

## PROGETTO DPC-RELUIs 2019-2021

### WP4 - MAPPE DI RISCHIO E SCENARI DI DANNO SISMICO (MARS)

#### Coordinatori:

**Sergio Lagomarsino**

*Università degli Studi di Genova*

**Angelo Masi**

*Università degli Studi della Basilicata*

### *Mappe di rischio sismico dell'edilizia residenziale*

## REPORT FINALE

Redatto a cura di Sergio Lagomarsino e Angelo Masi  
con la collaborazione di Sara Alfano e Giuseppe Nicodemo

Hanno fornito contributi specifici:

Giulio Zuccaro (§2.2), Roberto Paolucci (§3.1), Marco Di Ludovico (§6),  
Francesca da Porto (§11), Barbara Borzi (§13.1)

Referenti del DPC per il WP4: Mauro Dolce ed Elena Speranza

Il report descrive le attività del triennio, nei Task 4.1/2/3/4/5/6/10/11, svolte dalle seguenti UR:

UR1 (UniBAS) Angelo Masi	UR2 (UniGE-a) Sergio Lagomarsino
UR3 (UniNA-f) Giulio Zuccaro	UR4 (PoliMI) Roberto Paolucci
UR6 (UniCAM) Andrea Dall'Asta	UR8 (UniCH) Giuseppe Brando / Guido Camata
UR9 (UniGE-b) Serena Cattari	UR10 (UniNA-a) Gerardo Verderame
UR11 (UniNA-b) Andrea Prota / Marco Di Ludovico / Maria Polese	
UR13 (UniNA-d) Fulvio Parisi	UR16 (UniPD) Francesca da Porto
UR17 (UniPG) Antonio Borri	UR19 (UniPR) Beatrice Belletti
UR20 (UniPV) Andrea Penna / Francesco Graziotti	UR21 (UniRM1-a) Giorgio Monti
UR22 (UniRM1-b) Luigi Sorrentino	UR23 (UniSA) Enzo Martinelli



# Sommario

1	INTRODUZIONE: DESCRIZIONE ED OBIETTIVI DEL WP4.....	5
2	ESPOSIZIONE: IL COSTRUITO RESIDENZIALE ITALIANO.....	8
2.1	Descrizione e analisi dell'inventario ISTAT 2011 .....	8
2.2	Analisi tipologica regionalizzata del costruito tramite il database CARTIS .....	12
2.3	Elaborazione di matrici di frequenza delle tipologie muratura/solaio per le tipologie ISTAT in ambiti territoriali (Regione/Altimetria/Demografia).....	15
3	PERICOLOSITÀ.....	19
3.1	Pericolosità di base: riflessioni e aggiornamenti sulle curve di pericolosità .....	19
3.2	Pericolosità locale: mappa nazionale delle classi di suolo .....	22
4	VULNERABILITÀ: SVILUPPO DI MODELLI DI FRAGILITÀ.....	26
4.1	Inquadramento degli approcci utilizzati .....	26
4.2	Modelli di fragilità per gli edifici in muratura.....	27
4.2.1	UNIGE (Lagomarsino): approccio euristico-macrosismico .....	28
4.2.2	UNIPD (da Porto): approccio ibrido.....	30
4.2.3	PLINIUS (Zuccaro): approccio ibrido.....	32
4.2.4	UNIPV (Penna): approccio empirico-osservazionale.....	32
4.2.5	UNIGEb (Cattari): approccio meccanico-analitico .....	33
4.2.6	UNINAd (Parisi): approccio meccanico-numerico .....	35
4.2.7	UNICH (Brando): approccio euristico-macrosismico .....	36
4.2.8	UNIRM1b (Sorrentino): approccio empirico-osservazionale .....	37
4.3	Modelli di fragilità per gli edifici in cemento armato.....	38
4.3.1	UNIGE (Lagomarsino): approccio euristico-macrosismico .....	38
4.3.2	UNIBAS (Masi): approccio meccanico-numerico .....	39
4.3.3	EUCENTRE (Borzi): approccio meccanico-analitico.....	42

4.3.4	UNINA-PV (Verderame-Penna): approccio empirico-osservazionale .....	44
4.3.5	UNINA (Verderame): approccio meccanico-analitico .....	46
4.3.6	UNIPR-SA (Belletti-Martinelli): approccio numerico-numerico.....	47
4.3.7	UNIRM1a (Monti): approccio meccanico-numerico .....	49
4.4	Confronto tra i modelli “originali” .....	51
4.4.1	Edifici in muratura.....	51
4.4.2	Edifici in cemento armato.....	55
5	IL MODELLO DI VULNERABILITÀ MARS .....	59
5.1	Descrizione della metrica MARS in termini di classi EMS .....	59
5.2	Conversione dei modelli sviluppati dalle UR secondo il modello MARS .....	63
5.3	Confronto tra i modelli “convertiti” e quelli “originali” .....	67
5.4	Confronto tra i modelli “convertiti” delle diverse UR.....	69
5.4.1	Edifici in muratura.....	69
5.4.2	Edifici in cemento armato.....	71
5.5	Modello integrato di vulnerabilità per il costruito residenziale.....	72
5.6	Regionalizzazione della vulnerabilità per il costruito in muratura.....	76
6	MODELLI DI PERDITE .....	80
6.1	Modelli per la stima delle inagibilità e dei collassi .....	82
6.2	Modelli per la stima delle casualties.....	89
6.3	Modelli per la stima dell’agibilità e delle perdite economiche.....	97
7	PERDITE OTTENUTE DAI MODELLI DI FRAGILITÀ A SCALA NAZIONALE .....	108
7.1	Simulazione del danno (L’Aquila 2009) per edifici in muratura e CA .....	108
7.2	Confronto in termini di rischio tra i modelli di fragilità per edifici in muratura .....	118
7.3	Confronto in termini di rischio tra i modelli di fragilità per edifici in cemento armato..	120
7.4	Confronto tra le perdite in edifici in muratura e cemento armato .....	122



8	RISCHIO SISMICO IN TERMINI DI LIVELLI DI DANNO.....	126
8.1	Danno condizionato.....	126
8.1.1	Principali risultati.....	126
8.2	Danno incondizionato.....	127
8.2.1	Principali risultati.....	127
9	RISCHIO SISMICO IN TERMINI DI CONSEGUENZE.....	129
9.1	Rischio incondizionato .....	129
9.1.1	Inagibilità e collassi .....	129
9.1.2	Casualties.....	133
9.1.3	Perdite economiche.....	136
9.2	Influenza della classe di suolo sulle conseguenze .....	138
9.3	Confronto con i risultati di letteratura (NRA 2018 e GEM 2018).....	140
10	PRIMI RISULTATI OTTENUTI CON IL MODELLO REGIONALIZZATO.....	145
10.1	Danno condizionato .....	145
10.2	Conseguenze da rischio incondizionato.....	151
11	ANALISI COSTI-BENEFICI SU EDIFICI IN MURATURA RINFORZATI.....	155
11.1	Alberi tipologici e interventi di mitigazione sismica.....	156
11.1.1	Muratura .....	159
11.1.2	Cemento armato.....	165
11.1.3	Considerazioni sulle suddivisioni tipologiche .....	169
11.2	Risultati e commenti .....	170
12	CONCLUSIONI.....	177
	RINGRAZIAMENTI.....	181
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	182

13	ALLEGATI .....	A
13.1	PIATTAFORMA IRMA V2.....	191
13.2	ANALISI DELLE TIPOLOGIE EDILIZIE RILEVATE NEL PROGETTO CARTIS....	A-23
13.3	CONVERSIONE DEI MODELLI DI FRAGILITÀ SVILUPPATI DALLE UR PER MURATURA E CEMENTO ARMATO .....	A-44
13.4	CONFRONTO TRA I MODELLI DI FRAGILITÀ TRAMITE LA METRICA MARS...	A-83
13.5	MODELLO DI FRAGILITÀ MARS PER MURATURA E CEMENTO ARMATO .....	A-98
13.6	MODELLI DI FRAGILITÀ PER EDIFICI RINFORZATI E CONFRONTI .....	191

## 1 INTRODUZIONE: DESCRIZIONE ED OBIETTIVI DEL WP4

Nel 2019, il Dipartimento della Protezione Civile (DPC) ha finanziato un progetto di ricerca triennale (2019-2021) che ha coinvolto i suoi centri di competenza per il rischio sismico, quali il consorzio della Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale (ReLUIS) e il Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (EUCENTRE). Al fine di conseguire concreti obiettivi in ordine alla valutazione e alla riduzione della vulnerabilità e del rischio, il progetto di ricerca, composto da 20 Work Packages (WP), si è focalizzato su attività connesse ai programmi di prevenzione sismica; attività di sviluppo della conoscenza, coordinando altri soggetti tecnico-scientifici per la definizione, organizzazione e sviluppo di programmi di studio e ricerca integrati a livello nazionale, nel settore dell'ingegneria sismica; sviluppo di documenti pre-normativi relativi a tipi strutturali non ancora considerati nelle norme; assistenza alla redazione di norme tecniche e collaborazione alle attività di formazione, comunicazione e divulgazione sui temi della vulnerabilità, esposizione e rischio sismico. Al progetto di ricerca hanno partecipato 263 unità di ricerca (UR).

Nello specifico, il WP4 “Mappe di Rischio e Scenari di danno sismico - MARS” aveva l’obiettivo di aggiornare la versione 2018 delle mappe nazionali di rischio sismico (IPCD 2018; Dolce et al. 2021). I modelli di pericolosità, esposizione e vulnerabilità precedentemente considerati nella valutazione di rischio sismico (NRA 2018) sono stati criticamente analizzati ed aggiornati, avvalendosi anche dei risultati derivanti da altri WP del progetto di ricerca. Il WP4-MARS (Masi et al. 2021) comprende 11 Task coordinati da ricercatori italiani, di seguito elencati:

- TASK 4.1 - Esposizione: inventario, regionalizzazione e classificazione (resp. Giulio Zuccaro)
- TASK 4.2 - Input Sismico: misure di intensità, microzonazione e mappe di scuotimento (resp. Roberto Paolucci)
- TASK 4.3 - Vulnerabilità: modelli e curve di fragilità per il costruito residenziale diffuso (resp. Sergio Lagomarsino e Angelo Masi)
- TASK 4.4 - Rischio: calcolo delle conseguenze e delle perdite economiche (resp. Marco Di Ludovico)
- TASK 4.5 - Scenari di danno: validazione modelli e criteri per la loro combinazione (resp. Andrea Penna e Gerardo Verderame)

- TASK 4.6 - Strategie preventive: analisi comparata in termini di rischio a scala nazionale (resp. Francesca da Porto e Enrico Spacone)
- TASK 4.7- Modelli e curve di fragilità per le scuole e altri edifici strategici o rilevanti (resp. Serena Cattari e Angelo Masi)
- TASK 4.8 - Modelli e curve di fragilità delle chiese (resp. Gianfranco De Matteis e Chiara Calderini)
- TASK 4.9 - Modelli e curve di fragilità dei ponti (resp. Andrea Prota)
- TASK 4.10 - Interazione con Eucentre sulla funzionalità delle piattaforme (resp. Sergio Lagomarsino e Angelo Masi)
- TASK 4.11 - Aggiornamento mappe di rischio 2018 (resp. Sergio Lagomarsino e Angelo Masi)

Le attività di ricerca si sono principalmente focalizzate su *(i)* raccolta e revisione di modelli esistenti e definizione di nuovi modelli di vulnerabilità per il costruito diffuso (edilizia residenziale) e di singoli manufatti (es. scuole, ponti, chiese); *(ii)* raccolta, revisione ed aggiornamento di modelli di calcolo delle perdite (inagibilità/senzatetto, casualties, danno economico) e *(iii)* predisposizione delle mappe di rischio 2021 sulle costruzioni esistenti (as-built e consolidate) basate su modelli aggiornati di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, utili per pianificare strategie di mitigazione.

I successivi capitoli del presente report descrivono le attività sviluppate nel triennio nell'ambito dei Task 4.1/2/3/4/5/6/10/11 per la predisposizione delle nuove mappe di rischio sismico per il patrimonio edilizio residenziale italiano.

Per quanto riguarda la vulnerabilità dell'edilizia residenziale, nell'ambito delle attività sopra indicate, è stata effettuata una revisione critica dei diversi metodi utilizzati per derivare le curve di fragilità adottate nel IPCD 2018 (da Porto et al. 2021). Successivamente, sulla base dei risultati ottenuti e sul fatto che la piattaforma IRMA (Borzi et al. 2021a), la cui descrizione è riportata nell'allegato 13.1, attribuisce la vulnerabilità attraverso curve di fragilità associate alle sei classi della scala EMS-98 (Grünthal et al. 1998), è stato definito il modello di vulnerabilità MARS capace di considerare i diversi contributi proposti in un unico modello integrato. Il modello MARS è stato definito considerando nuovi modelli di fragilità derivati sia dai dati dei danni osservati durante le campagne di sopralluogo post-sismiche degli ultimi 50 anni e raccolti nella piattaforma Da.D.O. (Database Danno Osservato; Dolce et al. 2019) sia da risultati di

simulazioni numeriche (approcci analitico/meccanico), soprattutto per gli edifici in cemento armato per i quali pochi dati sono disponibili su Da.D.O.

Il censimento 2011 dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT 2011), implementato nella piattaforma IRMA, è stato considerato come database di riferimento per il patrimonio edilizio esistente. Tuttavia, un'analisi approfondita di alcune tipologie edilizie è stata effettuata anche sulla base dei risultati ottenuti dal WP2 "Inventario delle tipologie strutturali ed edilizie esistenti (CARTIS)" che mira a raccogliere dati sul patrimonio edilizio residenziale secondo un approccio più orientato al rischio, in grado di evidenziare le caratteristiche strutturali distintive locali e/o regionali, non incluse nell'ISTAT 2011 (Zuccaro et al. 2015a).

Per la definizione della pericolosità sismica, è stato utilizzato il modello di pericolosità MPS04 definito dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) (Stucchi et al. 2004, 2011). Al fine di migliorare le stime di rischio ottenute nel IPCD 2018, è stato effettuato uno studio approfondito per l'estensione della curva di pericolosità a periodi di ritorno inferiori e superiori rispetto a quanto disponibile in MPS04. Nella predisposizione delle mappe di rischio sismico 2021, le stime di pericolosità sismica sono state estese alle categorie di sito diverse da quella di riferimento (Mori et al. 2020). Infatti, avvantaggiandosi di una mappatura a scala nazionale delle categorie sismiche di sito, i valori della PGA sono stati moltiplicati per i corrispondenti fattori di sito.

## 2 ESPOSIZIONE: IL COSTRUITO RESIDENZIALE ITALIANO

### 2.1 Descrizione e analisi dell'inventario ISTAT 2011

L'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) pubblica ogni 10 anni un censimento della popolazione che include, per ogni comune, i dati sul numero di edifici, numero di abitazioni e superficie totale. Nella predisposizione delle mappe di rischio sismico dell'edilizia residenziale, le tipologie strutturali sono state definite sulla base dei parametri rilevanti disponibili nel database ISTAT 2011, ovvero tipologia costruttiva (calcestruzzo armato, CA, muratura, M, o "Altro"), numero di piani ed età di costruzione. Le informazioni del censimento sono disponibili sia in termini di edifici che di abitazioni. La tipologia costruttiva "Altro" è comunemente riferita a edifici in acciaio o in legno, a edifici di tipologia mista (es. un edificio in muratura con un piano in cemento armato) o anche a edifici per i quali non sono disponibili dati relativi alla tipologia costruttiva. Tabella 2.1 riporta la distribuzione del patrimonio edilizio residenziale italiano (numero di edifici) in termini di tipologie costruttive. In particolare, secondo l'ISTAT 2011, il 57% del patrimonio residenziale è costituito da edifici in muratura e il 30% da edifici in CA. La restante quota (circa 13%) è definita come "Altro".

<i>Tipologia costruttiva</i>	<i># edifici</i>	<i>% edifici</i>
<i>Muratura, M</i>	6'975'977	57
<i>Calcestruzzo armato, CA</i>	3'594'695	30
<i>Altro</i>	1'617'026	13
<i>Totale</i>	12'187'698	

**Tabella 2.1 Distribuzione del numero di edifici in termini di tipologia costruttiva**

Come riportato in Tabella 2.1, la tipologia "Altro" ha un'incidenza percentuale inferiore rispetto a M e CA. Tuttavia, nonostante questi edifici non siano analizzati in termini di vulnerabilità, devono necessariamente essere considerati in termini di esposizione. Dunque, sulla base della minore significatività statistica, dell'incertezza sul materiale da costruzione e sul fatto che i modelli di fragilità sono stati sviluppati solo per edifici in M e CA, il numero di edifici "Altro" (e relative abitazioni) è suddiviso tra tipologie edilizie in M e CA attraverso uno specifico

criterio, in funzione dell'età di costruzione e dell'incidenza percentuale degli edifici in M e CA in ciascun comune (Eucentre 2018; Dolce et al., 2020).

Nella piattaforma IRMA (Allegato 13.1), i dati ISTAT sono forniti a livello comunale e sono disaggregati, in modo che sia possibile ricavare la distribuzione per piani e per età sia per gli edifici in M che in CA (e relative superfici) in ciascun comune. Secondo l'ISTAT 2011, il patrimonio edilizio è suddiviso in termini di numero di piani in 4 classi: 1, 2, 3 e  $\geq 4$  ed in termini di età di costruzione in 9 classi (da <1919 a >2005). La combinazione tra i suddetti parametri descrive il patrimonio residenziale con 36 tipologie edilizie in M e 36 in CA e per ciascuna di esse viene associato a livello comunale il numero totale di edifici ed abitazioni. Pertanto, per ciascun comune italiano, è possibile ricavare il numero di edifici (e relative abitazioni) e la loro distribuzione in termini di tipologia costruttiva, numero di piani ed età di costruzione. Tabella 2.2 e Figura 2.1 mostrano le principali informazioni sul patrimonio residenziale italiano (ISTAT 2011) direttamente derivate da IRMA. I risultati in Tabella 2.2, comprensivi anche degli edifici/abitazioni classificati come "Altro", sono i dati di riferimento per le successive valutazioni di danno/rischio su scala nazionale. Come si può vedere in Figura 2.1, sebbene la muratura sia prevalente in termini di numero di edifici, CA e muratura sono pressoché equivalenti in termini di abitazioni, superficie e popolazione (con valori leggermente superiori per gli edifici in CA). Questa differenza è dovuta al numero di piani generalmente maggiore per gli edifici in CA e, quindi, un numero di unità abitative per edificio più alto rispetto agli edifici in M (corrispondenti per lo più a singole abitazioni).

<i>Tipologia costruttiva</i>	<i>Edifici</i>	<i>Abitazioni</i>	<i>Popolazione</i>	<i>Superficie (m2)</i>
<b>Muratura</b>	7'903'087	11'152'870	26'746'091	1'127'417'856
<b>CA</b>	4'284'611	12'912'424	32'084'149	1'269'273'699
<i>Totale</i>	<b>12'187'698</b>	<b>24'065'294</b>	<b>58'830'240</b>	<b>2'396'691'555</b>

**Tabella 2.2** Dati di esposizione sul patrimonio residenziale nazionale (secondo ISTAT 2011)

Questo aspetto è evidenziato anche dai grafici riportati in Figura 2.2 e Figura 2.3, che mostrano la suddivisione degli edifici, secondo le classi ISTAT 2011, per numero di piani (a), età di costruzione (b), combinazione di numero di piani ed età di costruzione (c) e classificazione sismica (d), rispettivamente per M e CA. Per quanto riguarda la classificazione sismica, il patrimonio edilizio residenziale viene suddiviso in edifici progettati solo per carichi verticali

(GLD) ed edifici sismicamente progettati (ERD). Gli edifici in M e CA sono classificati come GLD o ERD in funzione dell'anno di classificazione sismica del comune di appartenenza e dell'età di costruzione (Eucentre 2018). Per quanto riguarda gli edifici in muratura, Figura 2.2 mostra che circa il 70% ha un numero di piani minore o uguale a 2. Questa percentuale si riduce al 58% per il patrimonio edilizio in CA (Figura 2.3). I grafici in Figura 2.2 e Figura 2.3 mostrano anche che la maggior parte degli edifici in M è stato costruito prima del 1970 (72%) mentre il 70% degli edifici in CA è stato costruito dopo il 1970. Va inoltre sottolineato che la percentuale di edifici antisismici (ERD) in M e CA è pari rispettivamente al 4% e al 27%.

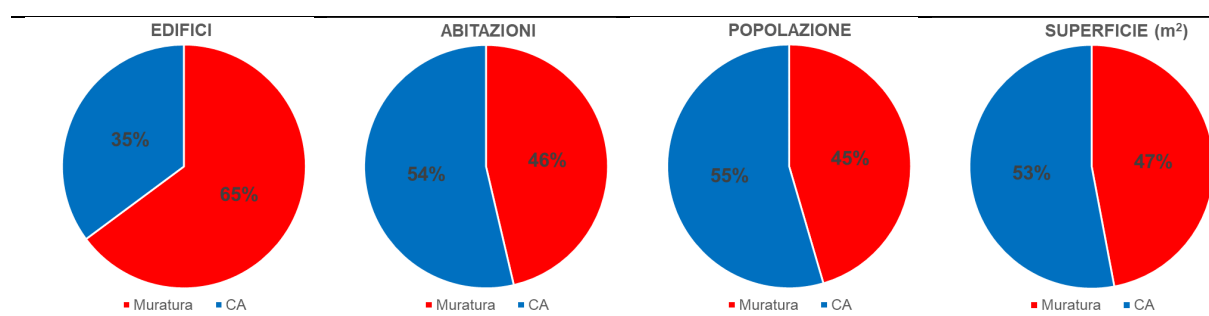


Figura 2.1 Suddivisione del patrimonio edilizio tra M e CA

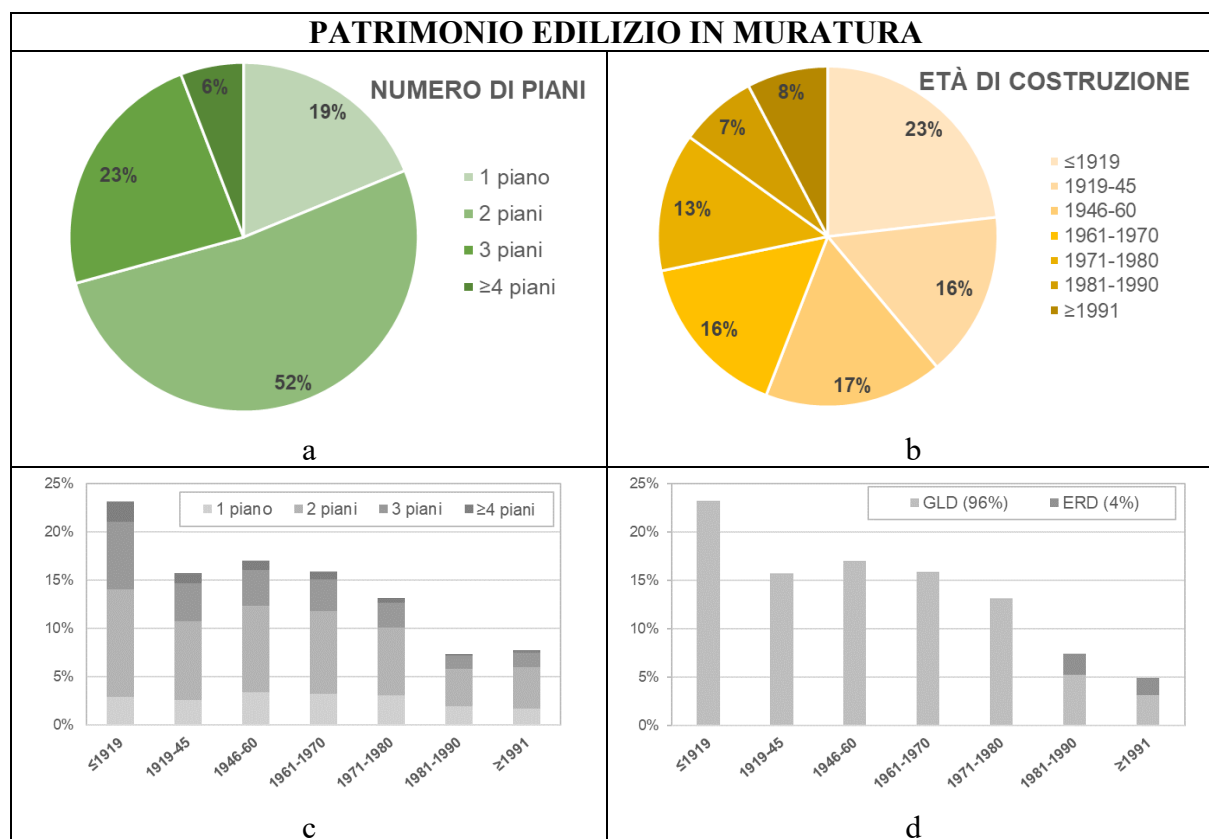
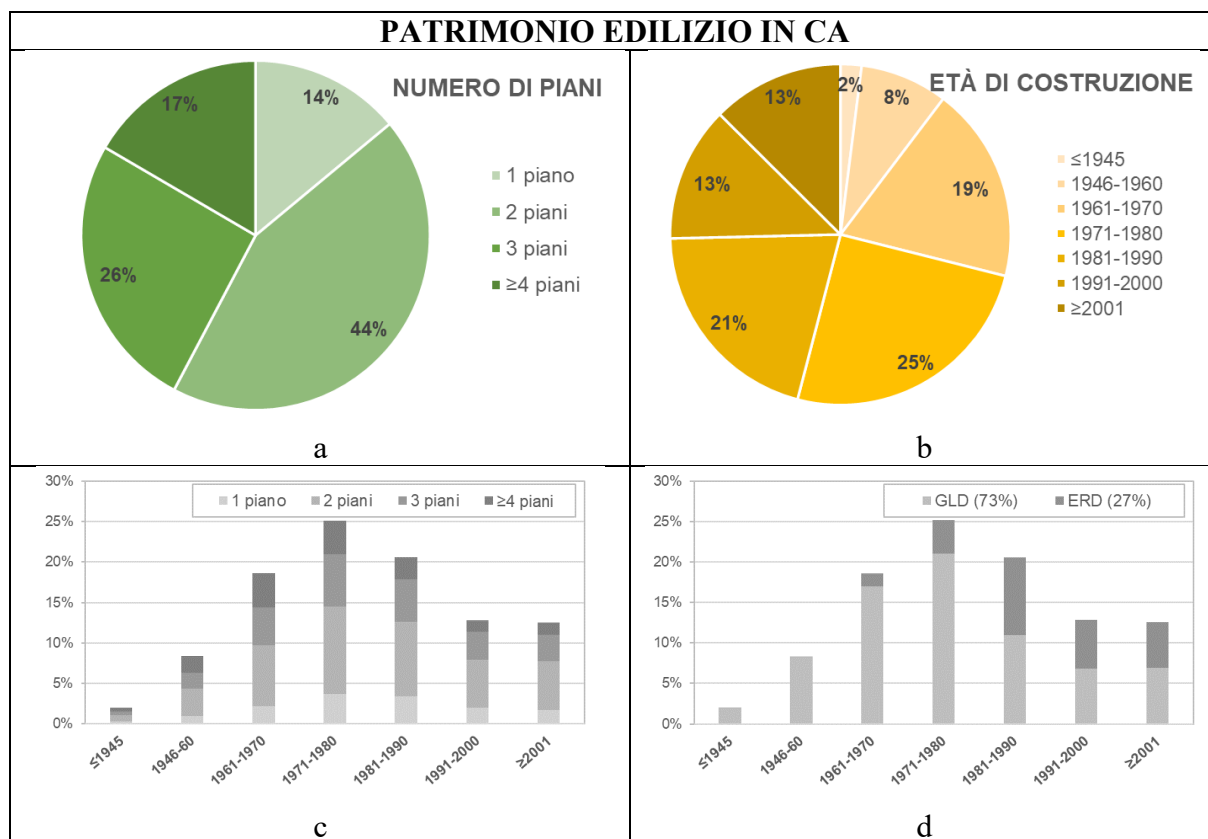


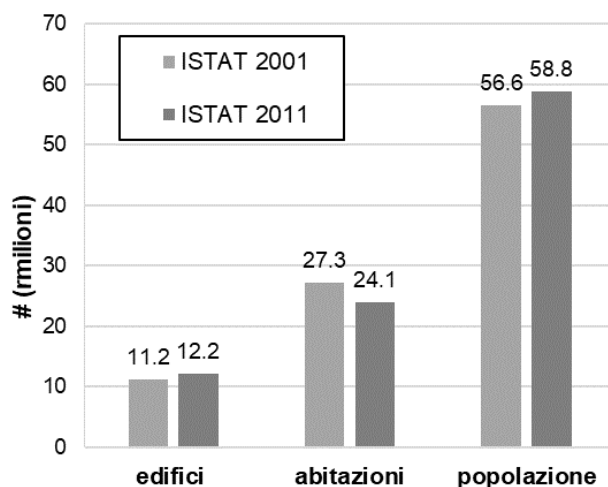
Figura 2.2 Distribuzione del numero di edifici in muratura per numero di piani (a), età di costruzione (b), combinazione di numero di piani ed età di costruzione (c) e classificazione sismica (d)





**Figura 2.3** Distribuzione del numero di edifici in CA per numero di piani (a), età di costruzione (b), combinazione di numero di piani ed età di costruzione (c) e classificazione sismica (d)

Nella piattaforma IRMA, sono caricati sia i dati ISTAT 2001, utilizzati come esposizione per le mappe di rischio sismico 2018 (IPCD 2018) sia i dati ISTAT 2011, utilizzati per la predisposizione delle mappe aggiornate 2021. Figura 2.4 mostra un preliminare confronto tra il database ISTAT 2001 e quello ISTAT 2011.



**Figura 2.4** Confronto tra ISTAT 2001 e 2011 in termini di numero di edifici, abitazioni e popolazione

Il numero di edifici e la popolazione sono aumentati nel 2011 (9% per gli edifici e 4% per la popolazione) mentre il numero delle abitazioni è diminuito (12%). Figura 2.5 riporta anche un confronto del numero di edifici in funzione della tipologia costruttiva. Si osserva come il numero di edifici in M non varia mentre il numero di edifici in CA aumenta del 29%. Una differenza da evidenziare riguarda la raccolta dei dati relativi al numero di piani: il database ISTAT 2001 fornisce i dati per singolo piano (da 1 a 8) mentre il database ISTAT 2011 raggruppa gli edifici con un numero di piani uguale o maggiore di 4.

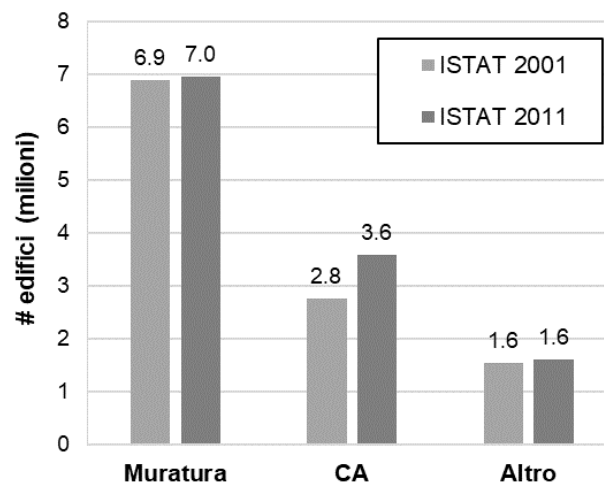


Figura 2.5 Confronto tra numero di edifici ISTAT 2001 e ISTAT 2011 in termini di tipologia costruttiva

## 2.2 Analisi tipologica regionalizzata del costruito tramite il database CARTIS

(redatto in collaborazione con la UR di cui è responsabile Giulio Zuccaro)

In accordo con il Piano Scientifico, l'UR UNINA-f si è impegnata a sviluppare delle analisi statistiche tese alla identificazione delle tipologie più ricorrenti per aree geografiche (Nord-est, Nord-Ovest, Centro, Sud e Isole) sulla base delle informazioni contenute nel database CARTIS. Inoltre, sono state sviluppate valutazioni in merito alla correlazione tra i parametri ISTAT (tipologici, morfologici, demografici e geografici) ed ulteriori parametri tipologici – strutturali, desunti dal database CARTIS, aventi una influenza significativa sul comportamento sismico dell'edificio (presenza/assenza di catene, rapporti di forma, strutture orizzontali, ecc.). In particolare, in questa fase si è approfondito lo studio di correlazione tra i parametri ISTAT di regione, altimetria e demografia con i parametri tipologici CARTIS di struttura verticale e struttura orizzontale.

L'affidabilità dello studio di correlazione tra i parametri è stata misurata tramite la valutazione della completezza di rilievo con il database CARTIS (allo stato attuale) di ciascuna regione italiana e di ciascuna ripartizione geografica in riferimento dal database ISTAT 2011. Un ulteriore controllo è stato svolto tramite il confronto tra le distribuzioni delle macro-tipologie verticali (muratura, cemento armato – e altro nel caso dell'ISTAT) secondo i due database.

Le analisi prodotte prendono in considerazione esclusivamente i Comuni che sul database CARTIS COMPARTO risultano segnati come 'completati' e non 'in lavorazione', per evitare di inserire informazioni parziali o ancora sotto revisione da parte dei compilatori.

Nel database CARTIS sono presenti informazioni inerenti a 510 comuni, di cui risulta che per 416 lo stato del rilievo è completato mentre i restanti 94 sono in lavorazione. Il numero totale di Comparti associati ai comuni completati è di 2.776, e in essi sono presenti 1.040.564 edifici.

L'analisi di completezza del rilievo è stata approfondita su due fronti:

- numero di comuni rilevati per ciascuna regione rapportato al numero totale dei comuni della regione indagata;
- numero di edifici presenti da ISTAT 2011 nei comuni rilevati rapportato al numero totale di edifici presenti nella regione indagata.

I risultati ottenuti sono riepilogati in allegato 13.2 (Tabella 1 relativamente alle regioni italiane ed in Tabella 2 per quanto riguarda le ripartizioni geografiche), da cui risulta:

- l'area centro-meridionale ha la maggiore completezza rispetto al numero di comuni (10%) mentre l'area nord-orientale risulta la più rilevata in termini di edifici (14%);
- l'area nord-occidentale risulta essere la più incompleta sia rispetto al numero di comuni (1,3%) sia al numero di edifici (0,7%);
- le regioni di Sardegna e Trentino-Alto Adige non presentano alcun dato di rilievo;
- la regione Campania presenta la più alta percentuale di rilievo in riferimento al numero di edifici (18%), mentre la regione Basilicata ha la percentuale di rilievo più alta in riferimento al numero di comuni (16%).

In allegato 13.2 sono indicate le distribuzioni delle macrotipologie verticali secondo il database ISTAT 2011 in riferimento ai Comuni rilevati in CARTIS (Tabella 3) ed il database CARTIS (Tabella 4). Si evince che alle regioni con indice di completezza maggiore è associata una migliore corrispondenza delle distribuzioni delle macrotipologie verticali tra database CARTIS e database ISTAT2011.

A seguito delle analisi di affidabilità del campione statistico, si sono riportati i dati relativi alla distribuzione delle tipologie di muratura, delle strutture in cemento armato e delle strutture

orizzontali in riferimento alle regioni italiane, alle ripartizioni geografiche, alle classi demografiche ed alle zone altimetriche.

Relativamente alla distribuzione della muratura in funzione delle regioni e delle ripartizioni geografiche (Tabella 5 e Tabella 6 riportate nell'allegato 13.2) si osserva che:

- l'area nord-orientale risulta essere costruita prevalentemente da muratura di buona qualità (tipo C – pietra squadrata e muratura regolare) contrariamente all'area nord-orientale in cui prevale la muratura scadente (tipo A);
- l'area centrale è costruita prevalentemente in muratura scadente (tipo A);
- nel meridione e nelle isole risultano presenti tutte le classi di muratura, con leggera prevalenza della tipologia di buona qualità rispetto a quella scadente.

In allegato 13.2 sono riportati anche i dati relativi alla distribuzione degli edifici in muratura sul numero di piani, in riferimento ad una suddivisione per Regione (Tabella 7) e per Ripartizione Geografica (Tabella 8), e i dati relativi alla distribuzione degli edifici in muratura sulle epoche di costruzione, in riferimento ad una suddivisione per Regione (Tabella 9) e per Ripartizione Geografica (Tabella 10).

Relativamente alla distribuzione del cemento armato in funzione delle regioni italiane (Tabella 11 e Tabella 12 riportate nell'allegato 13.2) si osserva che:

- l'intero territorio italiano ha una prevalenza di strutture intelaiate in cemento armato;
- nell'area meridionale e nelle isole sono presenti basse percentuali di strutture in setti murari e si riscontra una bassa percentuale di strutture con nuclei in cemento armato;
- la regione Marche presenta un alto numero di edifici in setti (4.933);
- il sud Italia un alto numero di edifici con tamponatura poco consistente (81.936).

In allegato 13.2 sono riportati i dati relativi alla distribuzione degli edifici in C.A. sul numero di piani, suddividendo per Regione (Tabella 13) e per Ripartizione Geografica (Tabella 14), e i dati relativi alla distribuzione degli edifici in muratura sulle epoche di costruzione, suddividendo per Regione (Tabella 15) e per Ripartizione Geografica (Tabella 16).

Infine, sono state ricavate le distribuzioni di edifici sui parametri combinati di:

- tipologia di muratura – tipologia di solaio
- tipologia di muratura – epoca di costruzione
- tipologia di cemento armato – epoca di costruzione.

Ciascuna di queste correlazioni è stata determinata in funzione della ripartizione geografica, della classe altimetrica e della classe demografica. I dati sono riassunti in allegato 13.2 (Tabella 17, 18, 19, 20, 21 e 22 per gli edifici in muratura e Tabella 23, 24 e 25 per gli edifici in C.A.).

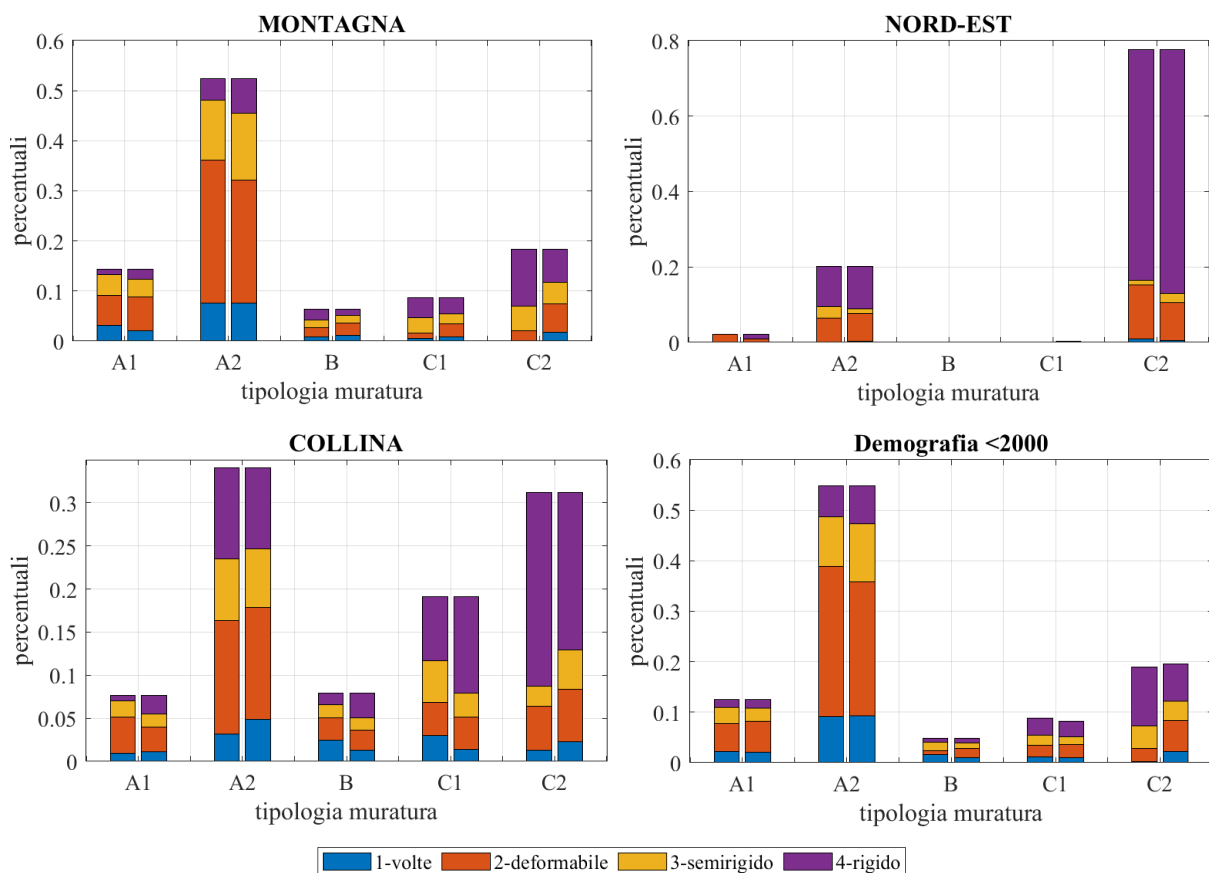
### 2.3 Elaborazione di matrici di frequenza delle tipologie muratura/solaio per le tipologie ISTAT in ambiti territoriali (Regione/Altimetria/Demografia)

Nel progetto triennale è stata avviata la regionalizzazione della vulnerabilità del costruito in muratura, seppur i preliminari risultati ottenuti non sono stati utilizzati per il NRA 2021. Nell'annualità 2021 sono state compilate, rielaborate e controllate un maggior numero di schede CARTIS che hanno permesso di ottenere una più alta percentuale di completezza dei dati e una robustezza maggiore; questo ha consentito inoltre l'estrazione di dati correlati, che precedentemente non erano stati ricavati per la limitata consistenza degli stessi. In particolare, sono state fornite dal progetto CARTIS (i) le distribuzioni al variare dei parametri tipologici (tipologia di muratura e tipologia di orizzontamenti) per i diversi ambiti territoriali (regioni amministrative, classi demografiche e classi altimetriche) e (ii) la correlazione tra tipologie murarie e orizzontamenti e tra le tipologie murarie e l'epoca di costruzione al variare delle classi di demografia e altimetria e per macroaree geografiche (Nord-Est, Nord-Ovest, Centro, Sud e Isole), come descritte nel paragrafo 2.2.

