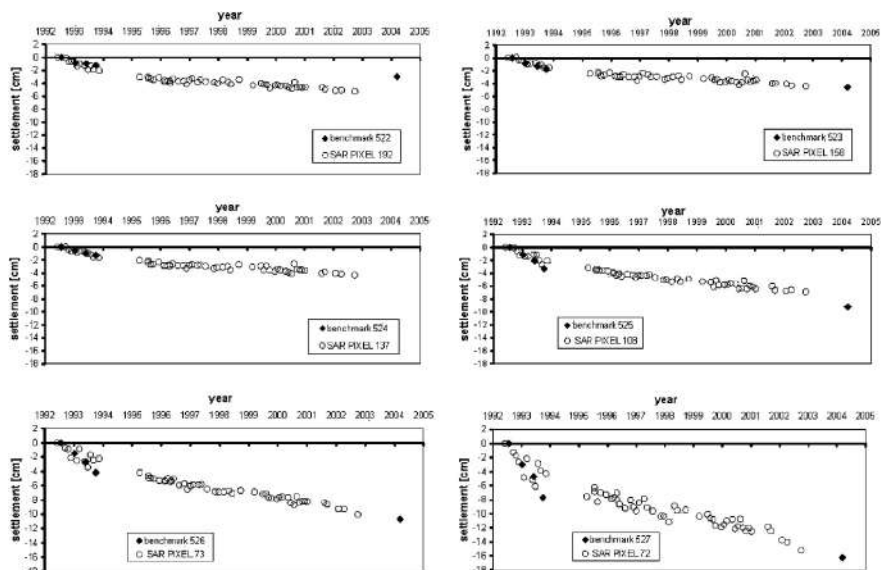


Figura 5-2 – Confronto in termini di cedimento fra dati SAR e livellamento del terreno (Cascini et al., 2006).

Lo studio condotto nell'area urbana di Lungro, una piccola città della regione Calabria, ha investigato gli effetti generati dalle frane a dinamica lenta sugli edifici in muratura (Peduto et al., 2018). Questo contributo propone una metodologia innovativa per l'analisi quantitativa delle conseguenze prodotte dalle frane in termini di perdita monetaria prevista, associata a diversi scenari di danno per gli edifici (su scala comunale). A questo scopo, sono stati combinati diversi tipi di analisi: analisi geomorfologiche, monitoraggio geotecnico e telerilevamento (DInSAR, ENVISAT e COSMO-SkyMed dataset), analisi della vulnerabilità degli edifici derivanti dalla cinematica delle frane, indagini sui danni osservabili. Inoltre, è stata condotta una stima quantitativa del valore monetario di ricostruzione degli edifici all'interno di un'area comunale. In Figura 5-3 è mostrato, in senso probabilistico, il livello di danno atteso (su base empirica) in funzione del cedimento differenziale alla base estratto dalle misure SAR, ricavato dall'analisi di 37 edifici in muratura con caratteristiche costruttive simili e tipiche dell'area considerata. Le curve empiriche così costruite sono proposte quale strumento interpretativo nella previsione di possibili scenari di danno per edifici in muratura soggetti a frane lente, in diversi intervalli temporali di evoluzione del fenomeno e tenendo in considerazione la varietà delle possibili condizioni cinematiche della frana. L'articolo mostra la possibilità, seppur ancora embrionale, di utilizzare i dati SAR a supporto di strategie di mitigazione del rischio franoso a scala urbana, indirizzando le indagini e gli eventuali interventi di riduzione della vulnerabilità laddove siano previste le perdite più consistenti.

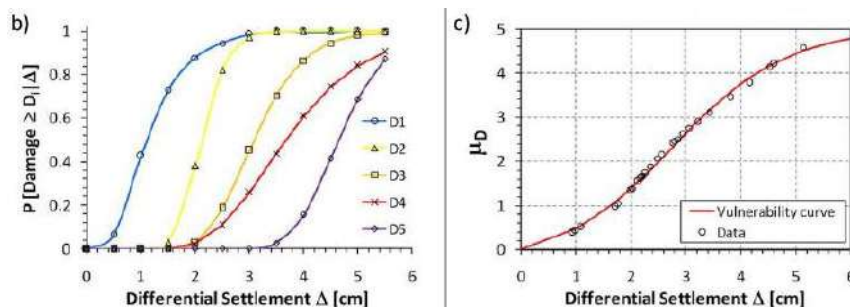


Figura 5-3 – (b) Fragilità empirica e (c) curve di vulnerabilità per edifici in muratura nell'area urbana di Lungro (Peduto et al., 2018).

Quale ulteriore esempio, l'uso combinato di diverse tecnologie SAR è stato applicato con successo in analisi volte alla rilevazione di effetti spaziali e temporali nel danneggiamento degli edifici indotto da frane lente, a Moio della Civitella in Provincia di Salerno (Infante et al., 2017). Il lavoro fornisce un approccio generale utile per studiare, a diversi livelli di dettaglio, la relazione causa-effetto che lega i moti franosi al danneggiamento strutturale. I dati SAR sono stati integrati con l'osservazione sul campo dei danni agli edifici, consentendo di elaborare curve di fragilità empiriche degli edifici nell'area indagata. Tali curve possono essere utilizzate come strumento per stimare e prevedere, nota l'evoluzione temporale del cedimento, la probabilità che si verifichino danni significativi alle strutture. In particolare, è stato valutato il comportamento di un aggregato di costruzioni in muratura analizzando le serie temporali degli spostamenti DInSAR pre- e post-riparazione, al fine di valutare l'efficacia degli interventi di consolidamento (Figura 5-4).

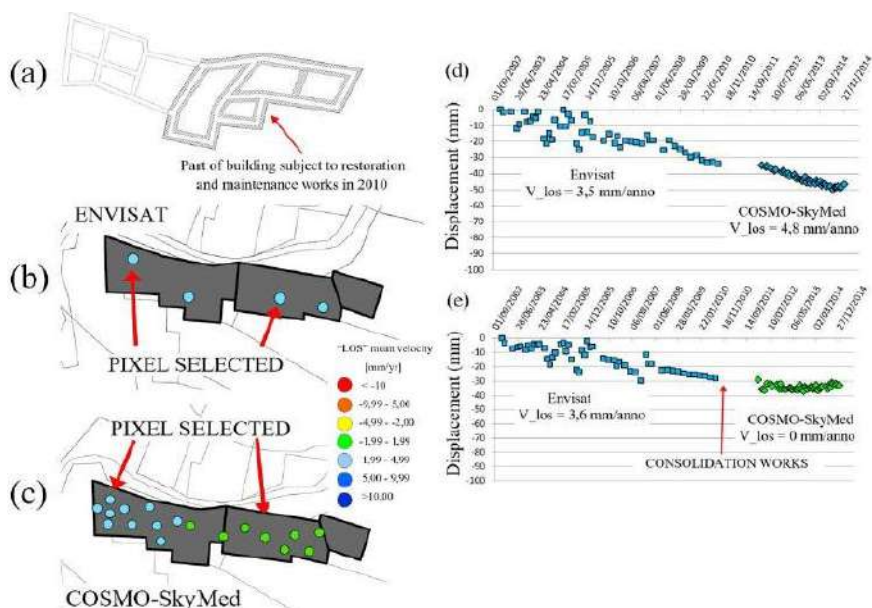


Figura 5-4 – Comportamento degli aggregati di edifici prima e dopo che i lavori di riparazione effettuati nel 2010, (Infante et al., 2017).

Il confronto fra le misure satellitari pre- e post-intervento ha mostrato un evidente cambiamento nelle tendenze di spostamento nella porzione riparata dell'aggregato, rimarcando così il potenziale delle tecniche di telerilevamento nel monitoraggio del comportamento strutturale degli edifici la loro utilità nella valutazione dell'efficacia dei lavori di consolidamento nei riguardi dei moti franosi.

Rivolgendosi allo studio dell'azione sismica e dei suoi effetti sugli edifici in muratura, un recente contributo di letteratura (Karimzadeh e Mastuoka, 2017) ha sfruttato i dati satellitari acquisiti prima e dopo il terremoto che nell'agosto 2016 ha colpito la cittadina di Amatrice nel Lazio, con l'obiettivo di costruire e validare delle mappe di collasso post-sismico sulla base delle risultanze del telerilevamento (Sentinel-1 e ALOS-2). L'articolo propone una metodologia che sfrutta il confronto tra i dati pre- e post-sismici per individuare variazioni nelle intensità di backscattering e di coerenza delle misure SAR. Tali variazioni sono combinate in un unico parametro che, sulla base di opportune soglie, è in grado di discriminare l'avvenuto collasso delle strutture. I risultati mostrano un buon accordo con le osservazioni ottiche dei collassi realmente avvenuti, evidenziando la potenzialità dell'interferometria satellitare nel supportare valutazioni emergenziali negli scenari post-sismici. Un ulteriore contributo che coinvolge l'utilizzo di dati SAR e LIDAR nello studio del terremoto di Amatrice è riportato in Saganeti et al. (2020).

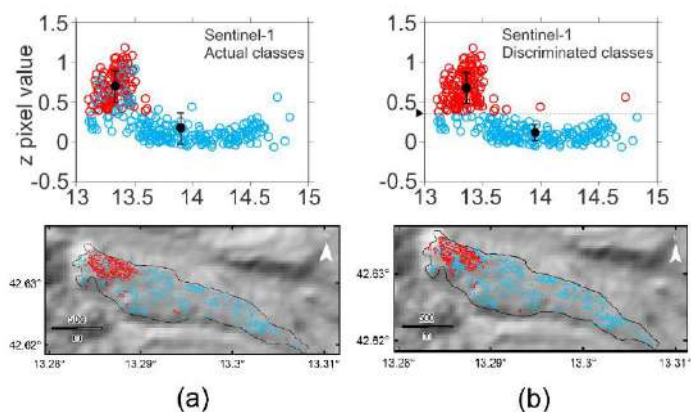


Figura 5-5 – Classi binarie degli edifici di Amatrice (blu: non collassato, rosso: collassato) come ricostruite (a) dall'osservazione di immagini satellitari e (b) sulla base delle variazioni di intensità e coerenza dei dati SAR (Karimzadeh e Mastuoka, 2017).

Per quanto riguarda i cedimenti indotti dall'azione dell'uomo, in particolare quella di scavo sotterraneo, un'applicazione di monitoraggio degli edifici con immagini TInSAR (Terrestrial Interferometric SAR) è stata proposta nella città di Roma (Mazzanti e Cipriani, 2011), in una zona coinvolta nella realizzazione della terza linea metropolitana. Particolare attenzione è stata dedicata agli edifici caratterizzati da problemi strutturali preesistenti, fornendo informazioni utili a lavori di stabilizzazione prima dello scavo. Tra i vari edifici, la Scuola Carducci, situata all'incrocio tra le strade di La Spezia e Altamura, è stata selezionata come caso studio per l'applicazione della tecnica menzionata in precedenza. Con questo obiettivo, sulla facciata della scuola, sono stati installati 20 prismi retroriflettenti a costituire gli scatteratori permanenti (PS) di misura. Oltre al monitoraggio TInSAR, l'edificio è stato continuamente monitorato con tecniche convenzionali, tra cui misuratori di inclinazione e due Stazioni Totali (TS) robotiche. Al fine di effettuare un confronto coerente tra queste diverse tecniche, gli spostamenti misurati dalle stazioni totali sono stati proiettati lungo la linea di vista dell'acquisizione radar. I risultati hanno mostrato un buon accordo reciproco tra le due tecniche di misurazione (Figura 5-6). La tecnica TInSAR mostra delle potenzialità nel monitoraggio degli edifici nelle aree urbane, soprattutto durante condizioni di emergenza che non consentono una pianificazione adeguata e/o la facile installazione di sistemi di monitoraggio on-site.

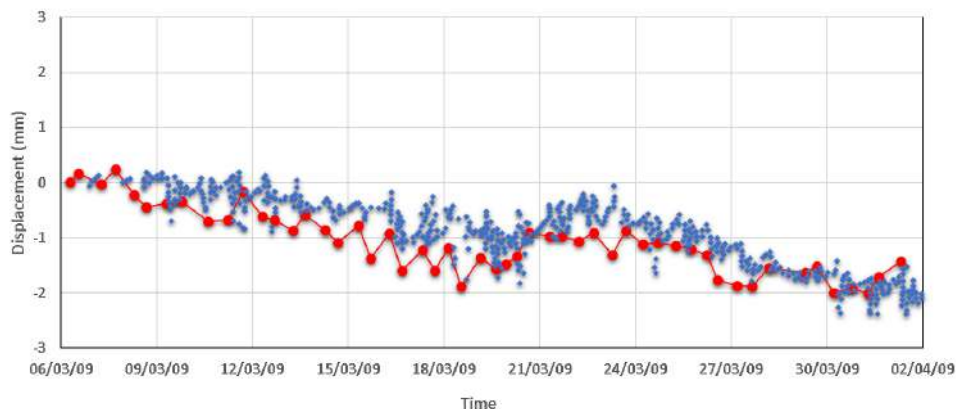


Figura 5-6 – Serie temporali di spostamenti derivati dal monitoraggio TS e TInSAR (Mazzanti e Cipriani, 2011).

Un contributo recente, che ha valutato i danni agli edifici derivanti dagli assestamenti del terreno di fondazione in seguito ad attività di scavo, è stato proposto in merito al percorso ferroviario sotterraneo *Crossrail* a Londra (Macchiarulo et al., 2019). L'area urbana monitorata è caratterizzata da un'alta percentuale di strutture in muratura (68%). Il suddetto lavoro presenta una metodologia automatizzata che sfrutta la tecnica StaMPS/MTI, per valutare i danni strutturali indotti dai cedimenti negli edifici in prossimità di grandi sistemi sotterranei. In particolare, sono stati adottati gli spostamenti cumulativi derivanti da un'analisi del set di dati COSMO-SkyMed al fine di generare il profilo di cedimento indotto dagli scavi su centinaia di edifici, nonché la corrispondente valutazione dei danni strutturali occorsi. Le informazioni relative al materiale di costruzione, alla tipologia di fondazione e all'età di costruzione sono state reperite ed utilizzate per identificare blocchi indipendenti di edifici, modellati nell'algoritmo di analisi come travi elastiche equivalenti. Sono state create mappe del livello di danneggiamento, confrontando i risultati ottenuti dagli spostamenti misurati dal SAR e dagli spostamenti ricavati da comuni assunzioni sul profilo di assestamento del terreno (Figura 5-7).

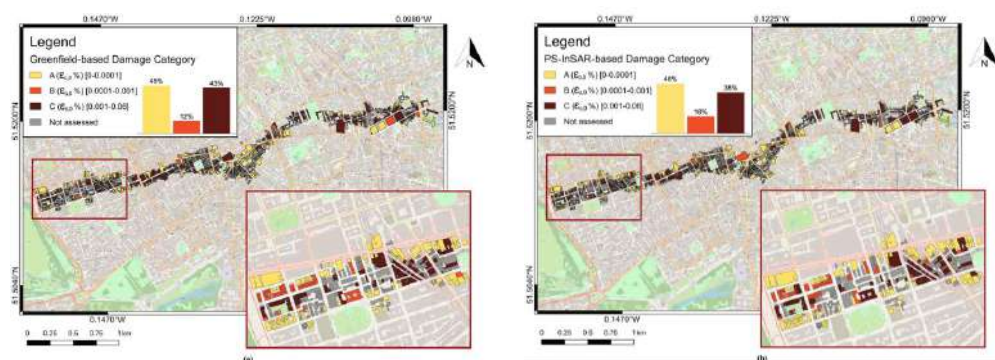


Figura 5-7 – Mappa dei danni basata sugli spostamenti topografici stimati con tecniche SAR e sulla base di assunzioni greenfield, (Macchiarulo et al., 2019).

I risultati mostrano che, per la maggior parte degli aggregati edilizi, la valutazione dello spostamento *greenfield* sovrastima la deformazione indotta dagli scavi e misurata tramite SAR. Questo fatto evidenzia come la presenza della struttura tende a ridurre la curvatura del profilo di insediamento, confermando che l'approccio che trascura l'interazione suolo-struttura è generalmente conservativo. La grande quantità di dati sperimentali forniti

dall'interferometria SAR ha consentito lo studio dell'effettiva risposta strutturale di diverse classi di edifici, aprendo alla prospettiva di individuare peculiari comportamenti – ad esempio legati alla costruzione e alla tipologia di fondazione – che potrebbero migliorare i metodi di previsione dei danni nei futuri lavori di scavo. Altri esempi degli effetti dei cedimenti da scavo su edifici in muratura, in relazione all'estrazione mineraria, sono riportati in Can et al. (2012).

In conclusione, gli esempi di letteratura qui presentati mostrano i numerosi ambiti di applicazione e le vaste potenzialità delle tecniche radar satellitari nel monitoraggio degli edifici in muratura. Appare tuttavia evidente come, allo stato attuale della ricerca, non esistano procedure standardizzate e soglie universalmente riconosciute a livello scientifico che possano indirizzare chiaramente la previsione e la diagnosi del danneggiamento di tali strutture. A dimostrazione di ciò, gli stessi esempi di letteratura evidenziano come l'integrazione con consolidate tecniche di monitoraggio tradizionale consenta di supportare l'interpretazione delle analisi di dati satellitari.

5.2 DANNI CHE POSSONO INTERESSARE LE STRUTTURE

Gli edifici in muratura soggetti ad una generica azione di origine ambientale o antropica possono manifestare, fra gli altri, danneggiamenti sottoforma di lesioni strutturali, crolli e perdita di equilibrio in seguito a cedimenti strutturali differenziali causati dalla deformazione del terreno di fondazione, di degrado superficiale per l'azione fisiologica dell'umidità, delle acque piovane e di quelle di risalita come pure di fessurazione per patologie legate alle infiltrazioni d'acqua e ai moti di falda. Infine, per effetto dell'azione dei terremoti, gli edifici in muratura possono essere interessati da un danneggiamento strutturale diffuso per risposta nel piano delle murature e dall'attivazione di cinematismi locali fuori-piano, di fessurazione e crollo degli orizzontamenti, di meccanismi di piano fino al collasso globale della struttura.

Da sottolineare come le diverse tipologie di danno possano essere rilevabili con tecniche SAR quando comportino spostamenti caratterizzati da evoluzione a cinematica lenta. È importante tenere presente che, nel caso gli spostamenti relativi tra acquisizioni successive siano troppo elevati, superando in particolare la lunghezza d'onda del segnale utilizzato, eq. (8), si possa incorrere in problemi di ambiguità della misura e conseguente decorrelazione, tipico caso dei fenomeni a cinematica veloce. Nel seguito vengono descritte le tipologie di danno conseguenti alle azioni di cui al paragrafo 4.2, evidenziando i casi in cui la tecnica SAR può rivelarsi un utile supporto.

5.2.1 Azioni legate alle deformazioni dei terreni

I problemi che possono verificarsi a livello delle fondazioni o del piano di posa in un edificio in muratura possono manifestarsi come: moti di corpo rigido che a loro volta possono indurre – nei casi più gravi - una rotazione globale della struttura; cedimenti uniformi o differenziali; o spostamenti orizzontali. In particolare, la rotazione rigida di una parte della struttura può generare delle concentrazioni di sforzi di compressione localizzati tali da determinare anche rotture per schiacciamento del materiale o portare ad una perdita di equilibrio complessiva della struttura, entrambe condizioni che possono portare al collasso.

La gravità degli effetti di un cedimento è strettamente legata alla qualità del sistema costruttivo (Figura 5-8).

I cedimenti possono essere particolarmente pericolosi se coinvolgono sistemi costruttivi con bassa qualità della muratura e/o scarsa connessione tra i muri ortogonali. In questi casi, essi possono determinare rottura dell'elemento murario (Figura 5-9a) o distacco, rotazione e deformazioni fuori piombo delle pareti, che a sua volta può essere ulteriormente amplificato in presenza di spinte dovute alla copertura o a orizzontamenti voltati (Figura 5-8a). Viceversa, nei sistemi costruttivi caratterizzati da una buona qualità muraria e da un buon ammassamento (Figura 5-8b), i cedimenti determinano usualmente deformazioni a taglio nel piano delle pareti, manifestandosi per mezzo di lesioni diagonali che tipicamente si propagano in corrispondenza dei giunti di malta (Figura 5-9b). Architravi e fasce murarie sopra le aperture sono facilmente coinvolti nel quadro fessurativo, e spesso sono i primi elementi nei quali gli effetti dei cedimenti si rendono visibili.

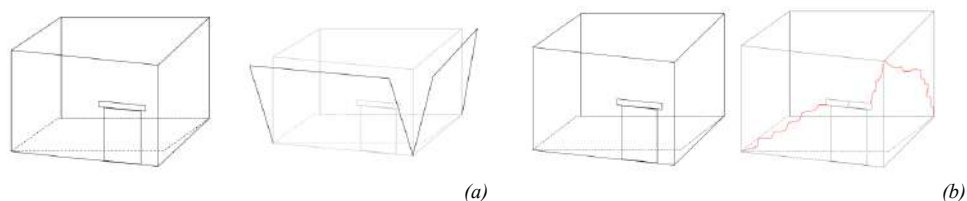


Figura 5-8 – Effetti di cedimenti differenziali in un edificio in muratura con: (a) scarso ammortamento tra le pareti murarie; (b) buon ammortamento (figure adattate da Roca et al., 2019).

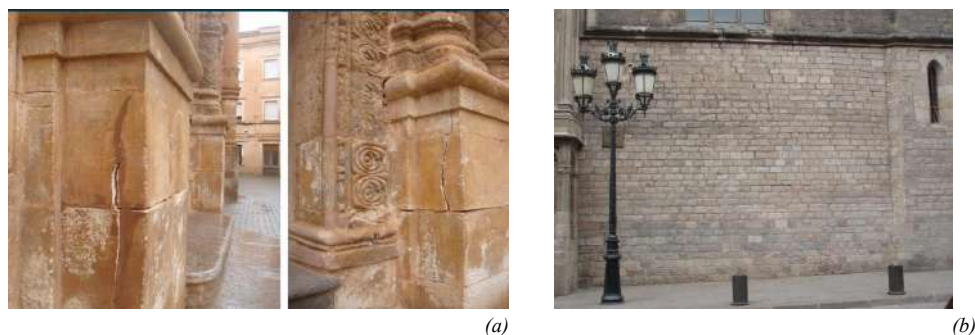


Figura 5-9 – Lesioni legate a cedimento: (a) verticale, in prossimità della base di un pilastro; (b) a taglio in una parete con poche aperture (immagini tratte da Roca et al., 2019).

Andamento delle lesioni da cedimento

La forma delle lesioni e la direzione dei movimenti relativi di due porzioni del fabbricato possono dare indicazioni sulla tipologia e sulla estensione del cedimento (Figura 5-10). Per quanto riguarda la forma, in funzione della geometria e delle caratteristiche dell'elemento murario coinvolto dal cedimento e dalla localizzazione e tipologia del cedimento, si possono riconoscere alcune forme ricorrenti delle lesioni da cedimento, di seguito schematizzate.

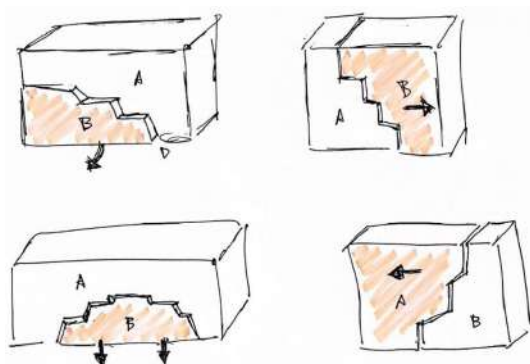


Figura 5-10 – Schema grafico del possibile andamento delle lesioni e delle possibili cause (figure adattate da Roca et al., 2019).

Nei muri a fondazioni continue e senza aperture (Roca et al., 2019 e Russo, 1930), il cedimento del piano di posa produce lesioni di andamento generalmente con carattere parabolico. Infatti, come esemplificato in Figura 5-11a, a causa del cedimento, il piano di posa MN viene ad assumere la posizione MON e nel muro sovrastante si produce una prima lesione abc di forma pressoché parabolica, cui talvolta ne fa seguito un'altra ($a_1b_1c_1$), pure essa parabolica detta di *consenso*. Queste sono legate al fatto che il muro si abbassa nella parte centrale per seguire il cedimento,

dando luogo alle suddette parabole di rottura. I punti di massima apertura (b e b_1 in figura) possono verificarsi ad altezze variabili a seconda della natura, della struttura, dell'età e dello spessore del muro stesso e dell'ampiezza del piano soggetto a cedimento. Di conseguenza, tali lesioni possono anche manifestarsi di forma:

- *schacciata*, che a volte si confonde con una retta (come accade nel caso di cedimenti totali dei muri isolati di buona struttura o nei tramezzi posati longitudinalmente su solaio a seguito di brusche deformazioni permanenti);
- *molto allungata*, tale da comparire sulla parete muraria solo due rette parallele verticali (come accade nei cedimenti bruschi e di grande entità);
- *deformata*:
 - per sovrapposizione di cedimenti gli uni sugli altri, che sconnettono la lesione a forma di parabola (ciò accade soprattutto per turbamenti in seguito a ripetute scosse di terremoto);
 - per la non omogeneità della struttura muraria, quando cioè una zona di muratura è di struttura diversa;
 - per la presenza di vuoti che ne interrompono la continuità (porte, finestre, archi, ecc.);
 - nel caso di elementi murari di spessore diverso, che pertanto resistono diversamente alle sollecitazioni originatesi.

In particolare, nel caso di lesione da cedimento di forma pressoché parabolica, la base di fondazione di un muro o di una zona di muro senza aperture che cede si comporta come una trave inflessa gravata da carichi crescenti dagli appoggi alla mezzzeria. Supponiamo che nella zona AB del muro schematizzato in Figura 5-11b si verifichi un cedimento di fondazione. Risultati sperimentali hanno dimostrato che, sulla linea di base AB – nell'atto di assumere la forma AO'B – non grava tutta la muratura ACDB, ma solamente la zona muraria AOB limitata dalla lesione parabolica dovuta al cedimento. Questo accade perché, col cedimento della zona AB, si determinano sul muro ACDB delle lesioni AO e BO (dovute al graduale assestamento del materiale) a forma di due mensoloni a contrasto mOA e nOB (con sagome AO e BO ad arco parabolico) che reggono il peso del muro sovrapposto (compresi i sovraccarichi di solai, tetti, etc.) e lo scaricano sui lati BF ed AE. Pertanto, la base AB che cede risente – nel suo inflettersi – solamente del peso della zona di muratura AOB, di fatto esiguo rispetto a quello di tutta la muratura sovrastante ACDB.

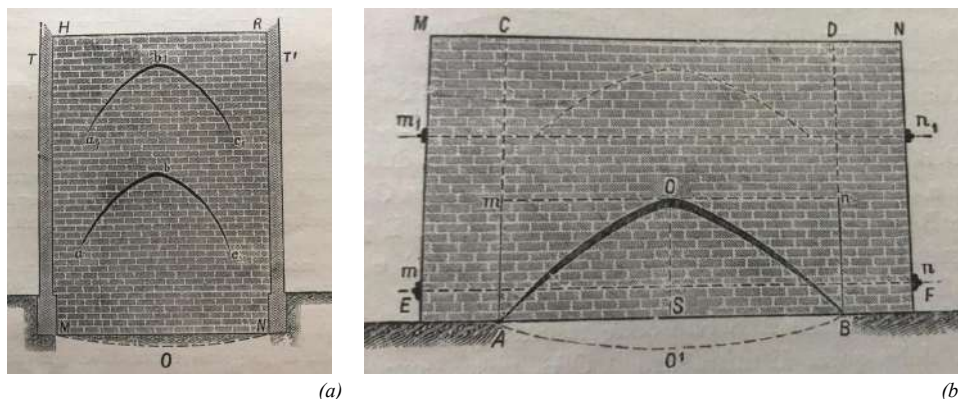


Figura 5-11 – (a) Andamento delle lesioni da cedimento in un muro senza aperture; (b) meccanismo di formazione della lesione di cedimento (figure tratte da Russo, 1930).

Viceversa, nei muri con molte aperture (Roca et al., 2019 e Russo, 1930) fondate su pilastri ed archi o su muri continui, le lesioni caratteristiche del cedimento si manifestano principalmente in prossimità delle aperture e coinvolgono tipicamente la rottura degli architravi e delle fasce. Simili rotture avvengono anche nelle soglie dei balconi o nelle porte collocate sulla verticale del terreno soggetto a cedimento. La Figura 5-12 mostra uno schema

della disposizione delle lesioni da cedimento verticale in una parete con presenza di bucatore, rispettivamente nel caso in cui il cedimento sia terminale (Figura 5-12a) o intermedio (Figura 5-12b) del fabbricato. Come si può osservare, il quadro del danno è costituito da lesioni localizzate principalmente in prossimità degli angoli delle finestre ed è caratterizzato da lesioni verticali a flessione e lesioni diagonali a taglio, la cui inclinazione indica la direzione del cedimento (l'inclinazione è opposta al punto in cui avviene il cedimento).

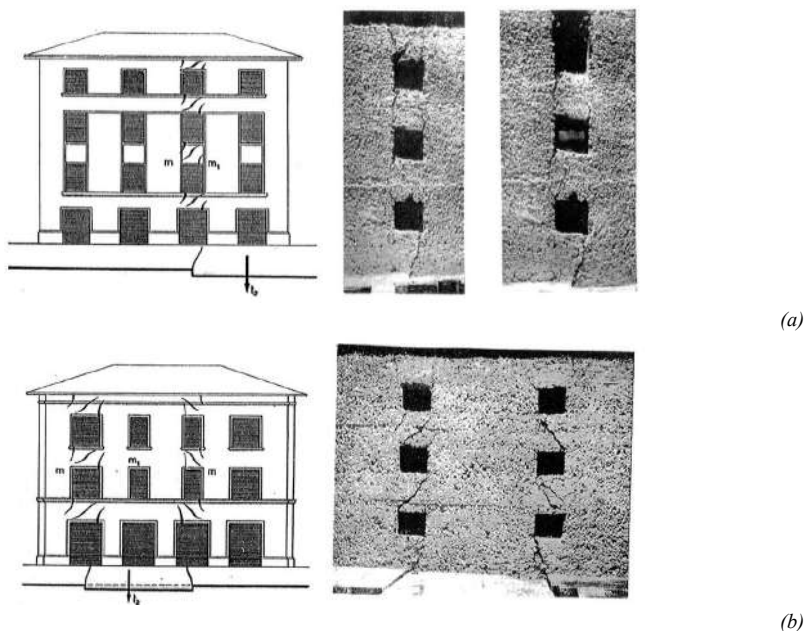


Figura 5-12 – Andamento delle lesioni in un complesso edilizio in muratura prodotte da (a) cedimento terminale o (b) laterale (figure adattate da Roca et al., 2019 e da Mastrodicasa, 1943), come esemplificato anche da sperimentazioni semplificate su prototipi condotte da Mastrodicasa (1943) e riportate nelle figure a destra.

Inoltre, se il cedimento determina la rotazione esterna di una delle facciate, è possibile che anche nei muri ad essa perpendicolari si possa generare un quadro fessurativo, che nuovamente risulta essere molto influenzato dalla presenza di bucatore (Figura 5-13).

In caso di cedimenti localizzati in una specifica area (Roca et al., 2019), la struttura può lesionarsi in modo differente a seconda dello spessore e della composizione del materiale dell'elemento (Figura 5-14). La Figura 5-14a mostra, ad esempio, un tipico danno che può riguardare gli spigoli del fabbricato, dove la separazione tra le parti segue la definizione di archi di scarico, la Figura 5-14b) mostra il cedimento nel caso di ammassamento tra muri ortogonali.

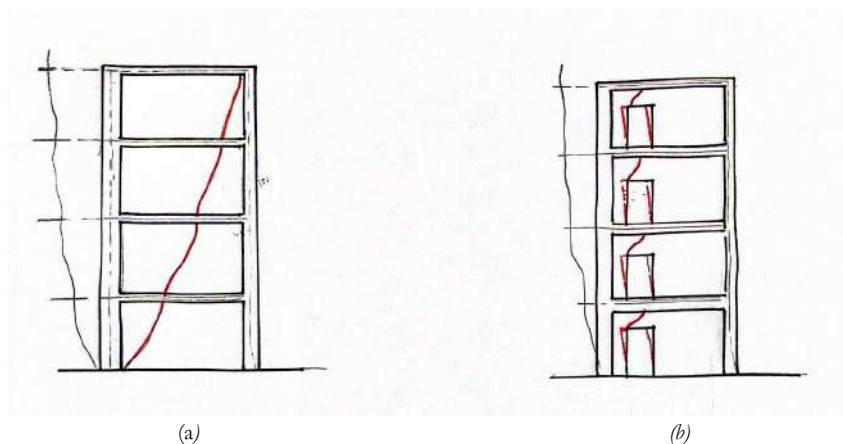


Figura 5-13 – Confronto tra la distribuzione delle lesioni in una parete (a) senza aperture e (b) con aperture soggetta a un fuori piombo dovuto a cedimenti differenziali.

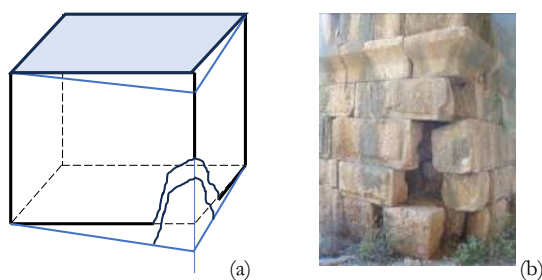


Figura 5-14 – Cedimento verticale localizzato nello spigolo: schema di formazione: (a) dell'arco di scarico; (b) danni osservati (Roca *et al.*, 2019).

Analogamente, in caso di cedimenti verticali localizzati in corrispondenza dell'intersezione di due muri ortogonali, la lesione può essere associata alla formazione di un arco di scarico. D'altro canto, un cedimento verticale che avviene in corrispondenza di metà muro può generare o un arco di scarico (Figura 5-15a) o un comportamento flessionale (Figura 5-15b) a seconda della geometria della parete coinvolta (in particolare, del rapporto tra altezza dell'edificio e larghezza della zona coinvolta dal cedimento).

Infine, se l'assessamento del terreno avviene in direzione orizzontale (ad esempio se indotto da terremoto, smottamento o altri fenomeni di origine geologica), è possibile distinguere tra cedimenti nel piano e fuori dal piano (Roca *et al.*, 2019). Gli effetti di un cedimento nel piano sono mostrati in Figura 5-16 per un muro senza (a) e con aperture (b), mentre quelli di un cedimento fuori dal piano sono mostrati in Figura 5-17, rispettivamente per un elemento senza aperture (a-b) o per una parete con aperture (c). Fra i danneggiamenti dovuti all'azione dei terreni precedentemente descritti, quelli associati ad uno stato deformativo strutturale o ad un atto di moto rigido dell'edificio che si evolve con cinematica lenta (ad esempio, cedimenti in fondazione dovuti alla subsidenza) possono essere rilevati e monitorati impiegando i dati satellitari.

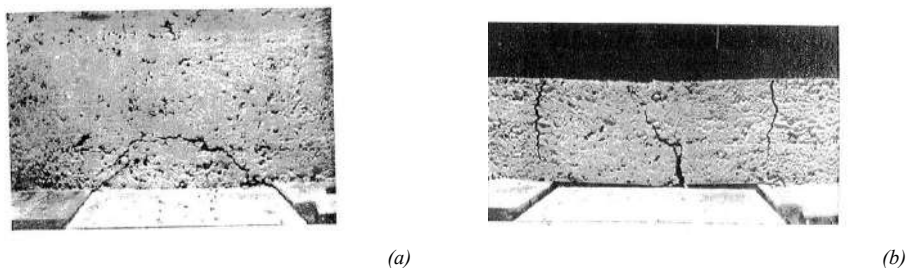


Figura 5-15 – Cedimento verticale localizzato nella parte centrale di un elemento murario: (a) schema di formazione dell'arco di scarico; (b) lesioni a flessione (figure tratte da Mastrodicasa, 1943).

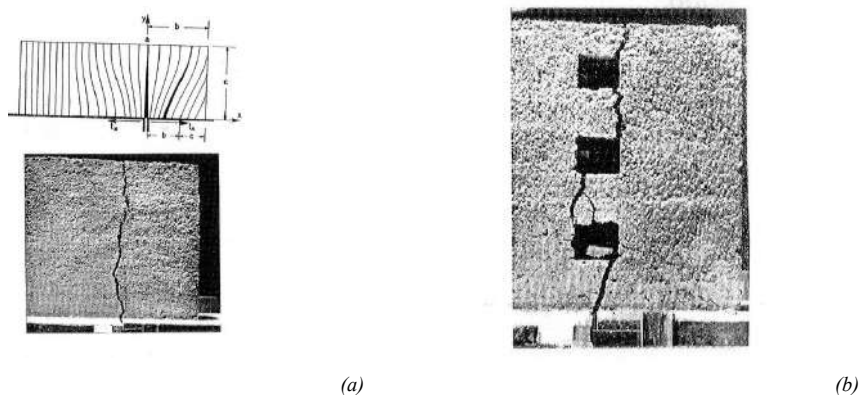


Figura 5-16 – Confronto tra la distribuzione delle lesioni (a) in un muro solido e (b) in un muro con aperture, dovuta a movimenti differenziali orizzontali nel piano nella parte terminale di un muro o in un angolo (figure adattate da Mastrodicasa, 1943).

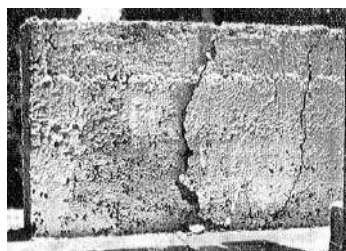


Figura 5-17 – Distribuzione delle lesioni dovute a movimenti orizzontali fuori dal piano (Mastrodicasa, 1943).

5.2.2 Azioni delle acque

Per quanto riguarda le strutture in muratura, l'acqua può generare degradi sia a livello superficiale, sia a livello strutturale della compagine muraria, con effetti più o meno estesi a seconda dei vari fattori.

Degradi superficiali

Fra le cause relative al degrado superficiale ricadono tutti quei fenomeni ambientali categorizzati come *fisiologici*. In questa categoria troviamo il vento, le piogge, i cicli di gelo e disgelo, l'inquinamento, le potenziali reazioni di gas presenti nel materiale (e/o a livello atmosferico) e dovute alla presenza di acqua etc. Questi fenomeni provocano sulle murature diversi effetti (degradi), riassumibili come di seguito (Zevi, 2007):

1. *Alveolizzazione*: si manifesta con la formazione di cavità di forma e dimensione variabili. Generalmente, è dovuta all'azione dell'erosione del vento che accelera l'evaporazione dell'acqua presente nei primi strati del materiale.
2. *Erosione*: dovuta all'azione meccanica delle precipitazioni, o anche alla formazione di ghiaccio negli strati superficiali, che causano l'asportazione di materiale, sia della malta sia del materiale ceramico.
3. *Fratturazione o fessurazione (superficiale)*: dovute a fenomeni di degrado tipici dei materiali sottoposti a carichi ciclici, come i cicli di gelo e disgelo.
4. *Polverizzazione*: dovuta all'effetto dei sali solubili e legato alla presenza di umidità e acqua e alla sua ripetuta migrazione ed evaporazione sulla superficie.

È importante specificare che secondo la UNI-11182:2006, le terminologie utilizzate in precedenza per definire uno specifico degrado, si riferiscono a una valutazione descrittiva del fenomeno e dunque prescindono dalle cause che lo generano. Tuttavia, fra i diversi fenomeni scatenanti il degrado, l'interazione dell'acqua con la muratura rappresenta il fenomeno più pericoloso e diffuso fra quelli considerati fisiologici (Zevi, 2007).

Gli effetti dell'acqua sul degrado delle murature riguardano più nello specifico 3 fenomeni:

1. *Cicli di gelo e disgelo*: il degrado può essere diffuso o concentrato ed è determinato dalla variazione di volume differenziale dell'acqua tra la fase liquida e solida (dell'ordine dell'8%), che può generare elevate pressioni nei pori della muratura. In teoria, in assenza di fessure sulla superficie, il fenomeno del gelo potrebbe non costituire un rischio eccessivo per la conservazione del materiale. Tuttavia, tale fenomeno diventa pericoloso soprattutto per tipologie di laterizio o materiale lapideo con porosità superficiale elevata, come mattoni cotti a bassa temperatura, o materiali già danneggiati superficialmente da altri fenomeni di degrado.
2. *Umidità*: l'umidità agisce come fenomeno indiretto scatenando il degrado, favorendo la formazione di efflorescenze e di migrazione di sali. Questa è da molti considerata fra le principali cause di degrado superficiale delle murature (Zevi, 2007). Per via dell'alta porosità, questo tipo di degrado si riscontra soprattutto su murature in cotto.
3. *Migrazione di acqua e risalita capillare*: il degrado è comunemente concentrato nella zona dell'edificio a contatto con il suolo, ma siccome l'acqua può essere trasportata da fattori esterni, quali quelli meteorici, non è raro imbattersi in degradi concentrati nelle zone degli edifici più esposte alle intemperie (davanzali, terrazzi, ecc.). Quando si parla di risalite capillari, il fenomeno di degrado può comportare in molti casi cadute di materiale in prossimità del fronte massimo di risalita, ovvero nel punto dove avviene l'evaporazione, mentre le parti più umide possono risultare meno degradate. In altri casi, invece, la continua migrazione ed evaporazione di acqua favorisce la formazione di scaglie e la conseguente successiva polverizzazione del materiale, specialmente nelle prime file di mattoni a contatto con il suolo.

In Figura 5-18 sono riportate alcune immagini dei più comuni fenomeni di degrado superficiale che possono interessare gli edifici in muratura.

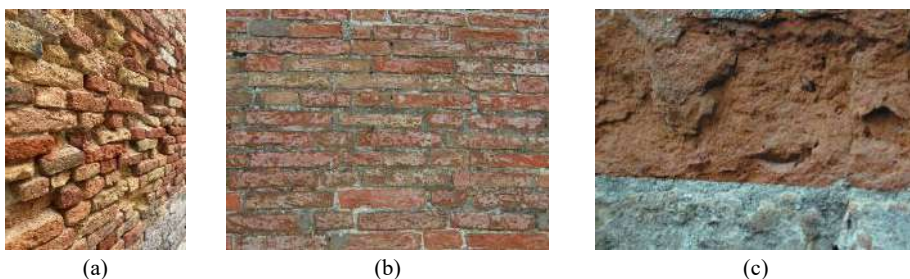


Figura 5-18 – Alcuni fenomeni di degrado superficiale delle murature: (a) Erosione portata da piogge; (b) Efflorescenze dovute a umidità (Zevi, 2007); (c) Scagliatura per risalita (Zevi, 2007).

Danneggiamenti strutturali

Ben più pericolosi dei degradi superficiali sono i danneggiamenti strutturali, legati a fenomeni ambientali *patologici* i cui effetti sono da analizzare con estrema cura durante la progettazione e il mantenimento in condizioni operative degli edifici in muratura. In questa categoria troviamo le infiltrazioni di acqua al di sotto delle fondazioni, gli effetti di scavi antropici in prossimità degli edifici e i fenomeni di liquefazione dei terreni, che generalmente comportano l'insorgere di cedimenti differenziali nella struttura muraria, o l'occorrenza di alluvioni eccezionali in grado di compromettere, anche istantaneamente, la stabilità globale degli edifici. Questi fenomeni provocano sulle murature diversi effetti (danneggiamenti, il più delle volte collassi), riassumibili come di seguito:

1. *Fratturazione o fessurazione (strutturale)*: la fessurazione o fratturazione della compagine muraria può essere dovuta a uno o più fenomeni concomitanti (infiltrazione, scavi, liquefazione, alluvioni, etc.). Normalmente la fessurazione propaga nel piano dei maschi murari o delle fasce di piano (avendo già interessato l'intero spessore delle pareti). In aggiunta, l'acqua, insediandosi nelle fessure esistenti, può successivamente aggravare il quadro fessurativo per via del susseguirsi di cicli di gelo e disgelo.
2. *Crollo strutturale*: Il crollo strutturale può presentarsi in due modalità: (i) Progressivo, come ad esempio a seguito di infiltrazioni di acqua (prolungate nel tempo) al di sotto delle fondazioni, o a seguito di scavi effettuati in prossimità di un edificio, che da un lato possono determinare la riduzione di rigidità orizzontale del terreno ospitante l'edificio, ma dall'altro anche fenomeni di migrazione di acqua con conseguente svuotamento di camere sotterranee; o in generale alterazione delle condizioni strutturali originali del terreno su cui è realizzata la struttura. In questa prima modalità è tipico notare l'insorgenza di fessure che propagano progressivamente nel tempo. (ii) Improvviso, come ad esempio nel caso dell'insorgenza di fenomeni di liquefazione durante eventi sismici o per via di urti massivi di acqua o materiale solido trasportato durante alluvioni eccezionali o maremoti. In questa seconda modalità è tipico notare l'insorgere di rotazioni rigide dell'edificio e/o l'istantanea formazione di fessure. Il crollo avviene comunemente fuori dal piano.

Gli effetti dell'acqua sul danneggiamento strutturale delle murature riguardano più nello specifico 4 fenomeni principali:

1. *Infiltrazione e/o oscillazioni della falda*: Le infiltrazioni, se prolungate nel tempo possono determinare cedimenti differenziali delle fondazioni. Tale situazione è rilevante in terreni sconnessi mentre risulta un fenomeno trascurabile in suoli estremamente compatti (es. bedrock). In Vandanapu et al., (2019), ad esempio, gli autori mostrano come anche solo la continua irrigazione dei prati, nel caso in cui il terreno favorisce il fenomeno di infiltrazione, alcuni strati profondi possono andare incontro a compattazione. Il tutto porta a un cedimento localizzato degli strati superficiali dove sono impostate le fondazioni. Allo stesso modo, oscillazioni di falda possono determinare cicli di fatica nel terreno, che compattandosi porta all'insorgere di cedimenti differenziali nella sovrastruttura, tipicamente molto diffusi. Un esempio dell'insorgere di danneggiamenti dovuti alle oscillazioni della falda (e in concomitanza alla costruzione di strutture sotterranee) è riportato in Couto et al., (2020), dove gli autori analizzano la performance sismica degli edifici in muratura di Pombalino a seguito di cedimenti differenziali delle fondazioni; o in Pistone et al., (2017), dove le oscillazioni stagionali della falda idrica hanno comportato il danneggiamento diffuso della manica lungo via Fiume dell'ex Ospedale Psichiatrico Chiarugi, a Racconigi (CN).
2. *Scavi profondi*: I cedimenti che insorgono a seguito di scavi (es. tunnel della metropolitana) possono essere fortemente influenzati dal peso dell'edificio e dalla tipologia di terreno. In Burd et al., (2000), gli autori concludono che i cedimenti degli edifici per presenza di cavità sotterranee sono caratterizzati da una modalità di deformazione *monopolizzante*, ossia uniforme e concentrata in una specifica zona dell'edificio.
3. *Liquefazione*: Nel caso di edifici in muratura, le alterazioni del suolo possono anche comportare fessurazioni diffuse in tutto l'edificio. A tal proposito, in Di Ludovico et al., (2020), gli autori effettuano una correlazione tra danno strutturale e liquefazione e introducono un parametro (atto a definire gli effetti di liquefazione a livello del suolo) correlato ai gradi di danno definiti secondo la Scala Macrosismica Europea: EMS-98.

4. *Alluvioni e Maremoti*: Alluvioni e maremoti generano danni catastrofici sulle strutture in muratura. Infatti, tali fenomeni sono sempre associati ad alti valori di energia (movimentazioni di masse elevate) che deve essere dissipata quando acqua e/o detriti incontrano gli edifici. I danni, quindi, possono variare da piccoli danneggiamenti locali, per passare a collassi nel piano dei maschi murari (es. formazione di lesioni) ed arrivare a crolli generalizzati con espulsione di materiale fuori dal piano. Per far luce su questo tipo di dissesti, in Lonetti e Maletta (2018) gli autori studiano gli effetti delle alluvioni sugli edifici in termini di fenomeni di danneggiamento e meccanismi di collasso. Per far ciò, nel loro studio vengono presi in considerazione diversi potenziali collassi strutturali, di cui vengono discusse le condizioni di attivazione, sia in termini di caratteristiche strutturali che caratteristiche del fluido impattante sull'edificio. Infine, vengono forniti abachi adimensionali che forniscono un fattore di sicurezza strutturale in funzione delle proprietà strutturali, geometriche e delle caratteristiche di inondazione della zona dove è ubicata la struttura.

In Figura 5-19 sono riportate alcune immagini dei più comuni fenomeni di danneggiamento strutturale che interessano gli edifici in muratura.

È bene sottolineare che, sia i degradi superficiali che i danneggiamenti strutturali dovuti all'effetto dell'acqua, costituiscono, anche se con intensità differente, un'importante fonte di pericolo per gli edifici in muratura. Infatti, degrado superficiale e danneggiamento strutturale sono fenomeni correlati. Il degrado superficiale può provocare una riduzione delle performance strutturali sia dal punto di vista della durabilità della struttura, sia che questa debba rispondere a un fenomeno distruttivo. Riferimenti generali sulle varie tipologie di dissesti e quadri fessurativi che interessano gli edifici in muratura possono essere trovati in Spizuoco (2019).

Si tenga presente che i fenomeni di degrado superficiale, non essendo causa di deformazioni di ampiezza significativa sulla struttura, non possono essere rilevati tramite l'utilizzo di dati satellitari. Al contrario, i fenomeni di danneggiamento strutturale a cinematica lenta dovuti all'azione delle acque quali, a titolo di esempio, i cedimenti di fondazione dai moti di falda sotterranea, possono essere utilmente indagati impiegando il telerilevamento satellitare.

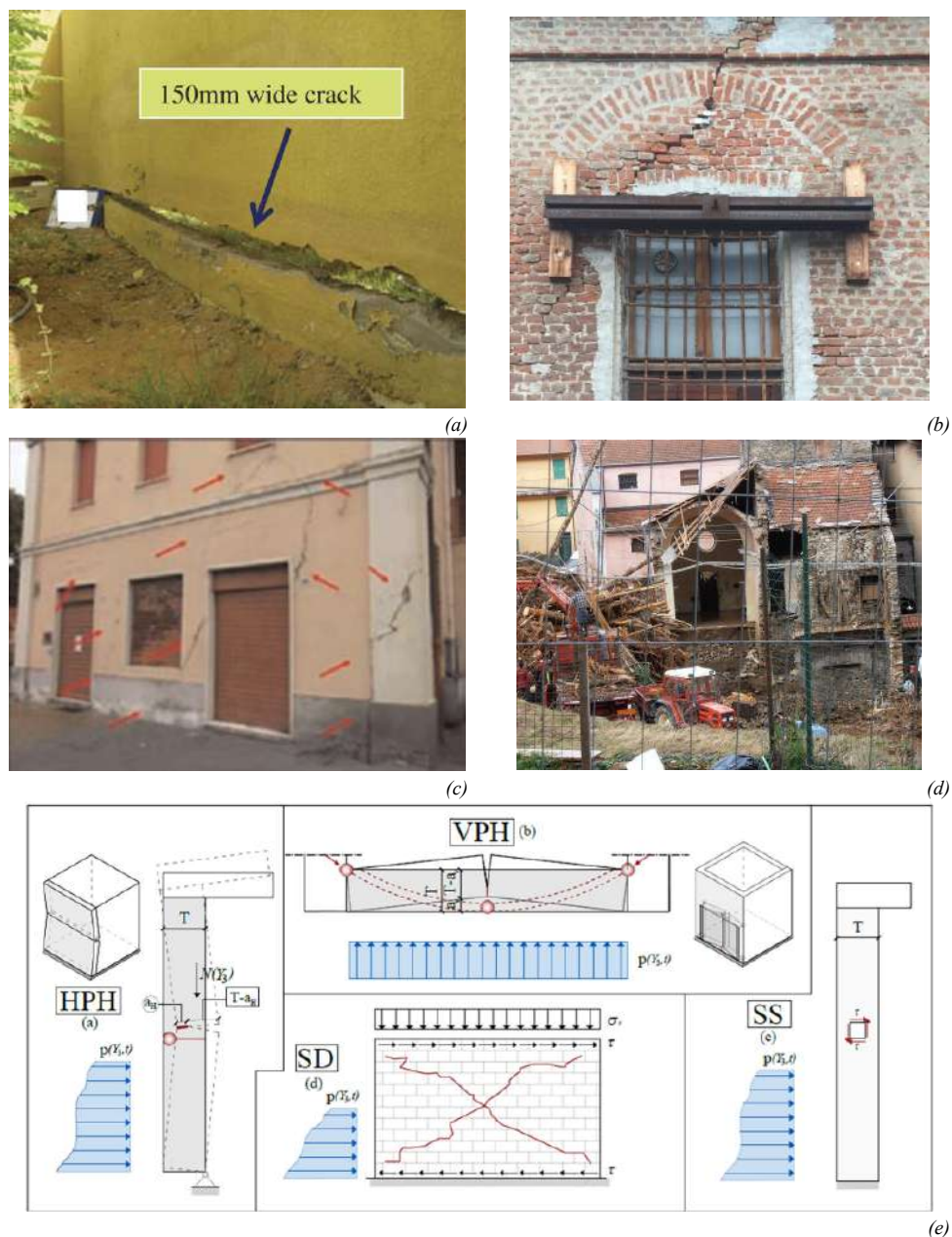


Figura 5-19 – Alcuni fenomeni di danneggiamento profondo delle murature: (a) Cedimento dovuto a infiltrazioni di acqua (Vandanapu et al., 2019); (b) Fessura insorta a seguito di oscillazioni stagionali della falda idrica nell'edificio del Chiarugi (Pistone et al. 2017); (c) Danni insorti a seguito di fenomeni di liquefazione e non linearità dovute al sisma (Di Ludovico et al., 2020); (d) Esempio di danneggiamenti su edifici in muratura a seguito dell'alluvione di ottobre-novembre 2011 in Liguria (<http://www.informazioneconsostenibile.info/4552/alluvione-in-liguria-considerazioni-sul-campo/>); (e) Meccanismo di danno nel piano e fuori dal piano dovuto a un carico idrico (Lonetti e Maletta, 2018).

5.2.3 Azione sismica

I danni causati agli edifici in muratura dalle azioni sismiche, facendo principalmente riferimento alla componente orizzontale di tali forze, possono essere tradizionalmente ricondotti a due classi di comportamento (Giuffrè, 1993): comportamento fuori dal piano delle pareti, o meccanismi di primo modo, e comportamento nel piano delle pareti, o meccanismi di secondo modo. In generale, la predominanza dell'uno o dell'altro meccanismo dipende da molteplici fattori, fra cui la qualità muraria, la qualità del collegamento fra pareti, i collegamenti pareti-solai, la rigidità dei solai nel loro piano, la presenza elementi spingenti (coperture, volte non contrastate), la presenza di elementi ritegno (catene metalliche, cordoli di piano in calcestruzzo armato).

I meccanismi di primo modo coinvolgono la risposta fuori dal piano di pareti murarie – indotta da forzanti sismiche ortogonali al loro asse medio – il cui collasso è associato ad una condizione di perdita di equilibrio. Tali meccanismi possono coinvolgere, in funzione della qualità muraria, porzioni di parete più o meno significative, tramite un comportamento assimilabile a corpo rigido della muratura (Figura 5-20a) oppure con sgretolamenti ed espulsioni locali, anche di singoli paramenti (Figura 5-20b). L'attivazione di cinematismi fuori dal piano, dunque, coinvolge la risposta indipendente delle pareti ed è tipica di edifici in cui non è garantito un saldo collegamento fra pareti ortogonali – ad esempio, a causa di uno scarso ammassamento murario nei cantonali o tra pareti esterne ed interne – o fra pareti e solai di piano – in assenza di elementi di ritegno quali catene metalliche o cordoli di piano.



(a)



(b)

Figura 5-20 – Meccanismi di primo modo: (a) risposta locale fuori dal piano in un edificio a L'Aquila, conseguente al sisma del 2009 e risultante nell'attivazione di un cinematismo di ribaltamento rigido di un muro perimetrale; (b) espulsione locale del paramento murario esterno in una scuola colpita dal sisma del Centro Italia del 2016.

Nel caso dei meccanismi di secondo modo, la propagazione di lesioni all'interno della parete muraria è associata al superamento delle proprietà di resistenza della muratura. La prevalenza di meccanismi di secondo modo è riconducibile ad un comportamento sismico *scatolare d'insieme*, in cui le pareti murarie collaborano mutuamente e contribuiscono alla risposta globale in ragione della loro rigidità e resistenza nel piano. In questo caso si realizza il cosiddetto comportamento scatolare della struttura – assicurato da una adeguata rigidità nel piano dei solai e dall'efficacia dei collegamenti sopra citati – per la redistribuzione delle azioni orizzontali fra le pareti, attingendo così alle massime riserve di resistenza e duttilità disponibili in funzione della tipologia muraria. In tal caso, i danni sismici appaiono generalmente diffusi sulla struttura (Figura 5-21a,b).



(a)



(b)

Figura 5-21 – Meccanismi di secondo modo: (a) risposta nel piano delle pareti in un edificio colpito dal sisma dell'Aquila nel 2009, concentrata al piano terra; (b) lesioni a taglio nei maschi del primo piano in una scuola colpita dal sisma del Centro Italia del 2016.



(a)



(b)

Figura 5-22 – Danno sismico alle pareti murarie, concentrato (a) nei maschi (Božidar Stojadinovic, NISEE/PEER Library, University of California, Berkeley); (b) nelle fasce.

L'osservazione del danno sismico sugli edifici causato da terremoti passati ha messo in evidenza come le lesioni si propaghino con maggiore ricorrenza in precise porzioni della parete muraria, quali maschi (Figura 5-22a) e fasce orizzontali (Figura 5-22b). I maschi, porzioni verticali di muratura comprese fra due aperture affiancate orizzontalmente, forniscono equilibrio alle azioni orizzontali attraverso modalità di risposta a taglio e pressoflessione, che si traducono in peculiari andamenti e localizzazioni delle lesioni nel pannello (Figura 5-23). Le fasce, porzioni di muratura comprese tra due aperture allineate verticalmente, giocano un ruolo primario nell'accoppiamento dei maschi, governandone altresì le modalità di risposta.

A seconda del rapporto relativo di rigidità e resistenza tra i maschi e le fasce murarie, si possono attivare a livello della parete meccanismi con concentrazioni delle lesioni nelle fasce (Figura 5-24a), nei maschi –alternativamente assimilabili a comportamenti di piano debole (Figura 5-24b) o estesi a più piani – o più comunemente in entrambi. Nei casi reali, data la complessità delle costruzioni esistenti, la distinzione fra tali comportamenti non è precisamente delineata. Tipicamente, il danno sismico osservato è il risultato di comportamenti eterogenei e risulta diffuso sia nei maschi che nelle fasce con modalità di danneggiamento miste.

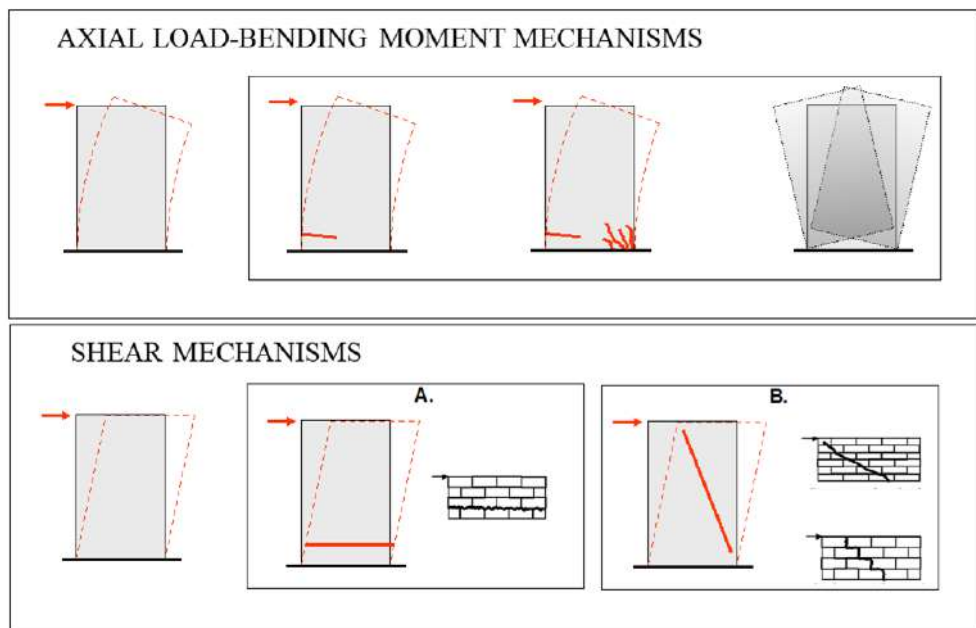


Figura 5-23 – Modalità di risposta nel piano dei pannelli murari a forzanti sismiche orizzontali e corrispondente andamento delle lesioni.

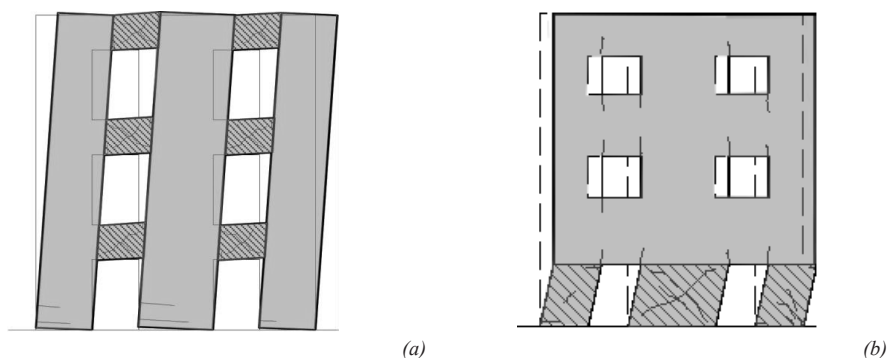


Figura 5-24 – Risposte globali nel piano: (a) danneggiamento delle fasce con risposta a mensola dei maschi murari; (b) danneggiamento dei maschi di piano e attivazione del meccanismo di piano debole.

Il danno sismico, inoltre, può ovviamente coinvolgere gli elementi strutturali orizzontali (solai di piano, volte, coperture, etc.), manifestandosi tipicamente con lesioni all'interfaccia con le strutture verticali, distacchi e crolli degli orizzontamenti parziali o totali.

Ulteriori informazioni riguardanti i meccanismi di danno negli edifici in muratura, anche a carattere monumentale assimilabili a palazzi, sono disponibili nei seguenti documenti:

- “Linee guida per il rilievo, l'analisi ed il progetto di interventi di riparazione e consolidamento sismico di edifici in muratura in aggregato”, ReLUIS-DPC 2010;
- “Scheda per il rilievo del danno ai beni culturali – palazzi”, Modello B-DP PCM-DPC MiBAC 2006.

Esempi di danno sismico osservato sulle strutture in muratura, per quanto concerne i recenti terremoti italiani, sono riportati ad esempio in Calderoni et al., (2020), Penna et al., (2014), Sorrentino et al., (2019).

Inoltre in D'Ayala e Speranza, (2003) sono riportati svariate schematizzazioni con riferimento ai meccanismi locali. Essendo il sisma un fenomeno a cinematica veloce che può causare, in maniera del tutto repentina, deformazioni di ampiezza significativa, l'utilizzo di dati satellitari per lo studio di tali effetti sulle strutture in muratura è inficiato dalla perdita di coerenza nelle misure interferometriche (benché esistano singolari applicazioni della letteratura al riguardo, si veda Sezione 5.1).

5.3 RIFERIMENTI

Bozidar Stojadinovic, NISEE/PEER Library, University of California, Berkeley. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2003. Preventing Earthquake Disasters: The Grand Challenge in Earthquake Engineering: A Research Agenda for the Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES). Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10799>.

Bozzano F., Esposito C., Mazzanti P., Patti, M., Scancella S. (2018). Imaging multi-age construction settlement behaviour by advanced SAR interferometry. *Remote Sensing*, 10, 1137.

Burd H. J., Housby G. T., Augarde C. E., Liu G. (2000). Modelling tunnelling-induced settlement of masonry buildings, *Proc. Inst. Civ. Eng. Eng.*, 143(1), 17–29.

Cascini, L., Ferlisi, S., Fornaro, G., Lanari R., Peduto, D., Zeni, G. (2006). Subsidence monitoring in Sarno urban area via multi temporal DInSAR technique. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 1709-1716.

Couto R., Bento R., Gomes R. C. (2020). Seismic performance and fragility curves of historical residential buildings in Lisbon downtown affected by settlements. *Bull. Earthq. Eng.*, 18(11), 5281–5307.

Di Ludovico M., Chiaradonna A., Bilotta E., Flora A., Prota A. (2020). Empirical damage and liquefaction fragility curves from 2012 Emilia earthquake data, *Earthq. Spectra*, 36(2), 507–536.

Infante D., Di Martire D., Confuorto P., Ramondini M., Calcaterra D., Thomas R., Centolanza G. (2014). Multi temporal assessment of building damage on a landslide-affected area by interferometric data. In 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI). IEEE.

Lonetti P., Maletta R. (2018). Dynamic impact analysis of masonry buildings subjected to flood actions, *Eng. Struct.*, 167, 445–458.

Macchiarulo V., Giardina G., Milillo P., Gondizalez Marti J., Sanchez J., DeJong, M. (2019). Settlement induced building damage assessment using MT-InSAR data for the crossrail case study in London. In International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC) Driving data-informed decision-making (pp. 721-727). ICE Publishing.

Mastrodicasa S., (1943). *Dissesti statici delle strutture edilizie – diagnosi, consolidamento, istituzioni teoriche, applicazioni pratiche*. Hoepli editore.

Mazzanti P., Cipriani I. (2009). Terrestrial SAR Interferometry monitoring of a building in a city of Rome. In FRINGE 2011 Workshop on ERS/Envisat SAR Interferometry, Frascati, Italy.

Peduto D., Nicodemo G., Caraffa M., Gullà G. (2018). Quantitative analysis of consequences to masonry buildings interacting with slow-moving landslide mechanism: a case of study. *Landslides*, 15, 2017-2030.

Pistone G., Ceravolo R., Lenticchia E. (2017). Survival of the historical wing of the former neuropsychiatric hospital of Racconigi (CN), in Proceedings of the IF-CRASC-17.

Reale D., Fornaro G., Panciullo A., Zu X., Bamler R. (2011). Tomographic imaging and monitoring of buildings with very high resolution SAR data. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 8, 661-665.

Roca P., Lourenço P. B., Gaetani A. (2019). *Historic construction and conservation: materials, systems and damage*. Routledge editore.

Russo C. (1930). *Le lesioni dei fabbricati. Studio teorico-pratico*. Unione Tipografica Editrice Torinese (Utet).

Spizuoco A., Spizuoco A. (2019). *Dissesti e quadri fessurativi di fabbricati in muratura*. Editor: Lulu.com. ISBN: 9780244522957

UNI-13/04/2006-11182, Cultural heritage natural and artificial stone description of the alteration.

Vandanapu R., Omer J. R., Attom M. F. (2019) Three-dimensional finite element analyses of ground settlement and structural damage caused by irrigation of desert landscapes overlying collapsible soil strata. *Int. J. Geotech. Eng.*, 16(1), 1–13.

Zevi L. (2007). *Il manuale del restauro architettonico*, Mancosu Editore, Roma.

Zhu M., Wan X., Fei B., Qiao Z. Ge C., Minati F., Costantini M. (2018). Detection of building and infrastructure instabilities by automatic spatiotemporal analysis of satellite SAR interferometry measurements. *Remote Sensing*, 10, 1816.

6 EDIFICI ORDINARI E DI IMPORTANZA STRATEGICA IN CALCESTRUZZO ARMATO

6.1 STATO DELL'ARTE

Si presenta in questo paragrafo un breve excursus della letteratura esistente nel campo delle applicazioni della tecnica DInSAR come strumento finalizzato allo studio di fenomeni deformativi riguardanti edifici in calcestruzzo armato.

Si possono trovare in letteratura molte applicazioni basate sull'utilizzo di dati satellitari per eseguire analisi di deformazioni del suolo indotte da processi naturali e/o indotti dall'uomo in zone antropizzate. Diversi studi hanno valutato le deformazioni del terreno causate da frane con riferimento a singoli edifici/infrastrutture in calcestruzzo armato o ad aree estese con presenza di edifici in calcestruzzo armato (e.g., Bianchini et al., 2015; Di Martire et al., 2016; Infante et al., 2016; Del Soldato et al., 2018; Confuorto et al., 2019; Di Carlo et al., 2021; Talledo et al., 2021; Miano et al., 2022). Altri studi hanno valutato le deformazioni del terreno causate da subsidenza con riferimento a singoli edifici/infrastrutture in calcestruzzo armato o ad aree estese (e.g., Cascini et al., 2006; Manunta, 2008; Stramondo et al., 2008; Scifoni et al., 2016; Bozzano et al., 2018).

Tra le applicazioni segnalate, si evidenzia lo studio eseguito da Manunta et al., (2008) che si occupa, tra l'altro, del monitoraggio dei cedimenti dovuti a fenomeni di consolidamento del terreno e relativi ad alcuni edifici di diversa tipologia strutturale nell'area di Roma, come mostrato anche dalle immagini riportate in Figura 6-1.

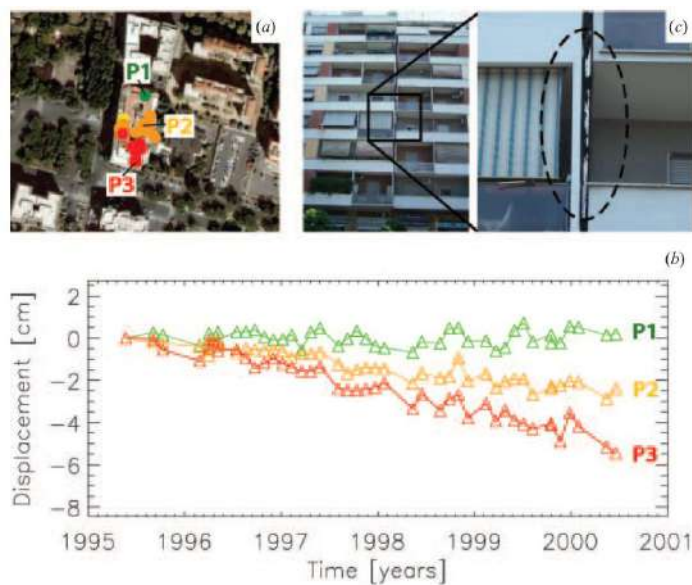


Figura 6-1 (a) Immagine aerea dell'edificio investigato con sovrapposta la mappa di velocità media di spostamento (DInSAR); (b) Serie tempo - spostamento per i tre PS P1, P2 and P3, riportati in (a); (c) Evidenza di fenomeni deformativi in corso riportati nelle immagini dell'edificio (Manunta et al., 2008).

Inoltre, alcune applicazioni focalizzano la loro attenzione sulla valutazione di un possibile danno strutturale di singoli edifici, attraverso l'utilizzo di dati satellitari ottenuti con diverse tecniche. Ad esempio, in Arangio et al., (2013), il risultato di un'analisi DInSAR è stato integrato con un modello semiempirico al fine di analizzare tre edifici in c.a. situati nella città di Roma. I risultati ottenuti dal modello sono stati confrontati con i danni osservati sugli edifici, mostrando un buon accordo e dimostrando che l'approccio proposto può rappresentare un efficace strumento per valutare in tempi brevi le condizioni strutturali degli edifici. La Figura 6-2 riporta alcune immagini

per uno degli edifici investigati nel lavoro. Va però tenuto conto che, essendo le misure di spostamento relative rispetto all'istante iniziale di acquisizione, tutti i livelli di danno stimati devono essere intesi come limite inferiore del danno reale che potrebbe essere stato raggiunto.

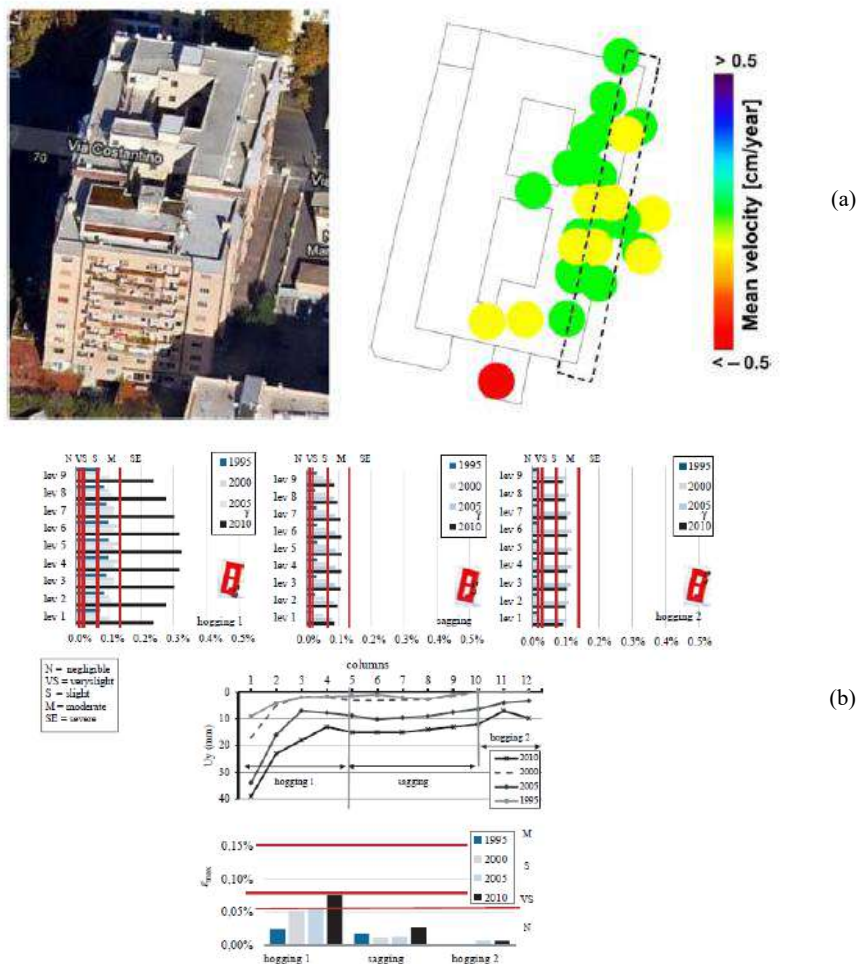


Figura 6-2 (a) Vista 3D dell'edificio con punti di misura SAR e valori di velocità media di spostamento associati; (b) Valutazione dei danni sulla facciata est, deformazioni taglianti e flessionali (con soglie di danno in rosso) e profili dei cedimenti dal 1995 al 2010, associati ai tratti di hogging e sagging (funzione delle concavità della deformata del terreno). Arangio et al., 2013.