Mentre i dati forniti nell'annualità 2020 presentavano mancanze tali da non permetterne l'uso, l'aggiornamento degli stessi nell'annualità 2021 ha fornito statistiche maggiormente coerenti che ne permettono l'utilizzo senza alterarle sulla base del giudizio esperto.

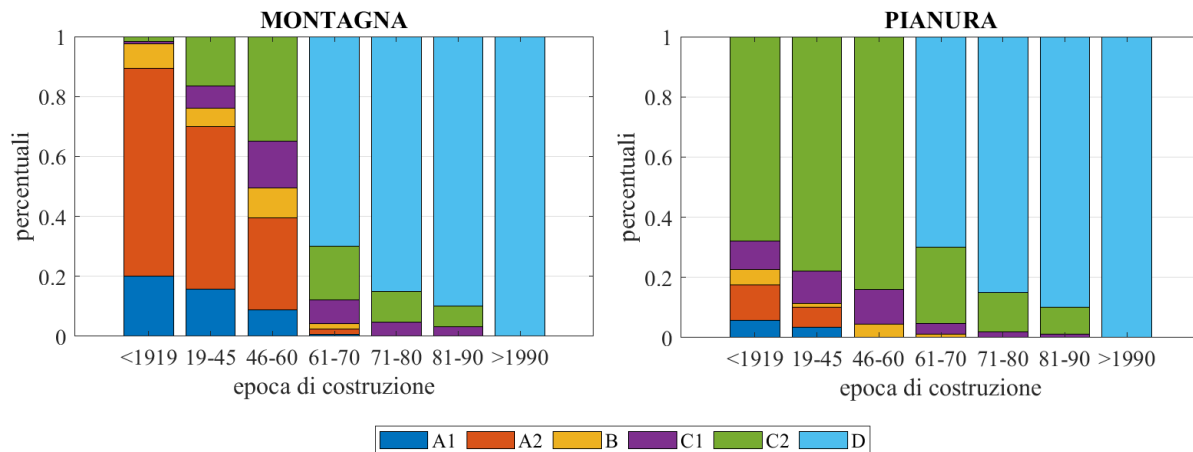
A partire dai dati forniti dal rilievo CARTIS, ai fini della regionalizzazione è stato deciso di: (i) accorpate le tipologie murarie *B1 (pietra lastriforme)* e *B2 (pietra pseudo-regolare)* in un'unica tipologia *B (Pietra regolare)*, sia a causa della scarsità dei dati registrati che per le difficoltà nel definire una chiara distinzione tra le due tipologie; (ii) considerare distintamente le tipologie *A1 (pietra arrotondata)* e *A2 (pietra grezza)*, anche se presentano forti somiglianze, per tenere in conto della vulnerabilità decisamente maggiore della tipologia *A1* rispetto alla tipologia *A2*; (iii) accorpate la classe demografica 0–500 con 500–2'000, la classe 2'000-5'000 con 5'000–10'000, e le ultime due classi, creando la classe >50'000; (iv) accorpate le zone altimetriche di *collina interna*, *collina litoranea* e *montagna litoranea* in un'unica zona definita *collina* e la *montagna interna* sarà chiamata semplicemente *montagna*; (v) introdurre la tipologia muraria *D* corrispondente ai blocchi in laterizio forato, non distinta nei dati CARTIS dalla tipologia *C2 (muratura di laterizio)*; tale tipologia corrisponderà alla *D2 (blocchi sismici con bassa percentuale di foratura)* nei comuni classificati sismicamente e *D1 (blocchi con alta percentuale di foratura)* nei comuni non classificati sismicamente.

I dati correlati di partenza determinano quindi matrici di combinazione tra le tipologie murarie e le tipologie di orizzontamenti e matrici di combinazione tra le tipologie murarie e le epoche di costruzione, ma non forniscono statistiche che correlano le tipologie di solai con le epoche di costruzione; pertanto è stato necessario trarre alcune regole di combinazione, a partire dalle correlazioni fornite, che permettano di relazionare le tipologie di muratura con le tipologie di solai al variare delle epoche di costruzione per ciascuna regione, classe di demografia e classe di altimetria. Tali leggi di correlazione sono state applicate anche alle statistiche aggregate fornite dal rilievo CARTIS per eliminare eventuali irregolarità e per sanare i dati mancanti. In Figura 2.6 si riportano alcuni confronti che mostrano la comparazione tra i dati correlati forniti dal rilievo CARTIS (barra di sinistra) e i dati risultanti dopo l'applicazione delle leggi di correlazione tratte dai dati disponibili e applicate all'interno campione (barra di destra); da tale confronto è possibile osservare una buona coerenza dei dati ottenuti dopo la rielaborazione rispetto a quelli disponibili.



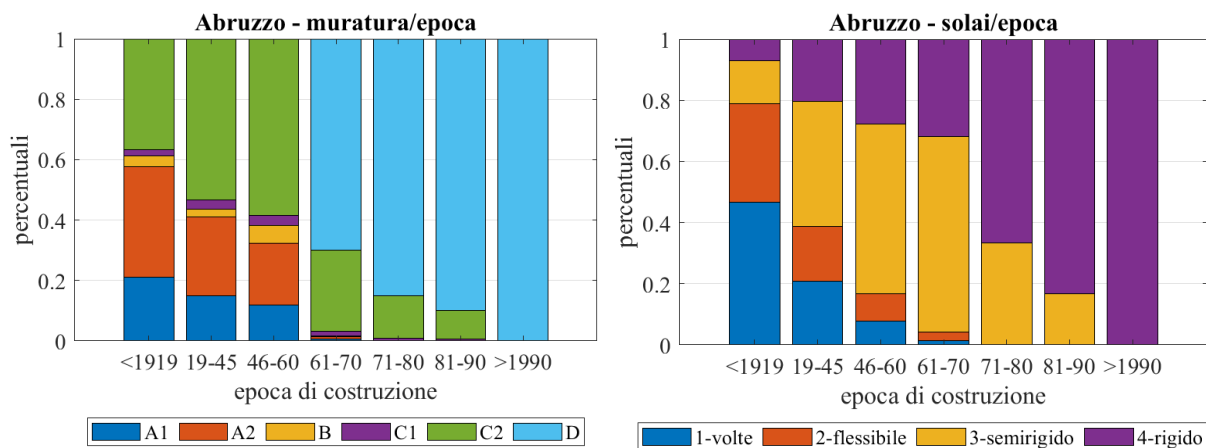
**Figura 2.6** Confronto delle statistiche ottenute dopo l'applicazione di leggi di correlazione (barra destra) rispetto ai dati disponibili (barra sinistra), per alcuni ambiti territoriali a titolo d'esempio.

Per l'introduzione della tipologia muraria *D* (*blocchi forati di tipo moderno*), è stata definita una correlazione che associa ad una parte della tipologia muraria *C2* la tipologia *D* nelle epoche successive al 1961. In Figura 2.7 si riportano le distribuzioni delle tipologie murarie al variare dell'epoca di costruzione, per alcuni ambiti territoriali.



**Figura 2.7** Introduzione della tipologia muraria *D* corrispondente ai blocchi forati di tipo moderno

Come già anticipato, i dati correlati riportati in Figura 2.7 sono derivati direttamente dal rilievo CARTIS e successivamente rivisti per correggere eventuali incongruenze e per inserire la tipologia muraria associata ai blocchi moderni. La stessa correlazione con l'epoca di costruzione non è invece disponibile per la tipologia dei solai, la quale è stata determinata considerando l'indipendenza statistica del dato relativo alla tipologia di muratura e di solai al quale sono stati applicati coefficienti correttivi tratti dalla correlazione dei dati disponibili; questo ha permesso per ciascun ambito territoriale (macroarea geografica, classe demografica e classe altimetrica) di determinare la distribuzione della tipologie di solaio al variare dell'epoca. In Figura 2.8 è riportata la distribuzione delle tipologie murarie e di orizzontamenti al variare dell'epoca, per la stessa regione amministrativa. Per ottenere le distribuzioni per ciascuna regione amministrativa, sono stati estesi i dati disponibili a scala delle macroaree geografiche (Nord-Est, Nord-Ovest, Centro, Sud e Isole).



**Figura 2.8 Distribuzione della tipologia di muratura e della tipologia di solaio al variare dell'epoca di costruzione per la regione Abruzzo**

La combinazione delle distribuzioni ottenute per le tipologie murarie e per le tipologie di solaio al variare dell'epoca di costruzione permette di determinare una matrice che combina le 6 tipologie murarie con le 4 tipologie di solaio per ciascuno dei 240 ambiti territoriali (20 regioni amministrative, 4 classi demografiche e 3 zone altimetriche) al variare delle sub-tipologie ISTAT. L'inventario ISTAT, disponibile a scala nazionale per il patrimonio edilizio residenziale e descritto al paragrafo 2.1, non include informazioni strutturali specifiche (quali caratteristiche della muratura, tipologie di orizzontamenti ecc..) che influenzano in modo significativo la vulnerabilità del costruito. Avendo a disposizione modelli che definiscono la vulnerabilità sismica per ciascuna sottipologia CARTIS, intesa come vulnerabilità associata alle diverse tipologie murarie e tipologie di solai, la combinazione di questi dati permette di ottenere la vulnerabilità sismica di ciascun ambito territoriale per ogni sottipologia ISTAT. Attraverso la piattaforma IRMA, che consente di analizzare separatamente le diverse aree territoriali applicando di volta in volta gli specifici modelli di vulnerabilità, è possibile ottenere mappe di rischio nazionali definite dall'aggregazione di tutti i 240 ambiti territoriali. Quest'ultimo aspetto sarà ampiamente approfondito nei capitoli 5.6 e 10.



### 3 PERICOLOSITÀ

Con riferimento alla pericolosità sismica, nel corso delle attività svolte dalle unità di ricerca del Task 4.2 del WP4-MARS “Input Sismico: misure di intensità, microzonazione e mappe di scuotimento”, sono stati affrontati tre problemi fondamentali:

- 1) quale sia la misura di intensità più idonea, tra quelle disponibili nel modello nazionale di pericolosità sismica MPS04, rispetto alla quale riferire le curve di fragilità;
- 2) come estendere le stime di pericolosità sismica a periodi di ritorno ( $T_r$ ) rispettivamente inferiori e superiori rispetto ai valori di  $T_r$ , variabili fra 30 e 2475 anni, disponibili nel modello MPS04;
- 3) come estendere le stime di pericolosità sismica alle categorie di sito diverse da quella di riferimento.

I problemi 1) e 2) vengono trattati nel paragrafo 3.1 mentre il problema 3) viene affrontato nel paragrafo 3.2, dove viene sinteticamente descritta la procedura per la realizzazione della carta nazionale dei valori attesi di  $V_{s30}$  (Mori et al. 2020a)

#### **3.1 Pericolosità di base: riflessioni e aggiornamenti sulle curve di pericolosità (redatto in collaborazione con la UR di cui è responsabile Roberto Paolucci)**

Le stime di rischio sono riferite al modello nazionale di pericolosità sismica MPS04 (Gruppo di lavoro MPS 2004) elaborata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e adottato a livello nazionale con l'OPCM 3519/2006 (Stucchi et al. 2004, 2011), tuttora alla base della definizione delle azioni sismiche nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018). La MPS04 è definita su una griglia di punti sufficientemente fitta che copre quasi l'intero territorio nazionale (esclusa la Sardegna e alcune isole minori) e fornisce stime di pericolosità sismica in termini di ordinate spettrali “a pericolosità uniforme”, disponibili su suolo di riferimento di categoria A (ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi con velocità di propagazione delle onde di taglio superiore a 800 m/s). La pericolosità uniforme implica l'uguaglianza della probabilità annua di eccedenza di ogni ordinata dello spettro, ovvero del corrispondente periodo di ritorno, quest'ultimo pari all'inverso della probabilità annua di eccedenza. La pericolosità è stata valutata in termini di PGA e accelerazione spettrale elastica  $Se(T)$  per 9 diverse probabilità di superamento in 50 anni (dal 2% a 81%) e mappata per 16.852 punti della griglia distanziati di  $0,05^\circ$  in latitudine e longitudine. La formula per ottenere il

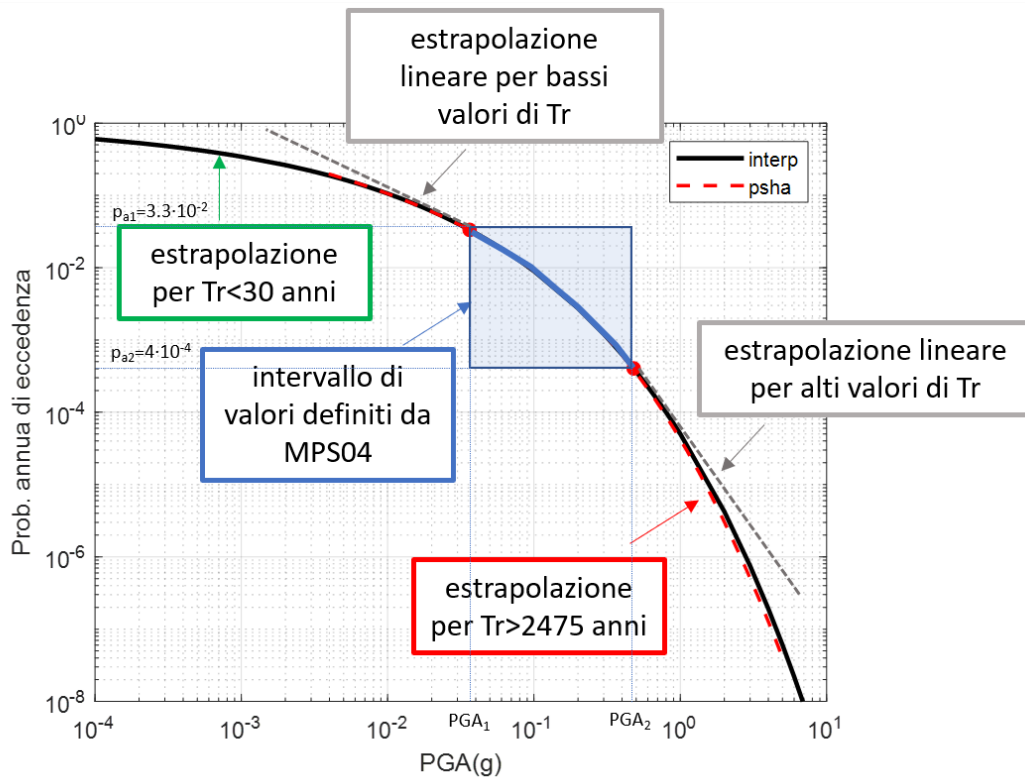
valore di pericolosità per un punto diverso dai punti della griglia è codificata nell'OPCM 3519/2006 (in linea di principio una media ponderata per la distanza). Va ricordato che la piattaforma IRMA (Allegato 13.1) considera l'esposizione a scala comunale e dunque la pericolosità viene valutata al baricentro di ogni comune in modo da avere un unico valore.

Per quanto riguarda la misura di intensità rispetto alla quale riferire le curve di fragilità (Capitolo 0), è stata scelta la Peak Ground Acceleration (PGA) che, pur con noti limiti di efficienza (alta variabilità nella domanda strutturale a parità di PGA) e di sufficienza (accelerogrammi con la stessa PGA, ma provenienti da terremoti con diversa magnitudo e distanza, hanno un potenziale di danno diverso), consente di esprimere le curve di fragilità in maniera il più possibile omogenea, sia per quanto riguarda la dipendenza dalla tipologia strutturale, sia per l'origine del dato di danno (osservazionale o numerica). La PGA è stata scelta anche sulla base delle esigenze della piattaforma IRMA che la utilizza attualmente come misura di intensità. Inoltre, l'utilizzo della PGA permette di confrontare direttamente le curve di fragilità proposte da passati studi e progetti di ricerca, dove viene largamente impiegata.

L'importanza del problema 2) per l'estensione delle stime di pericolosità sismica a periodi di ritorno ( $Tr$ ) rispettivamente inferiori e superiori rispetto a quanto disponibile in MPS04, con valori di  $Tr$  variabili fra 30 e 2475 anni, è forse poco intuitiva. Tuttavia, esso riveste un ruolo essenziale nella quantificazione del rischio proveniente da due categorie di eventi: (a) gli eventi frequenti a basso impatto, che acquistano rilievo specialmente nelle stime delle perdite economiche da terremoti, (b) gli eventi molto rari ma potenzialmente catastrofici, la cui occorrenza può stravolgere la stima delle vittime e, in generale, dell'impatto sociale ed economico dei terremoti. Per introdurre la soluzione di questo problema, si fa riferimento alla curva di pericolosità in Figura 3.1, espressa come la probabilità annua di eccedenza della PGA, calcolata in un sito generico in Italia. L'intervallo dei valori di probabilità annua  $p_a$ , e delle corrispondenti PGA calcolabili mediante MPS04 (cioè nell'intervallo di valori di  $Tr$  compreso tra 30 e 2475 anni), è delimitata dal riquadro blu. La linea a tratteggio rosso denota i risultati allo stesso sito ottenuti con analisi probabilistica di pericolosità sismica su un insieme più ampio di valori di  $p_a$ . Infine, la linea nera rappresenta l'Eq. (1) usata per estrapolare i valori all'esterno dell'intervallo di  $Tr$  della MPS04,  $1/30 < p_a < 1/2475$ , una volta noti i valori agli estremi di tale intervallo.

$$\log_{10} p_a = -bPGA^k \quad (1)$$

Nell'Eq. (1) i parametri  $b$  e  $k$  sono determinati dalla condizione di passaggio della curva dai punti  $(PGA_1, p_{a1})$ ,  $(PGA_2, p_{a2})$ , come indicato in figura. Quindi, una volta noti i valori per  $T_r$  pari a 30 e 2475, è possibile definire l'Eq. (1) ed estendere la curva di pericolosità.



**Figura 3.1** Esempio di estrapolazione della curva di pericolosità sulla base della eq. (1), a partire dai risultati contenuti nell'intervallo della probabilità annua  $p_a$  tra 1/30 e 1/2475

Come si nota, l'Eq. (1) fornisce un'ottima approssimazione della curva di pericolosità, come verificato su un insieme abbastanza ampio di siti per i quali è stata eseguita un'analisi probabilistica di pericolosità sismica ad hoc. Si nota inoltre che una soluzione più semplice, come l'estrapolazione lineare a sua volta indicata con una linea a tratteggio grigio in Figura 3.1, porta in generale a sovrastimare i valori della PGA corrispondenti a un prefissato valore di  $p_a$ , con conseguenti sovrastime delle stime di rischio.

L'intervallo di PGA associato ai 9 periodi di ritorno della MPS04 è diverso a seconda del sito di riferimento. Al fine del calcolo del danno e del rischio incondizionato sulla piattaforma IRMA v2 (vedi Allegato 13.1), i valori limiti di PGA dell'integrale di convoluzione sono stati fissati pari a 0.03g e 1g. Sulla base di numerose analisi di sensitività condotte dalle UR UNIGE e UNIBAS e del parere degli esperti del gruppo di lavoro formato dai ricercatori coinvolti nel progetto, il limite inferiore di PGA pari a 0.03g è stato considerato il valore minimo per il quale

ci si aspetta un danno per qualsiasi tipo di edificio, indipendentemente dalla pericolosità della zona. Al fine di raggiungere tali valori di PGA dell'integrale di convoluzione, per i siti a bassa pericolosità è necessaria un'estrapolazione per  $Tr > 2475$  anni invece, per quelli ad alta pericolosità, bisogna estrapolare per  $Tr < 30$  anni. Dunque, l'estrapolazione lineare porterebbe a considerare valori di  $Tr$  (e valori di  $p_a$ ) non realistici che porterebbero ad una sovrastima delle perdite economiche (per l'estrapolazione ai valori bassi di PGA) e del numero di vittime e feriti (per l'estrapolazione ai valori alti di PGA). Da notare che, oltre al limite superiore in termini di PGA fissato a  $1g$ , è stata aggiunta una soglia sul valore della probabilità pari a  $10^{-4}$  ( $Tr = 10'000$  anni); pertanto per  $Tr$  maggiori di  $10'000$  sarà associata la PGA corrispondente a  $Tr$  uguale a  $10'000$  anni, rendendo di fatto nullo il contributo del ramo di curva  $Tr > 10'000$  anni nel calcolo del rischio. Tale assunzione permette una trattazione omogenea del territorio per una coerente comparabilità dei risultati tralasciando i valori non realistici ottenuti dall'estrapolazione.

### 3.2 Pericolosità locale: mappa nazionale delle classi di suolo

Il presente paragrafo sintetizza il lavoro svolto dal WP19 "Definizione della carta di pericolosità sismica locale a scala nazionale" per la realizzazione della carta nazionale dei valori attesi di  $V_{s30}$  e del relativo intervallo di confidenza su una griglia regolare  $50 \times 50m$  (Mori et al. 2020a,b). Sulla base dei risultati ottenuti in questo lavoro, è stata definita una mappatura a scala nazionale delle classi di suolo secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC 2018), implementata a scala comunale nella piattaforma IRMA per la predisposizione delle mappe di rischio sismico 2021. Il processo per la realizzazione della nuova carta del parametro  $V_{s30}$  nazionale è basato sul dataset nazionale della Microzonazione Sismica, MS (ex Art. 11 della L77/2009) realizzato e gestito dall'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale della Ricerca, CNR-IGAG, su incarico del Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri (consultabile al link [www.webms.it](http://www.webms.it)).

I valori sperimentali del valore della velocità media (armonica) delle onde S nei primi 30 metri di sottosuolo ( $V_{s30}$ ) sono stati utilizzati per valutare la migliore strategia di spazializzazione del parametro  $V_{s30}$  sul territorio nazionale. I valori sperimentali di  $V_{s30}$  sono dedotti da circa 11.300 misure geofisiche di superficie e in foro e le configurazioni sismostratigrafiche (ovvero gli spessori delle unità litologiche secondo standard nazionali, raggruppate secondo quattro famiglie: substrato geologico, ghiaie, sabbie e limi/argille) sono dedotte da circa 35.000 sondaggi (Mori et al. 2020a). Al fine di raggruppare i dati dei valori di  $V_{s30}$  e delle successioni litologiche, sono state individuate due classificazioni del territorio: una di tipo litologico

(Amanti et al., 2008) ed una di tipo geomorfologico (Iwahashi et al. 2018). Considerando i risultati di analisi di regressione multipla fra i valori di  $V_{s30}$  e gli spessori delle diverse famiglie litologiche, la classificazione geomorfologica presenta una più marcata correlazione ed è stata pertanto ritenuta più efficace di quella litologica per la stima dei valori di  $V_{s30}$ . Dunque, gli 11,300 valori di  $V_{s30}$  dedotti dalle altrettante prospezioni geofisiche sono stati campionati nelle 40 classi geomorfologiche della carta di base. Per ciascuna classe geomorfologica, il valore di  $V_{s30}$  è stato messo in relazione, attraverso una regressione lineare multipla, con due parametri numerici potenzialmente in grado di meglio discriminare la situazione locale (cosiddetti proxy): il gradiente della pendenza ( $s$ ) in metri/metri e l'elevazione ( $e$ ) in metri.

Sulla base dell'algoritmo stepwise che ha permesso di misurare la robustezza statistica dei coefficienti della regressione definendo la dipendenza delle classi dai parametri morfologici, la carta di base geomorfologica non mostra una soddisfacente correlazione, in termini di proxy per il calcolo di  $V_{s30}$ , con due zone caratterizzate dall'affioramento di successioni di piattaforma carbonatica, ovvero la zona dell'Apulia e quella degli Iblei. In questi casi il valore di  $V_{s30}$  risulta indipendente dalla morfologia ed è stato pertanto calcolato in funzione della classe litologica (Amanti et al., 2008) e i valori di  $V_{s30}$  vengono calcolati attraverso la media dei valori delle misure disponibili nella banca dati nazionale di microzonazione sismica. Per questi motivi, la nuova carta dei valori attesi di  $V_{s30}$  è una carta ibrida, secondo il quale è possibile riconoscere 40 classi omogenee per caratteri geomorfologici (Iwahashi et al., 2018) invece, per la zona della Apulia e quella degli Iblei (con estensione areale inferiore all'1% del territorio cartografato), i valori di  $V_{s30}$  sono determinati solo su base litologica (Amanti et al., 2008). Figura 3.2 mostra la carta dei valori di  $V_{s30}$  medi (in m/s) predetti per le singole configurazioni geologico/geomorfologiche.

In Figura 3.3 sono riportate invece le carte dei valori corrispondenti al 16° (a) e all'84° (b) percentile della distribuzione dei valori di  $V_{s30}$  (in m/s) relativi alla singola configurazione geologico/geomorfologica.

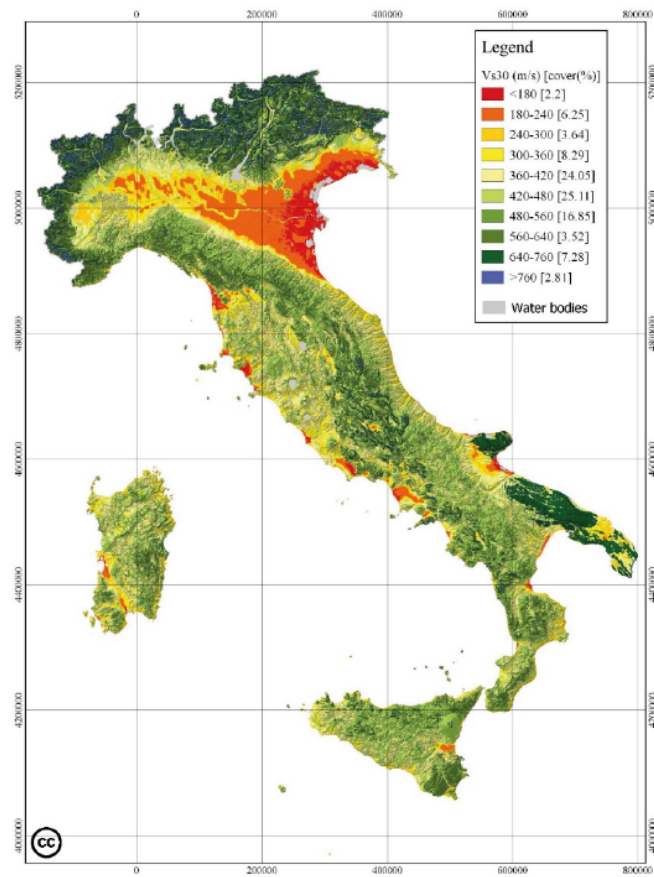


Figura 3.2 Carta nazionale dei valori medi attesi di  $V_{s30}$  per l'Italia (Mori et al., 2020a,b)

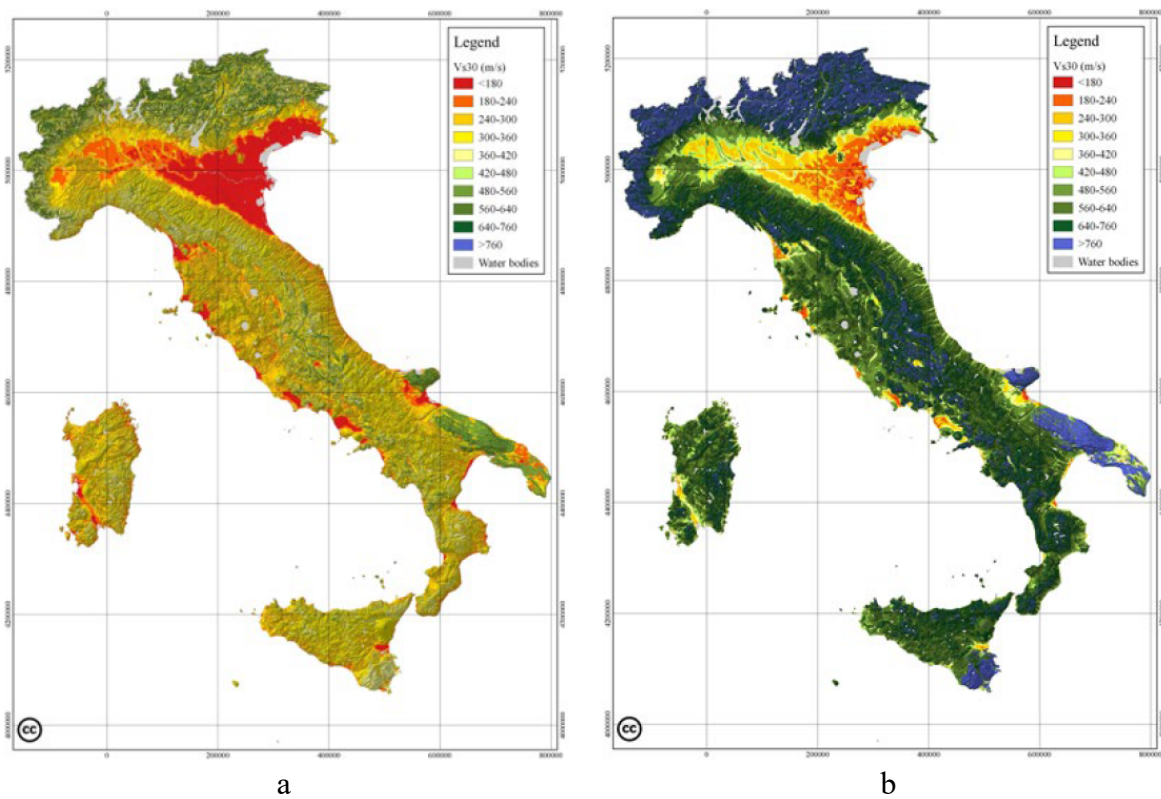


Figura 3.3 Carte al 16° (a) e 84° (b) percentile dei valori attesi di  $V_{s30}$  per l'Italia (Mori et al., 2020a,b)



### ***Uso della mappa nella piattaforma IRMA***

La piattaforma IRMA (Allegato 13.1) valuta il rischio e le perdite a scala comunale ed è a questa scala che è nota l'informazione sulla consistenza del costruito in termini di tipologia costruttiva, epoca di realizzazione e numero di piani; non è quindi presente una localizzazione relativa al singolo edificio. Per tener conto della mappa di pericolosità sismica (Mori et al., 2020a,b) è stata valutata la percentuale di superficie appartenente alle diverse classi di sottosuolo a scala comunale, facendo riferimento alle sole aree urbanizzate (ovvero escludendo le sezioni censuarie denominate "case sparse"). Il calcolo del rischio a scala comunale valutato con l'utilizzo della mappa dei suoli (Mori et al., 2020a,b) passa quindi attraverso la valutazione delle perdite associabili a ciascuna classe di sottosuolo (A, B, C, D ed E) per l'intero costruito comunale e alla successiva aggregazione dei vari scenari applicando le suddette percentuali. In questo modo si assume il dato sull'esposizione statisticamente non correlato da quello sulla tipologia di sottosuolo. Tale procedura è stata adottata sulla base delle informazioni disponibili; nella realtà le aree urbanizzate storicamente più antiche (centri storici) spesso sorgevano su aree con caratteristiche di sottosuolo migliori, mentre le aree di urbanizzazione più recenti sono state realizzate in alcuni casi in zone con peggiori caratteristiche geomeccaniche.

## 4 VULNERABILITÀ: SVILUPPO DI MODELLI DI FRAGILITÀ

### 4.1 Inquadramento degli approcci utilizzati

Al fine di analizzare i risultati ottenuti dalle unità di ricerca (UR) coinvolte nel Task 4.3 del WP4-MARS “Vulnerabilità: modelli e curve di fragilità per il costruito residenziale diffuso”, di seguito si riporta una breve panoramica dei principali approcci utilizzati nella derivazione dei modelli di fragilità. Gli approcci possono essenzialmente far riferimento (i) all’analisi dei dati dei danni osservati nei terremoti passati (approccio empirico), (ii) all’analisi numerica di modelli meccanici (approccio analitico) o (iii) alla combinazione di dati empirici e analisi numerica (approccio ibrido).

Gli *approcci empirici* si basano su analisi statistiche dei dati dei danni rilevati durante le campagne di sopralluogo post-sismiche per derivare le funzioni di fragilità (es. Dolce et al. 2003; Rossetto and Elnashai 2003; Rota et al. 2008; Del Gaudio et al. 2020). Questi approcci permettono di considerare la variabilità sia delle tipologie edilizie che dell’input sismico, rilevante per un’efficace valutazione del rischio su larga scala. L’affidabilità delle funzioni di fragilità empiriche è fortemente influenzata dalla qualità dei dati (legata innanzitutto alla soggettività nell’attribuire un livello di danno a ciascun edificio) e dalla completezza del database (ovvero la disponibilità di dati relativi sia alle diverse tipologie edilizie che ai diversi livelli di intensità sismica) (Silva et al., 2014). Va sottolineato che i dati disponibili riguardano principalmente eventi di bassa intensità con danno lieve-moderato e dunque tali approcci potrebbero sottostimare la fragilità per valori di intensità più alti (Rossetto et al. 2014). Inoltre, gli edifici non danneggiati generalmente non vengono ispezionati nei rilievi di agibilità post-sisma, determinando così una disponibilità di dati non omogenea nell’intervallo di intensità sismica. Se questi dati non sono adeguatamente inclusi nelle analisi, la fragilità può invece essere sovrastimata (Pitilakis et al., 2014). Particolare attenzione va posta nell’utilizzo delle curve di fragilità derivate per un’area specifica in aree diverse e/o più ampie, o per stimare la distribuzione dei danni per livelli di intensità o tipologie edilizie differenti (Rossetto et al. 2014).

Gli *approcci analitici* (meccanici) si basano su analisi numeriche della struttura, definendo una relazione diretta tra la risposta strutturale di un modello meccanico, l’intensità sismica e il danno atteso (es. Masi et al., 2015; Lagomarsino and Cattari 2015; D’Ayala et al. 2015; Borzi et al., 2021b). Gli approcci analitici consentono di simulare la risposta sismica di diverse tipologie edilizie, analizzandole anche ad elevati valori di intensità, per i quali generalmente sono



disponibili pochi dati empirici. Tutte le caratteristiche del patrimonio edilizio analizzato e le relative incertezze possono essere esplicitamente considerate. La corretta identificazione delle diverse fonti di incertezza (ad esempio, nella capacità, nella domanda e nella definizione dei livelli di danno) e la loro quantificazione può influenzare l'affidabilità dei risultati (Rossetto et al. 2014). Vengono generalmente considerate singole strutture prototipo rappresentative di una classe di edifici (es. Masi et al. 2015) oppure un insieme di strutture generate casualmente (es. Borzi et al. 2008). I principali limiti degli approcci analitici sono la ridotta capacità di un prototipo o di un insieme di strutture di rappresentare un patrimonio edilizio più complesso e le semplificazioni inevitabilmente introdotte dalla modellazione strutturale. Le funzioni di fragilità analitica possono essere raggruppate sulla base del metodo di analisi non lineare adottato per la valutazione della risposta dell'edificio: statico (es. Polese et al. 2008) o dinamico (es. Masi et al. 2015). Le differenze tra i metodi sono generalmente riscontrate in termini di risposta sismica e tempo di calcolo a causa della loro accuratezza nella modellazione sismica e delle diverse ipotesi semplificate (Silva et al. 2014). Per quanto riguarda le misure di intensità adottate, si possono definire due principali categorie: parametri empirici (intensità macrosismica) oppure strumentali (parametri di picco, spettrali o integrali).

I risultati empirici e analitici possono essere opportunamente combinati nel quadro degli *approcci ibridi* (es. Kappos et al. 2006; Calvi et al., 2006), sulla base dei limiti intrinseci dei due approcci.

Per implementare i contributi proposti dalle diverse UR nel modello di vulnerabilità MARS (capitolo 5) e successivamente nella piattaforma IRMA (Allegato 13.1), le curve di fragilità sono definite per cinque livelli di danno in accordo con la classificazione EMS-98 (Grünthal et al. 1998). I parametri richiesti sono i valori mediani di PGA (in g) associati ai cinque livelli di danno e la dispersione beta (deviazione standard) della distribuzione log-normale. Nei paragrafi successivi, vengono ampiamente descritti gli approcci utilizzati da ogni UR del Task 4.3 per la derivazione dei modelli di fragilità per gli edifici in muratura (4.2) e in cemento armato (4.3)

## **4.2 Modelli di fragilità per gli edifici in muratura**

Tabella 4.1 riporta UR e coordinatori coinvolti nel Task 4.3 del WP4-MARS “Vulnerabilità: modelli e curve di fragilità per il costruito residenziale diffuso” per la derivazione di modelli di fragilità per gli edifici in muratura (M). Viene anche indicato l'approccio utilizzato da ogni UR.

UR – RESPONSABILI (M)	APPROCCIO
UNIGE – Lagomarsino	Euristico-macrosismico
UNIPD – Da Porto	Ibrido
PLINIUS – Zuccaro	Ibrido
UNIPV – Penna	Empirico-osservazionale
UNIGEb – Cattari	Meccanico-analitico
UNINAd – Parisi	Meccanico-numerico
UNICH – Brando	Euristico-macrosismico
UNIRM1b – Sorrentino	Empirico-osservazionale

**Tabella 4.1 UR con coordinatore coinvolte nel task 4.3 e approccio utilizzato nella derivazione dei modelli di fragilità per gli edifici in muratura**

#### **4.2.1 UNIGE (Lagomarsino): approccio euristico-macrosismico**

L'approccio euristico-macrosismico sviluppato dalla UR UniGE ha necessità di essere calibrato con i dati del danno osservato ma, allo stesso tempo, ha una struttura che stabilisce a-priori una certa relazione tra le curve di fragilità dei diversi livelli di danno, fissata la classe di vulnerabilità, e nella transizione le classi di vulnerabilità. Molte di queste informazioni sono implicitamente contenute nella scala macrosismica EMS98 (da qui l'appellativo "macrosismico") mentre la denominazione "euristica" deriva dal fatto che alcune assunzioni esperte (non rigorose) consentono di definire la struttura di un comportamento che dovrà poi essere convalidato/calibrato. Questo approccio, in presenza di dati osservati incompleti e inevitabilmente affetti da errori, assicura risultati fisicamente coerenti sia per valori bassi che alti dell'intensità sismica.

Il metodo trae origine dalla proposta originale di Lagomarsino e Giovinazzi (2006), ma è stato generalizzato per rappresentare il comportamento di tipologie edilizie con diversa duttilità/fragilità (intesa come distanza tra le curve di fragilità dei diversi livelli di danno), grazie all'introduzione di un secondo parametro, l'indice di duttilità Q, in aggiunta all'indice di vulnerabilità V.

La calibrazione di tali parametri per le diverse tipologie ISTAT è stata supportata dall'utilizzo dei dati di danno sugli edifici residenziali in muratura presenti in Da.D.O., in particolare per i terremoti di L'Aquila (2009) e Irpinia (1980) (Lagomarsino et al., 2021). Il fitting dei dati di danno osservato viene effettuato suddividendoli per bin dell'intensità macrosismica (I) e

valutando in ciascuno il grado di danno medio ( $\mu_D$ ); in questo modo si ricavano i parametri liberi (V e Q) della curva di vulnerabilità macrosismica espressa dalla seguente formulazione:

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I+5V-0.38Q-11.6}{Q} \right) \right] \quad (2)$$

I valori dell'indice di vulnerabilità compatibili con le 6 classi di vulnerabilità EMS, definite in MARS e descritte nel seguito, sono  $V=1.05/0.85/0.65/0.45/0.25/0.05$  (passando da A a F). I valori di Q variano invece tra 1.8 (comportamento fragile) e 3 (comportamento duttile).

Le curve di fragilità dei singoli livelli di danno sono quindi derivate dall'andamento del danno medio  $\mu_D$ , assumendo che la distribuzione dei livelli di danno per fissata intensità (DPM) sia una binomiale. Quindi non si effettua un fitting su ciascuna singola curva di fragilità (per i livelli di danno più gravi i dati sarebbero statisticamente insufficienti) ma si ancora tutto all'andamento osservato del danno medio, che è un parametro più robusto.

I dati di danno osservato presenti in Da.D.O. sono associati a due diverse misure di intensità sismica: l'intensità macrosismica rilevata I (a livello comunale o di singola frazione) e la PGA (fornita puntualmente dalle shake map). Quindi i parametri V e Q sono stati ricavati sia usando direttamente l'intensità I, sia definendo bin di PGA e convertendo i valori adottando una legge di correlazione PGA-I. In particolare, è stata adottata la seguente correlazione:  $PGA = c_1 c_2^{I-5}$ , dove  $c_1$  rappresenta la PGA per intensità pari a 5, mentre  $c_2$  è il fattore di incremento della PGA corrispondente all'aumento di 1 dell'intensità macrosismica. In questo studio, i coefficienti  $c_1$  e  $c_2$  sono stati assunti pari a 0.05 e 1.8, rispettivamente. L'adozione di tale legge porta ad ottenere analoghi valori di V e Q usando le due misure di intensità.

Il passaggio dalla curva di vulnerabilità macrosismica ( $\mu_D, I$ ) alle curve di fragilità in PGA richiede l'utilizzo inverso della correlazione I-PGA. È quindi importante osservare che, usando i valori di PGA della shake-map, la stima delle curve di fragilità è pressochè non influenzata dai parametri scelti per la legge di correlazione, che viene usata solo in modo strumentale per fittare i parametri V e Q.

In particolare, i valori mediani delle curve di fragilità dei 5 livelli di danno sono quindi espressi in forma analitica, in funzione di V e Q:

$$PGA_{DSk}(V, Q, k) = c_1 c_2^{[6.6-5V+Q(0.38+\text{atanh}(0.36k-1.08))]} \quad (3)$$

Anche la dispersione  $\beta_{Dk}$  può essere derivata analiticamente in funzione di Q,  $c_1$  e  $c_2$ ; una accettabile stima è fornita dalla relazione:

$$\beta = 0.05 + 0.25 Q \quad (4)$$

Analizzando statisticamente i dati di danno osservato, sia per L'Aquila (2009) che per Irpinia (1980), sono stati ricavati i parametri del modello euristico-macrosismico, V e Q, al variare dell'epoca di costruzione e del numero di piani, rilevando andamenti molto regolari:

- una significativa riduzione dell'indice di vulnerabilità V passando dagli edifici in muratura più antichi a quelli di moderna concezione, con una contestuale leggera riduzione della duttilità Q;
- una minore influenza del numero di piani, ma comunque con un chiaro aumento della vulnerabilità per gli edifici più alti.

La vulnerabilità ricavata dai dati relativi ai due terremoti non è risultata molto diversa.

Inoltre, per il solo terremoto dell'Aquila, i dati sono stati processati definendo sub-tipologie, in funzione della regolarità/irregolarità della muratura, delle caratteristiche dei diaframmi orizzontali (volte, legno, putrelle, rigido) e dei dettagli costruttivi. Ciò ha consentito di ricavare modificatori dell'indice di vulnerabilità, che opportunamente combinati consentono di definire un modello di vulnerabilità per sub-tipologie ISTAT, che è stato usato per la regionalizzazione, ovvero per attribuire curve di fragilità diverse nei diversi ambiti territoriali in cui la piattaforma IRMA suddivide il territorio nazionale (Regioni/Altimetria/Demografia).

#### **4.2.2 UNIPD (da Porto): approccio ibrido**

Il modello di vulnerabilità sismica per analisi di rischio a larga scala elaborato dall'UR UniPD si basa sulla stima meccanica di fragilità del patrimonio edilizio residenziale in muratura italiano. Sono state individuate 10 macro-tipologie, definite sulla base di 5 epoche di costruzione (pre-1919, 1919-45, 1946-60, 1961-80, post-1980) e 2 classi di altezza (1-2 piani, da 3 piani in su). Per le analisi, è stato creato un database con più di 500 edifici in muratura, contenente le informazioni relative alle loro principali caratteristiche (geometria, proprietà dei materiali e caratteristiche costruttive). Le informazioni degli edifici sono state ricavate direttamente dai relativi progetti, e in caso di dati mancanti, è stato fatto riferimento a manuali di progettazione, codici normativi e letteratura specifica. Gli edifici selezionati appartengono a diverse regioni e a diversi comuni, in modo da garantire la rappresentatività tipologica del patrimonio edilizio italiano. Ogni edificio del database è stato implementato nel software Vulnus Vb 4.0, sviluppato presso l'Università di Padova (Bernardini 1990, Valluzzi et al. 2009). Vulnus analizza i meccanismi in piano e fuori piano di edifici in muratura e restituisce un set di 3 curve di fragilità, definite in termini di PGA: la curva centrale (White) rappresenta la

fragilità più probabile, mentre le altre due definiscono il massimo range di fragilità (Upper e Lower Bounds). Il livello di danno associato a queste curve di fragilità è riconducibile ad un DS2-3 (secondo la scala EMS-98). La fragilità meccanica delle macro-tipologie è stata ottenuta mediando le curve di ogni edificio con lo stesso numero di piani ed età di costruzione prima per comune, al fine di mantenere una rappresentatività tipologica geografica, e poi per classe di altezza in modo pesato, considerando per ognuna l'effettiva distribuzione reale ottenuta dai dati censuari ISTAT (2011). Per definire dei set di fragilità per tutti i livelli di danno previsti dalla scala EMS-98 (da DS1 a DS5), il modello macrosismico di Lagomarsino e Cattari (2014) convertito in PGA secondo la legge di correlazione di Margottini et al. (1992) è stato calibrato sui risultati di fragilità meccanica, ottenendo così un modello di vulnerabilità meccanico-euristico. La calibrazione è stata effettuata utilizzando l'algoritmo genetico NSGA-II, valutando la migliore combinazione lineare tra le curve di fragilità (associate ad un livello di danno DS2-3) delle varie classi del modello macrosismico. Per ogni macro-tipologia, sono stati quindi ottenuti 3 set di fragilità (da DS1 a DS5) associati alle curve di probabilità White, Upper e Lower Bound. Il set finale di fragilità è stato infine ricavato assumendo la fragilità media del set White, e la dispersione massima data dal range di fragilità tra le curve Upper e Lower, per ciascun DS.

Al fine di validare il modello elaborato, sono stati confrontati il danno rilevato tramite le schede AeDES di rilievo di danno compilate a seguito del terremoto de L'Aquila 2009 contenute in DaDO (Database di Danno Osservato) con le simulazioni di danno svolte nella piattaforma IRMA (Italian Risk MAPs) elaborate per lo stesso scenario. In particolare, le indicazioni di danno riportate nelle schede AeDES sono state ricondotte ad un livello globale di danno utilizzando le metodologie proposte da Lagomarsino et al. (2021) e da Rota et al. (2008). Le previsioni fatte tramite IRMA rispecchiano gli andamenti del danno ottenuto dall'analisi dei dati osservazionali, dimostrando la robustezza del modello di vulnerabilità elaborato.

Vanno tuttavia sottolineati alcuni limiti del modello. Innanzi tutto, l'approccio meccanico utilizzato permette di ricavare solamente una curva di probabilità, e non un set completo di fragilità. Come già spiegato, è infatti necessario appoggiarsi ad altri modelli presenti in letteratura per ricavare le curve di tutti gli stati di danno. Inoltre, il modello è chiaramente influenzato dal database di edifici analizzati; è stato però scelto di mediare le curve di fragilità per ogni comune, in modo da creare un modello che avesse validità generale, piuttosto che vari modelli calibrati su diverse aree geografiche. Inoltre, è stato verificato che la numerosità del campione risulta sufficiente a garantire una buona stabilità del modello.

### **4.2.3 PLINIUS (Zuccaro): approccio ibrido**

Il modello PLINIUS propone l'analisi del comportamento sismico degli edifici ordinari in muratura attraverso un approccio osservazionale critico basato sui dati di danneggiamento occorsi a seguito di due terremoti verificatisi in Italia (Irpinia 1980 e L'Aquila 2009), raccolti nella banca dati del Centro Studi PLINIUS dell'Università degli Studi di Napoli Federico II (Zuccaro 2004). Le informazioni disponibili riguardano le caratteristiche tipologico- strutturali degli edifici, il livello di danneggiamento (D0-D5, Grünthal 1998) e la misura dell'input sismico in PGA, desunta da shakemap per L'Aquila 2009 e attraverso legge di conversione da intensità macrosismica (Margottini et al. 1992) per Irpinia 1980. Le curve di vulnerabilità sono calcolate con un metodo di regressione che fa uso di funzioni lognormali pesate sul livello di affidabilità del dato al variare della PGA. Per ciascuna classe di vulnerabilità (A, B, C1), l'affidabilità è stimata sulla base dei dati de L'Aquila 2009 (in quanto più completi per tutti i livelli di danno), in funzione del rapporto tra il numero di edifici rilevati e quello degli edifici presenti nel database ISTAT 2001. A parità di PGA, la medesima affidabilità è assunta per i dati di Irpinia 1980. Inoltre, allo scopo di non sovrastimare il danneggiamento per bassi valori di PGA, si è fatta l'ipotesi di "assenza di danno" in corrispondenza di valori di PGA minori o uguali di 0,03g. L'assegnazione della classe di vulnerabilità è condotta attraverso un aggiornamento della procedura BINC, Building Inventory at National scale based on Census data (Cacace et al., 2018; Zuccaro and Cacace, 2015a), tramite le correlazioni statistiche tra i dati degli edifici rilevati (DB PLINIUS) e i dati "poveri" dell'ISTAT 2001 (numero di piani, età e tipo di struttura).

### **4.2.4 UNIPV (Penna): approccio empirico-osservazionale**

Il modello di vulnerabilità proposto dall'Università di Pavia per gli edifici residenziali in muratura è derivato empiricamente, elaborando statisticamente i dati di danno post-terremoto disponibili nella piattaforma di danno osservato Da.D.O. (Dolce et al. 2019). L'aggiornamento del modello di vulnerabilità UniPV 2018 ha riguardato l'elaborazione statistica dei dati di danno empirici relativi agli eventi sismici di Irpinia (1980), Marche (1997), Molise-Puglia (2002) e L'Aquila (2009), per i quali sono disponibili dati da comuni rilevati a tappeto e mappe di scuotimento INGV aggiornate (Michelini et al. 2020). I dati di danno post-terremoto sono stati integrati e completati dal dato ISTAT, assumendo che gli edifici non rilevati, siti nei comuni meno affetti dallo scuotimento sismico, fossero non danneggiati. Questo ha consentito di tener opportunamente conto dell'evidenza negativa del danno e di meglio condizionare le curve di

fragilità a basse soglie dello scuotimento sismico. Il modello di vulnerabilità comprende set di curve di fragilità definite per dodici categorie ISTAT, identificate sulla base dell'epoca di costruzione (i.e. <1919, 1919-45, 1946-60, 1961-70, 1971-80, >1980) e del numero di piani (edifici bassi: 1-2 piani ed edifici medio-alti: >2 piani). La severità dello scuotimento sismico è stata caratterizzata dalla PGA stimata da shakemaps INGV aggiornate (Michellini et al. 2020). Le curve di fragilità sono state definite per cinque livelli di danno della EMS-98 (Grünthal et al. 1998), identificati sulla base del massimo danno osservato su diversi componenti strutturali (e.g. Rota et al. 2008; Rosti et al. 2018), utilizzando leggi di conversione del danno disponibili dalla letteratura (i.e. Braga et al. 1982, Dolce et al. 2019, Rota et al. 2008).

Analogamente al modello di vulnerabilità UniPV 2018, i dati di danno empirici sono stati approssimati dalla distribuzione lognormale, considerando un unico valore di dispersione per tutti i livelli di danno (Rosti et al. 2021a). Per ogni soglia di PGA, la ripartizione degli edifici nei diversi stati di danno è stata descritta dal modello multinomiale. I parametri delle curve di fragilità sono stati derivati attraverso il metodo della massima verosimiglianza.

#### **4.2.5 UNIGEb (Cattari): approccio meccanico-analitico**

L'approccio adottato da UniGEb per la derivazione di curve di fragilità riferite principalmente al comportamento globale nel piano degli edifici residenziali in muratura è stato basato su un approccio analitico-meccanico sviluppato dall'Università di Genova (Lagomarsino e Cattari, 2014). Il modello DBV-Masonry (Displacement Based Vulnerability) definisce innanzitutto la curva di capacità rappresentativa della risposta sismica basata su tre variabili: il periodo pseudo-elastico della struttura  $T_y$ ; l'accelerazione spettrale allo snervamento  $A_y$ ; la capacità di spostamento associata al D3 e D4. La valutazione di queste variabili richiede la definizione di un numero limitato di parametri meccanici e geometrici, unitamente all'assunzione di una forma modale fondamentale e all'attribuzione di specifici fattori di correzione ( $K_i$ ) che tengano conto degli effetti relativi ai dettagli costruttivi e morfologici che caratterizzano gli edifici esistenti. La formulazione analitica per la valutazione del taglio di base complessivo parte dall'ipotesi di rottura contemporanea dei maschi murari secondo la modalità di rottura a taglio diagonale (SSWP, Strong Spandrels Weak Piers, meccanismo a piano debole). Introducendo poi opportuni fattori correttivi possono essere simulate altre modalità di collasso, uniforme (WSSP, Weak Spandrels Strong Piers) oppure intermedio (EF, Equivalent Frame). Una volta calcolata la curva di capacità, si adotta la procedura statica non lineare basata sull'uso di spettri sovrasmorzati (Freeman, 1998) per calcolare il valore della IM mediano che produce il



raggiungimento di ciascun livello di danno DL ( $IM_{DL}$ ). Infine, per la propagazione dell'incertezza, vengono considerati vari contributi calcolati analiticamente associati a: le incertezze nella domanda sismica (incertezza epistemica sulla derivazione della curva di pericolosità e dalla variabilità dell'input sismico descritto solamente dall'IM mediano); l'incertezza nella definizione delle soglie dei livelli di danno; le incertezze relative alla capacità della struttura, in particolare calcolata utilizzando il metodo della superficie di risposta (Pagnini et al, 2011). Partendo dalla proposta originaria del metodo, nell'ambito del progetto MARS sono state apportati ulteriori perfezionamenti del metodo che riguardano sia la stima della capacità di spostamento ultimo associata a ciascun livello di danno che la valutazione dell'IM mediano. Sono stati introdotti specifici coefficienti ( $\epsilon_{\mu}$ ) finalizzati a limitare la capacità di spostamento (e la duttilità disponibile del sistema) per introdurre, anche se in modo semplificato, la possibile attivazione di meccanismi fuori piano prima del raggiungimento dello spostamento ultimo associato ai meccanismi derivanti dalla sola resistenza nel piano della struttura. Le soglie di drift, definite per valutare gli spostamenti associati al D3 e D4, sono state aggiornate e differenziate in base al tipo di muratura per essere coerenti con le prove sperimentali (Vanin et al, 2017; Morandi et al, 2018) e con i livelli di danno EMS98 (Grünthal, 1998). Per quanto riguarda la valutazione dell'IM per ciascun livello di danno, è stato introdotto un fattore correttivo per tenere in considerazione dell'approssimazione che le procedure statiche non lineari comportano rispetto a metodi più raffinati, come le analisi dinamiche non lineari. In particolare, sulla base del lavoro svolto da Marino et al. 2019, è stato applicato un fattore correttivo pari a 1.45. Inoltre, sono state utilizzate leggi di smorzamento differenti in funzione del meccanismo globale prevalente e calibrate in maniera specifica per il costruito in muratura (Cattari e Lagomarsino, 2013) e la forma spettrale degli spettri di risposta è stata raffinata includendo, nel ramo solitamente a velocità costante, la dipendenza da un coefficiente  $a$  ( $1/T^a$ ) per renderla più coerente con le evidenze delle registrazioni reali (Smerzini et al, 2014); nel progetto MARS tale coefficiente è assunto pari a 1.2. Grazie alla variazione di tali parametri, il modello è in grado di cogliere risposte sismiche molto differenti, con variazioni apprezzabili in termini di resistenza, rigidità e duttilità della curva di capacità. I parametri che permettono di differenziare il comportamento possono essere (i) dedotti per classi di edifici a comportamento omogeneo rappresentative del costruito italiano (approccio A) oppure (ii) particolarizzati con riferimento a specifici archetipi (approccio B). Nel primo caso tali fattori sono definiti da un range di variazione di ciascun parametro e dalla relativa dispersione in modo da essere rappresentativi di una classe di edifici a comportamento omogeneo. Nel caso invece si



procedesse con un approccio di tipo B, è necessario selezionare degli archetipi che riflettano le caratteristiche di classi di edifici a comportamento omogeneo, in modo che l'integrazione dei risultati ottenuti per ciascun archetipo fornisca il comportamento della classe a cui appartengono. Entrambi gli approcci definiscono quindi il comportamento di una classe di edifici a comportamento omogeneo, ma l'aspetto vantaggioso dell'approccio di tipo B è quello di mantenere all'interno del risultato la caratterizzazione di ciascun edificio appartenente a quella classe. Qualora non fosse disponibile un campione abbastanza numeroso da coprire tutte le classi del costruito italiano, l'approccio di tipo A permette di definire il comportamento sismico di ciascuna classe utilizzando dei parametri medi rappresentativi. Per il Task 4.3 riguardante l'edilizia residenziale è stato adottato un approccio di tipo A.

#### **4.2.6 UNINAd (Parisi): approccio meccanico-numerico**

Il modello di vulnerabilità riguarda gli edifici in muratura della regione Campania ed è di tipo meccanico numerico, in quanto sviluppato mediante analisi statica non lineare di modelli strutturali a macro-elementi. La metodologia impiegata per ottenere il modello di vulnerabilità si basa innanzitutto sui dati disponibili nel database CARTIS, attraverso il quale sono state ricavate le statistiche sul costruito esistente distinguendo gli edifici in base all'epoca di costruzione e al numero di piani. Il risultato della raccolta dati ha evidenziato che gli edifici in muratura campani sono costituiti per la maggior parte da edifici in muratura di tufo e, in misura minore, da edifici in muratura di pietrame, rappresentando circa il 90% del costruito campano. I dati statistici così raccolti sono stati impiegati per generare, in modo casuale e per ciascuna classe tipologica considerata, un campione di 1'000 edifici attraverso una procedura parametrica automatica implementata in MATLAB che ha tenuto conto del numero di piani, dell'estensione planimetrica, dell'altezza di interpiano e della tipologia di orizzontamenti. Parallelamente, alle proprietà meccaniche della muratura sono stati assegnati valori generati casualmente a partire dalle rispettive distribuzioni di probabilità e statistiche, in accordo con la letteratura esistente e con le Istruzioni CNR-DT 212/2013. Poiché i dati CARTIS per la Campania sono al momento significativi sino al periodo 1981–1990 (soprattutto a causa del ridottissimo numero di nuovi edifici realizzati successivamente), i valori attribuiti ai parametri delle curve di fragilità relative ad epoche successive sono stati fissati uguali a quelli del periodo suddetto. Dunque, soltanto per il periodo 1981–1990 sono stati distinti gli edifici non antisismici da quelli progettati sismicamente. In accordo con quanto detto sopra, ogni realizzazione casuale di edificio è stata modellata come telaio equivalente. I pannelli di maschio e i pannelli di fascia sono stati

modellati con elementi beam a fibre, considerando alle loro estremità dei braccetti rigidi per modellare i pannelli di nodo. Gli impalcati sono stati modellati con elementi truss equivalenti, in modo da tenere in conto impalcati rigidi, semi-rigidi e deformabili attraverso un approccio univoco. Per ciascun edificio sono state eseguite quattro analisi statiche non lineari per due combinazioni di forze e per due direzioni dell'azione sismica, valutando la domanda di spostamento attraverso il metodo N2 per una PGA variabile tra 0 e 1g. Su ciascuna curva di capacità sono stati individuati direttamente 5 stati di danno, come segue: il DS1 in corrispondenza del 70% del massimo taglio alla base ( $V_{b,max}$ ) sul ramo crescente della curva di capacità, il DS2 in corrispondenza di  $V_{b,max}$ , il DS3 in corrispondenza di un degrado del 20% di  $V_{b,max}$ , il DS4 in corrispondenza di un degrado del 50% di  $V_{b,max}$ , il DS5 al raggiungimento dello spostamento ultimo. Per ciascun DS la fragilità condizionata a ciascun valore di PGA è stata calcolata mediante approccio frequentistico, successivamente ottenendo le curve di fragilità sotto l'ipotesi di distribuzione lognormale. Per tenere conto dell'incertezza legata alla record-to-record variability, le curve ottenute sono state convolute con la distribuzione della domanda per la quale è stato assunto un valore di dispersione pari a 0.4 in accordo con la letteratura. La validazione delle curve di fragilità proposte, successivamente trasformate in quelle delle classi di vulnerabilità EMS-98 secondo la procedura MARS, è stata effettuata attraverso la piattaforma IRMA, valutando la percentuale attesa di edifici che raggiunge un prefissato stato di danno. Lo scenario considerato in termini di shakemap e corrispondente distribuzione del danno è quello del terremoto irpino-lucano del 1980. La distribuzione di danno predetto mediante IRMA è stata confrontata con quella del danno osservato, disponibile nel portale DaDO. La validazione del modello relativo agli edifici in muratura campani si è resa possibile grazie al fatto che, dopo il 1980, gli edifici sono stati costruiti ex novo o ricostruiti con altri materiali (soprattutto c.a.), come evidenziato dai dati disponibili sia in CARTIS che nel database ISTAT.

#### **4.2.7 UNICH (Brando): approccio euristico-macrosismico**

Le curve di fragilità proposte da UNICH per edifici in muratura sono state ottenute attraverso un metodo empirico/osservazionale, la cui validità è stata corroborata per comuni di fascia montana delle regioni centro Italia (Abruzzo, Molise, Marche e Umbria), con demografia minore di 5000 abitanti. Infatti, tale modello è stato validato tramite l'osservazione dei danni post-sisma 2009 e 2016 (Brando et al. 2017). Data la fascia geografica di riferimento, le classi di vulnerabilità EMS-98 considerate sono la classe A (pietra irregolare) e la classe B (pietra

regolare). I risultati ottenuti sono stati organizzati in due gruppi. Il primo gruppo riguarda edifici a bassa vulnerabilità che, per noi, sono tutti gli edifici di classi ISTAT pre-1945 con numero di piani inferiore a tre. Il secondo gruppo riguarda edifici ad alta vulnerabilità, appartenenti a classi ISTAT pre-1945 con numero di piani maggiore o uguale a tre. Non consideriamo classi ISTAT post-1945, perché poco rilevanti ai fini della popolazione analizzata. Il modello UNICH, oltre all'anno di costruzione, alla tipologia di muratura e al numero di piani, contempla un terzo parametro riguardante la presenza/assenza di interventi. Tale parametro è rilevante ai fini del comportamento sismico e permetterebbe ad un edificio, secondo il nostro modello, di passare dal gruppo di edifici ad alta vulnerabilità al gruppo a bassa vulnerabilità (Tavani et al. 2017). In altre parole, un edificio con numero di piani maggiore o uguale a 3, che rientrerebbe nel gruppo "alta vulnerabilità", viene ad essere classificato "a bassa vulnerabilità" in presenza di interventi. Questo aspetto non è al momento rappresentabile sulla base della schematizzazione MARS. Tuttavia, partendo dalle informazioni del database CARTIS, è possibile includerlo nell'esposizione, ricollegandolo inizialmente ai due sottogruppi (alta e bassa vulnerabilità) che poi dovrebbero, a loro volta, essere correlati alle curve classi EMS-98 presenti in IRMA.

#### **4.2.8 UNIRM1b (Sorrentino): approccio empirico-osservazionale**

Nel modello di vulnerabilità proposto sono state calibrate curve di fragilità di tipo empirico a partire dai dati di danno osservati dopo il terremoto dell'Aquila del 2009, desunti dal database Da.D.O.. Sono state definite sei classi tipologiche per edifici in muratura ordinaria sulla base di due parametri (periodo di costruzione e stato di conservazione della costruzione) desumibili sia dal database di danno osservato, sia dal censimento ISTAT. Per il periodo di costruzione sono state considerate tre possibili categorie: <1919, 1919-1961, >1961; per lo stato di conservazione ne sono state definite due: ottimo/buono, mediocre/pessimo. Per la definizione di quest'ultime è stato necessario effettuare un'associazione tra il danno preesistente, desumibile dalla scheda AeDES, e lo stato di conservazione desumibile dal censimento ISTAT. Poiché lo stato di conservazione non è implementato in IRMA, è stata valutata l'associazione con gli altri parametri disponibili. Le curve di fragilità sono state definite in funzione della PGA per cinque stati di danno, definiti in accordo con la scala macrosismica europea EMS-98. In particolare, per ogni edificio il danno globale è stato valutato mediante un indice di danno proposto che tiene conto del danno subito da: strutture verticali, strutture orizzontali, scale, copertura e tamponature/tramezzi. Nella formulazione la combinazione del danno subito dai diversi elementi strutturali è pesata mediante coefficienti definiti in funzione delle tipiche

tecniche di riparazione utilizzate e della dimensione effettiva dei diversi elementi strutturali. Tale formulazione è stata calibrata su un database ridotto, per il quale si dispone del rilievo geometrico completo. Il database di danno osservato, composto da circa 57 000 edifici residenziali, è stato completato con i dati del censimento ISTAT, al fine di stimare il numero di edifici non danneggiati, che non sono stati rilevati durante la fase di emergenza sismica. Il database è stato esteso includendo tutti i comuni dell'Abruzzo. Tale incremento ha permesso di ridurre la probabilità di eccedenza per bassi valori di PGA, per i diversi stati di danno.

### 4.3 Modelli di fragilità per gli edifici in cemento armato

Tabella 4.2 riporta UR e coordinatori coinvolti nel Task 4.3 del WP4-MARS “Vulnerabilità: modelli e curve di fragilità per il costruito residenziale diffuso” per la derivazione di modelli di fragilità per gli edifici in cemento armato (CA). Viene anche indicato l'approccio utilizzato da ogni UR.

UR – RESPONSABILI <b>(CA)</b>	APPROCCIO
UNIGE – Lagomarsino	Euristico-macrosismico
UNIBAS – Masi	Meccanico-numerico
EUCENTRE - Borzi	Meccanico-analitico
UNINA – Verderame	Meccanico-analitico
UNINA-PV – Verderame/Penna (EA-EC)	Empirico-osservazionale
UNIPR-SA – Belletti/Martinelli	Meccanico-numerico
UNIRM1a – Monti	Meccanico-numerico

Tabella 4.2 UR con coordinatore coinvolte nel task 4.3 e approccio utilizzato nella derivazione dei modelli di fragilità per gli edifici in CA

#### 4.3.1 UNIGE (Lagomarsino): approccio euristico-macrosismico

L'approccio euristico-macrosismico sviluppato dalla UR UniGE è stato utilizzato anche per la derivazione di curve di fragilità per le tipologie ISTAT di edifici in cemento. Infatti, il metodo stabilisce a-priori una certa relazione tra le curve di fragilità dei diversi livelli di danno, fissata la classe di vulnerabilità, e la transizione tra le classi di vulnerabilità, definendo quindi una struttura “esperta” nel modello di vulnerabilità (relazione tra intensità e danno), ma ha necessità di essere calibrato con i dati del danno osservato. Quindi può essere applicato tanto alle strutture

in muratura quanto a quelle in cemento armato (si rimanda al §4.2.1 per la descrizione delle basi teoriche e concettuali del modello).

Analizzando statisticamente i dati di danno osservato, sia per L'Aquila (2009) che per Irpinia (1980), sono stati ricavati i parametri del modello euristico-macrosismico,  $V$  e  $Q$ , al variare dell'epoca di costruzione e del numero di piani, rilevando andamenti molto regolari:

- una riduzione dell'indice di vulnerabilità  $V$  passando dagli edifici in cemento armato degli anni '50-'60 a quelli più moderni (Post 1980);
- una chiara differenza tra edifici con progettazione sismica o solo gravitazionale; in particolare, si osserva una minore vulnerabilità degli edifici nella zona de L'Aquila rispetto a quelli in Irpinia, in quanto i primi sono il frutto di una progettazione sismica anche prima degli anni '80;
- un maggiore aumento della vulnerabilità degli edifici alti, rispetto a quanto osservato negli edifici in muratura.

#### **4.3.2 UNIBAS (Masi): approccio meccanico-numeric**

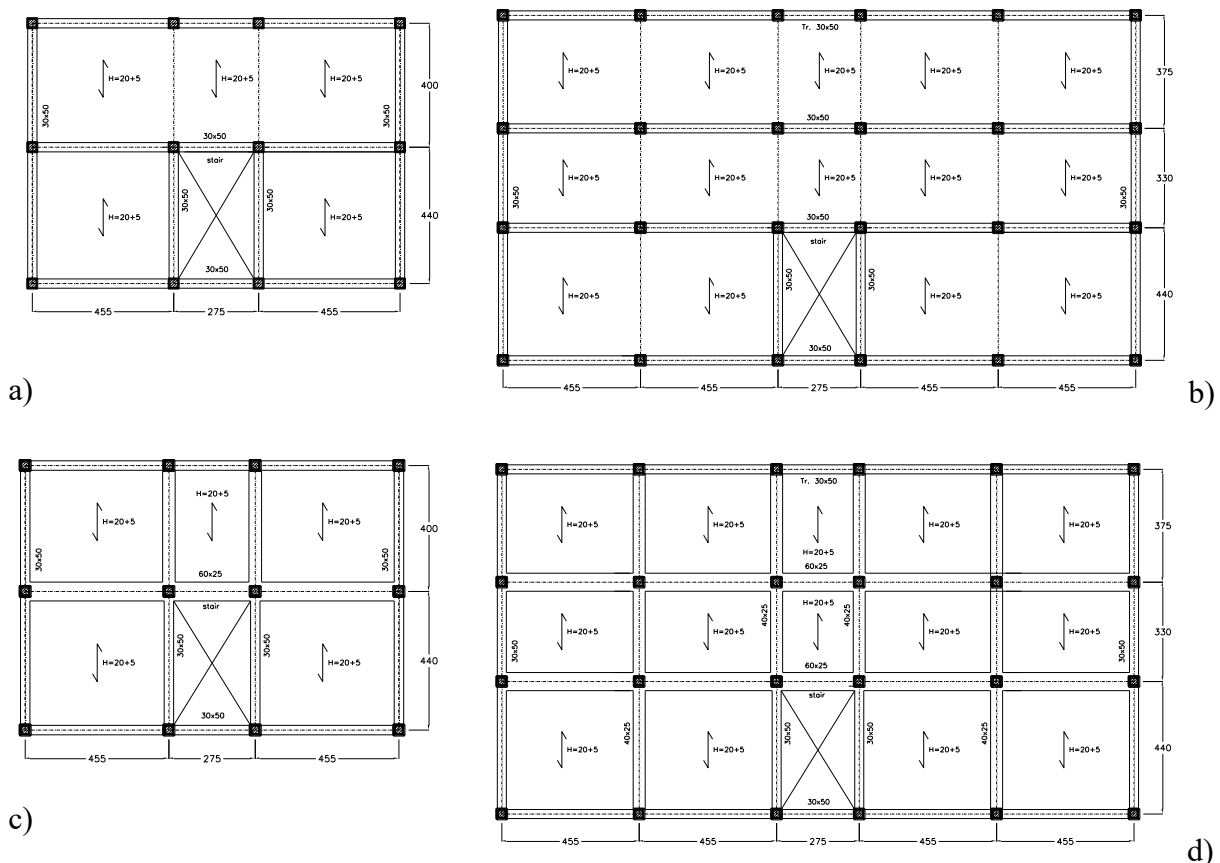
La metodologia utilizzata dalla UR UniBas si basa su analisi dinamiche non lineari condotte su prototipi di edifici rappresentativi di tipologie esistenti in c.a. maggiormente diffuse in Italia. Essa consiste principalmente in 10 step, come di seguito elencato (Masi et al., 2022):

1. Identificazione delle classi tipologiche;
2. Selezione delle tipologie di edificio;
3. Progetto simulato
4. Modellazione
5. Selezione del parametro di intensità sismica (IM)
6. Selezione degli accelerogrammi
7. Definizione del parametro di risposta strutturale (EDP) e della metrica del danno
8. Esecuzione delle analisi dinamiche non lineari
9. Trattamento delle incertezze
10. Derivazione delle curve di fragilità.

Le classi tipologiche sono state identificate in funzione dei parametri che maggiormente influenza la vulnerabilità sismica, cioè l'epoca di costruzione (tre periodi: anni '50, anni '70, anni '90), il numero di piani (tre tipologie: Low-rise, 1-2 piani; Mid-rise, 3-5, High-rise,  $\geq 6$ ), la distribuzione delle tamponature in elevazione (Bare frame, BF, Infilled frame, IF, Pilotis Frame, PF) e il livello di progettazione (gravitazionale, GLD, con forze laterali, ERD). Si evidenzia fin

d'ora che la tipologia BF è stata utilizzata solo per esigenze di confronto dei risultati ottenuti. Inoltre, in considerazione delle classi tipologiche definite nel database ISTA2011 (quattro classi in elevazione, da 1 a  $\geq 4$  piani senza distinzione della configurazione in elevazione delle tamponature), i risultati relativi alle tipologie IF e PF sono stati opportunamente combinati in funzione della percentuale relativa osservata in alcuni contesti italiani (es. L'Aquila).

Sulla base delle classi tipologiche definite, sono stati selezionati edifici rappresentativi. In particolare, per la tipologia Low-rise sono state considerati prototipi con 1 e 2 piani, per la tipologia Mid-rise prototipi con 4 piani e, infine, prototipi con 6 piani per la tipologia High-rise. Ciascuna tipologia in elevazione è stata ulteriormente caratterizzata secondo due diverse estensioni in pianta: pianta "piccola" (Figura 4.1 a,c), attribuita ai prototipi 1-2 piani, e pianta "grande" (Figura 4.1 b,d) per i prototipi 4 e 6 piani.



**Figura 4.1 Schema strutturale in pianta: a) e c) sono relative alla pianta "piccola" utilizzata per GLD e ERD, rispettivamente; b) e d) sono relative alla pianta "grande" utilizzata per GLD e ERD, rispettivamente**

Le dimensioni geometriche degli elementi resistenti e i dettagli di armatura sono stati determinati attraverso il progetto simulato condotto secondo le norme e la pratica costruttiva

relativa alle tre epoche considerate. Nello specifico per le tipologie GLD sono state considerati il RD 2229/1939, il DM 30/5/1972 e il DM 1/4/1983 rispettivamente per gli anni '50, '70 e '90. Per le medesime epoche, per il progetto delle tipologie ERD, sono state considerate il RD 640/1935, la Legge 1684/1962 e il DM 24/1/1986. Per tali tipologie, l'intensità delle forze laterali è coerente con la II categoria ( $S=9$ ).

In merito alle tamponature, è stata considerata la tipologia con doppia fodera in laterizio il cui spessore efficace è 20 cm, per le epoche anni '50 e '70, e 28 cm per le tipologie anni '90.

I prototipi così progettati sono stati analizzati in ambiente Opensees (McKenna, 2011) secondo un approccio a "plasticità concentrata". A tale scopo, sono stati utilizzati i criteri di modellazione già utilizzati nel progetto di ricerca DPC-Reluis RINTC (Iervolino et al., 2021; De Risi et al., 2022; Di Domenico et al., 2022). Nella determinazione della capacità delle sezioni sono stati considerati valori tipici di resistenza coerenti con l'epoca considerata secondo i risultati ottenuti da Masi et al. (2019), per il calcestruzzo, e Verderame et al. (2012) per l'acciaio.

In merito alle tamponature, è stato adottato un approccio a semplice puntone diagonale secondo il modello originariamente proposto da Decanini and Fantin (1986), utilizzando il legame costitutivo (nel solo piano del pannello) illustrato in Ricci et al. (2018).

Le analisi dinamiche non lineari (ADNL) sono state condotte utilizzando 125 records selezionati nell'ambito del Task 4.2 e coerenti per sottosuolo di categoria A/B (secondo la definizione della NTC2018, DM 17/1/2018). I segnali hanno intensità crescente in modo da consentire la derivazione delle curve per i diversi stati di danno secondo la classificazione della scala macrosismica EMS98 (Grunthal, 1998). Maggiori informazioni in merito alla selezione degli accelerogrammi sono riportate in (Manfredi et al., 2022). Particolare attenzione è stata destinata alla definizione della metrica del danno. Nel dettaglio, la metrica proposta in Masi et al. (2015), è stata aggiornata sulla base di dati sperimentali e di analisi numeriche sono stati definiti gli intervalli di drift interpiano (IDR, assunto come EDP) per i sei livelli di danno (dal danno nullo, D0, al collasso, D5).

Da ciascuna ADNL è stato valutato il massimo drift di piano nelle due direzioni in pianta ed è stato associato il corrispondente valore di PGA (assunto come IM). Il set di valori di PGA i cui IDR ricadono nell'intervallo relativo ad un dato livello di danno sono stati utilizzati per la generazione delle curve di fragilità del livello di danno. Come largamente validato e utilizzato negli studi di fragilità disponibili in letteratura, il modello di fragilità utilizzato segue la funzione di distribuzione cumulativa (CDF), definita dalla seguente espressione:



$$P(D_k|PGA) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{D,Dk}} \cdot \ln \left( \frac{PGA}{\overline{PGA}_{Dk}} \right) \right] \quad (5)$$

dove  $P(D_k|PGA)$  è la probabilità di superamento del  $k$ -esimo livello di danno ( $D_k$ ) condizionato al valore di  $PGA$ ,  $\Phi$  è la funzione di distribuzione cumulativa standard,  $\beta_{D,Dk}$  e  $\overline{PGA}_{Dk}$  sono rispettivamente la deviazione standard logaritmica e la mediana calcolata per il set dei valori di  $PGA$  relativa al livello di danno  $D_k$ . Appare utile evidenziare che la probabilità di superamento del D5 (collasso) è stata ottenuta portando in conto anche i casi di instabilità dinamica secondo quanto illustrato in Jalayer et al. (2017).

Si noti che, nella espressione precedente,  $\beta_{D,Dk}$  porta in conto solo la variabilità dell'input sismico (la cosiddetta *record-to-record variability*) così come ottenuto dalle analisi. Tuttavia, al fine di portare in conto altre sorgenti di incertezza, quali la variabilità intra- e inter-edificio, la variabilità associata alla definizione della metrica di danno ecc, alla quantità  $\beta_{D,Dk}$  sono stati sommati (secondo la regola della SRSS) altri due termini, uno riconducibile alla incertezza di capacità/modellazione ( $\beta_C$ ) e un altro relativo alla definizione delle soglie di danno ( $\beta_{DS}$ ). I valori di tali grandezze sono stati assunti dalla letteratura per tipologie coerenti con quelle esaminate (es. Kappos et al., 2010).

Maggiori informazioni sulla metodologia UniBAS sono riportate in Masi et al. (2022).

#### **4.3.3 EUCENTRE (Borzi): approccio meccanico-analitico**

Eucentre ha utilizzato la metodologia analitica SP-BELA (Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment, Borzi et al. 2008) per elaborare il modello di fragilità per gli edifici in CA. SP-BELA suddivide gli edifici in CA in edifici con progettazione gravitazionale ed edifici con progettazione sismica. Le due classi vengono assegnate in funzione del periodo di costruzione e dell'anno di classificazione sismica del comune a cui appartengono gli edifici. Le curve di fragilità sono ottenute confrontando la capacità di spostamento di edifici rappresentativi di un'intera classe con la domanda di spostamento per i diversi livelli di danno considerati. Il primo step della procedura consiste nella definizione di un campione di edifici attraverso una generazione Monte Carlo a partire da un prototipo di edificio che è rappresentativo dell'intera tipologia selezionata. Il campione di edifici viene generato considerando le caratteristiche del prototipo (dimensioni geometriche, carichi, proprietà dei materiali) come variabili random di assegnata distribuzione probabilistica. Il metodo integra un passo di progettazione simulata che porta alla definizione delle dimensioni e delle armature degli elementi strutturali. Il secondo step prevede l'analisi statica non lineare di ogni edificio



che consente di definire una curva pushover (PO) per un sistema equivalente ad un grado di libertà. La pushover descrive la capacità di spostamento dell'edificio. Nel terzo step della procedura la domanda di spostamento del terremoto è definita attraverso lo spettro in spostamento. Ad ogni valore di PGA per cui si vuole ottenere la curva di fragilità è possibile ancorare una forma spettrale in spostamento. Anche per la forma spettrale viene presa in conto una variabilità per considerare anche le incertezze legate all'input sismico. Infine, il quarto step prevede il confronto tra domanda e capacità. Se la domanda è superiore alla capacità significa che l'edificio non soddisfa la condizione limite, evolvendo nella condizione di danno più elevato. La procedura viene ripetuta per tutti gli edifici del campione: il numero di edifici per i quali la capacità è inferiore alla domanda diviso per la dimensione della popolazione del campione rappresenta la probabilità di superamento. Con la metodologia SP-BELA sono state prodotte curve di fragilità per i due stati limite identificabili numericamente: il danno severo e il collasso, considerati corrispondenti ai livelli di danno DS3 e DS4 della scala EMS98. Le curve per gli altri livelli di danno (DS1, DS2 e DS5) sono state ottenute mediante una procedura di "best fit" fra i dati di danno osservato di Da.D.O. e gli scenari di danno calcolati numericamente. I terremoti considerati nella calibrazione e validazione sono: L'Aquila 2009, Molise-Puglia 2002, Pollino 1998 e Irpinia 1980. I danni agli elementi non strutturali (tamponature e tramezzi) vengono presi in considerazione solo per la definizione dei livelli di danno DS1 e DS2. Relativamente al danno non strutturale, per i primi 3 terremoti citati è stata presa in considerazione la metrica del danno proposta da Del Gaudio et al. 2017 mentre per il terremoto dell'Irpinia si è considerata una metrica proposta da Eucentre (Figura 4.2).

	Danno EMS-98	Tamponature/tramezzi	
		Livello danno AeDES	Estens.
<ul style="list-style-type: none"> <li>L'Aquila 2009</li> <li>Molise-Puglia 2002</li> <li>Pollino 1998</li> </ul>	DS1	D1	<1/3
		D1	1/3-2/3
	DS2	D1	>2/3
		D2-D3	<1/3
		D2-D3	1/3-2/3
	DS3	D2-D3	>2/3
		D4-D5	<1/3
		D4-D5	1/3-2/3
		D4-D5	>2/3

	Danno EMS98	Livello danno tamponature/tramezzi scheda Irpinia
<ul style="list-style-type: none"> <li>Irpinia 1980</li> </ul>	DS0	D1
	DS1	D2-D3
	DS2	D4
	DS3	D5- D6- D7- D8

Figura 4.2 Metriche del danno considerate da Eucentre

La metodologia analitica SP-BELA implementa un passo di progettazione simulata ai sensi del DM 92 per la progettazione gravitazione e del DM 96 per la progettazione sismica. Il modello è quindi rappresentativo degli edifici più moderni. Tuttavia, poiché la progettazione

gravitazionale non ha subito sostanziali modifiche nel corso degli anni, è stato assunto che le curve ottenute per il CA gravitazionale possono essere estese anche agli edifici più vecchi. Le curve fornite sono quindi: A) per le classi di età dal 1981 in poi → CA e CA classificato sismicamente, B) per le classi di età precedenti al 1981 → CA (non classificato sismicamente).