In Miano et al., (2021), sono state utilizzate letture di spostamento satellitare per la previsione e valutazione dei danni di un edificio esistente in c.a., indotti da frane a movimento lento nell'insediamento urbano di Moio della Civitella (provincia di Salerno, Italia). Tali letture sono state anche combinate con il possibile effetto dell'azione sismica, per valutare la risposta dell'edificio ad una condizione potenziale di multi-hazard frana-sisma (Mele et al., 2022). Del Soldato et al., (2019) ha combinato i danni indotti dalle frane su strutture e gli spostamenti al suolo per definire curve di fragilità per diverse tipologie di strutture.

Un'altra interessante applicazione è stata eseguita da Guida, (2015) in ambito forense. A seguito del manifestarsi di un quadro fessurativo in un fabbricato in c.a. e in annessi manufatti secondari, sono stati analizzati i dati generali

del movimento dell'area, resi disponibili da telerilevamento satellitare. Dallo studio dei dati è stato individuato l'andamento tendenziale che è stato posto a confronto con le fluttuazioni della falda; sono state ricavate le componenti di velocità orizzontale e verticale ed è stato ottenuto lo spostamento verticale complessivo nell'arco di tempo di interesse.

Si segnalano, poi, tra le altre, alcune applicazioni in ambito internazionale, tra cui quella svolta da Bru et al., (2013), che si sono occupati della valutazione delle deformazioni di edifici di diversa tipologia strutturale interessati da subsidenza, utilizzando misure interferometriche, e quella svolta da Zhu et al., (2018), che ha trattato il rilievo dell'instabilità di edifici ed infrastrutture di diversa tipologia strutturale sulla base di misure interferometriche SAR. Inoltre, Tomas et al., (2013) ha presentato una rassegna di questioni pratiche inerenti l'utilizzo di tecniche di interferometria satellitare per lo studio dei fenomeni di subsidenza del suolo, sulla base dei risultati di diversi casi studio in Spagna, mentre Drougkas et al., (2020) ha proposto una metodologia per valutare l'evoluzione di danni nelle strutture edilizie, soggette a cedimenti differenziati e fenomeni di sollevamento.

6.2 DANNI CHE POSSONO INTERESSARE LE STRUTTURE

Le strutture in calcestruzzo armato soggette ad una generica azione possono manifestare danneggiamenti sottoforma di effetti visibili, come lesioni, deformazioni in campo plastico o grandi spostamenti, oppure possono manifestare variazioni anche significative dello stato di sollecitazione, come ad esempio nel caso di strutture iperstatiche (e.g., telai a nodi continui).

Da sottolineare come le diverse tipologie di danno possano essere rilevabili con tecniche SAR quando comportino spostamenti caratterizzati da evoluzione a cinematica lenta. Rientrano in tale categoria i danni conseguenti alle azioni legate alle deformazioni dei terreni (paragrafo 6.2.1), a quelle delle acque (paragrafo 6.2.2) ed alle deformazioni termiche e fenomeni reologici del calcestruzzo (paragrafo 6.2.4).

È importante tenere presente poi che, nel caso gli spostamenti relativi tra acquisizioni successive siano troppo elevati, superando in particolare la lunghezza d'onda del segnale utilizzato, eq. (8), si possa incorrere in problemi di ambiguità della misura e conseguente decorrelazione, tipico caso dei fenomeni a cinematica veloce. In tale categoria rientrano gli spostamenti conseguenti ad eventi sismici (i cui potenziali danni sono presentati nel paragrafo 6.2.3). Nello specifico, come riportato nel paragrafo 4.2.4, le deformazioni cosismiche associate ad un terremoto sono rilevabili attraverso un interferogramma ottenuto confrontando due immagini rispettivamente pre e post sisma. Gli spostamenti "asismici" lungo faglie possono essere esaminati attraverso serie temporali di spostamento ricostruite con tecniche di interferometria SAR multitemporale (Cetin et al., 2014).

6.2.1 Azioni legate alle deformazioni dei terreni

Le azioni dei terreni comportano generalmente spostamenti con evoluzione a cinematica lenta e sono quindi, in genere, monitorabili con tecniche DInSAR. Le azioni dei terreni si possono suddividere in differenti macro-categorie. Una prima categoria è relativa ai cedimenti. Gli effetti dei cedimenti possono essere limitati a quadri fessurativi circoscritti, ovvero a deformazioni ancora compatibili con l'esercizio della costruzione, ma possono anche evolvere in crolli locali o globali della struttura.

In un edificio intelaiato nudo in calcestruzzo armato, un cedimento produce tipicamente un dissesto prevalentemente localizzato nelle travi, le quali possono subire anche grandi spostamenti in quanto i nodi sono generalmente liberi di ruotare. Per bassi valori dell'entità del cedimento insorgono lesioni da trazione alle estremità delle travi. All'aumentare dell'entità del cedimento si verifica lo snervamento delle barre longitudinali nelle zone tese, e successivamente lo schiacciamento del calcestruzzo nelle zone compresse, innanzitutto dove il momento flettente sollecitante è massimo. Nel caso di barre lisce, la formazione di lesioni da compressione è preceduta dal fenomeno dello sfilamento delle barre dal calcestruzzo. La compressione può provocare, inoltre, instabilità delle barre longitudinali. In edifici multipiano, il dissesto riguarderà prevalentemente i piani bassi, che sono direttamente coinvolti dal fenomeno. Risalendo lungo l'altezza dell'edificio il carico si ridistribuisce, attraverso le travi, anche su elementi distanti da quelli direttamente coinvolti. All'aumentare dell'entità del cedimento corrisponde una diminuzione dello sforzo normale nel pilastro interessato dal cedimento, che viene trasferito dalla trave ai pilastri vicini tramite taglio e flessione.

In un edificio in calcestruzzo armato con telai tamponati, per effetto del cedimento, l'elemento che per primo fessura è usualmente la tamponatura, con lesioni inclinate la cui direzione consente di individuare solitamente la porzione che ha subito il cedimento.

Tali cedimenti possono essere prodotti da una serie di fenomeni che coinvolgono il terreno, come ad esempio fenomeni di subsidenza, e/o frane. La tipologia, direzione ed entità del cedimento sono legate al fenomeno che li genera.

Nel caso di scavi, ed in particolare di quello di una galleria, i danni che si possono verificare su un fabbricato sono generalmente associati ai cedimenti prodotti dallo scavo della galleria medesima. A parità di condizioni, tali cedimenti risultano più marcati per le gallerie superficiali. I cedimenti si sviluppano progressivamente durante lo scavo ed assumono una forma tipica detta "catino di subsidenza". I danni indotti sugli edifici preesistenti dipendono sia dall'entità dei cedimenti che dalle caratteristiche strutturali degli edifici medesimi, risultando tipicamente più marcati nel caso di edifici con fondazioni flessibili e/o superficiali.

Nel caso di cedimenti legati ad eventi franosi, sulle strutture ubicate a monte dei pendii, le frane producono cedimenti differenziali che causano effetti analoghi a quelli descritti in precedenza. Sulle strutture ubicate a valle, invece, l'azione franosa si traduce in un impatto delle rocce e dei detriti trasportati sulla struttura. L'impatto causa i danni più gravi principalmente al piano terra. In caso di movimento lento con trasporto di materiale, il danno è principalmente sugli elementi non strutturali. Fenomeni franosi possono indurre, nei casi più gravi, formazione di fessure di ampiezza considerevole, distorsione della struttura, fuori piombo degli elementi verticali e collasso parziale o totale della struttura.

Fenomeni quali liquefazione del terreno o frane possono essere indotti da una azione sismica.

A titolo di esempio, la Figura 6-3 mostra tipiche tipologie di danni strutturali per edifici in c.a. in seguito ad azioni franose. Tutti i fenomeni descritti, specie quelli con andamento lento nel tempo, sono associati a stati deformativi dell'edificio e che possono essere rilevati tramite lo strumento dei dati satellitari.



Figura 6-3 – Esempi di danni strutturali causati da frane: (a) San Fratello (provincia di Messina) (Bianchini et al., 2015); (b) Verbicaro (provincia di Cosenza) (Nicodemo et al., 2014).

6.2.2 Azioni delle acque

Le azioni delle acque possono comportare spostamenti con evoluzione a cinematica lenta e quindi, in tal caso, monitorabili con tecniche DInSAR. Nel caso di infiltrazioni di acque nel sottosuolo, edifici dotati di fondazioni indirette affronteranno generalmente meglio il trauma, rimanendo spesso indenni da cedimenti. In presenza di fondazioni dirette, invece, il manufatto risulterà più vulnerabile. Fenomeni alluvionali possono indurre impatti sulla struttura alla pari dei fenomeni franosi.

A titolo di esempio, la Figura 6-4 mostra gli effetti, su una struttura in calcestruzzo armato, di cedimenti subiti da un edificio a seguito di un nubifragio.



Figura 6-4 – Tipologie di danni strutturali per edifici in c.a. in seguito all'azione delle acque: Napoli – cedimenti subiti da un edificio a seguito di un nubifragio (Augenti, 2009).

6.2.3 Azione sismica

La principale tra le azioni naturali che possono interessare le strutture è l'azione sismica. La possibilità di monitorare gli spostamenti conseguenti ad azione sismica con tecniche interferometriche è stata presentata e discussa nel paragrafo 4.2.4. In questo paragrafo, si riportano alcune considerazioni che riguardano i potenziali danni da azione sismica per gli edifici in c.a. a telaio, sulla base di quanto riportato in Zuccaro e Papa (2004).

Nelle travi, la sollecitazione sismica che si somma temporaneamente ai carichi verticali può provocare la formazione di lesioni ortogonali all'asse, soprattutto in elementi poco armati. Nei pilastri, possono crearsi lesioni trasversali all'asse in testa o al piede, che sono, a parità di livello di sicurezza, generalmente più modeste rispetto alle corrispondenti lesioni nelle travi, per la presenza dello sforzo normale che tende a richiuderle. Tali lesioni sono dovute al processo di formazione di una cerniera plastica all'estremità superiore o inferiore, rispettivamente, del pilastro, in corrispondenza del collegamento con un elemento strutturale di rigidità maggiore. Nei pilastri possono venirsi a formare anche lesioni diagonali, nel caso in cui venga trasmesso un elevato sforzo di taglio. Ciò accade in pilastri rigidi, come ad esempio i pilastri tozzi, oppure in pilastri di modesta rigidità cui vengono trasferiti sforzi di taglio derivanti dalle tamponature collaboranti molto rigide e ben ammassate. Sono da considerare con attenzione le lesioni con andamento verticale, riconducibili agli schiacciamenti del calcestruzzo, o per l'insorgere di instabilità delle barre longitudinali con staffatura inadeguata, con conseguente espulsione del copriferro. Ad avanzati livelli di danno possono manifestarsi percettibili fuori piombo dovuti al sisma. Nei casi più gravi si possono avere anche forti espulsioni di copriferro che interessano persino il nucleo, forti sbandamenti delle armature dei pilastri, fuori piombo superiori all'1-2% dell'interpiano, distacchi ampi ed estesi fra solai o coperture e strutture portanti principali, crolli di interi pannelli di tamponatura, crolli parziali nelle strutture principali fino ad arrivare al collasso del fabbricato.

Nel caso delle costruzioni intelaiate in c.a., ad ogni modo, i dissesti coinvolgono solitamente i nodi, i quali nelle costruzioni esistenti manifestano spesso una rottura di tipo fragile che può pregiudicare il comportamento globale dell'intera struttura. In particolare, in assenza di idonea staffatura nei nodi, possono formarsi lesioni diagonali, indice di una significativa perdita di rigidità e resistenza, con conseguente diminuzione della capacità nodale di trasmettere gli sforzi, che è tipica del sistema intelaiato. I nodi che prevalentemente tendono a lesionarsi sono quelli non confinati (nodo d'angolo o nodo di estremità), e ciò si verifica per effetto degli sforzi di trazione o compressione trasmessi al nodo stesso dalle armature di travi e pilastri o a causa dell'azione di puntone esercitata dalla tamponatura. Anche le riprese di getto, se non effettuate a regola d'arte, possono rappresentare un punto debole di scorrimento tra pilastro e nodo. Ovviamente le lesioni che si vengono a formare negli elementi strutturali

in calcestruzzo armato, se esposte per lungo tempo ad ambienti aggressivi, possono facilitare la corrosione delle barre di armatura e quindi diminuire nel tempo la capacità portante dell'elemento.

Inoltre, si sottolinea come la presenza di tamponature influenzi in modo significativo la risposta strutturale di un edificio intelaiato in calcestruzzo armato sottoposto ad azione sismica, a causa dei meccanismi di danno fragile che coinvolgono i pilastri e i nodi trave-pilastro. Le azioni sismiche possono indurre la formazione di lesioni nelle tamponature stesse, che sono elementi generalmente fragili e tendono a danneggiarsi ancora prima di pilastri, travi e nodi. Nelle tamponature possono verificarsi lesioni ad andamento diagonale in una sola direzione o in due direzioni (a X), rotazione della tamponatura intorno alla sezione di base o distacco della tamponatura dal telaio principale senza rotazione fuori dal piano. L'azione ciclica produce lesioni con andamento a X lungo le diagonali compresse, prosegue con lo schiacciamento agli angoli (generalmente quelli superiori) fino a provocare crolli parziali/totali della tamponatura. La rotazione della tamponatura intorno alla sezione di base si manifesta quando la tamponatura è mal collegata al telaio strutturale ed è soggetta ad un'azione sismica con direzione prevalente ortogonale ad essa.

Nelle strutture in c.a. possono crearsi anche lesioni verticali nei giunti di strutture adiacenti, nel caso in cui tra due edifici accostati il giunto abbia ampiezza inadeguata, per effetto del fenomeno del martellamento. Danni più gravi e collassi locali si riscontrano più frequentemente in caso di sfalsamento delle quote dei piani. Nei solai, invece, possono verificarsi lesioni trasversali in corrispondenza dell'attacco dei travetti alle travi a spessore; in tal caso la continuità fra struttura principale e secondaria potrebbe essere venuta a mancare, almeno in parte, oppure, più frequentemente, in direzione parallela ai travetti.

Per quanto riguarda le azioni sismiche verticali, la loro intensità è generalmente pari ad una percentuale dell'accelerazione di gravità per la quale la struttura risulta già progettata, pertanto non producono effetti rilevanti, ad eccezione delle strutture di grande luce, di quelle a sbalzo, di quelle spingenti e di quelle caricate da "elementi in falso". I dissesti indotti sono in tutto e per tutto simili a quelli prodotti da eccessi di carichi verticali.

Infine, con riferimento agli edifici in c.a. a parete, alcune tipologie frequenti di lesioni possono presentare andamento diagonale nella parete, possono presentarsi alla base della parete con andamento parallelo alla direzione della parete stessa o ancora possono essere localizzate agli estremi della base della parete.

Con riferimento agli edifici prefabbricati monopiano, l'azione sismica può indurre danneggiamento legato alla perdita di appoggio degli elementi strutturali orizzontali, come tegoli di copertura e travi, dagli elementi di supporto, quali travi e pilastri, rispettivamente (Reluis, 2012). Ciò si può verificare qualora il collegamento faccia affidamento esclusivamente sull'attrito per la trasmissione delle forze orizzontali, in assenza di vincoli di tipo meccanico. Altri danneggiamenti possono interessare i collegamenti di tipo meccanico trave-pilastro, con conseguente crisi del calcestruzzo, evidenziata dalla rottura del copriferro ed espulsione dello spinotto. Un'altra tipologia di dissesto causato da sisma negli edifici prefabbricati riguarda il collasso delle connessioni pannello-pilastro e pannello-trave, con conseguente caduta del pannello stesso, dove il pannello è generalmente un elemento prefabbricato in calcestruzzo armato, disposto orizzontalmente o verticalmente (Reluis, 2012). Forti azioni orizzontali, come il terremoto, possono indurre nelle strutture monopiano prefabbricate la perdita di verticalità dei pilastri a causa di una rotazione rigida al piede per la formazione di una cerniera plastica, oppure associata alla rotazione dell'intero elemento di fondazione o al danneggiamento dei componenti in calcestruzzo armato (bicchieri, plinti, ecc.) della fondazione stessa. Danni più lievi alla base di pilastri corrispondono all'incipiente formazione di cerniera plastica alla base, con sola formazione di fessure o con espulsione di copriferro ed instabilizzazione delle barre, in carenza di armatura trasversale.

6.2.4 Altre azioni sulle strutture

Nel caso di strutture in calcestruzzo armato, danni possono essere indotti dagli effetti delle variazioni termiche, in quanto, essendo strutture a schema iperstatico, le distorsioni termiche producono significative modifiche del loro regime di sollecitazione.

In una struttura intelaiata, gli elementi strutturali più esposti alle azioni termiche sono i pilastri esterni e le travi di copertura. Le travi tendono a dilatare, mentre i pilastri tendono a subire distorsioni.

La fessurazione si avrà nel momento in cui il momento sollecitante che nasce per effetto delle variazioni termiche supera il momento di prima fessurazione del calcestruzzo.

Per le travi di copertura, parzialmente esposte all'ambiente esterno, vanno considerate anche distorsioni di tipo lineare dovute alla differenza di temperatura tra l'esterno e l'interno, che possono causare una sollecitazione flettente.

Infine, le strutture c.a. sono soggette a deformazioni lente nel tempo, di tipo anelastico, quali il ritiro (deformazione in assenza di carico) o le deformazioni viscosi (in presenza di carico). Le deformazioni lente sono più rilevanti nelle strutture snelle, ad esempio le coperture di grande luce, e possono causare una inflessione dell'elemento stesso, che può essere dell'ordine anche di centimetri. Le deformazioni da ritiro possono provocare fessurazioni, anche importanti, già nelle fasi immediatamente successive alla costruzione, in solai e travi, quando la contrazione del calcestruzzo è contrastata da elementi rigidi, quali pareti, vani scala etc., e non si sono seguiti i corretti accorgimenti in merito alla maturazione del calcestruzzo per contenere le deformazioni da ritiro. Tali fessurazioni sono tipicamente distanti da uno a pochi metri, e possono essere passanti sullo spessore dell'elemento trave o solaio, con conseguente riduzione della rigidezza flessionale. Sia le distorsioni termiche che gli effetti reologici del calcestruzzo comportano generalmente spostamenti con evoluzione a cinematica lenta che, in generale, sono monitorabili con tecniche DInSAR.

6.3 RIFERIMENTI

Arangio, S., Calò, F., Di Mauro, M., Bonano M., Marsella, M., Manunta M. (2013). An application of the SBAS-DInSAR technique for the assessment of structural damage in the city of Rome. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(11), 1469-1483.

Augenti N. (2009). Crolli e dissesti strutturali: Stato dell'arte e prospettive, Atti del Convegno IF CRASC '09, Napoli, 2-4 Dicembre 2009.

Bianchini S., Pratesi F., Nolesini T. and Casagli N. (2015). Building deformation assessment by means of persistent scatterer interferometry analysis on a landslide affected area: The Volterra (Italy) case study. *Remote Sensing* 7, 4678-4701.

Bozzano F., Esposito C., Mazzanti P., Patti M., Scancelli S. (2018). Imaging multi-age construction settlement behaviour by advanced SAR interferometry. *Remote Sensing*, 10, 1137.

Bru G., Herrera G., Tomás R., Duro J., De la Vega R. Mulas J. (2013) Control of deformation of buildings affected by subsidence using persistent scatterer interferometry, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9:2, 188-200, DOI: 10.1080/15732479.2010.519710.

Cascini, L., Ferlisi, S., Fornaro, G., Lanari R., Peduto, D., Zeni, G. (2006). Subsidence monitoring in Sarno urban area via multi temporal DInSAR technique. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 1709-1716.

Confuorto P., Di Martire D., Infante D., Novellino A., Papa R., Calcaterra D., Ramondini M. (2019). Monitoring of remedial works performance on landslide-affected areas through ground- and satellite-based techniques. *CATENA* 178, 77–89.

Del Soldato M., Riquelme A., Bianchini S., Tomàs R., Di Martire D., De Vita P., Moretti S., Calcaterra D. (2018) Multisource data integration to investigate one century of evolution for the Agnone landslide (Molise, southern Italy). *Landslides* 15, 2113–2128.

Del Soldato M., Solari L., Poggi F., Raspini F., Tomás R., Fanti R., Casagli N. (2019). Landslide-induced damage probability estimation coupling InSAR and field survey data by fragility curves. *Remote Sensing* 11(12), 1486.

Di Carlo, F., Miano, A., Giannetti, I., Mele, A., Bonano, M., Lanari, R., ... & Prota, A. (2021). On the integration of multi-temporal synthetic aperture radar interferometry products and historical surveys data for buildings structural monitoring. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(5), 1429-1447.

- Di Martire D., Tessitore S., Brancato D., Ciminelli M.G., Costabile S., Costantini M., Graziano G.V., Minati F., Ramondini M., Calcaterra D. (2016). Landslide detection integrated system (LaDIS) based on in-situ and satellite SAR interferometry measurements. *Catena* 137: 406–421.
- Drougkas A., Verstrynghe E., Van Balen K., Shimoni M., Croonenborghs T., Hayen R., Declercq P.Y. (2020). Country-scale InSAR monitoring for settlement and uplift damage calculation in architectural heritage structures. *Structural Health Monitoring*, 1475921720942120.
- Guida G. (2015) Accertamenti e valutazioni relative al dissesto statico di un fabbricato in c.a., Atti del Convegno IF CRASC '15, Roma, 14-16 Maggio 2015.
- Infante D., Confuorto P., Di Martire D., Ramondini M., Calcaterra D. (2016). Use of DInSAR data for multi-level vulnerability assessment of urban settings affected by slow-moving and intermittent landslides. *Procedia Engineering*, 158, 470-475.
- Manunta M., Marsella M., Zeni G., Sciotti M., Atzori S., Lanari R. (2008). Two-scale surface deformation analysis using the SBAS-DInSAR technique: a case study of the city of Rome, Italy, *International Journal of Remote Sensing*, 29(6), 1665 – 1684. DOI: 10.1080/01431160701395278.
- Mele A., Miano A., Di Martire D., Infante D., Ramondini M., Prota, A. (2022). Potential of remote sensing data to support the seismic safety assessment of reinforced concrete buildings affected by slow-moving landslides. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(2), 1-22.
- Miano A., Mele A., Calcaterra D., Di Martire D., Infante D., Prota A., Ramondini M., (2021). The use of satellite data to support the structural health monitoring in areas affected by slow-moving landslides: a potential application to reinforced concrete buildings. *Structural Health Monitoring*, 1-23.
- Miano A., Di Carlo F., Mele A., Giannetti I., Nappo N., Rompatò M., ... & Scarascia Mugnozza G. (2022). GIS integration of DInSAR measurements, geological investigation and historical surveys for the structural monitoring of buildings and infrastructures: an application to the Valco San Paolo urban area of Rome. *Infrastructures*, 7(7), 89.
- Nicodemo G., Ferlisi S., Peduto D., Cascini L., Gullà G., Borrelli L., Fornaro G. (2014). Analisi di livello preliminare delle conseguenze indotte agli edifici da frane a cinematica lenta. IARG 2014, Incontro annuale dei ricercatori di geotecnica.
- Reluis (2012): Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici.
- Scifoni S., Bonano M., Marsella M., Sonnessa A., Tagliaferro V., Manunta M., Lanari R., Ojha C., Sciotti M. (2016). On the joint exploitation of long-term DInSAR time series and geological information for the investigation of ground settlements in the town of Roma (Italy), *Remote Sensing of Environment*, 182, 113-127, ISSN 0034-4257, doi:10.1016/j.rse.2016.04.017.
- Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M. (2008). Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 3160-3172.
- Talledo D., Miano A., Bonano M., Di Carlo F., Lanari R., Meda A., Mele A., Prota A., Saetta A., Stella A. (2022). Satellite radar interferometry: potentiality and limitations for structural assessment and monitoring, *Journal of Building Engineering*, 46, 103756. doi:10.1016/j.jobe.2021.103756
- Tomás R, Romero R, Mulas J, Marturia J, Mallorquí J, Lopez-Sanchez JM, Herrera G, Gutierrez J, González PJ, Fernandez J, Duque S, Concha-Dimas A, Cocksley G, Castaneda C, Carrasco D, and Blanco P (2013) Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain. *Environmental Earth Sciences*, 71, 163–181.

Zhu M., Wan X., Fei B., Qiao Z., Ge C., Minati F., Vecchioli F., Li J., Costantini M. (2018). Detection of Building and infrastructure instabilities by automatic spatiotemporal analysis of satellite SAR interferometry measurements. *Remote Sensing*, 10, 1816

Zuccaro G., Papa F. (2004). CD Multimediale MEDEA – Manuale di esercitazione sul danno ed agibilità per edifici ordinari in cemento armato

7 INFRASTRUTTURE RILEVANTI (PONTI, VIADOTTI, GALLERIE)

7.1 STATO DELL'ARTE

Negli ultimi anni, le infrastrutture di trasporto (in particolare ponti e viadotti) hanno fatto registrare significative criticità per quanto riguarda la sicurezza, criticità che in alcuni casi hanno portato al collasso delle opere, con notevoli impatti sociali ed economici (Wenzel, 2009). Queste criticità sono imputabili a cause e concause di diversa natura, quali: invecchiamento, degrado, uso improprio delle tecnologie nella costruzione, bassa qualità dei materiali e, in alcuni casi, carenza nella pianificazione della manutenzione delle opere nel tempo, ordinaria e straordinaria.

In questo contesto, il monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring, SHM) è uno strumento utile e necessario a fornire informazioni che possono supportare correttamente le strategie finalizzate all'aumento della vita utile delle infrastrutture, pianificando correttamente gli interventi di manutenzione, in modo da garantire costantemente le condizioni minime di sicurezza delle singole infrastrutture.

Oggi le tecniche per il monitoraggio strutturale si sono arricchite di tutto il panorama delle tecniche satellitari quale, ad esempio, l'Interferometria SAR Differenziale (DInSAR). Nell'ultimo decennio, come ampiamente descritto nei primi capitoli di queste linee guida, sono stati sviluppati sistemi di radar di nuova generazione (Synthetic Aperture Radar, SAR) ad altissima risoluzione (VHR), in particolare TerraSAR-X e COSMO-SkyMed, in grado di rilevare spostamenti superficiali millimetrici con la risoluzione spaziale di pochi metri quadrati (Proto et al., 2010 e Fornaro et al., 2013).

Il vantaggio dell'utilizzo di tali tecniche risiede nella possibilità di eseguire il monitoraggio da remoto, senza la necessità di installare strumentazioni on-site, la possibilità di ampie coperture dell'area di interesse e con frequenza dei dati di pochi giorni. Un ulteriore vantaggio dell'interferometria SAR è rappresentato dall'alta densità dei punti monitorati: è possibile, infatti, ottenere molti punti lungo il ponte per monitorare l'intera infrastruttura, a differenza di quello che invece si potrebbe ottenere dal monitoraggio on-site.

Numerose sono le applicazioni di queste tecnologie effettuate su ponti o viadotti in tutto il mondo. Particolare interesse rivestono gli studi che si sono concentrati sulla ricostruzione del processo deformativo che ha interessato varie strutture prima del loro crollo. Si citano a titolo di esempio i lavori di Selvakumarana et al., (2018), Milillo et al., (2019), Lanari et al., (2020).

Il primo si concentra sulla possibilità di effettuare un monitoraggio da remoto per contribuire alla previsione di un possibile collasso di ponti a rischio di erosione, effettuato prendendo il Tadcaster Bridge, in Inghilterra, come caso di studio, Figura 7-1. Il ponte in questione è stato protagonista di un parziale crollo dovuto all'azione di dilavamento esercitata dal fiume. Nello studio sono state analizzate le immagini di TerraSAR-X del ponte relative al periodo di due anni prima del crollo di una porzione dello stesso, utilizzando l'approccio SBAS (Small Baseline Subset). Gli autori riscontrano un comportamento anomalo nei dati registrati a partire da circa un mese prima dell'effettivo crollo suggerendo, quindi, il possibile utilizzo di InSAR come sistema di allerta nel monitoraggio strutturale dei ponti.

Gli altri due studi invece hanno come oggetto il ponte Morandi (Viadotto Polcevera) e sono stati condotti sfruttando set di dati storici di misurazioni SAR acquisite dalla costellazione italiana COSMO-SkyMed e dalla costellazione europea Sentinel-1A/B nel periodo 2009–2018 e dal satellite Envisat nel periodo 2003–2011. I risultati dei due studi sono discordanti, e dimostrano come in questo campo siano necessari ulteriori approfondimenti e verifiche.



Figura 7-1 – Schema del Tadcaster Bridge, in Inghilterra, che mostra la posizione del ponte e l'entità del crollo. Foto del luogo del crollo scattata dopo l'inondazione (Selvakumaran et al., 2018).

In letteratura sono anche presenti alcuni studi che si sono concentrati sulla correlazione tra gli spostamenti misurati durante le acquisizioni delle immagini, utilizzate per effettuare le analisi, e la temperatura ambientale presente al momento dell'acquisizione stessa (ad esempio Monserrat et al., 2011; Huang et al., 2017). Il primo studio si focalizza sulla componente di dilatazione termica, nell'ambito di analisi interferometriche eseguite con approccio di tipo PS, dovuta a differenze di temperatura riscontrabili nell'area indagata tra differenti acquisizioni SAR. In particolare, viene descritto un nuovo modello PSI che include una componente di fase per la valutazione degli spostamenti dovuti a variazioni di temperatura. Il comportamento dei PS indagati è descritto attraverso tre componenti e quindi tre parametri incogniti, relativi alle baselines temporale e perpendicolare degli interferogrammi e alla differenza di temperatura media tra le acquisizioni delle immagini. Le mappe di questo ultimo parametro, dette mappe termiche, costituiscono un utile strumento per ricavare informazioni riguardo il coefficiente di dilatazione termica e sul comportamento statico dell'oggetto osservato. La procedura è applicata a due esempi relativi all'area metropolitana di Barcellona (Spagna) mediante l'utilizzo di dati SAR StripMap in banda X ad altissima risoluzione, acquisiti dal sensore spaziale TerraSAR-X (Figura 7-2).

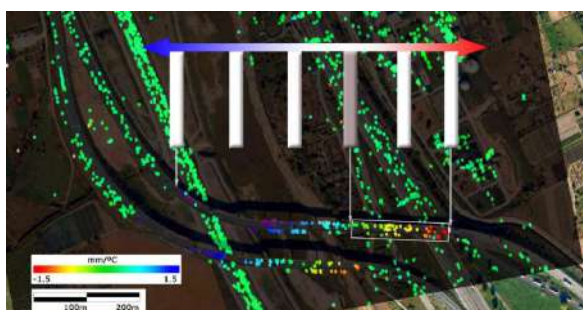
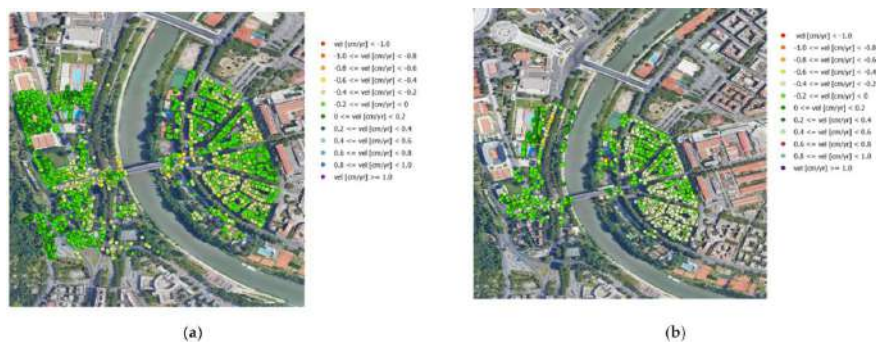


Figura 7-2 – Esempio di mappa termica. I valori dei parametri termici si riferiscono alla SAR LOS. Lo schema sovrapposto alla mappa illustra lo schema statico del viadotto dedotto dalla mappa termica: il pilastro grigio è un giunto a perni, gli altri presentano giunti a scorrimento (Monserrat et al., 2011).

Il secondo studio si è concentrato, invece, sull'analisi degli spostamenti longitudinali del ponte ferroviario in acciaio ad alta velocità del fiume Yangtze di Nanchino Dashengguan, mediante l'utilizzo di immagini Sentinel-1A dell'Agenzia Spaziale Europea. In questo lavoro è stata utilizzata una tecnica PSI per il monitoraggio degli spostamenti longitudinali del ponte ferroviario, analizzando una serie di 29 immagini di Sentinel-1A in banda C ascendente. Gli autori riscontrano una forte correlazione tra gli spostamenti valutati tramite interferometria ed i

valori della temperatura ambientale misurata all'istante temporale relativo a ciascuna acquisizione, identificandone quindi la causa al fenomeno di dilatazione termica del ponte. Gli autori riscontrano inoltre un buon accordo tra i risultati ottenuti tramite analisi SAR e misurazioni in sito, evidenziando quindi l'efficacia delle tecniche PSI per il monitoraggio degli spostamenti di ponti ferroviari.

Lo studio di Ponzo et al., (2021) ha riguardato l'integrazione di metodologie on-site e di telerilevamento per il monitoraggio del Ponte della Musica-Armando Trovajoli situato a Roma, con l'obiettivo di proporre nuovi protocolli per unire le informazioni ottenute dai dati satellitari e le misurazioni vibrazionali in loco. I risultati ottenuti tramite tecnica DInSAR (Figura 7-3) sono stati integrati con quelli derivanti da una campagna sperimentale finalizzata all'identificazione delle caratteristiche dinamiche del ponte stesso e dell'assetto geologico del terreno di fondazione. Il caso studio rappresenta un buon esempio di come l'integrazione di sensori on-site con i dati derivanti dal telerilevamento, unito ad una conoscenza dettagliata delle condizioni in loco, rappresenti un fattore chiave per un monitoraggio strutturale e infrastrutturale sostenibile e possa supportare la pianificazione sia della manutenzione che della gestione della sicurezza delle varie infrastrutture.



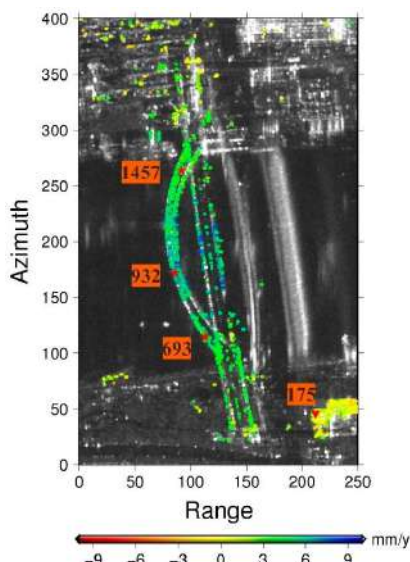


Figura 7-4 – Valori di deformazione (in linea di vista) dei punti di misura (Zhao et al., 2017).

Un'altra tipologia di immagini molto utilizzata per le applicazioni riguardanti le infrastrutture sono quelle ottenute dai satelliti Sentinel-1. Nel lavoro di Xiong et al., (2021), ad esempio, si applicano i metodi delle serie temporali per post-elaborare gli spostamenti delle serie temporali derivate da PS-InSAR con l'uso di acquisizioni Sentinel-1A. La *Empirical Mode Decomposition* (EMD) e la *Seasonal and Trend decomposition using Loess* (STL) vengono combinate per stimare la componente stagionale degli spostamenti totali delle serie temporali. Quindi, viene generata una mappa di correlazione della temperatura, correlando la componente stagionale con la variazione di temperatura. Le applicazioni riguardano edifici, ponti e una strada.

Huang et al., 2018 presentano una procedura basata sulla tecnica PSI per valutare la sicurezza di ponti. L'approccio proposto valuta periodicamente gli spostamenti, al fine di rilevare eventuali componenti anomale. Per validare la procedura, vengono studiate le caratteristiche di spostamento di due ponti: il ponte ferroviario ad alta velocità Nanchino-Dashengguan (NDHRB, lungo 1272 m) e il ponte sul fiume Nanchino-Yangtze (NYRB, lungo 1576 m).

In altri lavori si riscontra l'utilizzo di dataset provenienti dal processamento di immagini derivanti da sensori diversi. Uno di questi è lo studio di Jung et al., (2019), che mira a monitorare la deformazione dei ponti, in particolare sotto forma di flessione a lungo termine e dilatazione termica, utilizzando misure InSAR con dati Sentinel-1 e Cosmo-Sky-Med. I risultati presentati mostrano che entrambi i ponti caso studio hanno subito una flessione a lungo termine durante il periodo di osservazione, Figura 7-5.

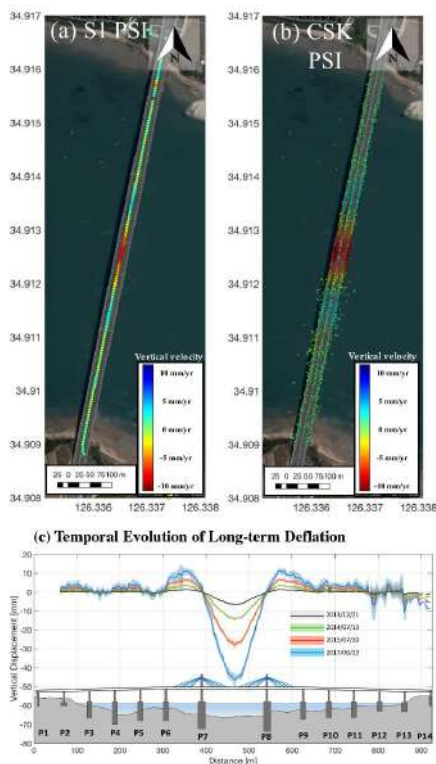


Figura 7-5 – Kimdajung Bridge. Valori di spostamento verticale derivati da (a) S1 PSI; (b) CSK PSI; (c) evoluzione temporale della deformata (Jung et al., 2019).

In DePrekel et al., (2018), si dimostra come il monitoraggio basato sulla tecnica PSInSAR e l'analisi basata sul Sistema Informativo Geografico (GIS) possono essere utili per valutare le prestazioni strutturali di una singola infrastruttura e come i processi su scala regionale possano controllare queste prestazioni. In questa applicazione vengono utilizzati dati ENVISAT, Figura 7-6.

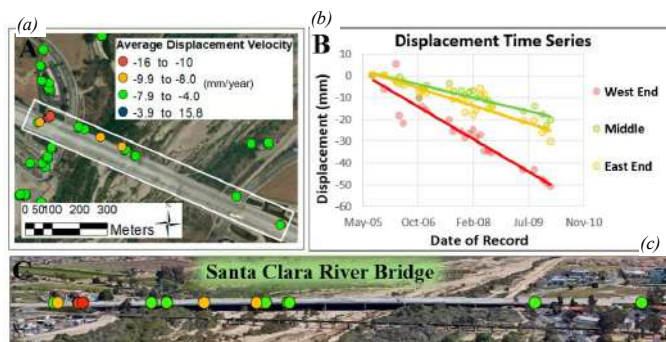


Figura 7-6 – Modello di spostamento del fiume Santa Clara: (a) vista aerea del ponte; (b) serie storiche di spostamento; (c) vista in elevazione del ponte (DePrekel et al., 2018).

È importante sottolineare che, solo da pochi anni, sia sul panorama nazionale che internazionale si è dato il via a studi a carattere tecnico-scientifico focalizzati sulla possibilità di integrare direttamente le informazioni ricavate dal monitoraggio remoto e quello on-site su strutture e infrastrutture. Questo costituisce proprio uno degli obiettivi del progetto di ricerca nel quale si inseriscono le presenti Linee Guida: individuare punti di forza e limiti di applicabilità delle singole tecniche/tecnologie e verificare la possibilità di integrare le informazioni e riuscire a superare i limiti di applicabilità delle singole tecniche con l'ausilio di approcci integrati.

7.2 DANNI CHE POSSONO INTERESSARE LE STRUTTURE

Le infrastrutture rilevanti, quali i ponti e i viadotti, soggette ad azioni di diversa natura (cfr. paragrafo 4.2) possono manifestare tipologie di danni classificabili secondo svariate impostazioni. In questo paragrafo si farà esplicito riferimento a quanto riportato in appendice alle “*Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*” (MIT, 2020).

Da sottolineare come le diverse tipologie di danno possano essere rilevabili con tecniche SAR quando comportino spostamenti caratterizzati da evoluzione a cinematica lenta. Rientrano in tale categoria i danni conseguenti alle azioni legate alle deformazioni dei terreni e alle azioni delle acque (paragrafo 7.2.1), e quelli dovuti ad un errato funzionamento, o ad un funzionamento diverso da quello previsto, degli apparecchi di appoggio (paragrafo 7.2.3). È inoltre importante tenere presente che, nel caso gli spostamenti relativi tra acquisizioni successive siano troppo elevati, superando in particolare la lunghezza d'onda del segnale utilizzato, eq. (8), si possa incorrere in problemi di ambiguità della misura e conseguente decorrelazione, tipico caso dei fenomeni a cinematica veloce. In tale categoria rientrano gli spostamenti conseguenti ad eventi sismici (esempi di potenziali danneggiamenti sono presentati nel paragrafo 7.2.2). Nel seguito vengono descritte le tipologie di danno conseguenti alle azioni di cui al paragrafo 4.2, evidenziando i casi in cui la tecnica SAR può rivelarsi un utile supporto.

7.2.1 Azioni legate alle deformazioni dei terreni e azioni delle acque

Nello spirito dell'impostazione delle “*Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*” (MIT, 2020), si fa qui riferimento alle tipologie di danni riportate nel paragrafo relativo ai difetti di “*Rilevati e fondazioni*”, che possono essere rilevabili tramite tecniche DInSAR.

Tale scheda prevede cinque tipologie di difetti che possono essere indotti da azioni legate alle deformazioni dei terreni e da azioni delle acque, quali frane, subsidenza, movimenti di rilevati, scarpate, scavi, consolidazione, variazione del livello di falda, erosione delle acque dei fiumi, etc.

Il primo di tali difetti è lo *scalzamento*, Figura 7-7 che può derivare dall'erosione del letto e delle sponde dell'alveo o del rilevato di approccio, causata da fenomeni meteorologici o dal trasporto solido dei corsi d'acqua, dall'abbassamento dell'alveo per variazioni nella direzione della corrente, o da escavazioni artificiali. Tali fenomeni sono favoriti in assenza di una corretta progettazione degli elementi, in particolare di una quota di imposta della fondazione non abbastanza profonda, o in presenza di pile con forma e orientamento inadeguati. Nel caso in cui lo scoprimento delle fondazioni non sia uniforme, la presenza di scalzamento può essere indice di movimenti indesiderati della fondazione, quali rotazione longitudinale e rotazione trasversale.



Figura 7-7 – Esempio degli effetti dello scalzamento delle fondazioni (MIT, 2020).

Il secondo di tali difetti è il *dilavamento* del rilevato di approccio, Figura 7-8. Il difetto si riferisce all'azione erosiva esercitata dalle acque meteoriche sul materiale costituente il rilevato nella sua parte superficiale. Tale fenomeno è dovuto principalmente all'errato o insufficiente convogliamento e/o smaltimento delle acque meteoriche sulla piattaforma stradale. Tale tipologia di difetto può essere responsabile di spostamenti e/o cedimenti del rilevato e della piattaforma stradale in corrispondenza del rilevato di approccio e di cedimenti differenziali tra il rilevato e la struttura.



Figura 7-8 – Esempio di danneggiamento dovuto al dilavamento del rilevato di approccio (MIT, 2020).

Il terzo di tali difetti è il *Dissesto del rilevato di approccio-Deformazioni*, Figura 7-9. Tale fenomeno rappresenta un'evoluzione dei cedimenti nel tempo eventualmente ancora in atto ed è dovuto principalmente all'errata valutazione dei cedimenti ed al loro decorso nel tempo. Tale tipologia di difetto può comportare la presenza di avvallamenti e cedimenti differenziali tra il rilevato e la struttura. Il fenomeno può comportare un aggravio dei carichi verticali sulle spalle (attrito negativo). Inoltre, il verificarsi di tale dissesto comporta motivi di pericolo per la circolazione, a causa della presenza di avvallamenti della piattaforma stradale.



Figura 7-9 – Esempi di danneggiamenti dovuti al dissesto del rilevato di approccio – Deformazioni (MIT, 2020).

Il quarto di tali difetti è il *Dissesto del rilevato di approccio-Stabilità*, Figura 7-10. Tale fenomeno è dovuto principalmente a materiale del rilevato non idoneo e/o non ben compattato. Può essere causato anche da effetti della corrente del corso d'acqua sottostante (erosione della base della scarpata). Il dissesto del rilevato è conseguenza di movimenti gravitativi incipienti o in atto. In generale tale dissesto non ha conseguenze di tipo strutturale sul ponte, ma può essere associato solo a problemi di circolazione stradale. Esempi di danno correlato includono la presenza di cedimenti e/o avvallamenti della sede stradale



Figura 7-10 – Esempio di danneggiamento dovuto al dissesto del rilevato di approccio – Stabilità, (MIT, 2020).

Il quinto di tali difetti è costituito da *Movimenti di fondazione*. I movimenti di rotazione e abbassamento possono essere dovuti sia a cedimenti differenziali della fondazione o del terreno, causati da eventi naturali, sia a cedimenti strutturali delle fondazioni, dovuti ad errori in fase di esecuzione e/o progettazione, quali un'errata valutazione dei carichi. Nel caso di traslazione, il movimento è indotto da spinte nel terreno causate da eventi naturali.

I movimenti della fondazione possono includere:

- Rotazione della fondazione su un piano verticale passante per l'asse stradale (rotazione longitudinale);
- Rotazione della fondazione su un piano verticale ortogonale all'asse stradale (rotazione trasversale);
- Spostamento della fondazione su un piano orizzontale (traslazione);
- Spostamento della fondazione sul piano verticale (abbassamento).

Tutti i movimenti in fondazione sono difficilmente rilevabili, per cui se ne può dedurre la presenza da fenomeni di degrado ad essi correlati, quali gradini o aperture in corrispondenza dei giunti stradali, particolari lesioni se la struttura è iperstatica, eventuali fuori piombo degli elementi sostenuti. Nel caso di traslazione sul piano orizzontale, occorre valutare, con indagini approfondite, se il movimento ha determinato il tranciamento dei pali per le sollecitazioni di flessione e taglio che il movimento genera su tali elementi. In generale, occorre sempre valutare se i movimenti hanno creato rotture delle strutture di fondazione (Figura 7-11).



Figura 7-11 – Esempi di danneggiamento dovuti a movimenti di fondazione (MIT, 2020).

7.2.2 Azione sismica

Come riportato al paragrafo 4.2.4 delle presenti Linee Guida, un evento sismico provoca accelerazioni a livello del suolo che possono causare danni alle strutture, e spostamenti residui della superficie terrestre dopo il sisma, detti spostamenti cosismici (ovvero, la deformazione permanente causata dal terremoto), spesso dell'ordine di decine di cm in direzione verticale ed orizzontale. Le deformazioni cosismiche associate ad un terremoto sono rilevabili attraverso un interferogramma ottenuto confrontando due immagini rispettivamente pre e post sisma. A tal fine, si può fare riferimento alla Figura 2-18 per il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009 e alla Figura 4-7 per il sisma

del Centro Italia del 2016. Gli spostamenti “asismici” lungo faglie possono essere esaminati attraverso serie temporali di spostamento ricostruite con tecniche di interferometria SAR multitemporale (Cetin et al., 2014).

L’analisi post sisma così condotta, confrontando le due immagini pre e post sisma dell’area interessata, può essere utile al fine di evidenziare problematiche non direttamente rilevabili attraverso i metodi classici dell’ispezione visiva. Esempi di tipologie di danneggiamento connesse all’azione sismica possono essere la caduta dall’appoggio, la chiusura dei dispositivi di giunto, la presenza di spostamenti dell’impalcato non compatibili con le sottostrutture, o la presenza di spostamenti/rotazioni delle pile o delle spalle.

7.2.3 Altre azioni e variazioni termiche

Tra i difetti che possono essere indotti da diverse tipologie di azione, e che possono essere rilevati attraverso le tecniche dell’interferometria satellitare, possono essere annoverati alcuni tra i danneggiamenti tipici che interessano i dispositivi di appoggio. Tra le diverse tipologie di difetto descritte nelle schede relative agli “*Apparecchi di appoggio*” delle “*Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*” (MIT, 2020), si riportano di seguito due difetti, la cui presenza può essere valutata attraverso l’analisi degli spostamenti ricavati attraverso le tecniche DInSAR: il bloccaggio e la deformazione orizzontale eccessiva del neoprene.

Il primo di tali difetti, il *bloccaggio*, Figura 7-12, consiste nell’errato funzionamento, o in un funzionamento diverso da quello previsto, degli apparecchi di appoggio. L’insorgere di tale fenomeno è correlato alle caratteristiche di conservazione degli apparecchi stessi. La probabilità che tale difetto si manifesti aumenta nel caso di materiali deteriorati o invecchiati, o se gli apparecchi sono mal posizionati. Altre possibili cause sono la presenza di detriti, che bloccano i movimenti degli apparecchi, e i movimenti a livello di fondazione.

Per quanto riguarda i fenomeni di degrado correlati, essendo una delle cause di tale fenomeno, il bloccaggio degli apparecchi si manifesta spesso in presenza di detriti. Inoltre, può essere concomitante con altri difetti tipici degli apparecchi di appoggio, quali ovalizzazione dei rulli, fuori sede dei rulli, deterioramento teflon o fuori piombo permanente dei pendoli. Mal funzionamenti degli apparecchi possono essere origine di danni causati dagli apparecchi di appoggio sugli elementi che essi collegano.

A causa di un non corretto funzionamento di un dispositivo di appoggio, potrebbe inoltre essere riscontrata una variazione dello schema statico strutturale, come ad esempio nel caso di chiusura di un appoggio gerber.



Figura 7-12 – Esempi di difetti sugli appoggi (MIT, 2020).

Il secondo di tali difetti, la *deformazione orizzontale eccessiva del neoprene*, Figura 7-13, può essere dovuto alla presenza di spinte orizzontali o attriti interni tra neoprene e lamierini non previsti, oppure ad un dimensionamento non corretto degli apparecchi o difetti in fase di fabbricazione. Tale difetto è inoltre favorito nel caso di invecchiamento e di conseguente perdita di elasticità del materiale. Il fenomeno si riferisce a scorrimenti eccessivi degli apparecchi di appoggio sul piano orizzontale, lungo l’asse trasversale o longitudinale del piano stradale. Essi provocano perdita

di forma delle sezioni nel caso di lastre non vulcanizzate o distacco e scorrimenti tra gli strati di neoprene e i lamierini di acciaio, nel caso di lastre vulcanizzate.

Per quanto riguarda i fenomeni di degrado correlati, l'invecchiamento del neoprene favorisce la presenza di tale fenomeno, il quale non deve essere confuso con il fenomeno di schiacciamento/fuoriuscita di materiale, che, a differenza del presente difetto, è causato da forze prevalentemente verticali. Mal funzionamenti degli apparecchi possono essere causa di danni causati dagli apparecchi di appoggio sugli elementi che essi collegano.

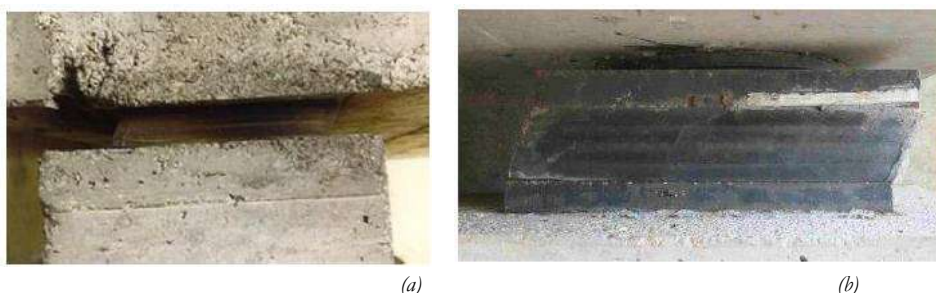


Figura 7-13 – Esempi di deformazione orizzontale eccessiva del neoprene, (MIT, 2020).

Una tipologia di difetto connesso all'azione di variazioni termiche, e che può essere indagato attraverso le tecniche dell'interferometria satellitare, è rappresentato dalla *chiusura dei giunti*. A causa delle dilatazioni termiche delle strutture, dovrebbero essere infatti misurabili spostamenti dell'impalcato lungo la direzione longitudinale dell'opera. L'assenza di tali spostamenti potrebbe quindi essere connessa ad un difetto di chiusura del giunto.

A tal fine, è opportuno sottolineare l'impossibilità di valutare la componente di spostamento lungo la direzione N-S, la cui conoscenza può risultare in molti casi di estrema importanza, come nel caso di ponti o viadotti orientati proprio lungo tale direzione.

7.3 RIFERIMENTI

DePrekel K., Bouali E. H. and Oommen T. (2018). Monitoring the impact of groundwater pumping on infrastructure using Geographic Information System (GIS) and Persistent Scatterer Interferometry (PSI). *Infrastructures*, 3(4), 57.

Fornaro G., Reale D., Simona Verde S. (2013). Bridge Thermal Dilation Monitoring With Millimeter Sensitivity via Multidimensional SAR Imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10 (4), 677–681.

Huang Q., Crosetto M., Monserrat O., Crippa B. (2017). Displacement monitoring and modelling of a high-speed railway bridge using C-band Sentinel-1 data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 204–211.

Huang Q., Monserrat O., Crosetto M., Crippa B., Wang Y., Jiang J. and Ding Y. (2018). Displacement monitoring and health evaluation of two bridges using Sentinel-1 SAR images. *Remote Sensing*, 10(11), 1714.

Jung J., Kim D. J., Palanisamy Vadivel S. K. and Yun S. H. (2019). Long-term deflection monitoring for bridges using X and C-band time-series SAR interferometry. *Remote Sensing*, 11(11), 1258.

Lanari R., Reale D., Bonano M., Verde S., Muhammad Y., Fornaro G., Casu F., Manunta M. (2020). Comment on “Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: the Morandi bridge, Genoa, Italy by Milillo et al., (2019)”. *Remote Sensing* 12(24), 4011. doi:10.3390/rs12244011

Lenstra A.K., Lenstra H.W., Lovász L. (1982). Factoring polynomials with rational coefficients. *Math. Ann.*, 261, 515–534.

- Liu X., Wang P., Lu Z., Gao K., Wang H., Jiao C. and Zhang X. (2019). Damage detection and analysis of urban bridges using terrestrial laser scanning (TLS), ground-based microwave interferometry, and Permanent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR). *Remote Sensing*, 11(5), 580.
- Milillo P., Giardina G., Perissin D., Milillo G., Coletta A., Terranova C. (2019). Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing*, 11, 1403.
- Milillo P., Giardina G., Perissin D., Milillo G., Coletta A., Terranova C. (2020). Reply to Lanari, R., et al., Comment on Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy by Milillo et al., (2019). *Remote Sensing*, 12, 4016.
- MIT. (2020). Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 17.04.2020.
- Monserat O., Crosetto M., Cuevas M., Crippa B. (2011). The Thermal Expansion Component of Persistent Scatterer Interferometry Observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8 (5), 864–868.
- Ponzo F. C., Iacovino C., Ditommaso R., Bonano M., Lanari R., Soldovieri F., Cuomo V., Bonazzo F., Ciampi P., Rompatò M. (2021). Transport infrastructure SHM using integrated SAR data and on-site vibrational acquisitions: Ponte Della Musica–Armando Trovajoli case study. *Applied Sciences*, 11, 6504.
- Proto M., Bavusi M., Bernini R., Bigagli L., Bost M., Bourquin F., Cottineau L. M., Cuomo V., Della Vecchia P., Dolce M., Dumoulin J., Eppelbaum L., Fornaro G., Gustafsson M., Hugenschmidt J., Kaspersen P., Kim H., Lapenna V., Leggio M., Loperte A., Mazzetti P., Moroni C., Nativi S., Nordebo S., Pacini F., Palombo A., Pascucci S., Perrone A., Pignatti S., Ponzo F. C., Rizzo E., Soldovieri F., Taillade F. (2010). Transport infrastructure surveillance and monitoring by electromagnetic sensing: the ISTIMES project. *Sensors (Basel)*, 10 (12), 10620–10639.
- Selvakumaran S., Plank S., Geiß C., Rossi C., Middleton C. (2018). Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 73, 463–470.
- Wenzel H. (2009). *Health Monitoring of Bridges*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Xiaoqiong Qin, Lu Zhang, Mengshi Yang, Heng Luo, Mingsheng Liao, Xiaoli Ding, (2018) Mapping surface deformation and thermal dilation of arch bridges by structure-driven multi-temporal DInSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 216: 71-90.
- Xiong S., Wang C., Qin X., Zhang B. and Li Q. (2021). Time-series analysis on persistent scatter-interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) derived displacements of the Hong Kong–Zhuhai–Macao bridge (HZMB) from Sentinel-1A observations. *Remote Sensing* 13(4), 546.
- Zhao J., Wu J., Ding X. and Wang M. (2017). Elevation extraction and deformation monitoring by multitemporal InSAR of Lupu Bridge in Shanghai. *Remote Sensing* 9(9), 897.

8 OPERE DI INTERESSE STORICO-MONUMENTALE ED AREE ARCHEOLOGICHE

I siti culturali, siano essi edifici storici, centri storici o siti archeologici, sono costantemente soggetti ad un numero elevato di fattori di rischio sia naturali (eventi sismici, frane, variazioni idrogeologiche, ecc.) sia antropici (turismo incontrollato, urbanizzazione, sovrasfruttamento del sottosuolo ecc.). Data la loro importanza per l'umanità e la loro particolare fragilità, la salvaguardia ed il monitoraggio dei contesti storici sono elementi imprescindibili per la crescita della civiltà odierna. Sono proprio i concetti di salvaguardia, come obiettivo, e monitoraggio, come strumento, su cui si è preso fortemente coscienza negli ultimi decenni. A tal proposito è utile citare il documento promulgato dal Parlamento Europeo nel 2007 *“La protezione del patrimonio culturale dalle calamità naturali?”*, in cui vengono enfatizzati i concetti di monitoraggio e salvaguardia del patrimonio culturale. Anche le Nazioni Unite non sono indifferenti all'argomento, inserendo la salvaguardia del patrimonio culturale nel “Goal 11” dell'Agenda 2030 come punto fondamentale per creare una società migliore. L'Unesco, infine, identifica e raccoglie tutti i siti di eccezionale importanza culturale o naturale nella World Heritage List WHS.

Per tale ragione si è ritenuto importante introdurre in queste Linee Guida un capitolo relativo alle opere appartenenti al patrimonio culturale: in particolare alle opere di interesse storico-monumentale e alle aree archeologiche.

A differenza degli altri capitoli che riguardano specifiche tipologie strutturali caratterizzate in alcuni casi da un unico materiale (muratura, calcestruzzo), questo capitolo si riferisce ad una categoria di opere che comprende diverse tipologie strutturali anche piuttosto disomogenee, accomunate tra loro più dall'approccio da seguire nel loro studio e nella valutazione della loro vulnerabilità, in quanto parte del patrimonio culturale, che da un'uniformità di comportamento strutturale. Tali opere includono le architetture puntuali (quali colonne e ruderi, etc.), quelle a prevalente sviluppo verticale (quali torri, campanili, etc.), o orizzontale (quali acquedotti, mura di cinta, ponti, etc.), gli edifici veri e propri (che a loro volta comprendono chiese, ville e palazzi, etc.), i complessi monumentali, gli edifici in aggregato, le aree archeologiche, le architetture del XX secolo. A tale varietà di opere corrispondono comportamenti strutturali molto diversi e quindi diversi danni possibili. Per tale ragione in questo capitolo, quando necessario, si distinguerà tra le diverse tipologie strutturali.

8.1 STATO DELL'ARTE

Tradizionalmente, il monitoraggio dei siti culturali è svolto on-site, tramite l'utilizzo di strumenti e sensori che registrano i dati in tempo reale. I sistemi tradizionali presentano certamente importanti vantaggi, come l'accuratezza e l'affidabilità delle registrazioni, l'elevata sensibilità delle misure, la flessibilità nella progettazione dei sistemi di monitoraggio. Tuttavia, ai vantaggi elencati si affiancano una serie di svantaggi: il monitoraggio è localizzato alla posizione dei sensori e alla singola struttura, non rendendo possibile il monitoraggio dell'intera area; non è utilizzabile nei casi in cui non sia possibile l'installazione dei sensori o una facile trasmissione dei dati registrati, come nel caso di territori non urbanizzati e/o difficilmente raggiungibili; i sensori sono particolarmente suscettibili ai fattori ambientali. È indubbio come gli svantaggi dei sistemi tradizionali siano particolarmente problematici nel campo del monitoraggio di edifici storici e di aree archeologiche, considerando le spesso elevate dimensioni delle aree d'interesse e la loro localizzazione geografica. Per far fronte a questi problemi, negli ultimi anni è cresciuta l'applicazione di tecniche DInSAR nel campo del monitoraggio di contesti storici. Tali tecniche, grazie alla possibilità di osservare zone più estese, alla non necessità di installare sensori e all'operatività in tutte le condizioni ambientali, hanno superato le limitazioni poste dalle tecniche tradizionali, affermandosi come un fondamentale e complementare strumento per il monitoraggio. Attualmente sono numerosi i programmi che si interessano dell'applicazione dei dati satellitari. Il più importante è senza dubbio Copernicus, programma europeo per l'osservazione satellitare della Terra. Copernicus, precedentemente conosciuto come GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), è un complesso programma di osservazione satellitare lanciato nel 1998 dalla Commissione Europea. Il principale obiettivo del programma è quello di garantire all'Europa una sostanziale indipendenza nel rilevamento e nella gestione dei dati satellitari sullo stato di salute del pianeta, comprendendo la gestione dei disastri naturali, il monitoraggio degli oceani, della vegetazione, dell'atmosfera e dei siti culturali stessi. Copernicus si basa

sulla costellazione di satelliti Sentinel, specializzati in particolari applicazioni. Più specifico è il progetto PROTHEGO (*PROTection of European Cultural Heritage from GEOhazards*), il cui scopo è il monitoraggio contro i rischi geologici dei monumenti e dei siti culturali inseriti nella WHL, tramite l'utilizzo di dati satellitari. Un altro progetto da menzionare è il progetto HERACLES (*Heritage Resilience Against CLimate Events on-site*), il cui obiettivo è la preservazione dei siti culturali contro gli effetti dei cambiamenti climatici, sempre tramite monitoraggio con dati DInSAR. Parallelamente alla crescita dell'interesse verso l'utilizzo di dati satellitari per il monitoraggio, sono stati sviluppati diversi approcci e metodi per il processamento dei dati stessi. Per un approfondimento al riguardo si rimanda alla ricerca di Zhou et al., (2015), Figura 8-1.

Characteristics Approaches		Description	Monitoring of			
			Site	Monument	Slow Deformation	Rapid Deformation
Space-borne differential radar interferometry	Persistent Scatterers SAR Interferometry (PS-InSAR)	applicable to heritage sites with an abundance of structures and archaeological remains on the ground	recommended	feasible	recommended	limited
	Small Baseline SAR Interferometry (SB-InSAR)	applicable to heritage sites in non-urban areas characterized by bare soil, debris concentrations and non-cultivated land	recommended	limited	recommended	limited
	Combined MT-InSAR presented by Hooper in 2008	applicable to heritage sites in both urban and non-urban areas, especially in archaeological sites characterized by a low density of exposed structures on the ground or archaeological remains widely spread over rural landscapes	recommended	feasible	recommended	limited
	SqueeSAR	applicable to cultural heritage sites with a large density of vertical structures	feasible	recommended	recommended	limited
	Differential SAR Tomography (D-TomoSAR)	perform static measurements for structural deformation monitoring	limited	recommended	feasible	recommended
Ground-based differential radar interferometry	Ground-Based SAR Interferometry (GB-InSAR)	perform dynamic measurements, such as structural vibration monitoring	limited	recommended	only for dynamic monitoring	
	GB-InRAR					

Figura 8-1 Caratteristiche principali delle diverse metodologie DInSAR per il monitoraggio di siti culturali (Zhou et al., 2015).

Nel seguito vengono presentati alcuni lavori riguardanti l'uso di dati satellitari per il monitoraggio di siti culturali. Per semplicità, le ricerche vengono suddivise in campi di applicazione, con riferimento alle tipologie che sono state oggetto di studi in tale ambito:

- Chiese e singoli edifici storici (architetture distribuite su una superficie);
- Centri storici e complessi di edifici monumentali (architetture distribuite su aree vaste);
- Siti archeologici (architetture distribuite su aree vaste);
- Ponti in muratura (architetture a prevalente sviluppo orizzontale).

Tra parentesi è indicata la tipologia di appartenenza dei casi studio esaminati, anche con riferimento alla classificazione utilizzata al successivo paragrafo 8.2 (*Danni che possono interessare le strutture*).

8.1.1 Architetture distribuite su una superficie (Chiese, teatri, palazzi, ville)

Non essendo necessaria l'installazione di strumentazione on-site e grazie alla possibilità di analizzare dati di anni passati, l'analisi di dati satellitari risulta particolarmente utile per il monitoraggio di edifici di valore artistico come chiese ed edifici storici. Un importante esempio di monitoraggio di chiese tramite dati satellitari è presentato in Tomás et al. (2012). Nel documento, l'analisi dei dati satellitari è utilizzata per il monitoraggio della chiesa di Santa Justa e Rufina (Orihuela, Spagna), Figura 8-2. Per lo scopo sono state analizzate le immagini acquisite dai satelliti ERS-1/2, riferite al periodo 1995-2005, e ENVISAT, riferite al periodo 2004-2008, utilizzando un algoritmo basato sui *Persistent Scatterer* (PS) definito *Stable Point Network* SPN (Duro et al., 2003). La chiesa, oltre ad una serie di danni dovuti a processi chimici/fisici (alveolizzazione, efflorescenze, attività biologica), è interessata da un fenomeno di subsidenza del terreno dovuto all'abbassamento del livello d'acqua. Nelle immagini analizzate, a causa della perdita di coerenza, non sono disponibili PS che si riferiscano direttamente alla chiesa. Per ovviare al problema, è stata effettuata un'interpolazione dei PS nell'intorno dell'edificio utilizzando il metodo *universal kriging* (cfr. paragrafo 3.4.2). Da tale interpolazione è stato possibile individuare un aumento della deformabilità in direzione Nord Est-Sud Est in accordo con quella che risulta essere la distribuzione del terreno soffic. Infine, gli autori affermano che

i cedimenti differenziali riscontrati, con un massimo di 7.6 mm per il periodo 1995-2005 e di 17.8 mm per il periodo 2004-2008, sono coerenti con le osservazioni fatte on-site.

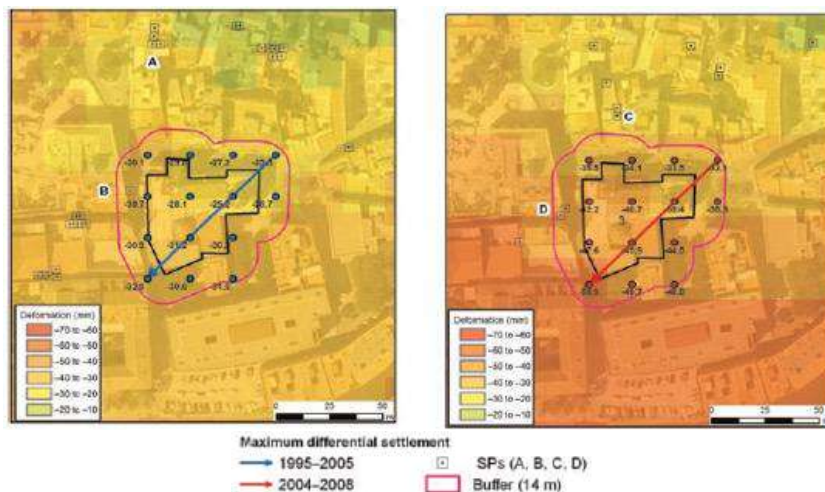


Figura 8-2 Spostamenti DInSAR interpolati nelle vicinanze della chiesa di Santa Justa e Rufina per i periodi 1995-2005 e 2004-2008. Le frecce indicano la direzione del massimo cedimento differenziale (Tomás et al., 2012).

Un altro esempio di tecniche DInSAR applicate al monitoraggio di chiese è riportato in Bejarano-Urrego et al., (2016). In questo caso, la tecnica PSInSAR è stata utilizzata per individuare i danni occorsi alla chiesa di Saint Vincente (Zolder, Belgio) a seguito dell'attività mineraria portata avanti per oltre 60 anni nella zona (1930-1992), Figura 8-3. Nel documento sono stati analizzati due gruppi di immagini diversi: il primo dei satelliti ERS-1/2 riferito al periodo 1992-2000 ed il secondo della missione Envisat riferito al periodo 2003-2010. La ricerca ha evidenziato come, tra il 1992 e il 2000, la chiesa sia stata interessata da un fenomeno di subsidenza, cominciato diverse decadi prima, dovuto all'attività mineraria. Sono evidenti importanti cedimenti differenziali nella direzione coincidente alla direzione di movimento delle faglie geologiche presenti e ciò, secondo gli autori, potrebbe indicare come l'attività mineraria a lungo effettuata negli anni possa aver indotto un'eccessiva attività delle faglie, causando i conseguenti cedimenti differenziali e i problemi di stabilità della chiesa. I dati tra il 2003 ed il 2010, invece, indicano come tra il 2001 ed il 2003 (periodo in cui i dati sono mancanti) il processo di subsidenza si sia fermato e sia iniziato un fenomeno di sollevamento del terreno dovuto ad un aumento del livello d'acqua nel terreno stesso.

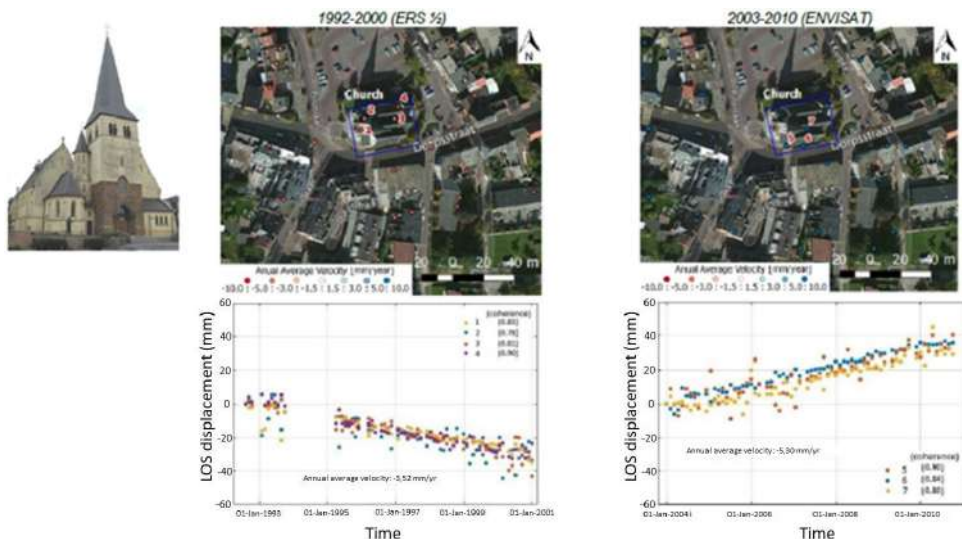


Figura 8-3 Serie temporali analizzate per individuare gli spostamenti della chiesa di Saint Vincent. (Bejarano-Urrego et al., 2016).

Un altro contributo sull'utilizzo di tecniche DInSAR per il monitoraggio di chiese è presentato in Moise et al., (2021). In questo studio, la tecnica PSInSAR, applicata su set di dati Sentinel, è utilizzata per il monitoraggio della Cattedrale dell'Incoronazione di Alba Iulia (Romania), Figura 8-4. Le analisi hanno individuato un potenziale fenomeno di subsidenza con interessamento della cattedrale. Secondo gli autori, questa applicazione della tecnica DInSAR rappresenta un eccellente strumento di *early-warning* che fornisce informazioni essenziali per la manutenzione della struttura. I risultati ottenuti, infatti, non sarebbero percepibili on-site e possono essere utilizzati dalle autorità locali per una programmazione delle eventuali attività di restauro/consolidamento.



Figura 8-4 Distribuzione dei PS sulla Cattedrale dell'Incoronazione ad Alba Iulia (Moise et al., 2021).

Un ulteriore contributo sul monitoraggio di edifici storici è riportato in Cavalagli et al., (2019). Nel documento le misure degli spostamenti strutturali, ottenute applicando la tecnica *Persistent Scatterer Pairs* (PSP) DInSAR ad una

serie di immagini acquisite dalla costellazione di satelliti COSMO-SkyMed, sono state confrontate con le misure ottenute dal monitoraggio statico on-site per i casi studio di Palazzo Consoli, Figura 8-5, e delle mura cittadine a Gubbio (Perugia). Secondo gli autori, le misure dell'apertura delle maggiori fessure presenti su Palazzo Consoli ottenute tramite DInSAR, definite analizzando le serie temporali di punti a cavallo delle fessure stesse, sono coerenti con le misure on-site. Esse mostrano un andamento stagionale. Inoltre, le serie temporali dei punti a cavallo di una delle maggiori fessure situate all'ultimo livello della struttura sembrano indicare un aumento continuo dell'apertura della fessura stessa causato dalle sequenze sismiche avvenute nel 2013.