#### **4.3.4 UNINA-PV (Verderame-Penna): approccio empirico-osservazionale**

Il modello di vulnerabilità per gli edifici in cemento armato (CA), sviluppato in collaborazione tra i gruppi di ricerca dell'Università di Napoli Federico II e dell'Università di Pavia, è ottenuto su base empirica, elaborando statisticamente i dati di danno post-terremoto disponibili nella piattaforma di danno osservato Da.D.O. (Dolce et al. 2019). Analogamente al modello di vulnerabilità UniNA-UniPV 2018 (Rosti et al. 2021b), si sono considerati i database di danno post-terremoto relativi agli eventi sismici di Irpinia (1980) e L'Aquila (2009). Per tener conto dell'evidenza negativa del danno, i dati di danno post-terremoto sono stati successivamente integrati e completati dal dato ISTAT, assumendo che gli edifici non rilevati, siti nei comuni meno affetti dallo scuotimento sismico, fossero non danneggiati. Rispetto al modello di vulnerabilità UniNA-UniPV 2018, lo scuotimento sismico è stato caratterizzato mediante la PGA stimata da shakemaps INGV aggiornate (Michellini et al. 2020). Si sono identificate 24 tipologie edilizie sulla base del livello di progettazione sismica (i.e. edifici progettati per soli carichi gravitazionali, per carichi sismici pre-1980 e post-1980), epoca di costruzione (i.e. 1946-70; 1971-80; 1981-90 e >1990) e numero di piani (i.e. 1, 2, 3,  $\geq 4$  piani):

- Edifici progettati per soli carichi verticali nel periodo 1946-1970 a 1, 2, 3 e  $\geq 4$  piani
- Edifici progettati per soli carichi verticali nel periodo 1971-1980 a 1, 2, 3 e  $\geq 4$  piani
- Edifici in comuni classificati in zona sismica nel periodo 1946-1970 a 1, 2, 3 e  $\geq 4$  piani
- Edifici in comuni classificati in zona sismica nel periodo 1971-1980 a 1, 2, 3 e  $\geq 4$  piani
- Edifici con progettazione sismica costruiti nel periodo 1981-1990 a 1, 2, 3 e  $\geq 4$  piani
- Edifici con progettazione sismica costruiti dopo il 1990 a 1, 2, 3 e  $\geq 4$  piani

Per ciascuna tipologia edilizia, si sono derivate curve di fragilità empiriche, definite per cinque livelli di danno della EMS-98 (Grünthal et al. 1998), tenendo opportunamente conto del danno osservato sia su componenti strutturali che non strutturali (Rosti et al. 2021b). I dati di danno empirici sono stati approssimati utilizzando la distribuzione log-normale, imposta mediante il metodo della massima verosimiglianza, considerando un unico valore di dispersione ( $\beta$ ) per livello di progettazione, epoca, numero di piani e livello di danno. Per ogni soglia di PGA, la ripartizione degli edifici nei diversi stati di danno è stata descritta dal modello multinomiale.

Sono state proposte due procedure:

- la prima definita “EA – empirica approssimata”. I risultati ottenuti hanno evidenziato la tendenza alla riduzione della vulnerabilità con il livello di progettazione e l’epoca di costruzione e al suo incremento al crescere del numero di piani. Al fine di correggere eventuali “anomalie” nei risultati, dovute al numero di dati talvolta limitato o al fatto che non tutte le tipologie edilizie sono adeguatamente popolate, i valori mediani di PGA, ottenuti empiricamente a partire dai parametri delle curve ricavate dall’applicazione della procedura 2018, sono stati approssimati introducendo, livello di danno per livello di danno, un modello lineare, funzione del livello di progettazione/epoca e numero di piani. Per ogni DS, i valori mediani di PGA, ottenuti dal fitting 2D, hanno consentito di garantire il rispetto delle gerarchie attese tra i diversi set di curve di fragilità;
- la seconda definita “EC - empirica corretta”. Al contrario, la soluzione del problema è stata ottenuta attraverso un processo di ottimizzazione non lineare, ricercando il minimo della funzione verosimiglianza multivariata prescelta, in funzione dei 120 valori della media logaritmica, caratteristici delle 24 classi tipologiche per i 5 DSs, e il valore di deviazione standard logaritmica, comune a tutte le classi. Nel processo di ottimizzazione non lineare vengono imposti 306 vincoli lineari che impongono (laddove necessario) il rispetto delle gerarchie (ad es. che la vulnerabilità non diminuisca al crescere del numero di piani) osservate dall’analisi critica dei risultati ottenuti in assenza di vincoli. Operativamente tali vincoli vengono introdotti attraverso una matrice  $A$  di dimensioni  $M$  (pari al numero di vincoli = 306) x  $N$  (pari al numero di variabili = 120 valori di media logaritmica + 1 valore di deviazione standard logaritmica). Tale circostanza si traduce quindi nel seguente sistema di disequazioni lineari  $A \cdot x \leq b$  in cui  $x$  è il vettore contenente i parametri incogniti e  $b$  il vettore dei termini noti. L’approccio adottato permette quindi alla soluzione del problema non lineare di effettuare una correzione automatica di eventuali “anomalie” nei risultati, dovute al numero di dati talvolta limitato o al fatto che non tutte le tipologie edilizie sono adeguatamente popolate, imponendo, laddove necessario, una disequazione tra i parametri di classi contigue secondo le macro-tendenze osservate.

Ai fini delle valutazioni di rischio sismico a scala nazionale, per le epoche pre-1946, si considerano le curve di fragilità relative agli edifici in CA gravitazionale del periodo 1946-70. Agli edifici in CA progettati per soli carichi verticali post-1980 sono state attribuite le curve di fragilità per edifici gravitazionali del periodo 1971-1980.

#### **4.3.5 UNINA (Verderame): approccio meccanico-analitico**

Il modello di vulnerabilità per gli edifici in cemento armato (CA), sviluppato dall'UR-UNINAa (Verderame) dell'Università di Napoli Federico II, è basato sul modello analitico semplificato POST (PushOver on Shear Type models) sviluppato in Del Gaudio et al., (2015-2016-2017a-2018). La metodologia è sviluppata in ambiente Matlab attraverso uno script stand-alone che restituisce il modello geometrico-strutturale dell'edificio. Quest'ultimo è ottenuto attraverso una procedura di progettazione simulata che considera le differenti Norme Tecniche emanate nel corso degli anni, nonché l'evoluzione della progettazione sismica, distinguendo tra progettazione per soli carichi gravitazionali e progettazione sismica (Verderame et al., 2010). Il comportamento non lineare dell'edificio è sintetizzato attraverso la curva di PushOver (PO) effettuato lungo le due direzioni dell'edificio. Essa viene ottenuta in forma chiusa nello script Matlab a partire dal comportamento non lineare degli elementi strutturali verticali attraverso un modello a quattro rami (due crescenti e due degradanti) sia per i pilastri (Di Domenico et al., 2020) che per le tamponature (Panagiotakos and Fardis, 1996). A tal riguardo, si evidenzia la maggiore semplificazione dell'approccio, che trascurando il contributo deformativo offerto dalle travi, assume che tutti i pilastri di un piano (assunti con comportamento shear-type) agiscano in parallelo con le tamponature esterne, definendo una curva taglio di piano-spostamento di interpiano. Assumendo una distribuzione di forze laterali proporzionali al primo modo di vibrazione dell'edificio, viene quindi valutata la curva PO a partire dalle precedenti relazioni taglio di piano-spostamento di interpiano.

La valutazione della capacità sismica dell'edificio per un dato stato di danno (DS) viene effettuata in corrispondenza di soglie di spostamento di interpiano definite a livello di singolo elemento (sia per le tamponature che per i pilastri) sulla base della classificazione della scala macrosismica EMS98. L'attingimento, al generico piano, della soglia di spostamento di interpiano di un dato DS (valutata come la minima tra la soglia delle tamponature e dei pilastri) definisce il punto di capacità sulla curva PO. L'adozione di un sistema SDOF equivalente al sistema reale consente la valutazione della curva di risposta del sistema SDOF a partire dalla curva PO del sistema reale. Il valore della ordinata spettrale elastica  $S_{a,e}(T)$ , corrispondente all'attingimento di un dato DS, viene quindi desunta dalla curva IDA ottenuta attraverso il tool SPO2IDA (Vamvatsikos and Cornell, 2006) in funzione della curva di risposta (multi-linearizzata) rappresentativa del comportamento del sistema SDOF. L'adozione, infine, di una adeguata forma spettrale consente di definire la capacità sismica in termini di PGA. La PGA capace, per un dato DS, è intesa come la minima tra le due direzioni dell'edificio. La procedura

viene reiterata nell'ambito di un approccio di simulazione Montecarlo introducendo l'incertezza nella stima dei parametri per sei famiglie di variabili:

- parametri geometrici (dimensioni in pianta e rapporto di forma correlati al numero di piani);
- resistenze dei materiali, calcestruzzo, acciaio e tamponatura, valutate in funzione del tempo sulla base di quanto riportato in Masi et al. 2019, Ricci et al. 2011, Del Gaudio et al. 2018, rispettivamente;
- modelli di capacità (punti caratteristici della curva di risposta degli elementi) secondo quanto riportato in Di Domenico et al., 2020 e Panagiotakos and Fardis, 1996;
- soglie di danno a livello di elemento (intese spostamenti di interpiano di attingimento di un dato DS) secondo quanto riportato in Del Gaudio et al. 2019a;
- forma spettrale (valutata in termini normativi, mediando su tutti i Comuni italiani dopo aver assegnato a ciascuno di essi la categoria di sottosuolo predominante (Forte et al., 2019; Mori et al., 2020), in funzione del periodo di ritorno;
- incertezza record-to-record (ovvero valutando l'incertezza di  $R_{\mu}$  dato  $\mu$ ).

La distribuzione dei valori di PGA per i 5 DSs considerati, ottenuti attraverso l'approccio di simulazione Montecarlo, approssimati attraverso una funzione di distribuzione cumulata permettono quindi di ottenere le curve di fragilità per la classe considerata. Il modello di vulnerabilità sviluppato ha permesso di identificare 32 tipologie edilizie sulla base:

- del livello di progettazione sismica (per soli carichi gravitazionali e per carichi sismici);
- dell'epoca di costruzione (i.e. 1946-70; 1971-80; 1981-90 e >1990);
- del numero di piani (i.e. 1, 2, 3,  $\geq 4$  piani).

Ai fini delle valutazioni di rischio a scala nazionale, per le epoche pre-1946, si considerano in via semplificata le curve di fragilità degli edifici in CA gravitazionali del periodo 1946-70.

#### **4.3.6 UNIPR-SA (Belletti-Martinelli): approccio numerico-numerico**

Le attività di ricerca delle UR dell'Università di Parma e dell'Università di Salerno sono state finalizzate alla produzione di curve di fragilità per edifici a nucleo e/o a pareti in ca (sub tipologia A – setti o nuclei associati a telai, con numero di piani  $> 3$ ) mediante l'uso di un modello meccanico-numerico basato sull'esecuzione di analisi pushover (PO) non lineari. Il modello è stato sviluppato per un edificio prototipo, a telaio con nucleo interno in c.a., avente 6 piani fuori terra e progettato per soli carichi verticali. L'edificio può ritenersi rappresentativo

di edifici medio-alti progettati a partire dagli anni '70 in assenza di prescrizioni antisismiche (pre/low code). Le analisi sono state ripetute con riferimento a diverse ipotesi (telaio pendolare/collaborante; diversa definizione degli EDPs, assenza/presenza di tamponamenti); le curve di fragilità qui presentate sono relative al caso di struttura priva di tamponamenti, considerando la collaborazione del telaio. Le analisi sono state condotte su un modello tridimensionale agli elementi finiti dell'edificio. Le travi e i pilastri del telaio sono stati rappresentati con elementi beam, a cui è stato attribuito un legame momento-curvatura non lineare, mentre le pareti del nucleo sono state modellate con elementi shell, mettendo in conto gli aspetti della non linearità meccanica mediante il modello PARC\_CL\_2.1 (basato su una formulazione "total strain" di tipo smeared a fessura fissa). Le curve di fragilità, in termini di PGA, sono state ricavate mediante una procedura numerica basata sull'analisi statica incrementale, a partire dai risultati delle analisi pushover (con indicazione dei livelli di danno considerati), e con riferimento ai 125 accelerogrammi spettro-compatibili forniti dal Task 4.2 del WP4 per suolo di categoria A (roccia). La definizione dei livelli di danno ha previsto un controllo sia sul raggiungimento di deformazioni "limite" nei materiali della parete (calcestruzzo e acciaio), che sul raggiungimento di valori limite della rotazione alla corda nei pilastri (avendo escluso l'occorrenza anticipata di rotture fragili), secondo il seguente schema:





Livelli di danno	1	2	3	4
Definizione EMS-98				
	SD = nullo NSD = leggero	SD = leggero NSD = moderato	SD = moderato NSD = grave	SD = grave NSD = molto grave Distruzione grave
EDPs				
pareti	$\epsilon_c = \epsilon_{cracking}$ (fessurazione)	$ \epsilon_c  = 3.5\%$ (copriferro)	$ \epsilon_c  = 3.5\%$ (calcestruzzo confinato)	$ \epsilon_c  = 3.5\%$ (calcestruzzo confinato)
pilastri	-	$\epsilon_s = \epsilon_y$ $\theta = \theta_y$	$\epsilon_s = 1\%$ $\theta = \frac{3}{4} \theta_u$	Instabilità/collasso armature longitudinali $\theta = \theta_u$

Figura 4.3 Definizione dei livelli di danno

I valori di mediana e dispersione per i vari livelli di danno sono i seguenti:

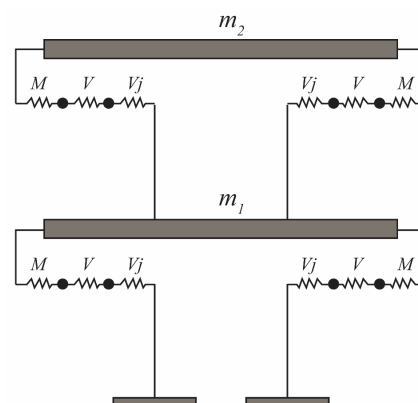
	D1	D2	D3	D4
<b>Mediana (g)</b>	0.05	0.09	0.23	0.26
<b>Deviazione standard (g)</b>	0.40	0.42	0.43	0.45

Tabella 4.3 Valori di mediane e dispersione

La verifica dell'attendibilità del modello è stata effettuata mediante confronto con alcune curve di fragilità reperibili in letteratura e riferite ad edifici con caratteristiche "compatibili" con quello considerato (almeno in termini di numero di piani, materiale e tipo di progettazione).

#### 4.3.7 UNIRM1a (Monti): approccio meccanico-numeric

Le curve di fragilità per gli edifici in CA proposte dall'UR-UNIRM1a sono state ottenute da un metodo di analisi pushover (PO) (Rahmat et al., 2021), sviluppato per applicazioni ad edifici rappresentabili da un telaio 2D, come spesso accade quando si analizza la risposta di un ampio patrimonio edilizio. Un telaio 2D è considerato come un sistema in serie di piani, che sono a loro volta sistemi in parallelo di pilastri, che a loro volta sono sistemi in serie di diversi meccanismi resistenti. Un'ideale schematizzazione di un telaio 2D a due piani è illustrata in Figura 4.4, dove ogni pilastro è mostrato come un sistema in serie di capacità flessionale ( $M$ ) e di taglio, sia del pilastro ( $V$ ) che del nodo ( $V_j$ ). Si presume che le travi rimangano elastiche, rappresentando la situazione di trave forte/pilastro debole che si trova tipicamente nella maggior parte degli edifici esistenti.



**Figura 4.4** Idealizzazione meccanica di un esempio di telaio 2D a una campata a due piani (trave forte/pilastro debole), in cui in ciascun pilastro vengono considerati tre meccanismi resistenti: flessione ( $M$ ), taglio ( $V$ ) e taglio del nodo ( $V_j$ )

La capacità globale del telaio 2D si ottiene in termini di taglio totale della base e spostamento in testa. Questo è definito da una curva trilineare, in cui sono identificati tre Stati Limite (LS): Stato Limite di Danno (DLS), Stato Limite di Salvaguardia della vita (LLS) e Stato Limite di Collasso (CLS). Gli LS globali sono una diretta conseguenza degli LS locali raggiunti a livello di sezioni. Questo criterio fornisce una relazione tra LS locali e globali, evitando così di ricorrere a metriche diverse (ad esempio, lo spostamento interpiano). Tabella 4.4 mostra un confronto tra le metriche del danno e gli stati limiti adottati in questo approccio.



HRC	HAZUS99	Vision2000	ATC-13	EMS-98		Stato limite
				Livello	Stato di danno	
lieve	leggero	com. operativo	lieve	liv. 1		
leggero		operativo	leggero	liv. 2	DS1	DLS
moderato	moderato	salvaguardia vita	moderato	liv. 3	DS2	LLS
esteso	esteso		grave			
coll. parziale			coll. parziale	molto grave	liv. 4	DS3
collasso		collasso	DS4			

**Tabella 4.4 Confronto tra le varie metriche di danno e gli stati limite considerati in questo studio**

Le tipologie di telaio considerate in questo studio sono classificate in base al numero di piani, da 1 a 5, e quindi sotto classificate in base al numero di campate e alle lunghezze delle campate come indicato nella Tabella 4.5. Per ciascuna tipologia di telaio, sono state considerate due sotto tipologie, che rappresentano due diversi periodi di costruzione, 1991-2000 denotate come “nuove”, e 1961-1970 denotate come “vecchie”. Ogni sotto tipologia è caratterizzata da un diverso range di proprietà dei materiali (resistenza del calcestruzzo e dell’acciaio), di armatura a taglio (passo e diametro delle staffe) e di armatura a flessione (Tabella 4.6).

		2 campate		3 campate		
		Tip. 1	Tip. 2	Tip. 3	Tip. 4	Tip. 5
<b>L = 8 m</b>	L <sub>1</sub> /L	0.50	0.30			
	L <sub>2</sub> /L	0.50	0.70			
<b>L = 10 m</b>	L <sub>1</sub> /L			0.33	0.25	0.25
	L <sub>2</sub> /L			0.33	0.50	0.25
	L <sub>3</sub> /L			0.33	0.25	0.50
<b>L = 12 m</b>	L <sub>1</sub> L			0.33	0.25	0.25
	L <sub>2</sub> /L			0.33	0.50	0.25
	L <sub>3</sub> /L			0.33	0.25	0.50

**Tabella 4.5 Parametri geometrici delle tipologie considerate**

	Resistenza mediana calcestruzzo $f_{cm}$ (MPa)	Resistenza mediana acciaio $f_{ym}$ (MPa)	Diametro Staffe $\Phi_{st}$ (mm)	Passo staffe $s_{st}$ (mm)	Armatura a flessione $A_s$ (%)
1991-2000 “nuove”	18-28	300-500	8-10	150-250	0.75-1.25
1961-1970 “vecchie”	14-20	220-370	6-8	200-300	0.65-1.00
Distribuzione	uniforme	uniforme	discreta	discreta	discreta

**Tabella 4.6 Proprietà dei materiali e armatura per le due sotto tipologie considerate**

Il metodo di analisi pushover semplificato proposto è stato convalidato attraverso la sua applicazione su tre diversi telai in CA e successivamente confrontato con i risultati ottenuti da una rigorosa analisi statica non lineare.



#### 4.4 Confronto tra i modelli “originali”

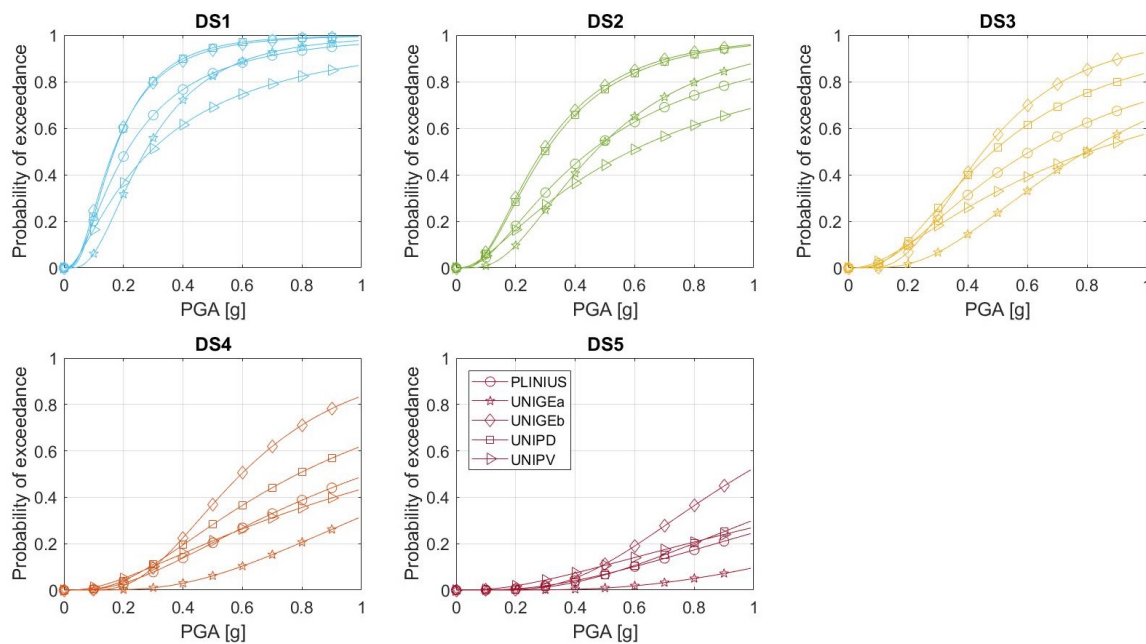
Nel presente paragrafo si riporta un confronto tra i modelli di fragilità a scala nazionale in termini di valori mediani e beta associati alle tipologie edilizie secondo l’ISTAT 2011. La Tabella 4.7 riporta le 10 UR (5 per M e 5 per CA) che hanno sviluppato un modello di fragilità a scala nazionale utilizzato per la predisposizione delle mappe di rischio sismico. In particolare si osserva che sia per la muratura (Tabella 4.1) che per il cemento armato (Tabella 4.2) sono disponibili 5 modelli di tipologie diversificati (per M: euristico-macrosismico, empirico-osservazionale, ibrido, meccanico-analitico e meccanico-numeric; per CA: euristico-macrosismico, empirico-osservazionale, meccanico-analitico e meccanico-numeric). L’analisi comparativa permette di valutare la sensitività dei modelli proposti dalle UR rispetto ai parametri di vulnerabilità considerati (età di costruzione, livello di progettazione e numero di piani).

UR – RESPONSABILI (M)	UR – RESPONSABILI (CA)
UNIGEd – Lagomarsino	UNIGE – Lagomarsino
UNIPD – Da Porto	UNIBAS – Masi
PLINIUS – Zuccaro	EUCENTRE - Borzi
UNIPV – Penna	UNINA – Verderame
UNIGEd – Cattari	UNINA-PV – Verderame/Penna

Tabella 4.7 UR (5 M e 5 CA) che hanno sviluppato un modello di fragilità a scala nazionale utilizzato per la predisposizione delle mappe di rischio

##### 4.4.1 Edifici in muratura

Nel presente paragrafo si riporta un confronto tra i cinque modelli di fragilità per gli edifici in muratura (M) utilizzati per la predisposizione delle mappe di rischio sismico 2021. Figura 4.5 mostra a titolo esemplificativo un confronto tra i modelli di fragilità per i cinque livelli di danno EMS-98 relativi alla tipologia in M progettata a soli carichi verticali (GLD) con numero di piani ( $N_p$ ) pari a 3 ed età di costruzione compresa tra ‘71-80.

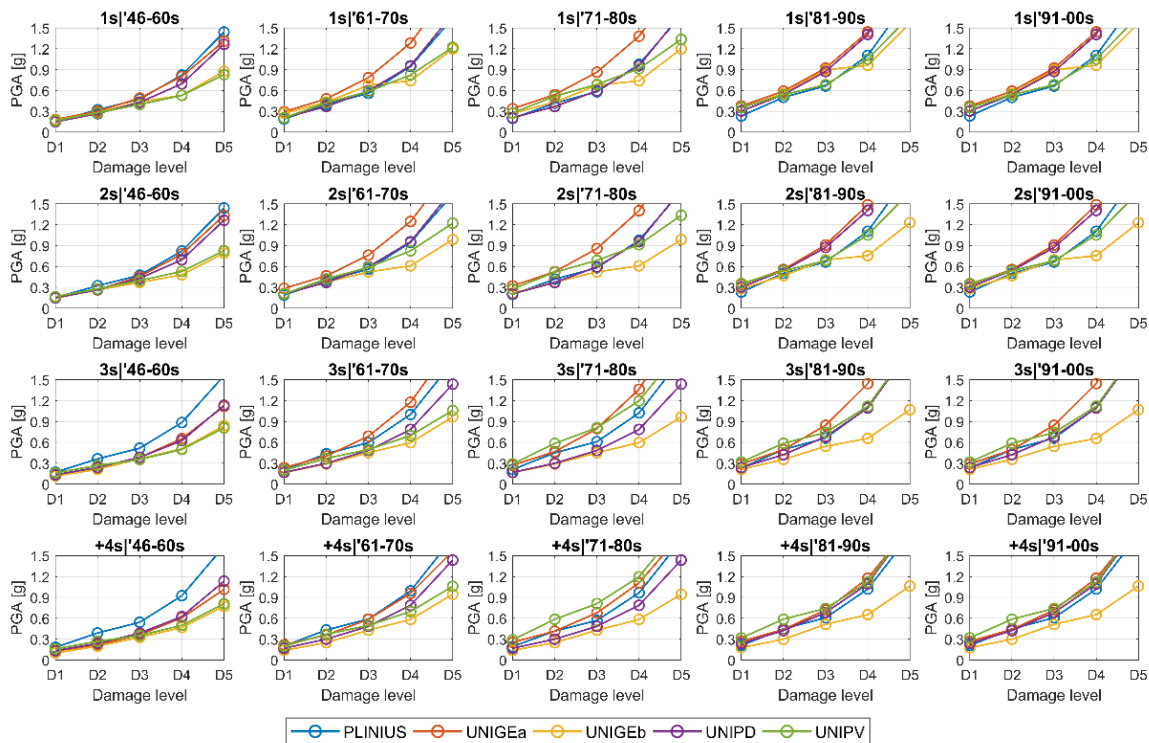


**Figura 4.5 Confronto fra i modelli di fragilità per le tipologie GLD in muratura con 3 piani in elevazione appartenenti all'epoca '71-80**

All'aumentare del livello di danno (da D1 a D5), le curve piegano verso l'asse delle ascisse con un aumento significativo dei valori mediani. Le differenze tra i modelli crescono per i livelli di danno più severi. Per la tipologia GLD considerata, per il livello di danno D5 (grafico in basso al centro), il valore mediano di PGA più basso è osservato per il modello proposto da UNIGEB (dunque il più fragile) mentre il modello UNIGEA è quello meno fragile. Figura 4.6 riporta il confronto dei modelli in termini di valori mediani di PGA per i 5 livelli di danno EMS-98 al variare del numero di piani (lungo le righe) e dell'età di costruzione (lungo le colonne). In ogni grafico, i valori mediani di PGA (in g) sono riportati lungo l'asse delle ordinate mentre i livelli di danno (da D1 a D5) lungo l'asse delle ascisse. Analizzando una singola riga (fissato quindi il numero di piani), è possibile osservare il trend dei valori mediani al variare dell'età di costruzione. Al contrario, analizzando una singola colonna (fissata dunque l'età di costruzione), si osservano le differenze al variare del numero di piani. In generale, i valori mediani aumentano con l'età di costruzione e diminuiscono con il numero di piani. Il modello proposto da UNIGEB presenta una maggiore fragilità, in particolare per i livelli di danno più severi (D4 e D5).

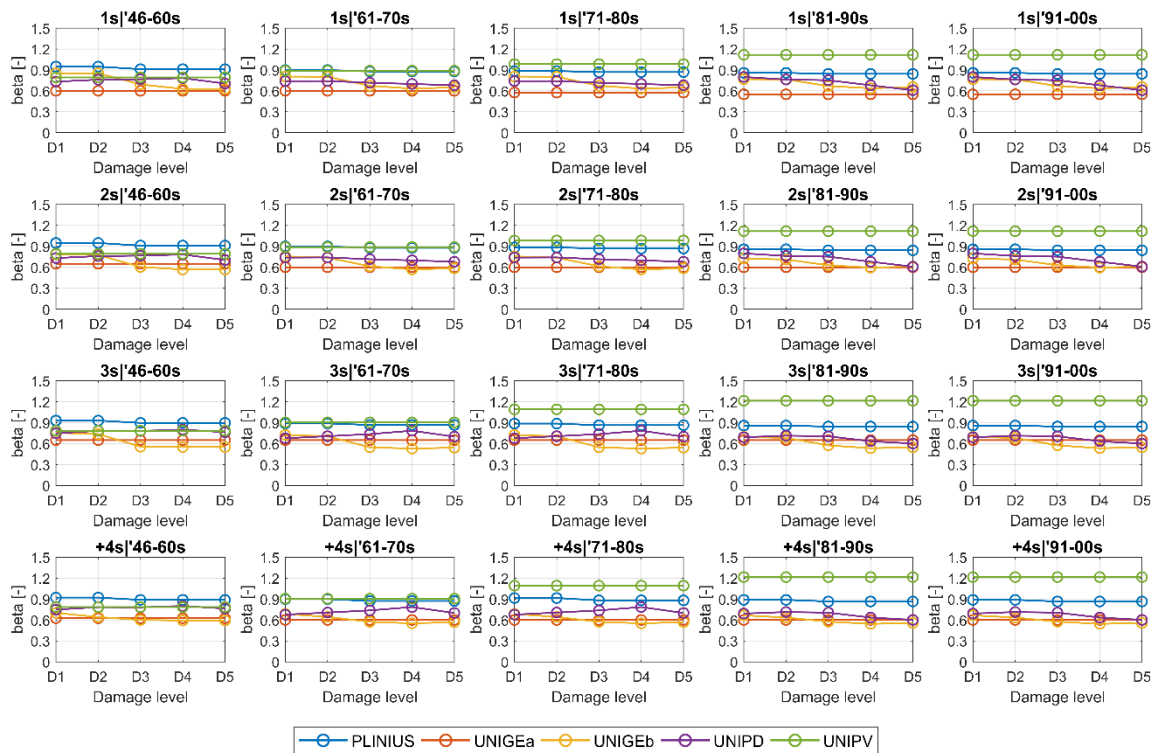
La Figura 4.7 mostra il confronto dei modelli in termini di dispersione per i 5 livelli di danno EMS-98 al variare del numero di piani (lungo le righe) e dell'età di costruzione (lungo le colonne). I valori di dispersione proposti da UNIGEA e UNIPV sono costanti al variare del livello di danno mentre i valori proposti da UNIGEB, PLINIUS e UNIPD variano leggermente.

I valori sono compresi nel range 0.5-1.2 al variare dell'età di costruzione e del numero di piani. I valori più alti sono proposti da UNIPV per le tipologie costruite dopo il 1960 e da PLINIUS per quelle costruite prima del 1960. Al contrario, i modelli di UNIGEA e UNIGEB presentano valori di dispersione più bassi. Valori molto simili si osservano per le tipologie ERD.

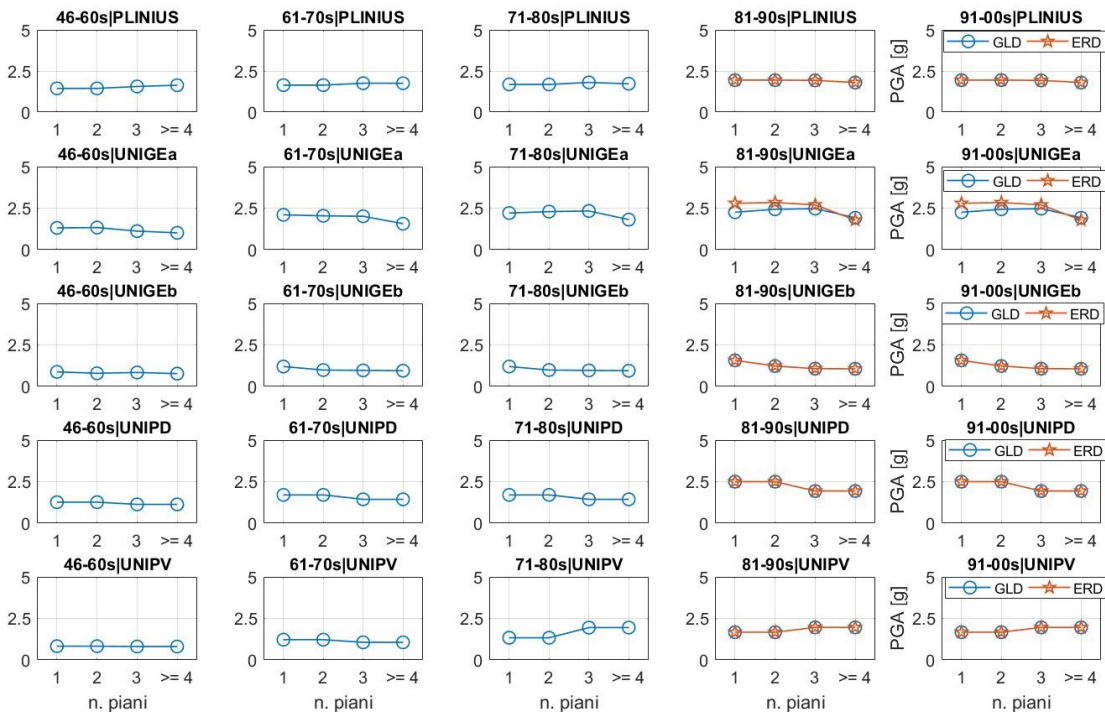


**Figura 4.6** Confronto in termini di PGA mediana relativi ai modelli di fragilità per le tipologie in muratura. A parità di colonna, il numero di piani cresce andando dall'alto (1 piano) al basso (4+ piani). A parità di riga, l'epoca di costruzione varia dagli anni '46-60 (a sinistra) a '91-00 (a destra)

Figura 4.8 riporta il confronto dei valori mediani relativi alle corrispondenti tipologie GLD (progettazione a soli carichi verticali) e ERD (progettazione antisismica) dei modelli proposti dalle 5 UR (lungo le righe). In ogni grafico, i valori mediani di PGA sono riportati lungo l'asse delle ordinate mentre il numero di piani (da 1 a  $\geq 4$ ) lungo l'asse delle ascisse. Analizzando una singola riga (dunque un singolo modello), si osserva il trend dei valori mediani al variare dell'età di costruzione. Al contrario, analizzando una singola colonna (fissata dunque l'età di costruzione), si osservano le differenze GLD-ERD tra i diversi modelli. La progettazione antisismica per gli edifici in M è stata considerata a partire dall'epoca di costruzione '81-90. I valori sono pressoché identici per tutti i modelli, tranne per il modello proposto da UNIGEA.



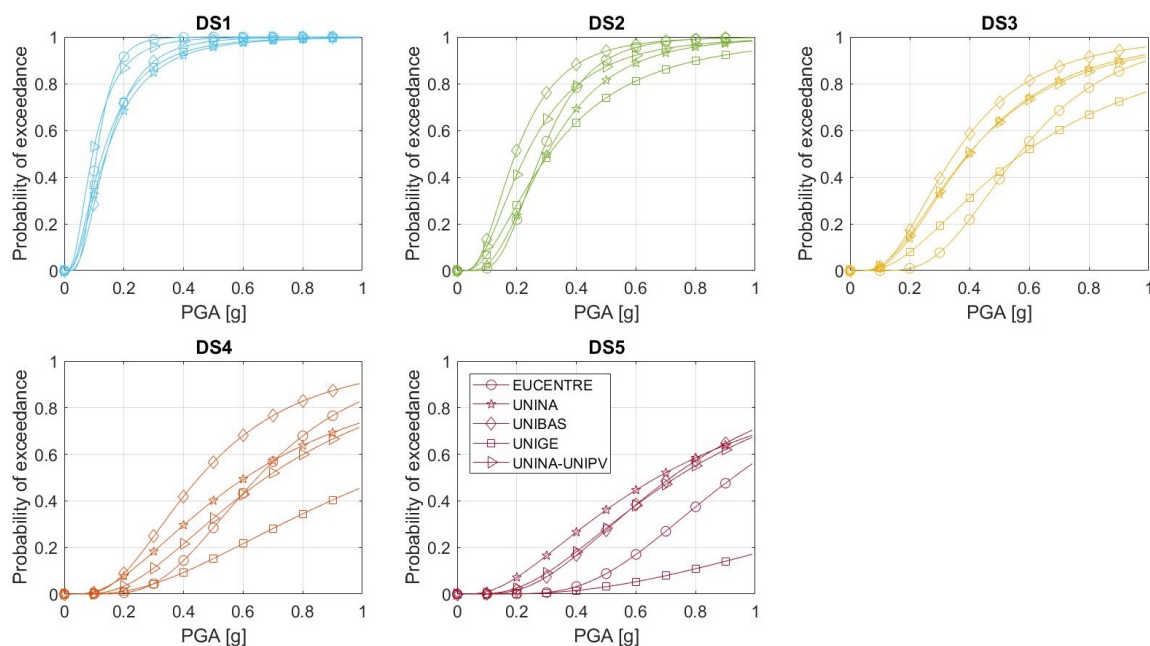
**Figura 4.7** Confronto in termini di dispersione (beta) relativi ai modelli di fragilità per le tipologie in muratura. A parità di colonna, il numero di piani cresce andando dall'alto (1 piano) al basso (4+ piani). A parità di riga, l'epoca di costruzione varia dagli anni '46-60 (a sinistra) a '91-00 (a destra)



**Figura 4.8** Confronto in termini di PGA mediana per le tipologie GLD e ERD in muratura. A parità di riga, l'epoca di costruzione varia dagli anni '46-60 (a sinistra) a '91-00 (a destra)

#### 4.4.2 Edifici in cemento armato

Nel presente paragrafo si riporta un confronto tra i cinque modelli di fragilità per gli edifici in CA utilizzati per la predisposizione delle mappe di rischio sismico 2021. Figura 4.9 mostra a titolo esemplificativo un confronto tra i modelli di fragilità per i cinque livelli di danno EMS-98 relativi alla tipologia in CA progettata a soli carichi verticali (GLD) con numero di piani ( $N_p$ ) pari a 3 ed età di costruzione compresa tra '71-80.

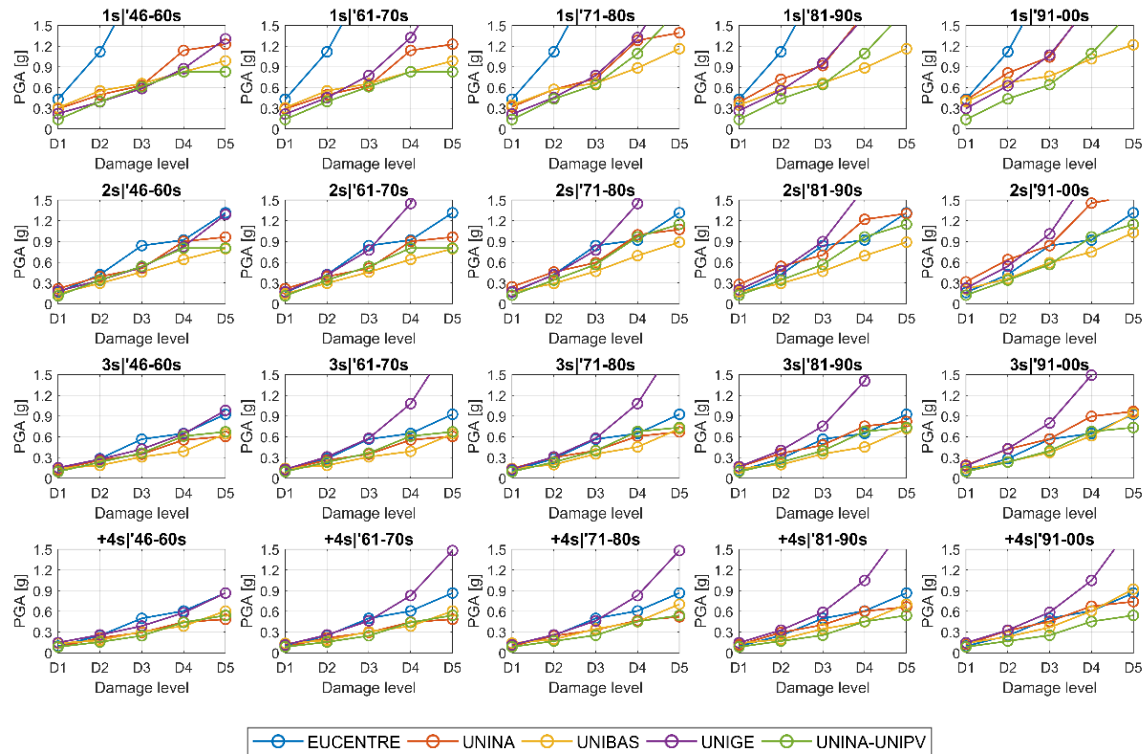


**Figura 4.9 Confronto fra i modelli di fragilità per le tipologie GLD in muratura con 3 piani in elevazione appartenenti all'epoca '71-80**

Dalla Figura 4.9, si evince che, all'aumentare del livello di danno (da D1 a D5), le curve piegano verso l'asse delle ascisse con un aumento sia dei valori mediani di PGA sia dei valori di dispersione. Le differenze tra i modelli crescono per i livelli di danno più severi (D4 e D5). Considerando il grafico per il livello di danno D5 (in basso al centro), il valore medio di PGA più alto è osservato per il modello proposto da UNIGE (dunque il meno fragile) mentre il modello UNINA è quello più fragile. Figura 4.10 riporta il confronto dei modelli in termini di valori mediani di PGA per i 5 livelli di danno EMS-98 al variare del numero di piani (lungo le righe) e dell'età di costruzione (lungo le colonne). In ogni grafico, i valori mediani di PGA (in g) sono riportati lungo l'asse delle ordinate mentre i livelli di danno (da D1 a D5) lungo l'asse delle ascisse. Analizzando una singola riga (fissato quindi il numero di piani), è possibile osservare il trend dei valori mediani al variare dell'età di costruzione. Al contrario, analizzando

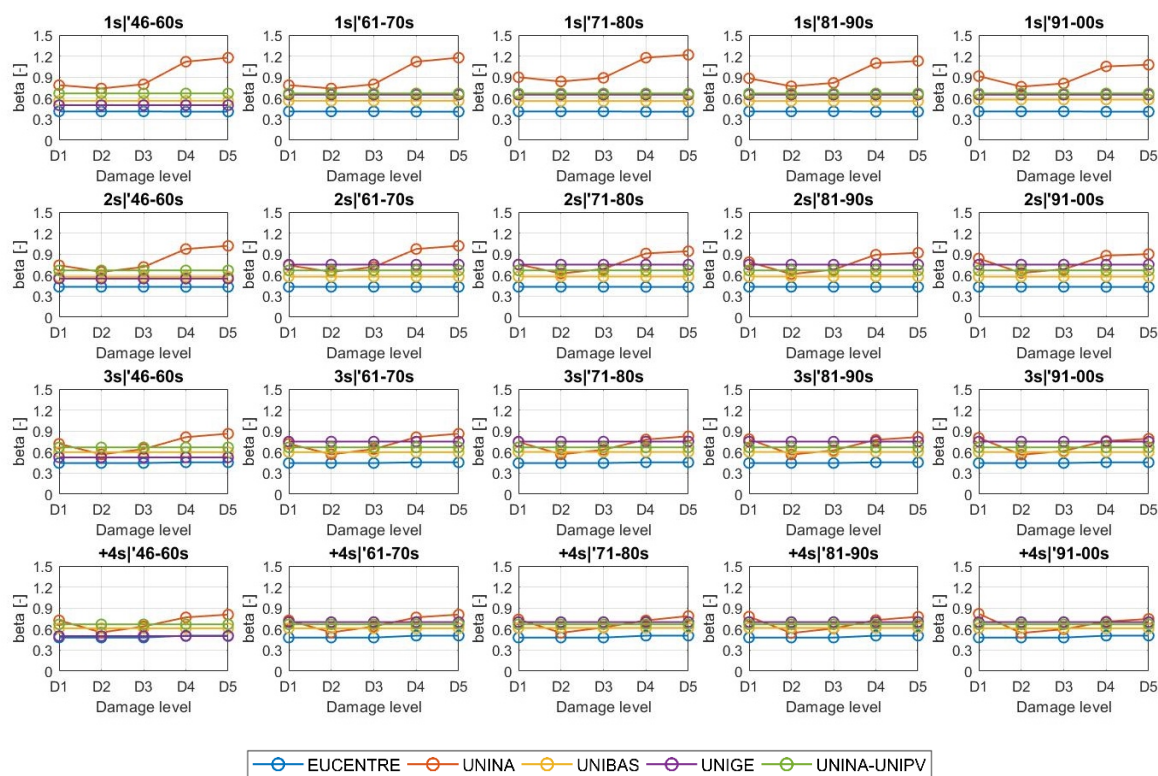


una singola colonna (fissata dunque l'età di costruzione), si osservano le differenze al variare del numero di piani.



**Figura 4.10** Confronto in termini di PGA mediana relative ai modelli di fragilità per le tipologie in C.A. A parità di colonna, il numero di piani cresce andando dall'alto (1 piano) al basso (4+ piani). A parità di riga, l'epoca di costruzione varia dagli anni '46-60 (a sinistra) a '91-00 (a destra)

Per gli edifici bassi ( $N_p=1-2$ ), limitate differenze si rilevano al variare dell'età di costruzione. Questo è dovuto principalmente alla progettazione vincolata dai minimi normativi. Il modello proposto da EUCENTRE presenta i valori più alti per le tipologie con  $N_p=1$ . All'aumentare dell'età di costruzione, i valori proposti da UNINA e UNIGE sono molto variabili mentre quelli di UNIBAS e UNINA-PV mostrano limitata variabilità. Al contrario, si ha complessivamente una riduzione notevole dei valori mediani (e dunque un aumento della fragilità) all'aumentare del numero di piani per tutti i livelli di danno. I modelli in CA proposti presentano una maggiore sensibilità della fragilità al variare del numero di piani. Figura 4.11 mostra il confronto dei modelli in termini di dispersione per i 5 livelli di danno al variare del numero di piani (lungo le righe) e dell'età di costruzione (lungo le colonne).



**Figura 4.11** Confronto in termini di dispersione ( $\beta$ ) relativi ai modelli di fragilità per le tipologie in C.A. A parità di colonna, il numero di piani cresce andando dall'alto (1 piano) al basso (4+ piani). A parità di riga, l'epoca di costruzione varia dagli anni '46-60 (a sinistra) a '91-00 (a destra)

Tutti i modelli, tranne quello proposto da UNINA, propongono valori di dispersione costanti al variare del livello di danno. EUCENTRE propone valori costanti anche al variare del numero di piani e dell'età di costruzione. Dalla Figura 4.11, si osservano differenze minime sia al variare del numero di piani sia dell'età di costruzione. I valori proposti dalle diverse UR sono simili (tra 0.55 a 0.65) in particolare per gli edifici più alti. I valori di dispersione si riducono leggermente per le tipologie ERD. Infine, Figura 4.12 riporta il confronto dei valori mediани relativi alle corrispondenti tipologie GLD (progettazione a soli carichi verticali) e ERD (progettazione antisismica) dei modelli proposti dalle 5 UR (lungo le righe). In ogni grafico, i valori mediани di PGA sono riportati lungo l'asse delle ordinate mentre il numero di piani (da 1 a  $\geq 4$ ) lungo l'asse delle ascisse. Analizzando una singola riga (dunque un singolo modello), si osserva il trend dei valori mediани al variare dell'età di costruzione. Al contrario, analizzando una singola colonna (fissata dunque l'età di costruzione), si osservano le differenze GLD-ERD tra i diversi modelli. Le differenze sono limitate per i modelli proposti da EUCENTRE, UNINA e UNIBAS mentre sono significative per i modelli UNIGE e UNINA-PV, soprattutto al crescere dell'età di costruzione.

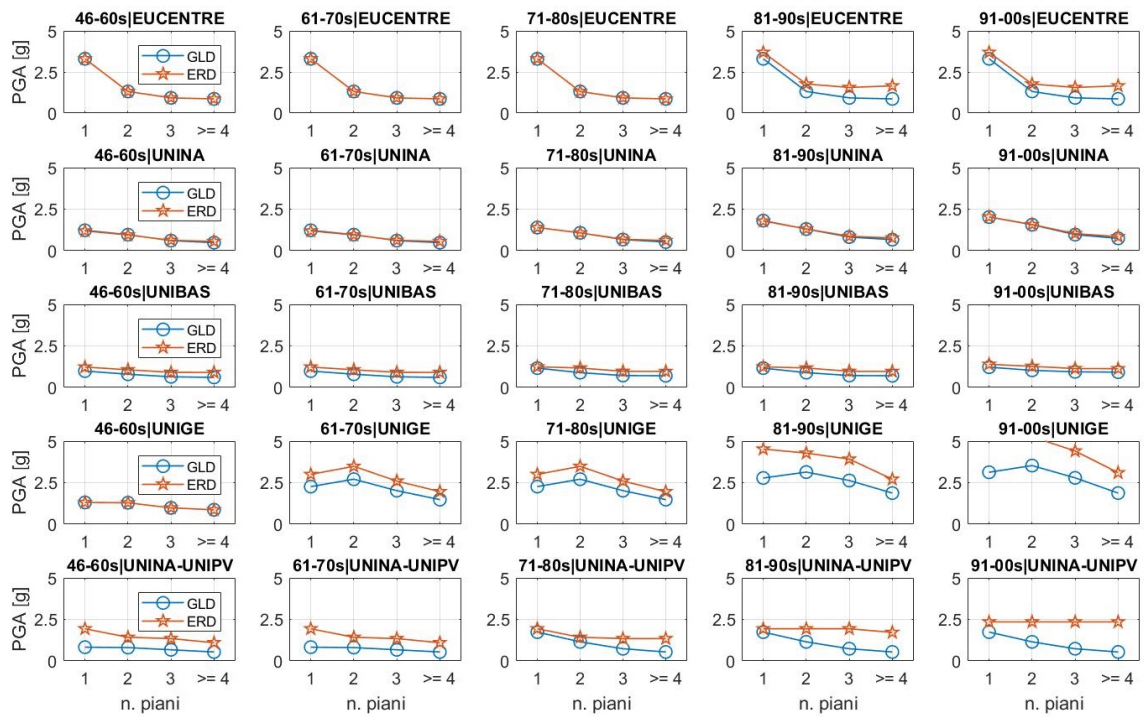


Figura 4.12 Confronto in termini di PGA mediana per le tipologie GLD e ERD in C.A. A parità di riga, l'epoca di costruzione varia dagli anni '46-60 (a sinistra) a '91-00 (a destra)



## 5 IL MODELLO DI VULNERABILITÀ MARS

### 5.1 Descrizione della metrica MARS in termini di classi EMS

Tra gli obiettivi del WP4-MARS vi è quello di sviluppare un modello di vulnerabilità avanzato per aggiornare lo scenario di rischio sismico per il National Risk Assessment (NRA). Le caratteristiche distintive del nuovo modello MARS sono (i) la definizione univoca della vulnerabilità attraverso la definizione di un set di curve di fragilità associate alle sei classi di vulnerabilità EMS e (ii) la derivazione di un modello di vulnerabilità unico e condiviso, attraverso la combinazione dei pesi proposti dalle unità di ricerca (UR) per ogni tipologia ISTAT, senza la necessità di calcolare diversi scenari di danno da combinare ex-post. La definizione di un'unica vulnerabilità sismica per tutte le unità di ricerca permette un confronto diretto fra i modelli di vulnerabilità delle diverse UR in termini di percentuali assegnate alle classi EMS. Il comportamento associato alle sei classi di vulnerabilità EMS definite nel progetto MARS è determinato dai seguenti parametri:

- il valore mediano della PGA del livello di danno D2 ( $PGA_{D2}$ ), assunto come riferimento per la classe EMS perché rappresentativo di un livello di danno moderato, con un leggero danno strutturale (vicino al raggiungimento della massima resistenza a taglio);
- i rapporti  $PGA_{Dk}/PGA_{D2}$  relativi ai valori mediani di PGA associati agli altri livelli di danno  $D_k$  ( $k=1,3,4,5$ ), che sono legati alle prestazioni sismiche in termini di duttilità (o, più precisamente, in termini di fattore di comportamento, per i livelli di danno più elevati, mentre per il livello di danno D1 è legato al rapporto di sovrarresistenza negli edifici in muratura e al danneggiamento delle pareti di tamponamento e divisorie negli edifici in RC);
- la dispersione associata ai livelli di danno  $D_k$ , che deve soddisfare determinate condizioni per evitare l'intersezione delle curve di fragilità nell'intervallo di integrazione numerica della convoluzione del rischio.

I valori di  $PGA_{D2}$  definiti nel progetto per ciascuna classe di vulnerabilità EMS sono riportati in Tabella 5.1. Tali valori sono stati ricavati da quelli assegnati dalle diverse UR per il NRA nel 2018 per avere un riferimento concordato; inoltre, tali classi rappresentano una metrica di vulnerabilità per l'assegnazione dell'insieme di curve di fragilità per qualsiasi sub-tipologia ISTAT, attraverso una combinazione lineare delle stesse. Secondo l'EMS, la differenza tra una classe di vulnerabilità e la seguente corrisponde all'incremento di un grado di intensità macrosismica per avere lo stesso livello di danno. Le leggi di correlazione tra intensità

macrosismica e PGA sono caratterizzate da una relazione matematica in cui all'incremento di un grado di intensità corrisponde un fattore moltiplicativo costante di PGA; in letteratura sono disponibili numerose correlazioni, da cui si è desunto un fattore pari a 1.8 utilizzato per la definizione delle classi di vulnerabilità EMS adottate nel progetto MARS.

Classi di vulnerabilità	A	B	C	D	E	F
PGA <sub>D2</sub> [g]	0.11	0.20	0.36	0.64	1.16	2.09

**Tabella 5.1 Valori mediani di PGA per il livello di danno D2 che definiscono le classi di vulnerabilità EMS**

Le classi di vulnerabilità EMS adottate nel progetto MARS sono state ulteriormente differenziate in funzione della duttilità, definendo le sei classi EMS duttili e fragili che si differenziano per la distanza tra gli stati limite. Le curve di fragilità proposte dai diversi gruppi di ricerca per il NRA 2018, definite attraverso approcci empirici o su base meccanica, hanno evidenziato alcune caratteristiche distintive in termini di duttilità. Gli edifici in muratura hanno dato luogo a tipologie antiche più vulnerabili rispetto a quelle moderne in quanto subiscono danni lievi o moderati per valori più bassi di PGA; tuttavia, le prime risultano più duttili rispetto a quelle moderne che sono caratterizzate da resistenze maggiori e minore duttilità. Per quanto riguarda gli edifici in cemento armato, quelli prima del 1980, in particolare se progettati solo per carichi gravitazionali, hanno una duttilità limitata, mentre quelli progettati con riferimento a normative moderne sono più duttili. Differenze in termini di duttilità sono attese anche nel caso di edifici prima e dopo interventi di adeguamento sismico; questa informazione è rilevante per pianificare gli interventi di mitigazione e valutarne l'efficacia. Se si considerano gli edifici antichi in muratura privi di connessioni efficaci, ci si aspetta che siano molto vulnerabili e fragili, a causa dell'elevata vulnerabilità ai meccanismi locali fuori piano (cioè, i livelli di danno D4 e D5 sono raggiunti con valori di PGA leggermente maggiori di quello che produce un danno moderato). Il miglioramento delle connessioni (ad esempio con tiranti in acciaio) riduce la vulnerabilità ai meccanismi locali, ma non modifica in modo significativo la danneggiabilità: quindi, secondo il modello MARS, l'edificio apparterebbe alla stessa classe EMS, ma con una maggiore duttilità. A seguito del rinforzo delle pareti in muratura, aumenta il taglio massimo alla base dell'edificio e, quindi, il valore del PGA<sub>D2</sub>: l'edificio passerebbe a una classe EMS superiore, senza modificare la duttilità. Infine, anche la duttilità aumenterebbe se si adottasse anche il rinforzo in piano dei diaframmi orizzontali, con collegamento alle pareti in muratura. L'analisi comparativa delle curve di fragilità utilizzate nella valutazione del rischio

2018 ha dimostrato (ad esempio Rosti et al. 2021b; Lagomarsino et al. 2021) che la distanza tra i livelli di danno è ben rappresentata dalla seguente legge:

$$PGA_{Dk} = PGA_{D2} e^{\alpha(k-2)} \quad (6)$$

dove  $\alpha$  è un parametro libero che varia tra 0.4 e 0.67 per passare da un comportamento fragile a duttile e il parametro  $k$  che definisce il livello di danno associato e si differenzia per il livello di danno D1 tra gli edifici in muratura e quelli in cemento armato. In particolare, per gli edifici in M è pari a 1, 3, 4 e 5 rispettivamente per i livelli di danno D1, D3, D4 e D5, mentre per gli edifici in CA il valore di  $k$  associato al D1 è pari a 0,6. La diversa distanza del D1 tra gli edifici in M e in CA è stata osservata a partire dai modelli definiti dai gruppi di ricerca descritti al capitolo 0, nei quali si evidenziava una maggiore distanza tra il livello di danno 1 e 2 negli edifici in CA rispetto a quelli in muratura, ovvero a parità di D2 il danno associato al D1 avveniva per una PGA minore. La Tabella 5.2 riporta i valori associati ai casi limite fragile e duttile per gli edifici in M e in CA. Da tali valori è possibile notare che nel caso limite fragile il livello di danno D4 (rappresentativo del quasi collasso) viene raggiunto con una PGA doppia rispetto a quella del danno moderato D2, mentre nel caso di massima duttilità questo fattore sale a 3.8. Pertanto, l'insieme delle curve di fragilità di un tipo di edificio può essere univocamente definito da due soli parametri:  $PGA_{D2}$  (compreso tra i valori di Classe A e F della Tabella 5.1) e  $\alpha$  (compreso tra i valori limite 0,4 e 0,67).

Classi di vulnerabilità	$\alpha$	$PGA_{Dk}/PGA_{D2}$					
		D1 (M)	D1 (CA)	D2	D3	D4	D5
Fragile	0.4	0.67	0.57	1	1.49	2.23	3.32
Duttile	0.67	0.51	0.39	1	1.95	3.82	7.46

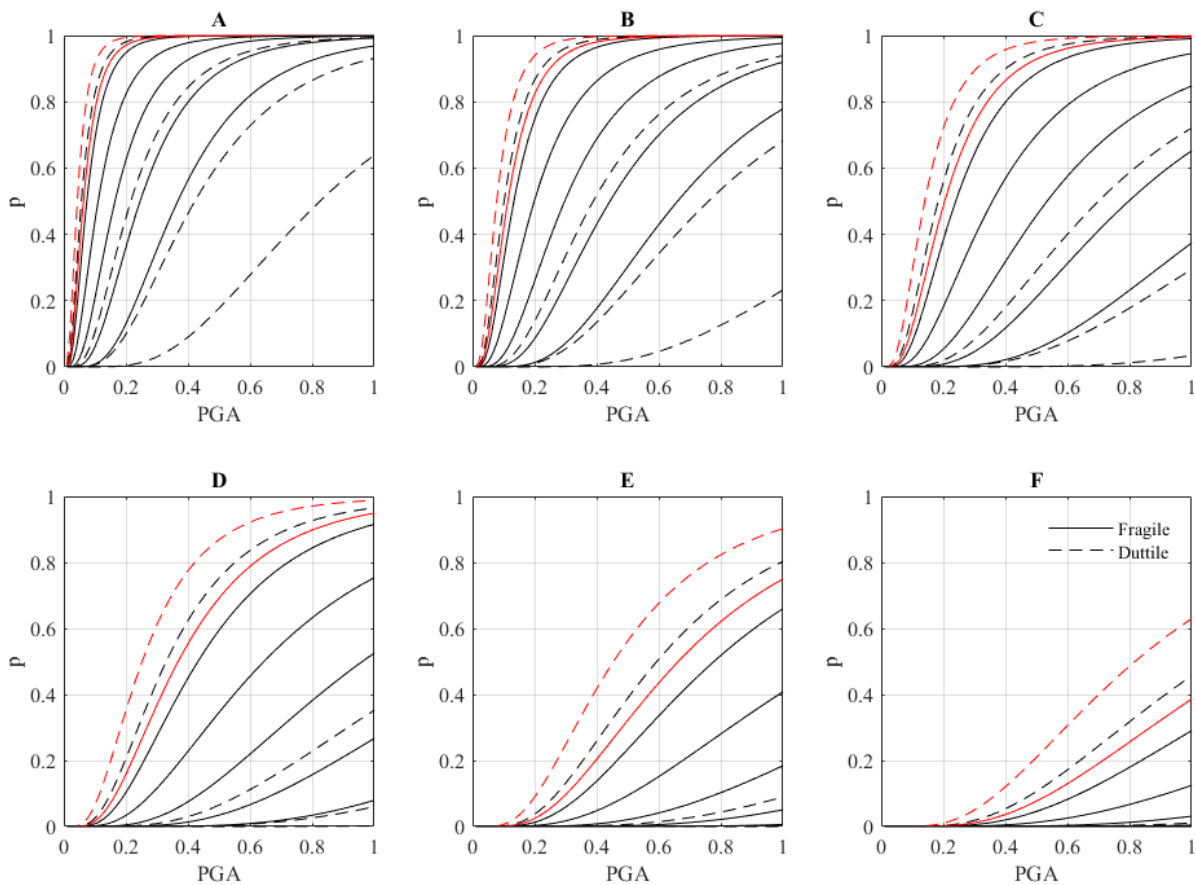
**Tabella 5.2 Valori mediani di PGA per il raggiungimento dei diversi livelli di danno rispetto al livello di danno D2, nei casi limite fragile e duttile**

Il modello di vulnerabilità MARS si basa quindi sulla definizione, per ogni classe di vulnerabilità EMS, di due serie di curve di fragilità, denominate fragile e duttile, caratterizzate dallo stesso valore  $PGA_{D2}$  (Tabella 5.1), ma da una diversa distanza tra i livelli di danno. La vulnerabilità al livello di danno D2, denominato moderato in EMS e rappresentativo della resistenza a taglio dell'edificio nella fase pseudoelastica, è quindi ciò che caratterizza ogni classe EMS. Per quanto riguarda le dispersioni delle curve associate alle classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS, esse sono definite per tenere in conto dei diversi contributi che possono influire nella definizione della dispersione di una curva di fragilità per un'analisi del rischio sismico a scala

nazionale, quali ad esempio le modeste informazioni sulla classificazione degli edifici (tassonomia ISTAT), che includono ampie tipologie di edifici con diverse configurazioni architettoniche e strutturali che sono caratterizzate da comportamenti differenti. I valori di dispersione utilizzati sono riportati in Tabella 5.3. In Figura 5.1 sono mostrate le curve di fragilità associate alle sei classi di vulnerabilità EMS nei casi limite duttile e fragile per i cinque livelli di danno.

	D1	D2	D3	D4	D5
Dispersione $\beta$	0.61	0.64	0.61	0.58	0.54

**Tabella 5.3** Valori di dispersione adottati per le curve di fragilità delle classi EMS del progetto MARS



**Figura 5.1** Set di curve di fragilità associate alle classi EMS del progetto MARS per i cinque livelli di danno; le curve indicate con il colore rosso si riferiscono al livello di danno D1 per gli edifici in CA

## 5.2 Conversione dei modelli sviluppati dalle UR secondo il modello MARS

Ciascuna unità di ricerca ha fornito un set di curve di fragilità definite sulla base dell'inventario ISTAT attraverso l'applicazione dei modelli di vulnerabilità descritti al capitolo 0; ogni set di curve di fragilità è definito da cinque valori di PGA mediani, associati ai cinque livelli di danno in accordo con la classificazione EMS-98 (Grünthal et al. 1998), e dai relativi valori di dispersione beta della distribuzione log-normale.

Per convertire le curve di fragilità originali di ciascuna UR in combinazione di classi di vulnerabilità EMS è necessario ricondurre le curve originali a curve aventi una dispersione analoga alle curve del modello MARS. Tale conversione viene svolta imponendo che la curva di fragilità con la dispersione modificata intersechi la curva di fragilità fornita dall'UR in un determinato punto della curva; per la definizione dei punti di intersezione sono stati adottati due metodi alternativi. Il primo metodo definisce i valori di intersecazione delle curve ( $\overline{PGA}_{Dk}$ ) corrispondenti a 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g e 0.5g rispettivamente per il livello di danno D1, D2, D3, D4 e D5. Il limite di questo metodo è che utilizza dei valori di riferimento per l'equivalenza delle curve indipendenti dalla vulnerabilità della tipologia considerata e pertanto per sub-tipologie molto vulnerabili le PGA di intersezione possono essere già vicine ai valori mediani, viceversa possono essere associate a valori di probabilità di superamento molto bassi. Il secondo metodo invece determina il punto di intersezione tra le curve in funzione di determinati frattili imponendo in aggiunta alcune soglie di limite inferiore e superiore di PGA. Nello specifico il valore di PGA per il quale viene imposta l'equivalenza è determinato dalla seguente espressione:

$$\overline{PGA}_{Dk} = e^{\ln(PGA_{Dk} - p_{Dk} * \beta_{Dk})} \quad (7)$$

dove  $p_{Dk}$  è pari a 0, 0.125, 0.252, 0.385 e 0.525 rispettivamente per i livelli di danno D1, D2, D3, D4 e D5 e  $\beta_{Dk}$  è la dispersione associata a ciascun livello di danno  $D_k$ . Tali valori di  $\overline{PGA}_{Dk}$  devono rientrare in determinati intervalli di variazione riportati in Tabella 5.4.

$\overline{PGA}$ (g)	D1	D2	D3	D4	D5
Limite inferiore	0.07	0.12	0.18	0.25	0.35
Limite superiore	0.30	0.40	0.60	0.75	1.00

Tabella 5.4 Limiti definiti per i valori di PGA di intersezione tra le curve originali e quelle convertite

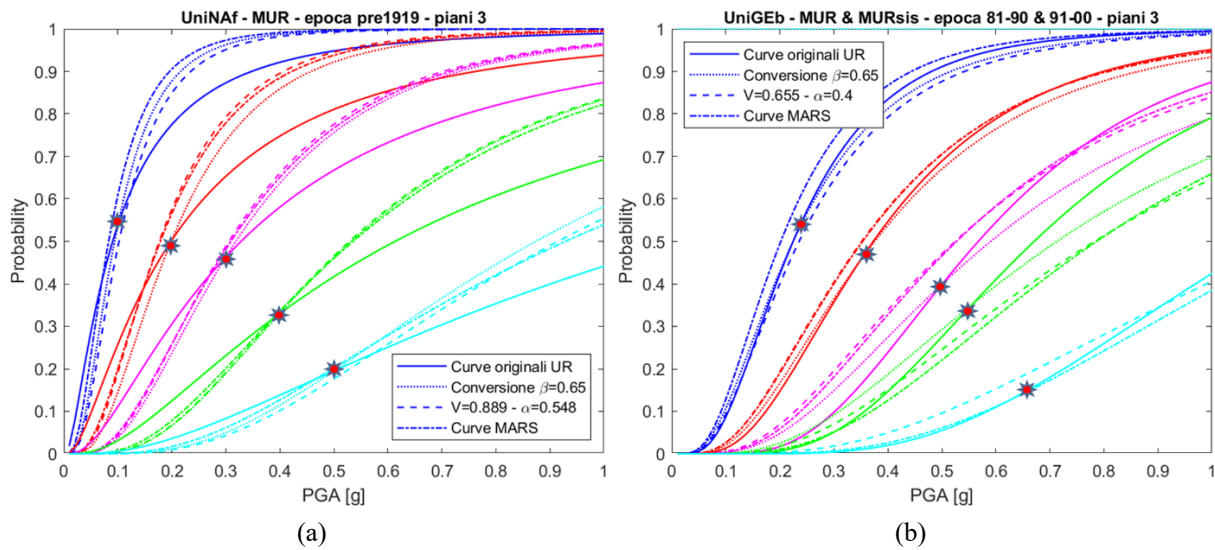
Il secondo metodo ha il vantaggio di definire il punto di intersezione in funzione della vulnerabilità della curva originale fornita dall'UR; pertanto, nei casi più vulnerabili si cerca la

somiglianza nelle curve per valori di PGA più piccoli rispetto a quelli predefiniti con il metodo 1. È importante tener presente che la piattaforma IRMA definisce l'integrale di convoluzione del rischio tra 0.03g e 1.0g e, in molti casi, associa a valori di PGA maggiori di 0.5g probabilità di occorrenza molto bassa; pertanto la zona in cui è più rilevante che la curva convertita sia analoga a quella originale fornita dall'UR è compresa tra 0.03g e 0.5g. Tale intervallo coincide anche con l'intervallo di PGA per il quale sono disponibili i dati osservazionali poiché gli eventi sismici più rilevanti che si sono verificati sul territorio nazionale hanno registrato intensità che rientrano in quell'intervallo (ad esempio per il terremoto de L'Aquila 2009 i valori massimi di PGA presenti nella shakemap sono inferiori a 0.5g), pertanto anche i risultati forniti da modelli empirici-osservazionali, per valori di PGA superiori di 0.5g, derivano da estrapolazioni. La valutazione del metodo ottimale per la determinazione dei punti di intersezione delle curve originali rispetto alle curve MARS è stata svolta sulla base delle conseguenze ottenute dal calcolo del rischio, andando a scegliere il metodo che minimizzava le differenze in termini di perdite tra le curve originali e quelle convertite.

Il valore di PGA per il quale si verificherà l'intersezione tra le curve è valutato con la seguente espressione:

$$PGA'_{Dk} = (PGA_{Dk})^{\frac{\beta'_{Dk}}{\beta_{Dk}}} \overline{PGA_{Dk}}^{(1-\frac{\beta'_{Dk}}{\beta_{Dk}})} \quad (8)$$

dove  $\beta'_{Dk}$  è il valore di dispersione associato alle curve di fragilità del modello MARS e  $\beta_{Dk}$  è il valore di dispersione delle curve originali entrambi definiti al variare del livello di danno  $D_k$ . In Figura 5.2 sono riportate due conversioni a titolo d'esempio per mostrare il criterio di intersezione definito con il metodo 1 (a) e con il metodo 2 (b), individuando l'equivalenza tra la curva a tratto continuo (curva originale) e la curva puntinata (curva con dispersione modificata).



**Figura 5.2 Esempio di conversione delle curve originali fornite dalle UR con indicazione del punto di intersezione determinato con il metodo 1 (a) o con il metodo 2 (b)**

Un ulteriore controllo viene svolto sull'intersezione delle curve di fragilità che può avvenire dal momento che viene modificato il valore di dispersione in maniera differente per i diversi livelli di danno. Tale intersezione può verificarsi per valori bassi di PGA quando la dispersione di un determinato livello di danno è maggiore di quella di un livello inferiore, o per valori elevati di PGA nel caso opposto. Tuttavia, poiché la piattaforma IRMA valuta numericamente l'integrale di convoluzione del rischio sismico (Cornell 1968) nell'intervallo di valori  $PGA_{min} < PGA < PGA_{max}$ , è sufficiente che le intersezioni tra le curve di fragilità siano al di fuori di questo intervallo. Dopo semplici passaggi matematici è possibile ricavare che questa condizione di compatibilità è garantita dalla seguente relazione:

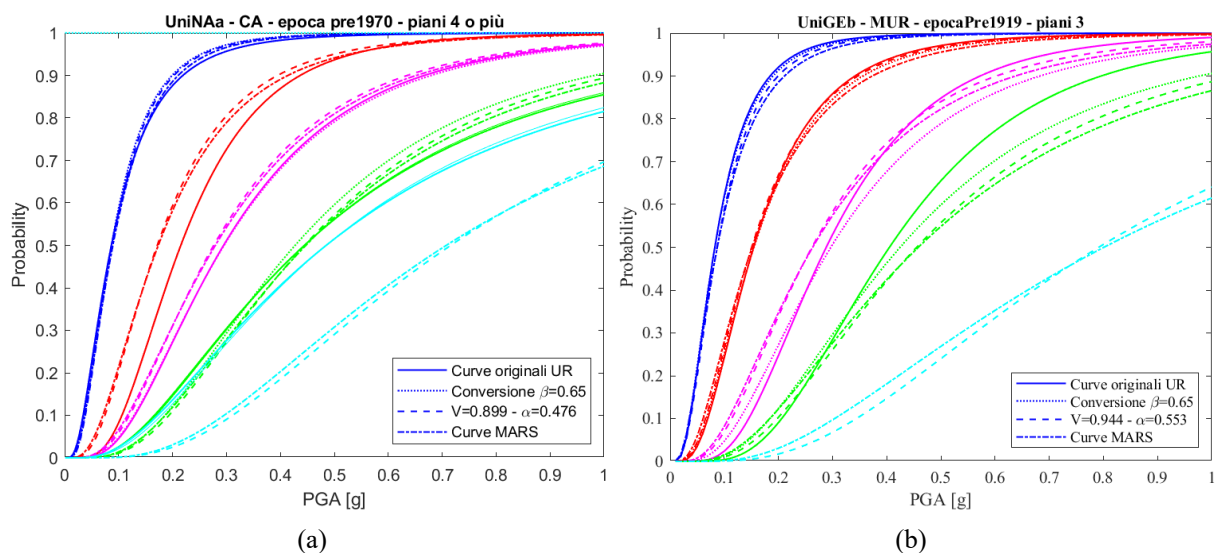
$$\beta_{Dk} \frac{\log(PGA_{max}) - \log(PGA_{Dj})}{\log(PGA_{max}) - \log(PGA_{Dk})} < \beta_{Dj} < \beta_{Dk} \frac{\log(PGA_{min}) - \log(PGA_{Dj})}{\log(PGA_{min}) - \log(PGA_{Dk})} \quad \text{with } j > k \quad (9)$$

Il passaggio successivo della conversione consiste nello stimare i parametri liberi,  $PGA_{D2}$  e il coefficiente  $\alpha$  che definisce la distanza tra i livelli di danno, attraverso una regressione ai minimi quadrati dell'errore percentuale tra la curva originale fornita dall'UR e quella convertita. Questo processo di minimizzazione dell'errore è condotto variando contemporaneamente i due parametri liberi ( $PGA_{D2}$  e  $\alpha$ ) per individuarne la coppia ottimale con la quale definire la PGA mediana associata al livello di danno D2 e la regola di distanza tra i diversi stati limite, con la seguente espressione:

$$PGA_{Dk} = PGA_{D2} e^{\alpha(k-2)} \quad (10)$$



dove  $k$  è il parametro definito al capitolo 5.1 ed è pari a 1, 3, 4 e 5 rispettivamente per i livelli di danno D1, D3, D4 e D5 per gli edifici in M, mentre per gli edifici in CA è pari a 0,6, 3, 4 e 5 rispettivamente per i livelli di danno D1, D3, D4 e D5. In questa procedura di minimizzazione dell'errore, per alcuni modelli, sono stati scartati alcuni stati limite che si posizionavano rispetto agli altri in maniera anomala per evitare che un singolo stato limite potesse sfalsare tutti gli altri, oppure nei casi in cui alcuni di essi non fossero forniti dall'UR. In Figura 5.3 è riportato a titolo d'esempio un caso in cui sono stati esclusi dalla conversione il livello di danno D2 e D5 (a) e un caso in cui non è stata fornita dall'UR la curva di fragilità associata al livello di danno D5 (b).



**Figura 5.3** Esempio di conversione delle curve originali fornite dalle UR nel caso in cui vengono esclusi dalla conversione alcuni livelli di danno (a) oppure non sono stati forniti dall'UR (b)

Dopo aver determinato il miglior fitting dei parametri  $PGA_{D2}$  e  $\alpha$ , con il valore della  $PGA_{D2}$  vengono determinate le due classi contigue dentro le quali si inserisce la PGA individuata ed essendo le curve di fragilità delle curve lognormali è possibile determinare le percentuali associate a ciascuna delle due classi mediante un'interpolazione lineare nel piano logaritmico. Con il parametro  $\alpha$  vengono invece determinate le percentuali nella classe duttile e fragile per determinare la distanza tra le curve di fragilità.

L'assegnazione del set di curve di fragilità a ciascuna tipologia ISTAT, con l'uso di un approccio empirico o meccanico, può quindi avvenire come combinazione lineare di 4 set di curve di fragilità, opportunamente selezionati tra le 6 classi EMS, ciascuna disponibile nella doppia opzione di comportamento fragile e duttile.



### 5.3 Confronto tra i modelli “convertiti” e quelli “originali”

Al fine di predisporre un confronto puntuale tra i risultati ottenuti dai diversi gruppi di ricerca con l’uso di approcci differenti, tutti i modelli sono stati convertiti utilizzando la procedura descritta al capitolo 5.2. Per ciascun modello è stato valutato il metodo di conversione che permettesse di determinare le curve convertite il più possibile vicine a quelle originali; per determinare quale dei due metodi potesse meglio descrivere le curve originali proposte dalle UR sono state valutate le perdite in termini di rischio (tema approfondito nel capitolo 0) utilizzando le curve originali, le curve convertite con il metodo 1 e le curve convertite con il metodo 2 e successivamente è stato scelto quello che dava luogo a conseguenze più vicine a quelle calcolate con il modello originale. In Tabella 5.5 e Tabella 5.6, rispettivamente per gli edifici in M e in CA, è riportato per ciascun gruppo di ricerca il metodo di conversione scelto e gli eventuali livelli di danno (DL) che sono stati esclusi per la conversione oppure non forniti dall’UR.

<b>UR – RESPONSABILI (M)</b>	<b>METODO DI CONVERSIONE</b>	<b>DL ESCLUSI</b>
UNIGE – Lagomarsino	M2	-
UNIPD – Da Porto	M1	-
PLINIUS – Zuccaro	M1	-
UNIPV – Penna	M1	-
UNIGEb – Cattari	M2	D5
UNINAd – Parisi	M2	D1 - D3 - D5
UNICH – Brando	M2	-
UNIRM1b – Sorrentino	M1	-

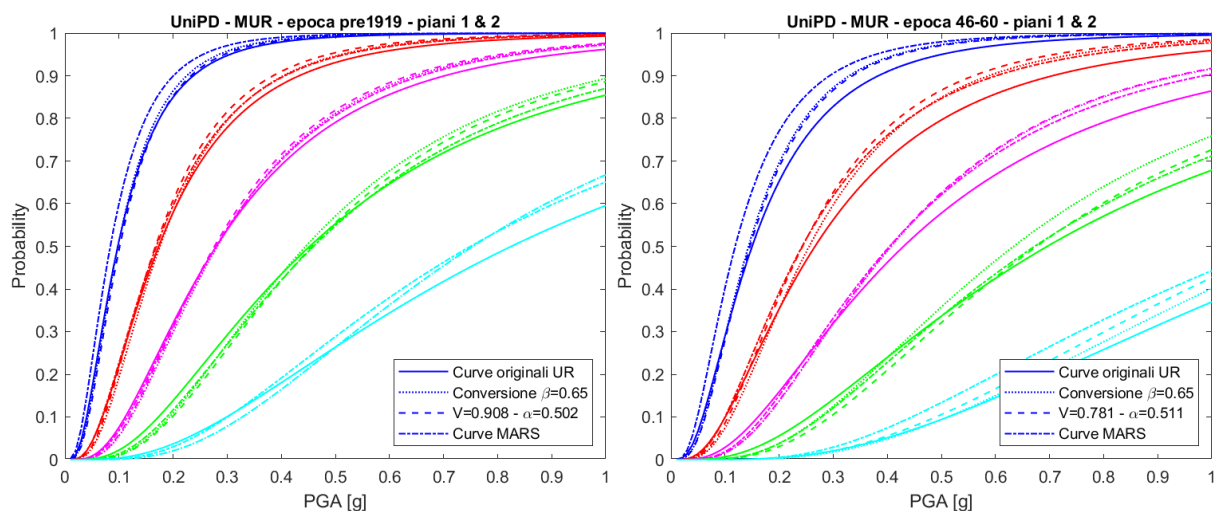
**Tabella 5.5 UR con coordinatore coinvolte nel task 4.3, metodo scelto per la conversione e livelli di danno (DL) esclusi dalla conversione per gli edifici in M**

La conversione è stata eseguita per tutti i modelli ricevuti dalle unità di ricerca e sono stati realizzati i grafici di confronto tra le curve "originali" e quelle "convertite" sistematicamente per tutte le sub-tipologie ISTAT; qualora l’UR avesse definito una stessa curva di fragilità per diverse sub-tipologie ISTAT, queste sono state accorpate in un unico grafico. In Figura 5.4 sono riportate due sub-tipologie a titolo d’esempio per mostrare l’impostazione del confronto; il colore associato alla curva di fragilità definisce il livello di danno associato (D1-blu, D2-rosso,

D3-magenta, D4-verde, D5-ciano), mentre la tipologia di linea mostra come varia la curva nei diversi passaggi della procedura di conversione (linea continua – curva originale, linea puntinata – curva ottenuta modificando la dispersione e definendo il punto di intersezione in funzione del metodo scelto, linea tratteggiata – curva definita dai parametri  $PGA_{D2}$  e  $\alpha$  determinati dalla procedura di minimizzazione dell'errore, linea tratto-punto – curva determinata dalla combinazione lineare delle quattro curve di fragilità associate alle classi di vulnerabilità EMS). In allegato 13.3 è riportato il confronto esteso svolto per ciascuna UR.

UR – RESPONSABILI (CA)	METODO DI CONVERSIONE	DL ESCLUSI
UNIGE – Lagomarsino	M2	-
UNIBAS – Masi	M1	-
EUCENTRE - Borzi	M2	-
UNINA – Verderame	M2	D2 - D5
UNINA-PV – Verderame/Penna (EA-EC)	M1	D1 - D5
UNIPR-SA – Belletti/Martinelli	M1	D5
UNIRM1a – Monti	M2	D4 - D5

**Tabella 5.6 UR con coordinatore coinvolte nel task 4.3, metodo scelto per la conversione e livelli di danno (DL) esclusi dalla conversione per gli edifici in CA**



**Figura 5.4 Grafici di confronto tra le curve originali fornite dalle UR e le curve convertite con il metodo MARS**

## 5.4 Confronto tra i modelli “convertiti” delle diverse UR

Grazie alla conversione delle curve di fragilità in classi di vulnerabilità EMS, definite nel progetto MARS, è stato possibile svolgere alcuni confronti centralizzati dei risultati disponibili. La definizione di un'unica vulnerabilità sismica per tutte le unità di ricerca permette infatti un confronto diretto fra i modelli di vulnerabilità in termini di percentuali assegnate alle classi EMS. I confronti sono stati svolti in maniera analoga per il costruito in muratura e in cemento armato.

### 5.4.1 Edifici in muratura

Una prima rappresentazione utilizzata per il confronto mostra il posizionamento di ciascuna sub-tipologia ISTAT tra le classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS per ciascun modello. In Figura 5.5 è mostrato il confronto per gli edifici in muratura, nella quale i simboli colorati sono associati alle unità di ricerca, mentre la linea continua nera indica il comportamento medio calcolato considerando i risultati dei soli modelli che hanno sviluppato curve di fragilità a scala nazionale (5 modelli indicati in Tabella 4.7).