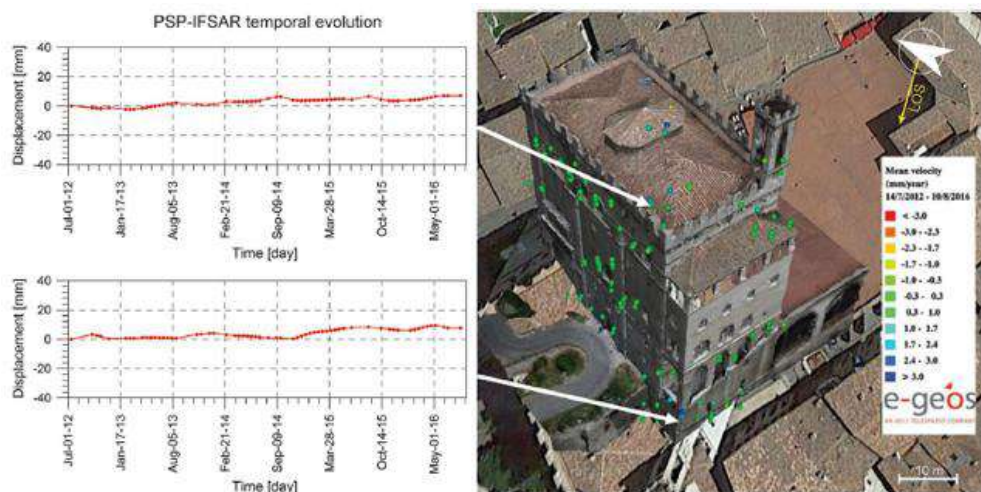


Figura 8-5 Distribuzione dei PS su Palazzo Consoli ed evoluzione temporale degli spostamenti riferiti alla base ed al tetto (Cavalagli et al., 2019).

Come indicato in Figura 8-6, infatti, si nota come, a partire dal 2013 e a seguito degli eventi sismici che hanno interessato la zona, i trend di spostamento individuati inizino gradualmente a discostarsi, indicando un accumulo di apertura della fessura in oggetto. Anche le analisi DInSAR e i dati degli inclinometri riguardanti le mura cittadine sembrano essere, secondo gli autori, altamente coerenti e correlati a fluttuazioni stagionali dipendenti dall'umidità relativa. Complessivamente, la ricerca fornisce una dimostrazione di come la tecnica DInSAR rappresenti una tecnica promettente per il monitoraggio di edifici storici, validando le conclusioni con misurazioni on-site.

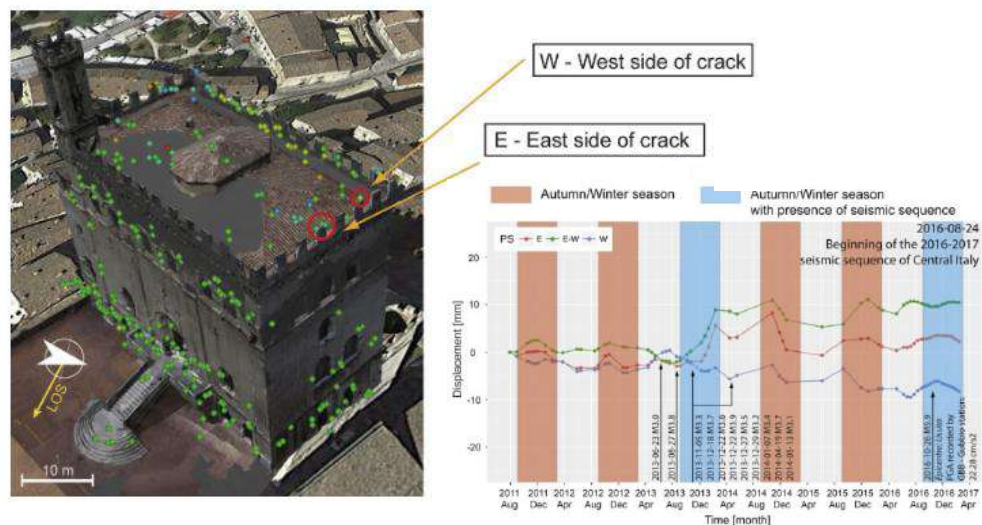


Figura 8-6 Evoluzione temporale dell'apertura di una fessura su Palazzo Consoli identificata tramite DInSAR (Cavalagli et al., 2019).

8.1.2 Architetture distribuite su aree vaste (aggregati, monasteri, fortezze, aree archeologiche)

8.1.2.1 Centri storici e complessi di edifici monumentali

La possibilità di analizzare aree molto estese rende le tecniche DInSAR uno strumento estremamente potente per il monitoraggio di aree e città caratterizzate da una presenza diffusa di edifici con elevato interesse storico ed artistico. Un esempio importante è costituito dallo studio condotto da Zeni et al., (2011), dove l'approccio SBAS-DInSAR è applicato al monitoraggio di alcuni monumenti presenti nell'area urbana di Roma, con un particolare focus sul Colosseo e sul Vittoriano, tramite l'analisi di immagini relative al periodo 1992-2010 da satelliti ERS-1/2 e ENVISAT. Per entrambi i monumenti è riscontrabile la presenza di spostamenti stabili con piccole zone soggette a leggeri spostamenti differenziali. Secondo gli autori, le tecniche DInSAR rappresentano un importante strumento per il monitoraggio e la prevenzione di edifici storico-monumentali che può essere potenziato utilizzando dataset di satelliti di ultima generazione come COSMO-SkyMed e TerraSAR-X.

Proprio sul processing di dati di COSMO-SkyMed relativi all'area di Roma è basato lo studio condotto da Cigna et al., (2014). Nel documento, il metodo Stanford (StaMPS) viene utilizzato per il processing di immagini COSMO-SkyMed, relative al periodo 2011-2013, per la valutazione delle condizioni ed il monitoraggio dei principali siti storici nel centro di Roma, Figura 8-7, nello specifico: Colle Palatino e Foro Romano, Colle Oppio, Colosseo, Colonna di Marco Aurelio, Colonna Traiana, Mausoleo di Augusto, Portico d'Ottavia, Basilica di San Saba, Bagni di Caracalla, Porta San Sebastiano, Vittoriano, Villa Medici, Galleria Borghese, Castel Sant'Angelo, Basilica di San Pietro, Basilica di San Paolo fuori le mura. Secondo gli autori, l'analisi, effettuata su più di 310.000 punti, ha permesso di stabilire due conclusioni importanti:

- i) la stabilità complessiva dei principali monumenti del centro storico e l'assenza di spostamenti locali, eccetto per movimenti individuati nell'area della Basilica di San Saba;
- ii) un fenomeno di subsidenza con velocità verticali in alcuni casi superiori a -7 mm/anno per alcune zone di recente urbanizzazione come nel caso di Grotta Perfetta in prossimità della Basilica di San Paolo fuori le mura.

È opinione degli autori, inoltre, che la ricerca abbia dimostrato come l'uso di dati COSMO-SkyMed permetta di individuare processi deformativi anche alla scala del singolo edificio.

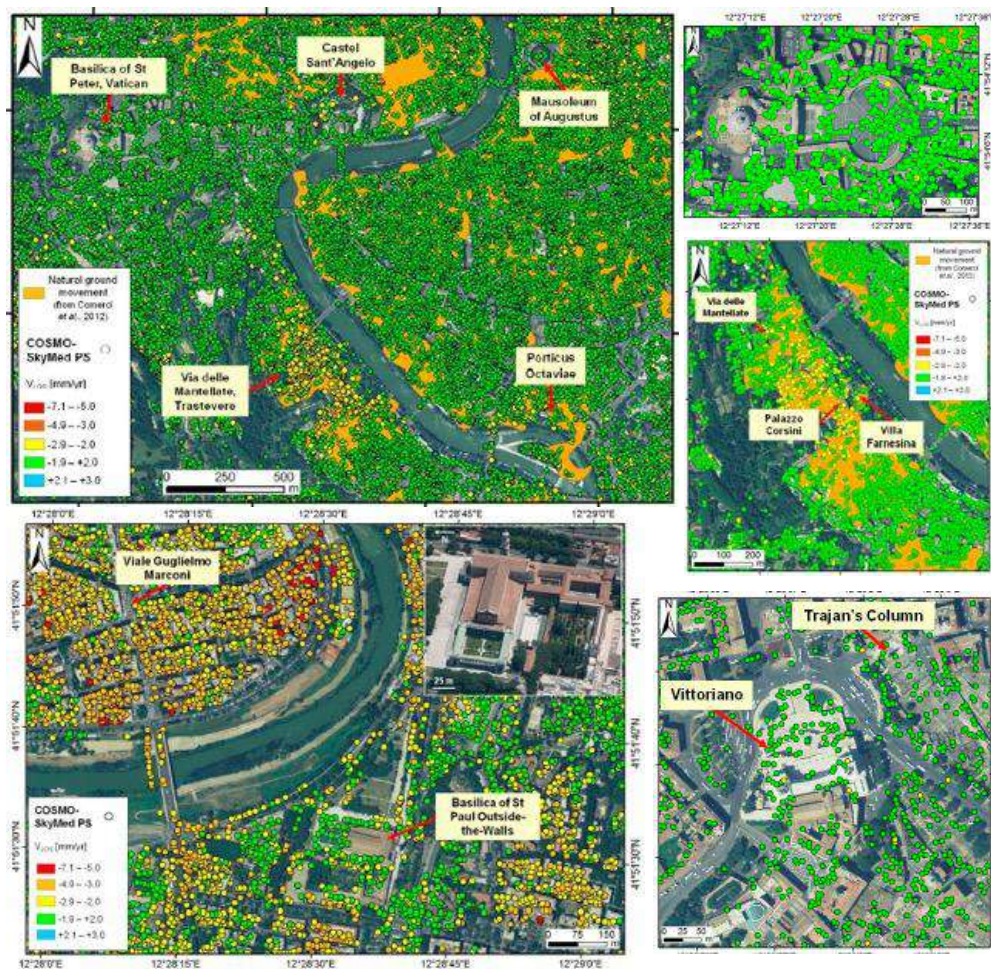


Figura 8-7 Indicazione dei principali monumenti monitorati in Cigna et al., (2014).

In Tapete e Cigna (2012), le tecniche DInSAR sono applicate all'analisi dei dati relativi ai paesi di Bivigliano e Pitigliano al fine di proporre una procedura *easy-to-use* per il monitoraggio e la valutazione dello stato di siti storici e culturali, Figura 8-8. Secondo gli autori, la metodologia proposta è un supporto utile per le attività diagnostiche e di conservazione di siti storico-culturali, siano essi concentrati in determinate aree (ad esempio centri storici) o siano più diffusi nel contesto urbano o rurale.

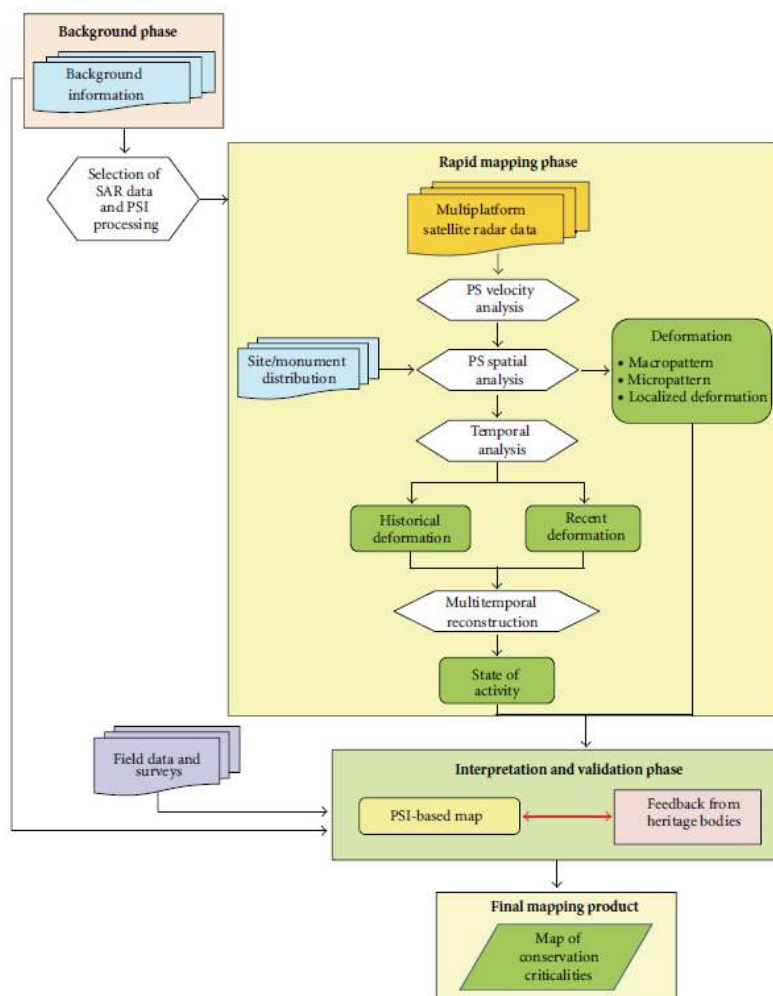


Figura 8-8 Procedura per il monitoraggio di edifici storici proposta in Tapete e Cigna (2012).

Un'ulteriore applicazione delle tecniche DInSAR per il monitoraggio di centri storici è presentata in Negula et al., (2015). In questo studio la tecnica PSInSAR è applicata ad un dataset TerraSAR-X per il monitoraggio dei principali edifici del centro storico di Sighisoara (Romania), inserito nella lista UNESCO dei siti culturali WHL. È conclusione degli autori che, nonostante gli ottimi risultati conseguiti dalle tecniche di monitoraggio satellitare, sia sempre raccomandabile anche la raccolta di dati di validazione on-site. D'altra parte, uno degli svantaggi maggiori del monitoraggio on-site è che ha come oggetto il singolo edificio, rendendo difficoltoso un monitoraggio su più strutture e spesso non considerando quello che accade nell'intorno degli edifici stessi.

In Tang et al., (2016), invece, le tecniche DInSAR sono utilizzate per il monitoraggio del Palazzo d'Estate a Pechino, un sito culturale composto da una serie di monumenti diffusi su una superficie di 70.000 mq. Nella ricerca viene applicata una nuova tecnica MT-InSAR che combina l'utilizzo di *Persistent Scatterers* PS e *Distributed Scatterers* DSs usando immagini SAR ad alta risoluzione (COSMO-SkyMed). Secondo gli autori questa tecnica è particolarmente adatta nei casi studio in cui il sito culturale sia circondato da un contesto naturale o poco urbanizzato.

8.1.2.2 Siti archeologici

A causa della loro natura di “rovina”, i siti archeologici sono particolarmente soggetti ad un processo di deterioramento. Ad accelerare tale processo, possono presentarsi fattori aggiuntivi come movimenti del sottosuolo o l'interazione con un eventuale attività antropica. Inoltre, un adeguato monitoraggio dei siti è reso più difficoltoso sia dalla spesso elevata estensione dell'area da monitorare sia dalla difficoltà di accesso come nel caso di siti archeologici situati in zone di guerra (ad esempio il Nord-Africa o il Medio Oriente). In questi casi il monitoraggio satellitare può rappresentare uno strumento di indubbia utilità. Nonostante il primo utilizzo di dati satellitari nel campo dell'archeologia risalga al 1981 (Adams et al., 1981), l'applicazione ai fini di monitoraggio non è stata possibile fino ai primi anni 2000, quando l'avvento dei sensori satellitari di nuova generazione ha garantito una precisione e una risoluzione dei dati sufficientemente alta per lo scopo. In particolare, un'importante accelerazione degli studi eseguiti in questo campo si è avuta a valle dal lancio nel 2007 dei sensori VHR (Very High Resolution), tra cui l'italiano COSMO-SkyMed e il tedesco TerraSAR-X (Lasaponara e Masini 2013). Nell'ultimo decennio, quindi, l'utilizzo delle tecniche DInSAR satellitare per il monitoraggio di siti archeologici ha subito una crescita esponenziale. Una panoramica sull'utilizzo di tali tecniche nel campo dei siti archeologici è presentata in Chen et al., (2017) e Luo et al (2019). Ad esempio, in Percharidis et al., (2010), sono state analizzate 39 immagini della missione ERS per individuare le deformazioni del terreno nella zona dell'antica Olympia, Grecia. Per il processamento dei dati è stato utilizzato il metodo *Interferometric Point Target Analysis* IPTA (Werner et al., 2003). Lo studio ha evidenziato come la maggior parte dei punti significativi individuati presenti subsidenza con valori intorno a 1.0-1.5 mm/anno. Il valore più alto di velocità media di spostamento è stato osservato nella zona est della città di Olympia (2.5-3.5 mm/anno), nei pressi dei villaggi Flokas e Drouva, aree in cui si sono verificate diverse frane nel passato. In Tapete et al., (2012), le immagini SAR dei satelliti ERS-1/2 e RADARSAT-1/2 sono state processate per il monitoraggio del sito archeologico del foro romano, ponendo l'attenzione sul colle Palatino e il colle Oppio. Nel primo caso, le immagini sono state processate con il metodo PSInSAR mentre nel secondo caso, considerando la ridotta densità delle strutture, è stato utilizzato l'algoritmo SqueeSAR. Il fine è stato quello di mappare le criticità e i processi di deterioramento in corso. La ricostruzione dei principali eventi di instabilità nel medio-breve passato ha evidenziato come sia in corso un processo di stabilizzazione per la Domus Tiberiana, Figura 8-9, a seguito di lavori di restauro, mentre il Tempio della Magna Mater sul Palatino, Figura 8-10, e le strutture dei Bagni di Traiano sull'Oppio, Figura 8-11, siano interessati da un processo deformativo.

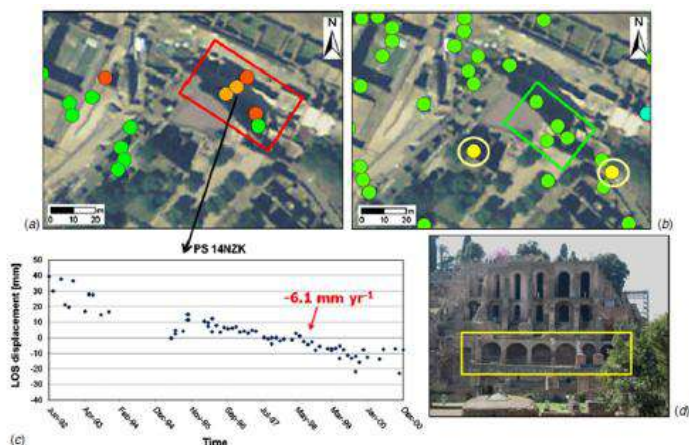


Figura 8-9 distribuzione dei punti di misurazione per (a) ERS-1/2 discendente (1992-2000) e (b) RADARSAT-1 ascendente (2003-2009) per le strutture della Domus Tiberiana. (c) mentre in ERS la serie mostra un andamento degli spostamenti LOS in allontanamento dal satellite, i dati RADARSAT-1 mostrano una stabilizzazione (quadrato verde in (b)) che può essere associata ai lavori di consolidamento della base del monumento (d). Sono presenti spostamenti localizzati (PS gialli in (b)) in corrispondenza di aree non ancora restaurate. (Tapete et al., 2012).

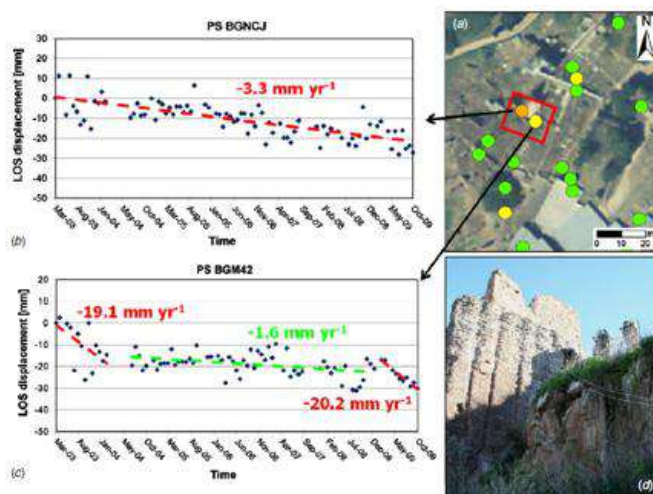


Figura 8-10 (a) distribuzione dei punti di misurazione dei dati RADARSAT-1 ascendenti per il Tempio della Magna Mater. Le serie temporali mostrano: (b) lo spostamento LOS in allontanamento dal satellite; (c) la differenza di velocità; (d) vista delle strutture archeologiche soggette a deformazione (Tapete et al., 2012).

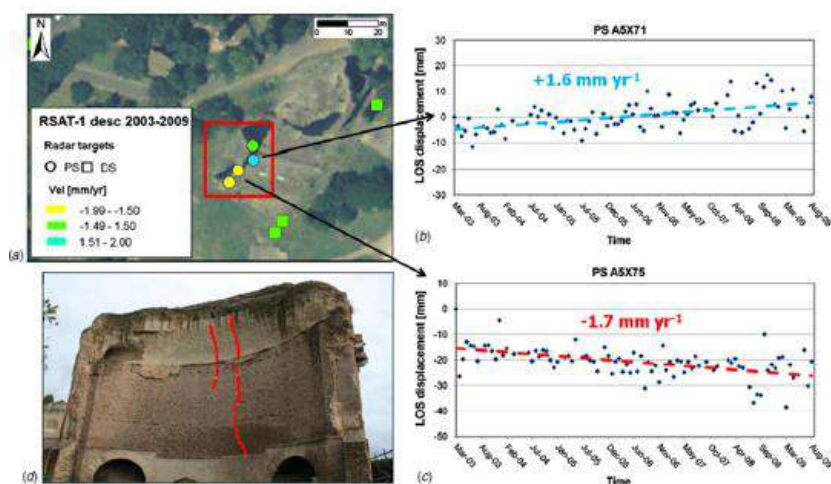


Figura 8-11 Distribuzione dei punti di misurazione relativi ai dati RADARSAT-1 ascendenti per il muro dell'abside dei Bagni di Traiano. I PS mostrano: (b) uno spostamento LOS in avvicinamento dal satellite; (c) in allontanamento dal satellite; (d) fessure rilevate. (Tapete et al., 2012).

In Tapete e Cigna (2012), la tecnica del PSInSAR viene applicata per individuare i processi deformativi di tre siti archeologici del sud Italia: Capo Colonna in Calabria, Pozzuoli vicino Napoli, la Valle dei Templi ad Agrigento. Secondo gli autori la ricerca ha evidenziato l'utilità delle tecniche DInSAR per identificare fenomeni deformativi che interessano estese aree come nel caso dei siti archeologici. In particolare, l'analisi delle serie temporali riguardanti la Valle dei Templi ha permesso di individuare alcune criticità dando la possibilità di programmare ulteriori indagini specifiche e i successivi interventi di restauro.

In Alberti et al., (2017), sono state analizzate 38 immagini acquisite dal satellite ENVISAT tra il 2003 e il 2010, processate con l'algoritmo SqueeSAR, per monitorare le deformazioni e la potenziale caduta di rocce nel sito archeologico di Petra (Giordania), Figura 8-12. La ricerca non ha individuato presenza di fenomeni deformativi durante il periodo di osservazione. Da un punto di vista metodologico, gli autori sostengono che i risultati ottenuti confermano il vantaggio di poter osservare vaste aree, vantaggio proprio delle tecniche satellitari ma, dall'altra parte, piccole cadute di rocce, facilmente individuabili in sito, non vengono riscontrate nei dati analizzati a causa della risoluzione media dei dati forniti da ENVISAT. Tale problema potrebbe essere superato con l'utilizzo di dati satellitari con maggiore risoluzione, come quelli dei satelliti COSMO-SkyMed o TerraSAR-X.

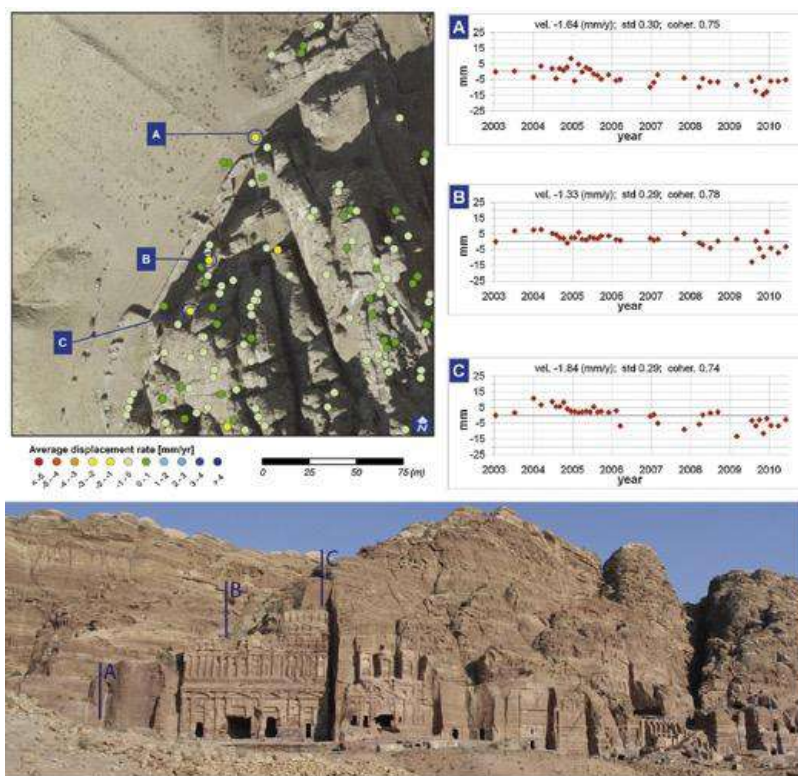


Figura 8-12 Vista della Tomba Reale, spostamenti LOS medi annuali e serie temporali dei punti indicati (Riprodotta da Alberti et al., Surface deformation data in the archaeological site of Petra from medium-resolution satellite radar images and SqueeSAR™ algorithm. *Journal of Cultural Heritage* 2017; 25:10-20. 1296-2074/© 2017 Elsevier Masson SAS. All rights reserved).

In Agapiou e Lysandrou (2020), le immagini di Sentinel-1 vengono processate, attraverso una nuova piattaforma chiamata *Hybrid Pluggable Processing Pipeline* (HyP3), per individuare gli spostamenti di terreno attorno ad alcuni siti archeologici a Cipro a seguito dell'evento sismico di magnitudo 5.6 avvenuto nel 2015, Figura 8-13. Secondo gli autori, questo nuovo approccio permette di ricostruire una mappa degli spostamenti verticali ed individuare i punti con maggiore criticità. In particolare, le zone d'interesse dei siti archeologici di Nea Paphos e la necropoli della Tomba dei Re hanno manifestato spostamenti relativi.

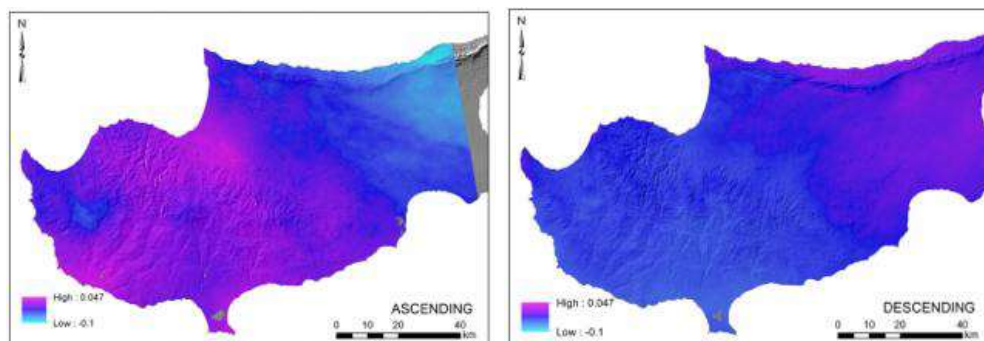


Figura 8-13 Mappa degli spostamenti verticali derivati dalle immagini di Sentinel-1 (Agapiou e Lysandrou, 2020).

Infine, in Tapete e Cigna (2018) è dimostrato come, per determinate dimensioni degli elementi, anche l'utilizzo di immagini HR (*high-resolution* 5-30m) anziché VHR (*very high resolution* <5m) potrebbe essere sufficiente per la valutazione dello stato di danno di siti archeologici. In particolare, nello studio sono stati utilizzati i dati del satellite Sentinel-2 per la definizione dello stato di danno dei siti archeologici di Aleppo e Apamea (Siria). Gli autori, inoltre, ipotizzano la possibilità futura di poter implementare algoritmi che, analizzando immagini HR, possano in modo automatico fornire una valutazione dello stato di danno dei siti.

8.1.3 Architetture a prevalente sviluppo orizzontale (Acquedotti, ponti, mura, archi)

8.1.3.1 Architetture con grande sviluppo in lunghezza

8.1.3.1.1 Mura storiche

L'applicazione delle tecniche InSAR si configura un elemento di fondamentale importanza per il loro monitoraggio e l'individuazione delle aree più vulnerabili. In Cavalagli et al., (2019), nell'ambito del progetto europeo HERACLES, un dataset composto da 132 immagini della costellazione COSMO-SkyMed, tra orbita ascendente e discendente, è stato elaborato tramite la tecnica PSP (Persistent Scatterers Pairs) per identificare possibili criticità che interessano le mura cittadine di Gubbio. In particolare, come indicato in Figura 8-14, i risultati del lavoro hanno evidenziato la presenza di aree critiche in prossimità della Porta di Sant'Ubaldo. Tale evidenza è stata in seguito confermata dalle ispezioni effettuate nell'area di interesse che hanno identificato una visibile fessura verticale all'interfaccia di collegamento tra la Porta e le Mura stesse.

In Chen et al., (2017) 26 immagini della costellazione TerraSAR-X e TanDEM-X, processate tramite PS-InSAR, sono state utilizzate per l'osservazione dello stato di salute delle mura di Nanchino (Cina). In particolare, l'analisi svolta dagli autori, sia a scala regionale sia a scala locale (come evidenziato in Figura 8-15), aveva un duplice scopo: individuare le zone critiche delle Mura e studiare la possibile correlazione tra l'urbanizzazione, compresa la nuova costruzione di una metropolitana, e i fenomeni di subsidenza che hanno interessato l'area. A conclusione del lavoro, è stato possibile affermare che non ci sia una diretta correlazione tra i lavori di costruzione della metropolitana e i fenomeni di subsidenza che hanno interessato l'area.

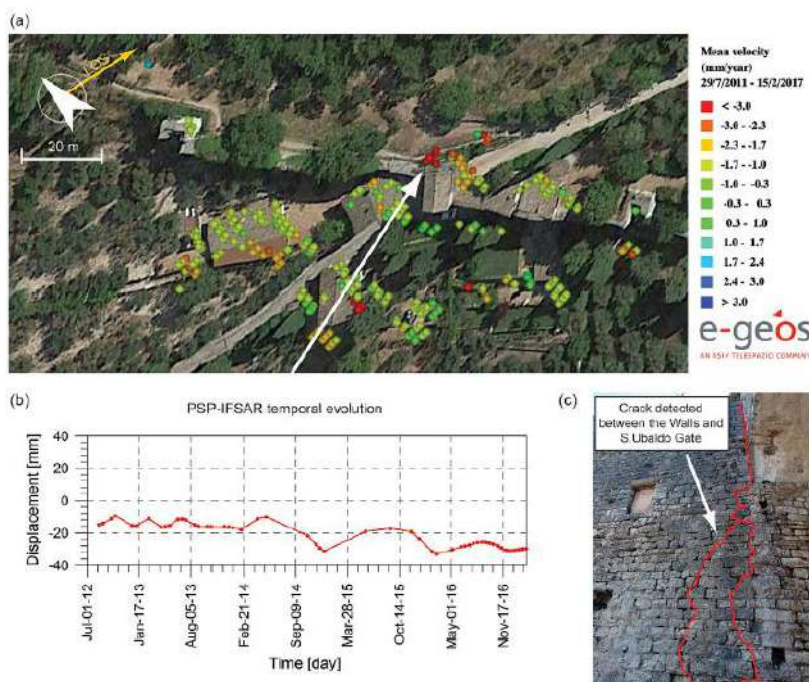


Figura 8-14 a) PS identificati sulle Mura cittadine in prossimità della Porta di Sant'Ubaldo che identificano possibili criticità. (b) Evoluzione temporale di un PS caratterizzato da un'elevata velocità di deformazione. (c) Fessura individuata nella connessione tra le Mura e la Porta di Sant'Ubaldo. Cavalagli et al., 2019.

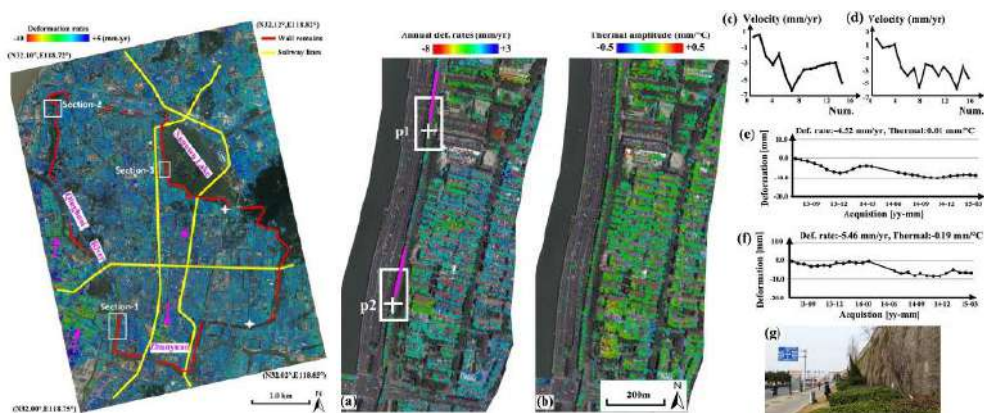


Figura 8-15 Analisi PSInSAR a scala globale e locale dell'area di Nanchino (Chen et al., 2017).

In Leoni et al., (2020) la tecnica PSInSAR applicata ad un dataset di immagini satellitari COSMO-SkyMed relativo al periodo 2011-2014, è stata utilizzata per individuare possibili emergenze che interessano le Mura Aureliane di Roma e confrontare tali situazioni con diverse mappe di pericolo locali (frane, subsidenza, sismicità). Come riportato in Figura 8-16, l'analisi delle serie deformative nel tempo dei PS ha permesso agli autori di classificare gli spostamenti in 3 range di movimento principali: stabile (tra -2 e +2 mm/anno, che corrisponde sostanzialmente al rumore di fondo delle misure nell'intera area di studio), leggero (tra ± 2 e ± 3 mm/anno e, sebbene sia piuttosto

debole, di solito rappresenta un indizio significativo per rotture precoci o instabilità diffusa) e significativo (il tasso di spostamento generalmente supera ± 3 mm/anno ed è associato ad evidenze chiare di presenza di lesioni). L'applicazione della metodologia al caso delle Mura Aureliane ha messo in evidenza la presenza di 12 situazioni di criticità, caratterizzate da movimenti ad un tasso superiore ai 3 mm/anno. È opinione conclusiva degli autori che le tecniche di monitoraggio satellitare possano apportare un importante contributo alla definizione delle priorità di intervento per strutture di estese dimensioni, permettendo agli amministratori di pianificare gli interventi e di verificarne l'efficacia.



Figura 8-16 Distribuzione dei punti di misura PS e degli eventi di danneggiamento monitorati (Leoni et al., 2020).

8.1.3.1.2 Acquedotti

Come per le Mura Storiche, la conformazione strutturale degli acquedotti rende l'applicazione delle tecniche InSAR per il monitoraggio un elemento di particolare interesse scientifico. In Tapete et al., (2015), gli autori hanno utilizzato la tecnica SqueeSAR, applicata ad un dataset di 87 immagini acquisite dalla costellazione RADARSAT, per il monitoraggio dell'Acquedotto Romano (Figura 8-17).

Le informazioni acquisite durante l'analisi, inoltre, sono state integrate con le misure GPS parallelamente ottenute per ridurre l'incertezza spaziale che caratterizza le tecniche interferometriche, con particolare attenzione al parametro dell'altezza dei punti di misura. È opinione degli autori, infatti, che il parametro di altezza dei punti di misura ottenuti dalle analisi satellitari sia particolarmente importante nel caso di deformazione di strutture alte (nel caso specifico di arcate) che non possono essere studiate solo considerando la posizione planimetrica dei punti di misura ma devono essere analizzate valutando anche la distribuzione dei punti lungo l'elevazione delle strutture stesse.

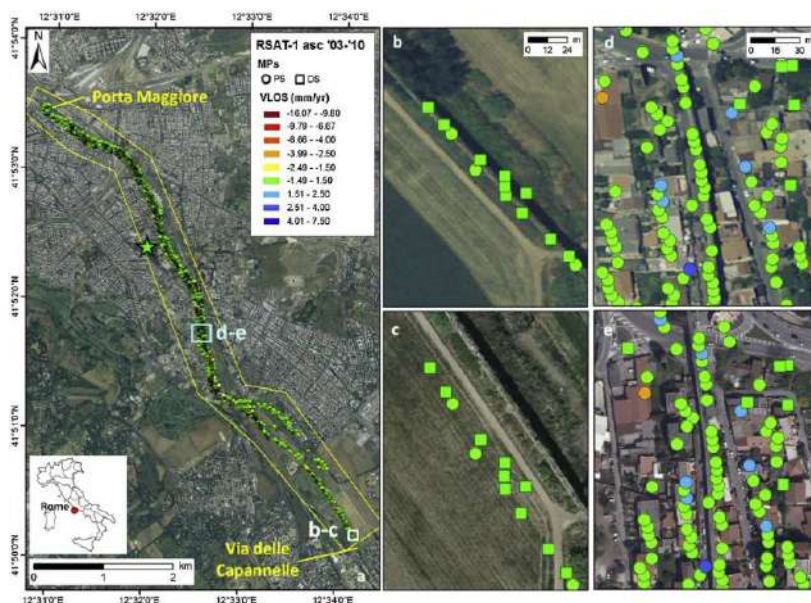


Figura 8-17 (a) Punti di misura ottenuti processando l'area di studio. Nelle figure b e d sono riportati ingrandimenti su una zona agricola ed urbana utilizzando come base l'ortofoto del 2008. Nelle figure c ed e sono riportate le stesse zone utilizzando come base le immagini ricavate da Google Earth (Tapete et al., 2015).

8.1.3.2 Architetture con limitato sviluppo in lunghezza

8.1.3.2.1 Ponti in muratura

Sebbene l'applicazione delle tecniche DInSAR per il monitoraggio di ponti abbia avuto ricevuto particolare attenzione per quanto riguarda il calcestruzzo armato e l'acciaio, la sua diffusione per i ponti in muratura è ancora limitata. Un esempio recente di applicazione è presentato in Alani et al., (2020), in cui è introdotto l'utilizzo della tecnica PSInSAR per il monitoraggio di un ponte ad arco in muratura, Figura 8-18. Il caso studio trattato, l'"old bridge" ad Aylesford (Kent, UK), è un ponte formato da sette archi risalente al 1250 circa. La tipologia di muratura principale è basata sull'utilizzo della *kentish ragstone*, una pietra dura calcarea tipica della zona. Sono stati analizzati e processati i dati dei satelliti Sentinel-1 per un arco di tempo di circa 21 mesi. Sono stati individuati undici punti PS (*Permanent Scatterers*) di cui è stato possibile valutare gli spostamenti.

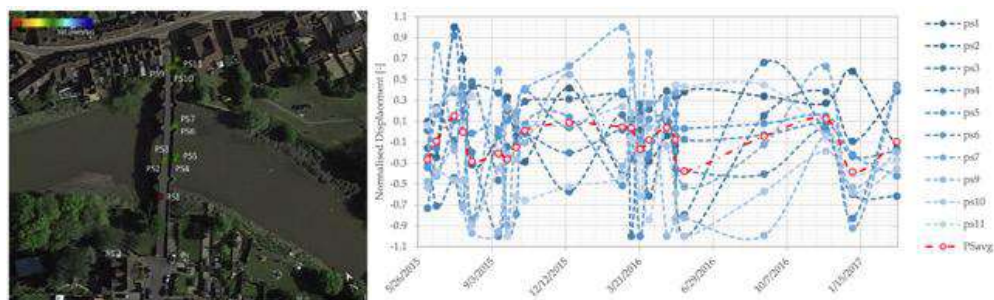


Figura 8-18 Vista del ponte (sx) e serie temporali dei PS individuati (dx) (Alani et al., 2020).

Dal confronto tra gli spostamenti relativi ai PS e l'andamento temporale del livello idrometrico del fiume, registrato dalla stazione più vicina, è evidente una correlazione tra le due serie di dati, indicando come gli spostamenti seguano un andamento stagionale ciclico fortemente legato alla saturazione del terreno, Figura 8-19.

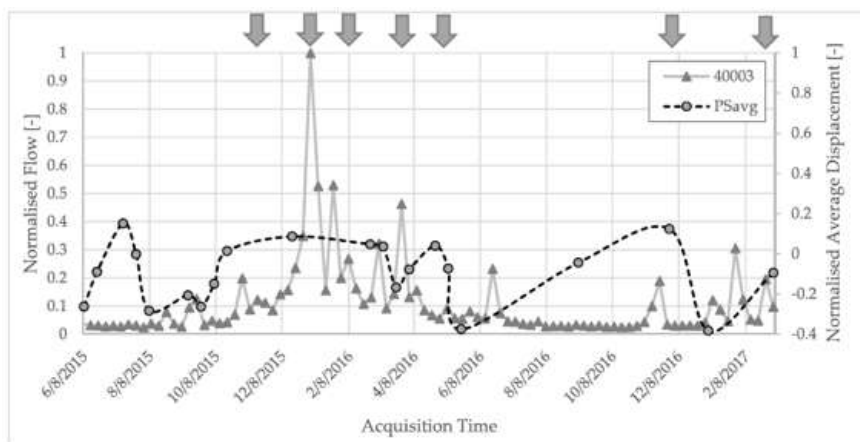


Figura 8-19 Comparazione tra la media degli spostamenti dei PS e l'andamento del livello idrometrico del fiume (Alani et al., 2020).

In Selvakumaran et al., (2018), invece, viene indagata la possibile applicazione delle tecniche DInSAR per prevedere l'eventuale occorrenza di fenomeni di scalzamento delle fondazioni di ponti ad arco in muratura. Per lo scopo, sono state processate, usando l'approccio SBAS, 48 immagini TerraSAR-X riferite al ponte Tedcaster (UK) in un periodo di tempo di 2 anni precedente ad un parziale collasso avvenuto nel 2015, per un ponte sul fiume Wharfe, Figura 8-20.

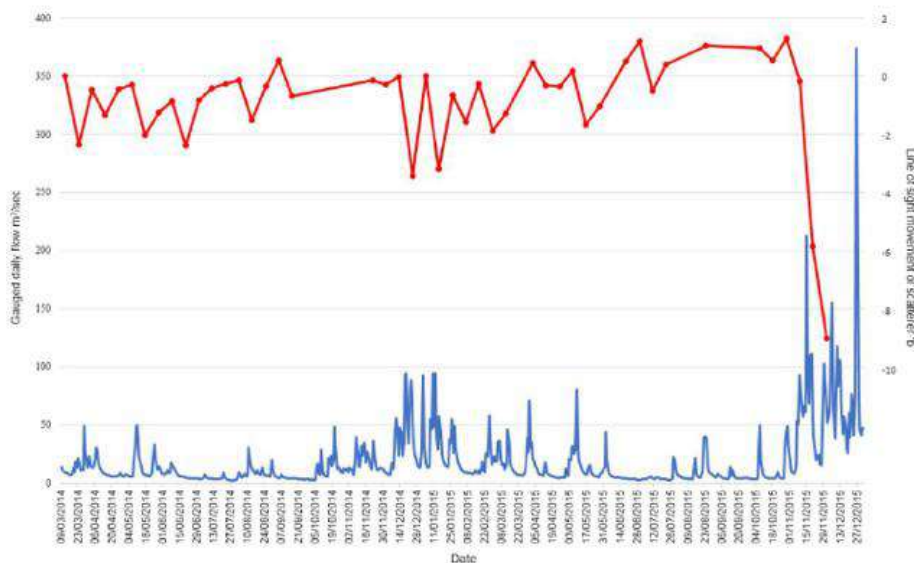


Figura 8-20 Flusso d'acqua del fiume Wharfe (in blu) e spostamento dello scatterers corrispondente alla regione del ponte crollata (in rosso) (Selvakumaran et al., 2018).

Secondo gli autori, i PS che hanno mostrato un comportamento deformativo inusuale durante il periodo di osservazione sono gli stessi che individuano la regione del ponte che è in seguito effettivamente collassata. Ciò evidenzia come il monitoraggio DInSAR possa essere utilizzato come strumento di *early-warning* per la prevenzione di fenomeni di scalzamento.

8.2 DANNI CHE POSSONO INTERESSARE LE STRUTTURE

Data la varietà di tipologie strutturali che caratterizza questa specifica categoria di opere, nel descrivere i principali danni che possono interessarle si è seguita una distinzione in specifiche tipologie. In particolare, si è scelto di suddividere le opere in base al loro sviluppo ed estensione. L'utilizzo di dati SAR ai fini di monitoraggio e controllo, infatti, è tendenzialmente più vantaggioso laddove siano disponibili più misurazioni relative a un singolo corpo o a corpi mutuamente interagenti; quindi, nelle architetture distribuite e a sviluppo orizzontale piuttosto che, in generale, in quelle puntuali.

Da sottolineare come le diverse tipologie di danno possano essere rilevabili con tecniche SAR quando comportino spostamenti caratterizzati da evoluzione a cinematica lenta. È importante tenere presente che, nel caso gli spostamenti relativi tra acquisizioni successive siano troppo elevati, superando in particolare la lunghezza d'onda del segnale utilizzato, eq. (8), si possa incorrere in problemi di ambiguità della misura e conseguente decorrelazione, tipico caso dei fenomeni a cinematica veloce. Nel seguito vengono descritte le tipologie di danno conseguenti alle azioni di cui al paragrafo 4.2, evidenziando i casi in cui la tecnica SAR può rivelarsi un utile supporto.

Nello specifico, nei paragrafi che seguono, si sono identificati e raggruppati danni relativi a più tipi di azioni essendo alcune di queste (es. azioni delle acque e azioni dovute a modifiche delle caratteristiche del sottosuolo) mutuamente correlate. Per non frammentare troppo la trattazione si è quindi introdotta una distinzione fra i danni dovuti ad "azioni rapide", come l'azione del sisma e del vento, e i danni generati da "azioni lente", come gli effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici.

8.2.1 Architetture puntuali (colonne, ruderi, elementi in aggetto)

8.2.1.1 Reperti archeologici isolati e ruderi

Ciò che contraddistingue i reperti archeologici rispetto ad altre costruzioni, è la loro intrinseca vulnerabilità strutturale, che può dipendere dalla tipologia, dalla configurazione geometrica assunta nel tempo a seguito di crolli parziali, dal materiale, dallo schema statico e, soprattutto, dallo stato di conservazione. Lo scavo archeologico di per sé può introdurre modificazioni che incrementano la vulnerabilità strutturale.

8.2.1.1.1 Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici

Manifestazioni geologiche di superficie, rilevabili anche da satellite, quali subsidenze, frane, erosione delle coste, variazioni della falda freatica etc., possono indurre danneggiamento e degrado nei reperti archeologici e ruderi. Altre azioni lente che determinano danni nei reperti sono quelle di natura più propriamente geotecnica, ad esempio quelle verticali connesse ad eccessive deformazioni del terreno di fondazione, oppure quelle orizzontali dovute alla spinta di masse di terreno, specialmente laddove si abbia accumulo di acqua.

In connessione diretta con i problemi geotecnici, le azioni di tipo idraulico dipendono dalla collocazione dei manufatti rispetto a corsi d'acqua e bacini, oltre che dal suolo e dall'ambiente fisico in genere. La sommersione e l'erosione del terreno dovuta a falde superficiali può diventare ulteriore fonte di degrado e di crolli, soprattutto nelle aree soggette a subsidenza. Anche fattori come l'inquinamento e il degrado dell'ambiente possono condizionare lo stato di conservazione del patrimonio archeologico. I paramenti murari, in particolare, sono soggetti al dilavamento delle acque meteoriche, all'azione corrosiva del vento, all'azione di degrado dovuta alla presenza di vegetazione e alla presenza di micro e macroorganismi. Azioni igrometriche sono generalmente dovute all'interazione tra il rudere e le acque, superficiali o di falda, mentre quelle termo-igrometriche sono da ascrivere a insufficiente ventilazione, magari legata agli stessi interventi di conservazione.

Per ulteriori informazioni sui danni rilevabili su reperti archeologici isolati e ruderi, si può fare riferimento a D'Agostino et al., (2009).

8.2.1.1.2 Danni per effetti sismici

La valutazione della vulnerabilità sismica dei reperti e ruderi rispetto ad azioni sismiche (e in certa misura anche ad azioni del vento) è da effettuare caso per caso, sulla base dello stato di conservazione del rudere al momento dell'evento, della presenza di interventi pregressi spesso non documentati e della particolare conformazione geometrica che i diversi elementi possono avere assunto nel tempo.

8.2.1.2 Elementi in aggetto e svettanti

8.2.1.2.1 Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici

Le azioni lente sugli elementi svettanti non presentano aspetti caratteristici, in quanto i cedimenti e i fenomeni reologici interessano prevalentemente la struttura principale.

8.2.1.2.2 Danni per effetti sismici

Dall'osservazione dei danni subiti dagli edifici storici in muratura è emerso come spesso danni gravi possono verificarsi su singoli elementi che compongono gli edifici, anche per bassi valori di accelerazione al suolo. È questo il caso degli elementi svettanti, come statue, pinnacoli, guglie, lanternini, merlature, che spesso costituiscono elementi significativi dal punto di vista storico e culturale. Pur essendo questi elementi spesso considerati come elementi secondari, il loro collasso può dare luogo a situazioni pericolose per le persone o può incidere sull'integrità di elementi strutturali più importanti.

8.2.2 Architetture a prevalente sviluppo verticale (campanili, torri, ciminiere)

8.2.2.1 Campanili e Torri

Le strutture snelle sono una tipologia architettonica particolarmente diffusa nell'architettura di quasi ogni epoca e solitamente costituiscono un simbolo religioso, politico o difensivo. Nei paragrafi seguenti si riportano alcune tipologie di danni che possono interessare più frequentemente tali tipologie strutturali.

8.2.2.1.1 Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici

I danni dovuti ad azioni lente sulle torri in muratura sono associabili a problematiche molto diverse, che vanno dal comportamento viscoelastico del materiale murario soggetto a compressione fino a fenomeni di varia natura che interessano il sottosuolo.

I fenomeni viscosi nelle strutture in muratura sono particolarmente legati alla stratificazione delle pareti, che influenza la distribuzione degli sforzi all'interno dello spessore delle pareti murarie stesse, così come il valore degli sforzi nel tempo. Per via dell'elevato tasso di compressione nella muratura, i fenomeni viscosi costituiscono una delle cause principali di collasso strutturale di torri e campanili (Ferretti and Bažant 2006). Si tratta spesso di collassi improvvisi e con pochi segnali di preavviso, dove spesso i fenomeni viscosi sono amplificati dalla distribuzione disomogenea dei materiali all'interno della struttura (Cominelli 2014).

Un altro fenomeno insidioso per le torri e i campanili è l'erosione che può interessare il suolo o, più in generale, la deformabilità dello strato di terreno al di sotto delle fondazioni. Così come riportato in Cuzzoni (2017), Figura 8-21, i cedimenti del sottosuolo possono avvenire per diverse cause, tra cui:

- cedimenti dovuti ai carichi trasmessi direttamente dalle fondazioni;
- cedimenti dipendenti da variazione di carico nelle zone adiacenti;
- cedimenti indipendenti dai carichi (variazioni di falda, compattazione del suolo per effetti dinamici, ecc.).

Per quanto riguarda i cedimenti per subsidenza, quindi indipendenti dal carico trasmesso in superficie, è importante sottolineare come le subsidenze stabili diano vita a fenomeni che tendono ad attenuarsi nel tempo. Al contrario, se la causa generatrice della subsidenza è in evoluzione, come l'abbassamento del livello di falda a causa di estrazioni prolungate, il cedimento per subsidenza può diventare instabile e accelerare nel tempo. A livello strutturale, ciò porta cedimenti differenziali e quindi forti disomogeneità tensionali nelle strutture fino a determinare collassi repentini. Apparentemente molto simili sono i cedimenti che si instaurano a seguito di continue oscillazioni del livello piezometrico. La variazione della falda, infatti, non modifica solo le caratteristiche del suolo interessato dai cicli, ma determina variazioni di umidità nella porzione di terreno soprastante la falda per effetto del fenomeno di risalita capillare. Queste variazioni possono provocare cedimenti ciclici, danneggiando, se pur lentamente, la struttura. In linea generale, minore è la compattezza del suolo maggiore sarà l'effetto di cedimento dovuto a variazioni di falda.

La gelività è un ulteriore fenomeno che può interessare le torri. Infatti, il gelo può provocare il peggioramento di condizioni di degrado, come la presenza di quadri fessurativi passanti nello spessore murario.

Per un approfondimento sui dissesti e danni per effetto di azioni rapide e lente che possono interessare strutture a torre e/o campanili in muratura si rimanda alla letteratura specifica (Curti et al., 2012; Bennati et al., 2005; Bartoli et al., 2017; Shakya et al., 2016; Diaferio et al., 2018; Casolo et al., 2017; Castellazzi et al., 2018; Zanotti Fragonara et al., 2017).

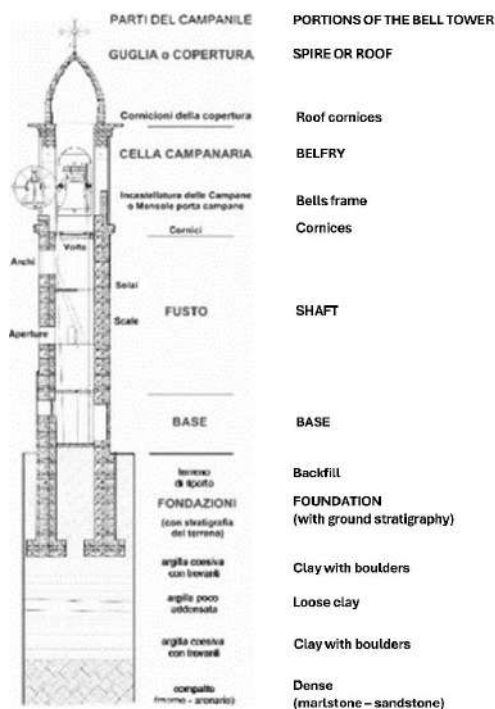


Figura 8-21 – Schema di un campanile con individuazione dei principali componenti e l'approfondimento delle pareti murarie nel suolo: esempio del campanile della Chiesa Prioria di S. Antonino Martire in Torrazza Coste (PV) (Cuzzoni, 2017).

8.2.2.1.2 Danni per effetti sismici

Come sottolinea la Direttiva PCM del 2011, il comportamento sismico di questa tipologia di opere è dipendente da alcuni fattori specifici: la snellezza della struttura; il grado di ammassamento delle pareti; l'eventuale presenza di

strutture adiacenti più basse in grado di fornire un vincolo orizzontale; la presenza nella parte sommitale di elementi architettonici snelli (guglie, vele campanarie, merlature, ecc.) o comunque vulnerabili (celle campanarie). La vulnerabilità è inoltre influenzata dalla presenza di stati di danneggiamento di altra natura, dovuti ad esempio alle vibrazioni indotte dalle campane o a problematiche in fondazione.

Da sottolineare come esistano però anche torri molto tozze che, in ragione dei grandi spessori murari e del ridotto sviluppo in altezza, possono essere assimilate agli edifici.

L'ammorsamento delle pareti di una struttura muraria a prevalente sviluppo verticale è funzionale a garantire che questa si comporti come una mensola incastrata alla base, nel caso di azioni orizzontali come quelle causate da un sisma, con una rigidità associata all'intera sezione muraria, e non come un insieme di pareti debolmente interconnesse o distinte (Direttiva, 2011). Le tecniche tradizionali per garantire un buon ammorsamento tra le pareti sono: realizzare una corretta tessitura dei cantonali, la presenza di cerchiature e catene metalliche, la presenza di orizzontamenti ben collegati. Inoltre, deve essere valutato attentamente l'effetto dovuto alla presenza di elementi spingenti, quali ad esempio le volte in muratura.

Bisogna inoltre considerare che torri e campanili possono presentarsi con una configurazione completamente isolata, oppure a contatto (collegate o in aderenza) con altri edifici (mura, chiese o altri corpi annessi).

Molto frequente è quest'ultimo caso in cui torri e campanili sono a contatto con altre strutture spesso di minore altezza. Alcuni casi tipici sono: campanili inglobati o accostati alla chiesa, torri inglobate in vario modo nel tessuto urbano, torri inglobate nella cinta muraria. La presenza di vincoli orizzontali, spesso diversi secondo le due direzioni, a diverse quote può mutare profondamente il comportamento della struttura, da una parte limitandone l'effettiva snellezza, dall'altra costituendo irrigidimenti localizzati e punti di possibile concentrazione delle sollecitazioni (Direttiva, 2011). In particolare, la presenza di corpi annessi alle torri costituisce spesso una irregolarità in elevazione, che finisce per peggiorare la risposta sismica.

I meccanismi di danneggiamento e collasso di questa tipologia di strutture sono molteplici e dipendono sia dalla geometria (snellezza) sia dalle caratteristiche costruttive (qualità muraria e ammorsamenti). Nel caso di torri piuttosto tozze si riscontrano rotture a taglio, mentre in presenza di una qualità muraria scadente si formano lesioni verticali, che partono dalla cella campanaria e tendono a dividere la struttura. Nelle torri snelle prevalgono comunque i meccanismi di pressoflessione, rispetto ai quali sono possibili valutazioni quantitative con schemi semplificati.

Secondo il metodo riportato nella Direttiva (2011), la torre può essere assimilata a una mensola sollecitata da un sistema di forze orizzontali oltre che dal proprio peso, che può andare in crisi in una generica sezione per schiacciamento nella zona compressa, che nel caso di azioni orizzontali è spesso associato alla parzializzazione delle sezioni dovuta alla non resistenza a trazione.

Va infine ricordato che la presenza di corpi annessi e ben ammorsati alle torri può dar luogo a danneggiamenti sismici locali e dislocazioni/compenetrazioni di materiale in corrispondenza delle connessioni. La situazione peggiore, tuttavia, si verifica in presenza di strutture non efficacemente collegate o staccate da un giunto insufficiente, circostanza quest'ultima che può determinare gravi fenomeni di martellamento e importanti danneggiamenti da mutua interazione o impatto.

8.2.2.2 Ciminiera

La sostanziale differenza fra edifici a torre e ciminiera è nella natura dello scheletro che costituisce la struttura, così come nella struttura interna alle pareti murarie. Le torri e/o i campanili, infatti, sono costituite da pareti molto spesse e da orizzontamenti interni, al contrario lo strato murario che circonda una ciminiera ha spessore il più delle volte limitato e, ovviamente, non vi è la presenza di orizzontamenti interni al camino.

Sebbene le ciminiere storiche siano costituite principalmente da materiale murario (es. in laterizio), esistono casistiche di "camini industriali" costruiti in acciaio così come in calcestruzzo armato. A tal proposito si evidenzia come il collasso delle ciminiere in acciaio è innescato principalmente da azioni dovute al vento. Le ciminiere in calcestruzzo armato invece si possono danneggiare principalmente per un elevato stato tensionale determinato da effetti termici e difetti costruttivi, mentre il 90% dei collassi di ciminiera in muratura è riconducibile a fenomeni sismici (Wang and Fan, 2019).

8.2.2.2.1 Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici

Le azioni lente nelle ciminiere in muratura comportano meccanismi di danno simili a quelli delle torri in muratura. Inoltre, si osserva che gli effetti termici, in presenza di preesistenti difetti costruttivi, possano determinare un'evoluzione degli stati tensionali e dei quadri fessurativi (Wang and Fan, 2019). Per le ciminiere in muratura che presentano acciaio di armatura all'interno delle pareti murarie, molto importante è l'effetto corrosivo delle barre, identificato come la principale causa dell'insorgere di fessure verticali (Bru et al., 2018). In aggiunta, fessure localizzate possono favorire l'infiltrazione di acqua, la quale produce l'attivazione di reazioni chimiche con i solfuri presenti nella malta con conseguente espansione localizzata della malta stessa. Queste reazioni, unite alle variazioni termiche a cui è soggetta la muratura, possono provocare inflessioni localizzate (il più delle volte nelle zone più esposte alle piogge, ad esempio nella parte superiore), Bru et al., (2018), Figura 8-22. Queste inflessioni, unite al fenomeno viscoso, nel tempo possono comportare il collasso della ciminiera.

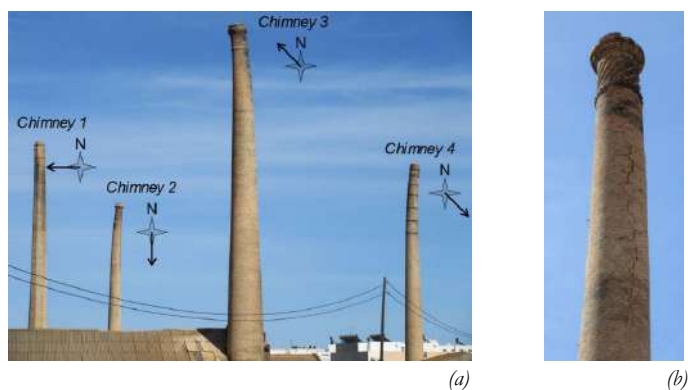


Figura 8-22 – (a) Tipiche inflessioni localizzate in ciminiere industriali in muratura; (b) particolare fessura verticale (Bru et al., 2018).

Come riferimento generale sulle cause di danno che affliggono le ciminiere in muratura è possibile consultare il lavoro di López-Patiño et al., (2017).

8.2.2.2.2 Danni per effetti sismici e vento

In tale casistica ricadono i danni provocati da forti raffiche di vento così come da eventi sismici. Questi danni, se severi, si traducono solitamente in collassi improvvisi. La struttura della ciminiera tende a favorire la formazione di cinematismi per rotazione di tronco rigido, cinematismi che partono dal danno localizzato a una specifica quota della ciminiera. A tal proposito è opportuno evidenziare come, in risposta ad eventi sismici, il danno nelle ciminiere può essere causato non solo per eccessive inflessioni in accordo al primo modo di vibrazione, ma anche per deformate ascrivibili a modi superiori (Qiu et al., 2020). In tali casi, la sezione di rottura è solitamente localizzata nella parte superiore della ciminiera. Inoltre, i difetti costruttivi e le disomogeneità dei materiali possono sensibilmente modificare la quota di rottura, specialmente per quanto riguarda le ciminiere in muratura portante. Tali considerazioni si applicano anche ai danneggiamenti dovuti a raffiche di vento piuttosto intense: la Figura 8-23 riporta l'esempio di una ciminiera collassata a seguito di forti raffiche di vento.



Figura 8-23 – (a) Ciminiera crollata a seguito di forti raffiche di vento; (b) ingrandimento della parte danneggiata (López-Patiño et al., 2017).

I rilievi post-sismici effettuati su una ciminiera in muratura a seguito degli eventi sismici dell'Emilia del 2012 hanno evidenziato come il danno da terremoto possa anche essere associato a formazione di fessure diagonali. Inoltre, questi tipi di strutture sono caratterizzati da risorse di duttilità molto limitate (Minghini, et al., 2014). Infine, sebbene le componenti orizzontali del sisma siano tendenzialmente più dannose rispetto a quelle verticali, queste ultime influenzano significativamente la configurazione finale del danno, e dunque dovrebbero essere considerate nel processo di simulazione.

8.2.3 Architetture a prevalente sviluppo orizzontale (acquedotti, ponti, mura, archi)

8.2.3.1 Architetture con grande sviluppo in lunghezza

8.2.3.1.1 Acquedotti storici

8.2.3.1.1.1 Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici

Le azioni lente che possono provocare danneggiamenti in strutture estese come gli acquedotti sono per lo più riconducibili ai cedimenti differenziali in fondazione che possono interessare tali strutture. I dissesti possono provocare nel tempo la formazione di fessure, così come il distacco delle cortine in laterizio dal nucleo cementizio dell'acquedotto (Tapete et al., 2015). In questo ambito, i dati satellitari oggetto delle presenti Linee Guida si rivelano particolarmente utili per monitorare in remoto possibili cambi del trend di spostamento, indicando zone potenzialmente affette da problemi di cedimenti differenziali, Figura 8-24 (Tapete et al., 2015).

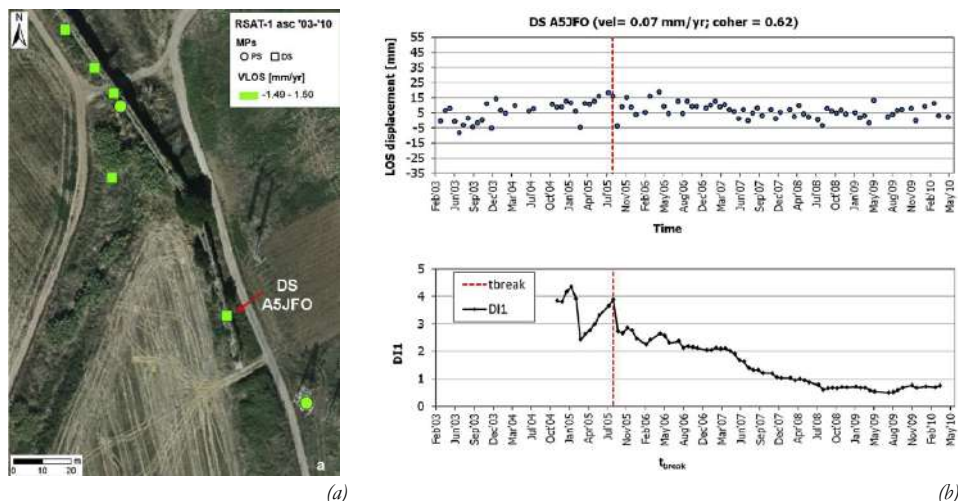


Figura 8-24 – (a) Vista dell'acquedotto e identificazione del PS per il quale si riporta la storia di spostamento; (b) LOS displacements e Deviation Index (DI1) di un punto dell'acquedotto Claudio (Aqua Claudia-Capannelle) calcolato con l'approccio proposto da (Cigna et al., 2012) e (Tapete and Casaghi, 2013). Immagine da (Tapete et al., 2015).

8.2.3.1.1.2 Danni per effetti sismici

Sviluppandosi su tratti molto estesi, un comune rischio di collasso degli acquedotti storici è legato agli eventi sismici. Essi generano azioni non uniformi alla base della struttura, che possono gravemente danneggiare parti localizzate lungo il loro sviluppo. Per esempio, Galli et al., (2010) evidenziano come l'acquedotto *Venafrum*, lungo circa 30 km, presenta un offset verticale di quasi 4 m all'intersezione di una faglia storica del luogo, Figura 8-25. La particolare distribuzione in lunghezza di queste strutture è stata dunque utilizzata da diversi ricercatori come strumento indiretto per localizzare antiche faglie intersecanti lo sviluppo della struttura (Volant et al., 2009; Passchier et al., 2011).

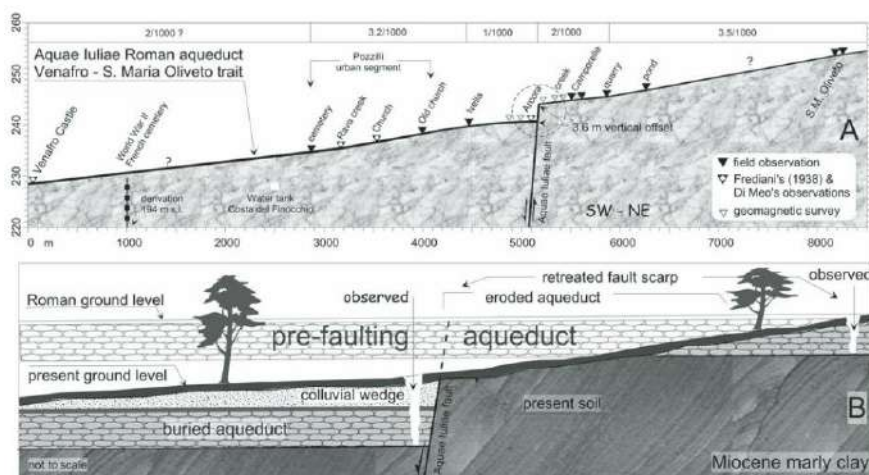


Figura 8-25 – Rappresentazione del meccanismo di faglia attivatosi e il conseguente danneggiamento dell'acquedotto *Venafrum* avvenuto per un abbassamento differenziale del suolo di circa 3.6 m (Figura 7 da Galli et al. (2007); © The Geological Society of America, used with permission.).

In aggiunta a danneggiamenti tipicamente ascrivibili a rotture di faglia (fenomeni *near fault*), gli acquedotti possono subire danneggiamenti più o meno localizzati per effetto delle vibrazioni sismiche, le quali possono instaurare meccanismi di ribaltamento di alcune componenti strutturali quali le pareti verticali costituenti il condotto principale, Figura 8-26 (Volant et al., 2009).

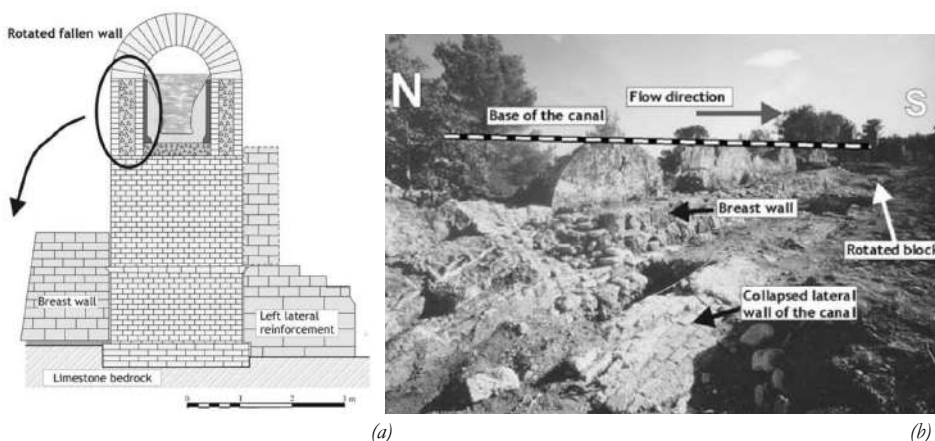


Figura 8-26 – (a) Esempio di collasso avvenuto nell'acquedotto romano "Pont de la Lône" a seguito di un evento sismico; (b) ruderi dello stesso acquedotto (Volant et al., 2009).

8.2.3.1.2 Mura di cinta

8.2.3.1.2.1 Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici

Le mura di cinta possono essere interessate da danni dovuti ad azioni di tipo geologico e geotecnico, quindi per progressivi cedimenti del terreno di fondazione o per la spinta del terreno a contatto con l'opera. A questi si aggiungono i possibili danni dovuti ad azioni di tipo idraulico o igrometrico, in quanto il prolungato contatto dell'opera con le acque presenti, superficiali o di falda, può causare ulteriore degrado ed essere fonte di crolli. Infine, importanti sono anche i fattori ambientali e l'inquinamento (acque meteoriche, dilavamento, azione del vento, presenza di vegetazione) a cui queste opere sono esposte che possono alterare il loro stato di conservazione e provocarne il degrado (D'Agostino et al., 2009).

8.2.3.1.2.2 Danni per effetti sismici

Le mura di cinta sono caratterizzate da una vulnerabilità sismica intrinseca, principalmente rispetto al fenomeno di ribaltamento fuori dal piano, che può dipendere anche dalla tipologia costruttiva, dal materiale, dalla geometria e dallo stato di conservazione. Assume particolare importanza il tipo di muratura che costituisce la cinta muraria, strettamente legato alle risorse disponibili nella zona di costruzione, che influenza fortemente il tipo di meccanismo di danneggiamento (Coisson et al., 2017). Inoltre, i meccanismi di danno possono dipendere anche dalle tecniche di costruzione utilizzate: ad esempio nel caso di murature a sacco, possono verificarsi sgretolamenti e disconnessione dei paramenti.

Le mura di cinta spesso sono interessate dalla formazione di fessure; tale tipo di danno può essere anche dovuto alla presenza di elementi che si comportano come vincoli (come, ad esempio, nel caso di torri spesso ben ammassate alle mura). In tali casi, l'interazione tra le mura e i vincoli, caratterizzati da diversa rigidità, può dare origine a fessure causate dal differente comportamento dinamico tra i due elementi (Figura 8-27a).

Infine, altri meccanismi che interessano queste opere sono i cedimenti delle fondazioni dovuti al sisma o il ribaltamento causato dalla massa di terreno che può trovarsi dietro a queste opere (Figura 8-27b); la spinta del cuneo di terreno può essere tale da causare il ribaltamento o lo scorrimento sulla fondazione.

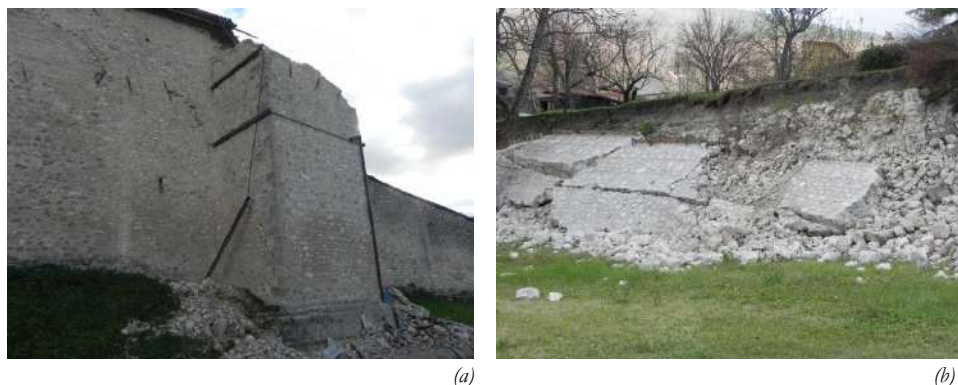


Figura 8-27 – Possibili meccanismi di danneggiamento delle mura di cinta: (a) formazione di fessure per interazione mura-vincolo; (b) azione del terreno sulle mura.