Questa rappresentazione dei risultati permette di avere un quadro d'insieme del comportamento stimato al variare del numero di piani e dell'epoca di costruzione; non permette però di approfondire i risultati che si ottengono in termini di classi di vulnerabilità EMS distinte in comportamento fragile e duttile. Per tale motivo sono stati realizzati alcuni istogrammi, definiti per ciascuna sub-tipologia, nei quali sono mostrati i risultati forniti da ciascuna UR distinguendo il comportamento fragile e duttile, riportando le percentuali così come sono da inserire nel file "esposizione" da caricare nella piattaforma IRMA. In Figura 5.6 si riportano, a titolo d'esempio, i grafici ottenuti per gli edifici a due piani per le epoche precedenti al 1919 e per l'epoca 1946-60. Il confronto esteso è riportato in allegato 13.4.

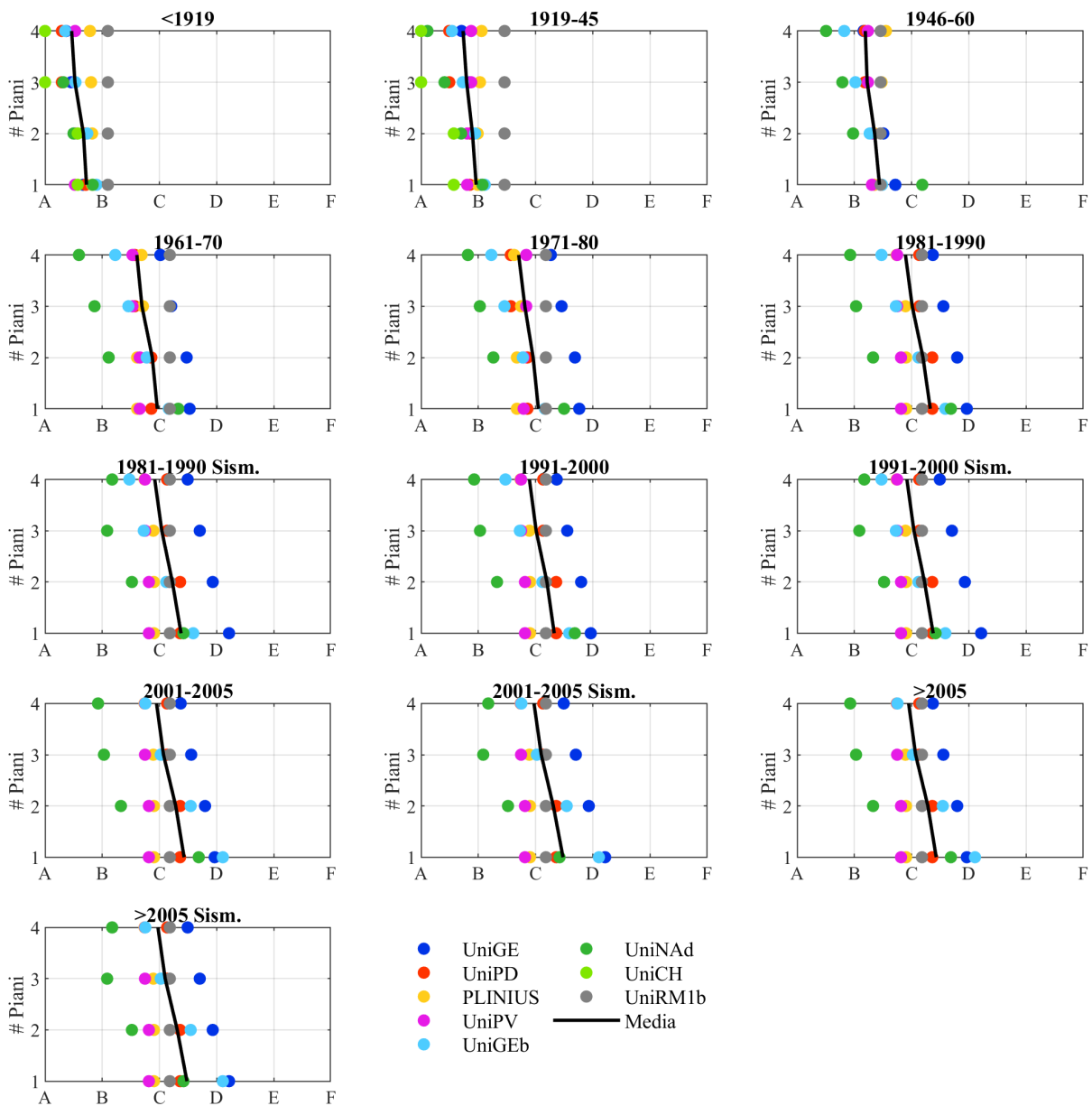


Figura 5.5 Confronto tra le UR in termini di classi di vulnerabilità EMS, per gli edifici in muratura

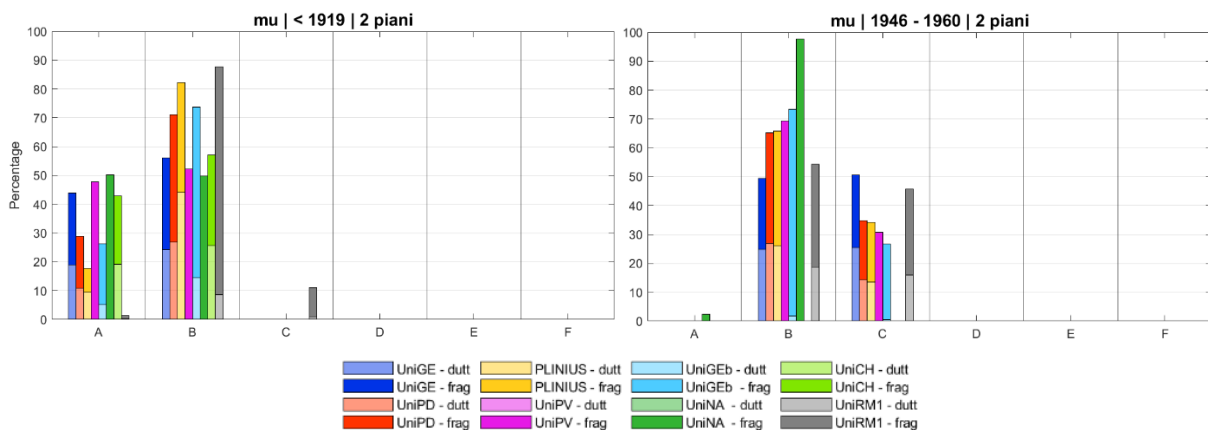


Figura 5.6 Confronto dei risultati forniti dalle UR in termini di classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS distinte per il comportamento duttile e fragile, per gli edifici in muratura

### 5.4.2 Edifici in cemento armato

Anche per il costruito in cemento armato è stato svolto un confronto analogo a quello mostrato per gli edifici in muratura (capitolo 5.4.1).

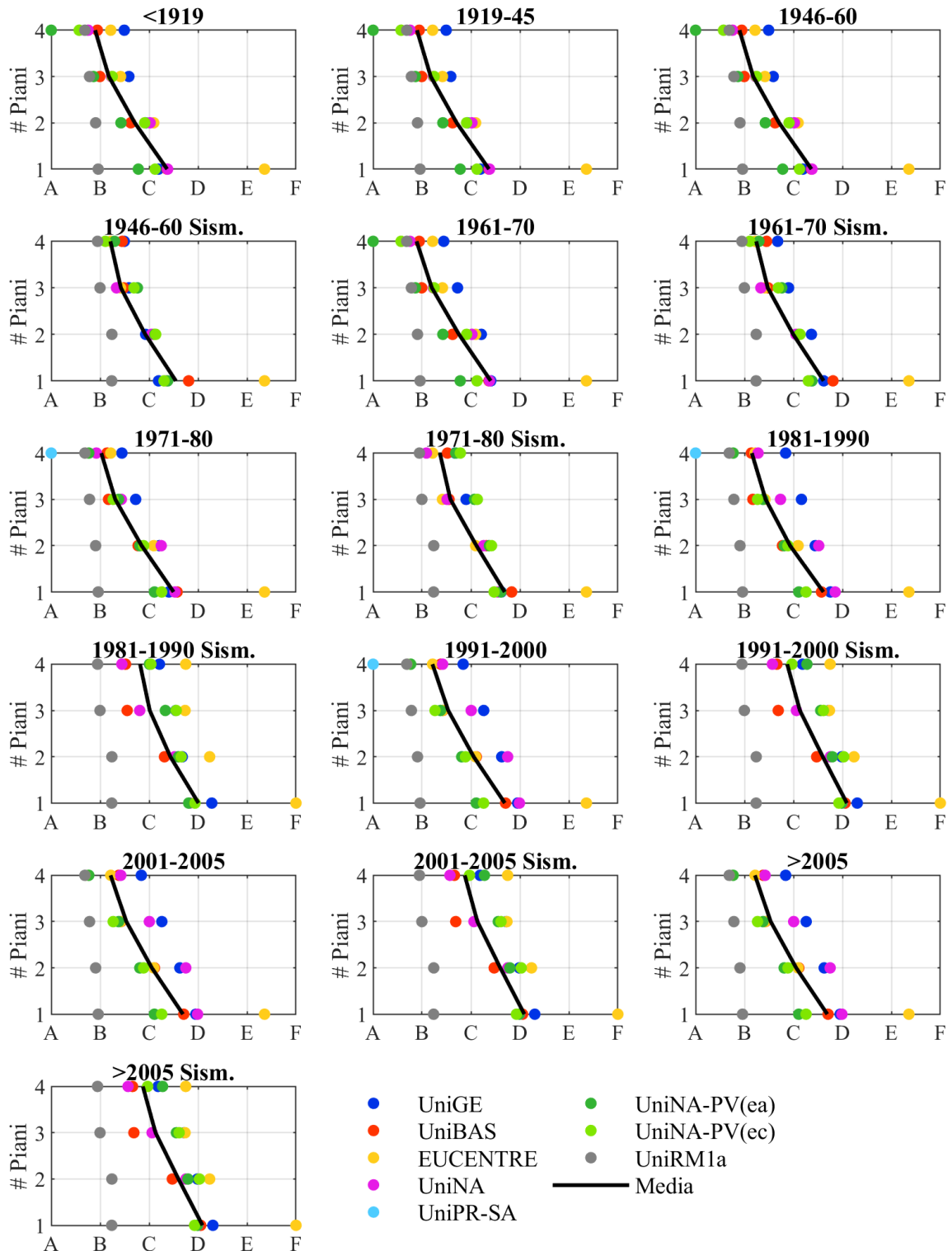
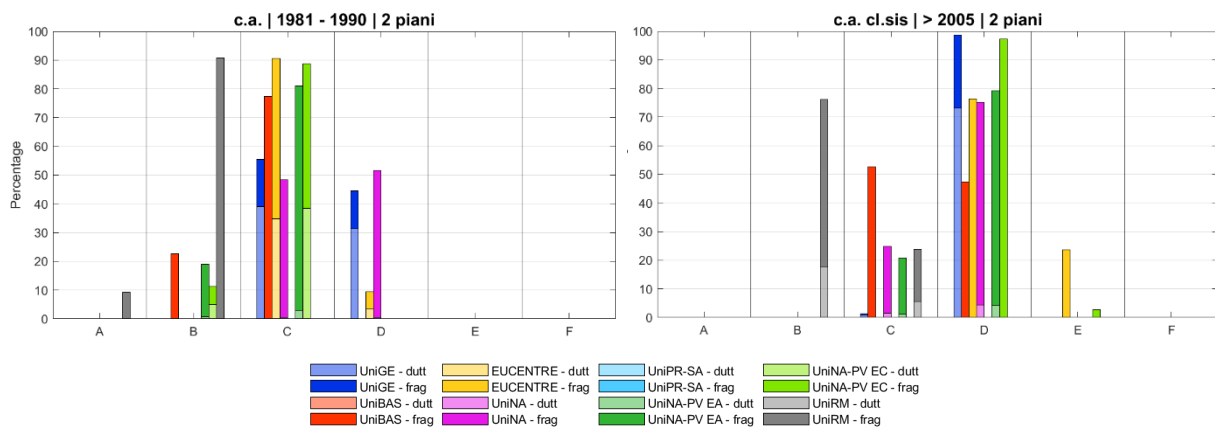


Figura 5.7 Confronto dei risultati forniti dalle UR in termini di classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS, per gli edifici in cemento armato



**Figura 5.8 Confronto dei risultati forniti dalle UR in termini di classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS distinte per il comportamento duttile e fragile, per gli edifici in cemento armato**

## 5.5 Modello integrato di vulnerabilità per il costruito residenziale

Dopo aver analizzato tutti i prodotti forniti da ciascuna UR e aver convertito le curve di fragilità disponibili in classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS, sono stati integrati i risultati per determinare un unico modello di riferimento MARS per l'edilizia residenziale in muratura e in cemento armato. L'uso della conversione delle curve di fragilità nelle sei classi di vulnerabilità EMS permette l'integrazione di risultati derivanti da diverse metodologie. In particolare, il modello integrato è il risultato della combinazione di 5 modelli:

- per la muratura, un modello definito con approccio euristico-macosismico, uno con approccio empirico-osservazionale, due modelli da approccio ibrido e un modello meccanico-analitico;
- per il cemento armato, un modello definito con approccio euristico-macosismico, uno con approccio empirico-osservazionale, un modello meccanico-numerico e due modelli meccanico-analitici.

Il modello integrato è stato definito combinando con egual peso i cinque modelli a disposizione per la M e per il CA. I modelli non utilizzati per la definizione del modello integrato si riferivano soltanto ad alcune tipologie ISTAT o avevano un carattere fortemente regionale.

In Figura 5.9 sono mostrati i risultati del modello integrato per l'edilizia in muratura, in termini di classi di vulnerabilità EMS distinte in comportamento fragile e duttile. In generale si osserva che la vulnerabilità determinata per gli edifici in muratura risulta molto omogenea e compatta (quasi sempre determinata a cavallo di sole due classi) e che, all'avanzare dell'epoca, si passa da una classe di vulnerabilità compresa tra A e B nell'epoca precedente al 1919, ad una classe sostanzialmente B nell'intervallo tra il 1919 e il 1945 fino ad una classe compresa tra C e D per

le epoche più moderne (1981-1990). Inoltre, associata ad una riduzione della vulnerabilità all'aumentare dell'epoca di costruzione è possibile notare una riduzione delle percentuali associate al comportamento duttile ed un aumento di quelle associate al comportamento fragile.

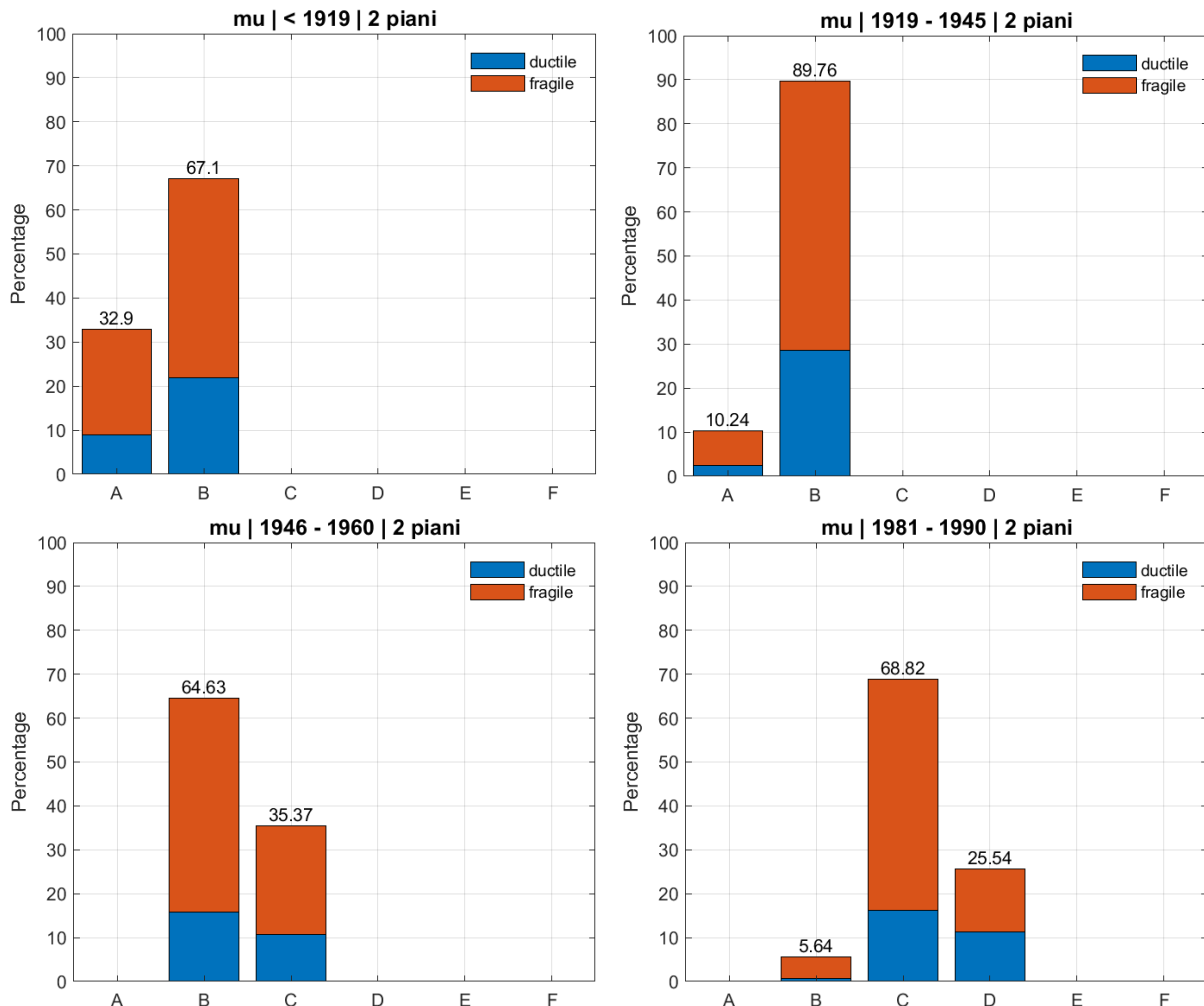


Figura 5.9 Modello integrato MARS per l'edilizia in muratura

Per l'edilizia in muratura, l'influenza sulla variazione dell'epoca è molto evidente nei risultati forniti dai gruppi di ricerca, come mostrano gli istogrammi riportati (Figura 5.9), mentre emerge una minore dipendenza dei risultati dal numero di piani analizzati, come invece mostra la linea media riportata nei grafici in Figura 5.5. I risultati ottenuti per gli edifici in cemento armato (Figura 5.10) rivelano tendenze differenti. La variazione dell'epoca di costruzione non determina una rilevante differenza nel comportamento strutturale, come mostrano gli istogrammi riferiti all'epoca 1961-70 e 1981-90; mentre risultano più influenti (i) la variazione sul numero di piani, che determina un aumento della vulnerabilità passando da una classe C per gli edifici a due piani ad una classe B per quelli con quattro o più piani (a titolo d'esempio per

l'epoca 1961-70) e (ii) il passaggio da una progettazione gravitazionale ad una progettazione sismica (associata ai comuni che risultano classificati sismicamente). I risultati estesi per tutte le sub-tipologie ISTAT sono riportati in allegato 13.5.

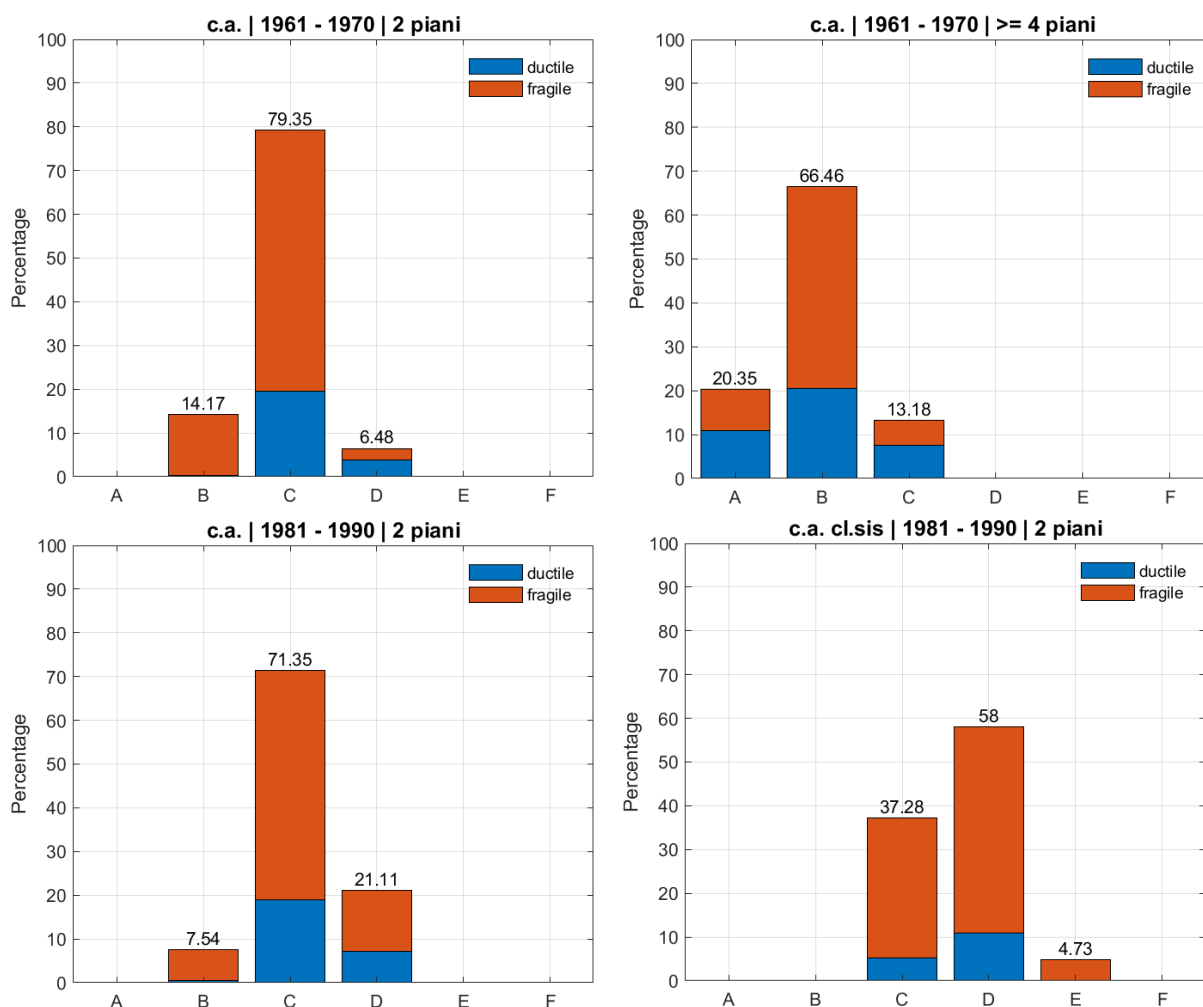


Figura 5.10 Modello integrato MARS per l'edilizia in cemento armato

È stato svolto un ulteriore confronto che mostra direttamente le curve di fragilità derivanti dalla combinazione lineare delle curve di fragilità associate alle classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS per gli edifici in M e in CA. In Figura 5.11 è mostrato il confronto per l'epoca 1919-1945 (riportato in maniera estesa in allegato 13.5); nella prima riga sono inserite le curve di fragilità ottenute sovrapponendo quelle riferite agli edifici in M (linea tratteggiata) e in CA (linea continua), mentre nella seconda e nella terza riga vi sono gli istogrammi con le percentuali delle classi di vulnerabilità EMS per la M e per il CA. Da tale confronto emerge (i) una maggiore vulnerabilità degli edifici in M soprattutto per gli edifici bassi, (ii) un elevato incremento di vulnerabilità all'aumentare del numero di piani per gli edifici in CA e (iii) una



forte differenza nei risultati forniti dalle UR per la stima della vulnerabilità degli edifici ad un piano in CA (come si osserva dagli istogrammi in termini di percentuali) che si traduce in una maggiore dispersione nelle curve di fragilità.

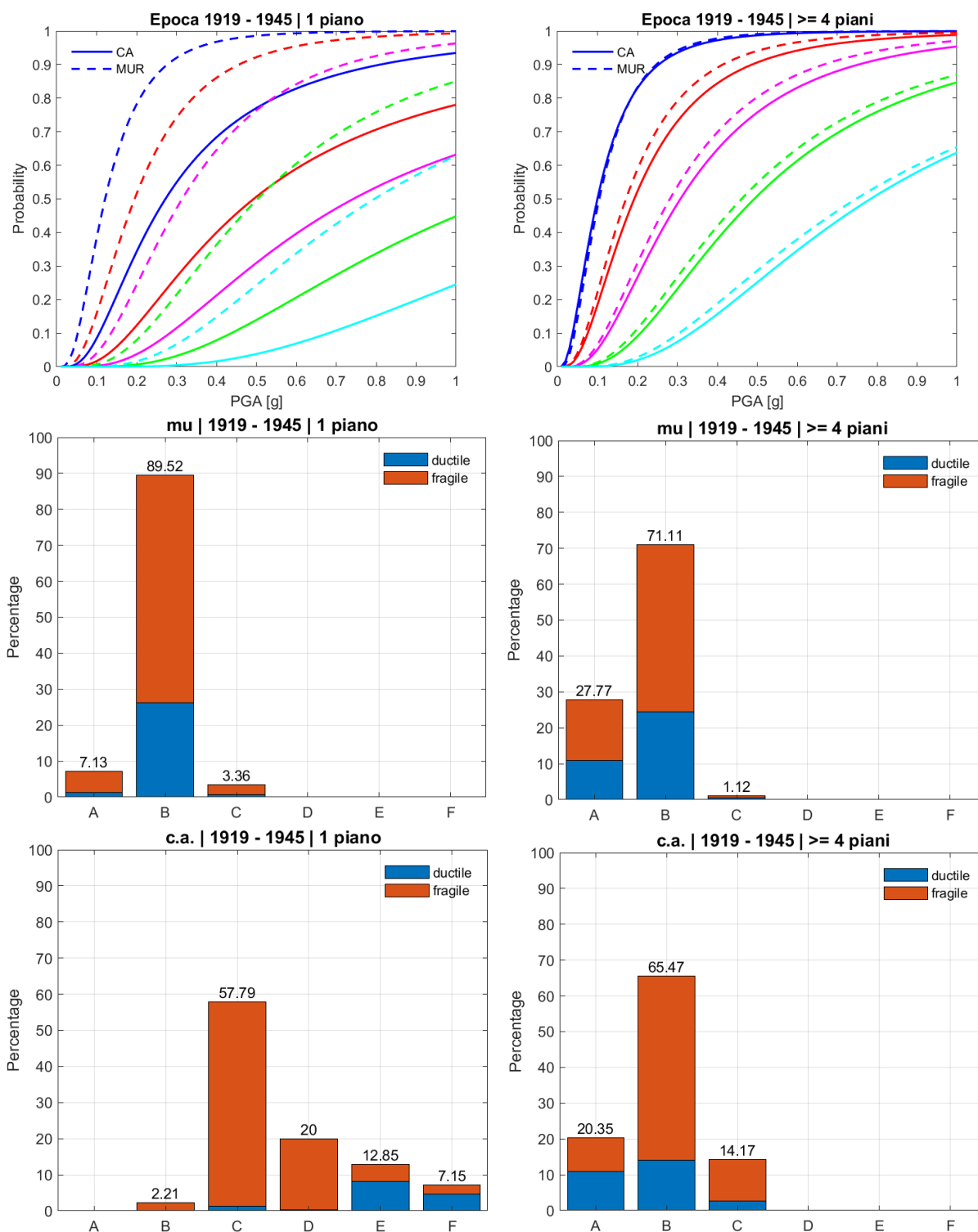
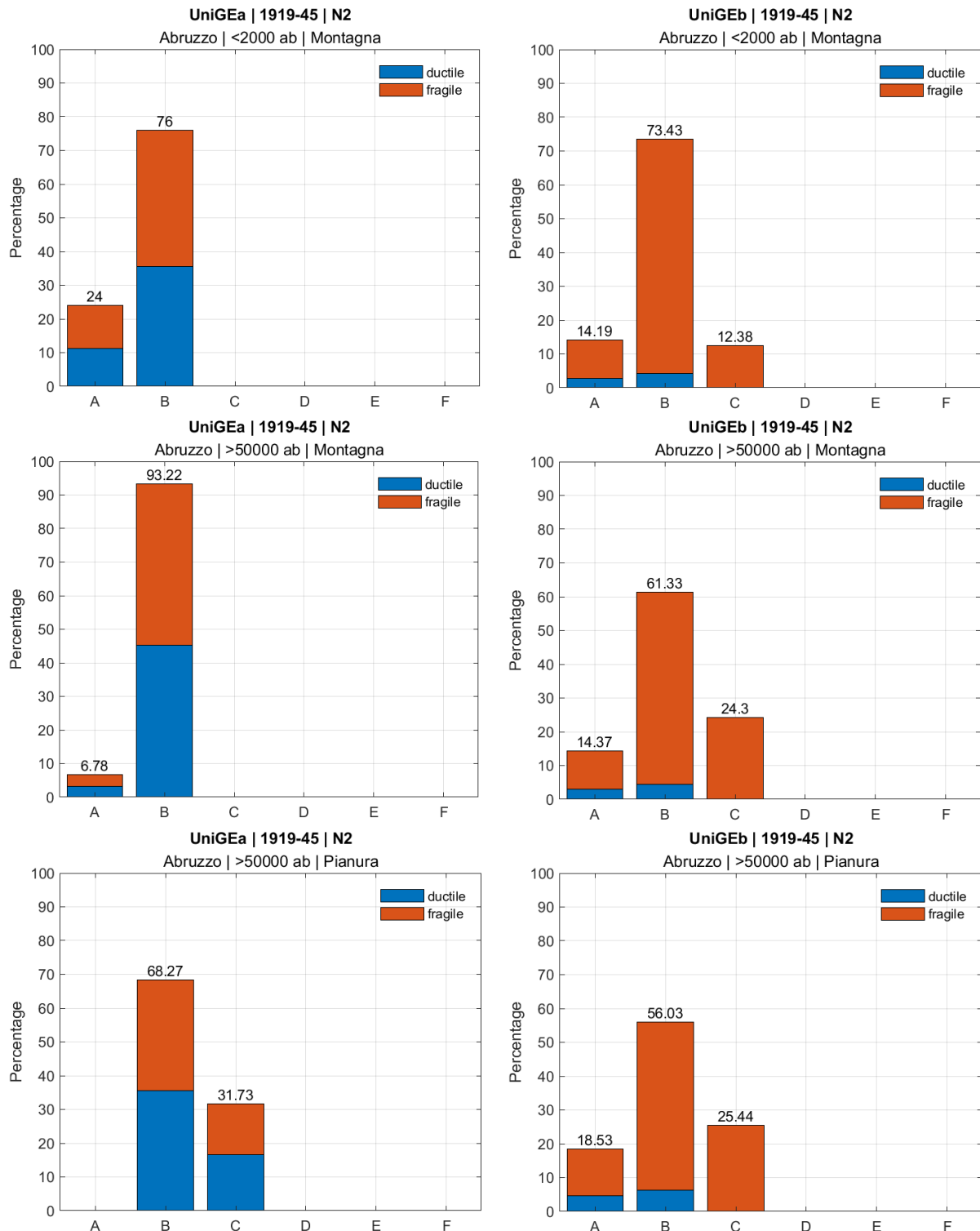


Figura 5.11 Confronto dei risultati ottenuti per gli edifici in M e in CA in termini di curve di fragilità e classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS

## 5.6 Regionalizzazione della vulnerabilità per il costruito in muratura

Per quanto riguarda la regionalizzazione della vulnerabilità del costruito in muratura, grazie ai dati del rilievo tipologico eseguito nel progetto CARTIS, in particolare nell'annualità 2021, che ha consentito di derivare distribuzioni congiunte delle frequenze di tipologie murarie e dei solai nei diversi ambiti territoriali che caratterizzano il territorio nazionale. In aggiunta, con i nuovi dati raccolti, è stato possibile definire delle distribuzioni che correlano le tipologie murarie con le epoche di costruzione, come già descritto al capitolo 2.3. Sono state quindi derivate diverse matrici di frequenza che descrivono le distribuzioni di tipologie murarie e di solai (matrici 6x4) per le 7 epoche presenti nell'inventario ISTAT e per ciascun ambito territoriale (complessivamente 240 matrici derivanti dalla combinazione di 20 regioni amministrative, 3 ambiti altimetrici e 4 ambiti demografici). Nel caso in cui fossero disponibili modelli in grado di differenziare il comportamento strutturale, non solo al variare del numero di piani e dell'epoca di costruzione, ma anche in funzione delle tipologie murarie e di solai, è possibile ricostruire curve di fragilità differenziate in ogni ambito territoriale; pertanto, è possibile disporre di vulnerabilità differenziate per le sub-tipologie ISTAT per ogni ambito territoriale. In questa fase della ricerca, tale procedura è stata sviluppata con due modelli: il modello euristico-macrosismico del Prof. Lagomarsino (UniGEa) e il modello meccanico-analitico della Prof.ssa Cattari (UniGEb). Attraverso l'uso del modello meccanico-analitico di UniGEb sono state definite le 12 percentuali delle classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS per tutte le sub-tipologie CARTIS, che combinano tipologie di muratura e di solai, al variare dell'epoca di costruzione e del numero di piani; le sub-tipologie per cui è differenziato il comportamento risultano in totale 568. Per quanto riguarda il modello euristico-macrosismico (UniGEa) sono stati definiti dei modificatori che agiscono direttamente sui parametri sintetici di vulnerabilità  $V$  e  $Q$  che caratterizzano il modello stesso, agendo sia sulla vulnerabilità che sulla duttilità della struttura in funzione della tipologia di muratura, la tipologia di solaio e i dettagli costruttivi ipotizzati al variare delle epoche di costruzione. Con l'uso dei modificatori, le percentuali associate alle classi di vulnerabilità EMS sono ricostruite in una fase successiva. Considerando ad esempio l'epoca precedente al 1919, il modificatore applicato all'indice  $V$  varia da un valore pari a 0.1 in presenza di murature in pietra ad un valore pari a -0.05 quando vi sono i mattoni pieni. Nel caso invece del modello analitico-meccanico (UniGEb), per l'epoca precedente al 1919, le classi di vulnerabilità EMS variano da più del 90% di classe A nel caso di muratura in pietra e solai flessibili/voltati ad un 70% di classe C nel caso di murature in mattoni con solai

rigidi. In Figura 5.12 sono mostrate le percentuali delle classi di vulnerabilità EMS associate al progetto MARS ricavate per alcuni ambiti geografici della regione Abruzzo.

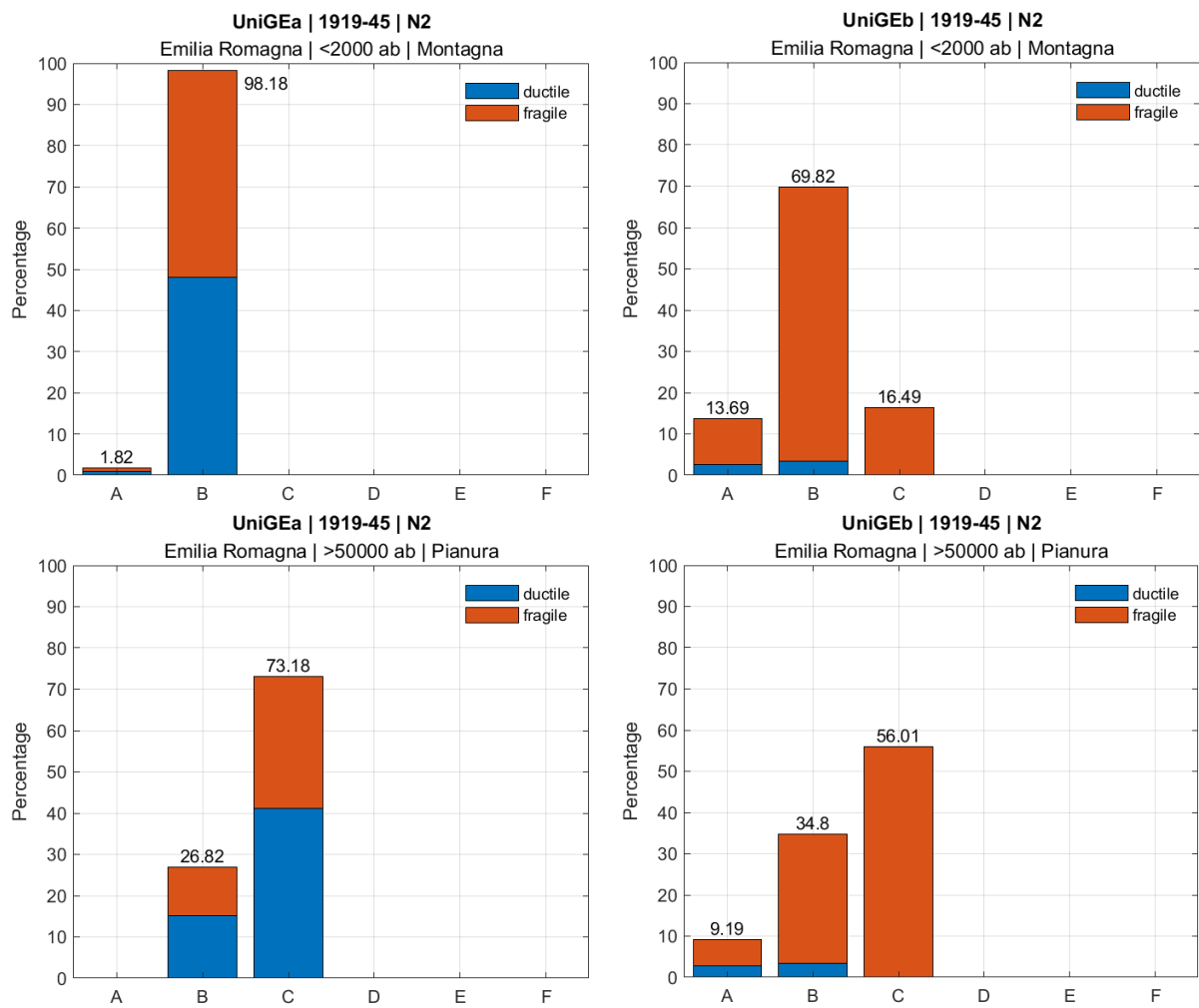


**Figura 5.12 Vulnerabilità differenziate per ambiti territoriali per la regione Abruzzo in termini di percentuali di classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS**

In particolare, nella colonna di sinistra sono mostrati i risultati ottenuti con il modello euristico-macrosismico (UniGEa), mentre nella colonna di destra quelli ottenuti con il modello analitico-meccanico (UniGEb). Le percentuali sono state estratte per determinati ambiti:

- Montagna e meno di 2'000 abitanti, associato ad esempio al comune di Poggio Picenze;
- Montagna e più di 50'000 abitanti, associato ad esempio al comune de L'Aquila;
- Collina e più di 50'000 abitanti, associato ad esempio al comune di Pescara.

Per entrambi i modelli si evidenzia un comportamento principalmente di classe B, con un'escursione dalla classe A alla C passando dai comuni di montagna con pochi abitanti ai comuni di collina riferiti a città grandi. Nel modello di UniGEa i risultati sono definiti solamente tra due classi EMS in quanto i modificatori che determinano la variabilità della tipologia muraria o dei solai sono applicati ai parametri sintetici V e Q e solo in una seconda fase tali indicatori sono convertiti in classe EMS, mentre nel modello di UniGEb, combinando attraverso le percentuali della regionalizzazione direttamente le classi di vulnerabilità EMS, il comportamento può essere descritto da più di due classi. In Figura 5.13 sono mostrati i risultati ottenuti per la regione Emilia-Romagna, al variare di due ambiti territoriali (comuni piccoli di montagna e comuni grandi in collina).



**Figura 5.13 Vulnerabilità differenziate per ambiti territoriali per la regione Emilia-Romagna in termini di percentuali di classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS**

## 6 MODELLI DI PERDITE

**(redatto in collaborazione con la UR di cui è responsabile Marco Di Ludovico)**

La definizione di mappe di rischio sismico su scala nazionale risulta di fondamentale importanza non solo per stimare, in una data regione, le potenziali perdite dovute ai terremoti, ma anche per programmare e introdurre appropriate politiche di mitigazione. Negli ultimi 20 anni si è riscontrato, in ambito nazionale, un sempre più crescente interesse nell'implementazione delle mappe di rischio sismico (RISK-UE 2001–2004; Zuccaro 2004; Lagomarsino e Giovinazzi 2006; Pitilakis et al. 2006; Shakib et al. 2011; Silva et al. 2015; Chaulagain et al. 2015; NDCP ed., 2018; Silva et al. 2019; Dolce et al. 2021). Ai notevoli sforzi profusi dalla comunità scientifica per la definizione di sempre più accurate mappe di rischio, si affiancano oggi sempre più frequentemente studi che mirano ad approfondire gli aspetti connessi alla corretta quantificazione delle perdite economiche, intese come la somma tra i costi diretti necessari per riparare i danni rilevati sugli edifici a seguito di un evento sismico, e dei costi indiretti che ne derivano (ad es. IRMA (Italian Risk MAPs), Borzi et al. 2021; CAESAR II tool, Zuccaro et al. 2021a). I costi diretti si possono desumere dall'analisi dei dati ricavati dai costi delle ricostruzioni di aree colpite dal terremoto; i costi indiretti, tra cui ad esempio i costi di assistenza alla popolazione (Mannella et al. 2017) o quelli dovuti all'interruzione dell'attività economica e alla riduzione della produzione nel settore industriale (Benson e Clay 2004), si sono rilevati, a seguito dei recenti eventi sismici, particolarmente significativi in termini di incidenza sulle perdite totali indotte dal sisma, ma sono evidentemente non sempre facilmente quantificabili e rilevabili nei processi di ricostruzione.

Nell'ambito delle attività del consorzio ReLUIIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica), che opera come centro di competenza del Dipartimento della Protezione Civile (DPC), particolare attenzione è stata dedicata in questi anni allo sviluppo di curve di fragilità per la stima del danno da sisma e di strumenti per la valutazione delle perdite dirette ed indirette, specie con riferimento all'edilizia residenziale. In particolare, nel progetto di ricerca DPC-ReLUIIS 2019-2021, il Task 4.4 "Rischio: calcolo delle conseguenze e delle perdite economiche afferente al WP4 " Mappe di Rischio e Scenari di Danno Sismico - MARS", si è posto come obiettivo una revisione critica dei modelli disponibili in letteratura al fine di comprendere la loro affidabilità nella stima delle vittime e delle perdite economiche (NDPC 2018; Dolce et al., 2021) nonché la definizione di nuovi strumenti e funzioni per la previsione delle perdite.

Per quanto concerne le perdite di vite umane, i modelli disponibili in letteratura sono stati analizzati in dettaglio e valutati con riferimento ai più recenti eventi sismici italiani, per poi procedere alla calibrazione di opportuni accorgimenti.

Nell'ambito della stima delle perdite economiche, sono state analizzate le correlazioni tra i costi diretti e indiretti e diversi parametri rappresentativi del danno sugli edifici: esito di agibilità (edificio agibile, temporaneamente inagibile, parzialmente inagibile, inagibile) e livello di danno globale (DS), assegnato a ciascun edificio attraverso diverse metriche di conversione che si basano sul danno osservato sui diversi elementi strutturali e non strutturali.

L'esito di agibilità mira a valutare le condizioni di sicurezza degli edifici e le azioni necessarie per consentire alle persone di tornare nelle loro case. In tale ambito, lo studio effettuato ha fatto riferimento ai dati relativi alla valutazione dell'esito di agibilità degli edifici secondo la classificazione italiana derivante dalle schede AeDES (Baggio et. al. 2007). Tuttavia, i risultati cui si è pervenuti possono essere facilmente estesi anche ad altri paesi, che, comunemente adottano schede di valutazione e modelli finalizzati alla valutazione dell'agibilità di un edificio molto simili a quello italiano (Giappone, Goretti e Inukai 2002; U.S., ATC, 2005; Nuova Zelanda, NZSEE, 2009).

L'esito di agibilità degli edifici viene generalmente valutato nelle prime fasi dell'emergenza e, quindi, rappresenta uno strumento cruciale per una immediata stima delle perdite. Noto il quadro dell'agibilità degli edifici è anche possibile pervenire ad una rapida stima delle perdite indirette legate all'assistenza alla popolazione, evidentemente strettamente correlate all'esito di agibilità ed al tempo di inagibilità degli edifici.

Tuttavia, la valutazione del rischio in "tempo di pace", partendo da modelli basati sull'esito di agibilità e sulla previsione delle fasi di ricostruzione, non è oggi del tutto agevole in quanto ancora non ci sono modelli affidabili che prevedono l'esito di agibilità di un dato edificio a fronte di un evento sismico di una certa intensità. Pertanto, gli studi condotti nell'ambito del Task 4.4 hanno anche riguardato la definizione di curve di fragilità attraverso cui predire, in funzione di una data intensità sismica, l'agibilità degli edifici. Sono state, inoltre, calibrate funzioni di conseguenza idonee a correlare l'esito di agibilità ai costi di riparazione degli edifici e di assistenza alla popolazione.

Alla luce del notevole sforzo profuso dalla comunità scientifica per derivare curve di fragilità in termini di probabilità di raggiungere un certo stato di danno globale degli edifici, DS, (basate su un approccio empirico, Rota et al. 2008, Zuccaro e Cacace 2015a, Del Gaudio et al. 2017b; Rosti et al. 2018; Del Gaudio et al. 2019b; Del Gaudio et al. 2020; Rosti et al. 2021b; da Porto



et al. 2021, o su modelli analitici, Rossetto e Elnashai 2005; Lagomarsino e Giovinazzi 2006; Borzi et al. 2008; Rota et al. 2010), è stato, inoltre, ritenuto indispensabile nel Task 4.4 indirizzare gli studi nei riguardi della definizione di specifiche funzioni di conseguenza attraverso cui associare i costi diretti ed indiretti direttamente ai diversi livelli di danno, DS.

Tali funzioni sono state derivate dai dati reali di costo desunti dai recenti processi di ricostruzione post-sisma con particolare riferimento al sisma di L'Aquila 2009 (Di Ludovico et al. 2017a,b, De Martino et al. 2017) (Mannella et al 2017, Di Ludovico et al. 2022). In particolare, anche in questo caso, sono stati analizzati i costi di riparazione del danno indotto dal sisma ed i costi di assistenza alla popolazione. Si osserva che per quanto concerne quest'ultimi, è stato necessario in primis associare i costi di assistenza per persona relativi a ciascuna forma di assistenza alla popolazione (tende, contributo autonoma sistemazione, alberghi, Moduli Abitativi Provvisori, M.A.P., Complessi abitativi Antisismici, Sostenibili ed Ecologicamente compatibili, Progetto C.A.S.E) per poi procedere alla definizione di specifiche funzioni di conseguenza attraverso cui associare costi di assistenza a DS.

Anche se influenzati da diverse incertezze, questi dati sono unici e di fondamentale importanza per definire futuri scenari di perdita e per orientare nelle scelte coloro che sono coinvolti nella definizione e pianificazione di adeguate politiche di mitigazione del rischio sismico (Cosenza et. al. 2018).

Di seguito si riportano in maniera sintetica i principali risultati ottenuti nell'ambito dei tre principali filoni di studio condotto: (i) modelli per la stima delle inagibilità e dei collassi; (ii) analisi e calibrazione di modelli per la stima delle casualties e (iii) modelli per la stima delle perdite economiche.

## **6.1 Modelli per la stima delle inagibilità e dei collassi**

Una stima raffinata della valutazione delle perdite richiede lo sviluppo di modelli di vulnerabilità adatti alla valutazione di scenari di danno e alla valutazione del rischio. L'obiettivo è quello di ottenere strumenti di supporto al processo decisionale di allocazione delle limitate fonti economiche per le attività di prevenzione del rischio sismico e la gestione delle emergenze (Dolce et al.2021; Borzi et al. 2021). Con questo obiettivo, negli ultimi anni sono stati sviluppati molti metodi empirici grazie alla grande disponibilità di dati osservati resa possibile dal Dipartimento Nazionale della Protezione Civile attraverso la piattaforma Da.D.O. (Dolce et al. 2019). Sono state sviluppate diverse curve di fragilità in funzione del danno strutturale per classi tipologiche caratteristiche del patrimonio edilizio italiano, sia per edifici in cemento armato (es.

Del Gaudio et al. 2020) che per edifici in muratura non armata (es. Rosti et al. 2021a; Zucconi et al. 2021; Lagomarsino et al. 2021). Una volta ottenuta una stima affidabile del danno strutturale, le funzioni di conseguenza consentono una correlazione tra il danno strutturale e la stima delle perdite espresse in termini di costi di riparazione (Ramirez et al. 2012; Del Vecchio et al. 2020) o di perdite sociali.

In alternativa al metodo precedente, basato sul danno subito da un edificio dopo un evento sismico, è possibile considerare la valutazione dell'agibilità della struttura. L'agibilità, cioè l'idoneità a utilizzare un edificio dopo un evento sismico senza rischi per la vita umana, è un indicatore significativo della prestazione sismica della struttura (Stannard et al. 2014). La valutazione dell'agibilità richiede indagini dettagliate in situ basate sulla valutazione dei danni subiti dall'edificio dopo l'evento sismico.

In Italia, dopo il terremoto de L'Aquila del 2009, i finanziamenti per la riparazione sono stati assegnati all'inizio del processo di ricostruzione in base al giudizio di agibilità (Di Ludovico et al. 2017a, b). Del Vecchio et al. 2020 hanno mostrato una forte correlazione tra il giudizio di agibilità e i costi di riparazione relativi a diverse componenti strutturali di edifici residenziali in cemento armato danneggiati dal terremoto de L'Aquila. Inoltre, la perdita di agibilità è stata direttamente correlata ai costi indiretti legati al tempo di assistenza della popolazione (Mannella et al. 2017; Di Ludovico et al. 2022). Inoltre, Zucconi et al. 2018, 2020 hanno evidenziato una buona correlazione tra diversi parametri strutturali e il giudizio di agibilità.

Nell'ambito del Task 4.4, è stato sviluppato un modello di agibilità per edifici residenziali in muratura non rinforzata basato sui dati empirici raccolti dopo il terremoto de L'Aquila del 2009 (Zucconi et al. 2022). L'obiettivo è quello di utilizzare un modello simile a quello di vulnerabilità che sia applicabile in uno scenario di rischio sismico per la valutazione delle perdite e che consenta una maggiore correlazione tra gli esiti di agibilità e i costi di riparazione, i tempi di assistenza alla popolazione, le vittime, i morti e i senzatetto. Il modello proposto sviluppa curve di fragilità in termini di agibilità per edifici italiani in muratura non armata, partendo da quasi 60.000 strutture ispezionate dopo il terremoto dell'Aquila. In primo luogo, sono stati identificati i parametri strutturali rilevanti che influenzano il giudizio di agibilità attraverso regressioni di perdita di agibilità, quindi sono state definite le classi tipologiche, includendo le informazioni disponibili sia nel database AeDES e nel censimento italiano (ISTAT 2011). La correlazione con i dati del censimento è significativa per l'applicabilità del modello a qualsiasi comune del territorio italiano. I parametri selezionati sono stati: i tempi di costruzione, lo stato di conservazione e il numero di piani. Le categorie rilevanti per il periodo

di costruzione seguono i principali cambiamenti nelle norme italiane per le costruzioni in muratura non armata: < 1919, 1919-1961, > 1961 (Zucconi et al. 2018). Lo stato di conservazione è stato definito considerando due categorie: R1 per Eccellente e Buono, e R2 per Stato di conservazione mediocre e scadente, introdotte grazie a una correlazione tra il danno preesistente, raccolto con la AeDES, e le quattro categorie di stato di conservazione dei dati censuari (Zucconi et al. 2022). Infine, il parametro del numero di piani (1-2 piani e più di 2 piani) è risultato rilevante solo per gli edifici con lo stato di riparazione R1. Nella Tabella 6.1 sono state identificate le dodici classi tipologiche ottenute combinando le categorie rilevanti dei parametri selezionati. Le percentuali sono calcolate considerando per le prime sei righe l'insieme completo degli edifici, mentre per le ultime sei righe solo gli edifici con uno stato di riparazione R1.

ID	Periodo di costruzione, T	Stato di conservazione, R	No. di piani, S	Edifici [%]
T1R1	< 1919	R1	-	45
T2R1	1919-1961	R1	-	17
T3R1	>1961	R1	-	21
T1R2	< 1919	R2	-	10
T2R2	1919-1961	R2	-	3
T3R2	>1961	R2	-	4
T1R1S1	< 1919	R1	1	8
T1R1S2	< 1919	R1	>1	46
T2R1S1	1919-1961	R1	1	3
T2R1S2	1919-1961	R1	>1	17
T3R1S1	>1961	R1	1	4
T3R1S2	>1961	R1	>1	21

**Tabella 6.1 Classi tipologiche basate sul censimento**

Per tenere conto degli edifici non ispezionati nell'area sismica interessata, è stata implementata una procedura per stimare il numero totale effettivo di edifici, al fine di evitare una sovrastima della probabilità di superamento per un determinato livello di prestazione, soprattutto per le aree lontane dall'epicentro, dove le ispezioni vengono generalmente effettuate solo su richiesta dei proprietari. In questo studio è stata implementata la procedura proposta in un precedente lavoro di Zucconi et al. 2018. I dati osservati vengono incrementati al numero totale di edifici presenti nei dati censuari per ogni località, includendo i comuni abruzzesi non presenti nella banca dati AeDES. La banca dati aumentata è composta da oltre 375 000 edifici. La classe

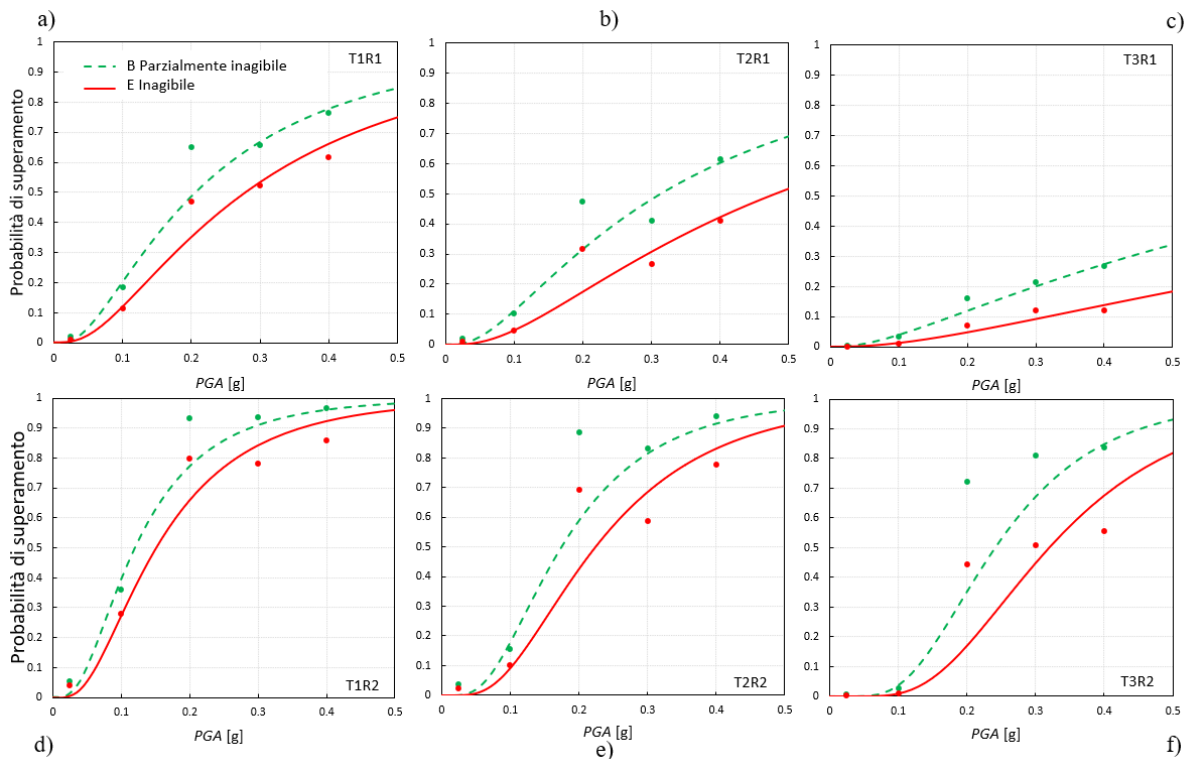
tipologica degli edifici aggiunti è stata definita attraverso una procedura Monte Carlo, considerando la distribuzione percentuale dei dati AeDES.

Le curve di fragilità dell'agibilità sono state definite in funzione dell'accelerazione di picco al suolo (PGA) per due stati di agibilità US: B parzialmente inagibile; E inagibile. I punti osservati sono stati adattati con una distribuzione lognormale e i loro parametri sono stati stimati con il metodo della massima verosimiglianza. Le curve di fragilità in termini di agibilità per le sei classi tipologiche definite in funzione del periodo di costruzione e dello stato di conservazione sono riportate nella Figura 6.1. È possibile notare che:

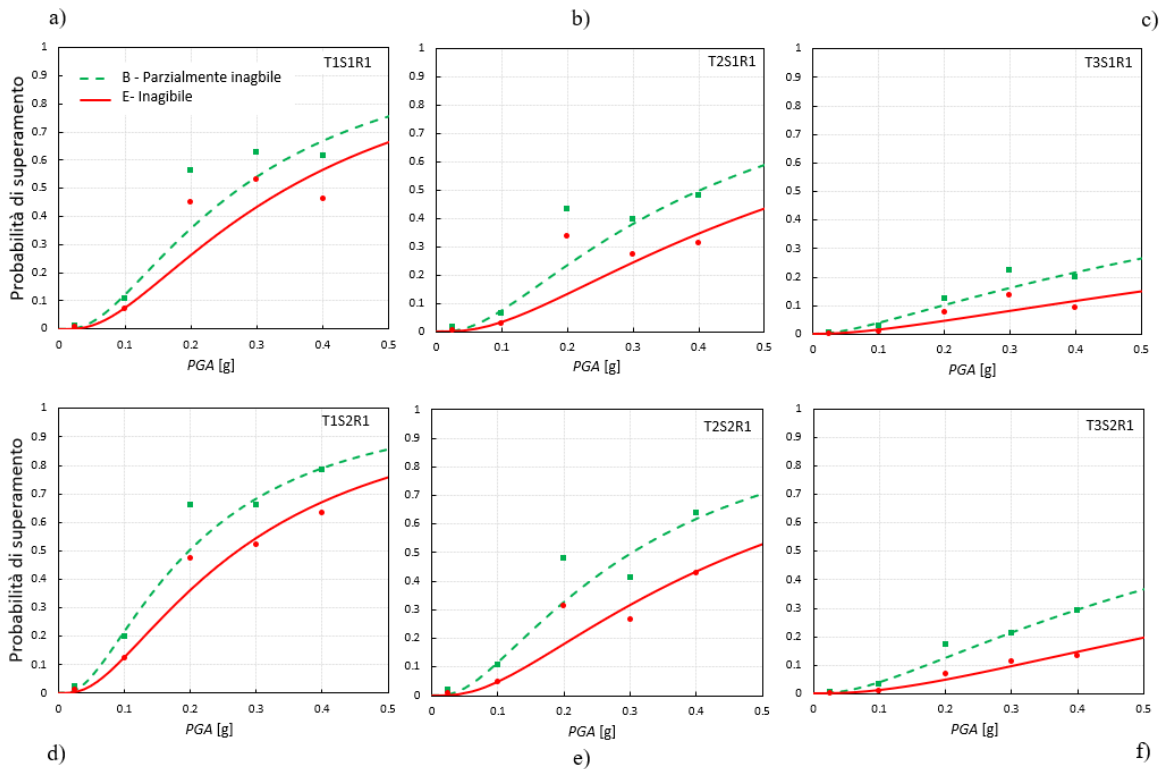
- i valori mediani aumentano con l'US, per cui, a parità di classe tipologica, l'US = B ha sempre una mediana più bassa rispetto all'US = E; di conseguenza, gli edifici parzialmente inagibili hanno sempre una maggiore probabilità di occorrenza rispetto agli edifici inagibili per un dato valore di PGA;
- gli edifici più vetusti hanno sempre una maggiore perdita di utilizzabilità rispetto a quelli più recenti, come è possibile osservare valutando l'influenza del periodo di costruzione, per il quale la categoria T1 (< 1919) mostra sempre una perdita di agibilità maggiore rispetto a T2 (1919-1961), che a sua volta è superiore a quella di T3 (> 1961);
- lo stato di conservazione R2 comporta sempre una perdita di agibilità maggiore rispetto allo stato di conservazione R1, a parità di tempi di costruzione.

Infine, va notato che, le curve di fragilità in termini di agibilità per gli stati di agibilità B ed E, di una data classe tipologica, non si intersecano tra loro anche per valori di PGA maggiori di quelli tracciati nel seguito, grazie alla deviazione standard logaritmica imposta costante per tutti gli stati di agibilità.

Le curve di fragilità che tengono conto anche del numero di piani fuori terra comportano risultati contraddittori nel caso dello stato di conservazione R2, con edifici più alti che risultano leggermente meno vulnerabili di quelli più bassi a parità di tempi di costruzione. Questo risultato ha portato all'adozione del modello presentato, basato solo sui tempi di costruzione e sullo stato di riparazione. Tuttavia, poiché l'informazione sul numero di piani fuori terra è già disponibile nel censimento, le curve di fragilità che tengono conto di questo parametro sono presentate esclusivamente per gli edifici con R1 in Figura 6.2, l'unica categoria di stato di conservazione per la quale il numero di piani fuori terra è significativo.



**Figura 6.1** Curve di fragilità in termini di agibilità e dati osservati per le classi tipologiche basate sul censimento: a) T1R1, b) T2R1, c) T3R1, d) T1R2, e) T2R2, and f) T3R2.



**Figura 6.2** Curve di fragilità in termini di agibilità e dati osservati per ulteriori classi tipologiche con stato di riparazione R1: a) T1R1S1, b) T2R1S1, c) T3R1S1, d) T1R1S2, e) T2R1S2, and f) T3R1S2.

Nella Tabella 6.2 sono riportati i parametri delle distribuzioni lognormali per tutte le classi tipologiche basate sul censimento. È possibile notare che il parametro è stato assunto uguale per tutte le US per evitare l'intersezione delle curve, come suggerito da Porter (2020). Pertanto, è possibile osservare nella Tabella 6.2 che gli edifici inagibili hanno sempre valori mediani più elevati rispetto a quelli parzialmente inagibili, con una minore probabilità di superamento. Il parametro periodo di costruzione è il più importante e gli edifici più vecchi comportano sempre una perdita di agibilità maggiore rispetto a quelli più recenti. Quindi, lo stato di conservazione R2 ha portato a una perdita di agibilità maggiore rispetto allo stato di conservazione R1, a parità di tempi di costruzione. Il numero di piani è stato considerato solo per lo stato di conservazione R1, perché per lo stato di conservazione R2 sono stati ottenuti risultati contraddittori. Le classi tipologiche con un numero di piani pari o superiore a 2 mostrano una perdita di utilizzabilità maggiore rispetto all'edificio con 1 piano, a parità di altri parametri.

Classi tipologiche	B	E	B, E
	Parzialmente inagibili $q = \exp(m)$	Inagibili $q = \exp(m)$	Parzialmente inagibili o inagibili $b$
	[g]	[g]	[ln(g)]
T1R1	0.206	0.279	0.865
T2R1	0.313	0.480	0.936
T3R1	0.822	1.474	1.195
T1R2	0.121	0.152	0.681
T2R2	0.175	0.225	0.605
T3R2	0.242	0.320	0.490
T1R1S1	0.273	0.345	0.866
T1R1S2	0.199	0.272	0.868
T2R1S1	0.401	0.585	0.969
T2R1S2	0.302	0.466	0.930
T3R1S1	1.218	2.190	1.419
T3R1S2	0.739	1.322	1.135

**Tabella 6.2 Parametri delle curve di fragilità lognormali per le classi tipologiche**

Le curve di fragilità, espresse in termini di livelli prestazionali parzialmente inagibili e inagibili degli edifici, possono rappresentare uno strumento cruciale per la valutazione preventiva dello scenario sismico e del rischio, in quanto l'agibilità è un indicatore adatto per l'allocazione dei finanziamenti economici dopo un terremoto. Infatti, l'agibilità ha una forte correlazione sia con i costi di riparazione sia con i tempi di assistenza alla popolazione, che rappresentano la parte

più significativa delle perdite sismiche dirette e indirette. Infine, in attesa di studi specifici e ulteriori calibrazioni basate sull'utilizzo di dati provenienti da altri terremoti, le curve di fragilità proposte possono essere utilizzate per stime preliminari in Paesi con costruzioni simili. Anche se manca un censimento sistematico degli edifici, il numero molto ridotto di parametri che definiscono il modello proposto è più veloce da raccogliere rispetto a quelli richiesti da modelli alternativi più dettagliati. Nella maggior parte dei casi, possono essere identificati da strumenti on-line come Google Street View e mappe storiche senza la necessità di un sopralluogo. Infine, un modello analogo può essere sviluppato per gli edifici residenziali in c.a. Va sottolineato che alcuni aspetti devono essere ulteriormente analizzati e migliorati, anche per l'implementazione di tali modelli nella piattaforma IRMA v2. Dunque, il modello proposto nel NRA 2018 (Dolce et al., 2021) è stato adottato nella predisposizione delle mappe di rischio 2021. Il modello valuta il numero di edifici/abitazioni inagibili e collassi sulla base della distribuzione del danno e dell'inventario del patrimonio edilizio. In particolare, gli edifici agibili ( $U_s$ ), tra quelli danneggiati, sono quelli interessati da danni molto lievi, mentre gli edifici inagibili si distinguono in due sottocategorie, ovvero edifici inagibili a breve periodo  $UnB_{st}$  (per danni lievi o moderati) ed edifici inagibili a lungo periodo  $UnB_{lt}$  (per danni più gravi). Le equazioni per stimare gli edifici agibili ed inagibili sono:

$$U_s = \sum_{i=1}^5 (N_{Mi} u_{usk}) + \sum_{i=1}^5 (N_{RCi} u_{usk}) \quad (11)$$

$$UnB_{st} = \sum_{i=1}^5 (N_{Mi} u_{stk}) + \sum_{i=1}^5 (N_{RCi} u_{stk}) \quad (12)$$

$$UnB_{lt} = \sum_{i=1}^5 (N_{Mi} u_{ltk}) + \sum_{i=1}^5 (N_{RCi} u_{ltk}) \quad (13)$$

dove:

- $N_{M/RCi}$  è il numero di edifici in muratura/CA che subiscono un livello di danno  $k$ ;
- $u_{usk}$  è la percentuale di edifici agibili per ogni livello di danno  $k$ ;
- $u_{stk}$  ( $u_{ltk}$ ) è la % di edifici inagibili a breve (lungo) periodo per ogni livello di danno  $k$ .

Le percentuali di edifici agibili e inagibili in funzione del livello di danno sono riportate in Tabella 6.3. Le stesse percentuali sono adottate sia per la muratura che per il CA. Il numero atteso di edifici collassati è valutato considerando il 100% degli edifici con livello di danno D5.

%	D1	D2	D3	D4	D5
$u_{us}$ (agibili)	100	60	0	0	0
$u_{st}$ (inagibili b.p.)	0	40	40	0	0
$u_{lt}$ (inagibili l.p.)	0	0	60	100	0

**Tabella 6.3 Percentuali di edifici agibili e inagibili in funzione del livello di danno (Dolce et al. 2021)**



## 6.2 Modelli per la stima delle casualties

Uno degli obiettivi principali di una valutazione di rischio sismico è quello di stimare il numero di casualties (morti e feriti), al fine di pianificare le future attività di protezione civile. La valutazione è essenziale anche per le agenzie mediche e di soccorso così da migliorare le strategie di preparazione e pianificazione delle emergenze. La stima delle casualties è sicuramente uno degli aspetti più complessi del processo di valutazione del rischio a causa della limitata qualità e disponibilità di informazioni. Sebbene le casualties siano principalmente causate dai danni agli edifici (Coburn and Spence 2002), un terremoto può causare morti e feriti in diversi modi (es. collasso delle infrastrutture, effetti secondari innescati, panico, etc.). I fattori che influenzano l'impatto reale di un terremoto possono essere principalmente correlati a (i) vulnerabilità (es. tipologia strutturale, caratteristiche costruttive, danno strutturale e non); (ii) esposizione (es. popolazione in diverse tipologie edilizie, occupazione al momento dell'evento, uso delle strutture); (iii) pericolosità (es. magnitudo, intensità macrosismica) o (iv) altri parametri (es. ricerca e soccorso, SAR). Nonostante i numerosi fattori coinvolti e le incertezze associate, negli ultimi anni numerosi studi e progetti hanno sviluppato modelli per la valutazione delle conseguenze sulle persone (es. "Human casualties in earthquakes", Spence et al. 2011a). Nell'ambito delle attività del Task 4.4, è stata innanzitutto condotta un'ampia revisione dei principali approcci disponibili in letteratura per stimare le conseguenze attese in termini casualties (morti e feriti) e sono stati analizzati i principali fattori coinvolti nei modelli di stima delle casualties (Casualty Estimation Model, CEM). Al fine di valutare l'influenza di ciascun fattore considerato nei diversi CEM nella stima finale (Coburn and Spence 2002; Jaiswal and Wald 2010; Zuccaro and Cacace 2011; So and Spence 2013; Khazai 2013 e IPCD 2018), sono stati preparati gli scenari di rischio basati sui dati relativi a due terremoti passati (Irpinia-Basilicata 1980 e L'Aquila 2009). In particolare, sono stati considerati i dati su 41 comuni colpiti dal terremoto dell'Irpinia-Basilicata 1980 e i dati sull'area urbana dell'Aquila per l'evento del 2009. Il database dei rilievi post-terremoto Da.D.O. è stato utilizzato per ottenere informazioni sulla tipologia edilizia e sulla distribuzione dei danni. Il confronto è stato effettuato in termini di numero di vittime per una maggiore affidabilità dei dati osservati.

### *Dati sui 41 comuni colpiti dal terremoto dell'Irpinia-Basilicata 1980*

Il terremoto dell'Irpinia-Basilicata è avvenuto il 23 novembre 1980 alle ore 18:34:52 ora locale con Mw pari a 6,81. I valori di intensità macrosismica secondo la scala MCS sono stati ricavati dal Database Macrosismico Italiano (DBMI15) e da Braga et al. (1982), con un valore massimo

osservato pari a IX. Il numero complessivo di edifici (assunto pari al numero di edifici rilevati) per i 41 comuni è pari a 38'079 mentre il numero totale di abitanti, calcolato dai dati ISTAT 1971, è pari a circa 140'000. Il numero di vittime registrate è stato ottenuto dalle seguenti fonti: (i) Cambridge Earthquake Impact Database (Spence et al., 2011b); (ii) Catalogo dei forti terremoti in Italia 461 a.C. – 1997 e area mediterranea 760 a.C. – 1500 (CFTI5Med; Guidoboni et al., 2019) realizzato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e (iii) Libro “Il dissesto geologico e geo ambientale in Italia dal dopoguerra al 1990” di Catenacci (1992).

#### Dati sull'area urbana dell'Aquila interessata dal terremoto del 2009

Il terremoto dell'Aquila 2009 è avvenuto il 6 aprile alle 03:32:39 ora locale con  $M_w$  pari a 6,3. All'area urbana dell'Aquila è stato assegnato un valore di intensità macrosismica pari a VIII-IX sia in termini di scala MCS che EMS-98 (Galli e Camassi, 2009; Tertulliani et al., 2010). Il numero totale di edifici per l'area urbana dell'Aquila (ricavato da Da.D.O.) è pari a circa 11'300 (circa 40'000 abitanti estrapolati da dati ISTAT). È stata selezionata solo l'area urbana dell'Aquila per le problematiche relative alla completezza del database (Del Gaudio et al., 2020; Nicodemo et al., 2020). Il numero reale di vittime è pari a 220 (dati del quotidiano “Il Centro”). Al fine di preparare gli scenari di rischio, in una prima fase è stata valutata la distribuzione del patrimonio edilizio in termini di tipologia strutturale per i 41 comuni del terremoto Irpinia-Basilicata del 1980 (di seguito, DB Irpinia-Basilicata) e per l'area urbana dell'Aquila relativa all'evento del 2009 (di seguito, DB area urbana L'Aquila). Tabella 6.4 mostra che la maggior parte degli edifici inclusi nel DB Irpinia-Basilicata hanno struttura in muratura (circa il 79%) mentre solo il 10% è realizzato con struttura in cemento armato (CA). Al contrario, per il DB area urbana L'Aquila, circa il 43% degli edifici hanno struttura in muratura (M) e una percentuale simile (40%) ha struttura in CA.

In seguito, applicando i criteri definiti da Chiauzzi et al. (2012) e Dolce et al. (2019), è stata assegnata agli edifici rilevati la vulnerabilità secondo le quattro classi definite dalla scala EMS-98 (Grünthal, 1998), ovvero “A”, “B”, “C” e “D” (relative ad alta, media, medio-bassa e bassa vulnerabilità). L'associazione degli edifici in M e CA nelle classi di vulnerabilità EMS-98 si basa rispettivamente sulle caratteristiche strutturali degli edifici e sull'età di costruzione. Per il DB area urbana L'Aquila, i risultati mostrano che circa il 70% del patrimonio edilizio è caratterizzato da classi di vulnerabilità basse e medio-basse. Per il DB Irpinia-Basilicata, invece, circa il 57% del patrimonio edilizio appartiene alla classe ad alta vulnerabilità (“A”) mentre il restante 43% è caratterizzato da vulnerabilità media o medio-bassa.

DB Irpinia-Basilicata			DB area urbana L'Aquila		
Tipologia edilizia	#	%	Tipologia edilizia	#	%
M	30033	79%	M	4847	43%
CA	4185	11%	CA	4486	40%
Acciaio	-	-	Acciaio	274	2%
Mista	3666	9%	Mista	774	7%
n.d.	195	1%	n.d.	930	8%
<b>Totale</b>	<b>38079</b>		<b>Totale</b>	<b>11311</b>	

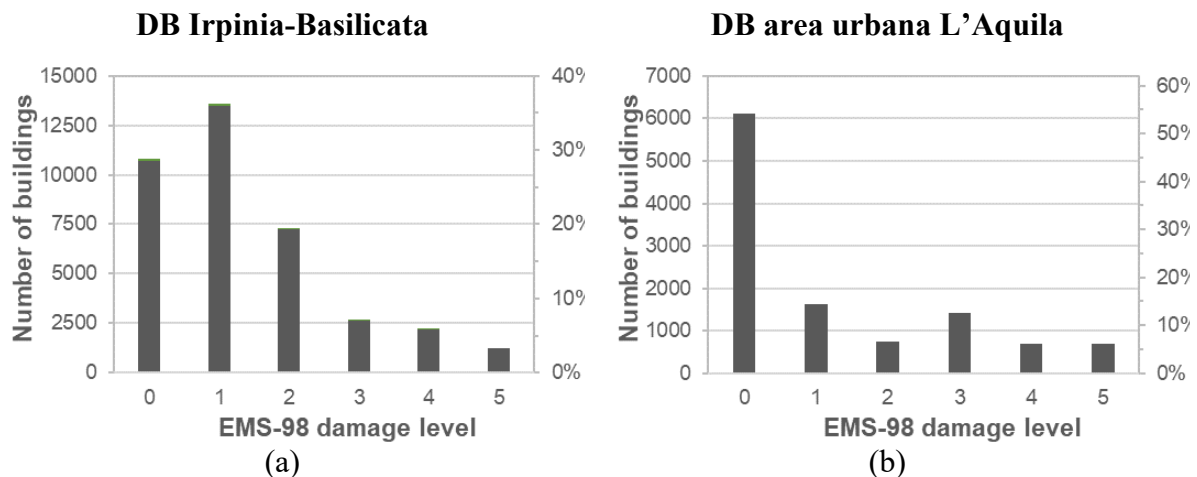
(a) (b)

**Tabella 6.4 Distribuzione del patrimonio edilizio dei 41 comuni del DB Irpinia-Basilicata (a) e del DB area urbana L'Aquila (b) in termini di tipologia edilizia**

Per quanto riguarda i dati sul danno, i diversi CEM considerano i livelli di danno secondo la classificazione EMS-98. I dati del terremoto Irpinia-Basilicata 1980 sono stati raccolti con la scheda Irpinia 1980 (Dolce et al., 2019) che consente di raccogliere i dati sui danni secondo otto livelli (da nessun danno ad edificio distrutto) per cinque componenti dell'edificio (Strutture verticali, Solai, Scale, Tetto e Tamponature-tramezzi). I dati relativi al terremoto dell'Aquila 2009 sono stati invece raccolti con la scheda AeDES 06/2008 (Baggio et al., 2007), in cui il danno per ciascuna delle cinque componenti (le stesse considerate nella scheda Irpinia 1980) è definito secondo quattro livelli di danno (D0, D1, D2-D3, D4-D5) e tre livelli di estensione ( $<1/3$ ;  $1/3-2/3$ ;  $>2/3$ ). Per assegnare un unico livello di danno EMS-98 (da D0 a D5) a ciascun edificio, i criteri di conversione proposti in Dolce et al. (2019) sono stati applicati ai danni relativi alla sola struttura verticale (VS). Figura 6.3 mostra la distribuzione in termini di livelli di danno EMS-98 rispettivamente per DB Irpinia-Basilicata e DB area urbana L'Aquila. Come si può notare, circa il 10% del patrimonio edilizio del DB Irpinia-Basilicata è stato gravemente danneggiato (D4) o crollato (D5). Per DB area urbana L'Aquila, circa il 12% degli edifici ha subito un livello di danno  $\geq 4$ .

Si segnala che, a causa della non disponibilità di informazioni sulla vulnerabilità e/o sul danno, nel confronto è stato considerato un dataset rispettivamente di circa 34'000 e 9'300 edifici (solo M e CA) per DB Irpinia-Basilicata e DB area urbana L'Aquila. Al fine di stimare la popolazione nelle tipologie edilizie in CA e in M, è stata ricavata la distribuzione in termini di numero di piani per gli edifici in CA e M dal database Da.D.O. Successivamente, il numero medio di persone per tipologia, M o CA, è stato stimato come prodotto tra il numero medio di persone per piano e il numero medio di piani per edificio. Di conseguenza, per il terremoto dell'Aquila, è stato stimato un numero medio di persone per tipologia di edificio pari rispettivamente a 3 per

M e 4.5 per CA. Per il DB Irpinia-Basilicata sono stati stimati valori pari a 3,5 per M e 4,5 per CA. Per stimare il tasso di occupazione al momento dell'evento, è stato considerato l'approccio di Coburn e Spence (2002). Considerando la curva relativa agli edifici residenziali (per popolazione urbana) e l'ora dell'evento, è stato ottenuto un valore del tasso di occupazione pari al 67% per Irpinia Basilicata 1980 e al 72,5% per L'Aquila 2009.

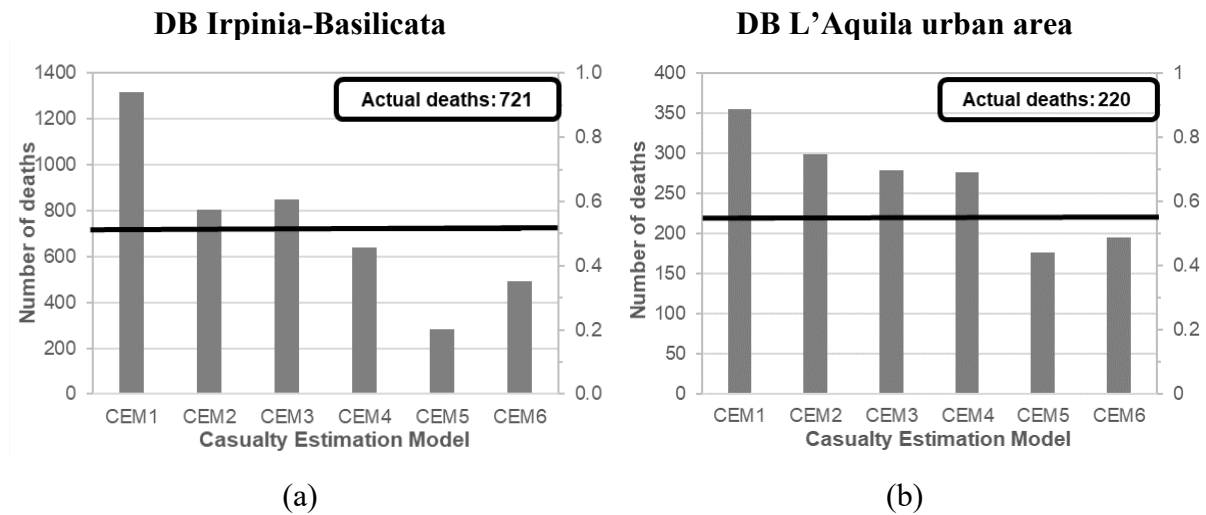


**Figura 6.3** Distribuzione del danno in termini di livelli EMS-98 per il DB Irpinia-Basilicata (a) e il DB area urbana L'Aquila (b)

Dunque, sulla base dei parametri sopra calcolati per il DB Irpinia-Basilicata e il DB area urbana L'Aquila, sono stati applicati i CEM e il numero di vittime è stato stimato (Figura 6.4). Per CEM3 (Jaiswal e Wald, 2010), i parametri ( $\theta$  e  $\beta$ ) sono rispettivamente pari a 13,23 e 0,18 e la popolazione esposta è assunta pari al numero di abitanti. Per l'applicazione del CEM1 (Coburn e Spence, 2002), il parametro M5 (i.e. capacità SAR) è assunto pari a 0,45 per edifici in M e 0,7 per edifici in CA per il terremoto dell'Aquila 2009 (vedi Dolce, 2010) mentre 0,95 per M e 1 per CA per il terremoto Irpinia-Basilicata 1980.

Per DB Irpinia-Basilicata (Figura 6.4a), CEM1 e CEM5 stimano il numero più alto e più basso di vittime, rispettivamente pari a circa 1'300 e 300. CEM1, CEM2 e CEM3 forniscono una stima superiore al numero osservato di vittime mentre CEM4, CEM5 e CEM6 forniscono valori inferiori. Per quanto riguarda il DB area urbana L'Aquila, Figura 6.4b mostra che il numero di vittime varia da circa 180 per CEM5 a circa 350 per CEM1. Rispetto al numero osservato, tutti i CEM forniscono una sovrastima, ad eccezione di CEM5 e CEM6. Va sottolineato che non vengono considerati le vittime derivanti da danni non strutturali, effetti secondari (frana, incendio, ecc.), guasti infrastrutturali (viadotti, ponti, ecc.) o semplicemente panico. Le vittime derivanti dalle altre cause (es. effetti secondari; guasti infrastrutturali o panico) raramente

costituiscono una quota significativa delle perdite totali. In conclusione, i risultati confrontati con i dati reali mostrano differenze significative dovute principalmente ai fattori coinvolti in ciascun CEM (es. livelli di danno, tasso di occupazione, tipologia edilizia).