8.2.3.2 Architetture con limitato sviluppo in lunghezza

8.2.3.2.1 Ponti in muratura

I ponti in muratura sono opere molto diffuse nel patrimonio monumentale, spesso caratterizzate da elementi ad arco. Essi hanno grande rilevanza sia sotto il profilo storico e culturale per l'architettura delle infrastrutture sia dal punto di vista strategico; infatti, sono spesso ancora utilizzati per il traffico carrabile e ferroviario. L'appartenenza al patrimonio storico rende, per tali opere, molto complessa la fase di conoscenza, sia in termini di identificazione della tessitura della muratura, sia per la presenza di eventuali irregolarità geometriche (e.g., rotazione fuori piano degli elementi verticali), sia per la presenza di degrado e di fessurazioni, che spesso seguono le variazioni termiche stagionali.

In queste opere, i tipi di danneggiamento sono legati alla tipologia degli elementi strutturali e dalla loro interazione (Ruocci, 2010). In Figura 8-28 è riportata una rappresentazione degli elementi strutturali che costituiscono un ponte in muratura dove vengono presentati i meccanismi di danneggiamento che li possono interessare (vedi schema di Figura 8-29).

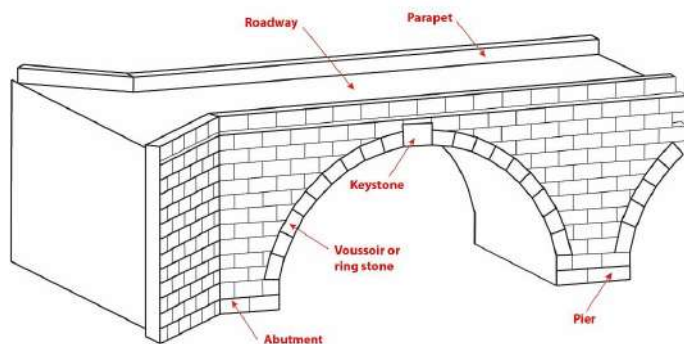


Figura 8-28 – Elementi strutturali di un ponte ad arco in muratura a più campate.

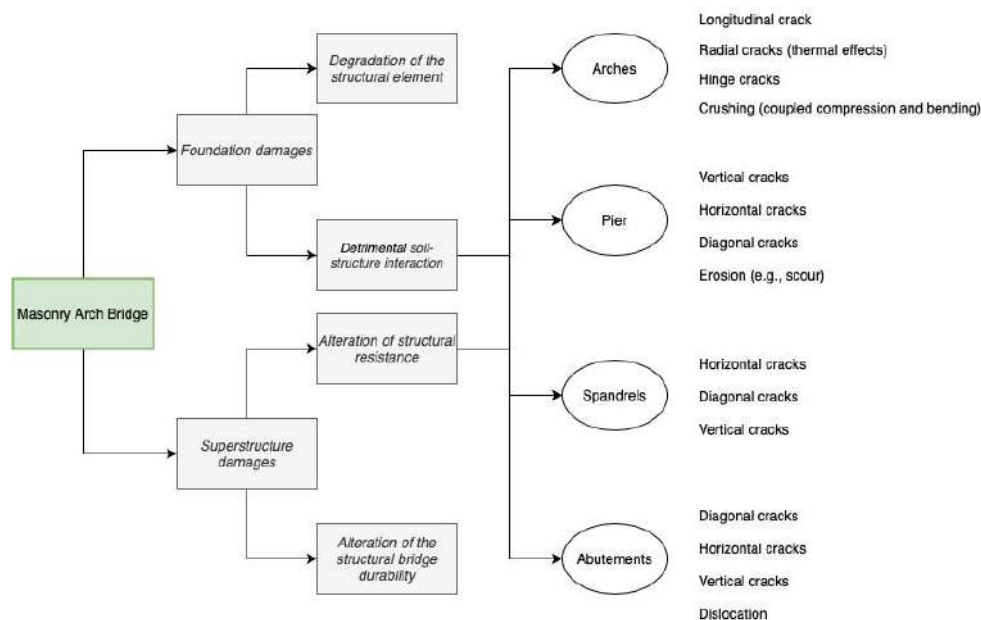


Figura 8-29 – Schema delle relazioni tra i meccanismi di danneggiamento e gli elementi strutturali di un ponte ad arco in muratura.

I meccanismi di danneggiamento che riguardano i ponti in muratura possono essere suddivisi distinti in base alla porzione di struttura in cui si verifica il danno, ovvero fondazione e sovrastruttura. In particolare, la fondazione può essere interessata da danni dovuti al degrado degli elementi strutturali, quali i danni causati da problemi di interazione suolo-struttura o lo scalzamento ed erosione localizzata alla base delle pile. Per quanto riguarda la sovrastruttura, possono verificarsi meccanismi di danneggiamento che incidono sulla resistenza degli elementi strutturali come la formazione di fessure longitudinali e trasversali nelle volte, fessure verticali nelle pile o anche orizzontali nelle spalle dell'arco. Un danno tipico è il distacco dell'armilla dalla volta, che non modifica la resistenza degli elementi strutturali connessi, ma può incidere sul funzionamento globale del ponte. Infine, le spalle possono essere interessate da meccanismi di scorrimento/traslazione, ribaltamento e rigonfiamento.

Nel caso della sovrastruttura, inoltre, possono verificarsi meccanismi di danneggiamento che incidono sulla durabilità di queste opere quali, ad esempio, gli effetti della vegetazione che cresce all'interno delle fessure, ovvero la perdita di materiale nella muratura per effetto dei cicli di gelo e disgelo.

8.2.3.2.1.1 Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici

Nei ponti in muratura possono essere causa di danneggiamento effetti termici come l'eccessivo riscaldamento, cicli di gelo-disgelo e l'esposizione agli agenti atmosferici che possono portare alla variazione delle proprietà dei materiali. Inoltre, questi tipi di opere possono essere interessati da spostamenti delle spalle e cedimenti delle fondazioni causati dalla variazione delle proprietà del terreno di fondazione o, nei casi di ponti in alveo, i cedimenti possono essere causati dal progressivo scalzamento dovuto ad eventi alluvionali.

Infine, i ponti in muratura possono essere interessati da meccanismi di degrado dovuti a fatica e a reazioni chimiche e fisiche causate dall'esposizione a piogge acide e all'inquinamento atmosferico (Ruocci, 2010).

8.2.3.2.1.2 Danni per effetti sismici

Il comportamento di un ponte in muratura nei confronti dell'azione sismica dipende prevalentemente dalla tipologia strutturale. Le norme sul patrimonio culturale in zona sismica (Direttiva, 2011), al paragrafo 5.4.5 "Ponti in muratura, archi trionfali ed altre strutture ad arco", riportano diversi meccanismi che possono interessare le varie

tipologie di ponti. In alcune tipologie di ponti il danno si accompagna a movimenti differenziali, ad esempio sulle imposte nel caso di ponti ad arco, rilevabili tramite SAR.

8.2.3.2.2 *Archi trionfali e altre strutture ad arco*

8.2.3.2.2.1 *Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici*

Gli archi trionfali sono opere in muratura caratterizzate da singoli elementi ad arco che risultano particolarmente vulnerabili nel caso di movimenti differenziali delle imposte dovute a cedimenti del terreno di fondazione.

8.2.3.2.2.2 *Danni per effetti sismici*

I meccanismi di danno per eventi sismici che possono interessare gli archi trionfali, e in generale le strutture ad arco, sono riportati in (Direttiva, 2011), dove, tra i 28 possibili meccanismi di danneggiamento individuati per i macroelementi costituenti le chiese, vengono anche riportati quelli per gli archi trionfali (Figura 8-30).

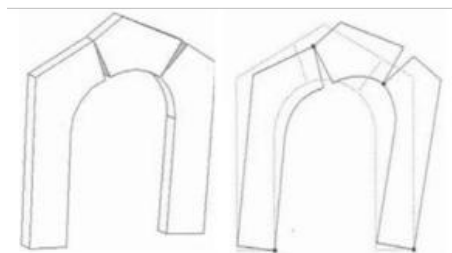


Figura 8-30 – Meccanismo locale relativo agli archi trionfali tratto dall'abaco dei meccanismi di collasso delle chiese (fonte Direttiva PCdM 9 febbraio 2011).

Gli archi trionfali possono essere interessati da lesioni nell'arco, scorrimento di conci e schiacciamento o lesioni orizzontali alla base dei piedritti.

La Direttiva (2011) individua, per questi elementi, possibili presidi antisismici, come:

- Pareti di contrasto efficaci (basso rapporto luce/larghezza aula, transetto, altri corpi di fabbrica);
- Presenza di una catena in posizione efficace;
- Conci di buona fattura e/o adeguato spessore dell'arco.

Mentre individuano come fattori e indicatori di vulnerabilità

- Presenza di copertura pesante in c.a.;
- Presenza di cupola o tiburio.

8.2.4 *Architetture distribuite su una superficie (chiese, teatri, palazzi, ville)*

8.2.4.1 Chiese, luoghi di culto e altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi (compresi teatri)

8.2.4.1.1 *Chiese*

8.2.4.1.1.1 *Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici*

Di fatto la quasi totalità dei danni dovuti ad azioni lente e durature nel tempo producono l'insorgere e/o l'evoluzione di quadri fessurativi più o meno localizzati. Questi danni possono essere riassunti come di seguito riportato:

- Strapiombo: È solitamente associato a dissesti estesi e generalizzati ed è rappresentato dalla perdita di verticalità di una parete, solitamente verso l'esterno della struttura. Spesso si verifica in pareti in muratura

snelle e prive di vincoli dati dagli orizzontamenti. Cedimenti in fondazione e presenza di elementi spingenti (spesso presenti nelle chiese) sono la principale causa scatenante per tale dissesto;

- Spanciamento: È solitamente associato a dissesti locali e rappresenta l'insorgenza di una sporgenza in una particolare zona o fascia muraria sottoposta ad elevato carico verticale di compressione. Tale fenomeno è tendenzialmente osservato in pareti snelle e/o male ammassate. Le disomogeneità e la natura viscosa del materiale murario possono far evolvere nel tempo questo tipo di dissesto verso un vero e proprio collasso locale della parete interessata, e, nel caso la parete sostenga ulteriori elementi strutturali, verso un collasso generalizzato dell'intera struttura;
- Degrado diffuso: I degradi diffusi possono essere rappresentati da quadri fessurativi e perdita di strati protettivi delle pareti. In entrambi i casi l'effetto congiunto di cicli termici ed effetto delle acque meteoriche può aggravare sensibilmente lo stato fessurativo, anche in funzione della composizione chimica del materiale murario utilizzato.

Nei casi in cui l'interazione terreno-struttura gioca un ruolo fondamentale, ne è esempio il noto caso del Santuario di Vicoforte (CN), soggetto a cedimenti differenziali delle fondazioni avvenuti nel tempo (Ceravolo et al., 2017, Ceravolo et al., 2021, Garro et al., 1962), i dati satellitari sono di grande utilità per correlare gli spostamenti del terreno con dati provenienti dal monitoraggio strutturale on-site ed eventualmente con i parametri ambientali (Coccimiglio et al., 2022). In Figura 8-31 è riportata la localizzazione del santuario su mappa, unitamente allo spostamento lungo la verticale di una zona limitrofa al santuario, ottenuto mediante la combinazione degli spostamenti Line of Sight (LoS) misurati dalle orbite ascendenti e discendenti dei satelliti (<https://egms.land.copernicus.eu/>).

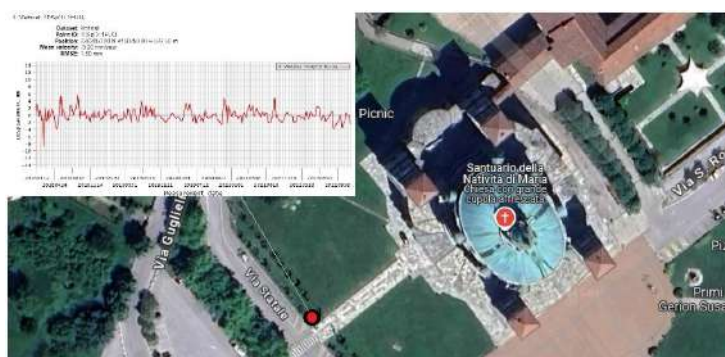


Figura 8-31 – Localizzazione del Santuario di Vicoforte e spostamento verticale dell'area circostante, ricavato dalla combinazione dei dati Line of Sight da orbite satellitari ascendenti e discendenti.

8.2.4.1.1.2 Danni per effetti sismici

L'analisi sistematica dei danni subiti dalle chiese in occasione dei principali eventi sismici italiani degli ultimi decenni ha evidenziato come il comportamento sismico di questa tipologia di manufatti possa essere interpretato attraverso la loro scomposizione in porzioni architettoniche (denominate macroelementi), caratterizzate da una risposta strutturale sostanzialmente autonoma rispetto alla chiesa nel suo complesso (facciata, aula, abside, campanile, cupola, arco trionfale, ecc.) (Doglioni et al., 1994; Lagomarsino e Podestà 2004; Penna et al., 2019).

La scheda per il rilievo del danno e della vulnerabilità delle chiese è stata utilizzata nelle emergenze sismiche a partire dal 1995; la notevole mole di dati raccolti (oltre 4000 chiese) ha consentito, attraverso elaborazioni statistiche, di stabilire una relazione tra l'azione sismica ed il danno, in funzione di un parametro di vulnerabilità della chiesa.

Nell'Allegato C della Direttiva (2011) sono elencati 28 meccanismi, unitamente ad una lista di presidi e di indicatori di vulnerabilità, cui è possibile aggiungerne altri, in relazione agli aspetti caratteristici della singola chiesa o del costruito nell'area.

I meccanismi si possono distinguere in: 1) meccanismi di 1° modo, quando le azioni sismiche agenti ortogonalmente al piano della muratura generano meccanismi caratterizzati dalla rotazione dei muri fuori dal proprio piano; 2) meccanismi di 2° modo, quando le azioni sismiche agenti parallelamente al piano della muratura generano rotture a taglio nel proprio piano. Queste ultime si innescano solo se i meccanismi del primo modo sono impediti (buon ammortamento degli elementi).

La facciata è il macroelemento più facilmente identificabile e tra i più vulnerabili delle chiese. Il suo distacco e conseguente ribaltamento è dovuto alle oscillazioni della parete fuori dal proprio piano, che spesso è snella e male ammortata. Gli elementi di vulnerabilità per questo meccanismo sono rappresentati dalla presenza di aperture (finestre, porte e rosoni) e dalla presenza di volte e coperture spingenti. I meccanismi di facciata si attivano per carenza di ammortamenti tra facciata e pareti laterali e tra facciata e copertura. A seconda delle configurazioni, si può osservare un distacco con rotazione cilindrica alla base o con rotazione con cerniera nella fascia bassa che si verifica soprattutto in presenza di grandi aperture in facciata. I danni osservabili per questo tipo di meccanismo sono per lo più lesioni verticali o inclinate a cuneo sulle murature nella fascia di sovrapposizione con le pareti laterali, e con lesioni sullo spigolo verticale.

Il ribaltamento è uno dei meccanismi più frequenti che coinvolgono anche il macroelemento timpano che viene considerato isolato rispetto alla facciata poiché spesso è un elemento snello e particolarmente svettante, tendenzialmente male ancorato al corpo principale (l'ancoraggio più diffuso con le pareti retrostanti è costituito dai semplici appoggi degli arcarecci e della trave di colmo senza adeguate connessioni). Inoltre, può essere soggetto a carichi aggiuntivi aggettanti come frontoni, cornici ed elementi scultorei. In caso di sisma il timpano può oscillare fuori dal proprio piano, dando luogo a meccanismi di ribaltamento con cerniere orizzontali nella fascia alta, o con cerniere oblique, più frequenti in presenza di aperture in facciata. Il danno riscontrabile relativo a questo meccanismo è costituito da lesioni orizzontali che compaiono in corrispondenza all'attacco tra il timpano e la facciata.

Il ribaltamento delle pareti laterali, simile al meccanismo di facciata, è causato dall'azione sismica alla base cui si aggiunge l'interazione con l'orditura della copertura che trasferisce i carichi direttamente sulle pareti laterali. Spesso alle spinte del tetto si sommano le spinte di volte e archi che causano carichi orizzontali concentrati. Questo tipo di collasso è favorito dalla presenza di scarsi o deboli elementi di connessione fra la copertura e le pareti laterali, in aggiunta alle discontinuità nella muratura dovute a trasformazioni avvenute nel tempo.

Per effetto del ribaltamento delle pareti laterali, si riscontrano lesioni verticali tra le pareti e i muri verticali e lesioni longitudinali sugli arconi trasversali di pertinenza, ovvero lesioni incrociate sulle volte delle navate. Fenomeno frequente e indicativo di questo meccanismo è il collasso parziale delle volte. In altri casi, le travi di copertura possono crollare o sfilarsi, causando un effetto di martellamento sulla parete.

8.2.4.1.2 Teatri

8.2.4.1.2.1 *Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici*

I danni dovuti da azioni lente nei teatri sono riconducibili ad altre tipologie strutturali riportate nel presente capitolo, in particolare le chiese e gli edifici con grandi aule senza orizzontamenti intermedi e i palazzi.

8.2.4.1.2.2 *Danni per effetti sismici*

Dal punto di vista strutturale, si può affermare che i teatri, come anche molti cinema e auditorium, presentano componenti tipiche sia degli edifici con grandi aule, come le chiese, sia una configurazione che invece li assimila di più ai palazzi (presenza di orizzontamenti nelle porzioni dell'edificio non dedicate alla scena e alla platea). Spesso questa tipologia architettonica presenta spesso notevoli complessità sia geometriche sia strutturali, il che rende difficile la scelta del modello da applicare per valutarne la vulnerabilità (Cennamo et al., 2011).

Per questi motivi, per i teatri storici non è facile definire macro-elementi che possano descrivere un comportamento tipico. Inoltre, il numero dei teatri nei centri cittadini solitamente è ridotto rispetto ad altre tipologie architettoniche,

come chiese, palazzi e torri; pertanto i danni osservati su questa tipologia spesso non hanno raggiunto una numerosità statistica sufficiente a poter definire una scheda di danni tipici.

In sintesi, ad oggi non sono ancora stati effettuati studi consistenti mirati ad analizzare questa tipologia in modo estensivo e sistematico, tali da consentire di individuarne caratteristiche specifiche di danneggiamento e di collasso, soprattutto per quegli elementi che sono unicamente relativi a questa tipologia come la torre scenica, e di comprendere appieno l'interazione che può avere con il corpo del retroscena e della grande aula ospitante la platea.

8.2.4.2 Palazzi, ville e altre strutture con pareti di spina e orizzontamenti intermedi

A parte la complessità dell'impianto volumetrico tipica degli edifici storici, si osserva una sostanziale sovrapposizione della categoria dei palazzi e delle ville con quella degli edifici in muratura dell'edilizia ordinaria non tutelata. Di conseguenza si può fare riferimento, nella maggior parte dei casi, a quanto già esposto al capitolo 5 di questo documento. Fanno eccezione edifici che appartengono a complessi più ampi e che verranno trattati al paragrafo successivo.

Una peculiarità degli edifici storici, soprattutto in caso di evento sismico, è la loro vulnerabilità nei confronti dei meccanismi locali. Infatti, tali edifici, se pur usualmente realizzati con materiali e tecniche di buona qualità, spesso non presentano sistematici collegamenti a livello di piano (catene, cordoli); inoltre, i criteri di proporzionamento tipicamente adottati (distanza tra i muri di spina, distanza delle aperture dai cantonali, ecc.) non sono sufficienti a prevenire possibili meccanismi locali nel caso di azioni sismiche.

8.2.5 Architetture distribuite su aree vaste (aggregati, monasteri, fortezze, aree archeologiche)

8.2.5.1 Aree archeologiche delimitate e anfiteatri

Riguardo ai possibili danni sui singoli reperti presenti nelle aree archeologiche vale quanto riportato in 8.2.1.1, mentre sul complesso di reperti e ruderi e sulle loro mutue interazioni vale quanto affermato in 8.2.5.2 sugli aggregati edilizi.

Per ulteriori informazioni sui danni rilevabili su aree archeologiche e reperti, consultare D'Agostino et al., (2009).

8.2.5.2 Aggregati edilizi

L'Ordinanza n. 3431 del 3 maggio del 2005 alla sezione 11.5.4.3.2 riporta la seguente definizione di aggregato edilizio: *Un aggregato edilizio è costituito da un insieme di parti che sono il risultato di una genesi articolata e non unitaria, dovuta a molteplici fattori (sequenza costruttiva, cambio di materiali, mutate esigenze, avvicinarsi dei proprietari, etc.). Nell'analisi di un edificio facente parte di un aggregato edilizio occorre tenere conto, perciò, delle possibili interazioni derivanti dalla contiguità strutturale con gli edifici adiacenti, connessi o in aderenza ad esso. A tal fine dovrà essere individuata, in via preliminare, l'Unità Strutturale (US) oggetto di studio, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue. Ove necessario, tale analisi preliminare dovrà considerare l'intero aggregato, al fine di individuare le relative connessioni spaziali fondamentali, con particolare attenzione al contesto ed ai meccanismi di giustapposizione e di sovrapposizione* (O.P.C.M. 3 maggio 2005, Ordinanza n. 3431).

A tal proposito, l'Ordinanza definisce gli aspetti su cui concentrare l'attenzione, in previsione dei tipi di danneggiamento cui sarà maggiormente soggetto un aggregato edilizio sia sotto azioni rapide che lente. Fra questi si possono citare: disassamenti dei fronti edilizi, posizionamento delle scale, allineamento delle pareti, prolungamenti, rotazioni, intersezioni e slittamenti degli assi delle pareti, rapporti di regolarità, modularità ai diversi piani, simmetria, rastremazioni delle pareti, sfalsamento di quota tra solai contigui, etc.

In aggiunta è necessario analizzare, in ordine, l'effetto di carichi provenienti da solai o da pareti di unità strutturali (US) adiacenti alla US oggetto di analisi, spinte di archi e volte appartenenti ad US contigue, spinte provenienti da archi di contrasto o da tiranti ancorati su altri edifici, differenze di altezza o di rigidità tra US adiacenti, azioni di ribaltamento e di traslazione che interessano le pareti nelle US di testata delle tipologie seriali (schiere), e possibile martellamento nei giunti tra US adiacenti.

8.2.5.2.1 *Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici*

Le azioni lente su questa tipologia strutturale sono riconducibili principalmente a cedimenti di fondazione e/o effetti di interazione terreno-struttura. Di conseguenza, il danneggiamento che ne deriva può assumere configurazioni molto diversificate, in funzione di altezza dell'edificio rispetto alle strutture adiacenti, alla posizione dell'edificio rispetto all'aggregato (di testa o centrale), posizione del dissesto del suolo in relazione all'aggregato, effettivo ammassamento fra i diversi edifici costituenti l'aggregato, etc.

A causa della natura così diversificata del danno che può insorgere per azioni lente e per il fatto che gli aggregati edilizi sono composti spesso da strutture ordinarie, si rimanda per considerazioni più specifiche ai capitoli che trattano i danneggiamenti dei singoli edifici (in calcestruzzo armato, capitolo 5 e muratura capitolo 6).

8.2.5.2.2 *Danni per effetti sismici*

Sebbene la casistica di danneggiamento di aggregati edilizi soggetti ad azioni sismiche sia molto vasta, è tuttavia possibile trarre alcune considerazioni sulla base di osservazioni di danneggiamenti avvenuti in passato a seguito di terremoti (Sisti et al., 2019, Figura 8-32; Carocci, 2012). Se pur da un punto di vista qualitativo, è possibile osservare infatti che il principale danneggiamento cui è soggetta questa tipologia strutturale è quello di collasso parziale delle porzioni in quota (prossime alle coperture, soprattutto in casi di altezze differenti tra i singoli edifici), nonché il danneggiamento, spesso per ribaltamento fuori dal piano, di porzioni di edifici di testa o posti negli spigoli degli aggregati.

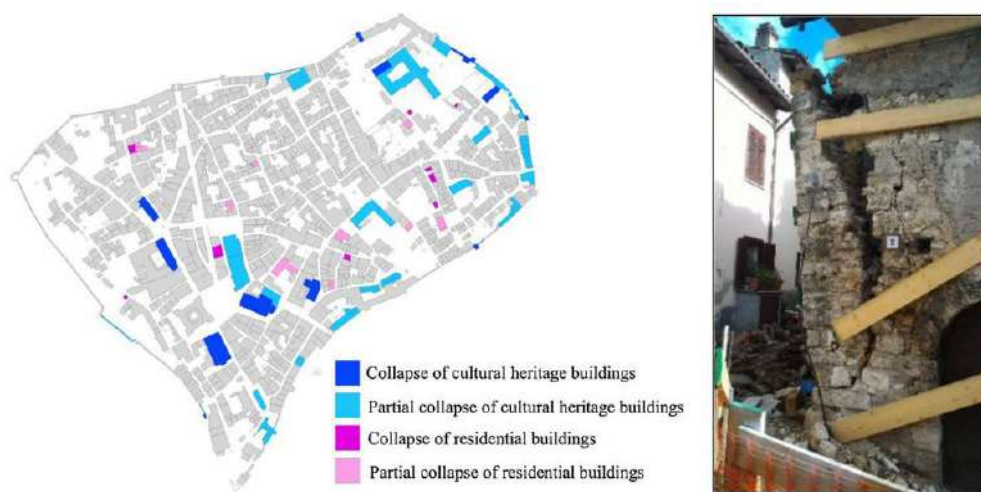


Figura 8-32 – (a) Identificazione del crollo in edifici residenziali e del patrimonio culturale; (b) crollo di una unità in muratura di spigolo (Sisti et al., 2019).

8.2.5.3 *Complessi ecclesiastici e monasteri*

Riguardo ai danni sui singoli edifici appartenenti a complessi ecclesiastici e monasteri vale quanto riportato in 8.2.4.1 per le chiese e in 8.2.4.2 per i palazzi, etc. Mentre sui complessi e sul loro comportamento d'insieme vale quanto specificato in 8.2.5.2 sugli aggregati edilizi.

8.2.5.4 *Castelli e fortezze*

Al contrario delle chiese – che hanno mantenuto la stessa funzione nel corso dei secoli – le fortificazioni hanno da sempre avuto una natura mutevole e multifunzionale, che coniugava la primigenia funzione difensiva, all'abitazione privata o, più di recente, a funzioni pubbliche. Per questo motivo, le fortificazioni sono da sempre state soggette a

continue evoluzioni e trasformazioni, dovute sia agli adattamenti alle tecniche belliche, sia ai diversi mutamenti socio-economici. Il termine architettura fortificata pertanto va inteso in una accezione molto ampia, che spazia tra strutture architettoniche anche funzionalmente molto diverse tra loro, ma che presentano alcuni caratteri comuni, come la presenza di torri e mura difensive.

Le fortezze, i borghi fortificati, i castelli e le cittadelle, sono solo alcune delle tipologie che si sono sviluppate nel corso del tempo e che fanno parte di questo patrimonio. In Italia le fortificazioni sono diffuse su tutta la penisola e molte di queste sono sopravvissute fino ai giorni nostri, in diversi stati di conservazione: dai ruderi a edifici ancora oggi in uso. Le loro conformazioni sono molteplici e variano a seconda del luogo in cui sorgono, delle soluzioni difensive, degli elementi costruttivi e dei materiali disponibili nella regione in cui venivano edificati.

8.2.5.4.1 *Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici*

Castelli e fortezze sono per loro natura strutture tozze e massicce. Gli effetti dei fenomeni lenti tendenzialmente non destano molta preoccupazione se confrontati con quelli osservabili su altre tipologie strutturali (ad esempio le chiese). Tuttavia, proprio per via della costituzione massiccia, tali strutture possono essere soggette a fenomeni di disgregazione, osservabili per lo più in lunghi periodi di tempo. A questo contribuisce il tipo di struttura muraria spesso utilizzata per le pareti portanti, costituite nella maggior parte dei casi da “muratura a sacco”. Un altro fenomeno lento che può interessare questo tipo di strutture è l'attacco chimico e fisico dovuto all'effetto delle piogge. In questo caso il danno che ne deriva è riconducibile il più delle volte a degradi superficiali più o meno estesi ma che interessano spessori limitati della parete.

Infine, per i danneggiamenti interessanti singole componenti di castelli e fortezze si rimanda ai paragrafi specifici del presente capitolo.

8.2.5.4.2 *Danni per effetti sismici*

Gli eventi sismici degli ultimi quarant'anni in Italia – e in particolare gli ultimi eventi che hanno colpito il Centro Italia – hanno evidenziato la fragilità di queste costruzioni, all'apparenza massicce e robuste, che hanno subito, insieme alle chiese, i danni più gravi e sono state interessate da crolli parziali o totali.

Nonostante la manifestata vulnerabilità di questa tipologia di edifici – nonché la loro importanza sul piano sociale e culturale – le costruzioni fortificate sono state finora soggette a studi limitati sul comportamento sismico, per lo più concentrati su singoli casi studio. Solo a partire dal terremoto del 2012 in Emilia è stata rivolta una attenzione più sistematica a queste tipologie strutturali, andando a definire un primo abaco dei meccanismi di danno specifico per le architetture fortificate (Cattari et al., 2014) (Cattari et al., 2012). La validità dell'abaco è stata poi ampliata da successivi studi (Coisson et al., 2017), che hanno esteso il dataset dei danni prendendo in considerazione i castelli e le fortificazioni danneggiate dai terremoti distruttivi degli ultimi 40 anni in Italia, includendo quindi anche tipologie edilizie, tecniche costruttive, materiali e topologie differenti.

Oltre a definire l'area di danneggiamento, la documentazione fotografica raccolta ha permesso di confrontare le tipologie di danno osservate in castelli con caratteristiche diverse in termini di suolo, materiali, caratteri costruttivi e stato di conservazione. L'abaco è stato quindi impiegato per catalogare i danni subiti da 192 castelli. In Figura 8-33 è riportato l'abaco dei meccanismi di danno osservati per le fortificazioni (Coisson et al., 2017):

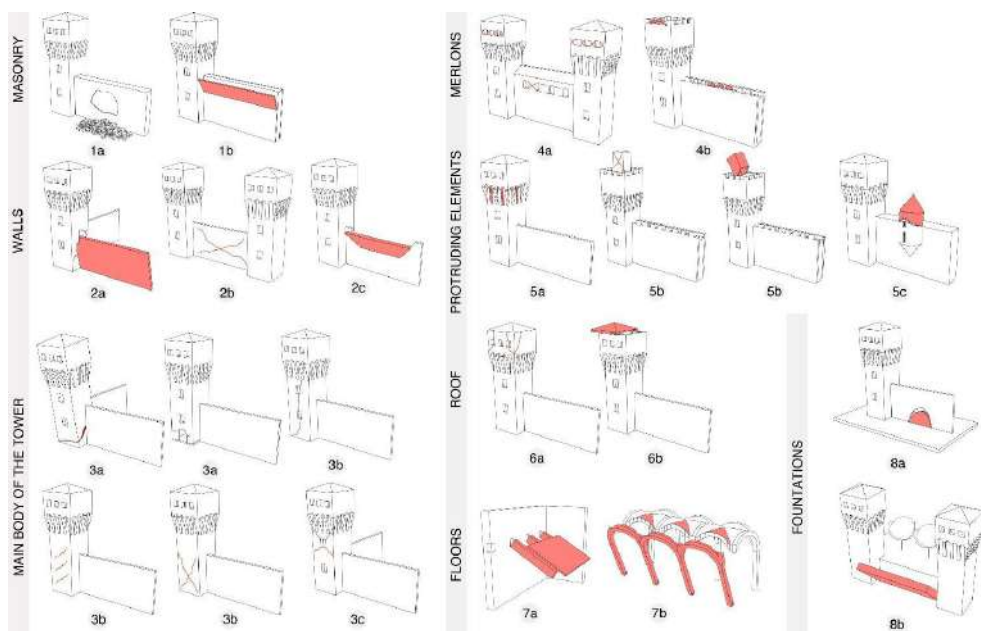


Figura 8-33 – Abaco dei meccanismi di danno delle architetture fortificate.

8.2.6 Architetture del XX secolo

Le architetture del XX secolo costituiscono una classe ampia, che include diversi materiali e tipologie, le cui problematiche sono in parte già trattate nei capitoli del documento dedicate più generalmente agli edifici strategici e ordinari e alle infrastrutture. Nondimeno, l'introduzione di un paragrafo specifico relativo alle architetture del XX secolo può avere interesse a seguito di alcune loro caratteristiche che li distinguono dagli edifici ordinari:

- Molte tecnologie e tipologie adottate in passato, in alcuni casi pionieristiche e legate a brevetti, non hanno avuto ampia diffusione e non sono tuttora trattate dalle norme o dalle linee guida sulle costruzioni esistenti;
- Attualmente, gran parte del patrimonio mondiale delle architetture del XX secolo non è riconosciuto e tantomeno tutelato e, pertanto, è a rischio di essere soggetto a trasformazioni che non ne rispettino le caratteristiche costruttive e storiche, soprattutto in caso di danni causati da eventi antropici e naturali, e necessita della messa a punto di metodi specifici di analisi, manutenzione e controllo per i quali le tecniche DInSAR potrebbero rivelarsi uno strumento potenzialmente molto utile.

8.2.6.1.1 Danni per effetti di deformazione del sottosuolo, acqua, temperatura, effetti viscosi e chimici

La straordinaria varietà e quantità di strutture realizzate durante il XX secolo non è certo esente da difetti di concezione, progettazione e realizzazione. In alcuni casi, principalmente agli albori dell'uso del calcestruzzo armato, mancava un livello appropriato del controllo della sicurezza in fase di progettazione a causa di una inadeguatezza della teoria moderna per il calcestruzzo strutturale, sia nel caso di strutture in calcestruzzo ordinario che, a maggior ragione, nel caso di opere in precompresso.

I danni per effetto delle azioni lente sono quelli tipici delle costruzioni ordinarie, ma sono spesso accentuati dalla difficoltà di manutenzione preventiva e correttiva e, più frequentemente, da problemi di durabilità. Questi ultimi, in particolare, sono correlati al ritardo che ha segnato l'introduzione di adeguate disposizioni rispetto i fenomeni di degrado e la durabilità delle opere, così come del controllo di qualità nei codici tecnici.

Per ulteriori informazioni sulle architetture del XX secolo si può fare riferimento a (Lenticchia et al., 2018; Lenticchia et al., 2021; Levi and Chiorino, 2004; Ceravolo, 2020).

8.2.6.1.2 *Danni per effetti sismici e vento*

Le architetture del XX secolo sono state generalmente concepite senza considerare gli effetti delle azioni sismiche. In alcuni casi la progettazione ha considerato la presenza di altre azioni rapide, come quelle del vento, considerate applicate alla superficie dell'opera e non alla massa degli elementi. I problemi riguardano specialmente le architetture spaziali, che sono caratterizzate da forme molto complesse, a volte staticamente virtuosistiche, e da distribuzioni disomogenee delle masse e delle rigidità, all'interazione fra corpi attigui, al comportamento incerto di materiali e tecnologie utilizzate all'epoca della loro realizzazione ed oggi non più in uso (es. solai prefabbricati di diverse tipologie, collegamenti, ferrocemento, precompressione etc.).

Nel caso delle strutture in calcestruzzo armato va detto che la loro duttilità è spesso compromessa da fattori come la massa eccessiva, l'inadeguatezza dei dettagli costruttivi e le irregolarità introdotte dagli elementi non strutturali (es. tamponamenti). Un problema molto ricorrente e tipico delle prime strutture in calcestruzzo armato è l'insufficienza di armatura trasversale negli elementi. Più in generale, i primi progettisti di calcestruzzo armato riponevano molta fiducia sulla resistenza degli elementi in calcestruzzo, e inoltre gli standard del tempo richiedevano verifiche a taglio solo per le travi, non per le colonne. Nel caso di strutture in acciaio, le criticità sono invece associate alla loro concezione tendenzialmente isostatica e ai diversi tipi di instabilità e collasso repentino potenzialmente indotti dall'azione sismica.

I danni prodotti da azioni dinamiche sulle architetture appartenenti al patrimonio del XX secolo, in linea di principio, non dovrebbero differire da quelli riscontrati nelle rispettive tipologie, come evidenziato nei rispettivi capitoli. Tuttavia, considerando le sperimentazioni in termini di nuove forme e configurazioni strutturali condotte dai progettisti di questo periodo, alla ricerca dei limiti e delle potenzialità dei nuovi materiali e tecniche costruttive (es. c.a. e c.a.p.), si possono individuare alcune caratteristiche specifiche che incrementano notevolmente le potenzialità e l'efficacia dei dati SAR. Il monitoraggio mediante dati interferometrici risulterebbe, ad esempio, efficace in presenza di edifici con grandi volumi e superfici coinvolte, grandi luci o altezze, coperture a membrature sottili e/o elementi molto snelli o deformabili, etc.

Inoltre, non essendo stati progettati secondo standard antisismici e/o con presidi rispetto alle azioni orizzontali, questi edifici sono soggetti a modi di danneggiamento a volte rilevabili da SAR, quali piani soffici incipienti, movimenti non solidali delle fondazioni, movimenti non solidali fra i corpi e in corrispondenza dei giunti, eccessive deformazioni di elementi in aggetto per insufficienza degli ancoraggi, rotazioni di piano per via di irregolarità strutturali, e molto altro. I dati SAR, di converso, non forniscono indicazioni su altri tipi di danneggiamento importanti, che richiedono evidentemente l'integrazione con il monitoraggio o l'ispezione on-site, quali l'integrità dei nodi trave-colonna (non ben protetti in queste costruzioni), le lesioni a taglio negli elementi tozzi (molto ricorrenti specie negli elementi verticali, dove le staffe sono insufficienti e in alcuni casi sono del tutto assenti), gli inneschi di fenomeni di instabilità globale, flessione-torsionale, euleriana, locale, etc.

8.3 RIFERIMENTI

- Adams R., Brown W., Culbert T. (1981). SAR mapping, archeology, and ancient Maya land use. *Science* 213: 1457–1463
- Agapiou A., Lysandrou, V. (2020). Detecting displacements within archaeological sites in cyprus after a 5.6 magnitude scale earthquake event through the hybrid pluggable processing pipeline (HyP3) cloud-based system and Sentinel-1 interferometric synthetic aperture radar (InSAR) analysis, in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 6115–6123, doi: 10.1109/JSTARS.2020.3028272.
- Alani M.A., Tosti F., Bianchini Ciampoli L., Gagliardi V., Benedetto A. (2020). An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies, *NDT & E International*, 115, doi:10.1016/j.ndteint.2020.102288.
- Alberti S., Ferretti A., Leoni G., Margottini C., Spizzichino, D. (2017) Surface deformation data in the archaeological site of Petra from medium-resolution satellite radar images and SqueeSAR™ algorithm, *Journal of Cultural Heritage*, doi:10.1016/j.culher.2017.01.005.

- Aoki T., Sabia D., Rivella D. (2008). Influence of experimental data and FE model on updating results of a brick chimney. *Advances in Engineering Software*, 39 (4), 327–35.
- Bartoli G., Betti M., Marra A.M., Monchetti S. (2017). Semiempirical Formulations for Estimating the Main Frequency of Slender Masonry Towers. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 31 (4): 4017025.
- Bejarano-Urrego L.E. Verstryng E., Van Balen K., Wuyts V., Declercq P.Y. (2016). Settlement-induced damage monitoring of a historical building located in a coal mining area using PS-InSAR. In: *Workshop on Civil Structural Health Monitoring*. Queen's University; Belfast.
- Bennati S., Nardini L., Salvatore W. 2005. Dynamic behavior of a medieval masonry bell tower. ii: measurement and modeling of the tower motion. *Journal of Structural Engineering*, 131 (11), 1656–64.
- Borri A. (2011). Problematiche strutturali e aspetti normativi, convegno: Cambiamenti climatici e stabilità degli edifici. Consolidamento dei terreni, normativa tecnica e casi di successo. Firenze, 20 ottobre 2011.
- Bru D., Reynau R., Baeza F.J., Ivorra S. (2018). Structural damage evaluation of industrial masonry chimneys. *Materials and Structures*, 51 (1), 1–16.
- Buti A, Pistone G. (1998). Criteri di rilievo delle strutture di elevazione in muratura e degli elementi costruttivi associati. Milano, UNI.
- Carocci C. F. (2012). Small centres damaged by 2009 L'Aquila Earthquake: on-site analyses of historical masonry aggregates. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10 (1), 45–71 doi 10.1007/s10518-011-9284-0.
- Casolo S., Diana V., Uva G. (2017). Influence of soil deformability on the seismic response of a masonry tower. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15 (5), 1991–2014.
- Castellazzi G., D'Altri A.M., de Miranda S., Chiozzi A., Tralli A. (2018). Numerical insights on the seismic behavior of a non-isolated historical masonry tower. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16 (2), 933–61.
- Cattari S., Degli Abbati S., Ferretti D., Lagomarsino S., Ottonelli D., Tralli A. (2014). Damage assessment of fortresses after the 2012 Emilia earthquake (Italy). *Bull. Earthquake. Eng.* 12 (5), 2333-2365.
- Cattari S., degli Abbati S., Ferretti D., Lagomarsino S., Ottonelli D., Rossi M., Tralli A. (2012). The seismic behaviour of ancient masonry buildings after the earthquake in Emilia (Italy) on May 20th and 29th. *Ingegneria Sismica*.
- Cavalagli N., Kita A., Falco S., Trillo F., Costantini M., Ubertini, F. (2019). Satellite radar interferometry and in-situ measurements for static monitoring of historical monuments: The case of Gubbio Italy. *Remote Sens. Envir.* 235.
- Cecchi R. (2011). Roma Archeologia. Interventi per la tutela e fruizione del patrimonio archeologico, Electa, Milano, Vol. I.
- Cennamo C., Chiaia B.M, D'Angelo S., Ferretti D. (2011). Seismic assessment and rehabilitation of a historical theater based on a macro-element strategy. *International Journal of Architectural Heritage* 5 (3), 264-295.
- Ceravolo R. (2020). Condition assessment, monitoring and preservation of some iconic concrete structures of the 20th century. In: *Iabse Symposium Wroclaw 2020 - Synergy of Culture and Civil Engineering – History and Challenges*, 59–82.
- Ceravolo R., De Marinis A., Pecorelli M.L., Zanotti Fragonara L. (2017). Monitoring of masonry historical constructions: 10 years of static monitoring of the world's largest oval dome, *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 24, no. 10, e1988, doi:10.1002/stc.1988.
- Ceravolo R., Coletta G., Miraglia G., Palma F. (2021). Statistical correlation between environmental time series and data from long-term monitoring of buildings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 152, 107460, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107460.

- Cescatti E., Salzano P., Casapulla C., Ceroni F., da Porto F., Prota A. (2019). Damages to masonry churches after 2016–2017 Central Italy seismic sequence and definition of fragility curves. *Bulletin of Earthquake Engineering*, doi:10.1007/s10518-019-00729-7.
- Chen F., Lasaponara R., Masini, N. (2017) An overview of satellite synthetic aperture radar remote sensing in archaeology: from site detection to monitoring. *J. Cult. Herit.*, 23, 5–11.
- Chen, F., Wu, Y., Zhang, Y., Parcharidis, I., Ma, P., Xiao, R., Xu, J., Zhou, W., Tang, P. Fomelis, M. (2017) Surface Motion and Structural Instability Monitoring of Ming Dynasty City Walls by Two-Step Tomo-PSInSAR Approach in Nanjing City, China. *Remote Sens.*, 9, 371. <https://doi.org/10.3390/rs9040371>.
- Cigna F., Tapete D., Casagli N. (2012). Semi-automated extraction of deviation indexes (di) from satellite persistent scatterers time series: tests on sedimentary volcanism and tectonically-induced motions. *Nonlinear Processes in Geophysics* 19 (6), 643–55.
- Cigna F., Lasaponara R., Masini N., Milillo P., Tapete, D. (2014) Persistent scatterer interferometry processing of COSMO-SkyMed Stripmap Himage time series to depict deformation of the historic centre of Rome, Italy. *Remote Sensing*, 6(12), 12593-12618. doi:10.3390/rs61212593
- Coccimiglio S., Coletta G., Lenticchia E., Miraglia G., Ceravolo R. (2022). Combining satellite geophysical data with continuous on-site measurements for monitoring the dynamic parameters of civil structures. *Scientific Reports*, 12(1), 2275 doi: 10.1038/s41598-022-06284-7.
- Coisson E., Ferretti D., Lenticchia E. (2017). Analysis of damage mechanisms suffered by Italian fortified buildings hit by earthquakes in the last 40 years. *Bull. Earthquake Eng.*, 15 (12), 5139–5166.
- Cominelli S. (2014). *Comportamento delle murature storiche al collasso: meccanismi di rottura, effetti del confinamento e fenomeni reologici*. Editor: Aracne. ISBN: 978-88-548-7004-8
- Curti, E., S. Podestà, and L. Scandolo. (2012). Simplified mechanical model for the seismic vulnerability evaluation of belfries. *International Journal of Architectural Heritage*. 6 (6),605–25. doi:10.1080/15583058.2011.594932.
- Cuzzoni M. (2016). *Restauro strutturale dei campanili: manuale pratico per la manutenzione, il consolidamento e il ripristino*. Dario Flaccovio editore. ISBN: 978-88-579-0603-4.
- D'Agostino S., Cairoli F. Giuliani, Conforto M.L., Guidoboni E. (2009). *Raccomandazioni per la redazione di progetti e l'esecuzione di interventi per la conservazione del costruito archeologico*. Napoli: Cuzzolin Editore.
- Diaferio M., Foti D., Potenza F. (2018). Prediction of the fundamental frequencies and modal shapes of historic masonry towers by empirical equations based on experimental data. *Engineering Structures*, 156, 433–42.
- Direttiva (2011). *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008*, Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011 (pubblicata nella G.U. n. 47 del 26/02/2011 - suppl. ord. n. 54).
- Doglioni F, Moretti A., Petrini V., Angeletti P. (1994). *Le chiese e il terremoto. Dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro. Verso una politica di prevenzione*. Lint Editoriale Associati, Trieste, Italy.
- Duro J., Inglada, J., Closa, J., Adam, N., Arnaud, A. (2003) High resolution differential interferometry using times series of ERS and Envisat SAR data; FRINGE Workshop: Frascati, Italy.
- Ferretti D., Coisson E., Lenticchia E. (2018). Seismic damage on merlons in masonry fortified buildings: A parametric analysis for overturning mechanism. *Engineering Structures*. 177, 117-132.
- Ferretti D., Bažant Z.P. (2006). Stability of ancient masonry towers: moisture diffusion, carbonation and size effect. *Cement and Concrete Research*, 36 (7), 1379–88.
- Fiorani D. (1996). L'invecchiamento e il degrado, in Carbonara G., *Trattato del Restauro Architettonico*, vol.2, Torino, UTET, 297-409.

- Formisano A., Florio G., Landolfo R., Mazzolani F.M. (2015). Numerical calibration of an easy method for seismic behaviour assessment on large scale of masonry building aggregates. *Advances in Engineering Software*, 80, 116–38.
- Formisano A., Di Feo P., Grippa M. R., Florio G. (2010). L'Aquila earthquake: a survey in the historical centre of Castelvetro Subequo, in *COST ACTION C26: Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events - Proceedings of the Final Conference (Naples)*, 371–376.
- Galli P.A.C., Giocoli A., Naso J.A., Piscitelli S., Rizzo E., Capini S., Scaroina L. (2010). Faulting of the Roman aqueduct of Venafrum (Southern Italy): methods of investigation, results, and seismotectonic implications. in Sintubin, M., Stewart, I.S., Niemi, T.M., and Altunel, E., eds., *Ancient Earthquakes*. Geological Society of America Special Paper 471, 233–42, [https://doi.org/10.1130/2010.2471\(19\)](https://doi.org/10.1130/2010.2471(19)).
- Garro, M. 1962. The Sanctuary of Vicoforte: strengthening and rehabilitation works.
- Lagomarsino S., Podestà S. (2004). Seismic vulnerability of ancient churches: ii. statistical analysis of surveyed data and methods for risk analysis. *Earthquake Spectra*, 20 (2), 395–412.
- Lasaponara, R. & Masini, N. (2013). Satellite synthetic aperture radar in archaeology and cultural landscape: An overview. *Archaeological Prospection*, 20 (2), 71-78
- Lenticchia E., Ceravolo R., Antonaci P. (2018). Sensor placement strategies for the seismic monitoring of complex vaulted structures of the modern architectural heritage. *Shock and Vibration*, 2018, Article ID 3739690 [doi:10.1155/2018/3739690](https://doi.org/10.1155/2018/3739690)
- Lenticchia E., Miraglia G., Quattrone A., Ceravolo R. (2021). Condition Assessment of an Early Thin Reinforced Concrete Vaulted System. *International Journal of Architectural Heritage* <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1922784>.
- Leoni, G., Spizzichino, D., Marcelli, M., Carta, C., 2020. Il monitoraggio satellitare nelle aree archeologiche: il caso delle Mura Aureliane di Roma, in: *Monitoraggio e Manutenzione Delle Aree Archeologiche Cambiamenti Climatici, Dissesto Idrogeologico, Degrado Chimico-Ambientale*. Presented at the convegno internazionale di studi sulla tutela del patrimonio culturale, “l'erma” di Bretschneider, Roma.
- Levi F., Chiorino M.A. (2004). Concrete in Italy, part i: technique and architecture. *Concrete International*, 26 (9), 55–61.
- López-Patiño G., Adam J.M., Verdejo Gimeno P., Milani G. (2017). Causes of damage to industrial brick masonry chimneys. *Engineering Failure Analysis*, 74, 188–201.
- Luo L., Wang X., Guo H., Lasaponara R., ... Yao, Y. (2019). Airborne and spaceborne remote sensing for archaeological and cultural heritage applications: a review of the century (1907–2017). *Remote Sensing of Environment* 237, 111280.
- Markiet V., Matti M. (2020). Estimation of boreal forest floor reflectance from airborne hyperspectral data of coniferous forests. *Remote Sensing of Environment*. 237, 112018.
- Mastrodicasa S. (1999). *Dissesti statici delle strutture murarie*, Hoepli Editore.
- MiBACT (2015) Direttiva 23 aprile 2015: Aggiornamento della direttiva 12 dicembre 2013, relativa alle Procedure per la gestione delle attività di messa in sicurezza e salvaguardia del patrimonio culturale in caso di emergenze derivanti da calamità naturali. G.U. no. 169, 23/07/2015
- Milano L., Mannella A., Morisi C., Martinelli A. (2008). Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi. Allegato alle linee guida per la riparazione e il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni. DoppiaVoce Edizioni, ReLuis.
- Minghini F., Milani G., Tralli A. (2014). Seismic risk assessment of a 50 m high masonry chimney using advanced analysis techniques. *Engineering Structures*, 69, 255–70.

- MIT 2018. Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 17/1/2018, GU Serie Generale n.42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8.
- Moise C., Dana Negula I., Mihalache C.E., Lazar A.M., Dedulescu A.L., Rustoiu G.T., Inel I.C., Badea A. (2021). Remote sensing for cultural heritage assessment and monitoring: the case study of Alba Iulia Sustainability 13(3), 1406. doi:10.3390/su13031406
- Nazioni Unite, 2015. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. 21 October 2015. <https://unric.org/it/agenda-2030/>
- Negula I. D., Sofronie R., Virsta A., Badea A. (2015). Earth observation for the world cultural and natural heritage, Agriculture and Agricultural Science Procedia, 6 438-445, doi:10.1016/j.aaspro.2015.08.114.
- Norme UNI 11182. Beni culturali. Materiali lapidei naturali ed artificiali. Descrizione della forma di alterazione – Termini e definizioni. 13 aprile 2006.
- Papa S., Di Pasquale G., Podestà S., Brignola A. (2011). Manuale per la compilazione delle schede per il rilievo del danno ai beni culturali, Chiese, Modello A-DC, Presidenza del Consiglio dei Ministri – DPC.
- Parcharidis I., Fomelis M., Pavlopoulos K., Kourkoulis P. (2010) Ground deformation monitoring in cultural heritage areas by time series SAR interferometry: The case of ancient Olympia site (Western Greece). In Proceedings of the 2010 Fringe Conference, ESA, Noordwijk, The Netherlands, 4-7 May.
- Parlamento Europeo, 2007. La protezione del patrimonio culturale dalle calamità naturali. European Parliament Directorate-General for Internal Policies of the Union. IP/B/ CULT/IC/2006_163 Feb 2007, 120. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/it/document.html?reference=IPOL-CULT_ET\(2007\)369029](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/it/document.html?reference=IPOL-CULT_ET(2007)369029)
- Passchier C.W., Wipflinger G., Sürmelindi G., Kessener P., Güngör T. (2011). Roman aqueducts as indicators of historically active faults in the Mediterranean basin. In Earthquake Geology (Proc. 2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics), Archaeology and Engineering Corinth, Greece.
- Penna A., Calderini C., Sorrentino L., Carocci C.F., Cescatti E., Sisti R., Borri A., Modena C., Prota A. (2019). Damage to Churches in the 2016 Central Italy Earthquakes. Bulletin of Earthquake Engineering, 17 (10). 5763–90.
- Qiu Y., Zhou C., Siha A. 2020. Correlation between Earthquake Intensity Parameters and Damage Indices of High-Rise RC Chimneys. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 137: 106282.
- Ruocci G. (2010). Application of the SHM methodologies to the protection of masonry arch bridges from scour. PhD Thesis. Torino.
- Selvakumaran S., Plank S., Geiß C., Rossi C., Middleton C. (2018). Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 73, 463-470, doi:10.1016/j.jag.2018.07.004.
- Sepe V., Speranza E., Viskovic A. (2008). A method for large-scale vulnerability assessment of historic towers. Structural Control and Health Monitoring 15 (3): 389-415.
- Shakya M., Varum H., Vicente R., Costa A. (2016). Empirical formulation for estimating the fundamental frequency of slender masonry structures. International Journal of Architectural Heritage 10 (1): 55–66.
- Sisti R., Di Ludovico M., Borri A., Prota A. (2019). Damage assessment and the effectiveness of prevention: the response of ordinary unreinforced masonry buildings in Norcia during the central Italy 2016–2017 seismic sequence. Bulletin of Earthquake Engineering. 17 (10), 5609–29.
- Tang P., Chen F., Zhu X., Zhou W. (2016) Monitoring cultural heritage sites with advanced multi-temporal InSAR technique: the case study of the Summer Palace. Remote Sensing, 8(5):432. doi:10.3390/rs8050432
- Tapete D., Cigna F. (2012). Site-specific analysis of deformation patterns on archaeological heritage by satellite radar interferometry, in 20th Int. Materials Research Congress, Symposium 8 Cultural Heritage and Archaeological Issues in Materials Science, vol. 1374 of MRS Proceedings, Cambridge University Press.

- Tapete D., Cigna, F. (2017). InSAR data for geohazard assessment in UNESCO World Heritage sites: state-of-the-art and perspectives in the Copernicus era, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63, 24-32, doi:10.1016/j.jag.2017.07.007.
- Tapete D., Cigna F. (2018) Appraisal of Opportunities and Perspectives for the Systematic Condition Assessment of Heritage Sites with Copernicus Sentinel-2 High-Resolution Multispectral Imagery. *Remote Sensing*, 10, 561, doi:10.3390/rs10040561.
- Tapete D., Cigna F. (2012). Rapid mapping and deformation analysis over cultural heritage and rural sites based on persistent scatterer interferometry. *International Journal of Geophysics*, 2012, 618609. doi:10.1155/2012/618609
- Tapete D., Fanti R., Cecchi R., Petrangeli P., Casagli, N. (2012) Satellite radar interferometry for monitoring and early-stage warning of structural instability in archaeological sites, *J. Geophys. Eng.* 9 10–25.
- Tapete D., Casagli N. (2013). Testing computational methods to identify deformation trends in RADARSAT persistent scatterers time series for structural assessment of archaeological heritage. In *International Conference on Computational Science and Its Applications*, 693–707.
- Tapete D., Morelli S., Fanti R., Nicola C. (2015). Localising deformation along the elevation of linear structures: An experiment with space-borne InSAR and RTK GPS on the Roman Aqueducts in Rome, *Applied Geography*, Volume 58, Pages 65-83, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.009>
- Tedesco A. (2017) Application of FRO materials on architectural elements in historical masonry. VIIIth Conference Diagnosis, Conservation and Valorization of Cultural Heritage, 14/15 December 2017.
- Tomás R., García-Barba J., Cano M., Sanabria M.P., Ivorra S., Duro J., Herrera G. (2012). Subsidence damage assessment of a gothic church using differential interferometry and field data. *Struct Health Monit* 11(6):751–762.
- Valente M., Milani G. (2019) Damage survey, simplified assessment, and advanced seismic analyses of two masonry churches after the 2012 Emilia earthquake, *International Journal of Architectural Heritage*. 13(6), 901-924, DOI: 10.1080/15583058.2018.1492646
- Volant P., Levret A., Carbon D., Scotti O., Combescure D., Verdel T., Piant A., Laurent P. (2009). An archaeo-seismological study of the Nîmes roman aqueduct, France: indirect evidence for an M> 6 seismic event? *Natural Hazards* 49 (1): 53–77.
- Wang L., Fan X. (2019). Failure cases of high chimneys: a review. *Engineering Failure Analysis* 105: 1107–1117.
- Werner C., Wegmüller U., Strozzi T., Wiesmann A. (2003). Interferometric point target analysis for deformation mapping. *Proceedings of IGARSS '03*, vol. 7, pp. 4362–4364.
- Zanotti Fragonara L., Boscato G., Ceravolo R., Russo S., Ientile S., Pecorelli M.L., Quattrone A. (2017). Dynamic investigation on the Mirandola bell tower in post-earthquake scenarios. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15 (1), 313–37.
- Zeni G., Bonano M., Casu F., Manunta M., Manzo M., Marsella M., Pepe A., Lanari R. (2011) Long-term deformation analysis of historical buildings through the advanced SBAS-DInSAR technique: the case study of the city of Rome, Italy, *Journal of Geophysics and Engineering*, Volume 8, Issue 3, P S1–S12, doi:10.1088/1742-2132/8/3/S01.
- Zhou W., Chen F., Guo H. (2015). Differential radar interferometry for structural and ground deformation monitoring: a new tool for the conservation and sustainability of cultural heritage sites. *Sustainability*. 7(2), 1712-1729. doi:10.3390/su7021712.

9 UTILIZZO DELL'INTERFEROMETRIA SATELLITARE PER IL MONITORAGGIO STRUTTURALE – CONSIDERAZIONI GENERALI

9.1 PREMESSA

Come discusso nei capitoli precedenti, l'interferometria satellitare può rappresentare un valido strumento per l'acquisizione di informazioni relative agli spostamenti subiti nel tempo dal terreno e, in determinate condizioni, anche da strutture e infrastrutture, al fine di individuare precocemente eventuali comportamenti anomali. Tuttavia, per un uso corretto del SAR satellitare ai fini del monitoraggio strutturale, è opportuno definirne i limiti di utilizzo ed individuare strategie e tecniche integrative di misurazione delle grandezze necessarie per un'efficace valutazione della sicurezza delle strutture.

In questo capitolo vengono sinteticamente commentati i principali limiti e le potenzialità dell'utilizzo dell'interferometria satellitare per il monitoraggio strutturale. Successivamente vengono descritte alcune tra le tecniche di monitoraggio on-site che si prestano ad essere utilizzate congiuntamente alle tecniche di interferometria satellitare.

9.2 INTERFEROMETRIA SATELLITARE PER IL MONITORAGGIO STRUTTURALE: LIMITI E POTENZIALITÀ

Le problematiche relative all'utilizzo dell'interferometria satellitare riguardano diversi aspetti connessi sia alle modalità operative di funzionamento dei sistemi satellitari e di trattamento ed elaborazione del dato SAR, sia alla specificità di comportamento delle diverse tipologie di opere strutturali.

Un primo aspetto riguarda l'elevato intervallo di tempo tra i passaggi satellitari, dell'ordine mediamente di 2 settimane, che permette quindi di monitorare efficacemente solamente fenomeni deformativi lenti caratterizzati da un periodo ben superiore a quello di campionamento.

Un ulteriore aspetto è legato al fatto che il dato di spostamento lungo la LOS deriva da un trattamento della misura effettuata dal radar sintetico e dunque è subordinato alle limitazioni insite nella procedura adottata, che dovranno essere verificate per stabilire se il dato è realmente sfruttabile ai fini strutturali. Il data-set di spostamenti lungo la LOS presenta, inoltre, una localizzazione, caratterizzata dalle precisioni rappresentate in Tabella 2-3, per il dato COSMO-SkyMed, che può variare in dipendenza delle caratteristiche dei sistemi SAR considerati. Questa condizione è ben diversa da quella dei più classici monitoraggi on-site, nei quali il punto di acquisizione su cui è installato un sensore è noto e rimane stabile nel tempo. Infatti, la condizione per cui due geometrie di acquisizione satellitare (ad esempio ricavate dall'orbita ascendente e discendente dello stesso satellite) identifichino lo stesso punto di misura risulta verificata raramente. Per tale motivo, nella maggioranza dei casi, per poter effettuare la composizione del moto è necessario procedere, a patto che sussistano le condizioni, a un ricampionamento spaziale ed eventualmente temporale dei dati ottenuti nelle due geometrie di acquisizione.

Particolarmente delicato è anche l'aspetto legato alla diversa frequenza di rivisitazione dei satelliti su una medesima area, che unitamente alla non regolarità temporale delle acquisizioni effettuate, almeno per quanto riguarda la costellazione COSMO SkyMed, determina un tempo di campionamento non uniforme e dunque la necessità di ricorrere a tecniche di ricampionamento e interpolazione temporale per consentire la rielaborazione dei dati. Si pensi ad esempio a una semplice operazione di gradiente (temporale) numerico per ottenere i profili di velocità lungo la LOS. Un divario eccessivo fra due dati consecutivi potrebbe comportare, ad esempio, una sottostima della velocità in un certo *range* temporale, anche se non necessariamente della velocità media su un arco temporale ampio. È opportuno evidenziare, inoltre, che il ricampionamento temporale può essere effettuato in maniera corretta su strutture le cui eventuali deformazioni cicliche siano caratterizzate, nel rispetto del teorema di Nyquist, da frequenze inferiori a quelle di rivisitazione dei satelliti e da ampiezze compatibili con la lunghezza d'onda utilizzata dal sensore satellitare, in assenza di informazioni ulteriori (ad esempio derivanti da un modello).

È fondamentale tener presente, inoltre, che le operazioni di interpolazione spaziale forniscono risultati effettivamente rappresentativi degli spostamenti reali solo quando la tipologia del fenomeno deformativo osservato è caratterizzata da una distribuzione spaziale di spostamenti correlati nello spazio. Un esempio tipico di questa situazione è il caso della deformazione di un impalcato da ponte per effetto di fenomeni lenti come il ritiro e il fluage nelle strutture realizzate con materiali reologici, ovvero come le deformazioni termiche (cfr. 10.6). Gli

spostamenti di diversi punti del ponte potrebbero non essere correlati al processo deformativo dei punti circostanti. In questi casi potrebbe risultare, inoltre, non propriamente corretta la procedura di combinazione dei due dataset ascendenti e discendenti per ricavare lo spostamento vettoriale in un punto per effetto della decorrelazione dei dati delle due orbite.

Per le strutture caratterizzate da una particolare deformabilità sotto l'effetto dei carichi variabili o delle variazioni dei parametri ambientali (temperatura, umidità ecc.), un ulteriore problema è rappresentato dalla limitazione dei massimi spostamenti relativi rilevabili tra un passaggio del satellite e il successivo. Tale limite è legato alla lunghezza d'onda del segnale emesso dal sensore satellitare. È importante tenere presente poi che, nel caso gli spostamenti relativi tra acquisizioni successive siano troppo elevati, superando in particolare la lunghezza d'onda del segnale utilizzato, eq. (8), si possa incorrere in problemi di ambiguità della misura e conseguente decorrelazione, tipico caso dei fenomeni a cinematica veloce. Il superamento di tale limite può generare problemi di ambiguità della misura con conseguente decorrelazione dei dati (aspetto tipico dei fenomeni a cinematica veloce), in assenza di informazioni ulteriori (ad esempio derivanti da un modello).

Gli effetti della deformazione termica, inoltre, devono essere opportunamente considerati anche nelle operazioni di composizione vettoriale dei dataset appartenenti alle due orbite ascendente e discendente. Tale operazione, infatti, potrebbe risultare non formalmente corretta nel caso in cui la diversa temperatura ambientale, in corrispondenza dei passaggi dei satelliti lungo le orbite ascendenti (4:45 UTC circa) e discendenti (17:09 UTC circa), determini spostamenti dei PS sulla struttura differenti per effetto del delta termico.

Ultimo aspetto, non meno importante, è legato alle difficoltà intrinseche di molti degli attuali sistemi satellitari ad acquisire informazioni lungo direzioni prossime alla direttrice N-S, come evidenziato nei capitoli precedenti, poiché i satelliti seguono rotte quasi-polari. In futuro, l'integrazione di dati provenienti da differenti sistemi di costellazioni di satelliti potrebbe però consentire di superare questa limitazione.

L'elenco, non esaustivo, delle problematiche evidenziate in questo paragrafo vuole dunque rappresentare la necessità di un'attenta valutazione preventiva sull'opportunità/possibilità di utilizzo delle tecniche satellitari per il monitoraggio di strutture, in particolare delle strutture particolarmente deformabili. Pertanto, considerato che in alcuni casi particolarmente sfavorevoli l'insorgere di fenomeni patologici su strutture o infrastrutture potrebbe avvenire anche per ampiezze di spostamento inferiori all'errore associato alla misura satellitare, diventa di fondamentale importanza poter prevedere misure e sistemi di monitoraggio on-site quando il monitoraggio satellitare indica che gli spostamenti rilevati sono tali da poter potenzialmente causare danni alle strutture.

9.3 SISTEMI DI MONITORAGGIO ON-SITE

Il monitoraggio strutturale, inizialmente proposto quale complemento alla semplice ispezione visiva periodica per strutture o infrastrutture, oggi rappresenta una delle strategie di controllo più efficaci e utilizzate per individuare comportamenti strutturali anomali dovuti al verificarsi di eventi critici o al degrado/danneggiamento dei materiali costituenti le strutture portanti.

Un sistema di monitoraggio strutturale può essere implementato per funzionare sia in modo continuo che in modo discreto, ossia con misure ad intervalli di tempo programmati o con misure spot a valle del verificarsi di eventi critici quali, ad esempio, terremoti, esplosioni, etc. In entrambi i casi, i dati possono essere utilizzati anche al fine della gestione di strutture e infrastrutture, della pianificazione e prioritizzazione di eventuali interventi di recupero e valutazione dell'impatto economico dovuto alle possibili interruzioni di servizio.

Il monitoraggio strutturale di tipo on-site, tuttavia, è in grado di fornire informazioni sui parametri geometrici, dinamici e meccanici significativi ed eventualmente sullo stato di salute della singola struttura e non si presta ad estrapolazioni a scala territoriale così come a considerare tempi passati, cosa, invece, possibile tramite il monitoraggio da satellite. La possibilità, dunque, di integrare le informazioni ottenute da sistemi on-site con sistemi basati sull'interferometria satellitare può fornire informazioni affidabili e robuste e consentire di superare così i limiti intrinseci delle due tecniche utilizzate separatamente.

Oltre che per l'individuazione dei danni a valle di un evento critico, i sistemi di monitoraggio, in particolare quelli di tipo permanente, possono essere utilizzati congiuntamente a quelli di monitoraggio sismico del territorio per la

realizzazione di sistemi di allarme sismico precoce (*early warning*) al fine di incrementare la protezione sismica di beni e persone.

Il monitoraggio strutturale, in particolare quello di tipo dinamico, consente inoltre di ricavare i parametri modali da utilizzare per la calibrazione dei modelli numerici (*model updating*), la cui variazione nel tempo può essere direttamente attribuibile all'insorgenza di danneggiamenti nella struttura.

Con riferimento ai sistemi di monitoraggio on-site, il tipo e la densità della strumentazione che costituisce un sistema di monitoraggio strutturale dipendono dall'obiettivo del sistema stesso e dal dettaglio con cui si vuole indagare il comportamento della struttura nonché dell'eventuale interazione dinamica con il terreno di fondazione. Nel corso degli ultimi decenni sono state sviluppate molte ricerche nel settore della valutazione del danno sugli edifici, utilizzando tecniche non distruttive (*Non-destructive Damage Evaluation: NDE*), basate sul rilevamento di variazioni del comportamento dinamico del sistema. I metodi NDE possono essere classificati in quattro diversi livelli (Stubbs et al., 2000), in funzione del tipo di informazioni che esse consentono di ottenere (Rytter, 1993). Il primo livello fornisce informazioni speditive sulla possibilità che sull'edificio si sia verificato un danno, il quarto livello, oltre a dare informazioni sul danno e sulla posizione, fornisce anche indicazioni circa l'impatto che il possibile danneggiamento ha avuto sulla struttura.

Nei paragrafi seguenti, senza alcuna pretesa di esaustività, si descrivono alcune tecniche di monitoraggio on-site caratterizzate da un buon livello di complementarità con le tecniche di interferometria satellitare.

9.3.1 Monitoraggio dinamico o vibrazionale

Il monitoraggio dinamico, basandosi sulla misurazione dei parametri cinematici (accelerazioni, velocità e spostamenti), ha come obiettivo principale la valutazione della risposta strutturale in termini di parametri modali (frequenze e modi di vibrare) al fine di individuarne eventuali variazioni nel tempo a valle di eventi critici. L'architettura base di un sistema di monitoraggio può essere costituita da una rete di sensori velocimetrici e/o accelerometrici, da un'unità di acquisizione di dati che converte il segnale da analogico a digitale e da un sistema di stoccaggio dei dati. Nelle recenti applicazioni, il sistema di monitoraggio può essere anche dotato di unità per l'analisi dei dati al fine di operare la trasmissione di risultati sintetici (Figura 9-1).

Una struttura monitorata può diventare un sistema 'intelligente', in grado di fornire una sorta di autodiagnosi del proprio stato di salute. Lo scopo di un tale sistema non è propriamente quello di fornire una valutazione della sicurezza della struttura, intesa come rapporto tra capacità e domanda, ma è quello di valutare in continuo i parametri ritenuti significativi (ad esempio, i parametri modali) e rappresentativi della risposta strutturale al fine di individuarne, in modo automatico e/o semi-automatico, eventuali variazioni distinguendo quelle fisiologiche (dovute, ad esempio, agli effetti di variazioni termiche sulla struttura) da quelle patologiche, correlate a fenomeni di degrado e/o di danneggiamento strutturale.

Le tecniche di analisi dei segnali oggi disponibili consentono di analizzare sia la risposta strutturale in regime stazionario (lineare) che in regime non stazionario (lineare e non lineare). Le grandezze modali rivestono un ruolo strategico per il monitoraggio dello stato di salute di una struttura poiché sono parametri globali intrinseci del sistema che non dipendono dall'input cui il sistema stesso è soggetto in un determinato intervallo temporale. Pertanto, trascurando le variazioni fisiologiche dovute alle oscillazioni di temperatura (riconoscibili poiché correlate con la temperatura misurata e di conseguenza eliminabili in una fase di post-processing dei dati), una variazione delle caratteristiche modali può essere sintomatica di un meccanismo patologico che si sta sviluppando sulla struttura monitorata.

I metodi per la determinazione delle caratteristiche modali, quando applicati utilizzando dati vibrazionali della struttura nelle sue condizioni di servizio e quindi senza utilizzare una fonte di eccitazione artificiale nota, sono detti "*ambient vibration testing*", o più comunemente Operational Modal Analysis (OMA) o metodi di analisi modale output-only. Inizialmente proposti in ambito meccanico, questi metodi hanno trovato grande sviluppo nel campo delle strutture civili (Rainieri e Fabbrocino, 2014).

Entrando maggiormente nel merito delle varie tecniche di analisi dei dati per la stima delle frequenze proprie di oscillazione, delle caratteristiche dissipative e delle deformate modali, si possono distinguere tecniche che operano nel dominio del tempo, nel dominio delle frequenze e nel dominio tempo-frequenza.

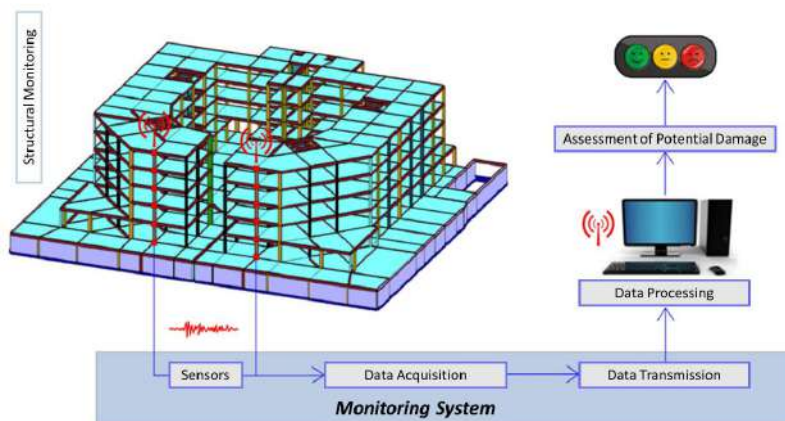


Figura 9-1 Schema generale di un sistema di monitoraggio strutturale

Per quanto riguarda le tecniche di analisi nel dominio del tempo, tra le più utilizzate troviamo quelle basate su modelli autoregressivi del tipo ARX, ARMA, ARMAX (Ljung, 1999), i metodi SSI (Stochastic Subspace Identification) (Peeters and De Roeck, 1999) e le tecniche basate su approcci non parametrici tipo Empirical Mode Decomposition (EMD) (Huang et al., 1998), Variational Mode Decomposition (VMD) (Boyd et al., 2011). Le tecniche autoregressive e SSI consentono di stimare i parametri della struttura monitorata utilizzando un approccio di tipo statistico/stocastico, calibrando un modello numerico direttamente con i dati nel tempo acquisiti, mentre l'EMD e la VMD forniscono una decomposizione del segnale registrato in "funzioni oscillatorie", simili ad armoniche, dalle quali stimare le caratteristiche intrinseche della struttura monitorata.

Per quanto riguarda le tecniche di analisi nel dominio delle frequenze, le più utilizzate per lo studio della risposta sperimentale di strutture a comportamento stazionario, la maggior parte di esse si basa sull'analisi di Fourier (Rudin, 1970), operante nel campo complesso, da cui sono poi derivate numerose altre tecniche quali, ad esempio, quelle basate sulla determinazione delle funzioni di trasferimento (Girod et al., 2001), funzione di densità spettrale di potenza (PSD) quali l'Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) (Brincker et al., 2001, Rainieri e Fabbrocino, 2014). Per un approfondimento in merito ai principali algoritmi di identificazione del dominio del tempo e della frequenza si può far riferimento a (Peeters and De Roeck, 1999, 2001; Reynders, 2012).

L'applicazione estensiva delle tecniche di identificazione dinamica finalizzata alla caratterizzazione dello stato di salute di strutture civili richiede robuste e accurate procedure di identificazione dei parametri modali. Le prime analisi e classificazioni sistematiche delle procedure automatiche di identificazione dinamica *output-only* sono piuttosto recenti e indicano una chiara distinzione tra identificazione automatica e tracciamento dei parametri modali. Nel primo caso è sufficiente una singola registrazione per estrarre i parametri modali in assenza di informazioni a-priori sulle proprietà dinamiche della struttura oggetto di indagine (Rainieri e Fabbrocino, 2010). Nel secondo caso, invece, l'osservazione nel tempo dell'evoluzione dei parametri modali della struttura si basa su un insieme di stime di riferimento (Rainieri et al., 2011).

I parametri modali di riferimento possono essere forniti sia da procedure manuali sia da algoritmi automatici di identificazione dinamica. A dispetto della loro minore autonomia, le procedure di tracciamento dei parametri modali risultano vantaggiose rispetto alle procedure di identificazione dinamica automatica per tutte quelle applicazioni che richiedono tempi di risposta ridotti e bassi oneri computazionali. Le tecniche di identificazione dinamica automatica, d'altro canto, sono l'unica opzione possibile quando non sono disponibili stime di riferimento dei parametri modali. L'efficacia delle procedure di identificazione del danno dipende dall'accuratezza delle stime dei parametri modali. Tuttavia, la maggior parte degli algoritmi di identificazione dinamica automatica disponibili mostra limiti comuni che influiscono negativamente sulla qualità delle stime. Le principali cause di inaccuratezza sono legate all'uso di soglie impostate staticamente e di parametri che richiedono una calibrazione preliminare.

Numerosi approcci per l'identificazione dinamica automatica sono attualmente disponibili in letteratura. Alcuni di essi si basano su metodi parametrici (Reynders et al., 2012; Devriendt et al., 2014) mentre altri sono stati sviluppati a partire da metodi di tipo non parametrico (Rainieri e Fabbrocino, 2010; Weijtjens et al., 2014).

L'automazione dei metodi parametrici ha seguito alcune direttrici principali:

- sviluppo di algoritmi di identificazione in grado di produrre diagrammi di stabilizzazione estremamente semplici da interpretare (Weijtjens et al., 2014; Peeters et al., 2004);
- definizione di criteri e parametri funzionali a distinguere i poli fisici da quelli spuri (Reynders e De Roeck, 2008; Verboven et al., 2002);
- sviluppo di metodologie per l'interpretazione automatica dei diagrammi di stabilizzazione (Reynders et al., 2012; Scionti e Lanslots, 2004).
- sviluppo di algoritmi ibridi basati sulla combinazione di fasi computazionali riconducibili a tecniche OMA diverse.

Tra le diverse opzioni disponibili, gli algoritmi ibridi come ARES (Automated modal paRAMeter Extraction System; Rainieri & Fabbrocino, 2015) consentono di superare numerose limitazioni collegate alla gestione diretta dei diagrammi di stabilizzazione, sfruttando i punti di forza dei diversi metodi di identificazione output-only e migliorando le stime dei parametri modali, incluso lo smorzamento.

Tra le tecniche più recenti per monitorare l'evoluzione dei parametri modali di una struttura, si segnalano quelle basate sull'analisi tempo-frequenza, che consentono di stimare tutti i parametri di una struttura monitorata anche quando essa esibisce un comportamento di tipo non lineare. Tra queste tecniche, va sicuramente citata la trasformata di Gabor (Gabor, 1946), che consente di seguire l'evoluzione delle frequenze proprie di un sistema senza, tuttavia, fornire la possibilità di estrarre dai segnali l'evoluzione delle deformate modali. Lo stesso vale per la distribuzione di Wigner-Ville (Bradford et al., 2006) che consente di seguire l'evoluzione delle frequenze della struttura monitorata con una migliore risoluzione rispetto alla trasformata di Gabor. Un notevole passo in avanti è stato fatto con l'introduzione della trasformata Wavelet (Addison, 2002), che, oltre a seguire con una discreta precisione l'evoluzione del comportamento dinamico della struttura monitorata (attraverso un parametro chiamato fattore di scala a cui si correla il valore della frequenza istantanea) consente anche di estrapolare dal segnale l'evoluzione delle deformate modali. Il limite della tecnica consiste nel fatto che il fattore di scala non coincide con la frequenza e pertanto la stima della frequenza istantanea potrebbe essere affetta da errori significativi soprattutto nei sistemi a rapida evoluzione (strutture in fase di danneggiamento). Tra le tecniche più recenti per l'analisi tempo-frequenza troviamo la trasformata di Stockwell (Stockwell et al., 1996) che risulta essere una generalizzazione delle Wavelet e della Trasformata di Fourier e che consente di stimare l'evoluzione delle frequenze proprie della struttura monitorata con elevata precisione, anche per sistemi fortemente non lineari (Figura 9-2). Abbinato a quest'ultimo tipo di trasformata vi è il filtro a banda variabile (Ditommaso et al., 2012) utile ad isolare l'evoluzione del singolo modo di vibrare ottenendo un segnale dal quale è possibile stimare con elevata accuratezza tutti i parametri modali e le loro variazioni istantanee nel tempo (Ditommaso e Ponzo, 2015).

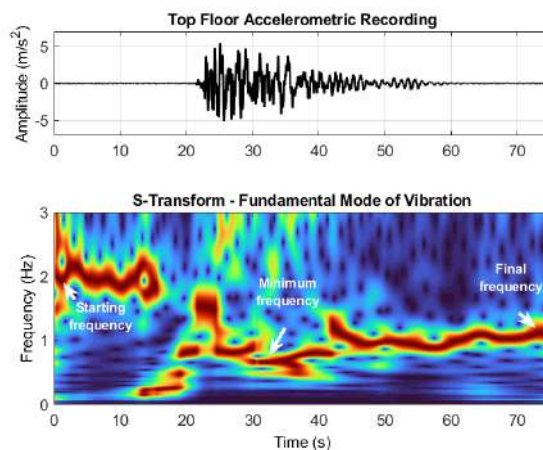


Figura 9-2 Esempio di analisi tempo-frequenza mediante trasformata di Stockwell (Ditommaso et al., 2021)

9.3.2 Monitoraggio strutturale mediante tecniche di GNSS (Global Navigation Satellite System)

Negli ultimi decenni, una delle tecnologie maggiormente utilizzate per il monitoraggio territoriale (con applicazioni anche in campo strutturale) è senza dubbio il rilievo GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Le costellazioni satellitari per la navigazione sono sempre in costante evoluzione. Una delle più conosciute è sicuramente la costellazione satellitare americana GPS (*Global Positioning System*), sviluppata negli anni Settanta e divenuta pienamente operativa nel 1994. La comunità europea, nel 2005, ha lanciato in orbita il primo satellite della costellazione GALILEO che nel 2018 ha raggiunto il numero operativo di 26 satelliti. Inoltre, nel 2013 è stato ammodernato anche il sistema satellitare russo GLONASS. Questi avanzamenti scientifici e tecnologici hanno portato a stimare, secondo studi effettuati dall'istituto europeo GNSS Agency (EGSA), che il numero di dispositivi utilizzati è aumentato di oltre tre volte nel giro dieci anni, passando dai quasi tre miliardi di unità del 2013, fino ad arrivare agli oltre nove miliardi del 2023, ovvero più di un ricevitore per ogni persona.

A trarne beneficio, oltre alle applicazioni di carattere tecnologico su strumenti commerciali come smartphone, smartwatch e navigatori su veicoli stradali, sono state le applicazioni in ambito di rilevamento topografico. La tecnologia GNSS è diventata uno strumento utile e vantaggioso anche per il monitoraggio strutturale, in quanto complementare alle altre differenti tecniche di rilievo, come il rilievo tradizionale con Stazione Totale, la fotogrammetria, il rilievo Lidar con Laser Scanner e in particolar modo con l'interferometria satellitare terrestre. Le tecniche GNSS si basano su tre componenti interagenti: la componente spaziale, costituita da costellazione di satelliti che trasmettono le loro coordinate e i loro dati temporali, la componente terrestre, costituita da stazioni di controllo dedicate che calcolano regolarmente le posizioni dei satelliti, le correzioni di posizioni e le correzioni dell'orologio dei satelliti, nonché la componente utente che richiede un ricevitore GPS in grado di recuperare i dati trasmessi e di utilizzarli per stimare le distanze tra sé e ciascun satellite, note come *pseudorange*.

I livelli di precisione con i quali tali sistemi possono determinare la posizione dei punti dipendono da numerosi elementi, quali la modalità di misura, le caratteristiche del ricevitore, le tecniche di rilievo, il tempo di stationamento del ricevitore, il numero e la configurazione dei satelliti durante la sessione di misura. In generale, con acquisizioni in tempo reale si ottengono determinazioni grossolane con errori di posizionamento valutabili in metri (utilizzati nella navigazione). Nel caso di condizioni favorevoli è possibile, invece, raggiungere precisioni di interesse topografico dell'ordine del centimetro e (a certe condizioni) anche del millimetro (Cannarozzo et al., 2018). Con almeno quattro satelliti in vista, un ricevitore è in grado di stimare una posizione in un quadro globale con una precisione di tipo centimetrica (Manzini et al., 2018).

Attualmente, esistono differenti approcci per il calcolo dei dati GNSS in funzione soprattutto del numero di ricevitori che l'utente decide di utilizzare in fase di acquisizione e calcolo dei dati. Nel caso di un unico ricevitore,

la tecnica utilizzata è il Precise Point Positioning (PPP), ovvero l'approccio non differenziato in cui si ottengono precisioni elevate di rilevamento. Viceversa, quando vengono utilizzati più ricevitori contemporaneamente attraverso un approccio di rete, i dati GNSS sono processati con il più noto approccio differenziato (DGNSS) (Poluzzi, 2016). Allo stesso tempo, questi approcci possono essere associabili a diverse modalità di acquisizione dei dati, che sono sostanzialmente riconducibili a diversi schemi di misurazione che, a loro volta, dipendono dalla durata delle sessioni e dalla dinamica dei ricevitori.

I sensori GNSS sono un ottimo strumento di integrazione con le tecniche DInSAR interferometriche poiché, come queste ultime, possono essere utilizzate in tutte le condizioni luminose e atmosferiche. Inoltre, possono aggiornare continuamente la posizione 3D dei punti a terra senza la necessità di far riferimento ad altri punti base (come richiesto invece nell'interferometria satellitare).

9.3.3 Monitoraggio strutturale con fibre ottiche

Il monitoraggio strutturale attraverso sensori a fibre ottiche, noto anche come *Optical Fibre Strain Monitoring System*, è un sistema che utilizza le proprietà della luce per le misurazioni di spostamenti e deformazioni delle strutture. I FOS (*Fiber Optic Sensors*) possono operare in ambienti elettricamente rumorosi e possono fornire dati di rilevamento non alterati anche su lunghe distanze senza contaminazione da EMI (*ElectroMagnetic Interference*). Inoltre, sono non conduttivi e adatti all'inserimento con un impatto minimo sulla struttura ospitante.

Oggigiorno le applicazioni su strutture civili sono in notevole aumento, anche perché i sensori godono di ottime proprietà di durabilità, essendo composti da materiali molto durevoli (ad es. silice) resistenti alla corrosione, alle elevate temperature e in grado di sopportare elevati allungamenti (fino al 5%). Le installazioni dei sensori possono essere effettuate su superfici complesse o su aree difficilmente raggiungibili (es., intorno alla circonferenza di un oggetto rotondo, lungo gli angoli acuti o attraverso le saldature). Ciò rende l'uso delle fibre ottiche molto interessante soprattutto per opere complesse quali edifici, ponti e viadotti (López-Higuera et al., 2011). Le tecnologie ottiche, grazie anche al rapido sviluppo dell'industria delle comunicazioni, sono già competitive dal punto di vista economico e i loro prezzi sono destinati a diminuire favorendo la diffusione dei FOS potendo competere, in alcuni campi, con l'uso di sensori convenzionali.

La classificazione dei sensori ottici può essere generalmente effettuata in funzione dell'estensione del tratto attivo, distinguendo quindi sensori locali e distribuiti. Tra i primi, i più diffusi sono basati sul reticolo di Bragg (FBG). Si tratta di sensori di deformazione, sensibili anche alle variazioni di temperatura, che possono essere installati direttamente sulle strutture da monitorare oppure all'interno di opportuni strumenti di misura (long gauge strain sensors, celle di carico, sensori di pressione, etc.). Il principio di funzionamento dei reticoli di Bragg consente di installare più sensori su di una stessa fibra a distanze notevoli, in numero dipendente dalle caratteristiche dell'interrogatore utilizzato. Altri sensori, di più modesta diffusione, impiegano interferometri di Fabry-Pérot o di Mach-Zehnder. Con riferimento ai sensori distribuiti è possibile distinguere strumenti che impiegano Raman o Rayleigh scattering, che consentono misure di deformazione su tratti di fibra di qualche centinaio di metri, con misure anche dinamiche, in funzione delle capacità dell'interrogatore, e strumenti che si basano sul principio del Brillouin scattering che permettono misure statiche di deformazione su tratti di fibra lunghi anche decine di chilometri (Tiang Wu. et al., 2020). Anche questi sensori sono sensibili alle variazioni di temperatura che deve essere quindi sempre misurata insieme alla deformazione. Alcune applicazioni delle tecnologie basate su fibre ottiche per il monitoraggio di opere civili sono descritte in Casas e Cruz, 2003, Reynnders et al. 2007, Habel e Krebber, 2011, Minardo et al. 2021, Jayawickrema et al. 2022.

9.3.4 Monitoraggio strutturale con radar terrestri

L'interferometria radar terrestre è una tecnica di telerilevamento attraverso la quale è possibile rilevare contemporaneamente spostamenti di numerosi punti di strutture, ponti o altri elementi artificiali e naturali. Le misure sono caratterizzate da elevate frequenze di campionamento dei dati, consentendo di eseguire contemporaneamente analisi statiche e dinamiche (Brunetti e Mazzanti, 2017). Le tecniche di interferometria terrestre possono essere sia di tipo TInRAR (Terrestrial Interferometric Real Aperture Radar) che TInSAR

(Terrestrial Interferometric Synthetic Aperture Radar), che si distinguono per le capacità delle antenne di generare immagini ad apertura reale o sintetica.

Le misure vengono eseguite a distanza, sfruttando la riflettività delle microonde degli oggetti nello scenario irradiato, ottenendo, in tal modo, vantaggi di tipo economico, operativo e in termini di sicurezza, grazie al fatto che non è più strettamente necessaria l'installazione di ulteriori sensori o riflettori sulla struttura (Castagnetti et al, 2019). In dettaglio, il TInRAR consiste in un radar interferometrico coerente ad apertura reale, munito di una o più antenne emittenti e riceventi che permette il calcolo degli spostamenti lungo la linea di vista (LOS) dello strumento-scena, confrontando le informazioni di fase dell'onda elettromagnetica emessa e riflessa a diversi intervalli di tempo.

Le strutture che si prestano meglio alla determinazione degli spostamenti tramite tecnica TInRAR sono quelle con sviluppo prevalentemente monodimensionale verticale (come torri, ciminiere, grattacieli) o orizzontale (come ponti, viadotti, passerelle), Figura 9-3, rispetto a strutture con estensione prevalentemente planimetrica, sulle quali si potrebbero riscontrare problemi di ambiguità per oggetti corrispondenti a settori diversi della struttura che, essendo situati a distanze uguali dal radar, ricadono nella stessa cella di risoluzione e quindi non sono distinguibili. Data la possibilità di effettuare misure di spostamento esclusivamente lungo la linea di vista strumentale, è raccomandabile individuare almeno due (o più) punti di misura da cui si abbia una visione prospettica diversa della struttura in esame. Conoscendo la distanza esatta delle postazioni di misura TInRAR dalla struttura e l'inclinazione del sensore radar sul piano verticale, è infatti possibile eseguire la scomposizione dei vettori spostamento di ciascuna cella di risoluzione, determinarne l'esatta quota rispetto al piano campagna e ricavare i valori di spostamento sul piano orizzontale (Brunetti e Mazzanti, 2017).

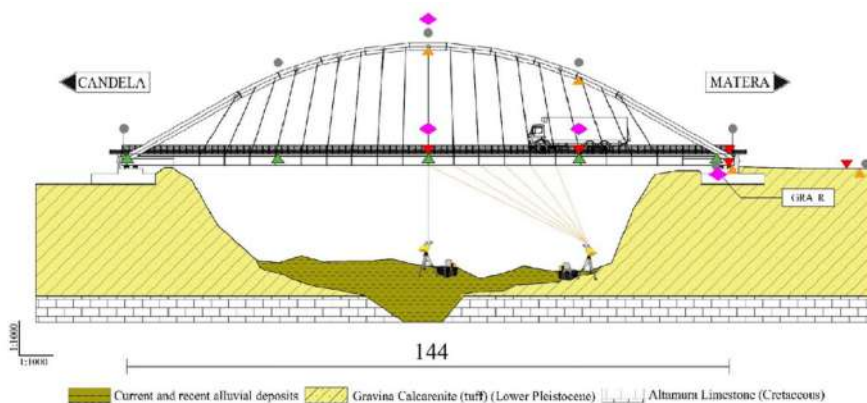


Figura 9-3 – Applicazione TInRAR su strutture a sviluppo orizzontale (Serlenga et al., 2021)

La tecnica TInSAR è invece basata sull'utilizzo di un sensore radar attivo installato su una piattaforma terrestre, costituito da due antenne (una trasmittente e una ricevente) che si muovono lungo una traiettoria predefinita grazie ad un binario lineare o a un sistema ruotante, acquisendo immagini radar durante tale movimento. Il movimento del sensore lungo una traiettoria predefinita e il processo di focalizzazione sono utilizzati con la finalità di incrementare la risoluzione in cross-range, rendendola indipendente dalla lunghezza fisica della antenna (sistemi RAR) e determinando così un sistema SAR (Brunetti et al., 2015).

Lo spostamento viene misurato attraverso l'analisi della differenza di fase di ogni pixel tra due o più immagini SAR acquisite in tempi diversi. Per ogni pixel delle mappe di spostamento 2D, è possibile ottenere la serie temporale di spostamento, ovvero osservare l'evoluzione della deformazione nel tempo di ogni singolo pixel. La risoluzione dei pixel di un'immagine SAR è compresa tra pochi decimetri e alcuni metri (in funzione delle caratteristiche strumentali e della distanza di monitoraggio) e l'accuratezza nella misura degli spostamenti varia tra alcuni decimi

di millimetro ad alcuni millimetri, principalmente in funzione della distanza di monitoraggio e delle condizioni atmosferiche (Mazzanti et al., 2014).

A differenza dei sistemi satellitari, caratterizzati da periodi di acquisizione dell'ordine delle settimane (circa 10^{-6} Hz), i radar terrestri consentono l'acquisizione di informazioni sulla deformazione dei punti monitorati con una frequenza ben maggiore, fino a 100-200 Hz, permettendo così di ricostruire il movimento delle strutture anche in campo dinamico o di essere utilizzati per analisi di identificazione modale (EMA e OMA).

Recentemente, hanno ricevuto grande attenzione i radar MIMO (Multi-Input Multi-Output), caratterizzati da una serie di antenne emittenti e riceventi (D'Aria et al., 2019). I radar MIMO sono capaci di generare mappe di spostamento bidimensionali con accuratezza dell'ordine di decimi o centesimi di millimetro per una notevole quantità di punti sulla struttura (Baumann-Ouyang et al., 2021). Poiché non hanno parti mobili, sono potenzialmente più adatti per il monitoraggio strutturale permanente o semi-permanente in quanto non prevedono significativi oneri di manutenzione. L'ampia possibilità di ottenere differenti risoluzioni spaziali e temporali e l'ottima precisione, rendono i radar MIMO una risorsa promettente per il futuro del monitoraggio strutturale, ad integrazione o sostituzione dei più classici sistemi statici o dinamici.

9.4 RIFERIMENTI

Addison P.S. (2002). The illustrated wavelet transform handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance. IOP Publishing.

Baumann-Ouyang A. Butt J.A. Salido-Monzú D. Wieser A. (2021) MIMO-SAR Interferometric measurements for structural monitoring: accuracy and limitations. *Remote Sens.*, 13, 4290.

Boyd S., Parikh N., Chu E., Peleato B., Eckstein J. (2011). Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers. *Foundations and Trends® in Machine Learning*. 3(1): 1–122.

Bradford S.C., Yang J, Heaton T. (2006). Variations in the dynamic properties of structures: the Wigner-Ville distribution. In: *Proceedings of the 8th US national conference on earthquake engineering*. San Francisco.

Brincker R., Zhang L., Andersen P. (2001) Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10 (3), pp. 441 – 445

Cannarozzo R., Cucchiari L., Meschieri W. (2018). *Misure, Rilievo, Progetto – Vol. 3: “Operazioni su superfici e volumi e applicazioni professionali”*, Quinta Edizione. Ed. Zanichelli. ISBN 9788808468178;

Casas, J.R., Cruz, P.J.S. (2003), Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring, *Journal of Bridge Engineering*, 8(6), 362-273.

Castagnetti, C.; Bassoli, E.; Vincenzi, L.; Mancini, F. (2019) Dynamic Assessment of Masonry Towers Based on Terrestrial Radar Interferometer and Accelerometers. *Sensors*, 19, 1319.

D'Aria, D., Falcone, P., Maggi, L., Cero, A., Amoroso, G. (2019), 'MIMO Radar-Based System for Structural Health Monitoring and Geophysical Applications', *International Journal of Structural and Construction Engineering*, 13(5), 258 - 265.

Ditomaso R., Iacovino C., Auletta G., Parolai S., Ponzo F.C. (2021). Damage Detection and Localization on Real Structures Subjected to Strong Motion Earthquakes Using the Curvature Evolution Method: The Navelli (Italy) Case Study. *Appl. Sci.* 11, 6496. <https://doi.org/10.3390/app11146496>.

Ditomaso R., Mucciarelli M., Ponzo F.C. (2012) Analysis of non-stationary structural systems by using a band-variable filter. *Bull Earthquake Eng.* doi:10.1007/s10518-012-9338-y.

Ditomaso R., Ponzo F.C. (2015). Automatic evaluation of the fundamental frequency variations and related damping factor of reinforced concrete framed structures using the short time impulse response function (STIRF). *Eng Struct.* 82:104-112.

Gabor D. (1946). Theory of communication. *J Inst Elect Eng* 93(3):429–457.

Girod B., Rabenstein R., Stenger A. (2001) *Signals and systems*, 2nd ed., Wiley, 2001, ISBN 0-471-98800-6 p. 50.

- Habel, W.R., Krebber, K. (2011) Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering. *Photonic Sens* 1, 268–280. doi: 10.1007/s13320-011-0011-x
- Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.C., Tung C.C., and Liu H.H. (1998). The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 454, no. 1971: 903–95. doi:10.1098/rspa.1998.0193.
- Jayawickrema U.M.N., Herath. H.M.C.M., Hettiarachchi, N.K., Sooriyaarachchi, H.P., Epaarachchi J.A. (2022) Fibre-optic sensor and deep learning-based structural health monitoring systems for civil structures: A review, *Measurement*, 199, doi:10.1016/j.measurement.2022.111543.
- Li H.N., Li D.S., Song G.B. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering, *Engineering Structures*. 26:1647–1657.
- Ljung, L., (1999). *System Identification: Theory for the User*, Second Edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall PTR.
- López-Higuera J.M., Rodríguez Cobo L., Incera A.Q., Cobo A. (2011). Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring. *Journal of lightwave technology*, 29(4).
- Manzini N., Orcesi A., Thom C., Clement A., Botton S., Ortiz M., Dumoulin J. (2018). Structural Health Monitoring using a GPS sensor network. *9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2018)*, July 10-13, 2018 in Manchester, UK (EWSHM 2018), Vol. 23(11).
- Mazzanti P., Bozzano F., Brunetti A., Esposito C., Martino S., Prestininzi A., Rocca A., Scarascia Mugnozza G. (2015). Terrestrial SAR Interferometry Monitoring of Natural Slopes and Man-Made Structures. G. Lollino et al. (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory*, Volume 5, Springer International Publishing, Switzerland, 189-194.
- Mazzanti P., Bozzano F., Cipriani I., Prestininzi A. (2014). New insights into the temporal prediction of landslides by a terrestrial SAR interferometry monitoring case study. *Landslides*.
- Minardo A, Catalano E, Coscetta A, Zeni G, Di Maio C, Vassallo R, Picarelli L, Coviello R, Macchia G, Zeni L. (2021). Long-term monitoring of a tunnel in a landslide prone area by Brillouin-Based distributed optical fiber sensors. *Sensors (Basel)*, 21(21):7032. DOI: 10.3390/s21217032.
- Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)*, 30(1).
- Peeters B., De Roeck G. (1999). Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis, *Mechanical systems and signal processing*, 13(6): 855-878.
- Peeters, B., and De Roeck, G. (2001). Stochastic system identification for operational modal analysis: a review. *J. Dyn. Sys., Meas., Control*. 123(4): 659–667.
- Poluzzi L. (2016). *Monitoraggio in continuo di strutture e del territorio mediante la tecnologia GNSS*. Ph.D. Thesis, Università di Bologna, Italy.
- Rainieri C., Fabbrocino G. (2010). Automated output-only dynamic identification of civil engineering structures. *Mechanical System Signal Processing*. 24: 678-695.
- Rainieri C., Fabbrocino G., Cosenza E. (2011). Near real-time tracking of dynamic properties for standalone structural health monitoring systems. *Mechanical System Signal Processing*. 25: 3010-3026.
- Rainieri C., Fabbrocino G. (2014). *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications*. Springer New York, NY. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0767-0>. eBook ISBN978-1-4939-0767-0.

- Rainieri C, Fabbrocino G (2015). Development and validation of an automated operational modal analysis algorithm for vibration-based monitoring and tensile load estimation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 60-61, p. 512-534, ISSN: 0888-3270, doi: 10.1016/j.ymssp.2015.01.019
- Reynders, E. (2012). System identification methods for (operational) modal analysis: review and comparison. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 19(1):51-124.
- Reynders E., De Roeck G., Gunders Bakir P., Sauvage C. (2007). Damage Identification on the Tülf Bridge by Vibration Monitoring Using Optical Fiber Strain Sensors, *Journal of Engineering Mechanics*, 133(2), 185-193.
- Reynders E., Houbrechts J., De Roeck G. (2012). Fully automated (operational) modal analysis. *Mechanical System Signal Processing*, 29: 228-250.
- Rudin W. (1987). *Real and Complex Analysis*, McGraw-Hill, ISBN 0-07-054234-1.
- Rytter A. (1993). *Vibrational based inspection of Civil Engineering Structures*. Ph.D. Thesis, University of Aalborg, Denmark.
- Scionti M., Lanslots J.P. (2004). Stabilization diagrams: pole identification using fuzzy clustering techniques. *Advances Engineering Software*, 36: 768-779.
- Serlenga V., Gallipoli M.R., Ditommaso R., Ponzo F.C., Tragni N., Perrone A., Stabile T.A., Calamita G., Vignola L., Carso R.F., Pietrapertosa D., Lapenna V. (2021). An integrated approach for structural behavior characterization of the Gravina Bridge (Matera, Southern Italy). *Structural Health Monitoring*, 20(6) 3371-3391. <https://doi.org/10.1177/1475921720987544>.
- Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P. (1996). Localization of the complex spectrum: the S transform. *IEEE, Trans Signal Process* 44:998–1001.
- Stubbs N., Perk S., Sikorsky C., Choi S. (2000). A global non-destructive damage assessment methodology for civil engineering structures. *International Journal of System Science*.
- Tiange Wu., Guowei Liu, Shenggui Fu, Fei Xing (2020). Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure, *Sensors*, 20, 4517.
- Verboven P., Parloo E., Guillaume P., Van Overmeire M. (2002). Autonomous structural health monitoring. Part I: Modal parameter estimation and tracking. *Mechanical System Signal Processing*, 16: 637-657.
- Weijtjens W., De Sitter G., Devriendt C., Guillaume P. (2014). Automated transmissibility based operational modal analysis for continuous monitoring in the presence of harmonics. *Atti della 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2014, Porto, Portugal, 30 June - 2 July 2014*, pp. 2231-2238.

10 CASI STUDIO

10.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DEI SITI DEI CASI STUDIO

Nei paragrafi che seguono sono discussi sei casi di studio relativi a differenti costruzioni della città di Roma, tipologicamente rappresentative, monitorate con un'analisi a ritroso attraverso interferometria satellitare al fine di ottenere informazioni sul relativo comportamento strutturale. Nell'appendice 1 sono discussi i dettagli della tecnica di processamento dei dati satellitari utilizzati per l'area di Roma.

Come discusso al capitolo 0, al fine di ottenere una visione d'insieme delle azioni che possono aver determinato i movimenti monitorati attraverso interferometria satellitare per i casi di studio esposti nei successivi paragrafi, è dirimente conoscere sia le caratteristiche della struttura sinteticamente riportate in ciascun paragrafo sia il contesto geologico del sottosuolo ed il contesto ambientale nel quale è inserita la costruzione stessa.

Se da un lato infatti, l'assetto geologico del sottosuolo, il comportamento geomeccanico delle formazioni che lo costituiscono, la modalità di circolazione dell'acqua, i processi geomorfologici attivi sulla superficie topografica e, non meno importante, l'attività antropica in superficie e nel sottosuolo, possono predisporre un sito a subire spostamenti nel tempo indipendenti dalla struttura stessa e che essa potrebbe anche registrare, dall'altro queste stesse caratteristiche di sito influenzano significativamente l'interazione attiva struttura – terreno, causa anch'essa di eventuali deformazioni monitorate.

In questa ottica si rimanda il lettore alla bibliografia di inquadramento dei diversi aspetti sopraelencati che fanno specifico riferimento alla sfera delle geoscienze e dell'ingegneria geotecnica (Ventriglia, 1971; 2002; Marra e Rosa, 1995; Funicello e Giordano, 2008; La Vigna et al., 2015; Mazza et al., 2015; Del Monte et al., 2016; Vergari et al., 2020). Tale bibliografia, e le voci in essa citate, consentono di visualizzare lo specifico contesto in cui ciascuno dei casi di studio proposti si inserisce.

Nella carta geologica (Figura 10-1) sono ubicati i 6 casi di studio. Cinque dei sei casi di studio sono ubicati in corrispondenza della piana alluvionale recente del F. Tevere e del sistema dei suoi affluenti (Corazza et al., 1999; Bozzano et al., 2020; Milli et al., 2016), notoriamente affetta da processi di subsidenza (Stramondo et al., 2008; Manunta et al., 2008; Cigna et al., 2014; Scifoni et al., 2016; Delgado Blasco et al., 2019) legati alla compattazione dei sedimenti fluviali recenti sotto effetto del proprio peso, dei carichi trasmessi dalle strutture e di eventuali variazioni delle condizioni di circolazione dell'acqua nel sottosuolo.

Il caso di studio 1, l'unico al di fuori della piana alluvionale recente ma ad essa in posizione limitrofa, tratta un edificio in muratura della seconda metà del XIX secolo, ubicato alla base del versante collinare che risale verso la collina del Gianicolo. Il substrato geologico con cui la struttura interagisce è localmente costituito dalla formazione di Monte Vaticano (MVA in Figura 10-1); trattasi di argille sovraconsolidate consistenti.

Il caso di studio 2 tratta il complesso delle Torri Stellari in calcestruzzo armato realizzate intorno al 1950 nella piana alluvionale del Tevere, in sinistra idrografica nella parte meridionale della città. Le costruzioni hanno le fondazioni sospese nei depositi alluvionali recenti del F. Tevere (SFTBa in Figura 10-1), dal punto di vista geotecnico si tratta di terre a bassa consistenza, compressibili. Il caso di studio esemplifica il contesto di costruzioni realizzate in un'area notoriamente soggetta a subsidenza per cause naturali e realizzate con fondazioni che poggiano sulle medesime unità geologiche compressibili causa della subsidenza. Il caso di studio 4 relativo al complesso monumentale di San Michele a Ripa Grande, è da questo punto di vista analogo, anche se l'età dell'edificio (1950 vs. fine del 1600 - metà del 1800) è ben diversa e presumibilmente diversa è anche la tipologia fondazionale (fondazione su pali vs. fondazioni assimilabili a "superficiali" che potrebbero poggiare, oltre che su depositi alluvionali recenti (SFTBa in Figura 10-1), in parte anche su riporti antropici (h in Figura 10-1) derivanti dalle demolizioni di edifici preesistenti). Analogo contesto è quello del caso di studio 6 relativo al Ponte Palatino realizzato alla fine del 1800 nella zona centrale della città: le fondazioni a cassone dei quattro piloni in muratura poggiano tra 10 e 15 metri di profondità "al di sotto del "livello delle magre" del fiume su un "antico buono strato di sabbie fluviali" (all'interno di SFTBa di Figura 10-1).

Il caso di studio 3, il Ponte Morandi alla Magliana realizzato alla fine degli anni '60 del secolo scorso, e il caso di studio 5, il ponte della Musica realizzato tra il 2008 ed il 2011, solo apparentemente invece sono collocati nella piana alluvionale recente del F. Tevere. Infatti, per il caso di studio 3, ubicato in destra idrografica di un'ansa del

F. Tevere nella parte meridionale della città le fondazioni del ponte dovrebbero collocarsi ad oltre 50m di profondità dal piano campagna, all'interno di argille dure e consistenti appartenenti alla formazione di Monte Vaticano (MVA in Figura 10-1), al di sopra delle quali poggiano i depositi alluvionali recenti compressibili (SFTBa in Figura 10-1). Analogamente, per il caso di studio 5 ubicato nella piana alluvionale del F. Tevere nella parte settentrionale della città, le fondazioni delle spalle del ponte attraversano i depositi alluvionali recenti compressibili spessi oltre 50m per andarsi ad attestare nel substrato geologico più rigido costituito dalla medesima formazione di Monte Vaticano. In ambedue i casi di studio 3 e 5, dunque, le fondazioni isolano parzialmente la struttura dai processi di subsidenza che animano la piana alluvionale recente del F. Tevere.

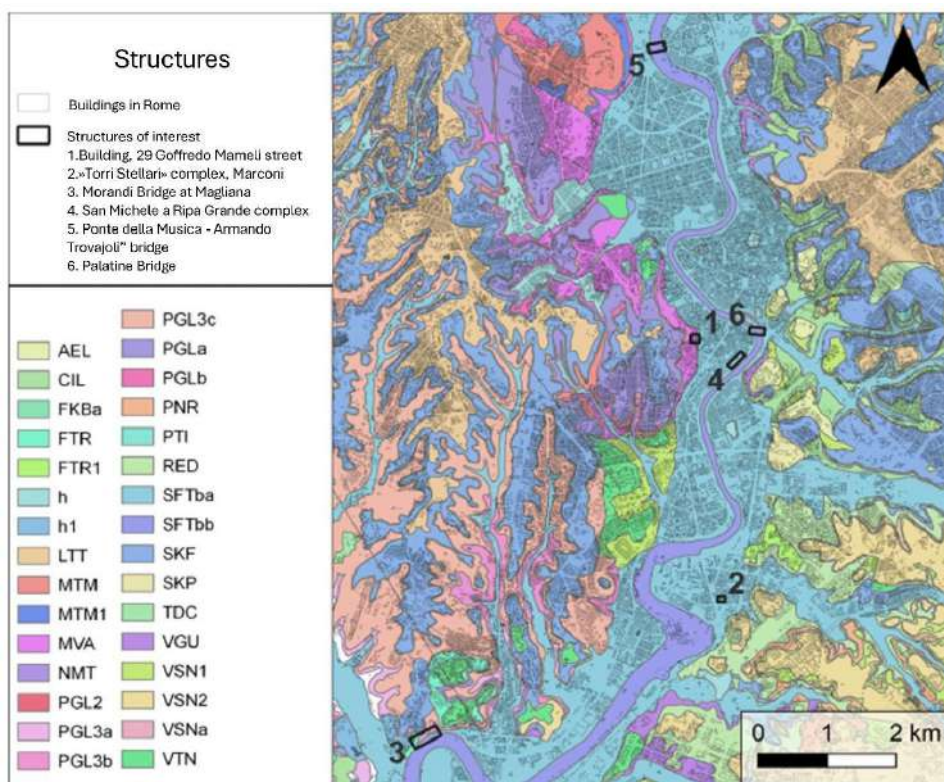


Figura 10-1 – Carta geologica di Roma (modificata da Funiello & Giordano, 2008). Dal basso stratigrafico verso l'alto: MVA: Formazione di Monte Vaticano; MTM: Formazione di Monte Mario - MTM1: Membro di Farneto; PGL: Formazione di Ponte Galeria - PGL2: Argille ad Helicella, PGL3a: Membro della Pisana, Litofacies conglomeratico-sabbiosa, PGL3b: Membro della Pisana, Litofacies argilloso-sabbiosa, PGL3c: Membro della Pisana, Litofacies sabbiosa, PGLa: Litofacies conglomeratica, PGLb: Litofacies argilloso-sabbiosa; CIL: Formazione di Santa Cecilia; TDC: Unità di Tor De Cenci; VGU: Formazione di Valle Giulia; PTI: Unità del Palatino; SKF: Tufo stratificati varicolori di Sacrofano; RED: Pozzolane Rosse; FTR: Formazione del Fosso del Torrino -FTR1: Conglomerato Giallo; LTT: Tufo stratificati varicolori di La Storta; PNR: Pozzolane Nere; VSN: Formazione di Villa Senni - VSN1: Tufo lionato, VSN2: Pozzolanelle, VSNa: Litofacies conglomeratico-sabbiosa; AEL: Formazione Aurelia; FKBa: Formazione di Madonna degli Angeli, Litofacies lavica; VTN: Formazione di Vitinia; NMT: Unità della Via Nomentana; SKP: Unità di Saccopastore; SFT: Sistema Fiume Tevere - SFTba: deposito alluvionale, SFTbb: deposito alluvionale in evoluzione; h: deposito antropico; h1: discarica. "Stralcio della nuova carta geologica di Roma: litostratigrafia e organizzazione stratigrafica, Mem. Descr. Carta Geol. D'Italia"

10.1.1 Riferimenti

- Bozzano, F., Andreucci, A., Gaeta, M., & Salucci, R. (2000). A geological model of the buried Tiber River valley beneath the historical centre of Rome, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59(1), 1-21.
- Cigna F., Lasaponara R., Masini N., Milillo P., Tapete D. (2014). Persistent Scatterer Interferometry Processing of COSMO-SkyMed StripMap HIMAGE Time Series to Depict Deformation of the Historic Centre of Rome, Italy, *Remote Sens.* 2014, 6(12), 12593-12618; <https://doi.org/10.3390/rs61212593>
- Corazza A., Lanzini M., Rosa C., Salucci R (1999). Caratteri stratigrafici, idrogeologici e geotecnici delle alluvioni tiberine nel settore del centro storico di Roma, *Italian journal of Quaternary Sciences* 12(2), 215-235.
- Delgado Blasco J.M., Fomelis M., Stewart C., Hooper A. (2019) Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry, *Remote Sens.* 2019, 11, 129; doi:10.3390/rs11020129
- Del Monte M., D'Orefice M., Luberti G.M., Marini R., Pica A., Vergari F. (2016). Geomorphological classification of urban landscapes: the case study of Rome (Italy), *Journal of Maps*, DOI: 10.1080/17445647.2016.1187977
- Funicello R., Giordano G. (2008). La nuova carta geologica di Roma: litostratigrafia e organizzazione stratigrafica, *Memorie descrittive della carta geologica d'Italia v. 80 , la geologia di Roma dal centro storico alla periferia*, 39-85. <https://www.isprambiente.gov.it/resolveuid/ac27a42e6b7d4b2898aaf3cd637b2b40>.
- Funicello R., Giordano G. (2008). Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50,000: foglio 374 Roma.
- La Vigna F., Mazza R., Amanti M., Di Salvo C., Petitta M., Pizzino L. (2015). The synthesis of decades of groundwater knowledge: the new Hydrogeological Map of Rome, *Acque Sotterranee*, 4(4), DOI 10.7343/AS-128-15-0155
- Manunta M., Marsella M., Zeni G., Sciotti M., Atzori S., Lanari R. (2008). Two-scale surface deformation analysis using the SBAS-DInSAR technique: a case study of the city of Rome, Italy, *International Journal of Remote Sensing*, 29:6, 1665-1684, DOI: 10.1080/01431160701395278
- Marra F., Rosa C. (1995). Stratigrafia e assetto geologico dell'area romana - In: *La geologia di Roma: il centro storico*, Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 50, 49 -118.
- Mazza R., La Vigna F., Capelli G., Dimasi M., Mancini M., & Mastroiillo L. (2015). Idrogeologia del territorio di Roma "Hydrogeology of Rome, *Acque Sotterranee* 4/142: 19-30. DOI: 10.7343. AS-129-15-0156.
- Milli S., Mancini M., Moscatelli M., Stigliano F., Marini M., Cavinato G.P., (2016). From river to shelf, anatomy of a high-frequency depositional sequence: The Late Pleistocene to Holocene Tiber depositional sequence, *Sedimentology* 63, 1886–1928
- Scifoni S., Bonano M., Marsella M., Sonnessa A., Tagliafierro V., Manunta M., Lanari R., Ojha C., Sciotti M. (2016) On the joint exploitation of long-term DInSAR time series and geological information for the investigation of ground settlements in the town of Roma (Italy), *Remote Sensing of Environment* 182 (2016) 113–127
- Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M. (2008). Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigation., *Remote Sens. Environ.* 2008, 112, 3160–3172, doi:10.1016/j.rse.2008.03.008
- Ventriglia, U. (1971). *La geologia della città di Roma*, Amm. Prov. Roma, 417 pp.
- Ventriglia, U. (2002). *Geologia del territorio del Comune di Roma*, Amm. Prov. Roma, 810 pp.
- Vergari F., Luberti G.M., Pica A., Del Monte M. (2020). Geomorphology of the historic centre of the Urbs (Rome, Italy)". *Journal of Maps*, DOI: 10.1080/17445647.2020.1761465

10.2 CASO STUDIO N. 1 – EDIFICIO IN MURATURA (ROMA)

10.2.1 Breve descrizione del caso studio

Il fabbricato oggetto di studio è un edificio residenziale in muratura costruito nella seconda metà del XIX secolo sito in centro a Roma (Figura 10-2a). L'edificio si sviluppa su sette piani fuori terra (Figura 10-2b), ed ha una pianta di forma trapezoidale organizzata attorno ad un cortile centrale, secondo una configurazione strutturale riferibile all'edilizia romana di quegli anni. Il fabbricato consta di un aggregato edilizio formato da due unità strutturali contigue. Le dimensioni complessive sono approssimativamente pari a 30 m, sia in pianta che in elevazione. La muratura portante è del tipo “alla romana”, composta da pietrame di tufo e ricorsi in mattoni. Gli orizzontamenti di piano sono costituiti da volte al piano terra e da putrelle in ferro e voltine in mattoni ai piani superiori. La copertura è piana in latero-cemento e praticabile.



Figura 10-2 – (a) Localizzazione dell'edificio caso studio in Roma. (b) Vista delle facciate Est e Nord (Google Street View).

10.2.2 Dati di base del caso studio

Dati a supporto delle elaborazioni

Sono stati reperiti, per la zona d'interesse, i prodotti digitali relativi alla topografia del terreno nell'area di interesse e alle caratteristiche geometriche dell'edificio, al fine di supportare l'identificazione dei punti di misura riferibili all'edificio nelle successive fasi di elaborazione ed interpretazione.

Il DataBase GeoTopografico (DBGT) della Regione Lazio, in particolare, fornisce la geolocalizzazione dell'edificio, la forma e le dimensioni in pianta, l'altezza volumetrica e la quota topografica al tetto.

Dalle ultime due informazioni è possibile ricavare, per sottrazione, l'altezza topografica dell'edificio in corrispondenza del livello stradale, in questo caso pari a circa 25 m s.l.m. Questa stima è confermata dal modello digitale del terreno sviluppato da Ispra (DEM20), ad estensione nazionale e con cella di risoluzione 20x20 m, rielaborato in ambiente GIS nella forma di curve di livello (Figura 10-3a). Il modello evidenzia come l'edificio sia collocato su di un leggero pendio che degrada in direzione Sud-Est (SE) con una pendenza pari a circa il 15%. L'altezza volumetrica sopra citata, pari a 29.6 m, è altresì compatibile con quella del rilievo architettonico, pari a 27.7 m al tetto.

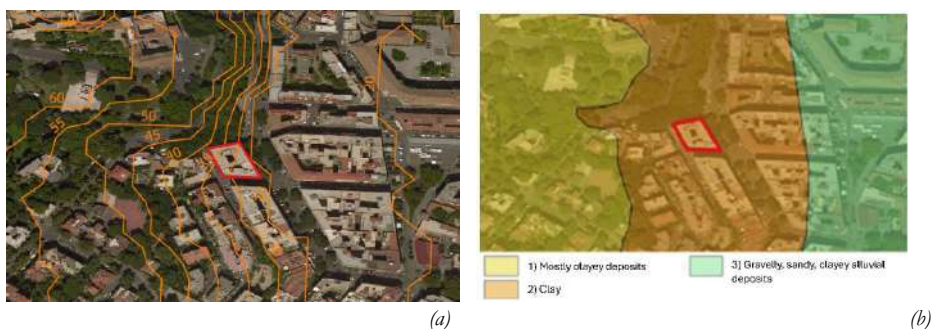


Figura 10-3 – (a) Curve di livello estratte dal DTM Ispra; (b) Carta geologica del Lazio riportante la litologia dell'area.

Dati a supporto dell'interpretazione

I dati geologici di base nell'area di interesse sono stati reperiti tramite la Carta geologica informatizzata della regione Lazio. L'edificio risulta edificato su argille plioceniche marine (Figura 10-3b; MVA in Figura 10-1). Per quanto riguarda i dati ambientali, mediante la piattaforma web raggiungibile tramite il link <http://193.206.192.214/serversuttm/serietemporali100.php>, sono stati recuperati, per l'arco temporale di interesse, dati di diversa natura inerenti a temperatura ambientale, precipitazioni, umidità relativa, etc. Fra le varie reti di sensori disponibili ci si è affidati alla rete regionale Lazio, in quanto ritenuta più stabile e con maggior numero di dati. La stazione più vicina al caso studio, avente dati con limitato numero di *missing points*, è quella di ROMA: longitudine: 12.523626, latitudine: 41.920555, che dista approssimativamente 6.5 km in linea d'aria dal caso studio. I dati forniti dalla piattaforma web possono essere scaricati con campionamento annuale, mensile, o con un passo temporale pari a 10 giorni (assunto nel presente studio). I dati sono disponibili per una finestra temporale che va dal 1860 al 2019. La Figura 10-4a mostra dove è localizzata la stazione meteo rispetto al caso studio, mentre nella Figura 10-4b è riportata la Trasformata di Fourier di alcuni dati registrati dalla stazione meteo.

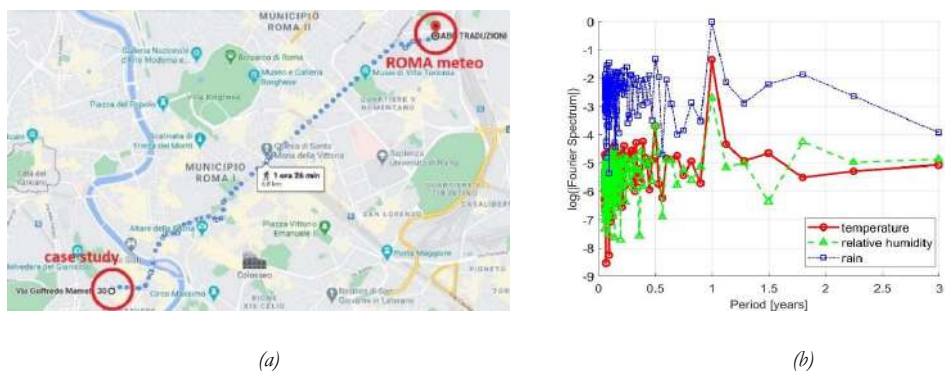


Figura 10-4 – (a) Localizzazione su mappa “Google Maps” della stazione meteo di ROMA rispetto al caso studio; (b) Trasformata di Fourier (in funzione del periodo) dei dati di temperatura, umidità relativa e pioggia giornaliera registrati dalla stazione di ROMA della rete regionale Lazio (diagramma in scala logaritmica nelle ordinate).

10.2.3 Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici

I dati satellitari relativi ad entrambe le orbite, limitatamente all'area di interesse in cui è ubicato l'edificio oggetto di studio, sono stati processati in ambiente *MATLAB*. In particolare, sono state estratte dal database ed analizzate le date di acquisizione, i coseni direttori LOS, le coordinate geografiche dei punti, i valori di coerenza, le velocità medie di spostamento e gli spostamenti LOS.

Rappresentazioni a scala territoriale

Come si può notare da una prima rappresentazione a scala territoriale delle velocità medie di deformazione su ortofoto, entrambi i quadranti contenenti l'edificio oggetto di studio sono caratterizzati da velocità medie di spostamento piuttosto contenute (Figura 10-5). La rappresentazione evidenzia come le velocità negative più significative siano localizzate in prossimità del fiume Tevere. Si tenga presente che valori di spostamento (o di velocità) negativi corrispondono ad un moto di allontanamento in linea di vista dal satellite, i valori positivi ad un moto di avvicinamento (Sezione 3.2). In particolare, come evidenziato dalle distribuzioni statistiche dei dati di ciascuna orbita (Figura 10-6), la quasi totalità delle velocità è compresa tra -0.2 cm/anno e 0.2 cm/anno. Le distribuzioni statistiche hanno un valore medio pari a circa -0.035 cm/anno, sono asimmetriche rispetto al valor medio ($skewness < 0$) e leptocurtiche ($kurtosis > 3$). Da una prima osservazione a scala territoriale non si evidenziano zone soggette a velocità medie di deformazione particolarmente elevate. Le misure di velocità fornite presentano valori di coerenza (Figura 10-7) che variano da un minimo di 0.35 ad un massimo di 1 , distribuite attorno ad un valore medio pari a 0.56 .

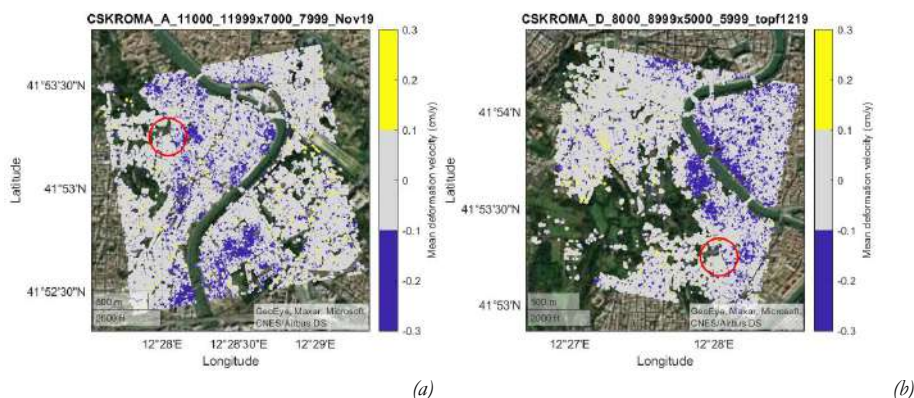


Figura 10-5 – Mappa delle velocità medie di deformazione: (a) orbita ascendente; (b) orbita discendente.

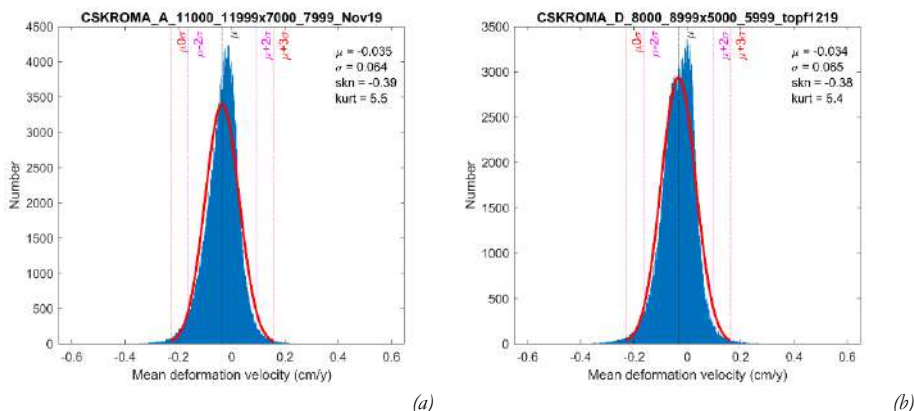


Figura 10-6 – Distribuzione delle velocità medie di deformazione: (a) orbita ascendente; (b) orbita discendente.

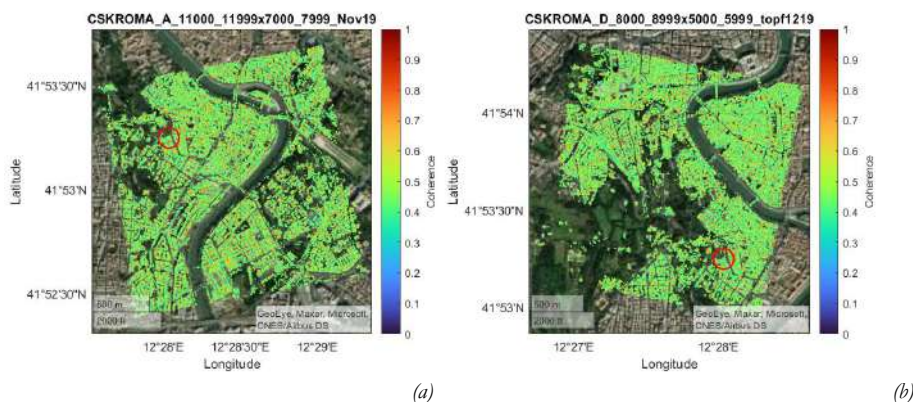


Figura 10-7 – Mappa dei valori di coerenza: (a) orbita ascendente; (b) orbita discendente.

Rappresentazioni alla scala dell'edificio

Sono disponibili dati satellitari afferenti all'edificio per entrambe le orbite. Più precisamente, il database comprende 223 punti di misura appartenenti all'edificio per l'orbita ascendente, 87 punti per l'orbita discendente. Per ciascuno di essi sono state acquisite 138 letture temporali in orbita ascendente e 116 letture temporali per l'orbita discendente, distribuite in circa 3000 giorni da Marzo 2011 a Marzo 2019.

La rappresentazione su ortofoto denota un buon accordo tra le posizioni dei punti di misura rilevati dal satellite sull'edificio e la geometria in pianta (Figura 10-8). Una prima analisi qualitativa delle velocità medie di spostamento in linea di vista sembra suggerire un moto di allontanamento dal satellite più marcato nella parte est dell'edificio, viceversa un moto di avvicinamento della parte ovest. Tale comportamento è evidenziato soprattutto dall'orbita ascendente (Figura 10-8a) e pare emergere dalla rappresentazione tridimensionale dei vettori velocità LOS (Figura 10-9a). La direzione dei vettori corrisponde alla linea di vista del satellite, il loro modulo è proporzionale alla velocità misurata. In particolare, per facilitare le successive elaborazioni, la localizzazione dei punti di misura è stata ottenuta convertendo le coordinate geodetiche rispetto all'ellissoide di riferimento WGS84 in coordinate cartesiane, assumendo la direzione x coincidente con quella EW. L'altezza topografica dei punti misurati, riferita al geoido di riferimento EGM96, risente dell'incertezza nel posizionamento del punto di riferimento (*Reference Point*) assunto per ciascuno dei set di misura. Un buon accordo fra la localizzazione topografica dei punti di misura e la geometria in elevazione dell'edificio è ottenuto traslando rigidamente i punti di entrambe le orbite di -5 m lungo la verticale. I valori di coerenza delle misure sull'edificio sono statisticamente in accordo con quelli degli interi set (Figura 10-10) e il loro valore medio si aggira intorno a 0.5 per entrambe le orbite.

Le storie temporali di spostamento dei punti di misura appartenenti all'edificio (Figura 10-11) evidenziano la presenza di spostamenti residui significativi al termine del periodo di misura. In particolare, quattro punti di misura misurati dall'orbita ascendente (Figura 10-11a) presentano velocità medie di spostamento negative maggiori in modulo di 0.15 cm/anno, accumulando circa 2 cm di spostamento residuo al termine della misura. Tali misure, come già accennato, sono localizzate nella parte est della copertura dell'edificio (punti di misura cerchiati in rosso in Figura 10-8). L'orbita discendente, tuttavia, non sembra essere conclusiva da questo punto di vista, presentando nella stessa area velocità negative ma non altrettanto significative.

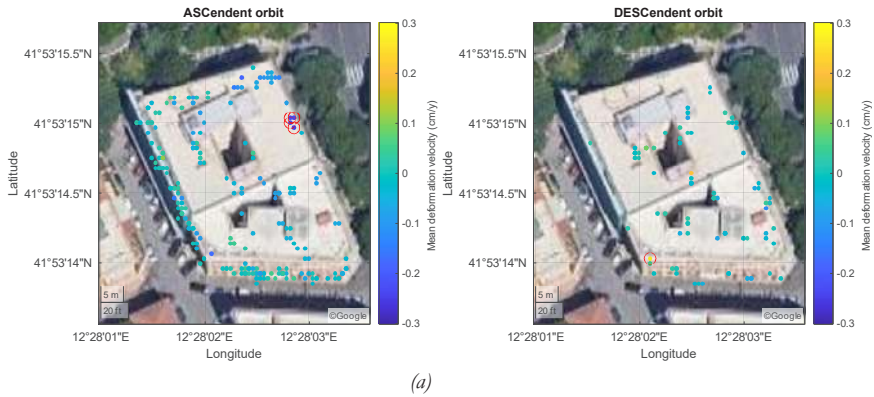


Figura 10-8 – Mappa delle velocità medie di deformazione dell'edificio: (a) orbita ascendente; (b) orbita discendente.

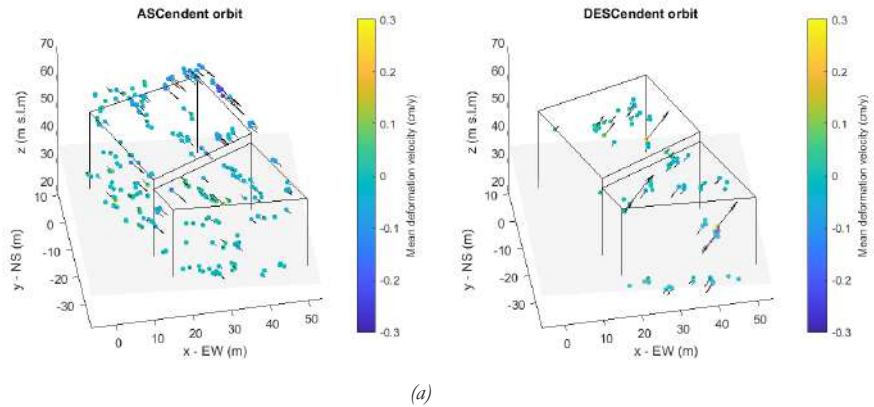


Figura 10-9 – Campo vettoriale delle velocità medie LOS: (a) orbita ascendente; (b) orbita discendente.

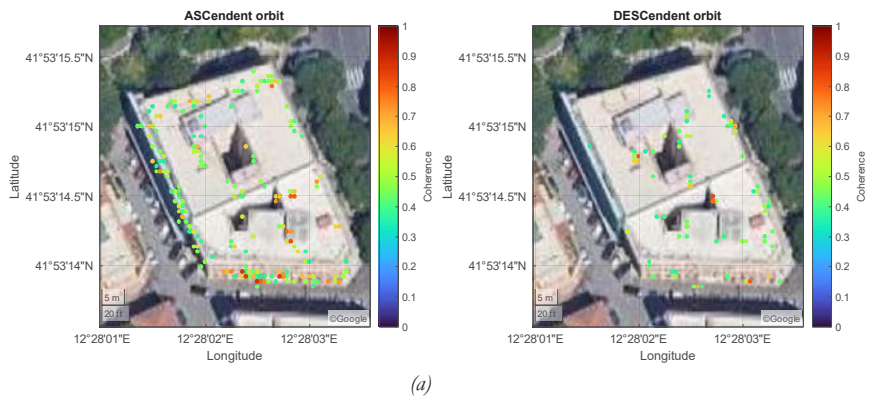


Figura 10-10 – Mappa dei valori di coerenza dell'edificio: (a) orbita ascendente; (b) orbita discendente.

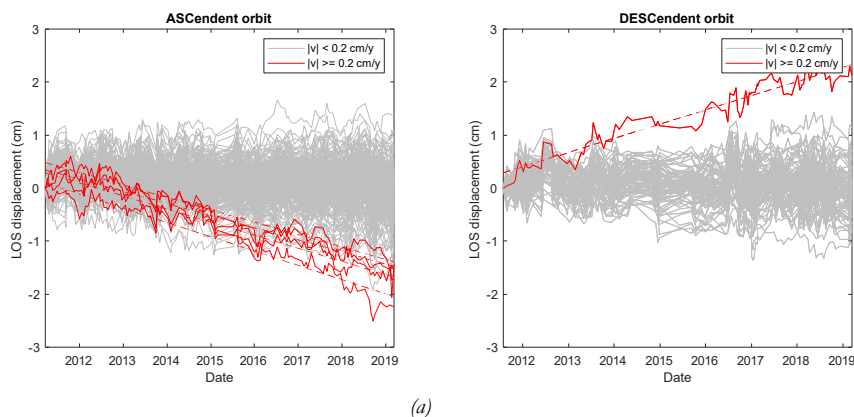


Figura 10-11 – Storie temporali di spostamento (in rosso con velocità assoluta > 0.2 cm/anno): (a) orbita ascendente; (b) orbita discendente.

Elaborazioni dei dati ai fini della combinazione delle due orbite

Limitatamente ai punti appartenenti alla copertura dell'edificio, è stata poi eseguita la composizione dei dati delle due orbite. Assumendo, per semplicità, la complanarità dei punti di misura così selezionati, le velocità medie di deformazione LOS sono state interpolate spazialmente su una griglia regolare di maglia $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$, attraverso la tecnica di interpolazione 2D TIN (vedi paragrafo 3.4.1). Le componenti assolute del moto, in particolare la componente verticale e quella orizzontale EW, sono state ricavate secondo la procedura proposta nel paragrafo 3.3, considerando trascurabile il contributo del moto in direzione NS. Si osservi in particolare come la componente verticale della velocità appaia contenuta nel modulo, positiva sul lato Ovest dell'edificio e negativa su quello opposto.

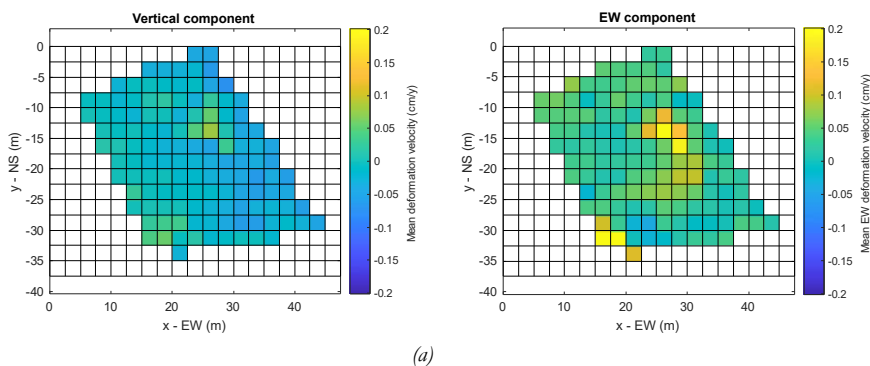


Figura 10-12 – Componenti (a) verticale ed (b) orizzontale EW delle velocità medie di deformazione in copertura all'edificio, ottenute dall'interpolazione spaziale delle due orbite.

Elaborazioni nel dominio della frequenza e analisi di entropia spettrale

Con l'obiettivo di analizzare la presenza di fenomeni con periodicità inferiore alla finestra di osservazione, depurate le storie temporali di spostamento dal trend lineare (velocità media) ed impiegato un ricampionamento lineare ad intervalli di tempo costanti, si è proceduto ad investigare il contenuto in frequenza dei segnali attraverso la

trasformata di Fourier discreta (paragrafo 3.5). Si può notare, nello spettro di densità di potenza, un picco con una frequenza annuale che coinvolge la maggior parte delle misure (Figura 10-13).

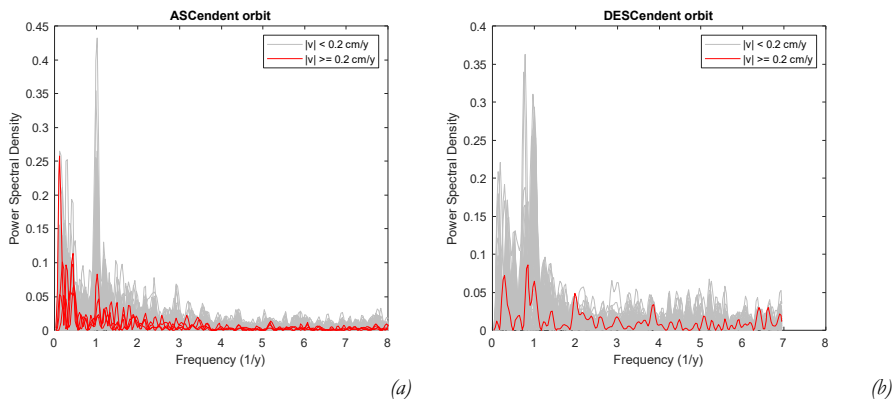


Figura 10-13 – Densità spettrale di potenza delle storie temporali di spostamento (in rosso con velocità assoluta > 0.2 cm/anno): (a) orbita ascendente; (b) orbita discendente.

In aggiunta alle analisi in frequenza, mediante *Short Time Fourier Transform* (STFT) si è stimato lo spettrogramma dei segnali di spostamento lungo la *Line Of Sight* (LOS) sia per orbite ascendenti che discendenti (Sezione 3.5). Dallo spettrogramma si è poi ricavata l'entropia spettrale istantanea dei segnali, dividendola nelle sue componenti di alta e bassa frequenza con frequenze di cut-off associate a periodicità di 6 mesi e 3 anni. Per la stima dell'entropia spettrale si è utilizzata la definizione data da *Shannon* nella teoria dell'informazione (Sezione 3.5.2). L'entropia “alta” fornisce informazioni su come lo spettro del segnale cambia la sua attitudine a disperdersi attorno alle frequenze fondamentali del segnale superiori alla frequenza di cut-off, contemplando in ciò sia variazioni di frequenza che di ampiezza. L'entropia “bassa” dello spettro si comporta in modo analogo per frequenza inferiori alla frequenza di cut-off. Per tale motivo l'entropia bassa è più adatta a descrivere variazioni di eventi con periodicità molto alte, mentre l'entropia alta si addice meglio a descrivere variazioni di eventi rapidi (per eventi rapidi e lenti si intende riferiti al periodo di osservazione). Dalla Figura 10-14 è possibile notare come il grafico dell'entropia spettrale di alcuni punti del caso di studio abbia subito un improvviso cambio di trend intorno al 2015.

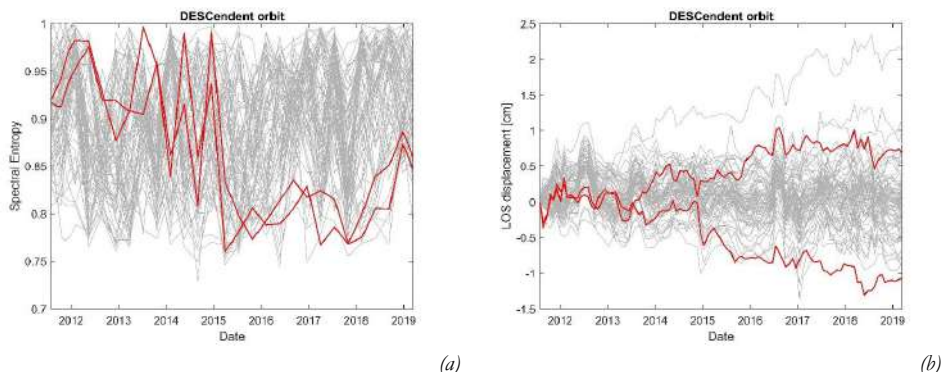


Figura 10-14 – (a) Entropia spettrale “alta” delle storie temporali di spostamento (orbita discendente) per il caso di studio. In rosso sono riportati i punti con entropia spettrale che ha subito una riduzione improvvisa e (b) storie temporali di spostamento associate.

Elaborazioni dei dati ai fini dell'identificazione delle componenti di moto rigido

Per potere identificare possibili moti dell'edificio rispetto al terreno circostante, è stata applicata la procedura descritta nel seguito, con riferimento ai punti rilevati sulla copertura dell'edificio selezionato e a quelli del terreno circostante l'edificio. La procedura si basa sull'identificazione di due superfici piane (una per la copertura e una per il terreno), considerando possibili errori nella localizzazione in pianta del punto ed errori nella valutazione dello spostamento associato al punto stesso.

L'identificazione prevede, dopo aver selezionato le *time-histories* dei punti appartenenti all'edificio, il riallineamento temporale tra i dati delle due orbite, che presentano un campionamento non uniforme e non contemporaneo con un tempo di rivisita medio di 25 giorni. L'allineamento delle serie temporali è effettuato tramite modelli autoregressivi affinché si possano avere, per il medesimo istante, valori di spostamento di più punti per entrambe le orbite satellitari. In Figura 10-15 è riportata una *time-history* ottenuta dopo tale allineamento. In figura i cerchi blu sono i dati originali mentre la linea continua nera rappresenta la funzione del tempo approssimante. Si noti che l'approssimazione dei dati è in genere molto buona. La curva approssimante non inizia dall'istante zero in quanto vi è uno sfasamento temporale con l'orbita discendente; quest'ultima, infatti, vede il primo punto acquisito in data 29 luglio 2011 mentre l'orbita ascendente presenta la prima acquisizione il 21 marzo 2011.

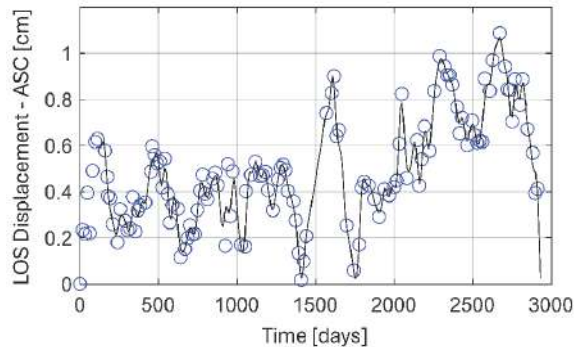


Figura 10-15 – Approssimazione mediante la procedura proposta di una time-history per ottenere storie temporali ad intervalli costanti e coerenti con l'orbita discendente.

Ottenuto l'allineamento temporale, è possibile valutare la componente di moto rigido della struttura. In Figura 10-16 sono riportate in blu le cinque componenti di moto rigido identificate. Si noti che la componente verticale del moto $\theta_2 = v_{z,G}$ è pressoché nulla, fatta eccezione di piccoli spostamenti qualitativamente sinusoidali. La rotazione attorno all'asse x risulta essere evidente, anche se di entità molto modesta. Infine, la rotazione rispetto all'asse z denominata $\theta_5 = \phi_z$ è certamente di entità trascurabile rispetto a tutte le altre rotazioni. Si noti inoltre che l'ultimo dato delle rotazioni $\theta_3 = v_{x,G}$ e $\theta_4 = v_{y,G}$ presentato presenta un'anomalia, quasi certamente dovuta all'imprecisione del modello autoregressivo approssimante le varie *time-histories* nel cogliere l'andamento effettivo degli spostamenti di alcuni punti. Tale valore deve essere eliminato per ottenere una rappresentazione corretta delle componenti del moto dell'edificio.

Successivamente è stata valutata l'incertezza dei risultati ottenuti in termini di componenti di moto rigido attraverso la definizione di sottogruppi di punti, la valutazione delle componenti di moto rigido per ogni sottogruppo e successivo confronto con i movimenti di corpo rigido ottenuti dalla totalità di punti presenti sulla copertura. In particolare, sono state eseguite 100 analisi per ciascuna delle quali sono stati selezionati in modo random 178 punti dall'orbita ascendente (su 223) e 70 punti dall'orbita discendente (su 87) ovvero circa l'80% dei punti disponibili, e riottenute le componenti di moto rigido nel tempo. In Figura 10-16 sono riportati i risultati in termini di componente di moto rigido. Ognuna delle 100 analisi eseguite è rappresentata con una linea grigia mentre la linea blu corrisponde al moto rigido già illustrato e riferito alla soluzione con tutti i punti a disposizione. Dai risultati ottenuti si mostra che la variabilità degli spostamenti risulta essere molto limitata, mentre è limitatamente più

sensibile alla selezione la valutazione della rotazione. In particolare, si nota che la rotazione attorno all'asse z è la più incerta ed un risultato affidabile può essere colto solo in presenza di una numerosità sufficiente di punti presenti sull'edificio. Al contrario, lo spostamento verticale risulta molto stabile, sinonimo di buona accuratezza della stima.

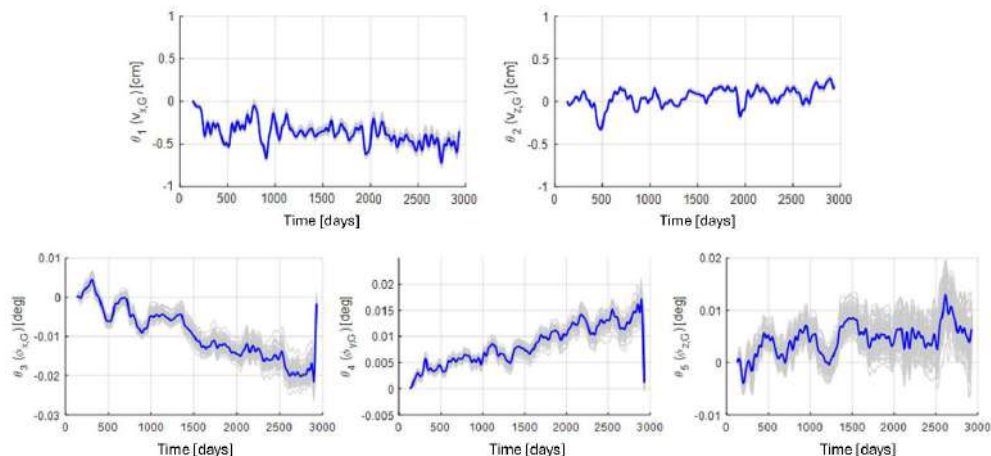


Figura 10-16 – Time-histories delle componenti di moto rigido della struttura considerando 100 subset di punti ottenuti da estrazioni random – riduzione del numero di punti del 20%.

10.2.4 Interpretazione dei dati interferometrici e discussione

In questo paragrafo sono riportati alcuni commenti che, seppure in modo preliminare, intendono stabilire possibili relazioni causa-effetto con anomalie/trend dei dati rielaborati nelle sezioni precedenti.

Commenti generali

Le elaborazioni eseguite sui dati interferometrici riferibili all'edificio caso studio, con particolare riferimento alla componente verticale di velocità di deformazione stimata in copertura (Figura 10-12), non evidenziano criticità che possano essere ricondotte a significativi fenomeni di cedimento in atto sulla struttura.

Commenti relativi all'analisi in frequenza

I picchi in frequenza osservati nello spettro di densità di potenza spettrale (Figura 10-13) sono riconducibili agli effetti di fattori ambientali con periodicità stagionale e/o annuale. È plausibile supporre che gli effetti osservati, fra le altre cause possibili, siano imputabili primariamente alle variazioni del livello di falda (paragrafo 4.2.24.2.3) e alla loro influenza locale sulla compressibilità del terreno di fondazione dell'edificio, vista la vicinanza del manufatto al fiume Tevere.

Commenti relativi all'entropia spettrale

Riguardo le anomalie rilevate nell'entropia spettrale (Figura 10-14), è opportuno precisare che esse non implicano necessariamente l'insorgenza di patologie strutturali, ma piuttosto che il segnale registrato ha cambiato la sua natura. Allo stato attuale, la lettura di variazioni di entropia deve essere interpretata come l'insorgenza di un'anomalia del segnale, la cui causa dovrebbe essere analizzata più nel dettaglio con ulteriori elaborazioni o attraverso l'uso di tecniche alternative.

Commenti relativi all'identificazione delle componenti di moto rigido

Le componenti di moto rigido possono essere impiegate ai fini di preliminari stime di atti di moto riconducibili all'attivazione di fenomeni di cedimenti in fondazione.

Le piccole variazioni di tipo sinusoidale riscontrate nella componente verticale del moto (Figura 10-16) sembrano presumibilmente riconducibili ad effetti stagionali.

10.3 CASO STUDIO N. 2 – COMPLESSO TORRI STELLARI IN CALCESTRUZZO ARMATO (ROMA)

10.3.1 Breve descrizione del caso studio

Il complesso di quattro edifici residenziali noto come “Torri Stellari”, situato nel quartiere “Valco San Paolo” di Roma, fu costruito tra il 1949 e il 1952 nell’ambito del programma Nazionale INA-Casa (Capolino, 2000; Di Biagi, 2001). I quattro edifici sono torri di 8 piani ciascuna, con pianta a sezione di stella. La struttura portante è costituita da telai in calcestruzzo armato con tamponature in mattoni e solette con laterizi forati (Storelli e Paolini, 2003). Per la loro conformazione, le Torri Stellari sono considerate un modello rappresentativo del patrimonio costruito italiano del dopo-guerra (Poretti, 2013). In Figura 10-17a e Figura 10-17b si riportano, rispettivamente, una vista dall’alto delle Torri Stellari, racchiuse in un riquadro rosso, e alcune viste laterali. La scelta di tali edifici residenziali quale caso studio proposto è anche stata dettata dalla disponibilità di documentazione storica.



Figura 10-17 – Torri Stellari: (a) vista dall’alto (Google Maps); (b) viste laterali.

10.3.2 Dati di base del caso studio

Per il caso studio è stata reperita la documentazione originaria a disposizione da fonti storiche archivistiche. Lo studio si è basato sugli elaborati grafici originari di progetto reperiti nell’archivio dell’architetto Mario De Renzi (1897-1967), il quale elaborò la pianta generale e gli elaborati grafici esecutivi della Torre n.1 (Figura 10-18a), conservati nell’Archivio Storico dell’Accademia Nazionale di San Luca a Roma. Tale documentazione ha fornito informazioni complete riguardo la geometria, la tipologia strutturale e i dettagli esecutivi, informazioni che sono state utilizzate per la creazione di un modello architettonico 3D accurato a superfici che descritto ai paragrafi successivi. A conferma di quanto riportato negli elaborati grafici, sono stati eseguiti dei controlli in sito relativamente alle dimensioni dei volumi esterni, e un rilievo fotografico dello stato attuale di conservazione.

Costruzione dei modelli 3D

A supporto dell’interpretazione e della diagnosi, sono stati creati un modello architettonico 3D delle Torri monitorate e il modello 3D della stratigrafia dell’area in cui esse sono situate. La modellazione 3D dei volumi delle strutture monitorate viene eseguita utilizzando le informazioni geometriche derivate dalla documentazione archivistica reperita, verificate con un’ispezione visiva in sito. I volumi includono, tra gli altri dettagli, anche le fondazioni, come mostrato in Figura 10-18b, dove si riporta il modello 3D della Torre n.1. I volumi e il modello geologico 3D, opportunamente geolocalizzati, vengono importati in ambiente GIS.

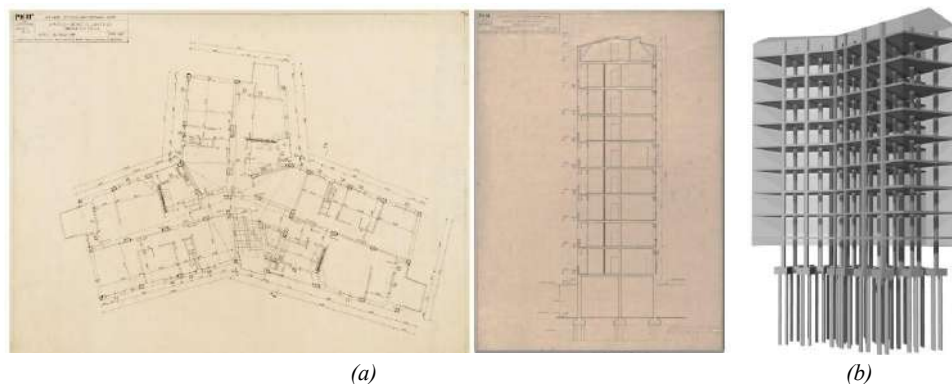


Figura 10-18 – (a) Disegni originali del quartiere residenziale Valco San Paolo INA-CASA (1949-52): M. De Renzi, Torre a pianta stellare, pianta del primo piano e sezione AA, 27 giugno 1950 (gentile concessione dell'Accademia Nazionale di San Luca); (b) Modello 3D dei volumi della Torre n. 1 (Miano et al., 2022).

Dati geotecnici e geologici a disposizione sull'area in esame

Per l'area di Valco San Paolo (l'area nel rettangolo rosso di Figura 10-19a, di circa 2.2 km²) sono stati reperiti dati geotecnici e geologici. L'indagine geologica ha fornito dati di input per la ricostruzione 3D della stratigrafia del suolo in termini di distribuzione spaziale di diversi litotipi. Sono stati utilizzati dati provenienti da diverse fonti: il Modello Digitale del Terreno 5x5 (DTM) di Roma, fornito dal servizio Open Data Lazio (www.dati.lazio.it) per fissare la quota del terreno, mappe geologiche, sezioni di letteratura (Bozzano et al, 2008) e profili stratigrafici realizzati per diverse campagne geognostiche tra il 1989 e il 2008, a profondità diverse (da circa 20 m a 70 m di profondità), per ricostruire la stratigrafia del sottosuolo. I profili stratigrafici sono stati analizzati ed interpretati facendo riferimento al lavoro di Bozzano et al., (2000). Il modello geologico del sottosuolo del quartiere Valco San Paolo è stato ricostruito concentrandosi sui dettagli del recente corpo alluvionale principale del fiume Tevere (SFTBa in Figura 10-1), per il quale sono stati individuati i seguenti litotipi (dall'alto verso il basso):

- Litotipo R: materiale di riempimento antropico caratterizzato da abbondanti frammenti di mattoni di varie dimensioni e blocchi di tufo incastonati in una matrice bruno-verde limosa-sabbiosa;
- Litotipo A: depositi principalmente limosi e in secondo luogo sabbiosi con tracce di materia organica, identificati con l'alluvione storica;
- Litotipo B: depositi di colore da marrone a giallo (più raramente grigio), sabbiosi e sabbioso-limosi;
- Litotipo C: argilla grigia e argilla limosa con un contenuto organico variabile che conferisce un colore nero localmente. Sono presenti anche occasionali livelli di torba spessi fino a 100 mm e rari strati di limo sabbioso con ghiaia;
- Litotipo D: alternanza di livelli limoso-sabbiosi, sabbioso-limosi, argilloso-limosi e argillosi. Vista nell'insieme, questa unità è di colore grigio;
- Litotipo G: prevalentemente ghiaia calcarea in una matrice grigia sabbiosa-limosa;
- Bedrock geologico: tutti gli altri depositi pre-Holocene che formano il fondo e i fianchi della paleovalle erosiva del Tevere (Figura 10-19b). Si presume che questi sedimenti sovraconsolidati non contribuiscano ai cedimenti trasmessi in superficie topografica e agli edifici.

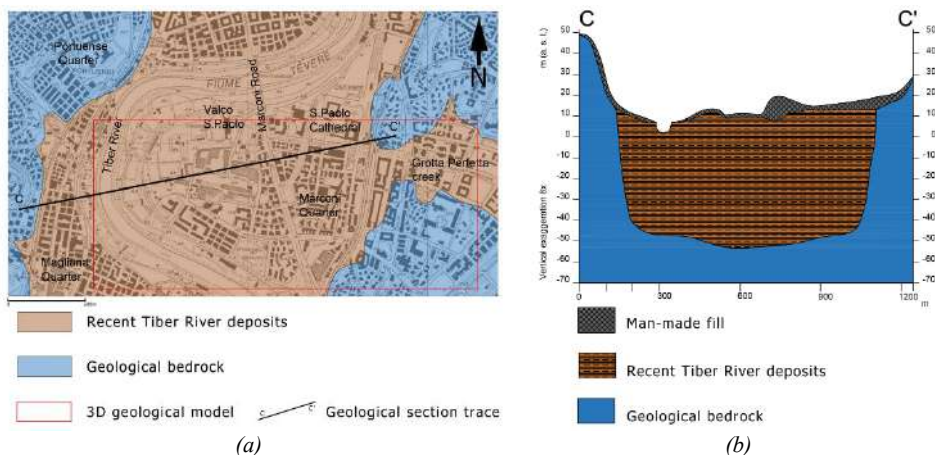


Figura 10-19 – (a) Carta geologica della valle del Tevere a Valco San Paolo (modificata da Bozzano et al., 2008); (b) Sezione geologica del quartiere Valco San Paolo, la cui linea di sezione è mostrata in (a) (modificata da Bozzano et al., 2008) (estratto da Miano et al., 2022).

Dalle informazioni raccolte riguardanti la stratigrafia dell'area di Valco San Paolo, è stato possibile ricostruire un modello 3D del sottosuolo dell'area in esame (Figura 10-20) mediante il software Leapfrog works 4.0. Sezionando il modello con un piano passante per le Torri Stellari, si ottiene il profilo stratigrafico riportato in Figura 10-21.

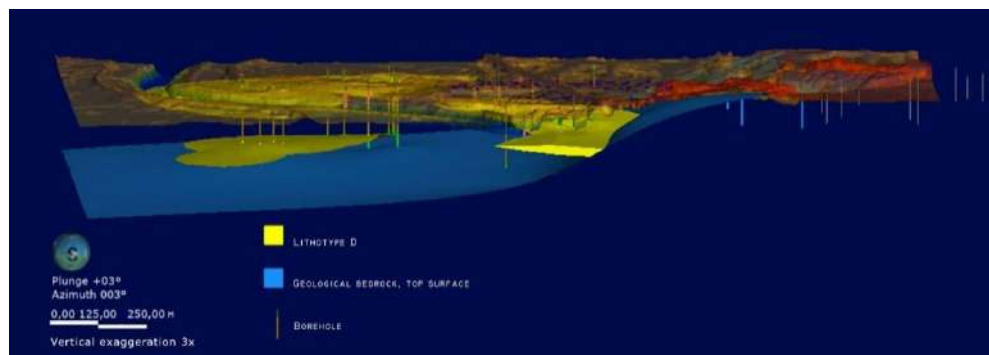


Figura 10-20 – Modello 3D della superficie superiore del substrato geologico con lenti di litotipo D e posizione dei sondaggi (estratto da Miano et al., 2022).

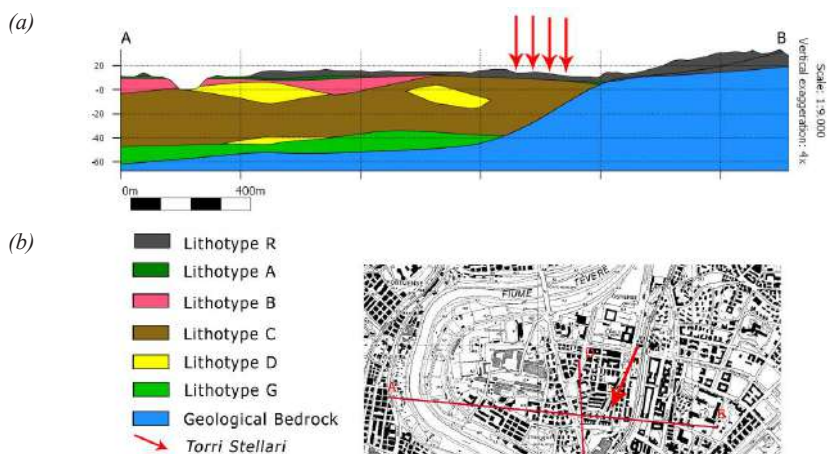


Figura 10-21 – Sezione stratigrafica estratta dal modello 3D rappresentato in Figura 10-20: (a) sezione A-B; (b) mappa topografica con linee di sezione (estratto da Miano et al., 2022).

10.3.3 Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici

In Figura 10-22 si riporta un inquadramento territoriale dell'area in cui ricade il complesso di edifici esaminato, indicato con un simbolo bianco. In particolare, si riportano i punti di misura appartenenti ai datasets ascendente e discendente, rispettivamente in Figura 10-22a e Figura 10-22b, con una scala di colori che rappresenta il corrispondente valore di velocità media di spostamento lungo la LOS, espresso in mm/anno.

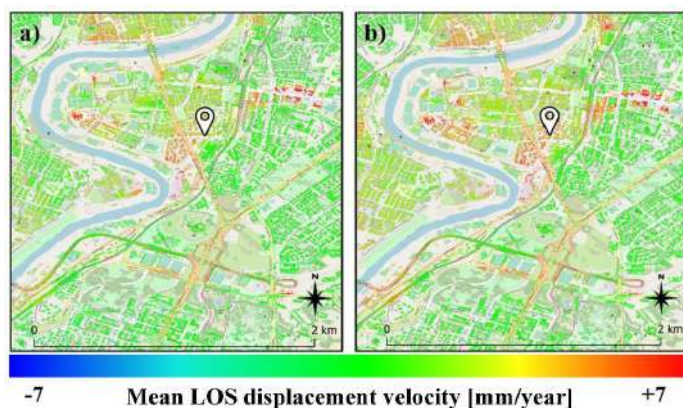


Figura 10-22 – Inquadramento territoriale delle Torri Stellari (indicate da un simbolo bianco): mappa delle velocità medie di spostamento lungo la LOS associate a ciascun punto di misura: (a) dataset ascendente; (b) dataset discendente.

La fase di modellazione 3D dei volumi delle strutture monitorate permette di ottenere una geometria accurata utile per il corretto posizionamento dei punti di misura. A titolo di esempio, in Figura 10-23 è mostrato un confronto tra il posizionamento dei punti di misura (i punti di misura appartenenti ai datasets ascendente e discendente sono indicati rispettivamente con colore rosso e verde), eseguito con il modello 3D accurato e con i volumi schematici ottenibili dalla Carta Tecnica Regionale Numerica (CTRN). Si può osservare come nel caso di utilizzo di un modello 3D accurato, i punti di misura siano opportunamente allineati lungo i volumi esterni degli edifici, tenendo conto anche della presenza del tetto a falde e dei balconi. Come si può vedere dalle rappresentazioni in pianta,

infatti, ci sono punti di misura contenuti nel poligono (che rappresentano quelli sul tetto) e altri lungo il suo perimetro (che rappresentano quelli sulle facciate). Osservando il poligono fornito dalla CTRN, invece, quasi tutti i punti di misura sono inverosimilmente contenuti all'interno della superficie.

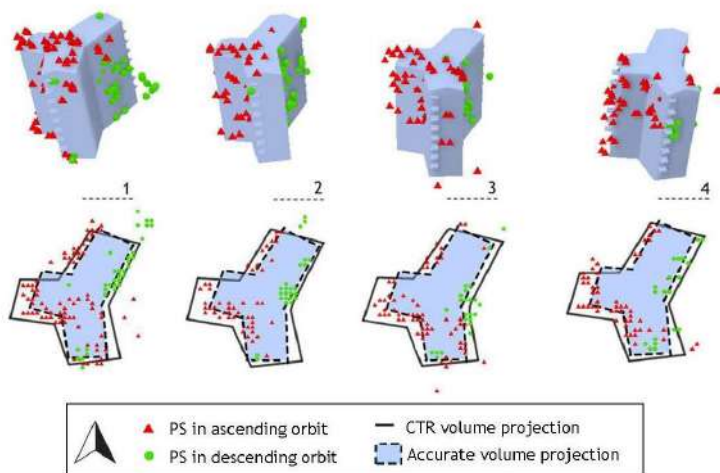


Figura 10-23 – Posizionamento dei punti di misura: a) sui volumi 3D accurati; b) sui volumi ottenuti attraverso la CTRN, nelle orbite ascendente (triangoli rossi) e discendente (cerchi verdi).

Al fine di migliorare la fase di rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici, può risultare utile la creazione di un modello 3D integrato, composto dall'unione del modello 3D inerente ai volumi esterni degli edifici e alle strutture di fondazione e del modello 3D geologico. L'integrazione dei due modelli 3D è eseguita in ambiente ArcGIS Pro, utilizzando un unico sistema georeferenziato (adottando il sistema di coordinate WGS 84) e sovrapponendo al tempo stesso i punti di misura. Il modello integrato permette di osservare i punti di misura sui volumi accurati della struttura, tenendo in considerazione anche le caratteristiche dell'area circostante. In questo modo è possibile distinguere i punti appartenenti alle diverse aree della struttura, ad esempio la copertura, le facciate o il terreno. Il modello 3D geologico permette di confrontare i profili di spostamento ottenuti attraverso le misurazioni satellitari con le caratteristiche geologiche e la stratigrafia del sottosuolo. Il modello integrato con la rappresentazione dei volumi degli edifici delle Torri Stellari, del modello geologico dell'area e dei punti di misura è rappresentato in Figura 10-24.

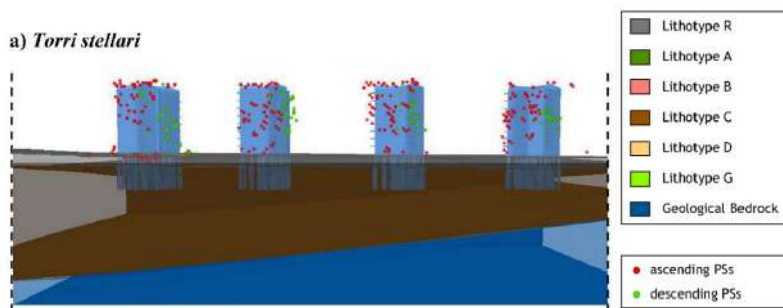


Figura 10-24 – Modello 3D integrato del complesso delle Torri Stellari (punti di misura appartenenti ai datasets ascendente e discendente indicati rispettivamente con cerchi rossi e verdi), Miano et al. (2022).

Per quanto riguarda la fase di valutazione degli spostamenti, si presentano tre approcci (cfr. capitolo 0). Il primo approccio (Ap1) è basato sulla selezione di coppie di punti di misura appartenenti ai datasets ascendente e discendente, sufficientemente vicini da poter essere considerati rappresentativi dello stesso bersaglio, a meno dell'errore legato al posizionamento. In generale, gli istanti temporali di acquisizione nei due datasets possono differire tra di loro, così come gli istanti iniziale e finale del periodo di osservazione nelle due orbite. Per questa ragione, si è proceduto ad un ricampionamento temporale, assicurando una sovrapposizione dei periodi di osservazione dei due datasets, eliminando le acquisizioni precedenti o successive al periodo di acquisizione comune. In virtù del piccolo sfasamento temporale tra le misure effettuate e del carattere quasi-statico dei fenomeni monitorati, è stato effettuato un ricampionamento della serie temporale del punto di misura in geometria ascendente rispetto agli istanti di acquisizione del punto in geometria discendente (e viceversa), mediante l'impiego di una tecnica di interpolazione lineare. In questo modo, poiché le serie temporali di spostamento vengono a riferirsi agli stessi istanti temporali, è possibile operare una combinazione delle due misurazioni lungo le LOS per la valutazione delle componenti di spostamento lungo le direzioni verticale e E-W (cfr. paragrafo 3.3). A titolo di esempio, in Figura 10-25 è mostrata una coppia di punti di misura ascendente e discendente (rispettivamente indicati con triangoli e cerchi), selezionata al livello del terreno, in prossimità della facciata sud della Torre 1. Al fine di una corretta selezione dei punti di misura sono stati tenuti in considerazione i seguenti criteri: distanza tra punti di misura ed edificio minore del massimo errore planimetrico di posizionamento (± 2 m in direzione N-S e ± 3 m in direzione E-W, cfr Tabella 2-3); distanze planimetriche ed altimetriche tra i punti di misura minori dei relativi errori di posizionamento (± 2 m in direzione N-S, ± 3 m in direzione E-W e ± 2 m in quota, cfr Tabella 2-3); tra tutte le coppie di punti di misura identificate, la coppia selezionata è quella caratterizzata dal valore di coerenza maggiore.

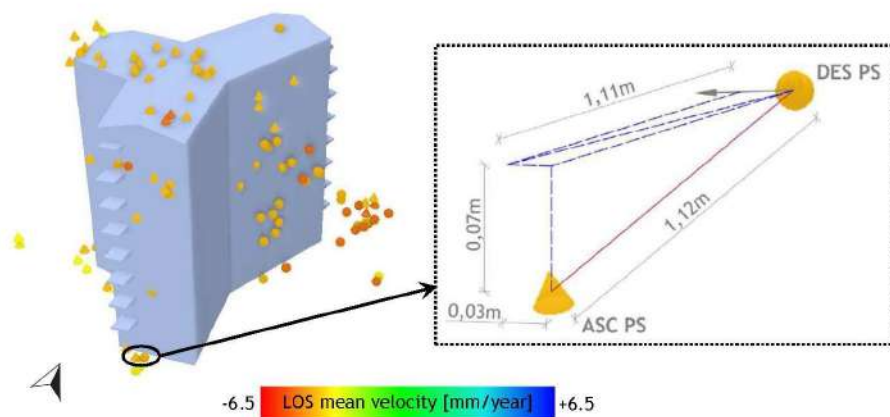


Figura 10-25 – Selezione della coppia di punti di misura ascendente (triangoli) e discendente (cerchi) dell'edificio numero 1.

Al fine di ridurre l'onere computazionale, sono stati seguiti altri approcci basati sulla valutazione del valore della velocità media di spostamento lungo le orbite ascendente e discendente, evitando così l'esecuzione del ricampionamento temporale. In particolare, il secondo approccio (Ap2) impiegato è basato sempre sulla selezione di coppie di punti di misura appartenenti ai datasets ascendente e discendente, sufficientemente vicini da poter essere considerati rappresentativi dello stesso bersaglio. Successivamente, le velocità medie di spostamento del punto di misura lungo le due orbite sono combinate al fine di valutare le componenti della velocità media di spostamento lungo le due direzioni verticale e E-W. Una stima delle componenti di spostamento del punto di misura può quindi essere effettuata moltiplicando le suddette componenti di velocità per la durata del periodo di acquisizione. Un terzo approccio (Ap3) adottato è infine basato sulla valutazione delle componenti di spostamento

del punto di misura lungo le due direzioni verticale e E-W a partire dalla costruzione di mappe delle velocità medie di spostamento, attraverso tecniche di interpolazione spaziale con utilizzo di una griglia ausiliaria di riferimento. Tale tecnica non richiede pertanto di operare una selezione dei punti di misura dei due datasets sufficientemente vicini. È opportuno sottolineare che, con riferimento all'edificio analizzato, il processo di interpolazione spaziale dei punti può essere eseguito a livello del terreno o a quote diverse, ad esempio al livello della copertura. La Figura 10-26 mostra le mappe della velocità media di spostamento lungo la LOS relativa alle due orbite e lungo le direzioni verticale e E-W, relativa all'area circostante il complesso delle Torri Stellari, a quota terreno. Nella stessa figura sono sovrapposti i punti misura posizionati a livello del terreno ed appartenenti alle due geometrie ascendente e discendente. In particolare, i punti appartenenti alla quota del terreno sono stati selezionati considerando il profilo del terreno ed impostando una banda di confidenza di ± 2 m, pari all'errore di posizionamento altimetrico (cfr Tabella 2-3).

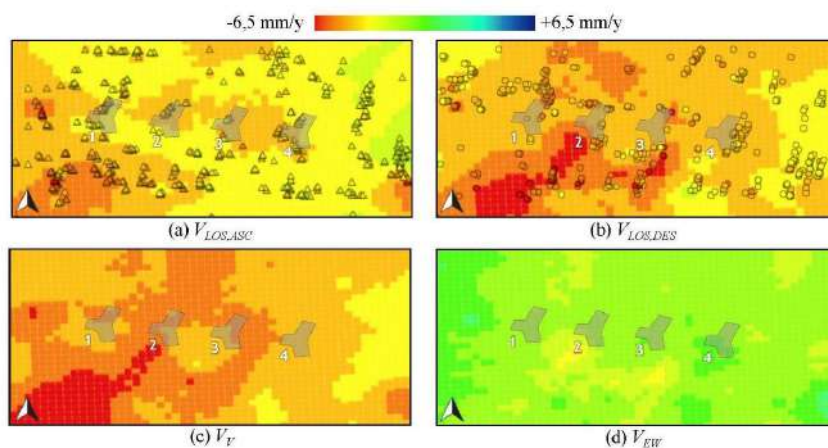


Figura 10-26 – Mappe della velocità media di spostamento dell'area circostante le Torri Stellari: dati (a) ascendenti e (b) discendenti, tecnica di interpolazione EBK; componenti della velocità media di spostamento lungo le direzioni (c) verticale e (d) E-W.

In particolare, è stata eseguito un ricampionamento spaziale dei dati ascendenti e discendenti utilizzando una tecnica di interpolazione stocastica EBK (Empirical Bayesian Kriging, §3.4.2). Per analizzare l'area alla scala dell'edificio, le mappe di velocità media di spostamento sono state proiettate su una griglia ausiliaria con dimensione pari a 5 m (Figura 10-27), comparabile con la distanza tra i pilastri dell'edificio. I valori delle componenti della velocità media di spostamento lungo le direzioni verticali e E-W possono quindi essere calcolati per ciascun punto della griglia, come mostrato in Figura 10-26c e Figura 10-26d, moltiplicando le componenti di velocità ottenute per la durata del periodo di acquisizione.

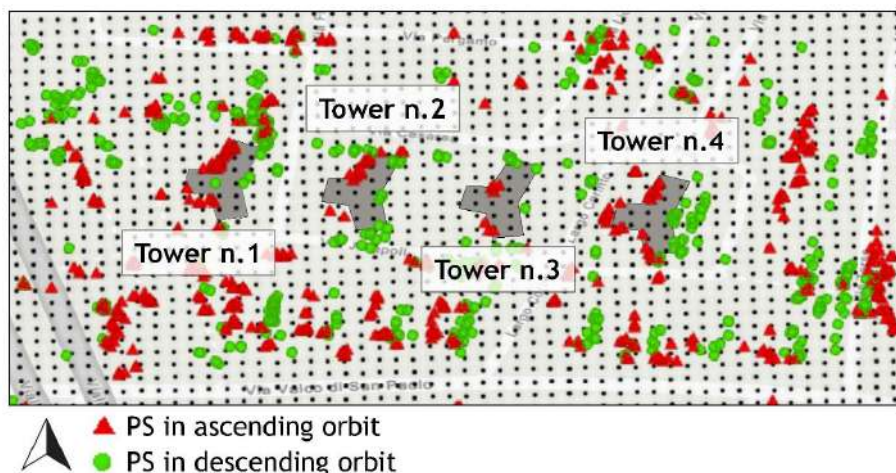


Figura 10-27 – Griglia adottata per l'area delle Torri Stellari, con sovrapposti i punti di misura ascendenti (rosso) e discendenti (verde).

Questo tipo di rappresentazione grafica evidenzia, con immediatezza, la presenza di zone affette da valori di velocità significative lungo le direzioni verticale ed E-W, e zone caratterizzate, al contrario, da un comportamento più stabile. Nella convenzione adottata, i valori negativi rappresentano spostamenti verso il basso e verso Ovest, mentre valori positivi rappresentano spostamenti verso l'alto e verso Est. Le aree coperte da punti verdi sono caratterizzate da un comportamento deformativo stabile lungo la direzione specifica, presentando valori di velocità verticale e/o E-W che variano intorno allo zero.

La Figura 10-28 mostra un confronto dei risultati ottenuti con i diversi approcci impiegati, con riferimento alla valutazione delle componenti di spostamento lungo le direzioni verticale e E-W della coppia selezionata di punti (Figura 10-25). Si evidenzia che per il primo approccio impiegato esistono due serie temporali per ciascuna componente di spostamento, a causa del doppio ricampionamento temporale eseguito (Figura 10-28a,b e Figura 10-28c,d). Le componenti di spostamento lungo le direzioni verticale e E-W sono indicate rispettivamente con cerchi di colore ciano e rosso. Nella stessa figura sono inoltre indicati i valori delle componenti della velocità media di spostamento lungo le direzioni verticale e E-W valutate con il secondo e il terzo approccio e rappresentate rispettivamente con linea continua e tratteggiata.

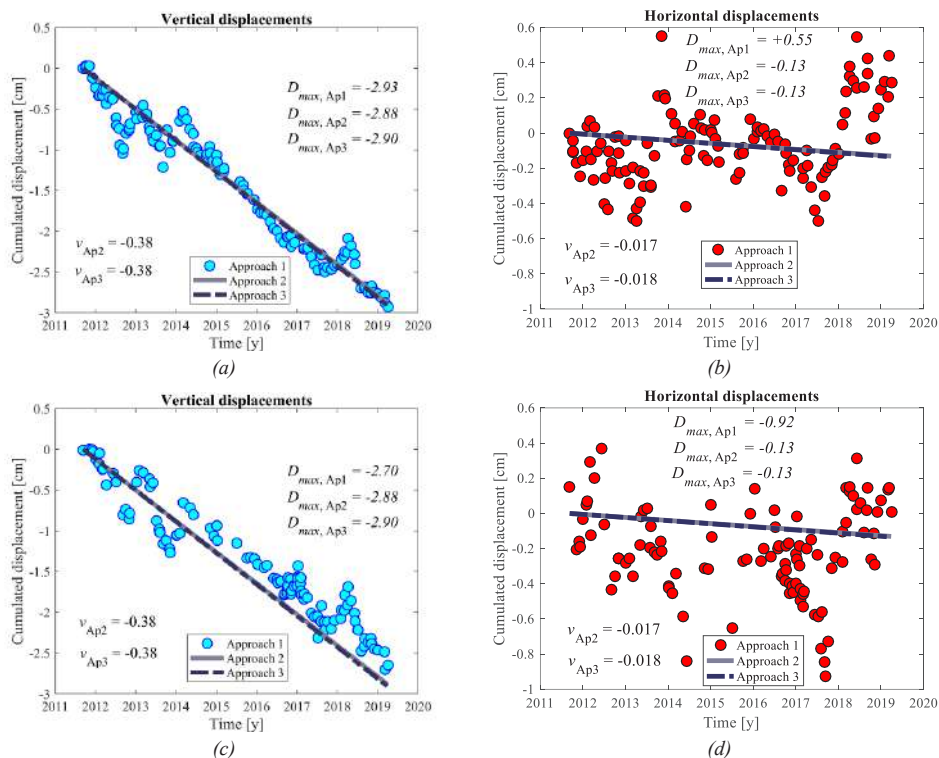


Figura 10-28 – Confronto delle componenti di spostamento lungo le direzioni verticale e E-W per le tre metodologie adottate: a) e b) ricampionamento temporale dei dati discendenti rispetto agli istanti di acquisizione della geometria ascendente; c) e d) ricampionamento temporale dei dati ascendenti rispetto agli istanti di acquisizione della geometria discendente.

10.3.4 Interpretazione dei dati interferometrici e discussione

Interpretazione del quadro di spostamento presente nell'area

Osservando la Figura 10-26c, si può notare la presenza di un fenomeno di spostamento in direzione prettamente verticale in corso, che può essere correlato alla subsidenza dell'area nei pressi del Fiume Tevere, già studiata in letteratura (Stramondo et al., 2008, Bozzano et al., 2008). In particolare, le quattro torri si trovano in una zona arancione della mappa della componente verticale di velocità media (Figura 10-26c) con valori che variano tra -5 e -3 mm/anno, mentre si trovano in una zona verde della mappa in direzione E-W (Figura 10-26d), con valori compresi tra -3 e -1 mm/anno. Si fa notare che le fondazioni delle Torri Stellari passano attraverso il riempimento antropico e si attestano direttamente nello strato costituito da Litotipo C.

Commento sull'andamento delle componenti di spostamento negli anni

Osservando la Figura 10-28, i valori più alti tra quelli ottenuti dalle due procedure di ricampionamento temporale forniscono le componenti verticale e E-W ottenute con l'approccio 1.

Si riportano due importanti chiarimenti:

1. la linea grigia continua e la linea tratteggiata viola rappresentano le componenti della velocità media lungo la direzione considerata rispettivamente per gli approcci 2 e 3. In generale, queste ultime possono essere

diverse rispetto alla linea di regressione della serie temporale degli spostamenti ricampionati dell'approccio 1;

2. nei tre approcci, l'istante iniziale coincide: se il periodo di acquisizione utilizzato nell'approccio 1 viene ridotto a causa di problemi di ricampionamento, si deve considerare lo stesso intervallo di tempo anche per gli approcci 2 e 3 per il calcolo degli spostamenti.

Osservando i risultati della coppia di punti esaminati, si può notare che la componente di spostamento orizzontale presenta un'ampia oscillazione, viceversa per la componente di spostamento verticale si ha un trend lineare decrescente nel periodo di acquisizione. In tutti i casi analizzati, i tre approcci forniscono valori simili della componente massima di spostamento verticale. Con riferimento alla componente di spostamento orizzontale, i valori sono quasi trascurabili e oscillano intorno allo zero. Infatti, gli spostamenti massimi in questa direzione sono paragonabili all'errore di misura per la singola misura di deformazione. Non è possibile identificare un trend ben definito per le componenti dello spostamento in direzione orizzontale e, da un punto di vista statistico, si perde l'applicabilità degli approcci 2 e 3, a causa dei bassi valori del gradiente della linea di regressione e dei coefficienti di determinazione. Ciò è confermato dal valore molto basso delle pendenze di regressione, pari a 0,036 e 0,008 per le curve in Figura 10-28b,d rispettivamente. In base a tali ipotesi, la procedura più efficace è rappresentata dall'approccio 1.

Diagnosi preliminare del danno strutturale

Per le Torri Stellari, che si trovano in un'area che presenta valori di spostamento significativi, si potrebbe eseguire una valutazione preliminare del danno strutturale, utilizzando formulazioni empiriche di letteratura che correlano il danno alla distorsione angolare e alla deformazione orizzontale (ad esempio, Skempton e MacDonald, 1956 per edifici a telaio in c.a.). A causa di recenti lavori di ristrutturazione delle facciate che hanno causato la perdita di qualsiasi traccia di danno esistente, non si è potuto, di conseguenza eseguire una correlazione tra danno e cedimento.

10.3.5 Riferimenti

- Bozzano F., Andreucci A., Gaeta M., Salucci R. (2000). A geological model of the buried Tiber River valley beneath the historical centre of Rome. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59, 1-2.
- Bozzano F., Caserta A., Govoni A., Marra F., Martino S. (2008). Static and dynamic characterization of alluvial deposits in the Tiber River Valley: New data for assessing potential ground motion in the City of Rome. *Journal of geophysical research* 2008, 113, B01303. doi: 10.1029/2006JB004873.
- Capolino P. (2000) Quartiere Valco San Paolo. Torri stellari. In: Bonavita A., Greco A., Remiddi G., Ferri P. (eds.). *Il moderno attraverso Roma. Guida a 200 architetture e alle loro opere d'arte*. Roma, Palombi.
- Di Biagi P. (2001) *La grande ricostruzione: il piano Ina-Casa e l'Italia degli anni cinquanta*. Donzelli, Torino.
- Di Carlo F., Miano A., Giannetti I., Mele A., Bonano M., Lanari R., Meda A., Prota A. (2021). On the integration of multi-temporal synthetic aperture radar interferometry products and historical surveys data for buildings structural monitoring. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(5), 1429-1447. doi: doi:10.1007/s13349-021-00518-4.
- Esri (2020) ArcGIS Pro 2.7.
- Leapfrog (2021), version:1.2, Seequent.
- Miano A., Di Carlo F., Mele A., Giannetti I., Nappo N., Rompato M., Striano P., Bonano M., Bozzano F., Lanari R., Mazzanti P., Meda A., Prota A., Scarascia Mugnozza G. (2022). GIS Integration of DInSAR Measurements, Geological Investigation and Historical Surveys for the Structural Monitoring of Buildings and Infrastructures: An Application to the Valco San Paolo Urban Area of Rome. *Infrastructures*, 7(7), 89. doi: doi:10.3390/infrastructures7070089
- Poretti S. (2013) *Italian Modernism. Architecture and Construction in 20th Century Italy*. Rome, Gangemi.

Skempton W., MacDonald D.H. (1956). Allowable settlement of buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 5(6), 727-768.

Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., ..., Saroli M. (2008). Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 3160-3172.

www.dati.lazio.it

Storelli F., Paolini C. (2003). Il quartiere di Valco San Paolo a Roma (1949-52). In: Capomolla R, Vittorini R (eds). *L'architettura INA CASA 1949-1963. Aspetti e problemi di conservazione e recupero*. Rome, Gangemi, pp. 32-43.

10.4 CASO STUDIO N. 3 – PONTE MORANDI ALLA MAGLIANA - (ROMA)

10.4.1 Breve descrizione del caso studio

Il Viadotto Ansa del Tevere, noto anche come Ponte Morandi alla Magliana o Viadotto Morandi, è un ponte autostradale che si trova a Roma nel quartiere della Magliana lungo l'autostrada A91 (Roma-Fiumicino). Si tratta di un ponte strallato realizzato tra il 1965 ed il 1967, in seguito ad uno smottamento di un'ansa del fiume Tevere, avvenuto il 28 giugno 1965. Tra le diverse proposte di Morandi fu scelta quella che permetteva di ridurre al minimo il numero di appoggi a terra, proprio per le caratteristiche geologicamente instabili del terreno in sito. Esso fu il primo ponte di questo tipo ad essere realizzato a Roma e, ancora oggi, l'unico viadotto di Morandi strallato a carreggiata curva. Il viadotto è realizzato in calcestruzzo armato precompresso ed è lungo complessivamente 145 m, con una carreggiata larga 24,20 m. Il viadotto è stato successivamente intitolato a Franco della Scala, direttore del Centro Sperimentale Stradale (ANAS S.p.A.) di Cesano di Roma, vittima dell'attentato terroristico che ebbe luogo nell'aeroporto di Fiumicino nel 1985.



Figura 10-29 – Viadotto Ansa del Tevere (Google Earth).

10.4.2 Dati di base del caso studio

Per il caso studio in oggetto sono stati utilizzati i dati forniti dall'Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IREA). Tali dati sono il risultato dell'elaborazione delle immagini acquisite dai satelliti COSMO-SkyMed (Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation), sia in geometria ascendente che in geometria discendente, nell'arco temporale che va da marzo 2011 a marzo 2019. In Figura 10-30a si riportano i punti di misura presenti nell'area in cui ricade la struttura esaminata (indicata con un rettangolo rosso), per entrambe le geometrie ascendente e discendente, mostrate rispettivamente con colore rosso e verde. In Figura 10-30b è mostrata invece una vista di dettaglio del Viadotto Ansa del Tevere, con sovrapposti i punti di misura.



(a)



(b)

Figura 10-30 – (a) Punti di misura appartenenti ai datasets ascendente (rosso) e discendente (verde); (b) Dettaglio in corrispondenza del Viadotto Ansa del Tevere (base Google Earth).

Di seguito si riportano delle immagini del viadotto esaminato con sovrapposti i punti di misura appartenenti ai datasets ascendente e discendente, rispettivamente in Figura 10-31a e Figura 10-31b, con una scala di colori che rappresenta il corrispondente valore di velocità media di spostamento lungo la LOS, espresso in mm/anno.

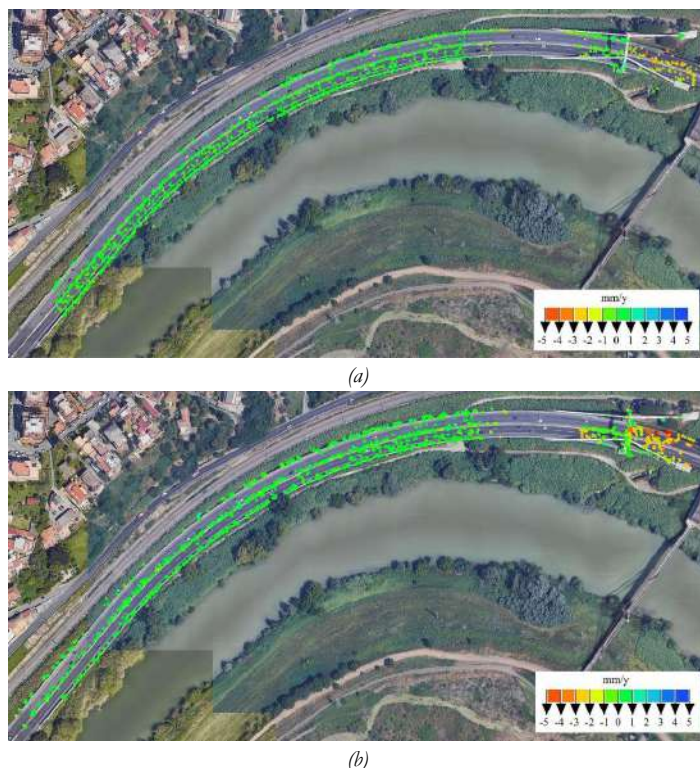


Figura 10-31 – Velocità media di spostamento lungo la LOS dei punti di misura appartenenti alla geometria di acquisizione (a) ascendente e (b) discendente.

10.4.3 Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici

L'elaborazione dei dati è stata eseguita partendo dalla visualizzazione, in ambiente QGIS e Google Earth, della distribuzione spaziale dei punti di misura. In Figura 10-32 si può osservare la presenza di una zona (cerchiata in rosso) caratterizzata dall'assenza di punti di misura, che pertanto rende impossibile effettuare analisi dirette in quella specifica zona del ponte. Le motivazioni alla base di tale fenomeno non risultano sempre univocamente identificate. Per maggiori dettagli si rimanda al paragrafo 2.6.3.



Figura 10-32 – Area della struttura esaminata caratterizzata dall'assenza di punti di misura (base Google Earth).

Inoltre, si può notare la presenza di altre zone - in particolare gli stralli del ponte - in cui sono presenti punti appartenenti solamente ad un singolo dataset, ascendente o discendente. È noto (cfr. paragrafo 3.2) come le informazioni di un singolo dataset forniscano le sole componenti di spostamento e di velocità media di spostamento lungo la LOS e possano quindi fornire solamente informazioni preliminari, escludendo la possibilità di trarre considerazioni definitive riguardo i fenomeni deformativi in atto. A titolo di esempio si riportano le immagini della struttura esaminata, con evidenziate con rettangolo di colore rosso le aree relative allo strallo Nord-Ovest (Figura 10-33a) e a quello Sud-Est (Figura 10-33b), caratterizzati dalla presenza di punti di misura appartenenti esclusivamente ad un solo dataset (ascendente per lo strallo Nord-Ovest e discendente per lo strallo Sud-Est).



(a)



(b)

Figura 10-33 – Esempi di aree con punti di misura appartenenti ad un singolo dataset: (a) Strallo Nord-Ovest; (b) Strallo Sud-Est (base Google Earth).

In riferimento alla fase di valutazione degli spostamenti, sono presentati nel seguito alcuni risultati ottenibili attraverso differenti metodologie di elaborazione.

Approccio Nearest Neighbors (Metodo 1)

La prima metodologia impiegata si basa sull'individuazione di coppie di punti di misura, appartenenti ad entrambi i datasets ascendente e discendente, sufficientemente vicini da poter essere considerati rappresentativi dello stesso bersaglio a terra, a meno dell'errore, intrinseco al sistema, legato al posizionamento dei punti nello spazio. In generale, come ben noto, i periodi temporali di acquisizione dei due datasets possono differire tra di loro, così come gli istanti iniziale e finale del periodo di osservazione nelle due orbite. Sarebbe quindi necessario un ricampionamento temporale che possa assicurare una sovrapposizione dei periodi di osservazione dei due datasets, eliminando le acquisizioni precedenti o successive al periodo di acquisizione comune. Tuttavia, una volta scelta la coppia dei punti di misura, sono stati direttamente combinati i valori della velocità media di spostamento lungo le due orbite, al fine di valutare le componenti della velocità media di spostamento lungo le due direzioni verticale e

E-W, evitando così l'esecuzione del ricampionamento temporale e considerando nullo il valore di velocità in direzione N-S (cfr. paragrafo 3.3). In particolare, il calcolo della velocità media di spostamento lungo le due direzioni verticale e E-W è stato eseguito a partire dai valori della velocità media di spostamento lungo le due orbite fornite direttamente dal CNR-IREA (Metodo 1.a), e da quelli ottenuti mediante regressione lineare delle serie di spostamento di entrambe le geometrie di acquisizione (Metodo 1.b). Una stima delle componenti di spostamento del punto di misura può quindi essere effettuata moltiplicando le suddette componenti di velocità media per l'intera durata del periodo di acquisizione.

In Figura 10-34 sono mostrate le coppie dei punti di misura esaminate, in corrispondenza dell'impalcato Ovest, dell'impalcato Est e della sommità della pila, con le relative serie di spostamento lungo la LOS. In Tabella 10-1 sono mostrati, invece, i valori della velocità media di spostamento lungo le direzioni verticale e E-W, ottenuti nei diversi punti esaminati. Si può osservare un buon accordo tra i risultati ottenuti con le due modalità di calcolo della velocità media di spostamento, con una differenza più marcata nel caso di valutazione della componente E-W per la coppia di punti individuata nell'impalcato Est.

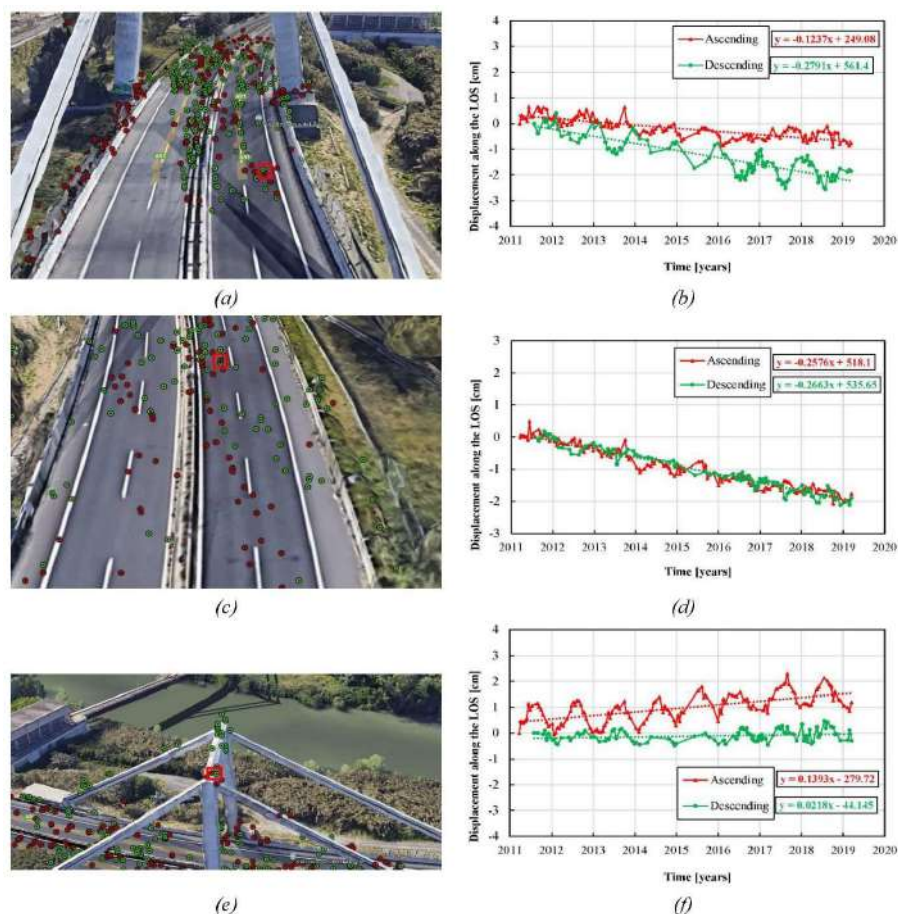


Figura 10-34 – (a) Coppia di punti analizzata, Impalcato Ovest; (b) Serie di spostamento lungo la LOS, Impalcato Ovest; (c) Coppia di punti analizzata, Impalcato Est; (d) Serie di spostamento lungo la LOS, Impalcato Est; (e) Coppia di punti analizzata, Sommità pila (base Google Earth); (f) Serie di spostamento lungo la LOS, Sommità pila.

Tabella 10-1. Velocità media di deformazione lungo la direzione verticale e E-W, metodologia 1.a e 1.b.

	Impalcato Ovest		Impalcato Est		Testata Pila	
	Metodo 1.a	Metodo 1.b	Metodo 1.a	Metodo 1.b	Metodo 1.a	Metodo 1.b
V_{vert} [cm/anno]	-0.246	-0.242	-0.31	-0.307	0.078	0.089
$V_{\text{E-W}}$ [cm/anno]	-0.141	-0.142	0.023	0.005	-0.086	-0.119

Approccio Grid-subsampling (Metodo 2)

La seconda metodologia impiegata si basa, invece, su tecniche di sotto-campionamento su griglia regolare. Nello specifico tale metodo è stato applicato limitatamente al caso dell’impalcato del ponte. A tale scopo, l’area di interesse è stata suddivisa in celle di ricampionamento quadrate di dimensione 6 x 6 m (Figura 10-35). La dimensione della maglia è stata definita tenendo in considerazione la larghezza dell’impalcato del ponte, pari a circa 24 m. I punti appartenenti all’impalcato sono stati selezionati applicando un filtro sul valore della quota dell’impalcato stesso, escludendo quindi dall’analisi i punti relativi a quote diverse. Assumendo poi, per semplicità, la complanarità dei punti di misura selezionati, al baricentro di ciascuna cella è stato assegnato un valore di velocità di spostamento, ottenuto come media dei valori di velocità dei punti di misura che ricadono all’interno della cella stessa, sia per la serie di dati ascendente che discendente. Infine, le velocità medie di spostamento del punto di misura lungo le due orbite sono state combinate, ricavando le componenti della velocità media di spostamento lungo le due direzioni, verticale e E-W. Analogamente al caso precedente relativo alla Metodologia 1, il calcolo delle componenti della velocità media di spostamento lungo le due direzioni verticale e E-W, è stato eseguito a partire dai valori della velocità media di spostamento lungo le due orbite, valutati come media dei valori forniti direttamente dal CNR-IREA (Metodo 2.a), e mediante regressione lineare della media delle serie di spostamento di entrambe le geometrie di acquisizione (Metodo 2.b). In Figura 10-35a e Figura 10-35b sono mostrati i quadranti, appartenenti all’impalcato Ovest (evidenziato in ciano) e all’impalcato Est (evidenziato in magenta), all’interno dei quali ricade il punto analizzato nella prima metodologia e di cui si mostrano i risultati ottenuti.

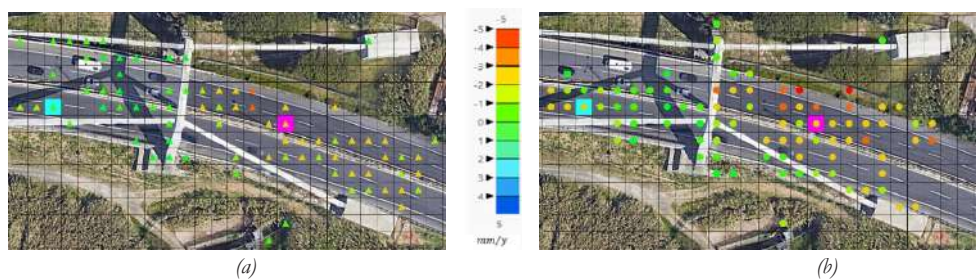


Figura 10-35 – Mappa delle velocità medie di spostamento lungo la LOS ottenute mediante sotto-campionamento su griglia regolare, per la geometria (a) ascendente e (b) discendente.

In Figura 10-36a e Figura 10-36b sono riportate le serie di spostamento lungo la LOS, rispettivamente per i quadranti appartenenti all’impalcato Ovest e all’impalcato Est, all’interno dei quali ricade il punto analizzato nella prima metodologia. Si sottolinea che tali curve sono ottenute mediando i valori delle serie di spostamento dei punti che ricadono all’interno del quadrante stesso. In Tabella 10-2 sono mostrati invece i valori della velocità media di spostamento lungo la direzione verticale e E-W per i quadranti considerati, con i due Metodi 2.a e 2.b. Anche in questo caso si può osservare un buon accordo tra i risultati ottenuti con le due modalità di calcolo della velocità media di spostamento.

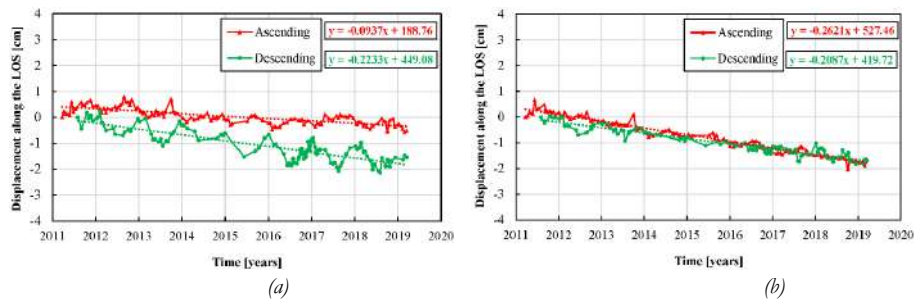


Figura 10-36 – (a) Media delle serie di spostamento lungo la LOS, Impalcato Ovest; (b) Media delle serie di spostamento lungo la LOS, Impalcato Est.

Tabella 10-2. Velocità media di deformazione lungo la direzione verticale e E-W, metodologia 2.a e 2.b.

	Impalcato Ovest		Impalcato Est	
	Metodo 2.a	Metodo 2.b	Metodo 2.a	Metodo 2.b
V_{vert} [cm/anno]	-0.187	-0.191	-0.274	-0.273
$V_{\text{E-W}}$ [cm/anno]	-0.131	-0.119	0.073	0.064

Interpolazione e combinazione dei dati presenti nell'intera area afferente al viadotto (Metodo 3)

Un ulteriore approccio impiegato consiste nell'applicazione di una tecnica di interpolazione spaziale (cfr. paragrafo 3.4) ai punti di misura presenti a quota impalcato, al fine della costruzione di mappe interpolate dei valori delle componenti della velocità media di spostamento nelle direzioni verticale e E-W. In prima analisi, si potrebbe pensare di eseguire un'interpolazione sull'intera struttura, considerando tutti i punti dell'impalcato. In Figura 10-37a e Figura 10-37b sono mostrate le mappe delle componenti di velocità media discendenti e ascendenti, ottenute mediante tecnica di interpolazione *Kriging Empirico Bayesiano* (EBK) applicata a tutti i punti dell'impalcato della struttura. Nelle figure sono mostrati, inoltre, tutti i PS presenti nell'area, al fine di evidenziare l'andamento deformativo dell'intera area. A causa della mancanza di punti di misura nella parte centrale dell'impalcato, come mostrato in Figura 10-32, è stata effettuata separatamente una interpolazione in ciascuna delle due aree poste a sinistra e a destra di tale porzione (Zona Ovest e Zona Est), al fine di evitare interpolazioni dei valori nella parte priva di dati. I punti di misura a cui è stata applicata la tecnica sono quelli relativi al solo impalcato del viadotto. In Figura 10-38a e Figura 10-38b sono quindi mostrate le mappe delle componenti di velocità media di spostamento, rispettivamente in direzione Est-Ovest e verticale, ottenute tramite interpolazioni separate a partire dai dati presenti nelle due aree dell'impalcato identificate e successiva combinazione.

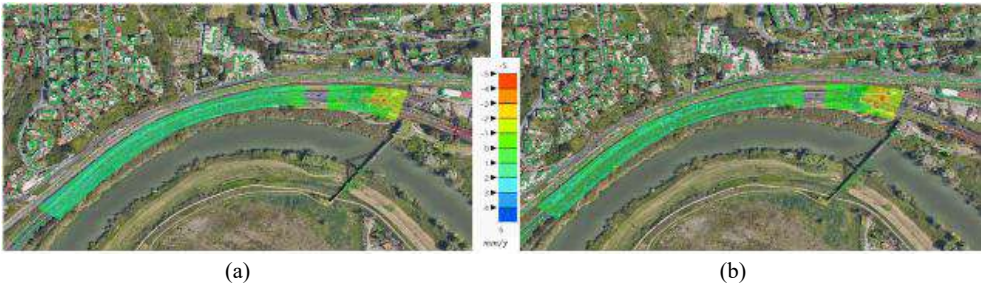


Figura 10-37 – Mappe interpolate: componente lungo l'orbita (a) discendente e (b) ascendente della velocità media di spostamento per i punti dell'impalcato ottenute mediante EBK.

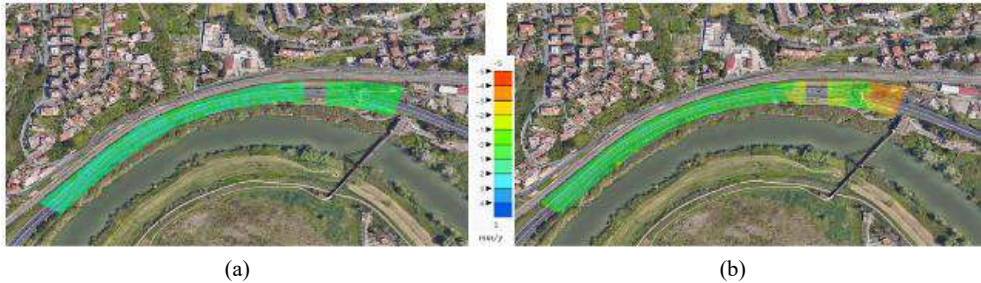


Figura 10-38 – Mappe delle componenti della velocità media di spostamento ottenute tramite interpolazione spaziale (EBK/IDW) applicate separatamente alle zone Ovest e Est e successiva combinazione: (a) componente Est-Ovest e (b) componente verticale.

10.4.4 Interpretazione dei dati interferometrici e discussione

Quadro di spostamento presente nell'area

Dall'analisi effettuata emerge una prevalenza della componente verticale della velocità media di spostamento, come mostrato in Tabella 10-3. Tale risultato trova conferma nel fatto che la velocità media di spostamento lungo la LOS presenta lo stesso segno sia in geometria ascendente sia discendente. Osservando la Figura 10-31, nonché la Tabella 10-3, si può inoltre notare che il fenomeno di spostamento, prevalentemente riscontrabile lungo la direzione verticale, sia di maggiore intensità nell'area relativa all'impalcato Est. Una possibile causa potrebbe essere identificata nell'esistenza di un fenomeno di subsidenza.

Tabella 10-3. Confronto dei risultati ottenuti con i metodi 1.a, 1.b, 2.a e 2.b.

	Impalcato Ovest				Impalcato Est			
	Metodo 1.a	Metodo 1.b	Metodo 2.a	Metodo 2.b	Metodo 1.a	Metodo 1.b	Metodo 2.a	Metodo 2.b
V_{vert} [cm/anno]	-0.246	-0.242	-0.187	-0.191	-0.31	-0.307	-0.274	-0.273
$V_{\text{E-W}}$ [cm/anno]	-0.141	-0.142	-0.131	-0.119	0.023	0.005	0.073	0.064

Componente verticale della velocità media di spostamento

Con riferimento alla sola determinazione della velocità verticale, è interessante notare come il Metodo 1, di tipo locale, fornisca un valore più alto della velocità media di spostamento rispetto al Metodo 2, che considera una media dei valori della velocità di spostamento dei punti che ricadono all'interno del quadrante della griglia considerato.

Influenza dello schema strutturale sul ricampionamento spaziale

È importante evidenziare che nel caso di ponti come quello in esame, gli spostamenti delle diverse parti della struttura potrebbero non essere direttamente correlati tra loro, a causa del complesso schema strutturale. Al fine di tenere conto delle diverse condizioni al contorno dei vari elementi strutturali coinvolti, un approccio alternativo potrebbe consistere nell'esecuzione di un ricampionamento spaziale distinto per ogni porzione omogenea della struttura.

Con riferimento al caso studio in esame, il ponte è costituito dai seguenti elementi schematizzati in Figura 10-39:

- Travatura A-B, lunghezza 63 m, schema di trave appoggiata – appoggiata: un primo appoggio si trova in corrispondenza della pila terminale A del tratto di viadotto non interessato dallo smottamento, mentre l'altro appoggio si trova in corrispondenza della sella Gerber B, ricavata nella testata della travatura B-D successiva;
- Travatura B-D, lunghezza 74 m, incernierata all'estremità D e sostenuta in C da una coppia di tiranti in cemento armato precompresso (tiranti rivolti ad ovest);
- Due antenne centrali, altezza 34 m ciascuna, unite in alto da una traversa. Da esse partono quattro tiranti in cemento armato precompresso, due rivolti ad est (verso Roma) e due rivolti ad ovest (verso Fiumicino);
- Tiranti rivolti ad ovest, i quali agganciano la carreggiata nel punto centrale dell'avvallamento C, creatosi a seguito dello smottamento;
- Tiranti rivolti a est, con funzione di controbilanciare le spinte, ancorati al suolo in F con possenti contrappesi.

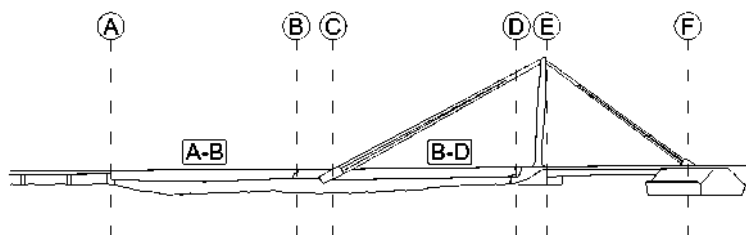


Figura 10-39 – Schema strutturale dell'opera.

Pertanto, con riferimento allo schema strutturale dell'opera in oggetto, si potrebbe pensare di svolgere l'analisi suddividendo l'impalcato in cinque differenti zone in funzione dello schema strutturale stesso, considerando i punti appartenenti ai singoli tratti in modo separato rispetto al resto dell'opera, poiché caratterizzati da uno stesso tipo di comportamento.

10.5 CASO STUDIO N. 4 – COMPLESSO DEL SAN MICHELE A RIPA GRANDE (ROMA)

10.5.1 Breve descrizione del caso studio

Il fabbricato oggetto di studio è il complesso monumentale del San Michele situato lungo il fiume Tevere in corrispondenza del porto di Ripa Grande (Figura 10-40) costruito tra la fine del XVII e l'inizio del XVIII secolo, oggi di proprietà demaniale. Si tratta di un complesso realizzato in più fasi (Figura 10-41) e che successivamente ha subito numerose trasformazioni e, a partire dal 1973, consistenti interventi di restauro. Ad oggi il complesso è adibito per la maggior parte della sua superficie ad uffici.

Il fabbricato presenta una forma quasi rettangolare e occupa un'area di circa 25000 m², mentre la superficie totale coperta del complesso è di circa 19000 m². Si sviluppa su 4 livelli più un seminterrato, con una volumetria totale di quasi 350000 m³. In alcune parti del Complesso è presente anche un piano ammezzato. Il fabbricato può essere suddiviso in 5 macro-unità, sostanzialmente coincidenti con i cortili interni (Figura 10-42). Questa suddivisione può essere assimilata, riferendosi a quanto riportato nella Direttiva del 2011 per gli edifici in aggregato, all'individuazione delle unità minime di analisi in cui si può scomporre il complesso.

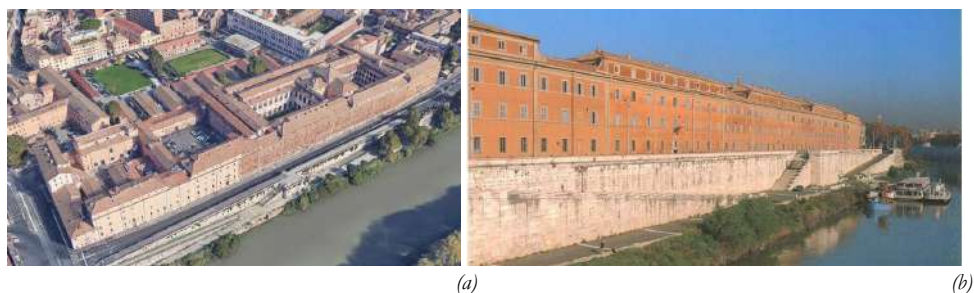
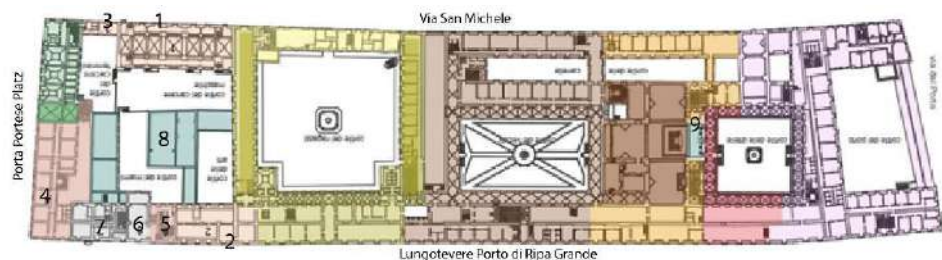


Figura 10-40 – (a) Inserimento del complesso del San Michele nel contesto urbano (base Google Earth); (b) Vista dal Tevere



Main construction phases of the San Michele complex:

1686-1689: Odescalchi factory	1710-1715: S. Michele church
1693-1701: raising of factory wings	1714-1717: hospice
1693-1701: woolen mill construction	1719-1720: girls' school
1686-1689: prison (1); barn (2); dyeing plant (3)	1734-1735: women's prison
1706-1709: custom office barracks (4); stairs (5)	from 1760: women's prison extension
1708-1713: hospice	from 1790: girls' school finishing
1710-1714: church (6); warehouse (7)	1831-1834: constructions in the arts' court (8); S. Michele church absidiae (9)

Figura 10-41 – Fasi costruttive del complesso del San Michele fino al 1834

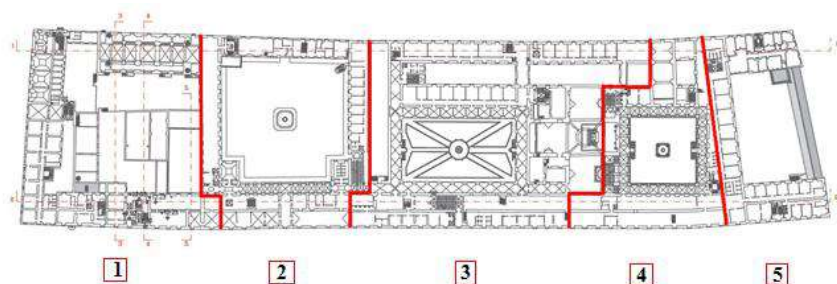


Figura 10-42 – Suddivisione del complesso del San Michele in macro-unità e loro numerazione

In base alle informazioni ed ai documenti storici, la muratura che costituisce la maggior parte del complesso è una muratura di tufo che presenta ricorsi in mattoni e che ha subito negli anni interventi di consolidamento con iniezioni di miscele leganti. Viste le dimensioni del fabbricato non si ha, invece, una piena e sicura conoscenza delle caratteristiche costitutive e costruttive di tutti gli impalcati presenti. In generale sono presenti volte poste prevalentemente al piano terra, anch'esse oggetto di interventi di consolidamento, mentre i solai ai piani superiori, originariamente in legno, sono stati sostituiti nella maggior parte dei casi da solai misti acciaio – calcestruzzo. Le coperture sono state integralmente sostituite e ad oggi sono in legno con un solaio di sottotetto in struttura mista.

10.5.2 Dati di base del caso studio

A supporto della rappresentazione, elaborazione ed interpretazione dei dati interferometrici, per questo caso studio si sono utilizzati alcuni strumenti cartografici derivati da telerilevamento aereo e satellitare (cfr. paragrafo 2.7.1).

Un primo livello di sfondo usato per rendere più semplice il processo di localizzazione dei punti di misura e per creare le varie mappe presentate in questo caso studio, è costituito dal servizio Google Maps. Allo stesso fine si possono usare altri servizi web, come ad esempio le mappe di Bing o, in alternativa, altri prodotti cartografici, quali le ortofoto prodotte da IGM e rese disponibili come servizio WMS. Tra tutti, il servizio di mappe satellitari di Google si è dimostrato, per il caso studio in oggetto, quello con la migliore risoluzione.

Per quanto riguarda il DTM utilizzato, si è fatto riferimento al database geotopografico della regione Lazio in cui è disponibile una griglia di punti quotati con maglia 5 m e resi disponibili in formato DXF. Tali punti sono stati ricavati dalla cartografia tecnica regionale numerica (CTRN) del 2002-2003. L'accuratezza in quota è pari a quella generale della CTRN che, per punti collimati, è di ± 1.20 m. Tali punti quotati sono stati scaricati per i diversi fogli disponibili e sono stati uniti e successivamente rasterizzati mediante l'utilizzo del software QGIS e del pacchetto GDAL ottenendo così un DTM dell'intera zona della regione Lazio in cui si hanno a disposizione i dati satellitari (cfr. Appendice 1).

Per quanto riguarda gli edifici, si è fatto riferimento in questo caso studio alla Carta Tecnica Regionale Numerica (CTRN) alla scala 1/5000 del 2014 disponibile nel portale opendata della regione Lazio che si può scaricare in formato shapefile; in particolare si è fatto riferimento al layer delle unità volumetriche (UN_VOI) che fornisce per ogni unità volumetrica, la geolocalizzazione in pianta e in quota, la forma e le dimensioni in pianta, l'altezza volumetrica e la quota topografica a livello della linea di gronda.

L'altezza topografica ricavata dalla CTRN delle unità volumetriche (i.e. la coordinata Z del poligono) che costituiscono il complesso monumentale è riportata in Figura 10-43. Il valore medio risulta pari a 14.75 m. Si è valutato il valore medio e la deviazione standard dell'altezza topografica del DTM attraverso un'analisi zonale in cui si estraggono alcune statistiche sui valori assunti dai pixel di un layer raster (i.e. il DTM in questo caso) nella zona definita da uno o più poligoni (i.e. le unità volumetriche). Attraverso questa analisi si è valutata una altezza media del DTM pari a 15.19 m e una deviazione standard pari a 0.57 m, come atteso in ottimo accordo con il dato rilevato dalla CTRN.

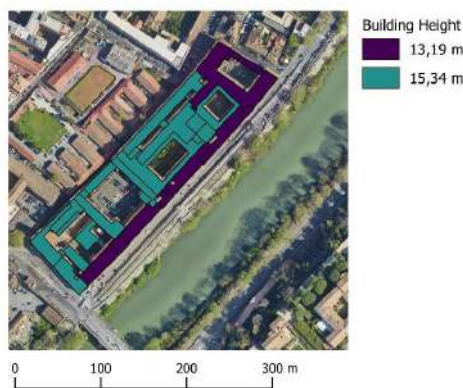


Figura 10-43 – Altezza topografica delle unità volumetriche del complesso San Michele ottenuta da CTRN 2014.

Al fine di un ulteriore confronto, si riporta in Figura 10-44 la zona intorno al complesso di interesse rappresentata con una scala di colore proporzionale all'altezza topografica fornita dal DTM utilizzato (DTM CTRN 2002-2003 Regione Lazio – risoluzione pari a 5 m) e da altri DTM spesso utilizzati in letteratura e resi disponibili gratuitamente: il DTM EU-DEM v.1.1 prodotto dal Copernicus Land Monitoring Service (risoluzione pari a circa 25 m) e il DTM 1 arcsec prodotto dalla Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (risoluzione pari ad 1 arcsec, corrispondenti a circa 30 m). Si possono osservare differenze anche di oltre 5-6 metri tra i diversi DTM. Eseguendo le analisi zonali si è valutata l'altezza topografica media per EU-DEM v.1.1 e per SRTM 1 arcsec, pari rispettivamente a 20.22 m (dev. Standard 2.07 m) e 20.38 m (dev. Standard 2.87 m).

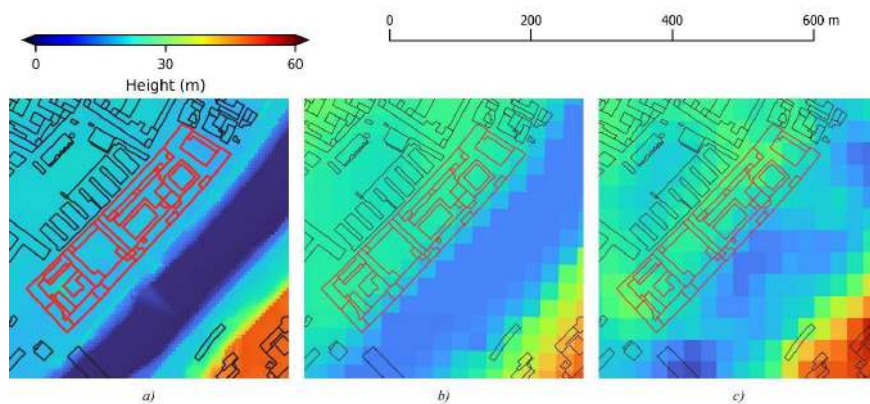


Figura 10-44 – Confronto tra diversi DTM nella zona del caso studio (individuato in rosso): a) CTRN 2002-2003; b) EU-DEM v.1.1 Copernicus; c) SRTM 1 arcsec.

Una vista 3D di confronto tra i diversi DTM considerati per il complesso del San Michele è riportata in Figura 10-45 dove sono evidenti le significative differenze riscontrate in termini di posizionamento del complesso rispetto al suolo. È quindi di fondamentale importanza, prima di eseguire qualsiasi elaborazione dei dati satellitari, avere consapevolezza degli strumenti che si stanno utilizzando al fine di poter individuare i punti di misura appartenenti al suolo con una approssimazione nota. Solo in questo modo la successiva fase di interpretazione del comportamento strutturale alla scala dell'edificio può essere effettuata con un grado di affidabilità adeguato.

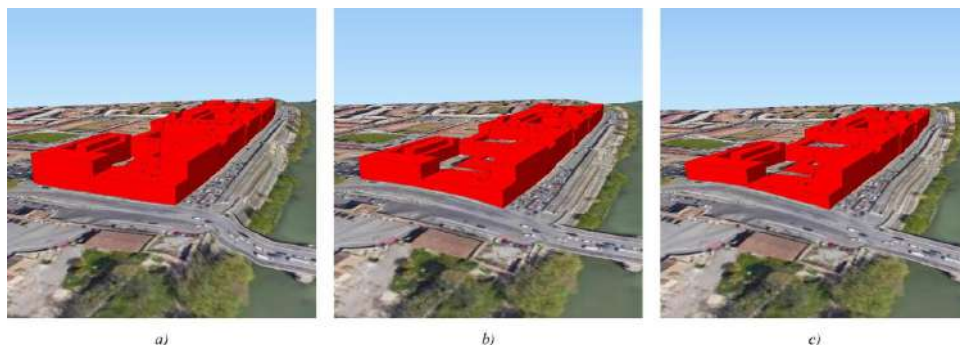


Figura 10-45 – Vista 3D di confronto tra diversi DTM nella zona del caso studio (individuato in rosso): a) CTRN 2002-2003; b) EU-DEM v.1.1 Copernicus; c) SRTM 1 arcsec.

10.5.3 Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici

Per la rappresentazione e la successiva elaborazione dei dati satellitari relativi ad entrambe le orbite ascendente (ASC) e discendente (DES), si sono sviluppati plugin e routine ad-hoc in linguaggio Python nell'ambiente del software open-source QGIS. Ad esempio, si è sviluppato uno script in grado di fornire rappresentazioni tridimensionali customizzate dei dati come coni di lunghezza e colore proporzionali alla velocità media annua di deformazione e direzione corrispondente alla linea di vista (LOS); inoltre si è realizzato uno script in grado di combinare i dati delle orbite ASC e DES mediante la tecnica dei punti vicini (*nearest neighbors*, cfr. 3.3.2) ed uno script per la combinazione mediante la tecnica del sotto-campionamento (*grid sub-sampling*, cfr. 3.3.2); un altro script realizzato riguarda la selezione, rappresentazione e combinazione dei punti appartenenti ad un allineamento scelto dall'utente.

Rappresentazioni a scala territoriale

In Figura 10-46 sono riportate le mappe delle velocità medie di spostamento lungo la LOS relative ai datasets ascendente (ASC) e discendente (DES) in una zona di circa 5 km² attorno al complesso. Come riportato al paragrafo 3.2, per convenzione alle misure di spostamento o di velocità media di spostamento in avvicinamento al satellite si assegna segno positivo (rappresentate in blu) mentre a quelle in allontanamento dal satellite si assegna segno negativo (rappresentate in rosso). Nell'area di interesse il range di velocità media di spostamento è compreso tra -6.3 mm/anno e 5.7 mm/anno. Il valore medio risulta pari a -0.3 mm/anno con una deviazione standard di 0.65 mm/anno. Si può notare una zona caratterizzata da un maggior fenomeno deformativo nella parte a sud del riquadro e in parte nella zona a nord.

Si sono estratte le altezze topografiche dei punti di misura nei due dataset ASC e DES e si è calcolato un istogramma di frequenze normalizzate (Figura 10-47); si può osservare come le altezze nei due dataset presentino un evidente shift pari a circa 5 m. Questo può essere dovuto ad una non perfetta geo-localizzazione (probabilmente per un errore nella definizione della quota del reference point). Quando, come in questo caso, si tratta di una traslazione verticale rigida, questo non rappresenta un problema e non inficia la qualità del prodotto interferometrico ottenuto. Nei software GIS è possibile solitamente correggere questo dato in real-time durante la creazione di mappe o l'esecuzione di query. Eventualmente è possibile processare tutto il dataset per effettuare una correzione definitiva. In Figura 10-48 si riportano i punti di misura con il colore proporzionale alla coerenza temporale. Come noto, tale valore (che può assumere valori tra 0 e 1) rappresenta il grado con cui i dati sperimentali corrispondono al modello di fase adottato, indicando quindi quanto bene il modello adottato riesce a rappresentare la variabilità osservata per ogni pixel nell'arco temporale di indagine. Per l'area del caso di studio la coerenza temporale è compresa tra 0.35 (valore minimo imposto come filtro per l'output dei punti di misura durante l'elaborazione interferometrica) e 0.98 con un valore medio di 0.52 e una deviazione standard di 0.16.

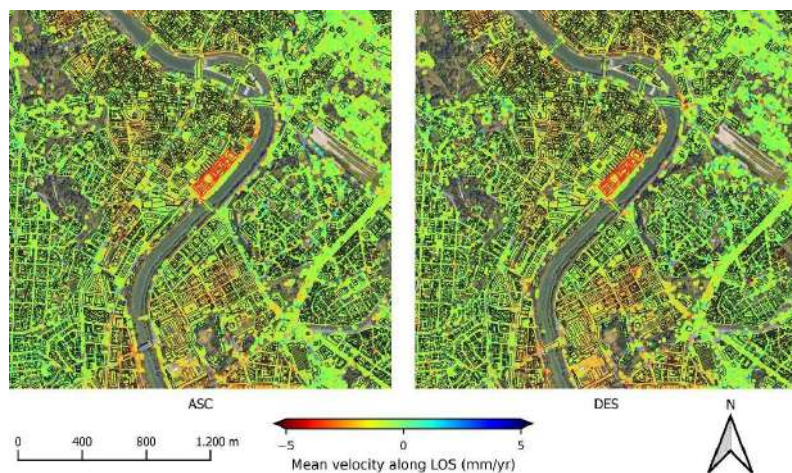


Figura 10-46 – Rappresentazione su mappa delle velocità medie annue lungo la LOS dei punti di misura appartenenti ai dataset ascendente (ASC) e discendente (DES) in un'area di circa 5 km² intorno all'edificio di interesse.

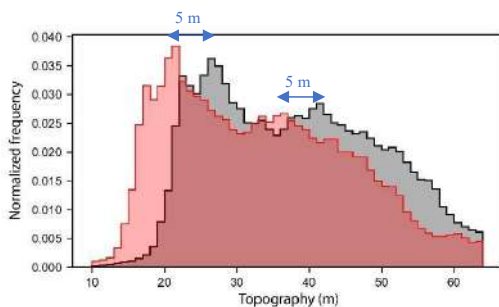


Figura 10-47 – Istogramma delle altezze topografiche dei punti di misura nei dataset ASC (in nero) e DES (in rosso): è visibile uno shift tra i due dataset di circa 5 metri.

La distribuzione delle coerenze è asimmetrica verso i valori più bassi di coerenza, come illustrato in Figura 10-49. Infatti, si può osservare in Figura 10-48 come il numero di punti totale nella zona di interesse sia pari a circa 650 mila punti, mentre i punti di misura caratterizzati da una coerenza maggiore o uguale a 0.7 siano solo poco meno di 135 mila punti (corrispondenti a circa il 20% del totale). Alla scala dell'edificio è quindi particolarmente utile poter disporre di dati anche con coerenza bassa per non perdere informazioni importanti. Tali dati devono però essere attentamente interpretati per poter essere utilizzati con un grado di affidabilità adeguato. In generale una coerenza bassa non indica quindi necessariamente che il dato debba essere scartato, ma che deve essere, ad esempio, confrontato con il comportamento dei punti vicini.

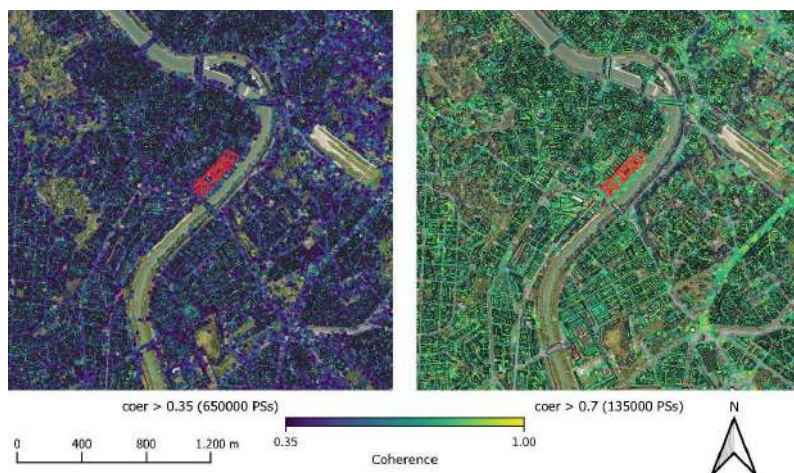


Figura 10-48 – Rappresentazione su mappa della coerenza dei punti di misura appartenenti ai dataset ascendente e discendente in un'area di circa 5 km² intorno all'edificio di interesse filtrati per diversi valori di coerenza.

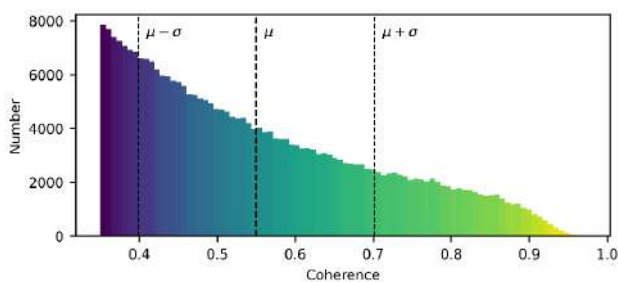


Figura 10-49 – Distribuzione dei valori di coerenza nella zona di interesse.

Rappresentazioni alla scala dell'edificio

In Figura 10-50 sono riportate le mappe di velocità media lungo la LOS per i due dataset ASC e DES alla scala dell'edificio. La velocità media è di circa -0.9 mm/anno per entrambi i dataset, con valore minimo di circa -5 mm/anno per il dataset ASC e -3.8 mm/anno per il dataset DES e valori massimi di circa 1.5 mm/anno per il dataset ASC e 2.3 mm/anno per il dataset DES. È interessante notare come i valori massimi e minimi siano caratterizzati da valori di coerenza piuttosto bassi (minori di 0.45) e debbano quindi essere valutati con particolare attenzione, anche controllando i valori dei punti loro adiacenti.

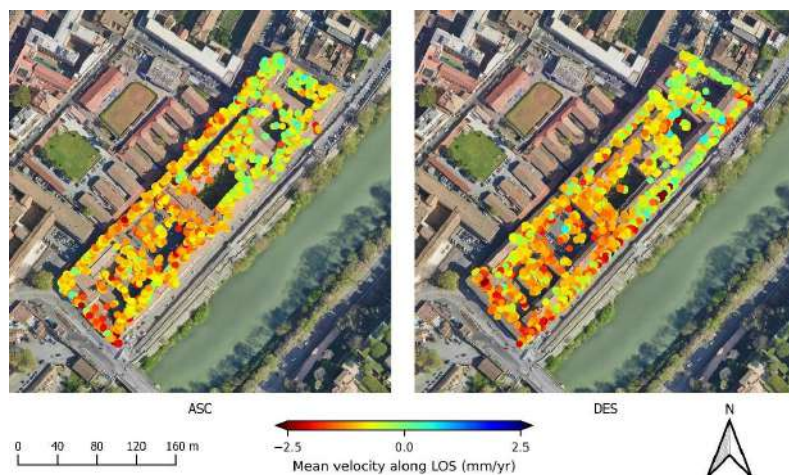


Figura 10-50 – Velocità media lungo la LOS dei PS appartenenti al complesso San Michele per i dataset ASC e DES.

Osservando meglio la porzione lungo il lato sud-est della struttura con una visualizzazione tridimensionale (realizzata mediante l'utilizzo di script sviluppati ad-hoc descritti precedentemente) si nota come il dato indicato con il quadrato giallo in

sia un dato anomalo rispetto ai punti intorno. Tale dato è in effetti caratterizzato da una coerenza molto bassa e pari a circa 0.35. Viceversa, nell'angolo sud del complesso (quadrato azzurro in Figura 10-51) si può osservare un dato del dataset DES caratterizzato da una coerenza molto bassa (circa 0.35) che in questo caso risulta ben correlato con i punti circostanti anche appartenenti all'altro dataset (i.e. dataset ASC).

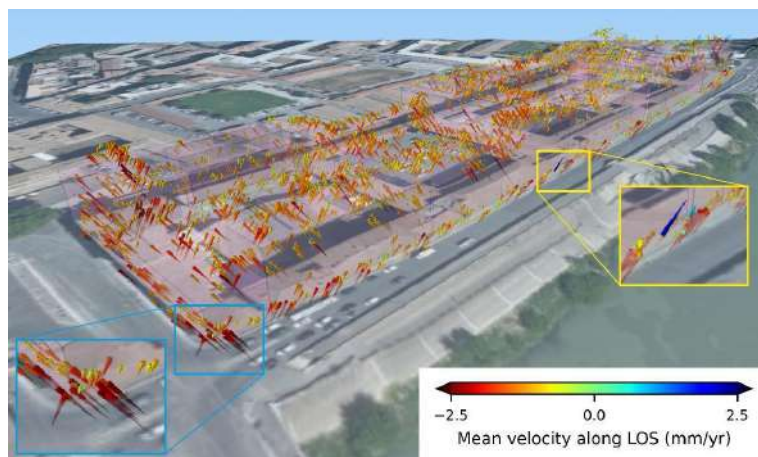


Figura 10-51 – Rappresentazione tridimensionale delle velocità medie annue lungo la LOS per i due datasets ASC e DES: le frecce hanno lunghezza e colore proporzionale alla velocità media e spessore proporzionale alla coerenza (più fine le frecce a bassa coerenza e più spesse quelle ad alta coerenza)

Elaborazioni dei dati ai fini della combinazione delle due orbite

Come dettagliatamente descritto al paragrafo 3.3, quando si hanno a disposizione le informazioni in termini di velocità e spostamento lungo le LOS di entrambi i dataset (ASC e DES) nell'area di interesse, è possibile combinare i dati al fine di ottenere le componenti in direzione verticale e orizzontale E-W.

Per l'area del caso studio vengono comparati i risultati che si ottengono utilizzando tre diverse tecniche:

1. La tecnica di interpolazione Empirical Bayesian Kriging (disponibile nel software commerciale ArcGIS Pro), che restituisce per ciascun pixel (di dimensione scelta dall'utente) le mappe della velocità media ASC e DES che poi vengono combinate per calcolare le componenti verticale e orizzontale E-W. È da notare che l'uso di questo approccio è condizionato da una buona densità e distribuzione dei PS nell'area di interesse, altrimenti può accadere che invece di eseguire interpolazioni vengano fatte estrapolazioni che non hanno lo stesso grado di affidabilità e che possono alterare i risultati.
2. La tecnica dei punti vicini, che presuppone che PS sufficientemente vicini rappresentino lo stesso punto di misura. In questo caso studio due PS sono considerati sufficientemente vicini quando la loro distanza 3D è inferiore a 3 m (corrispondente a circa l'errore di deviazione standard planimetrico e altimetrico nel posizionamento dei PS). L'intera serie temporale viene combinata dopo un ricampionamento temporale con un intervallo di tempo uniforme pari a 1 settimana e tagliando le serie temporali ASC in modo da avere una data di inizio comune per i due dataset.
3. La tecnica di sottocampionamento basata su una griglia di 20 m x 20 m. In questo caso si calcola il centro di ogni quadrato della griglia e si valutano le velocità ASC e DES come media di tutti i PS contenuti nel quadrato considerato; come ultimo passaggio, vengono calcolate le componenti verticale ed orizzontale E-W della velocità media di spostamento.

I risultati ottenuti utilizzando tali tecniche sono confrontati in Figura 10-52. È possibile osservare che, in generale, tali risultati sono sostanzialmente in accordo tra loro e mostrano una velocità media di spostamento verticale di circa -2 mm/anno nella porzione sud-ovest del complesso, mentre le velocità orizzontali E-W sono limitate. Si possono notare alcune piccole differenze tra l'approccio dei punti più vicini (che può essere considerato il più accurato tra i tre approcci) e gli altri due approcci.

In Figura 10-53 è riportato un dettaglio del lato sud-ovest - sud-est del complesso dove sono sovrapposti i risultati ottenuti con le tre tecniche. Nella parte sinistra della Figura 10-53 è possibile osservare uno shift tra le porzioni rosso scuro (che indicano velocità verticali negative): una prima zona rosso scuro per la tecnica dei punti più vicini si trova attorno alla facciata verso ovest (cerchio nero), mentre per i risultati dell'interpolazione si trova a 10 m verso la destra di Figura 10-53 (cerchio giallo), in corrispondenza al muro che delimita la corte interna. Lo stesso accade nella parte destra della Figura 10-53 dove si evidenzia un netto shift tra le zone con la massima velocità verticale (rispettivamente quadrato nero per tecnica dei punti vicini e quadrato giallo per interpolazione). Questi effetti potrebbero essere dovuti da un lato alle fasi di interpolazione, dall'altro dallo shift geometrico tra il centro della griglia e la reale posizione dei punti di misura.

Infine, vale la pena sottolineare due dei principali vantaggi dell'approccio dei punti più vicini: in primo luogo i dati conservano la loro natura 3D e quindi le informazioni sull'altezza non vengono perse durante l'elaborazione (come si vede dal dettaglio dell'angolo sud-est del complesso riportato in Figura 10-54); in secondo luogo è semplice valutare le componenti degli spostamenti verticale ed orizzontale E-W per l'intera serie temporale (Figura 10-55).

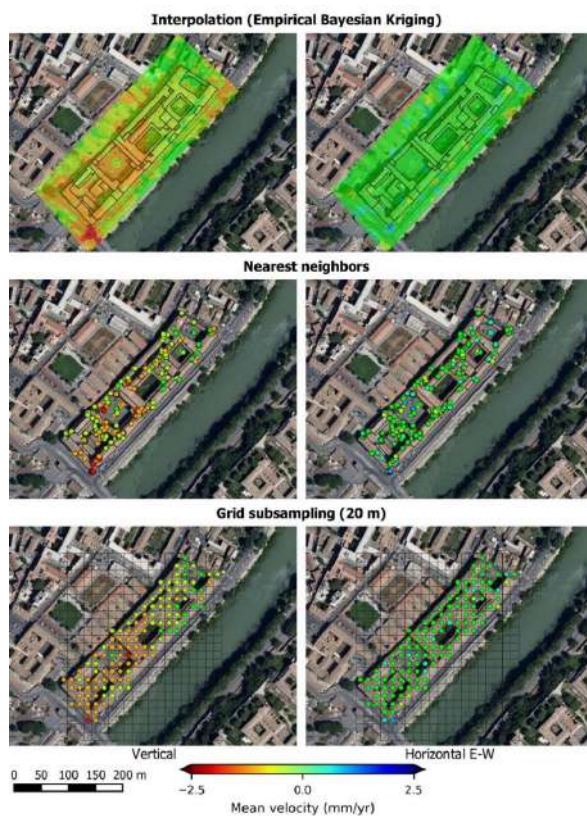


Figura 10-52 – Velocità verticali e orizzontali E-W ottenute mediante combinazione dei due dataset ASC e DES secondo tre distinte tecniche.

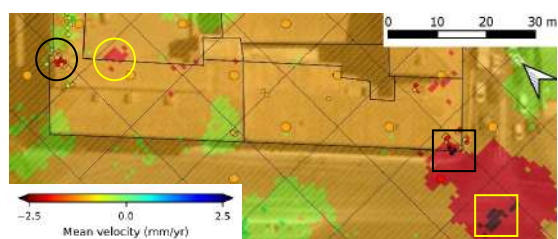


Figura 10-53 – Confronto tra i risultati ottenuti adottando diverse tecniche di combinazione dei datasets ASC e DES per ottenere velocità verticali ed orizzontali E-W: tecnica di interpolazione (quadrati continui); tecnica dei punti vicini (cerchi piccoli); tecnica di sottocampionamento (cerchi grandi al centro dei rombi).

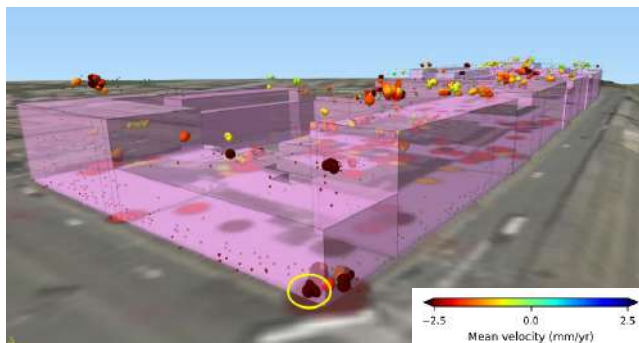


Figura 10-54 – Valori di velocità media di deformazione verticale ottenuti con la tecnica dei punti vicini (i cerchi più piccoli rappresentano i punti dei datasets originari ASC, punti rossi, e DES, punti verdi).

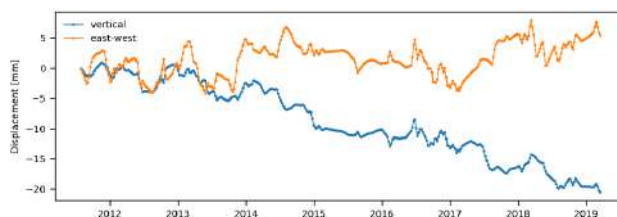


Figura 10-55 – Serie di spostamenti verticale e orizzontale E-W di un punto nella zona sud-ovest del complesso del S. Michele (evidenziata da un cerchio giallo in Figura 10-54).

10.5.4 Interpretazione dei dati interferometrici e discussione

Con riferimento alla Figura 10-51, osservando l'angolo a sud dell'edificio (quadrato azzurro), si può notare che entrambi i dataset presentano valori di velocità lungo la LOS negativi e di valore simile per i due dataset. Questo consente di ipotizzare che il moto nella porzione indicata sia prevalentemente verticale verso il basso. Tale ipotesi è poi confermata a valle della combinazione dei valori dei due datasets, come si vede chiaramente in Figura 10-55. Per un complesso edilizio come quello del caso in esame è necessario tenere conto delle fasi costruttive per valutare possibili mancanze di ammassamento che possono comportare una mancata continuità dei profili di spostamento. Con riferimento alle unità volumetriche indicate in Figura 10-53, in Figura 10-56 si riporta il confronto del profilo di velocità media annua verticale e orizzontale E-W lungo la parete sud-ovest determinato con le diverse tecniche sopra esposte. Si può osservare come il profilo di velocità verticale sia sostanzialmente costante per l'edificio di sinistra mentre per l'edificio a destra si vede un significativo aumento di velocità verticale verso l'angolo dell'edificio (corrispondente all'angolo sud del complesso rappresentato in Figura 10-54 e in Figura 10-55). Si può stimare il rateo di deformazione medio annuo (zona cerchiata in rosso) pari a circa 1.6×10^{-4} rad/anno. Negli otto anni di osservazione si può stimare quindi una deformazione angolare β pari a circa 1.3×10^{-3} . Osservando la velocità E-W è possibile stimare la velocità orizzontale nella direzione della parete tenendo conto che l'angolo tra la direzione della parete e la direzione E-W è circa 46° . Si può quindi stimare un rateo di deformazione orizzontale pari a circa 3×10^{-4} anno $^{-1}$ e una deformazione orizzontale ε_H negli otto anni di osservazione pari a circa 2.4×10^{-3} . Tali valori possono essere confrontati con la relazione tra deformazione angolare, deformazione orizzontale e danno proposta da Boscardin e Cording (1989): in Figura 10-57 è riportato il diagramma da loro proposto e in giallo un vettore con origine sullo 0 e componenti pari a β e ε_H (vettore giallo). È importante tenere conto che, essendo le misure di velocità e spostamento relative nello spazio e nel tempo, non è possibile conoscere il vero punto di applicazione di tale vettore e quindi il reale vettore potrebbe essere applicato ad esempio in ognuna delle posizioni indicate dalle frecce rosse. È comunque interessante notare che vista la lunghezza del vettore, anche

se il suo punto di applicazione fosse corrispondente all'origine del diagramma, è ipotizzabile che si abbia un certo grado di danneggiamento. Questo potrebbe essere compatibile con un movimento cinematico dell'angolata.

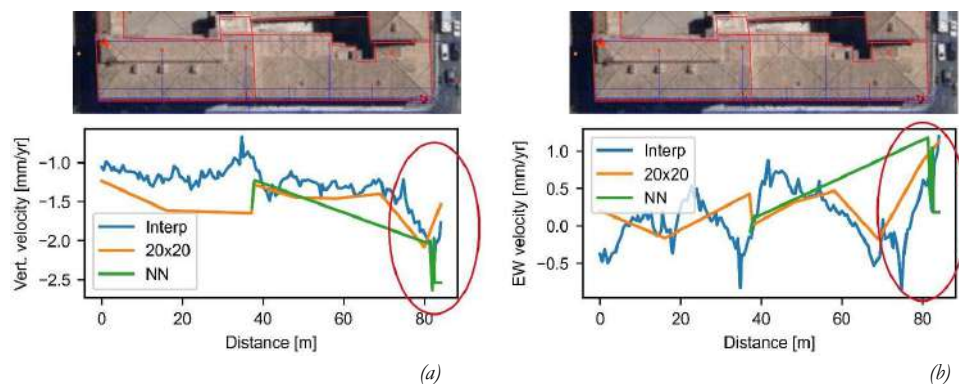


Figura 10-56 – (a) velocità verticale; (b) velocità E-W lungo l'allineamento sud-ovest ottenuta a partire dai dati combinati secondo diverse tecniche.

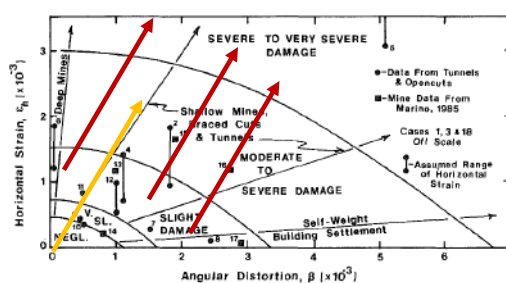


Figura 10-57 – Relazione tra distorsione angolare e deformazione orizzontale e danno (Boscardin e Cording 1989).

10.5.5 Riferimenti

Boscardin M.D., Cording E.G.. (1989). Building Response to Excavation Induced Settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), 1-21. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1989\)115:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:1(1)).

10.6 CASO STUDIO N. 5 – PONTE DELLA MUSICA “ARMANDO TROVAJOLI” - (ROMA)

10.6.1 Breve descrizione del caso studio

Il ponte della Musica “Armando Trovajoli” (Liaghat, 2015) è un ponte ad arco a singola campata a viabilità inferiore ad uso pedonale/ciclabile che sormonta il fiume Tevere (Roma), collegando piazza Gentile da Fabriano (quartiere Flaminio), con il Lungotevere Cadorna all'altezza dello stadio del nuoto al Foro Italico (quartiere Delle Vittorie). Il progetto è stato promosso da un concorso internazionale di design nel 2000 ed è stato inaugurato nel maggio 2011. L'opera è sostenuta da due archi inclinati rispetto al piano verticale, non collegati nella zona sovrastante l'impalcato. Il suo design innovativo sfrutta le imposte dell'arco in calcestruzzo armato, che riportano alle fondazioni le spinte degli archi proseguendone lo sviluppo fino al suolo, come elementi di collegamento tra il piano di calpestio del ponte e le rive attrezzate del Tevere (SBG&P, 2022). Il ponte è lungo 187 m e ha una larghezza variabile che va dai 17,20 m in corrispondenza delle spalle ai 20,70 m in mezzera. L'infrastruttura è costituita da 3 campate, una centrale lunga 126,6 m e due campate esterne di 30,2 m (Figura 10-58 e Figura 10-59). Gli archi inclinati verso l'esterno di 20° rispetto alla verticale, totalmente in acciaio, hanno una sezione tubolare a forma di “lacrima” (goccia asimmetrica) e sostengono telai trasversali posizionati ad intervalli di 8,5 m. L'impalcato è costituito da due travi centrali, con sezione chiusa a z dissimmetrica, specchiate lungo l'asse longitudinale del ponte e da due travi di bordo con sezione scatolare chiusa che si estendono per tutta la lunghezza dell'opera. I traversi si suddividono in traversi principali, posizionati ad un interasse di 8,5 m, saldati a pendini in acciaio che garantiscono un telaio rigido ad U che collega gli archi all'impalcato e in traversi secondari di infittimento. Le spalle e la soletta in calcestruzzo armato sono state realizzate con un conglomerato cementizio ad alta resistenza Rck 70/85, permettendo di ridurre la sezione e quindi il peso proprio. La pavimentazione stradale è costituita da una fascia centrale in conglomerato bituminoso e due fasce laterali con pavimentazione in legno Bangkirai con tessitura longitudinale. I due archi sono realizzati in modo tale che i due percorsi pedonali siano separati dalla corsia carrabile centrale.

Un aspetto particolarmente delicato ha riguardato la progettazione delle fondazioni, poiché il terreno è relativamente soffice, in particolar modo negli strati superficiali. L'arco esercita elevate forze orizzontali che spingono in fondazione. Inizialmente erano stati previsti dei pali inclinati di contrasto per assorbirne la spinta, tuttavia, durante lo sviluppo del progetto, il Comune di Roma ha richiesto che la struttura venisse progettata tenendo conto di un possibile attraversamento carrabile per i mezzi pubblici nella zona centrale dell'impalcato, conducendo ad una modifica nello schema strutturale del ponte: da arco semplice ad arco legato. In tal modo la componente orizzontale della spinta dell'arco è stata interamente assorbita da 6 cavi costituiti da 55 trefoli, di area, per singolo trefolo, di 150 mm², posizionati all'intradosso dell'impalcato, in uno spazio compreso tra le due travi centrali, liberi di scorrere in opportune asole presenti nei traversi, evitando così l'utilizzo dei pali inclinati (configurazione a spinta eliminata). Il carico dall'arco viene, così, trasferito alle fondazioni, realizzate con 54 pali $\Phi 600$ infissi a contrasto, che essendo rigidamente connesse alle spalle, alle cui teste sono ancorati i cavi, impediscono ogni scorrimento orizzontale grazie alla configurazione auto-equilibrata del sistema.



Figura 10-58. Ponte della musica "Armando Trovajoli" (Ponzo et al., 2024)

Il motivo per il quale questo caso studio è risultato di interesse risiede nel fatto che, nonostante l'elevata retrodiffusione elettromagnetica tipica dell'acciaio, in corrispondenza della campata centrale del ponte non sono disponibili misure DInSAR satellitari che, al contrario, sono disponibili nelle sezioni terminali in prossimità delle campate laterali. Al fine di validare l'ipotesi avanzata di dipendenza del fenomeno dall'elevata deformabilità della struttura, principalmente per fenomeni termici, dopo aver reperito la documentazione progettuale e aver effettuato vari sopralluoghi, si è proceduto alla costruzione di un modello numerico, calibrato anche con prove di tipo dinamico, con il quale sono state effettuate diverse analisi considerando le azioni termiche connesse alle variazioni di temperatura misurate dalla stazione meteorologica più prossima al ponte, gestita da ARPA LAZIO (<https://www.arpalazio.it/rete-micro-meteorologica>).

10.6.2 Dati di base del caso studio

Per il caso studio in esame è stata reperita la documentazione di progetto originaria. La Figura 10-59 mostra gli elaborati grafici delle viste in pianta e longitudinale dell'infrastruttura.

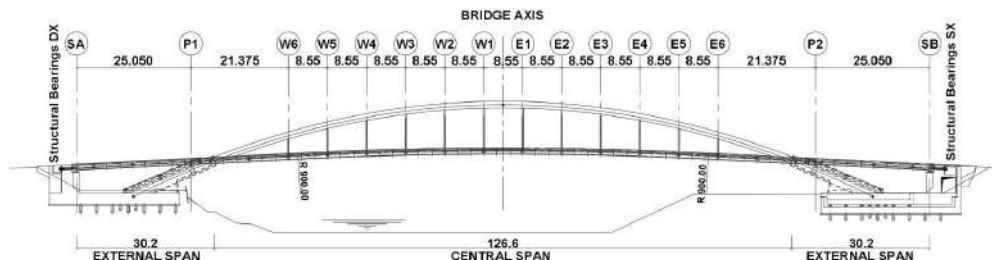


Figura 10-59. Vista longitudinale del Ponte della musica "Armando Trovajoli" (Ponzo et al., 2024; documentazione fornita dall'ing. Giacobino Stroveglia).

Dall'analisi della documentazione di progetto è emerso che il ponte presenta vincoli a due diversi livelli: i) vincoli alla base, in corrispondenza dei collegamenti con le spalle e le fondazioni (Figura 10-60) e ii) vincoli tra gli elementi verticali e l'impalcato (Figura 10-61).

Il collegamento alla base della fondazione (primo livello) è differente alle due estremità: a) spalla fissa sul lato Ovest, costituita da una fondazione con pali di 50 m poggianti direttamente sul bedrock e collegata ad una piastra di calcestruzzo; b) spalla mobile sul lato Est, composta da due piastre sovrapposte: la zattera di fondazione, vincolata al suolo con pali di 50 m su bedrock, ed una seconda piastra desolidarizzata dalla precedente per mezzo di 27 isolatori su cui sono impostati l'arco e la spalla.

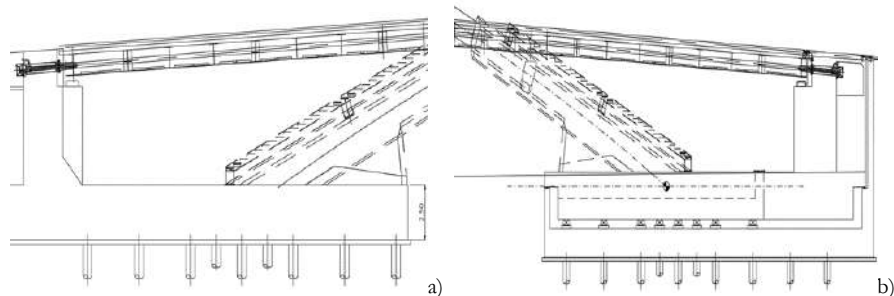


Figura 10-60. Vincoli alla base: a) spalla fissa sul lato Ovest b) spalla mobile sul lato Est (documentazione gentilmente fornita dall'Ing. G. Strovaglia).

Il secondo livello di vincolo è rappresentato dalle connessioni tra le spalle e l'impalcato tramite apparecchi di appoggio. Come si osserva in Figura 10-61, le travi centrali poggiano sulle spalle (Aa.2, Aa.3, Ba.2, Ba.3) e su una trave in c.a., che collega gli archi (P1.1, P1.2, P2.1, P2.2). Si tratta di appoggi unidirezionali con asse longitudinale, i quali consentono le rotazioni attorno ai 3 assi e la traslazione lungo l'asse longitudinale, impedendo quindi gli spostamenti lungo gli assi verticale e trasversale. Le travi di bordo, invece, gravano solo sulle spalle (Aa.1, Aa.4, Ba.1, Ba.4). In questo caso sono stati utilizzati appoggi multidirezionali, i quali consentono tutti i cinematismi, eccetto gli spostamenti verticali.

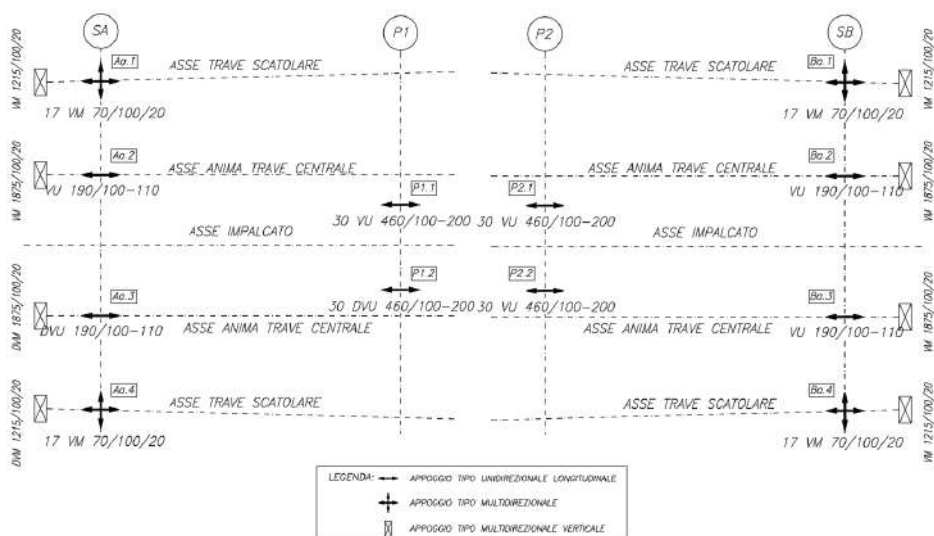


Figura 10-61. Schema di vincolo tra elementi verticali ed impalcato (Ponzo et al., 2023; documentazione fornita dall'ing. Giocchino Strovaglia).

Dati a supporto dell'interpretazione

Analisi Geologica

Il Ponte della Musica è localizzato all'interno della pianura alluvionale del fiume Tevere e attraversa il fiume nella parte settentrionale del tracciato urbano. Analizzando le sottostrutture, la spalla Est è molto lontana dal limite sinistro dei depositi alluvionali, mentre la spalla Ovest è prossima al limite destro tra i depositi alluvionali recenti, evidenziati in azzurro nella Figura 10-62, e il bedrock geologico che affiora lungo la collina di Monte Mario (Stramondo et al. 2008; Ponzo et. al 2021).

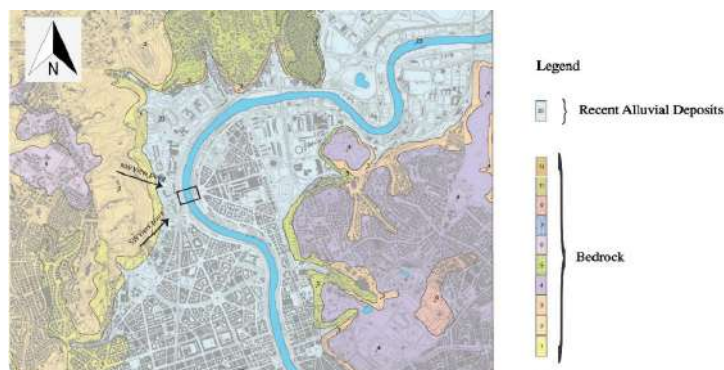


Figura 10-62. Mappa litologica città di Roma (Stramondo et al., 2008; Ponzo et al., 2021).

In sintesi, la parte principale del corpo alluvionale del Tevere è caratterizzata da terreni a grana fine soffici comprimibili con bassi parametri di resistenza al taglio, mentre il substrato geologico locale (la formazione “Marne Vaticane”) è significativamente più consistente e con parametri di resistenza più elevati. Per questo motivo i pali della fondazione del Ponte della Musica (Figura 10-63) attraversano i terreni alluvionali e sono impostati nella formazione delle Marne Vaticane. (per maggiori dettagli, Stramondo et al. 2008).

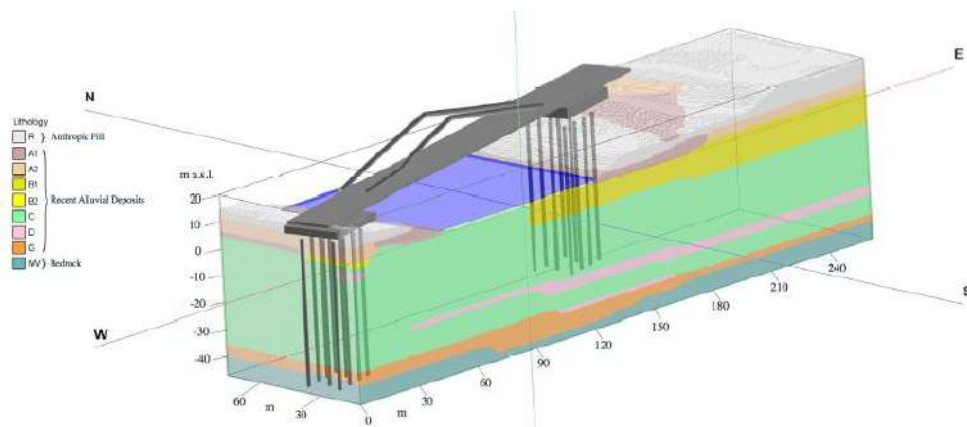


Figura 10-63. Modello geologico tridimensionale del Ponte della musica (Ponzo et., al 2021).

Identificazione Dinamica

Il modello numerico della struttura è stato calibrato considerando le caratteristiche dinamiche del ponte ricavate attraverso due campagne sperimentali in sito, entrambe effettuate in regime di vibrazione ambientale, utilizzando due diversi tipi di sensori: sensori velocimetrici tri-direzionali per la prima campagna, eseguita nell'Ottobre 2020,

e sei stazioni accelerometriche tri-direzionali per la seconda, eseguita nel Novembre 2021 (Figura 10-64, Ponzo et. al 2023).

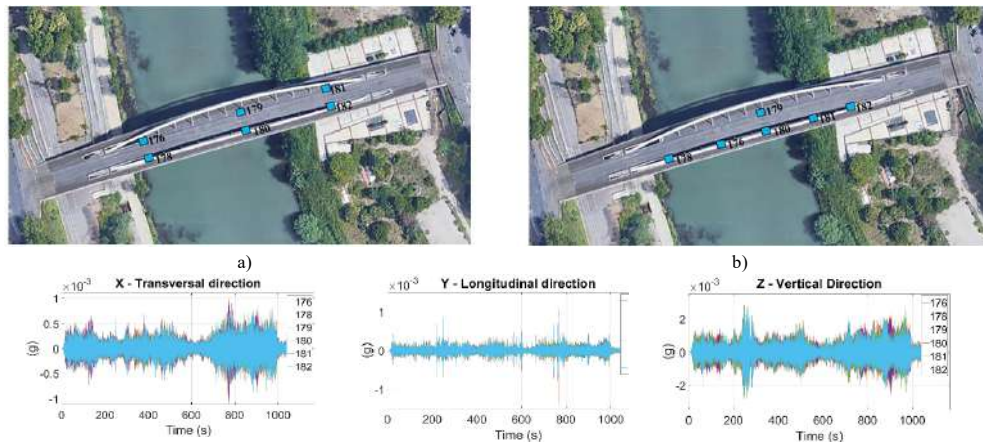


Figura 10-64. Campagna sperimentale Novembre 2021 eseguita con accelerometri: a) TEST 1-2 b) TEST 3 (Ponzo et al., 2024).

Durante la seconda campagna sperimentale sono state eseguite tre acquisizioni accelerometriche della durata di circa un'ora con una frequenza di campionamento pari a 250 Hz. In Figura 10-64a è illustrata la configurazione di prova dei primi due test, mentre la Figura 10-64b mostra la configurazione utilizzata per il terzo test. Sono stati utilizzati sensori accelerometrici con bilanciamento della forza dotati di digitalizzatore a 24 bit e un'ampia gamma dinamica superiore a 140 dB. Dall'analisi dei dati vibrazionali acquisiti sul ponte si evince che le ampiezze massime del moto vengono registrate lungo la componente verticale, a seguire lungo la direzione trasversale e, per ultima, lungo quella longitudinale. Sia le acquisizioni velocimetriche che quelle accelerometriche sono state utilizzate per caratterizzare i principali parametri dinamici del ponte. In particolare, al fine di effettuare un confronto, i dati velocimetrici sono stati analizzati nel dominio delle frequenze valutando le funzioni di trasferimento (riferimento sulla spalla destra) (Girod et al., 2001), mentre i dati accelerometrici sono stati analizzati, sempre nel dominio delle frequenze, ma utilizzando le trasformate di Welch (Welch,1967).

In Tabella 10-4 sono riepilogate le principali frequenze di vibrazione ottenute per mezzo delle analisi dei dati vibrazionali acquisiti durante le campagne sperimentali (Figura 10-65, dati e risultati relativi alle sole indagini accelerometriche). Inoltre, per ciascuna frequenza propria di vibrazione è stata individuata la tipologia di modo di vibrazione. I risultati sperimentali ottenuti dalla seconda campagna sperimentale hanno sostanzialmente confermato quelli della prima campagna, anche in presenza di configurazione dei sensori e temperature diverse.

Tabella 10-4. Frequenze fondamentali sperimentali

MODO DI VIBRARE	FREQUENZA [Hz] Campagna Velocimetrica	FREQUENZA [Hz] Campagna Accelerometrica	TIPOLOGIA
Modo 1	0.92±0.01	0.92±0.01	Verticale - Z
Modo 2	1.00±0.01	1.01±0.01	Trasversale - X
Modo 3	1.33±0.01	1.33±0.01	Verticale - Z

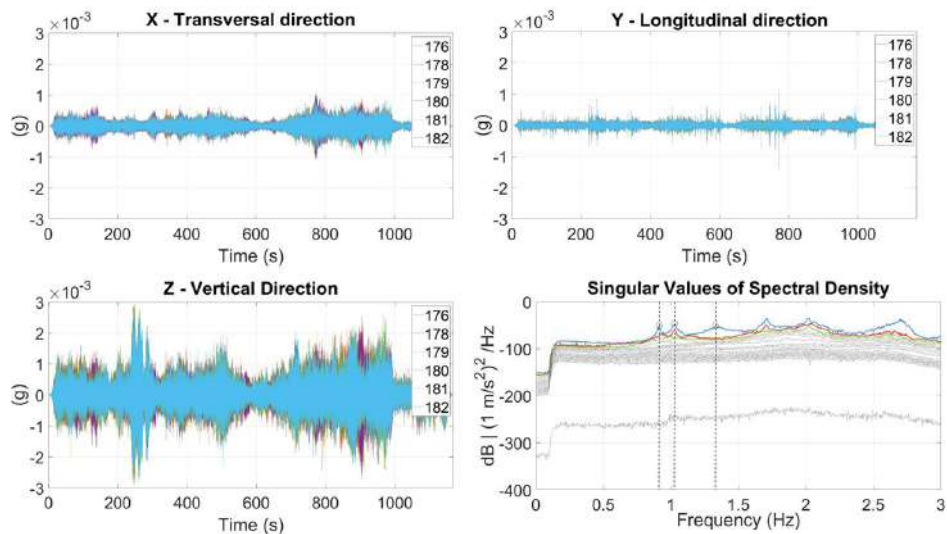


Figura 10-65. Analisi dei dati accelerometrici (Ponzo et al., 2024).

Inoltre, al fine di stimare il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente associato ai modi principali, ciascuna traccia accelerometrica è stata analizzata utilizzando il metodo “Non-Parametric Damping Analysis”. Questo approccio utilizza anche per un sistema forzato il metodo del decremento logaritmico con approccio statistico sui picchi decrescenti posti alla distanza dello stesso pseudo-periodo (Mucciarelli e Gallipoli, 2007). In Tabella 10-5 vengono riepilogati i valori mediani dei fattori di smorzamento viscoso equivalenti calcolati nelle direzioni trasversale e verticale.

Tabella 10-5. Smorzamenti viscosi equivalenti ottenuti utilizzando il metodo Non-Parametric Damping Analysis (NonPaD.An).

Trasversale - X = 4.1%	Verticale - Z = 3.7%
------------------------	----------------------

Modellazione numerica e calibrazione

Al fine di effettuare analisi termo-meccaniche (Ponzo et al., 2023), è stato implementato un modello numerico 3D del Ponte (Figura 10-66) con il software agli elementi finiti FEM SAP2000, (CSI, 2014), utilizzando elementi frame monodimensionali, per la struttura, ed elementi shell per la modellazione della soletta, delle spalle e delle fondazioni. La geometria, i materiali, i carichi e le sezioni degli elementi strutturali sono stati definiti sulla base della documentazione progettuale disponibile. Le sezioni con geometria irregolare non disponibili nella libreria SAP2000, come archi, travi centrali, travi di bordo e dei cordoli, sono state implementate a seguito di una rappresentazione dettagliata in CAD 3D.

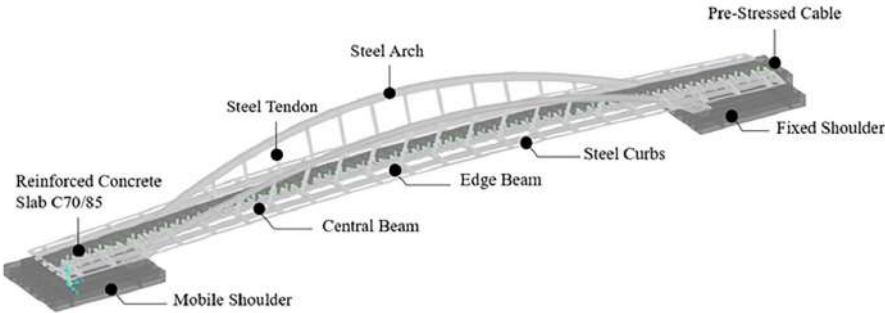


Figura 10-66. Modello numerico 3D agli elementi finiti (Ponzo et al., 2024).

Il modello numerico, di tipo lineare, è stato opportunamente calibrato sulla base dei dati ottenuti dalle due campagne sperimentali in sito. Il processo di calibrazione è stato basato principalmente sulla variazione delle caratteristiche meccaniche dei vincoli esterni (tenendo conto dell'interazione fondazione-dispositivi di supporto-struttura). La configurazione numerica selezionata, in grado di minimizzare le differenze tra frequenze numeriche e sperimentali in condizioni di vibrazioni ambientali, è quella costituita da vincoli di incastro alla base (in considerazione del fatto che in condizioni di rumore ambientale è lecito supporre che l'attrito presente a livello dei vincoli sia in grado di bloccare qualsiasi movimento) e da elementi di collegamento a comportamento lineare (elementi “link” Sap2000) per la modellazione dei dispositivi di appoggio. La Tabella 10-6 mostra il confronto tra le frequenze ottenute dalla seconda campagna sperimentale con l'uso di accelerometri e quelle numeriche ottenute con il modello FEM.

Tabella 10-6. Confronto tra risultati sperimentali e numerici in termini di frequenze fondamentali

	SPERIMENTALE	NUMERICO	DIFFERENZA
MODO DI VIBRARE	Frequenza [Hz]	Frequenza [Hz]	[%]
Modo 1	0.92±0.01	0.92	0.01
Modo 2	1.01±0.01	1.07	5.94
Modo 3	1.33±0.01	1.49	12.03

10.6.3 Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici

Per il monitoraggio satellitare del Ponte della Musica è stata utilizzata la tecnica multi-temporale a piena risoluzione SBAS-DInSAR (Berardino et al.,2002, Lanari et al.,2004, Manzo et al., 2012), descritta nel capitolo 2.5.2 delle LLGG. Nello specifico, sono state utilizzate sequenze di acquisizioni SAR satellitari raccolte dalle orbite ascendenti e discendenti della costellazione italiana COSMO-SkyMed (CSK) sull'area urbana di Roma. I due set di dati sono composti da 129 acquisizioni Single Look Complex (SLC) ascendenti e 107 discendenti, raccolte durante l'intervallo di tempo marzo 2011-marzo 2019, con un angolo di illuminazione al centro della scena di circa 34° e 29°, rispettivamente.

I dati, disponibili per l'area considerata per entrambe le orbite ascendenti e discendenti, sono stati forniti dal CNR-IREA, visualizzati mediante un software GIS. Successivamente, sono stati selezionati diversi PS relativi all'impalcato e alle spalle del ponte per i quali sono state analizzate serie temporali di spostamento. La Figura 10-67 mostra le mappe della velocità di deformazione media dell'area in esame e dell'infrastruttura associata rispettivamente all'orbita ascendente e discendente. Come si può osservare, la velocità di deformazione varia da -0.4 a 0 cm/anno e i punti rilevati dal satellite sono presenti solo sulle spalle e sulle campate esterne del ponte e non

sull'impalcato centrale. I valori di coerenza temporale dei punti rappresentati, relativi sia all'orbita ascendente che a quella discendente, variano da 0,35 a 0,55 (Manzo et al., 2012).

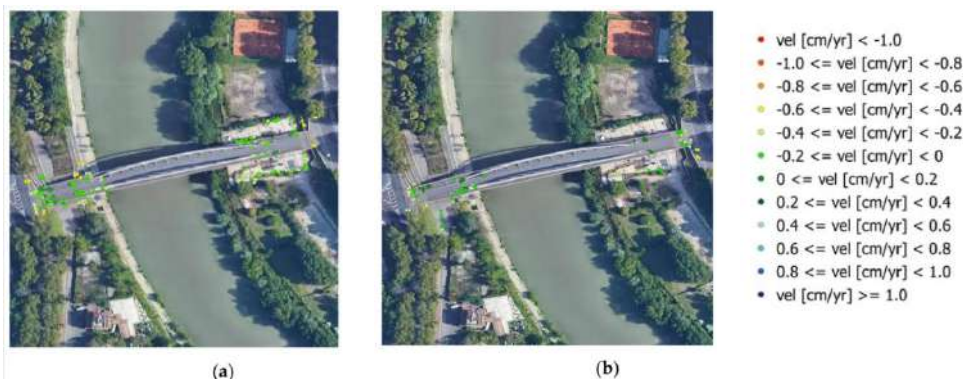


Figura 10-67 Mappe della velocità di deformazione nell'area di studio: a) orbite ascendenti b) orbite discendenti (Ponzo et al., 2021).

10.6.4 Interpretazione dei dati interferometrici e discussione

Ai fini delle valutazioni da effettuare per il caso in esame, la componente che interessa è fondamentalmente quella verticale. Le analisi dei dati interferometrici mostrano valori negativi crescenti degli spostamenti verticali sulle fondazioni e sulle spalle (per convenzione segni negativi corrispondono ad allontanamenti rispetto al sensore). Per le spalle/fondazioni il trend di spostamenti è compatibile con i cedimenti di consolidazione innescati dal carico del ponte stesso, finito di costruire solo 2 anni prima dell'inizio del monitoraggio satellitare. Inoltre, quasi tutte le serie temporali di spostamento relative alle campate laterali mostrano, invece, un andamento oscillatorio con frequenza annuale che potrebbe essere legato alla variazione della temperatura o della falda idrica nell'arco temporale considerato. Per quanto concerne il caso studio, l'aspetto più rilevante riguarda la totale assenza di informazioni satellitari lungo lo sviluppo della campata principale del ponte, nonostante l'elevata riflettività elettromagnetica degli archi in acciaio. Il motivo di tale assenza è ascrivibile ad una combinazione di diversi fattori, tra i quali, la deformabilità termica elevata e la lunghezza d'onda del segnale utilizzato (banda X), oltre ad altri fattori quali: geometria dell'impalcato; consistenza e configurazione delle opere di protezione della circolazione; limitata riflettività dei materiali con i quali è realizzato il piano viabile.

Estendendo la scala di osservazione a livello territoriale (Figura 10-68), si è osservato che anche altri ponti prossimi a quello in oggetto (Ponte Matteotti, Ponte Pietro Nenni, Ponte Flaminio e Ponte Milvio) sono scarsamente coperti dai PS, per i motivi sopra riportati. È altresì da tener presente che in molti casi (un esempio è il Ponte Risorgimento) la presenza di guardrail, lampioni per l'illuminazione, statue o altri elementi sono spesso colti dal segnale emesso dal passaggio del satellite, diventando così sede di PS. Al fine di una corretta elaborazione del dataset si deve tenere conto della natura delle misurazioni relative a questi PS.

Sono state effettuate analisi termiche sul modello FEM precedentemente calibrato, utilizzando i dati climatici forniti dalla stazione meteorologica più vicina alla posizione del ponte, denominata AL007 – Boncompagni (ARPA Lazio), considerando il periodo temporale di disponibilità dei dati che va da gennaio 2013 a dicembre 2021. La stazione di Boncompagni rileva i parametri meteorologici con un passo di campionamento pari a 30 minuti, fornendo così 48 misure ogni 24 ore.

Come si osserva in Figura 10-69, le temperature mostrano un andamento periodico coerente con gli andamenti stagionali caratterizzati da valori minimi, intorno allo 0°C , e da valori massimi di poco inferiori ai 40°C .

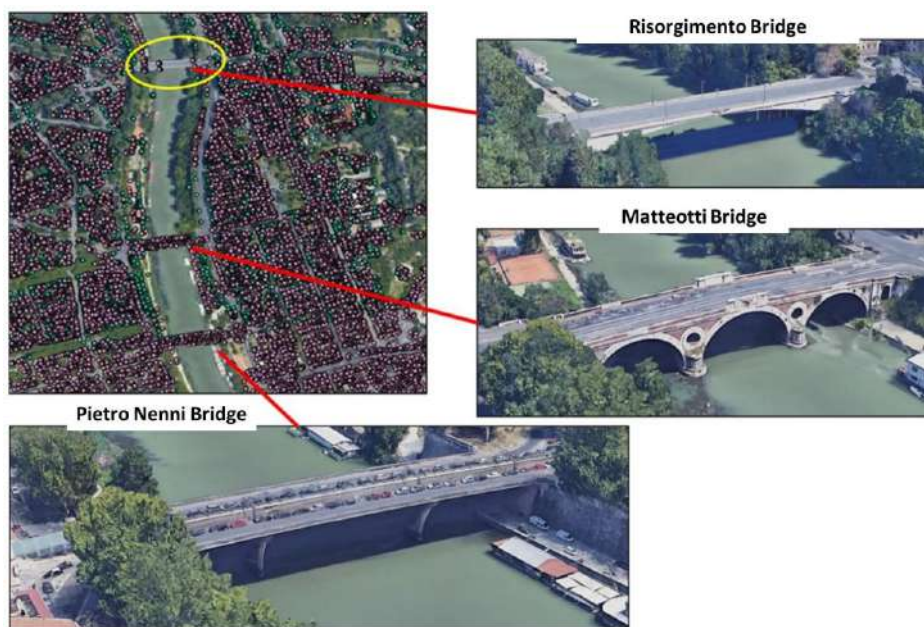


Figura 10-68. PS rilevati dal satellite sulle infrastrutture poste a sud del Ponte della Musica (Ponzo et al., 2021).

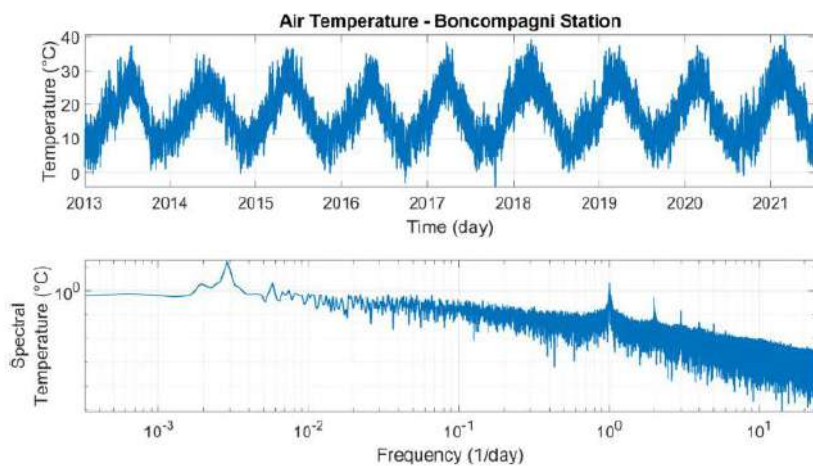


Figura 10-69. Trend di temperatura, valori registrati dalla stazione meteorologica Boncompagni (Ponzo et al., 2024).

Nell'ottica di effettuare una valutazione semplificata degli effetti della variazione di temperatura ambientale sullo stato deformativo del ponte, sono stati inizialmente analizzati i dati di temperatura registrati in concomitanza con le acquisizioni satellitari, lungo le due orbite. È stato constatato che le stesse si riferiscono a condizioni climatiche e di irraggiamento molto diverse. Il passaggio dell'orbita ascendente sul sito in esame avviene, infatti, mediamente intorno alle ore 4:46 (UTC), mentre quello relativo all'orbita discendente intorno alle ore 17:09 (UTC). La differenza di temperatura misurata tra un'acquisizione satellitare e la successiva, per entrambe le orbite, presenta un valore medio pari a circa 5°C (Figura 10-70), con valori della varianza, differenziati per le due orbite, pari a

circa 8.5°C per l'orbita ascendente e 13.95°C per quella discendente. Il valore mediano della temperatura (5°C) è stato, dunque, considerato come input nel modello termo-meccanico col quale sono state effettuate le diverse analisi che hanno consentito la definizione di una relazione empirica in grado di legare il valore dello spostamento massimo (ΔZ) nella mezzeria dell'impalcato alla variazione della temperatura (ΔT), nell'ipotesi di comportamento lineare del modello:

$$\Delta Z \text{ (cm)} = 0.09 + 0.40 \times \Delta T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

Basandosi su tale relazione è stato possibile associare alle distribuzioni delle temperature le corrispondenti distribuzioni degli spostamenti (spostamento massimo in mezzeria) dell'impalcato del ponte, così come rappresentato nel riquadro inferiore della Figura 10-70. Coerentemente con quanto rappresentato in Figura 10-70, la Figura 10-71 fornisce una rappresentazione bi-dimensionale dello stato deformativo dell'impalcato del ponte in corrispondenza della differenza di temperatura di riferimento (5°C) cui corrisponde un abbassamento in mezzeria pari a circa 2 cm.

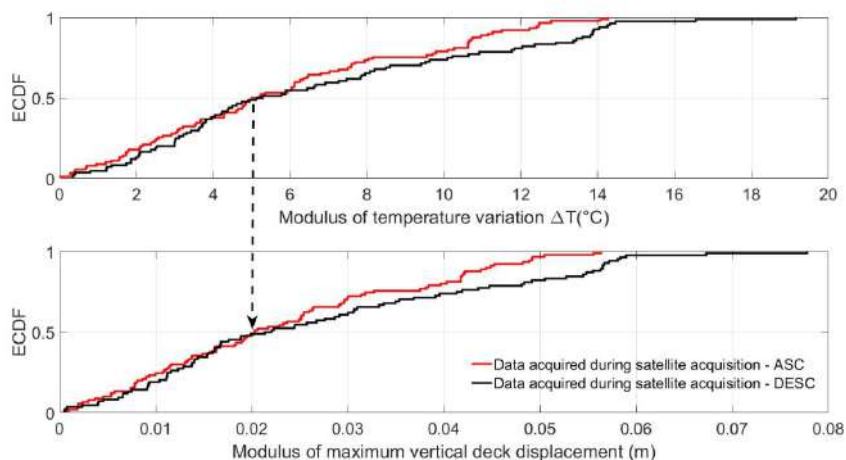


Figura 10-70. Funzioni di distribuzione cumulativa delle variazioni di temperatura corrispondenti alle misurazioni delle orbite ascendente e discendente e del relativo spostamento verticale massimo dell'impalcato (Ponzo et al., 2024).

La risposta strutturale ai carichi termici è influenzata, tuttavia, oltre che dalla temperatura dell'aria anche da altre componenti quali l'irraggiamento solare e l'inerzia termica strutturale. Semplificando, il ponte può essere inteso come un sistema dinamico la cui risposta è sfasata rispetto alla variazione della temperatura dell'aria, in funzione dei parametri di cui sopra. Per completezza è doveroso osservare che, per l'area oggetto di studio, in particolare nelle ore diurne, gli effetti dell'irraggiamento potrebbero produrre variazioni della temperatura superficiale del ponte comprese tra 5 e 20°C e che tali effetti non sono stati considerati nella stima della deformazione dell'impalcato. I punti indicati nella Figura 10-71 rappresentano la posizione dei PS relativi alle orbite ascendenti (blu) e discendenti (rossi). Come si può notare, i PS sono presenti solamente sulle campate esterne del ponte, mentre nella zona centrale dell'impalcato, caratterizzata da valori superiori di spostamento, essi non sono presenti. Per i sistemi radar che utilizzano la banda X, come nel caso dei satelliti della costellazione COSMO SkyMed, nell'elaborazione dei dati satellitari con la tecnica SBAS- DInSAR i PS caratterizzati da un valore di coerenza inferiore ad una certa soglia (tipicamente 0.35), stabilita sulla base di analisi statistiche, sono considerati inaffidabili

e vengono quindi automaticamente scartati. Sempre dalla Figura 10-71, si osserva, inoltre, che non sono presenti acquisizioni satellitari per deformazioni verticali dell'impalcato superiori a circa 0.7 cm.

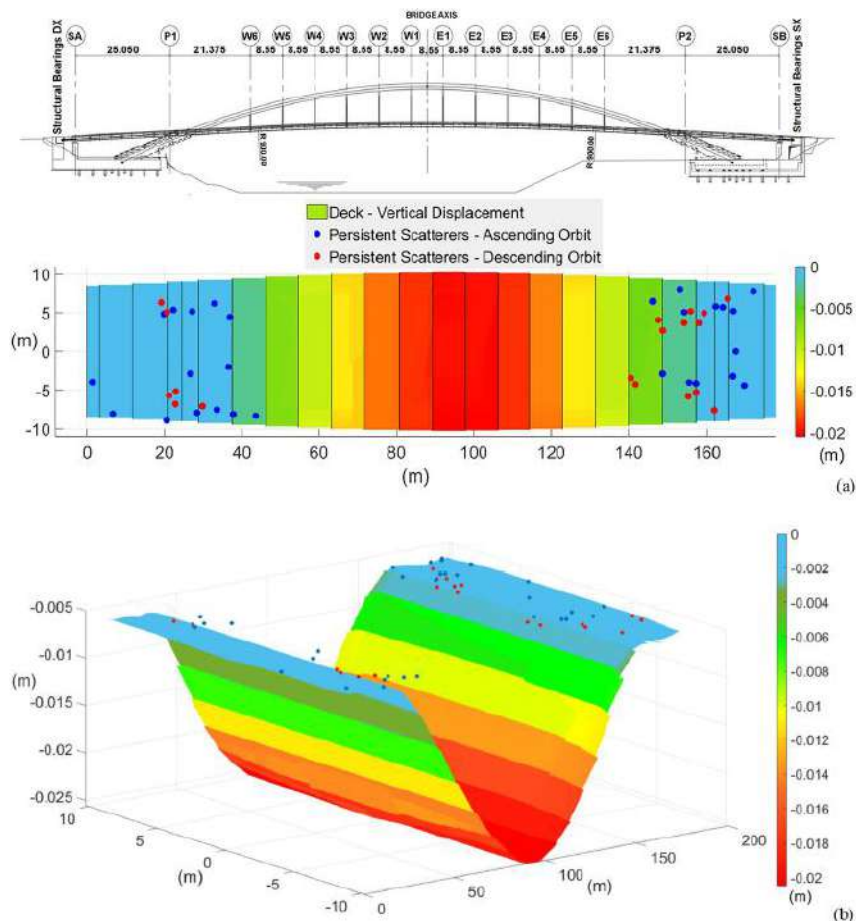


Figura 10-71. Contour level della deformata termica con una variazione di temperatura di $|\Delta T| = 5^\circ\text{C}$ (Ponzo et al., 2024)

Nel caso dei sensori operanti in banda X, la lunghezza d'onda corrisponde a circa 3.1 cm, pertanto, valori di spostamento tra due acquisizioni consecutive superiori circa una frazione della lunghezza d'onda, eq. (8), risulterebbero ambigui e, conseguentemente, non misurabili in assenza di informazioni ulteriori (ad esempio derivanti da un modello), come peraltro sembrerebbe confermato dai risultati del presente caso studio. Per tali condizioni, peraltro abbastanza frequenti se si considera il numero di strutture ed infrastrutture di grande luce o realizzate con schemi particolarmente sensibili alle deformazioni di tipo termico, potrebbe essere opportuno utilizzare in maniera integrata le informazioni dedotte da misurazioni effettuate con diversi sistemi radar satellitari operanti anche con frequenze minori (di conseguenza caratterizzati da lunghezze d'onda significativamente maggiori) come in particolare nel caso dei sensori operanti in banda L.

10.6.5 Riferimenti

ARPA Lazio (2022). <https://www.arpalazio.it/rete-micro-meteorologica> (accessed December 2022).

- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 40(11), 2375–2383. doi:10.1109/TGRS.2002.803792.
- CNR-IREA (2023). <https://www.irea.cnr.it/glossario/termini> (accessed February 2023).
- CSI, Computers and Structures Inc. (2014). SAP 2000 v. 16.1.0 [Software]. Comp. and Struct. Inc.: Berkeley, CA.
- Girod B., Rabenstein R., Stenger A. (2001). *Signals and systems*, 2nd ed., Wiley, ISBN 0-471-98800-6 p. 50.
- Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorquí J. J., Berardino P., Sansosti E. (2004). A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 42(7), 1377–1386. doi: 10.1109/TGRS.2004.828196.
- Liaghat D. (2015). Ponte della Musica: A landmark bridge in Rome. *Proc. Inst. Civ. Eng. Bridg. Eng.*, 168, 112–122. ISSN 1478-4637
- Manzo M., Fialko Y., Casu F., Pep A., Lanari R., (2012). A quantitative assessment of DInSAR measurements of interseismic deformation: The Southern San Andreas Fault case study. *Pure Appl. Geophys.*, 169, 1463–1482. doi:10.1007/s00024-011-0403-2.
- Mucciarelli M., Gallipoli M.R., (2007). Non-parametric analysis of a single seismometric recording to obtain building dynamic parameters. *Annals of Geophysics*, 50(2). <http://hdl.handle.net/2122/3523>.
- Ponzo F. C., Ditommaso R., Auletta G., Lamarucciola N., Ielpo P. (2023). Structural Health Monitoring of transport infrastructures: preliminary experimental calibration of the numerical model of “Ponte della Musica – Armando Trovajoli”. XIX ANIDIS Conference, Seismic Engineering in Italy. *Procedia Structural Integrity* 44 (2023) 854–861. doi:10.1016/j.prostr.2023.01.111.
- Ponzo F. C., Iacovino C., Ditommaso R., Bonano M., Lanari R., Soldovieri F., Cuomo V., Bozzano F., Ciampi P., Rompatò M. (2021). Transport Infrastructure SHM using integrated SAR data and on-site vibrational acquisitions: “Ponte Della Musica–Armando Trovajoli” case study. *Applied Sciences*, 11(14), 6504. doi.org/10.3390/app11146504.
- Ponzo F. C., Ditommaso R., Auletta G., Ielpo P. (2023). Numerical Model Calibration of a Bridge by Using Inverse Engineering: A Case Study. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, EVACES 2023 - Volume 1. Lecture Notes in Civil Engineering*. ISSN 2366-2557. ISBN 978-3-031-39108-8. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-39109-5>.
- Ponzo F.C., Auletta G., Ielpo P., Ditommaso R. (2024). DInSAR–SBAS satellite monitoring of infrastructures: how temperature affects the “Ponte della Musica” case study. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Volume 14, pages 745–761. <https://doi.org/10.1007/s13349-023-00751-z>.
- SBG&P (2022). <https://www.sbgp.com/portfolio/ponte-della-musica> (accessed April 2022).
- Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M. (2008). Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sens. Environ.* 112, 3160–3172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.008>.
- Welch P. D. (1967). The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, AU-15 (2): 70–73. doi: 10.1109/TAU.1967.1161901.

10.7 CASO STUDIO N. 6 – PONTE PALATINO (ROMA)

10.7.1 Breve descrizione del caso studio

Il caso studio esaminato in questa sezione è il Ponte Palatino sul Tevere, localizzato nel centro di Roma in prossimità dell'Isola Tiberina. La struttura prende il nome dal vicino Colle Palatino e fu realizzata tra il 1886 e il 1890 in sostituzione di un antico ponte romano, detto "Ponte Rotto". L'opera ha una lunghezza pari a 155 m, una larghezza di 20 m e asse obliquo rispetto alle due sponde del Tevere. L'impalcato è costituito da una struttura metallica continua sorretta da quattro pile centrali in alveo e due spalle inglobate nei muraglioni di sponda del Tevere. Le pile hanno una forma rastremata con larghezza alla base pari a 5 m e 3 m in sommità. Le fondazioni delle pile e delle spalle sono anch'esse in muratura e raggiungono profondità variabili tra i 10 ed i 16 m. La struttura reticolare dell'impalcato è fissata in prossimità di una delle pile centrali mediante piastre in ghisa mentre può scorrere longitudinalmente sugli altri appoggi grazie alla presenza di rulli cilindrici. La struttura presenta dei giunti all'estremità dell'impalcato, in prossimità delle spalle del ponte.

Gli obiettivi del caso studio sono molteplici, nello specifico: (a) studio del comportamento del Ponte Palatino nel tempo mediante dati InSAR; (b) validazione indiretta del valore degli spostamenti ottenuti mediante il processo interferometrico; ed infine (c) viene presentato un metodo per valutare l'eventuale presenza di anomalie strutturali mediante analisi delle componenti principali degli spostamenti strutturali e carte di controllo. Oltre alla rilevanza storica dell'opera, le seguenti motivazioni hanno portato alla scelta del Ponte Palatino come caso studio:

- L'opera è costituita da una struttura metallica continua di notevoli dimensioni e pertanto è soggetta a dilatazioni termiche non trascurabili;
- Il caso studio si presta particolarmente al rilevamento degli spostamenti per via interferometrica in quanto l'asse longitudinale dell'impalcato è orientato approssimativamente in direzione E-W. Questa caratteristica riduce l'errore indotto dal non poter rilevare gli spostamenti in direzione N-S.

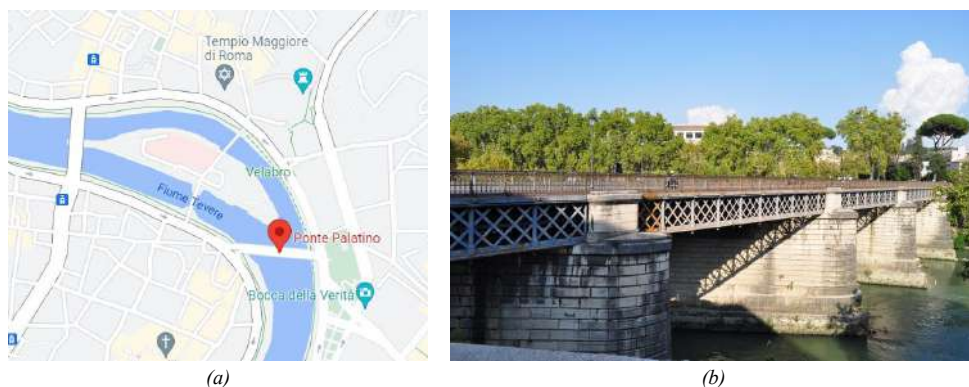


Figura 10-72 (a) Localizzazione del Ponte Palatino; (b) Ponte Palatino—Lato sud.

10.7.2 Dati di base del caso studio

I dati di base del caso studio riguardano (i) le caratteristiche geometriche dell'opera e le proprietà dei suoi materiali ed (ii) i dati satellitari elaborati da CNR-IREA.

Nello specifico, i dati su geometria e materiali sono stati recuperati da un documento storico in cui è riportata una descrizione del ponte e della sua costruzione. Un estratto da questo documento è mostrato in Figura 10-73.

Per quanto riguarda la descrizione dettagliata dei dati satellitari utilizzati per questo caso studio si rimanda all'Appendice 1 di questo documento.

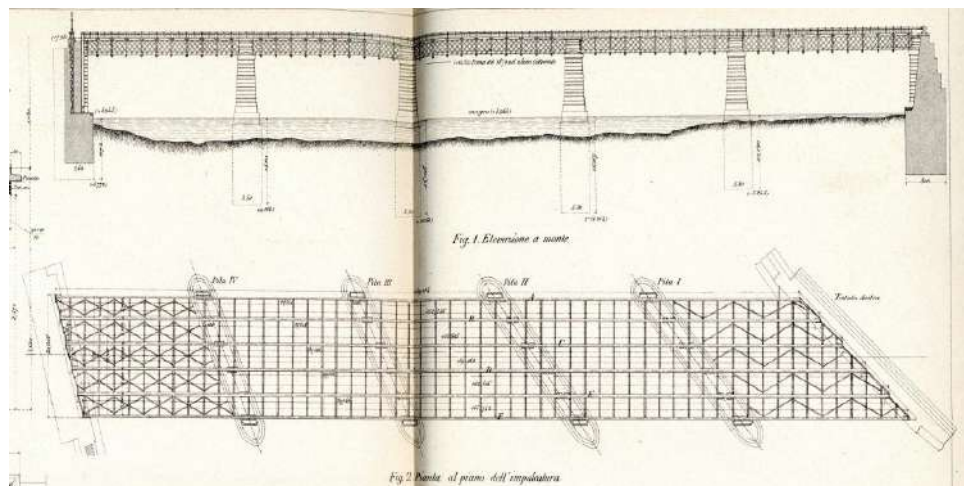


Figura 10-73 Alzato e pianta del Ponte Palatino.

Dati a supporto dell'interpretazione

A supporto delle analisi effettuate si sono utilizzati i dati di temperatura media giornaliera registrati dalla stazione meteorologica “ROMA Lanciani”, situata a circa 5 km dall’Isola Tiberina. I dati sono stati reperiti sul sito della Regione Lazio e sono mostrati in Figura 10-74 (i dati si riferiscono ai soli giorni di acquisizione).

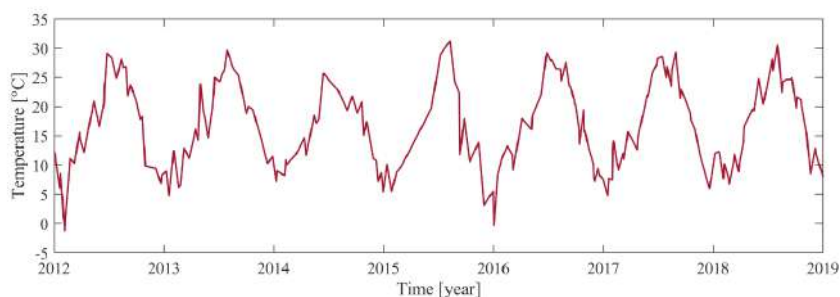


Figura 10-74 Temperatura media dell'aria nei giorni di acquisizione nel periodo 2012-2019.

10.7.3 Rappresentazione ed elaborazione dei dati interferometrici

I dati forniti da CNR-IREA, generati dal processamento di immagini CSK ed usati in questo studio, sono relativi sia all'orbita ascendente che a quella discendente e consistono in numerosi *Persistent Scatters* (PS) localizzati nell'area circostante il Ponte Palatino. I dati sono innanzitutto importati in ambiente GIS per visualizzare i PS sulla superficie terrestre. In particolare, si è impiegato il software open source QGIS. La Figura 10-75 mostra i PS appartenenti alle due orbite ascendente e discendente in prossimità del Ponte Palatino. Il colore indica la velocità media annua dei PS nel periodo di osservazione.

Dopo aver identificato i PS appartenenti al ponte, questi sono stati organizzati in sottogruppi afferenti a diverse zone del ponte, come evidenziato in Figura 10-76. Le zone corrispondono alla porzione di impalcato tra due appoggi successivi. Non si sono considerati i PS localizzati in prossimità delle pile per la difficoltà di attribuirli correttamente all'impalcato o alle pile stesse. Le analisi successive sono state effettuate in ambiente MATLAB.

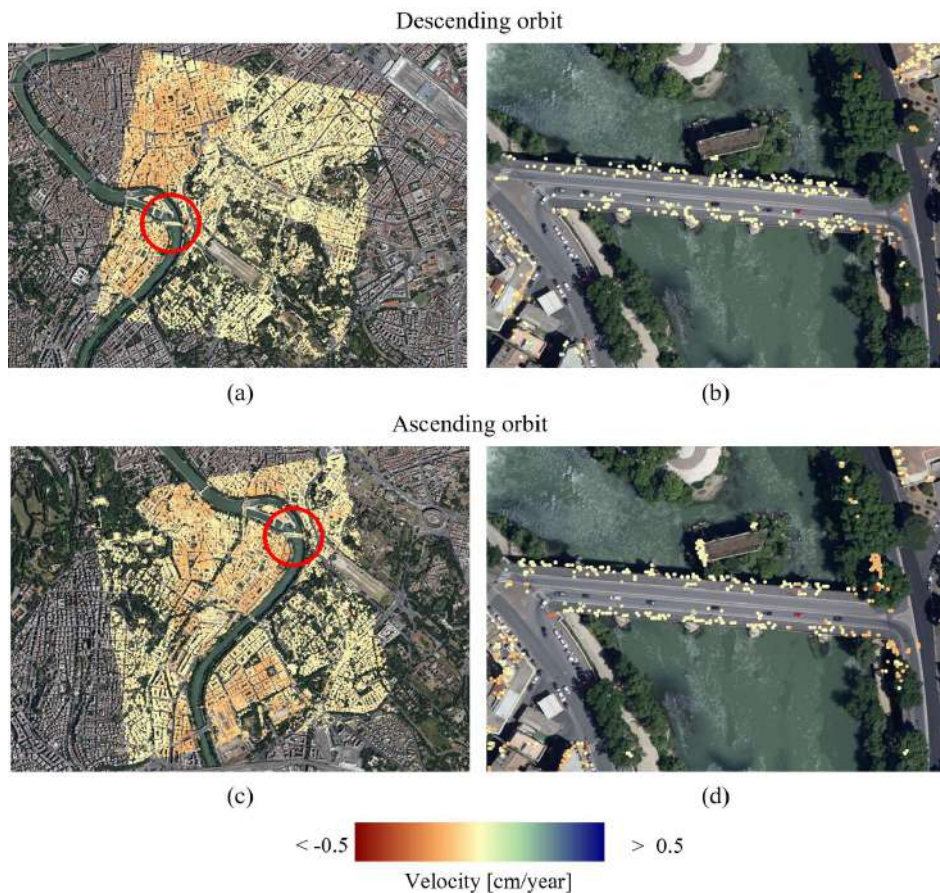


Figura 10-75 (a) PS relativi all'orbita discendente e (b) ingrandimento del ponte Palatino; (c) PS relativi all'orbita ascendente e (d) ingrandimento del ponte Palatino. La posizione del ponte in (a) e (b) è evidenziata dai cerchi rossi.



Figura 10-76 Raggruppamento di PS dalle orbite ascendenti e discendenti.

Determinazione delle componenti di spostamento

Vista la disponibilità dei dati ascendenti e discendenti, sono stati determinati lo spostamento verticale e longitudinale medio (in direzione E-W) di ogni zona secondo quanto riportato al § 3.3. Per ottenere gli spostamenti verticali e longitudinali, sono state eseguite alcune elaborazioni preliminari. Nello specifico:

- Esclusione dei PS *outlier*. Sono stati esclusi dallo studio i PS caratterizzati da un comportamento anomalo nel periodo di osservazione. Nello specifico, per ogni zona, lo studio è limitato ai soli PS caratterizzati da una velocità media compresa nell'intervallo $\pm 2\sigma$ (con σ = scarto quadratico medio delle velocità della zona cui appartiene il PS).
- Inizializzazione delle serie temporali. Le serie temporali degli spostamenti LOS di ogni PS sono fornite come valori relativi ad un punto di riferimento (*Reference Point*). La serie temporale di ogni PS è stata depurata dello spostamento medio calcolato in un periodo di riferimento pari ai primi due anni di osservazione.
- Ricampionamento temporale dei dati. Data la diversa cadenza temporale dei dati delle orbite ascendenti e discendenti, è stato necessario interpolare i dati sull'intero periodo di osservazione in corrispondenza dei giorni di acquisizione delle due orbite. Per questo caso studio è stata utilizzata un'interpolazione lineare (§ 3.3.1).

Le componenti dello spostamento vengono calcolate nel periodo in cui sono disponibili i dati relativi ad entrambe le orbite. Per una panoramica sulle tecniche di ricampionamento spaziale che permettono di ottenere mappe di spostamento si può fare riferimento al § 3.3.2.

I risultati sono mostrati in Figura 10-77. Sia per gli spostamenti verticali che longitudinali, si possono notare dei comportamenti stagionali imputabili agli effetti ambientali.

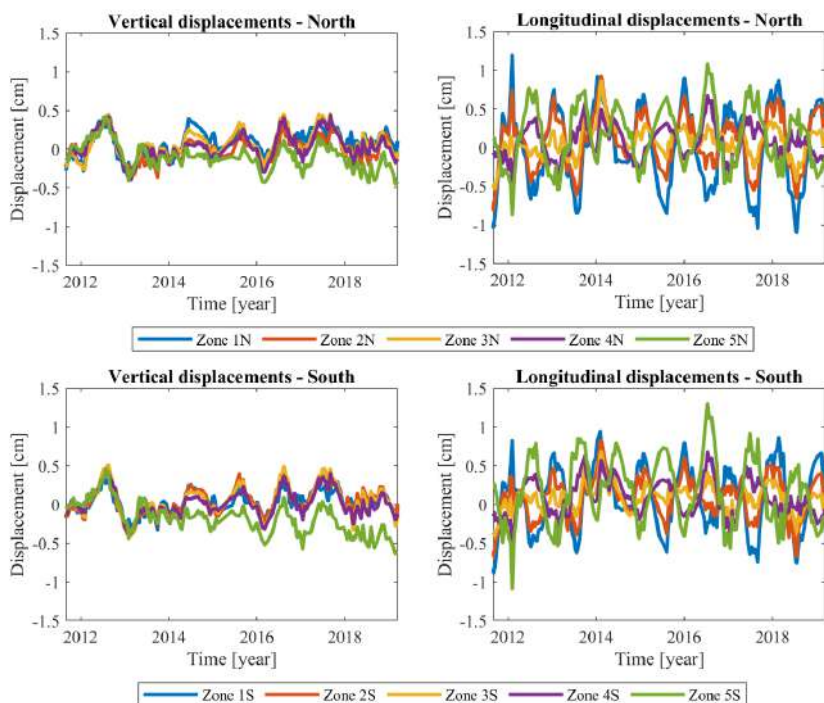


Figura 10-77 Serie temporali degli spostamenti verticali e longitudinali.

Analisi in frequenza delle serie temporali di spostamento

L'analisi in frequenza delle serie temporali di spostamento (§ 3.5) mostrata in Figura 10-78 evidenzia un picco marcato in corrispondenza dei fenomeni aventi cadenza annuale. Per ottenere questi risultati, le serie temporali sono state ricampionate ad un passo costante di circa 4 giorni. Il picco annuale è particolarmente visibile negli spostamenti longitudinali confermando la correlazione con gli effetti termici indotti dalle escursioni termiche stagionali.

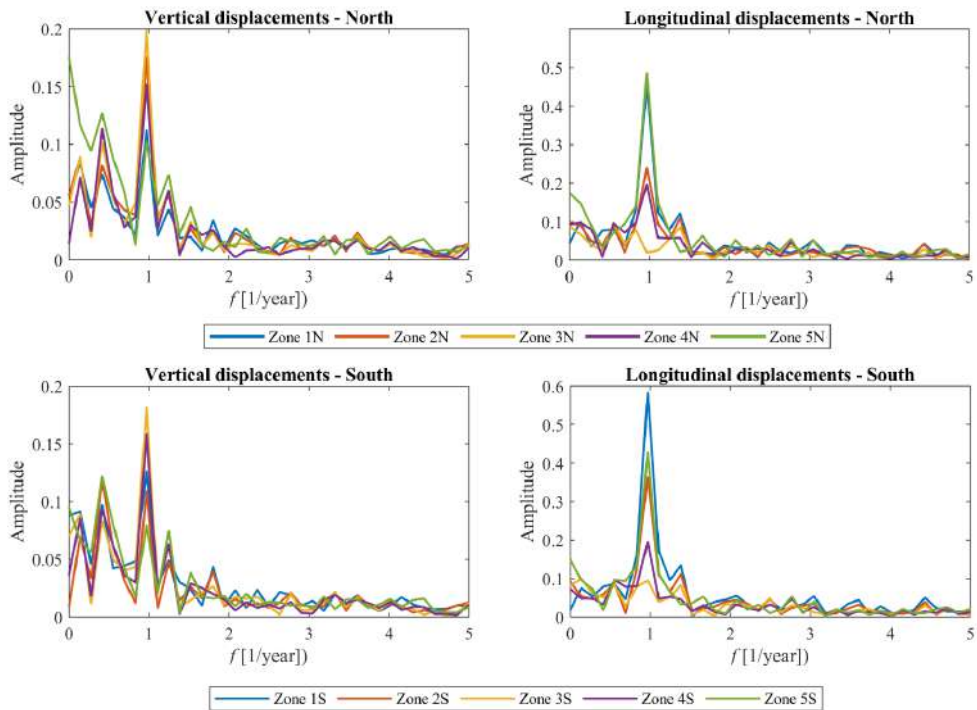


Figura 10-78 Trasformata di Fourier dei dati di spostamento.

Analisi degli effetti ambientali sugli spostamenti longitudinali

Tabella 10-7 riporta i coefficienti di correlazione $c_{E,i}$ tra gli spostamenti longitudinali delle varie zone dell'impalcato ed i valori di temperatura, dove il suffisso i si riferisce all' i -esima zona. I valori di $c_{E,i}$ sono vicini a 1 (in valore assoluto) ad eccezione di quelli relativi a Zona 3, che presenta spostamenti ridotti. Gli spostamenti delle Zone 1 e 2 mostrano una correlazione negativa con la temperatura (spostamenti negativi nei mesi estivi e positivi in quelli invernali, vedi Figura 10-77) mentre quelli delle Zone 4 e 5 hanno una correlazione positiva (spostamenti positivi nei mesi estivi e negativi in quelli invernali, vedi Figura 10-77), coerentemente con la loro posizione rispetto al vincolo fisso. Questo comportamento suggerisce che gli spostamenti longitudinali sono causati dalla dilatazione termica del ponte dovuta alla variazione della temperatura ambientale.

Tabella 10-7. Coefficienti di correlazione tra componenti di spostamento longitudinale e temperatura.

Zona n.	1		2		3		4		5	
Lato	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud
$c_{E,i}$	-0.93	-0.894	-0.871	-0.771	-0.452	-0.1271	0.694	0.654	0.872	0.882

La correlazione tra i dati di temperatura e spostamento longitudinale è evidenziata anche dai grafici mostrati in Figura 10-79 dove ogni punto rappresenta una coppia di valori di temperatura e spostamento longitudinale. L'unica eccezione è rappresentata dalla Zona 3 che presenta spostamenti modesti durante l'intero periodo di osservazione.

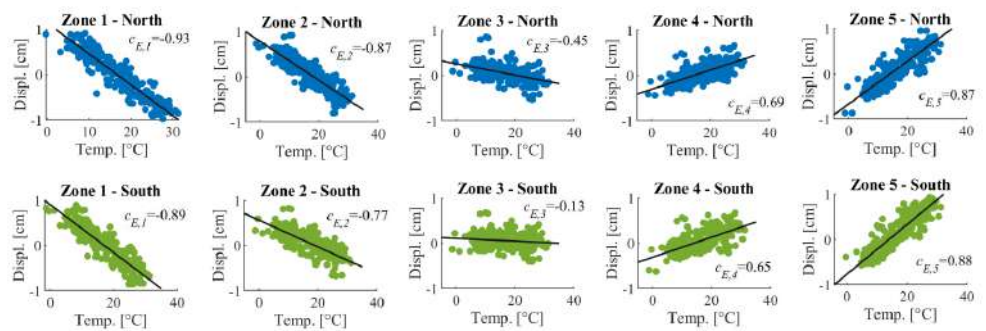


Figura 10-79 Grafici di spostamento longitudinale vs temperatura.

Analisi degli effetti ambientali sugli spostamenti verticali

La prima riga di Tabella 10-8 riporta i coefficienti di correlazione $c_{U,i}$ tra gli spostamenti verticali delle varie zone del ponte e la temperatura. Questi valori rimangono nel range 0.3-0.65. Ciò suggerisce che gli spostamenti non sono legati soltanto alle variazioni di temperatura. Risultati analoghi sono stati ottenuti analizzando la trasformata di Fourier degli spostamenti (Figura 10-78).

Tabella 10-8. Coefficienti di correlazione tra componenti di spostamento verticale e temperatura.

Zona n.	1		2		3		4		5	
Lato	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud
$c_{U,i}$	0.37	0.436	0.295	0.623	0.628	0.657	0.585	0.554	0.297	0.385
$c_{U^*,i}$	0.450	0.577	0.531	0.778	0.758	0.844	0.807	0.795	-	-

Viene quindi analizzato il comportamento dell'area circostante il ponte. Nello specifico, gli spostamenti verticali del ponte sono confrontati con quelli delle rovine del Ponte Rotto mostrato in Figura 10-80. Sulle rovine, sono presenti PS sia appartenenti sia all'orbita ascendente che a quella discendente. Pertanto, è possibile calcolare gli spostamenti verticali e longitudinali medi della struttura. I PS utilizzati nell'analisi sono quelli all'interno dell'ovale bianco in Figura 10-80.

La Figura 10-81a confronta le serie temporali degli spostamenti verticali delle rovine (linea rossa) con quelli delle Zone 1-4 (linee grigie) per entrambi i lati del ponte. La Zona 5 non è considerata in questa analisi poiché caratterizzata da spostamenti maggiori rispetto a quelli delle altre zone (vedi Figura 10-77).

Viene poi calcolato lo spostamento verticale relativo tra le rovine e l'impalcato del ponte. Le rovine sono costituite da blocchi di marmo che possono essere rappresentati come corpi rigidi che si muovono in maniera solidale al terreno. Gli spostamenti verticali relativi possono pertanto essere interpretati come gli spostamenti del ponte rispetto al terreno (che a sua volta può essere soggetto a fenomeni deformativi locali). I risultati sono mostrati in Figura 10-81b. I coefficienti di correlazione $c_{U^*,i}$ tra gli spostamenti relativi e la temperatura sono mostrati nella seconda riga di Tabella 10-8. Si nota come questi siano maggiori rispetto ai coefficienti di correlazione $c_{U,i}$ associati agli spostamenti verticali assoluti.

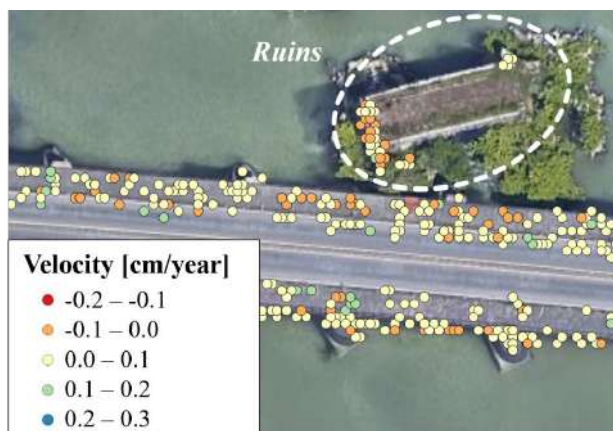


Figura 10-80 PS dalle due orbite situate sulle rovine.

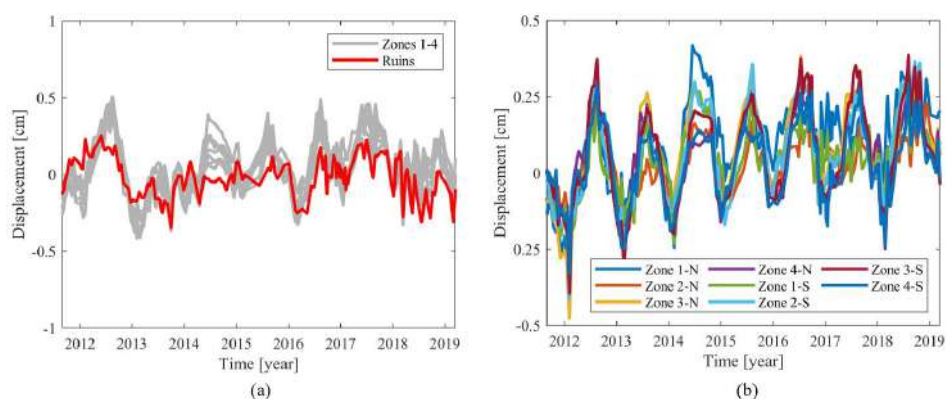


Figura 10-81 (a) Confronto tra gli spostamenti verticali delle Zone 1-4 e quelli delle rovine; (b) Storie temporali degli spostamenti verticali relativi.

Metodo per l'identificazione di anomalie strutturali

Gli spostamenti dei PS possono presentare variazioni dovute ad anomalie strutturali o agli effetti di fattori ambientali e/o operativi. Questo è un problema ben noto nel campo del monitoraggio strutturale e generalmente viene affrontato utilizzando approcci probabilistici. In (Giordano et al, 2022), i dati relativi al Ponte Palatino vengono trattati utilizzando un metodo di identificazione di anomalie strutturali basato sull'uso del dato interferometrico, integrato ad un algoritmo che rimuove gli effetti ambientali analizzando le componenti principali dello spostamento (Principal Components Analysis, PCA).

L'evoluzione nel tempo del comportamento strutturale viene indagata con il supporto di “carte di controllo” per individuare valori devianti dalla condizione di riferimento, tenendo conto allo stesso tempo di errori casuali. Sulle carte di controllo è visualizzato l'indice di danno T^2 , il quale rappresenta una misura della discrepanza tra i dati osservati e quelli attesi, tenendo conto della variabilità dei dati stessi e del modello di riferimento. Quando l'indice di danno T^2 si trova tra al di sotto del valore soglia (“Upper Control Limit”, UCL), la struttura può essere considerata in uno stato “di salute”.

Per indagare la sensibilità del metodo di identificazione di anomalie strutturali, viene simulato un cedimento di Zona 3 a partire dall'anno 2017. In particolare, vengono considerati due valori di cedimento: 1 e 2 mm. Non

vengono considerati gli spostamenti di Zona 5. I risultati dell'analisi di sensitività sono mostrati in Figura 10-82. Per definire il UCL, (linea tratteggiata arancione in Figura 10-82) è stata considerata una probabilità di falso allarme del 5% in un periodo di allenamento corrispondente ai primi due anni di osservazione. I risultati nei primi grafici a sinistra sono ottenuti considerando gli spostamenti effettivi delle 4 Zone (nessun assestamento simulato) mentre i risultati riportati negli altri due grafici (centrale e destra) sono relativi alle configurazioni con cedimento simulato. In assenza di cedimento, la maggior parte dei valori dell'indice T^2 si colloca al di sotto del UCL prima e dopo il periodo di allenamento. Per quanto riguarda i due scenari con cedimento, l'indice T^2 aumenta con l'entità del cedimento a partire dall'anno 2017. Un cedimento di 1 mm viene rilevato utilizzando gli spostamenti verticali relativi ad entrambi i lati (Nord e Sud) del ponte.

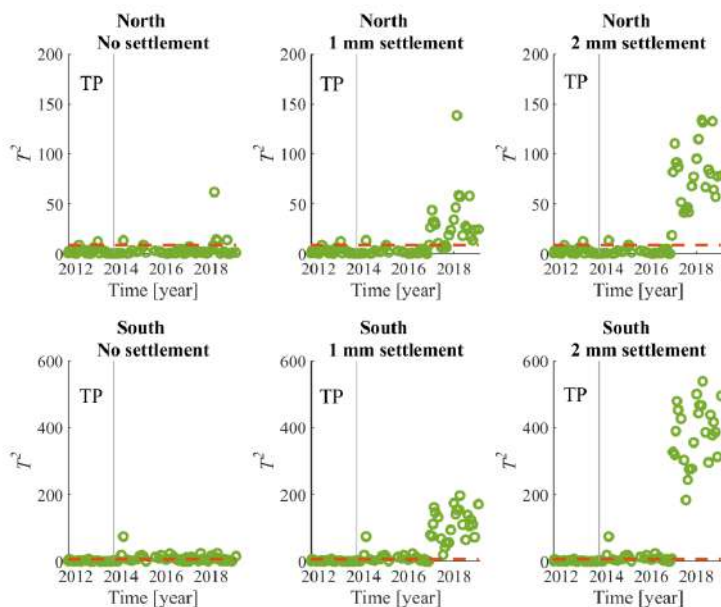


Figura 10-82 Carte di controllo e analisi di sensitività utilizzando gli spostamenti verticali (TP indica il periodo di allenamento).

10.7.4 Interpretazione dei dati interferometrici e discussione

Commenti relativi all'influenza degli effetti ambientali sugli spostamenti

Per quanto concerne gli spostamenti nella direzione longitudinale del ponte, si distinguono delle marcate oscillazioni stagionali imputabili principalmente a variazioni termiche. Queste sono coerenti con la posizione del vincolo fisso individuato nella pila posta fra le Zone 2 e 3.

Complessivamente, gli spostamenti verticali delle zone del ponte sono simili tra di loro ad eccezione di quelli relativi alla Zona 5. Questi sono dovuti in parte a dilatazioni termiche ed in parte a fenomeni di deformazione locale del terreno.

Commenti relativi alla validazione indiretta delle componenti di spostamento

La validazione degli spostamenti ottenuti mediante analisi InSAR è generalmente effettuata utilizzando dati acquisiti mediante sistemi in loco. In assenza di tali sistemi, in (Giordano et al., 2023), la coerenza degli spostamenti longitudinali del Ponte Palatino con gli effetti termici è stata verificata attraverso l'analisi dei coefficienti di dilatazione termica. Nello specifico, i dati di spostamento longitudinale e di temperatura sono stati utilizzati per

stimare il coefficiente di dilatazione termica lineare dell'impalcato del ponte ottenendo coefficienti compatibili con quello del ferro.

Commenti sull'identificazione di anomalie strutturali

Per identificare un'anomalia strutturale è necessario tener conto degli effetti ambientali ed operazionali sugli spostamenti. Dati su questi fattori non sono però sempre disponibili. Il principale vantaggio del metodo proposto basato su analisi PCA e carte di controllo consiste nella possibilità di eliminare l'influenza sugli spostamenti degli effetti ambientali ed operazionali senza la loro modellazione esplicita.

10.7.5 Riferimenti

Giordano P.F., Türksezer Z.I., Previtali M., Limongelli M.P. (2022). Damage detection on a historic iron bridge using satellite DInSAR data, *Structural Health Monitoring*, 21(5), 2291–2311; doi: 10.1177/14759217211054350.
Giordano P.F., Previtali M., Limongelli M.P. (2023). Monitoring of a metal bridge using DInSAR data, *Proceedings of the 10th European Workshop on Structural Health Monitoring (10th EWSHM)*, Palermo (Italy), 4-7 July, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-07258-1_41.

11 CONCLUSIONI

Il presente documento rappresenta probabilmente il più aggiornato stato dell'arte, anche nel panorama internazionale, sull'utilizzo dell'interferometria satellitare per applicazioni in ambito strutturale. Questo studio, promosso e finanziato dalla Protezione Civile tramite il progetto Reluis 2019-21 e 2022-24, è stato possibile tramite la collaborazione di esperti di interferometria satellitare del CNR IREA e di esperti di ingegneria strutturale facenti capo alle 17 Università coinvolte nel progetto. Le differenti competenze dei due gruppi di ricercatori hanno consentito di approfondire in modo critico il tema dell'uso dei dati satellitari, storicamente utilizzato principalmente per il monitoraggio del territorio, anche se alcuni approfondimenti sul tema avevano già evidenziato le grandi potenzialità del settore. Il confronto ha consentito sicuramente di individuare e proporre nuove tecniche di analisi dei dati, specificatamente per applicazioni che interessavano le costruzioni, sia specifiche per le varie tipologie di strutture che per tenere in conto quei fenomeni, cosiddetti ambientali, che causano spostamenti ma che non hanno rilievo sulla possibile insorgenza di danneggiamenti, come ad esempio i cicli stagionali di deformazione del terreno a scala territoriale o le variazioni termiche sia stagionali che giornaliere. La competenza in questa materia acquisita dai ricercatori coinvolti nel progetto sarà certamente un motore che porterà nel prossimo futuro a nuovi avanzamenti che potranno essere poi utilizzati anche oltre il campo della ricerca universitaria.

Infine, come era lecito attendersi, il monitoraggio da dati satellitari è stato inquadrato come una delle possibili tecniche per il monitoraggio delle strutture, di particolare interesse in quanto fornisce tipologie di dati molto diversi da quelli dei monitoraggi tradizionali on-site, oltre a consentire analisi indietro nel tempo. Tuttavia, proprio il fatto di essere un sistema molto diverso da quelli storicamente utilizzati, rende particolarmente importante poter confrontare anche se indirettamente, la coerenza dei dati ottenuti con quelli di monitoraggi tradizionali in qualche concreto caso di studio. Su questo aspetto si concentrerà la ricerca nel prossimo futuro.

Infine, la qualità dei risultati dipende certamente dalla disponibilità dei dati satellitari e dalla loro qualità. Tuttavia, il grande avanzamento tecnologico e, in parallelo, la rapida obsolescenza dei sistemi di costellazioni di satelliti, fa sì che disporremo in futuro certamente di dati sempre migliori e più numerosi, ma si porrà il problema di non perdere la continuità dei dati nel tempo che è ciò che consente di condurre analisi retroattive dei fenomeni di interesse. Un ulteriore elemento da segnalare riguarda il grande sforzo che si sta facendo nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), lo strumento attraverso cui il governo investe i fondi dell'iniziativa europea Next Generation EU, al fine di potenziare la disponibilità, l'accesso e l'utilizzo delle tecnologie satellitari di Osservazione della Terra, con l'obiettivo di fornire servizi operativi alla pubblica amministrazione ed a clienti privati. In tale contesto PNRR si inserisce lo sviluppo del sistema IRIDE, affidato all'ESA, con il supporto dell'ASI e delle principali istituzioni di ricerca italiane, ed implementato dall'industria nazionale. IRIDE prevede, entro il giugno 2026, la realizzazione di una costellazione di costellazioni di satelliti piccoli e medi, per fornire servizi di monitoraggio, sempre più avanzati, in diversi ambiti applicativi. Una componente rilevante della costellazione IRIDE riguarderà la realizzazione di sistemi SAR operanti nella banda X delle microonde, analogamente a quanto già accade per la costellazione nazionale COSMO-SkyMed, ed un ambito applicativo rilevante è rappresentato dal monitoraggio dell'ambiente costruito. Pertanto, l'utilizzo dei dati SAR che verranno acquisiti dalla costellazione IRIDE, ed il loro uso sinergico con quelli disponibili grazie alla costellazione COSMO-SkyMed di prima e seconda generazione, rappresenteranno ulteriori importanti temi di ricerca di frontiera ed elementi strategici per l'aumento della resilienza di edifici ed infrastrutture.

12 APPENDICE 1: LA PROCEDURA SBAS-DINSAR APPLICATA ALL'AREA STUDIO DI ROMA

12.1 PREMESSA

In questa Appendice si illustrano nel dettaglio le principali caratteristiche dei dati SAR satellitari e dei prodotti avanzati DInSAR derivati dalla loro elaborazione interferometrica, che sono stati utilizzati come caso studio per la redazione delle presenti Linee Guida. I dati SAR utilizzati per tale sperimentazione sono stati acquisiti dai sensori operanti in banda X (lunghezza d'onda pari a 3.1 cm) montati a bordo della costellazione satellitare COSMO-SkyMed (CSK), descritta nel paragrafo 2.3.2, e sono relativi alla modalità operativa definita *Stripmap HIMAGE*, con una risoluzione spaziale di circa 3m x 3m lungo le direzioni *azimuth* e *range*. La scelta dell'utilizzo dei dati in banda X per tale sperimentazione è legata alle risoluzioni spaziali molto spinte, che rendono i dati CSK particolarmente adatti all'analisi ed al monitoraggio su vasta scala delle deformazioni localizzate di strutture isolate, edifici o porzioni di essi, a supporto delle attività di controllo e tutela del territorio in aree densamente urbanizzate. I relativi prodotti DInSAR avanzati (serie temporali di spostamento e mappe di velocità media di deformazione a piena risoluzione spaziale) sono stati ottenuti elaborando i dati CSK con la tecnica DInSAR multi-temporale denominata SBAS (acronimo di *Small Baseline Subset*) a piena risoluzione spaziale, (tecnica SBAS-DInSAR, §2.5.2). Tale elaborazione è stata effettuata dai ricercatori del CNR-IREA, che hanno partecipato alla costituzione del tavolo tecnico di lavoro insieme al Dipartimento di Protezione Civile e al consorzio ReLUIS, finalizzato alla definizione delle suddette Linee Guida.

L'area scelta come test per le elaborazioni DInSAR e per l'analisi dei vari casi studio trattati all'interno del documento è l'area metropolitana di Roma. Tale scelta è dettata da vari fattori: per prima cosa, considerato il suo patrimonio storico, artistico ed archeologico, la città di Roma è stata "osservata" dai satelliti SAR di varie Agenzie Spaziali con una certa continuità dal 1992 ad oggi, permettendo di collezionare un archivio molto vasto di immagini radar, acquisite in oltre venticinque anni da diverse geometrie di osservazione (ascendenti e discendenti), con varie risoluzioni spaziali e frequenze di revisita. Inoltre, data la complessità ed eterogeneità del suo patrimonio costruito, Roma offre una variegata casistica sia di tipologie di edifici o infrastrutture, sia di fenomenologie che possono determinare spostamenti negli edifici, rappresentando un caso studio particolarmente interessante per l'analisi su vasta scala spaziale delle deformazioni localizzate di strutture isolate, edifici o porzioni di essi. Infine, grazie alla disponibilità di una gran quantità di informazioni di varia natura sulla città di Roma, dalla caratterizzazione geologica/geotecnica dei terreni su cui è stata costruita fino alla conoscenza delle caratteristiche strutturali e di edificazione delle strutture, è possibile sviluppare approcci innovativi finalizzati all'interpretazione delle misure di deformazione ottenute da dati SAR interferometrici.

Al fine di esaminare le potenzialità e/o le criticità dell'utilizzo delle misure di spostamento derivate dalle tecniche interferometriche satellitari per il monitoraggio e l'interpretazione del comportamento strutturale, sono stati identificati e selezionati due set di dati CSK acquisiti a partire dal 2011 sull'area di Roma da orbite sia ascendenti (direzione Sud-Nord) sia discendenti (direzione Nord-Sud). In particolare, i dati considerati sono di tipo *Single Look Complex* (SLC) di Livello L1, nella modalità *Stripmap* così come definita dal piano di acquisizione dati sull'intero territorio nazionale da orbite ascendenti e discendenti all'interno del progetto *Map Italy*, che consente di illuminare aree relativamente piccole rispetto a quelle di altri sensori satellitari (*footprint* a terra di circa 40 km) ma con una elevata risoluzione spaziale al suolo. I dati sono stati richiesti tramite License Agreement all'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e resi disponibili ai partecipanti al tavolo tecnico a seguito di approvazione del documento di licenza. La tecnica SBAS-DInSAR adottata in queste Linee Guida consente di misurare e seguire l'evoluzione temporale dello spostamento della superficie terrestre (e delle strutture poste su di essa) a diverse scale di risoluzione spaziale (Lanari et al., 2004; Bonano et al., 2012), producendo mappe di velocità e corrispondenti serie temporali di deformazione a scala sia regionale sia locale. L'analisi alla scala regionale permette di ricavare informazioni medie sugli spostamenti relativi ad aree che si estendono per alcune migliaia di chilometri quadrati, mentre l'analisi alla scala locale consente di "zoomare" in aree sensibili, al fine di rilevare *pattern* deformativi anche molto localizzati spazialmente, come nel caso di analisi di singoli edifici ed infrastrutture, strutture antropiche o frane, con notevoli

implicazioni e ricadute applicative nel campo della geotecnica e del controllo e monitoraggio di aree urbane o del patrimonio storico-culturale.

Le aree a terra illuminate dai *footprint* dei dati CSK ascendenti e discendenti sono mostrate in Figura 12-1. Essendo tra loro fortemente in sovrapposizione, è possibile eseguire, nelle aree comuni alle due elaborazioni interferometriche, analisi comparate dei risultati interferometrici a piena risoluzione spaziale ottenuti in maniera indipendente, ossia elaborando separatamente i dataset ascendenti e discendenti, in modo tale da ricavare, per quanto possibile, ulteriori informazioni utili per l'analisi e l'interpretazione dei segnali deformativi ricavati. Tale analisi è stata descritta nel paragrafo 3.3 e ampiamente utilizzata nei capitoli dedicati ai casi studio specifici. Qui di seguito verranno mostrati i risultati ottenuti dalle elaborazioni eseguite indipendentemente su due dataset CSK ascendenti e discendenti con la tecnica SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale.



Figura 12-1 – Copertura al suolo dei dati CSK acquisiti da orbite ascendenti (a) e discendenti (b) relativi all'area di Roma, scelta come area di riferimento in queste linee guida.

12.2 PROCEDURE DI ANALISI

L'approccio SBAS-DInSAR si basa sulla generazione di un gran numero di interferogrammi differenziali, ottenuti calcolando la differenza di fase tra coppie di immagini SAR acquisite da posizioni orbitali sufficientemente vicine (baseline spaziali) e in istanti temporali ravvicinati (baseline temporali). Combinando opportunamente tali interferogrammi è possibile ottenere mappe di velocità media e serie storiche di deformazione, relative ad aree di migliaia di chilometri quadrati, alla scala del singolo edificio o infrastruttura e con accuratizie sub-centimetriche. L'approccio SBAS-DInSAR permette di minimizzare gli effetti di rumore (decorrelazione) presenti negli interferogrammi, massimizzando, pertanto, il numero di punti di misura per unità di area (punti coerenti). Tali misure rappresentano la proiezione dello spostamento lungo la linea di vista del sensore radar, denominata LOS (acronimo di Line Of Sight), e sono riferite ad un unico punto nello spazio, scelto in una zona ritenuta stabile, e ad un istante nel tempo, che tipicamente corrisponde alla prima acquisizione disponibile.

Come già anticipato nel paragrafo 3.2, l'analisi interferometrica ottenuta a partire dall'elaborazione di dati acquisiti da una singola orbita, ascendente o discendente, può fornire informazioni preliminari in relazione a fenomeni deformativi in atto, limitate però all'analisi dello spostamento e della velocità media lungo una sola direzione, quella della Linea di Vista (LOS) del sensore. Per effettuare analisi SBAS-DInSAR più accurate finalizzate ad una corretta interpretazione dei fenomeni deformativi in corso, è opportuno avere a disposizione, su una certa area di interesse, i dati acquisiti da orbite sia ascendenti sia discendenti, in modo tale da elaborare in maniera indipendente i due set di dati interferometrici CSK ascendenti e discendenti e poi combinare tra loro i risultati ascendenti e discendenti, al fine di stimare la componente dello spostamento nelle due direzioni Verticale ed E-W (non è possibile ricavare

invece in modo ugualmente accurato la terza componente dello spostamento lungo la direzione N-S per ragioni intrinseche del sistema di acquisizione radar che opera tipicamente lungo orbite quasi polari). Chiaramente, essendo le misure interferometriche differenziali, la condizione per poter effettuare tale analisi avanzata (che è descritta in dettaglio nel paragrafo 3.3 e che è stata utilizzata largamente nella descrizione dei diversi casi di studio) è di utilizzare un unico punto di riferimento spaziale comune ai risultati SBAS-DInSAR ottenuti da elaborazioni interferometriche indipendenti, definito *Reference Point* (paragrafo 2.6.1), generalmente selezionato in un'area coerente, dal punto di vista interferometrico, e stabile, in modo da poter assumere nulli eventuali fenomeni deformativi nel punto.

È possibile fare lo stesso tipo di considerazione per il riferimento temporale, che nel caso dei prodotti SBAS-DInSAR coincide con la prima acquisizione del dataset SAR elaborato. Nel caso di analisi congiunta di serie temporali di deformazione ascendenti e discendenti per la stima delle componenti verticale ed E-W dello spostamento, è necessario quindi considerare un intervallo temporale comune alle due elaborazioni, effettuare un ricampionamento temporale (si veda il paragrafo 3.3.1 per maggiori dettagli) e prendere come riferimento temporale la prima acquisizione.

Come già ampiamente discusso nel paragrafo 2.6.2, un parametro di fondamentale importanza per la selezione dei punti di misura SBAS-DInSAR ritenuti affidabili è la coerenza temporale, ossia il parametro che fornisce una stima, per ogni singolo punto di misura, della qualità delle serie temporali di spostamento, attraverso la valutazione della similarità tra il segnale interferometrico di partenza e il modello di fase adottato. Il suo valore può variare tra 0 (punti completamente rumorosi) e 1 (punti senza rumore); per la selezione dei pixel coerenti, viene assegnata una soglia minima di coerenza temporale al di sotto della quale la qualità dei punti di misura viene considerata non sufficiente per considerare affidabile le stime delle componenti di spostamento e pertanto tali punti vengono scartati nella catena di elaborazione SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale.

L'ultimo passo della catena interferometrica SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale riguarda la geolocalizzazione dei punti di misura ottenuti dalle elaborazioni interferometriche indipendenti dei due dataset CSK ascendenti e discendenti, attraverso operazioni di *geocoding* interferometrico che consentono di passare da griglia radar a griglia geografica. Nel caso specifico, l'operazione di *geocoding* viene eseguita utilizzando la componente topografica della fase interferometrica, stimata dalla catena di elaborazione SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale nei punti coerenti, per la correzione/aggiornamento del DEM di partenza. In questo modo, grazie all'informazione topografica, caratterizzata da una precisione nettamente migliore rispetto a quella del DEM di partenza sia in termini di campionamento spaziale, sia di accuratezza della misura, è possibile geolocalizzare i punti coerenti con un errore di pochi metri nelle tre dimensioni dello spazio. In particolare, facendo riferimento alla Figura 2-26, la posizione dei punti coerenti è trasformata dalla griglia *azimuth/range* (griglia radar in rosso) alla griglia latitudine/longitudine (griglia geografica in nero); la prima è una griglia regolare nella geometria radar dell'immagine di riferimento con passo di campionamento definito dal sistema di acquisizione radar (per CSK circa 2 m sia in *azimuth* che in *range*), mentre la seconda è una griglia regolare nelle coordinate geografiche (latitudine e longitudine nel sistema di riferimento globale WGS84), il cui campionamento è definito dalle cifre significative utilizzate per la conversione in latitudine e longitudine (nel caso in esame, 10^{-5} gradi in entrambe le direzioni).

12.3 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI SBAS-DINSAR A PIENA RISOLUZIONE SPAZIALE CON DATI CSK SULL'AREA DI ROMA

Come anticipato ai paragrafi precedenti, l'analisi interferometrica degli spostamenti superficiali nell'area di Roma è stata condotta utilizzando la tecnica SBAS-DInSAR, sviluppata presso l'IREA-CNR di Napoli a partire dal 2001 e consolidata negli anni successivi.

Sono stati selezionati due set di dati CSK, il primo composto da 129 immagini acquisite da orbite ascendenti e relative all'intervallo temporale che va da Marzo 2011 a Marzo 2019, e il secondo composto da 107 immagini acquisite da orbite discendenti nell'intervallo da Luglio 2011 a Marzo 2019. A partire da tali dataset, sono stati generati 392 interferogrammi differenziali ascendenti e 332 discendenti; per la selezione delle corrispondenti coppie interferometriche, è stato imposto un vincolo massimo di 1000 m sulla *baseline* perpendicolare (per non incorrere in problemi di decorrelazione della fase interferometrica nel caso di valori molto elevati di *baseline* perpendicolare).

Le caratteristiche principali dei dati SAR CSK utilizzati per l'analisi interferometrica sono sintetizzate in Tabella 12-1. Inoltre, per la generazione degli interferogrammi differenziali è stato utilizzato il DEM (Digital Elevation Model), generato dalla SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), dell'area con una risoluzione spaziale di 1 arcsec (circa 30 m alle nostre latitudini). Sia gli interferogrammi differenziali generati, sia le successive mappe di velocità media e serie storiche di deformazione hanno una risoluzione spaziale di circa 3 m.

Per entrambi i dataset ascendente e discendente è stata imposta la soglia minima di coerenza temporale pari a 0.35 e sono stati, pertanto, scartati i punti con coerenza inferiore a tale soglia.

Tabella 12-1. Caratteristiche principali dei dati SAR CSK utilizzati per l'analisi interferometrica

Sensore	COSMO-SkyMed	
Lunghezza d'onda	3.1 cm	
Direzione di acquisizione	Ascendente destro	Discendente destro
Angolo di vista	~34°	~29°
Estensione spaziale	~40 km x 40 km	
Intervallo temporale	23/03/2011 – 11/03/2019	29/07/2011 – 13/03/2019
Numero di acquisizioni	129	107
Numero di interferogrammi differenziali	392	332

In Figura 12-2 è riportata la mappa della velocità di deformazione dell'intero frame sull'area metropolitana di Roma, proiettata lungo la LOS del sensore e ottenuta dall'elaborazione SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale dei dati CSK ascendenti nell'intervallo Marzo 2011 – Marzo 2019. L'informazione di velocità media di deformazione (in falsi colori) è stata geocodificata e sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area; le zone dove la misura di deformazione è affetta da rumore di decorrelazione sono escluse dalla mappa a falsi colori; il riferimento spaziale rispetto al quale sono state calcolate le misure di deformazione è localizzato nel centro storico di Roma, vicino al Colosseo, indicato in figura con la stella rossa.

L'analisi interferometrica ha mostrato l'assenza di segnali deformativi a carattere regionale, pur evidenziando alcuni fenomeni localizzati (con entità dell'ordine del cm/anno) che interessano il singolo edificio o la singola infrastruttura. I maggiori movimenti sono relativi alla zona del raccordo autostradale A90/A91 che collega l'area urbana del comune di Roma con l'aeroporto di Fiumicino (Figura 12-3), dove sono stati misurati segnali deformativi dell'ordine di qualche cm/anno (si veda il grafico della serie temporale di deformazione relativo ad un punto in corrispondenza della zona di massima deformazione). Inoltre, sono stati registrati spostamenti di alcuni mm/anno nella zona di Viale Giustiniano Imperatore, a sud del centro urbano di Roma, in accordo con quanto già evidenziato da analisi interferometriche precedenti (Manunta et al., 2008; Zeni et al., 2011) ottenute con dati storici ERS/ENVISAT acquisiti in banda C.

Analogamente a quanto fatto per i dati CSK acquisiti da orbite ascendenti, si riporta in Figura 12-4 la mappa della velocità di deformazione SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale del dataset discendente, proiettata lungo la LOS del sensore e relativa all'intervallo temporale Luglio 2011 – Marzo 2019. Anche per il dataset discendente è stato utilizzato un punto di riferimento in corrispondenza del centro storico di Roma vicino al Colosseo (si veda la stella blu in Figura 12-4).

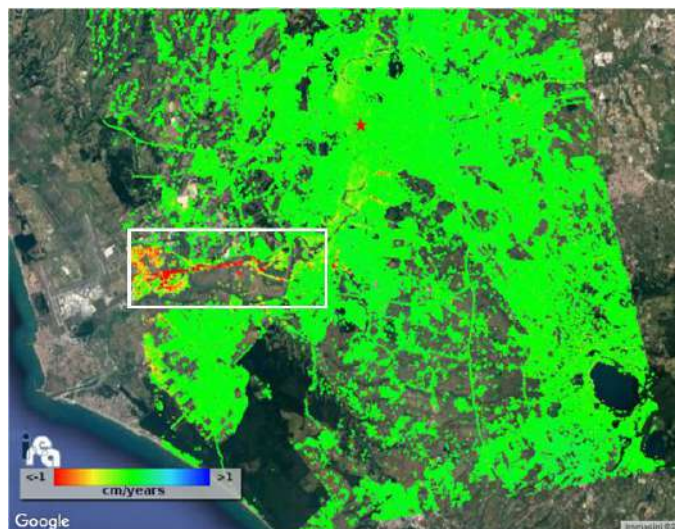


Figura 12-2 – Mappa geocodificata (in falsi colori) della velocità media di deformazione in LOS, espressa in cm/anno e ottenuta dall'elaborazione SBAS-DInS.AR a piena risoluzione spaziale dei dati CSK acquisiti da orbite ascendenti nell'intervallo Marzo 2011 – Marzo 2019, relativa all'intera area metropolitana di Roma. La stella rossa indica un punto in corrispondenza di un'area vicina al Colosseo scelto come punto di riferimento per l'elaborazione interferometrica.

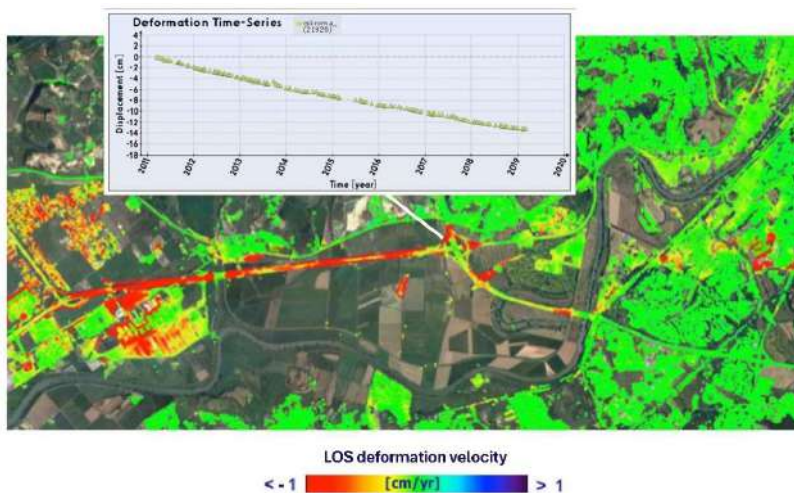


Figura 12-3 –Ingrandimento dell'area del raccordo autostradale A90/A91 Roma-Fiumicino indicato nel rettangolo bianco di Figura 12-2. Il grafico rappresenta la serie storica di deformazione relativa ad un punto localizzato in una delle aree di massima deformazione.

Anche dall'elaborazione del dataset CSK discendente risulta che i maggiori segnali deformativi sono ascrivibili ad effetti locali che interessano singoli edifici o infrastrutture (con entità della velocità di deformazione di circa 1 cm/anno), principalmente localizzati nella zona a Sud-Ovest dell'area metropolitana di Roma, in corrispondenza del tratto di sopraelevata all'altezza dello svincolo per il Raccordo Anulare, dove i piloni poggiano su depositi alluvionali e terreni di riporto, e nell'area della nuova Fiera di Roma (la zona riportata in dettaglio in Figura 12-3

per il dataset ASC). In queste zone i segnali deformativi mostrano un andamento pressoché lineare, con velocità di deformazione che, in diversi casi, superano il cm/anno. Inoltre, i risultati SBAS-DInSAR ottenuti da orbite discendenti confermano ancora una volta la ben nota deformazione che interessa l'area urbana a Sud del centro storico di Roma, tra i quartieri Ostiense e Viale Marconi, in corrispondenza dei depositi alluvionali del Tevere, dove sono evidenti fenomeni deformativi di entità di diversi mm/anno (Figura 12-5). Oltre alle caratteristiche geologiche, geotecniche e idrologiche dei terreni di tipo alluvionale, caratterizzati da un'elevata compressibilità, in quest'area giocano un ruolo chiave anche i fenomeni di interazione tra terreno e struttura (dipendenti a loro volta dal tipo di costruzione e dal sistema di fondazione, dall'età degli edifici, etc.). In Figura 12-5 sono riportati ingrandimenti delle mappe di velocità di deformazione a piena risoluzione spaziale corrispondenti ai tre riquadri bianchi indicati con le lettere A, B e C, ed i plot delle serie storiche di alcuni punti relativi ai fenomeni deformativi osservati. In particolare, nel riquadro indicato con la lettera A è riportata la velocità media di deformazione dell'area di Viale Giustiniano Imperatore, in zona Viale Marconi, dove sono registrate velocità di spostamento di diversi mm/anno in corrispondenza di alcuni edifici caratterizzati da trend deformativi localizzati nello spazio. Grazie alle risoluzioni spaziali elevate (circa 3 m) caratteristiche dei sistemi CSK, i quali operano in banda X, è possibile rilevare spostamenti associati a singoli edifici o porzioni di essi, identificando pertanto anche movimenti differenziali "intra-building" tra parti di strutture complesse o associate a loro porzioni. Il grafico associato al riquadro A rappresenta i valori delle velocità media di deformazione lungo la sezione A'A", indicando un segnale deformativo variabile lungo il profilo longitudinale della struttura in esame. Nel riquadro indicato con la lettera B in Figura 12-5 è riportata la mappa di velocità di deformazione e il corrispondente plot della serie temporale di spostamento di un punto localizzato nella zona vicino alla stazione di Roma Ostiense, caratterizzata da fenomeni deformativi significativi dell'ordine del cm/anno. Oltre a spostamenti associati al consolidamento dei terreni alluvionali (movimenti principalmente relativi alla subsidenza del terreno, spesso caratterizzati in quest'area da un andamento lineare nel tempo), la tecnica SBAS-DInSAR è in grado di individuare anche segnali deformativi caratterizzati da andamenti non lineari nel tempo, come ad esempio quelli legati alle componenti di spostamento dovuto alla dilatazione termica dei materiali correlata con le temperature medie giornaliere dell'area. Un esempio è mostrato nel riquadro identificato con la lettera C in Figura 12-5, dove è riportata la mappa di velocità di deformazione SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale in corrispondenza dell'ormai dismesso gasometro di Roma Ostiense (quello che rimane adesso è, infatti, solo la gabbia metallica esterna), dove non sono stati registrati spostamenti rilevanti, ma soltanto un andamento ciclico stagionale associato alle strutture metalliche, dovuto alla dilatazione termica del metallo correlato con le temperature medie giornaliere.

La differente copertura a terra dei dati CSK acquisiti da orbite discendenti rispetto a quelli da orbite ascendenti (vedi Figura 12-1) non consente in generale una valutazione completa dei fenomeni deformativi in atto, possibile soltanto utilizzando i dati delle due orbite come specificato al paragrafo 3.3. Ad esempio, l'intera area dell'aeroporto di Fiumicino è coperta solo dall'orbita discendente e in Figura 12-6 è riportata la mappa della velocità media annua di deformazione di tale dataset. Da ricordare che in caso di dati da un singolo dataset (vedi paragrafo 3.2) è comunque possibile ricavare alcune informazioni utili all'interpretazione dei fenomeni in corso. I segnali deformativi registrati in quest'area sono abbastanza rilevanti (con entità di velocità di deformazione di oltre 1 cm/anno) e sono principalmente correlati sia con le caratteristiche litologiche e geotecniche dei depositi costituenti il substrato dell'area in esame, ricchi di sostanza organica di origine lagunare-palustre, sia con i successivi pompaggi d'acqua effettuati in seguito alla costruzione dell'aeroporto, iniziata intorno al 1958. In Figura 12-6 è riportato, a titolo d'esempio, l'ingrandimento della mappa di velocità di deformazione SBAS-DInSAR a piena risoluzione in corrispondenza di un tratto della pista aeroportuale, dove sono stati misurati spostamenti superiori a 1 cm/anno. Il grafico a destra mostra l'andamento temporale dello spostamento di un punto localizzato nella zona di massima deformazione della pista; si noti che la velocità di deformazione è aumentata a partire dal 2016.

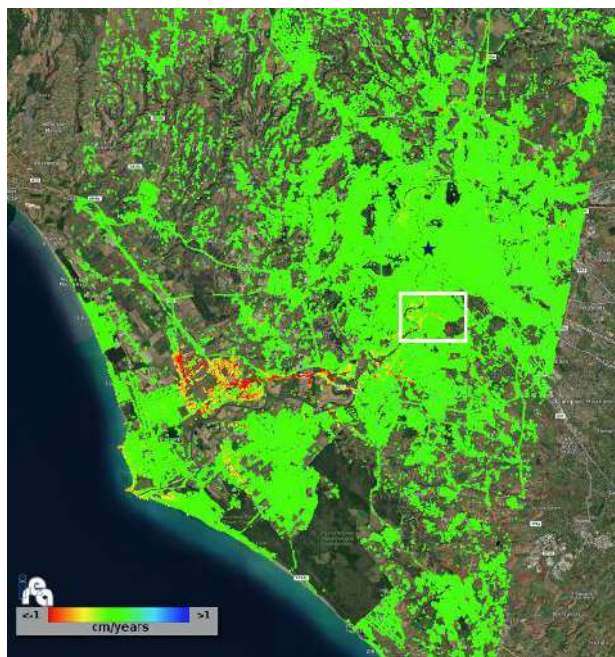


Figura 12-4 – Mappa geocodificata (in falsi colori) della velocità media di deformazione in LOS, espressa in cm/anno e ottenuta dall'elaborazione SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale dei dati CSK acquisiti da orbite discendenti nell'intervallo Luglio 2011 – Marzo 2019, relativa all'intera area metropolitana di Roma. La stella blu indica la posizione del punto di riferimento per l'elaborazione interferometrica localizzato vicino al Colosseo.

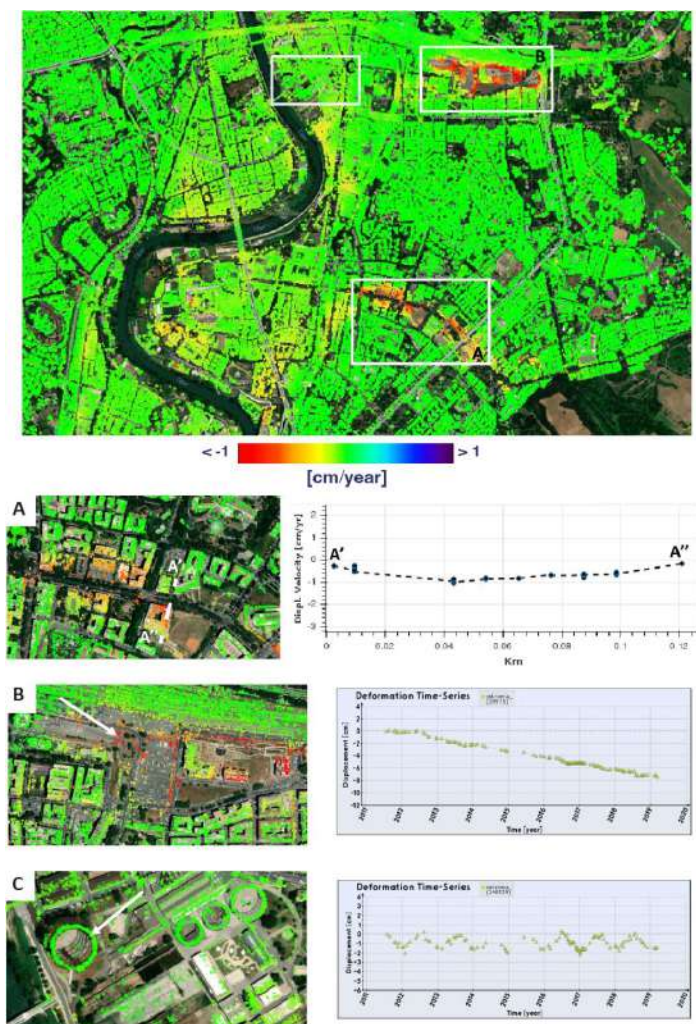


Figura 12-5 – In alto, mappa della velocità di deformazione a piena risoluzione spaziale, relativa all'area a Sud del centro storico di Roma, tra i quartieri Ostiense e Viale Marconi, corrispondente al rettangolo bianco di Figura 12-4. I tre rettangoli bianchi indicati con le lettere A, B e C sono corrispondenti a tre aree caratterizzate da diversi fenomeni deformativi, le cui viste ingrandite delle mappe di velocità e i grafici degli spostamenti relativi ad alcuni punti localizzati sono riportati nella parte sottostante della figura.

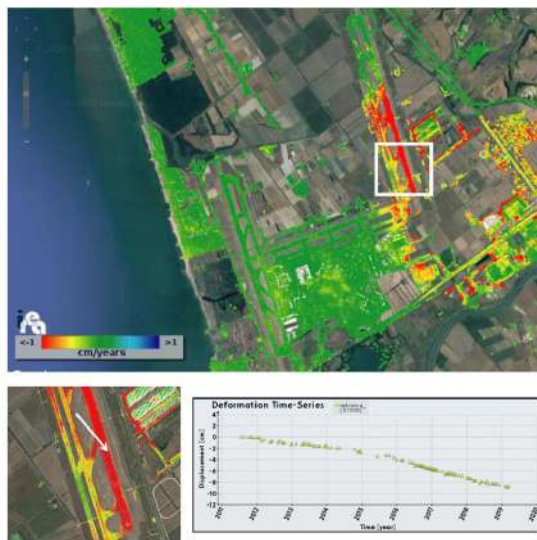


Figura 12-6 – Mappa della velocità di deformazione SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale dei dati CSK acquisiti da orbite discendenti, relativa all'area dell'aeroporto di Fiumicino. In basso è mostrata l'ingrandimento della mappa di velocità di deformazione in corrispondenza di un tratto della pista, ed il grafico della serie temporale di deformazione di un suo punto localizzato nell'area di massima deformazione.

12.4 TIPOLOGIA DEL DATO FORNITO

I risultati interferometrici SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale ottenuti attraverso l'elaborazione dei due dataset CSK ascendenti e discendenti sono stati forniti sotto forma di file ASCII corredati di metadati a supporto dell'informazione di spostamento (e.g., angolo di incidenza, lunghezza d'onda, geometria di riferimento dell'immagine MASTER, risoluzione spaziale, numero di acquisizioni, etc.). Ogni PS presente nel file *txt* rappresenta un punto per il quale l'informazione di fase interferometrica è ritenuta affidabile nel tempo (punto coerente) ed è identificato tramite un ID numerico univoco e collocato spazialmente attraverso le coordinate geografiche (latitudine e longitudine espresse in gradi sessagesimali). Ogni PS è, inoltre, corredato di diverse informazioni utili alla localizzazione a terra in un sistema di riferimento geografico (**latitudine e longitudine**) e di parametri di maggiore interesse ingegneristico, quali:

- **“Topo”**: è la topografia assoluta che indica la quota geoidica del punto riferita al modello EGM96 nel sistema di riferimento WGS84;
- **“cosE, cosN, cosU”**: sono i coseni direttori della linea di vista (Line of Sight - LOS) rispetto agli assi E, N e verticale, rispettivamente;
- **“Vel”**: è la velocità di spostamento annuale espressa in [cm/anno], lungo la LOS del satellite del punto di misura cui è associato un certo ID, valutata come pendenza della retta di regressione lineare della serie temporale di spostamento di quel determinato punto;
- **“Coer”**: è la coerenza temporale, ossia il parametro che fornisce una stima, per ogni singolo punto di misura, della qualità delle serie temporali di spostamento, attraverso la valutazione della similarità tra il segnale deformativo arrotondato di partenza e il modello di fase adottato, e ha un valore compreso tra 0 e 1; nel caso delle due elaborazioni CSK presentate nel paragrafo 12.2, è stata considerata una soglia di coerenza di 0.35 per i prodotti SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale;
- **“TS”**: serie storiche di spostamento (in cm) lungo la LOS del satellite del punto di misura. La lunghezza di questo campo dipende dal numero di acquisizioni SAR utilizzate nella generazione delle serie temporali ed elencate nel campo denominato **“List_of_dates”** del file di testo; inoltre, il primo elemento del campo,

corrispondente allo spostamento della prima acquisizione, è sempre uguale a zero in quanto la serie temporale ha come riferimento temporale la prima immagine del dataset; pertanto, tutte le misure di spostamento sono riferite alla prima data.

12.5 RIFERIMENTI

Bonano M., Manunta M., Marsella M., Lanari R. (2012). Long-term ERS/ENVISAT deformation time-series generation at full spatial resolution via the extended SBAS technique. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 4756-4783.

Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorquí J.J., Berardino P., Sansosti E. (2004). A small baseline approach for investigating deformations on full resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 1377-1386.

Manunta M., Marsella M., Zeni G., Sciotti M., Atzori S., Lanari R. (2008) Two-scale surface deformation analysis using the SBAS-DInSAR technique: a case study of the city of Rome, Italy, *International Journal of Remote Sensing*, 29(6), 1665-1684. DOI: 10.1080/01431160701395278.

Zeni G., Bonano M., Casu F., Manunta M., Manzo M., Marsella M., Pepe A., Lanari R. (2011) Long-term deformation analysis of historical buildings through the advanced SBAS-DInSAR technique: the case study of the city of Rome, Italy, *Journal of Geophysics and Engineering*, Volume 8, Issue 3, P S1-S12, doi:10.1088/1742-2132/8/3/S01

GRUPPO DI LAVORO

Il presente Documento è stato predisposto nell'ambito delle attività dei Progetti DPC-ReLUIIS 2019-2021 – 2022-2024 *WP6 Monitoraggio e Dati Satellitari*, da un **Gruppo di Lavoro** costituito da:

Mauro DOLCE - *Presidente Consorzio Interuniversitario ReLUIIS*

Con il Coordinamento di:

Marco SAVOIA - *Università di Bologna*

Felice Carlo PONZO - *Università degli Studi della Basilicata*

Andrea PROTA - *Università degli Studi di Napoli "Federico II"*

Unità di Ricerca ReLUIIS:

Rocco DITOMMASO, Felice C. PONZO - *Università degli Studi della Basilicata*

Marco SAVOIA - *Università degli Studi di Bologna*

Serena CATTARI - *Università degli Studi di Genova*

Loris VINCENZI - *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*

Giovanni FABBROCINO - *Università degli Studi del Molise*

Andrea MIANO, Annalisa MELE, Andrea PROTA - *Università degli Studi di Napoli "Federico II"*

Francesca DA PORTO - *Università di Padova*

Francesca BOZZANO - *Sapienza Università di Roma*

Fabio DI CARLO, Alberto MEDA - *Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"*

Rosario CERAVOLO - *Politecnico di Torino*

Diego Alejandro TALLEDO, Alberto STELLA, Anna SAETTA - *Università IUAV di Venezia*

Unità di Ricerca IREA, Consiglio Nazionale delle Ricerche:

Manuela BONANO, Riccardo LANARI - *CNR-IREA*

Referenti del Dipartimento della Protezione Civile, Presidenza del Consiglio dei Ministri

Daniela DI BUCCI, Francesco GIORDANO, Roberta GIULIANI - *DPC*

Per i CASI STUDIO:

Caso studio n. 1

Daniele SIVORI, Serena CATTARI - *Università di Genova*

Loris VINCENZI - *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*

Gaetano MIRAGLIA, Rosario CERAVOLO - *Politecnico di Torino*

Caso studio n. 2

Andrea MIANO, Annalisa MELE, Andrea PROTA - *Università di Napoli "Federico II"*

Fabio DI CARLO - *Università di Roma "Tor Vergata"*

Diego Alejandro TALLEDO - *Università Iuav di Venezia*

Caso studio n. 3

Fabio DI CARLO, Alberto MEDA - *Università di Roma "Tor Vergata"*

Andrea MIANO, Annalisa MELE - *Università di Napoli "Federico II"*

Diego Alejandro TALLEDO - *Università Iuav di Venezia*

Caso studio n. 4

Diego Alejandro TALLEDO, Anna SAETTA - *Università Iuav di Venezia*

Andrea MIANO, Annalisa MELE - *Università di Napoli "Federico II"*

Fabio DI CARLO - *Università di Roma "Tor Vergata"*

Caso studio n. 5

Rocco DITOMMASO, Gianluca AULETTA, Nicla LAMARUCCIOLA, Paolo IELPO, Felice Carlo PONZO - *Università degli Studi della Basilicata*

Francesca BOZZANO - *Sapienza Università di Roma*

Manuela BONANO, Riccardo LANARI - *CNR-IREA*

Caso studio n. 6

Pier Francesco GIORDANO, Maria Giuseppina LIMONGELLI - *Politecnico di Milano*

Appendice 1

Manuela BONANO, Riccardo LANARI - *CNR-IREA*

Hanno inoltre contribuito al documento:

Michele MANUNTA, Francesco CASU, Mariarosaria MANZO, Pasquale STRIANO - *CNR-IREA*

Luisa BERTO - *Università Iuav di Venezia*

Antonio SANDOLI - *Università degli Studi del Molise*

Gabriele SCARASCIA MUGNOZZA, Paolo MAZZANTI, Nicoletta NAPPO - *Sapienza Università di Roma*

Gaetano MIRAGLIA - *Politecnico di Torino*

Questa pubblicazione può essere citata come:

Prota A., Savoia M., Ponzo F.C. (a cura di), *Linee guida per l'utilizzo dei dati interferometrici satellitari ai fini dell'interpretazione del comportamento strutturale delle costruzioni*, Doppiavoce, 2025.

Ringraziamenti e riconoscimenti

Gli studi oggetto della presente pubblicazione sono stati realizzati nell'ambito dei progetti DPC_ReLUIIS 2019_2021, DPC_ReLUIIS 2022_2024, DPC_CNR-IREA 2019-2021 e DPC_CNR-IREA 2022-2024. I contenuti di questo lavoro rappresentano le idee degli autori e non corrispondono necessariamente all'opinione ufficiale e alle politiche del Dipartimento della Protezione Civile.