- CEM1** Coburn and Spence (2002)
- CEM2** So and Spence (2013)
- CEM3** Jaiswal and Wald (2010)
- CEM4** Zuccaro and Cacace (2011)
- CEM5** SYNER-G (2013)
- CEM6** NRA (2018)

Figura 6.4 confronto tra i diversi CEM sul DB Irpinia-Basilicata (a) e il DB area urbana L'Aquila (b)

Sulla base dei risultati ottenuti è stata definita una preliminare proposta di aggiornamento del modello adottato nel NRA 2018 (IPCD 2018; Dolce et al. 2021). Nel modello NRA 2018, la probabilità di morti e feriti tra gli occupanti dell'edificio è determinata dai livelli di danno più severi, D4 e D5, secondo la classificazione EMS-98 (Grünthal 1998). Sulla base delle precedenti valutazioni di rischio (Lucantoni et al. 2001, Bramerini and Di Pasquale 2008), le seguenti equazioni sono adottate per calcolare il numero atteso di morti  $N_d$  o feriti  $N_i$ :

$$N_d = \sum_{j=1}^{n_M} [(O_{Mj,D4} \cdot p_{d,D4} + O_{Mj,D5} \cdot p_{d,D5})] + \sum_{l=1}^{n_{RC}} [(O_{RCl,D4} \cdot p_{d,D4} + O_{RCl,D5} \cdot p_{d,D5})] \quad (14)$$

$$N_i = \sum_{j=1}^{n_M} [(O_{Mj,D4} \cdot p_{i,D4} + O_{Mj,D5} \cdot p_{i,D5})] + \sum_{l=1}^{n_{RC}} [(O_{RCl,D4} \cdot p_{i,D4} + O_{RCl,D5} \cdot p_{i,D5})] \quad (15)$$

dove:

- $n_M$  and  $n_{RC}$  sono rispettivamente il numero di tipologie edilizie in M e CA;
- $O_{Mj,D4/D5}$ ,  $O_{RCl,D4/D5}$  è il numero di occupanti negli edifici M (RC) (la cui tipologia strutturale è identificato da j (l)), che hanno subito un livello di danno D4 o D5;

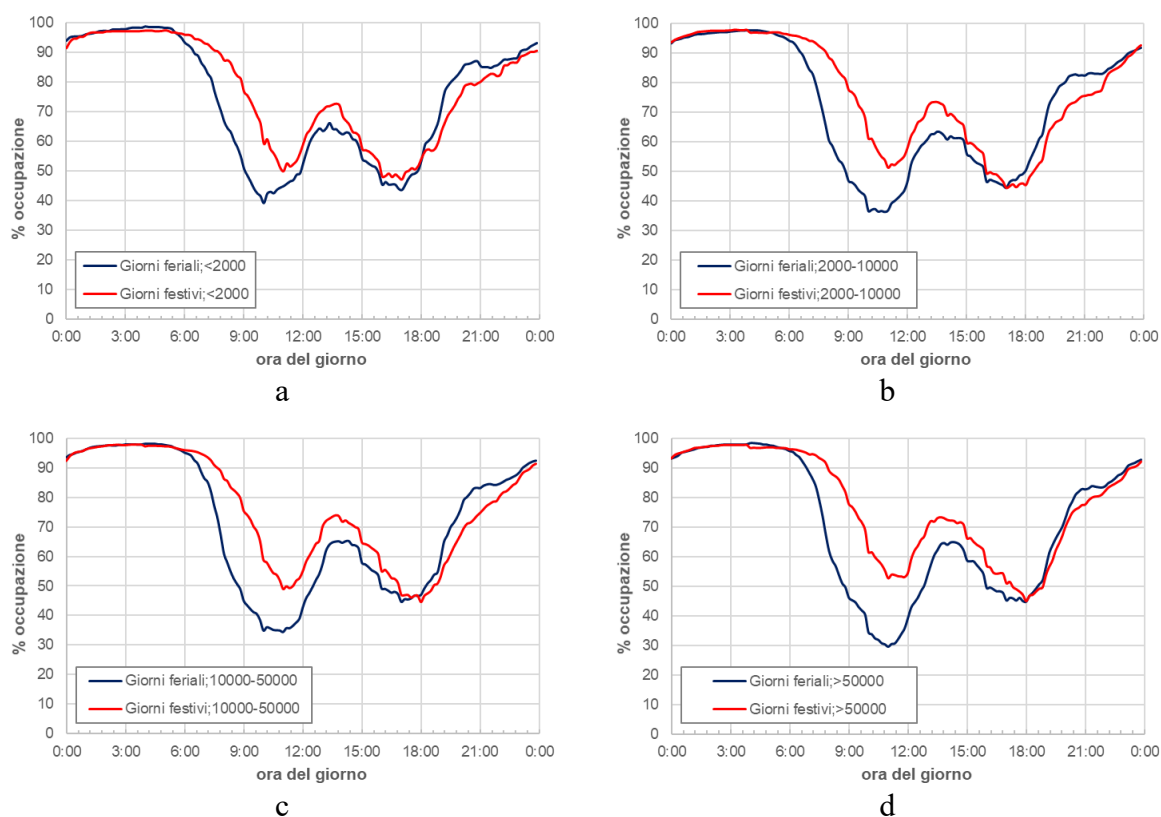
- $p_{d,D4}$ ,  $p_{d,D5}$  ( $p_{i,D4}$ ,  $p_{i,D5}$ ) sono la percentuale di vittime (feriti) rispetto agli occupanti in edifici con livelli di danno D4 e D5.

Le percentuali di morti e feriti per D4 e per D5 utilizzate nel modello adottato nel NRA 2018 sono riportate in Tabella 6.5.

Casualties	Livello di danno D4	Livello di danno D5
Vittime $p_d$ (%)	1	10
Feriti $p_i$ (%)	5	30

Tabella 6.5 Percentuali di casualties per D4 e per D5 (Dolce et al. 2021)

Il materiale da costruzione non è stato considerato nel modello (es. stessi valori per edifici in muratura, M, e in cemento armato, CA). Tuttavia, i meccanismi di danno e collasso negli edifici in M e CA sono piuttosto diversi e ciò può influire sulla stima del numero di morti e feriti. Alcuni modelli di letteratura propongono percentuali diverse a seconda del materiale da costruzione (es. Zuccaro and Cacace 2011). Inoltre, l'occupazione al momento dell'evento non è stata esplicitamente considerata nella stima ma implicitamente inclusa nella percentuale di casualties. A tal proposito, gli scenari di rischio hanno evidenziato il ruolo e il peso del tasso di occupazione al momento dell'evento nella valutazione finale. Pertanto, l'obiettivo della proposta è quello di considerare in un approccio metodologico trasparente questi fattori (materiale da costruzione e occupazione al momento dell'evento). Per quanto riguarda l'occupazione al momento dell'evento, i dati dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT 2013; indagine "La vita quotidiana e le opinioni dei cittadini") sono stati estrapolati e analizzati per definire curve specifiche relative all'occupazione tipica degli edifici residenziali (approccio simile a quello di Coburn and Spence 2002). Sono stati considerati i dati di occupazione degli edifici residenziali durante i giorni feriali (relativi a un giorno generico) e festivi (associati ai dati della domenica). Secondo la classificazione ISTAT, i comuni sono suddivisi in 4 classi di popolazione per numero di abitanti: <2000; 2000-10000; 10000-50000 e >50000. Sulla base dell'analisi dei dati ISTAT, Figura 6.5 riporta le curve relative all'occupazione tipica degli edifici residenziali nei giorni feriali e festivi per le 4 classi.



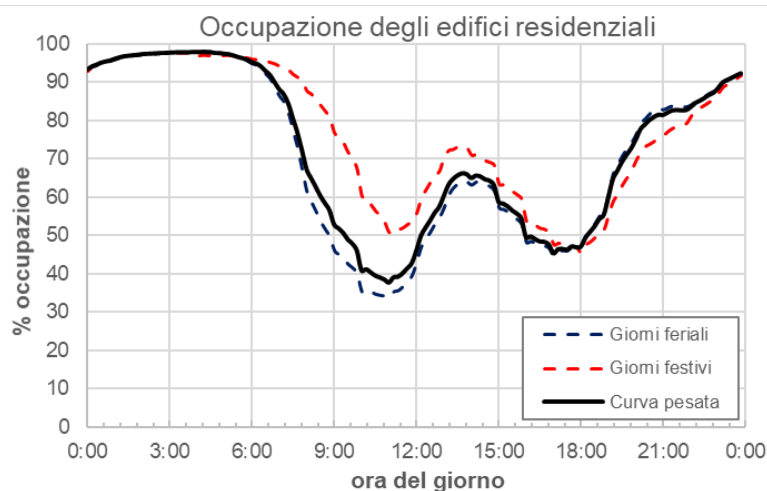
**Figura 6.5 Occupazione degli edifici residenziali nei giorni feriali (curva blu) e festivi (curva rossa) per le 4 classi di popolazione: (a)  $\leq 2000$ ; (b) 2000-10000; (c) 10000-50000 e (d)  $> 50000$**

Partendo dai dati sopra riportati è stata definita una curva ponderata del tasso di occupazione al momento dell'evento. In Figura 6.6 sono riportate le curve ottenute come media pesata sulla distribuzione della popolazione italiana in base alla classificazione dei comuni in termini di numero di abitanti (vedi Tabella 6.6), derivata direttamente dalla piattaforma IRMA (Borzi et al. 2021a). Oltre alle curve per i giorni feriali (linea tratteggiata blu) e festivi (linea tratteggiata rossa), la Figura 6.6 riporta la curva ponderata su un anno tra giorni feriali e festivi (linea continua nera).

	<i>&lt;2000</i>	<i>2000-10000</i>	<i>10000-50000</i>	<i>&gt;50000</i>	<i>Total</i>
<i># comuni</i>	3563	3326	1062	141	8092
<i>% comuni</i>	44%	41%	13%	2%	
<i># abitanti</i>	3418937	15232444	20669060	19509799	58830240
<i>% abitanti</i>	6%	26%	35%	34%	

**Tabella 6.6 Distribuzione dei comuni italiani secondo le 4 classi relative al numero di abitanti (prima e seconda riga) e distribuzione del numero di abitanti per ciascuna classe (terza e quarta riga)**





**Figura 6.6** Curve pesate dell'occupazione tipica degli edifici residenziali per i giorni feriali (linea tratteggiata blu), per i giorni festivi (linea tratteggiata rossa) e per la media tra giorni feriali e festivi (linea continua nera)

Per quanto riguarda il materiale da costruzione, sulla base dei principali studi di letteratura e dei risultati ottenuti dagli scenari per i terremoti Irpinia-Basilicata del 1980 e L'Aquila del 2009, una proposta preliminare è quella di considerare la percentuale di casualties (morti e feriti) proposta da Zuccaro and Cacace 2011 (leggermente rivista nel Task 4.4). Gli autori hanno fornito percentuali di morti e feriti funzione del danno subito dall'edificio (considerando i livelli D4 e D5 secondo la classificazione EMS-98) e della tipologia edilizia (M e CA). In conclusione, le attività del Task 4.4 hanno prodotto una preliminare proposta di modello aggiornato (rispetto a quello adottato nel NRA 2018) finalizzato alla stima delle casualties (morti e feriti) per il contesto italiano. Considerando esplicitamente il tasso di occupazione al momento dell'evento, la percentuale di casualties (morti e feriti) del modello proposto dipende dai livelli di danno, D4 e D5, e dalle tipologie edilizie, M e CA. Per essere implementato nella piattaforma IRMA, sulla base dell'equazione adottata nel NRA 2018 (Eq. (14), Eq. (15)), è necessario definire un valore medio del tasso di occupazione e considerarlo implicitamente nella percentuale di morti e feriti. Vale la pena sottolineare che alcuni aspetti devono essere ulteriormente analizzati e migliorati, in particolare una definizione più accurata della percentuale di casualties per le tipologie M e CA. Dunque, al fine di stimare il numero di casualties (morti e feriti), il modello proposto nel NRA 2018 (Dolce et al., 2021) è stato attualmente utilizzato.

### 6.3 Modelli per la stima dell'agibilità e delle perdite economiche

La previsione degli effetti sismici e lo sviluppo di modelli affidabili per definire mappe di rischio sismico, scenari di perdita e strategie di mitigazione, richiedono la definizione della relazione tra danneggiamento e perdite. Lo studio riportato nel 2018, NRA (NDPC 2018; Dolce et al. 2021), mostra che le perdite attese sono evidentemente significativamente influenzate dalla distribuzione dei danni. Nel dettaglio, le perdite economiche dirette nel NRA 2018 sono valutate in funzione del livello di danno e del costo di riparazione ad esso corrispondente, secondo l'espressione seguente:

$$L = CU \left( \sum_{j=1}^{np} \sum_{k=1}^5 A_{M,j} p_{M,k} c_k + \sum_{j=1}^{np} \sum_{k=1}^5 A_{RC,j} p_{RC,k} c_k \right) \quad (16)$$

dove:

- $np$  è il numero di piani o classi di piano;
- $CU$  è il costo di ricostruzione dell'edificio (Euro/m<sup>2</sup>) che include spese tecniche e IVA;
- $A_{M/RC,j}$  è l'area relativa alla tipologia edilizia (muratura "M" o cemento armato "RC") con numero di piani pari a "j";
- $P_{M/RC,k}$  è la probabilità di danno relativa alla tipologia edilizia (M o RC) che ha subito un livello di danno pari a "k";
- $c_k$  è la percentuale del costo di riparazione (rispetto a  $CU$ ) per ogni livello di danno "k".

Dai dati monitorati nel processo di ricostruzione degli edifici residenziali danneggiati dal sisma di L'Aquila del 2009 (Di Ludovico et al. 2017a, b), è emerso che normalizzando i costi effettivi di riparazione del danno (Actual Repair Costs,  $ACR$ ) rispetto al costo di ricostruzione di un edificio ( $CU$ ) assunto pari a 1350 €/m<sup>2</sup>, i costi percentuale di riparazione o sostituzione ( $c_k$  o  $\%Cr$ ) per i diversi livelli di danno risultano pari ai valori riportati in Tabella 6.7.

CU (Euro/m <sup>2</sup> )	D1	D2	D3	D4	D5
1350	2	10	30	60	100

**Tabella 6.7 Percentuali del costo di riparazione adottate nel NRA 2018 (Dolce et al 2021)**

A partire dai valori riportati nell' NRA 2018 [NDPC 2018], è stato effettuato un ulteriore e più approfondito studio per fornire delle distribuzioni probabilistiche di  $\%Cr$ . Lo studio è stato effettuato su 4664 edifici in c.a. e su 3833 edifici in muratura danneggiati dal terremoto di L'Aquila del 2009.

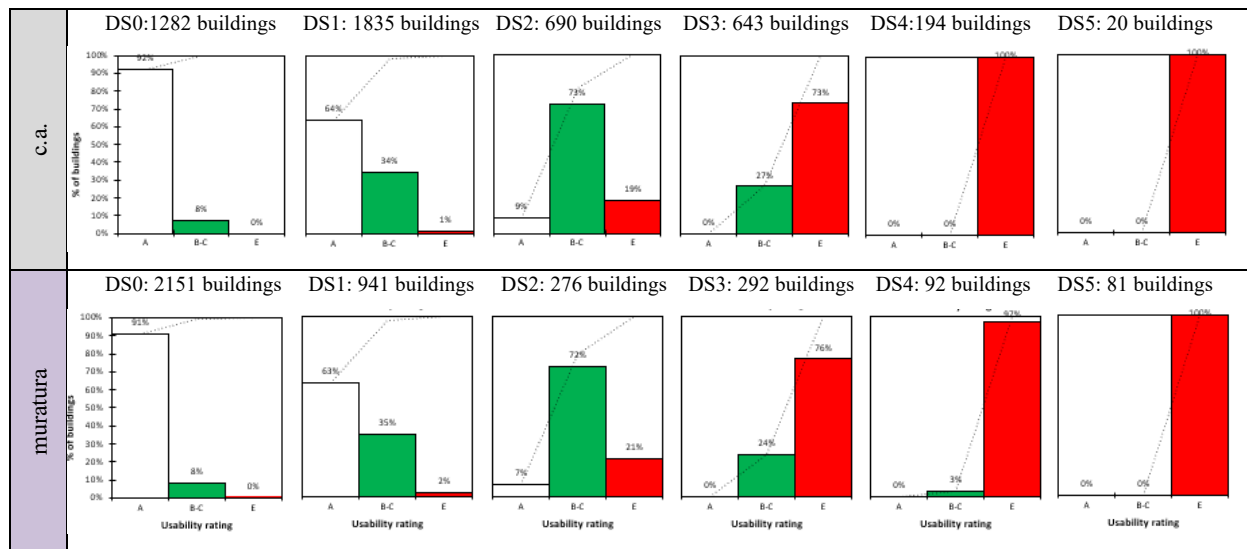
Il  $\%C_r$  è stato calcolato come il rapporto tra i  $ACR$ , calcolati dai tecnici incaricati dai proprietari degli edifici a presentare richiesta di contributo a fondo perduto, e il  $CU$ . Gli  $ACR$  non sono comprensivi di IVA, comprendono le spese tecniche e si riferiscono ai costi per il ripristino delle condizioni pre-sisma di elementi strutturali o non strutturali. Il  $\%C_r$  è stato definito in funzione del diverso livello di danno espresso in termini di:

- i) Esito di agibilità, A, B-C, E;
- ii) Livello di danno globale, DS;

Per quanto riguarda l'esito di agibilità, gli esiti A, B-C ed E corrispondono rispettivamente: A. edifici agibile; B. Edificio temporaneamente inagibile (tutto o in parte) ma agibile con provvedimenti di pronto intervento; C. edificio parzialmente inagibile; E. Edificio inagibile; la tipologia di edifici e il livello di danno sono definiti in accordo ai dati raccolti mediante le Schede AeDES (Baggio et. al. 2007) utilizzate nell'immediato post sisma del 2009 per la valutazione dell'agibilità e dei danni.

Si fa presente che la sezione 4 della scheda Aedes consente di archiviare le informazioni relative a quattro livelli di danno (D0 nessun danno, D1 danno lieve; D2-D3 danno medio-grave; D4-D5 danni molto gravi o crollo) e la relativa estensione di tale danno per gli elementi strutturali e non strutturali (Strutture verticali VS, Strutture orizzontali, F, Scale, S, coperture, R, and Tamponature-tramezzi, IP). I dati, così raccolti, sono stati convertiti in livello di danno globale di edificio, DS, mediante matrici di conversione riportate in (Del Gaudio et al. 2020) per gli edifici in c.a. e in (Dolce et al. 2019) per gli edifici in muratura. La prima matrice, per determinare il DS, prende in considerazione il danno massimo rilevato sulle VS e IP, mentre la seconda matrice considera il danno massimo rilevato sulle VS.

La Figura 6.7 riporta la distribuzione dell'esito di agibilità associato ad ogni livello di danno globale (DS) per gli edifici in c.a. e in muratura. Inoltre, viene riportato il numero di edifici per ogni livello di danno. La Figura 6.7 mostra che la percentuale di edifici con esito A diminuisce progressivamente con il crescere del DS, ed è nulla per DS superiore a DS2. Una percentuale significativa di edifici con esito di agibilità E si riscontra a partire dal DS3 sia per gli edifici in c.a. che per quelli in muratura.



**Figura 6.7 Distribuzione dell'esito di agibilità in funzione del livello di danno per edifici residenziali in c.a. e in muratura**

L'associazione tra DS e costi risulta uno strumento utile per definire gli scenari di perdita in "tempo di pace", una volta che in una determinata area, sono noti sia i dati sull'esposizione che l'input sismico (o, in un approccio probabilistico, diversi eventi sismici potenziali e la loro frequenza annuale di superamento). Invece, l'associazione tra costi ed esito di agibilità risulta fondamentale per pianificare i costi diretti e indiretti (per esempio i costi relativi all'assistenza alla popolazione) durante le fasi di ricostruzione post-emergenza. Infatti, l'esito di agibilità influisce fortemente sui tempi di ripristino delle condizioni dell'edificio pre-evento sismico e sui costi di assistenza degli occupanti.

Utilizzando le curve di fragilità empiriche o analitiche è possibile stabilire facilmente quanti edifici raggiungono uno specifico DS.

Tuttavia, la valutazione in "tempo di pace" del numero di edifici che raggiungono un determinato esito di agibilità risulta ancora affetta da incertezze, poiché mancano ancora modelli affidabili basati su tale parametro. Pertanto, è utile fornire la correlazione tra le percentuali di DS associate a ciascun esito di agibilità per gli edifici in C.A. e in muratura come riportato nella Figura 6.8

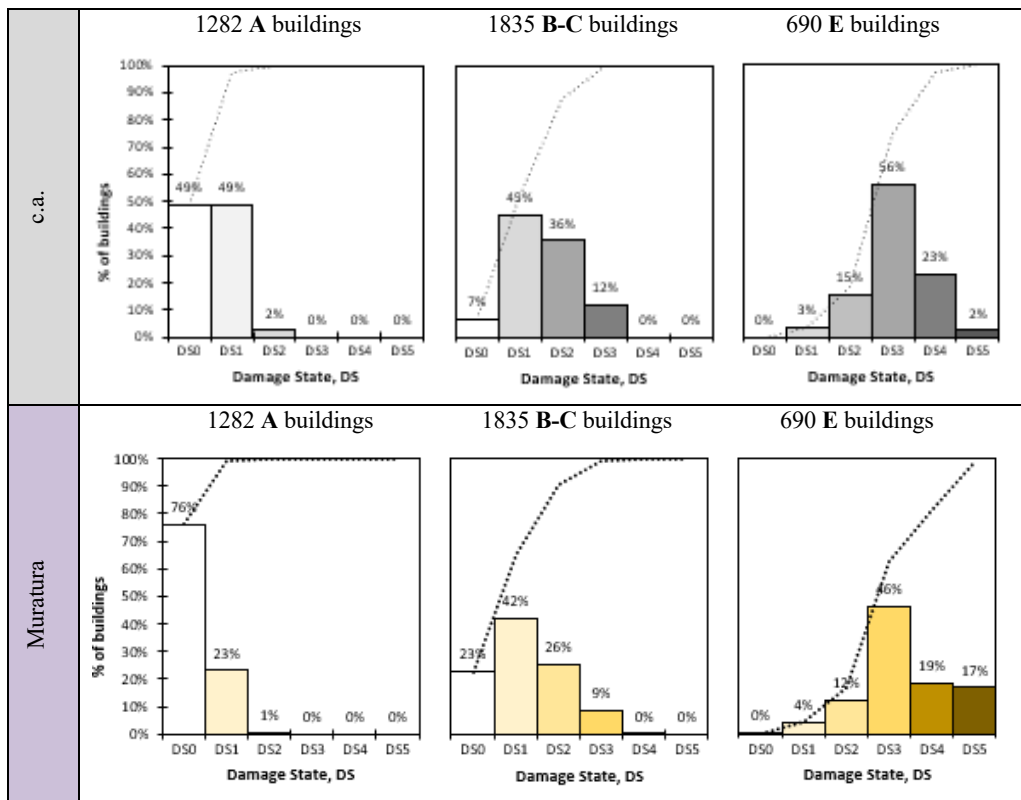


Figura 6.8 Distribuzione del livello di danno in funzione dell'esito di agibilità degli edifici residenziali in c.a. e in muratura

Le funzioni di densità di probabilità (PDF) di  $\%C_r$  per gli edifici in c.a. e in muratura in funzione dell'esito di agibilità sono illustrate nella Figura 6.9.

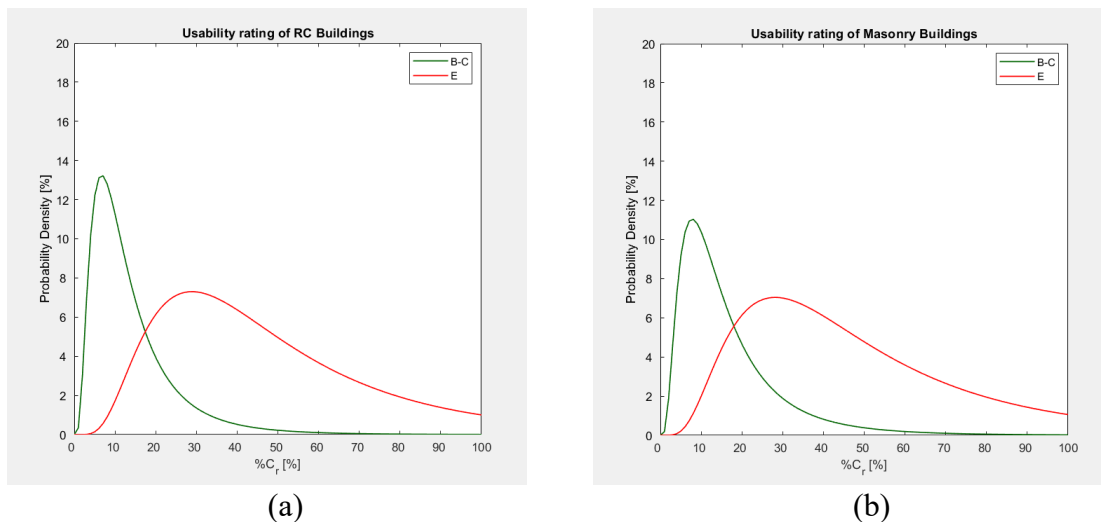
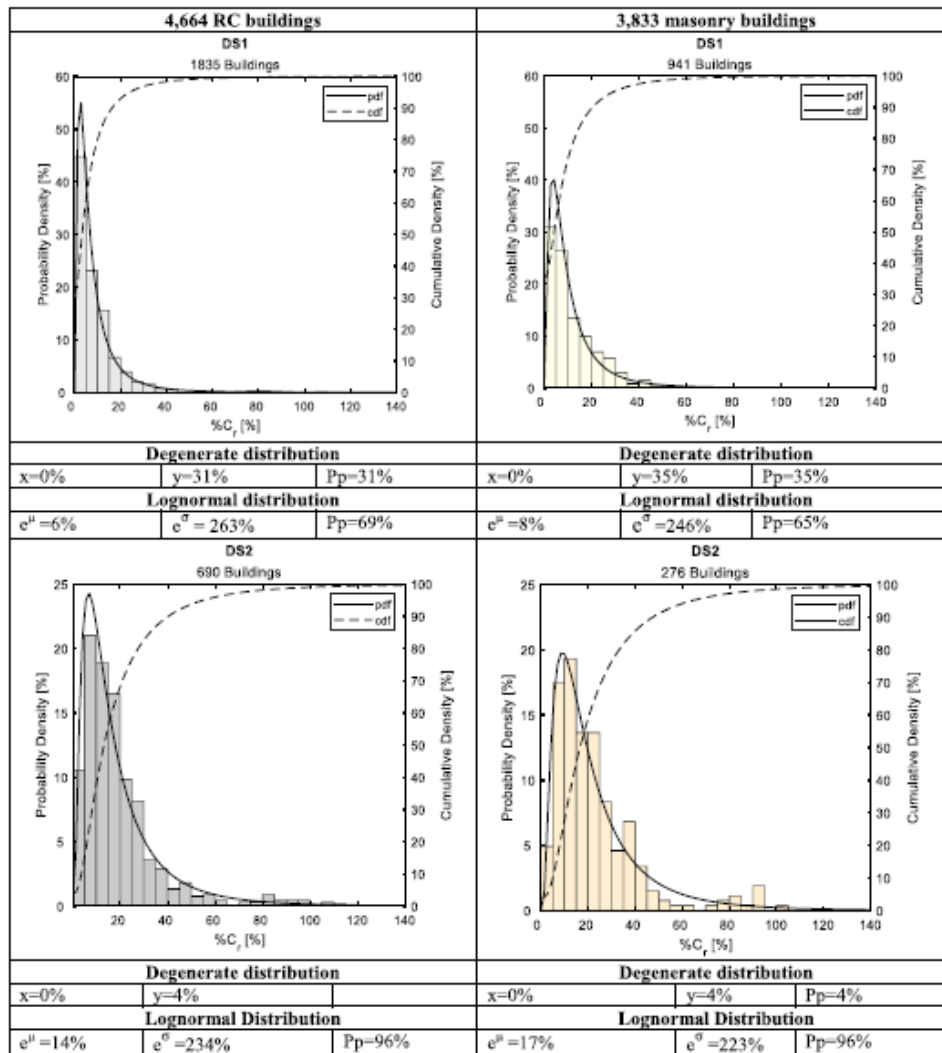


Figura 6.9 Densità di probabilità di  $\%C_r$  in funzione dell'esito di agibilità relativa agli edifici in c.a. (a) e in muratura (b)

Analogamente, in Figura 6.10 si riportano le funzioni di densità di probabilità (PDF) del  $\%C_r$ , determinate in funzione di ciascun DS per gli edifici in c.a. e in muratura e i relativi parametri per derivare le funzioni di distribuzione di probabilità.



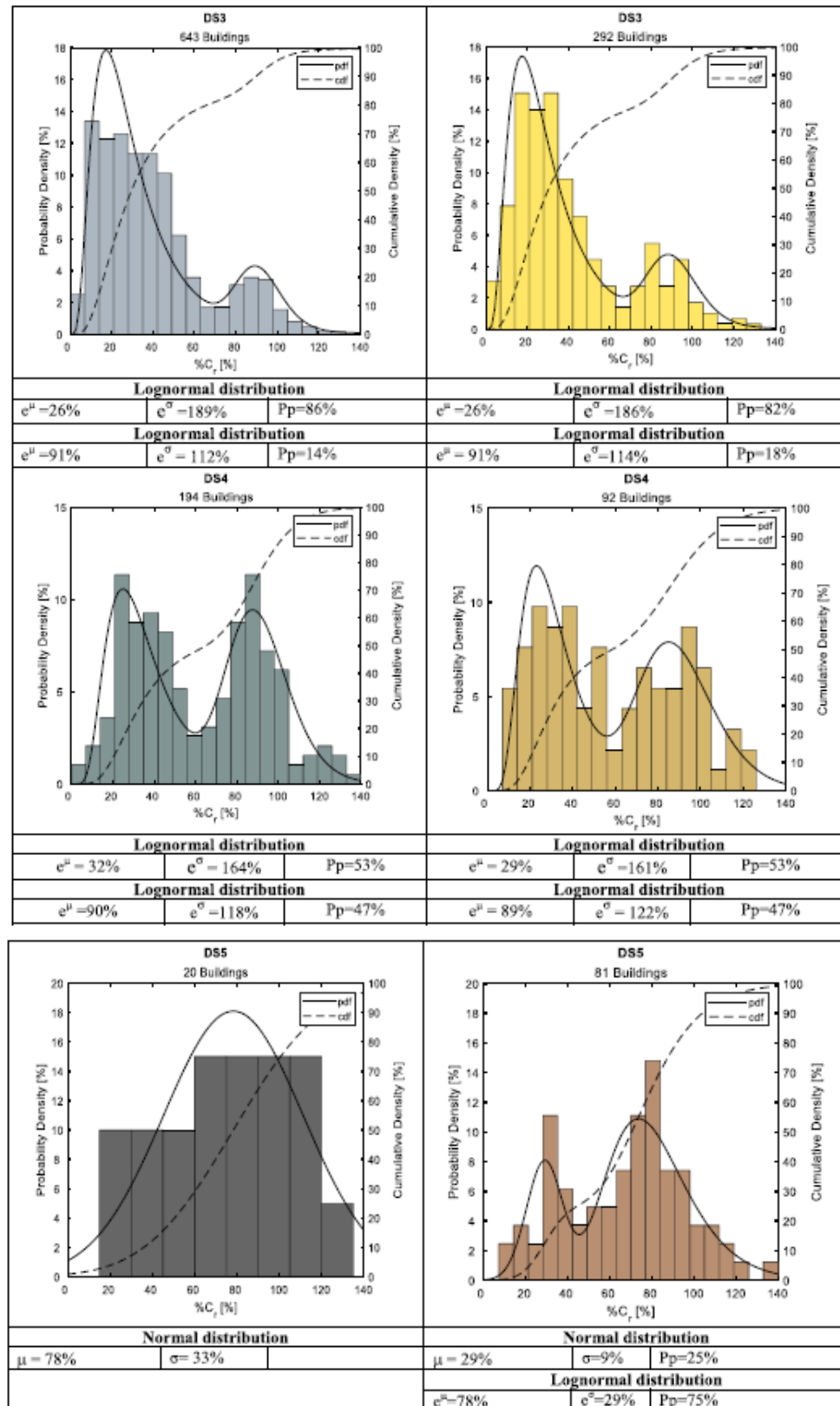


Figura 6.10 Densità di probabilità di %Cr in funzione del livello di danno per gli edifici in c.a. e in muratura



Nell'ambito delle attività svolte nel Task 4.4 si è inoltre focalizzata l'attenzione sull'analisi dei costi di assistenza alla popolazione, che rappresentano una parte significativa dei costi indiretti. Per definire il rapporto tra il danno globale, DS, e i costi di assistenza alla popolazione, è stata effettuata un'analisi approfondita delle differenti forme di assistenza alla popolazione e dei relativi costi persona/mese. A seguito del terremoto di L'Aquila del 2009 l'assistenza alla popolazione è stata fornita mediante cinque forme:

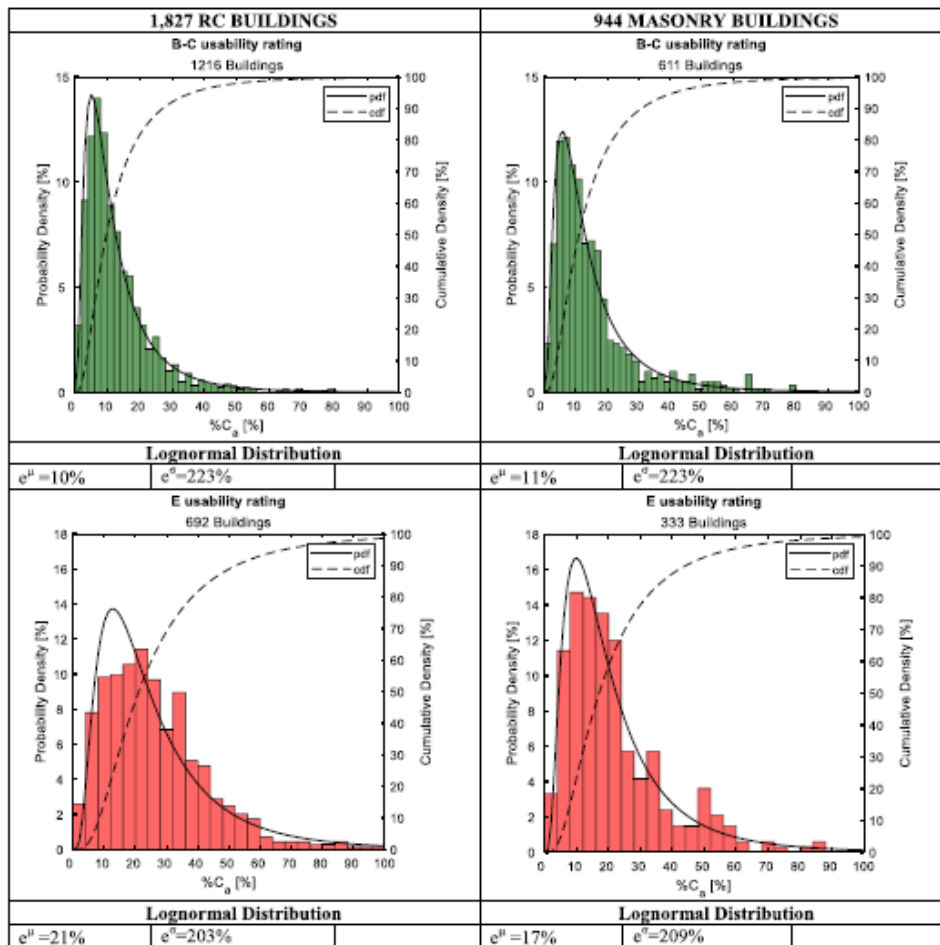
- i) Tende;
- ii) Alberghi;
- iii) Contributo autonoma sistemazione (C.A.S.);
- iv) Moduli Abitativi Provvisori, M.A.P.;
- v) Complessi abitativi antisismici, sostenibili ed ecologicamente compatibili, il cosiddetto progetto C.A.S.E., (Dolce 2010).

I costi delle varie forme di assistenza e il costo medio mensile per persona,  $C_i$ , desunti dai dati della ricostruzione sono riportati in Tabella 6.8.

<b>Forme di assistenza</b>	<b>Costo di assistenza</b>	<b>Costo medio/mese/persona</b> $C_i$
Tende	M€ 175	€1,191.2
Hotel	M€ 319	€1,524.40
C.A.S.	M€ 235	€227.40
Progetto C.A.S.E.	M€ 853	€ 581.70
M.A.P	M€ 116	€ 350.20

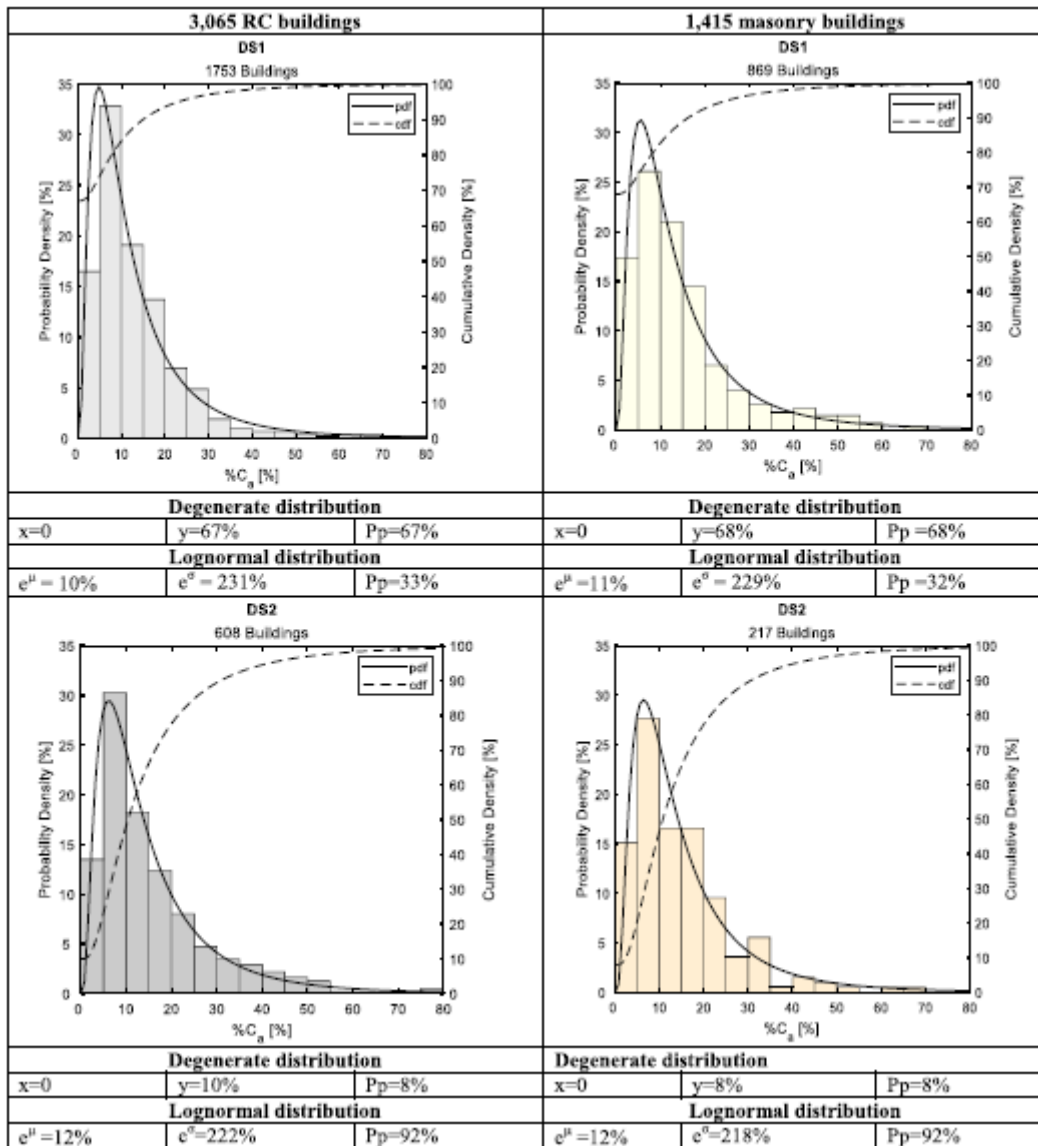
**Tabella 6.8 Costo di assistenza alla popolazione e relativo costo medio mensile a persona,  $C_i$**

Questi costi sono stati associati ad ogni edificio in funzione del livello di danno, espresso in termini di esito di agibilità e DS, per esprimere i costi di assistenza in termini di costo percentuale rispetto al costo unitario di riferimento di un nuovo edificio, vale a dire  $\%C_a$  (Di Ludovico et al. 2021). Una volta calcolato il  $\%C_a$  per ogni edificio, è stata studiata la relazione tra il livello di danno e  $\%C_a$ . La funzione di densità di probabilità più adatta (PDF) per il  $\%C_a$  in funzione di ciascun esito di agibilità per gli edifici in c.a. e in muratura è riportata in Figura 6.11. così come i relativi parametri chiave PDF per derivare le funzioni di distribuzione di probabilità.



**Figura 6.11** Densità di probabilità di  $\%C_a$  in funzione dell'esito di agibilità relativa agli edifici in C.A. (a) e in muratura (b)

Analogamente la Figura 6.12 mostra le funzioni di densità di probabilità (PDF) di  $\%C_a$  in funzione di ogni DS per gli edifici in c.a. e in muratura e i relativi parametri per derivare le funzioni di distribuzione di probabilità.



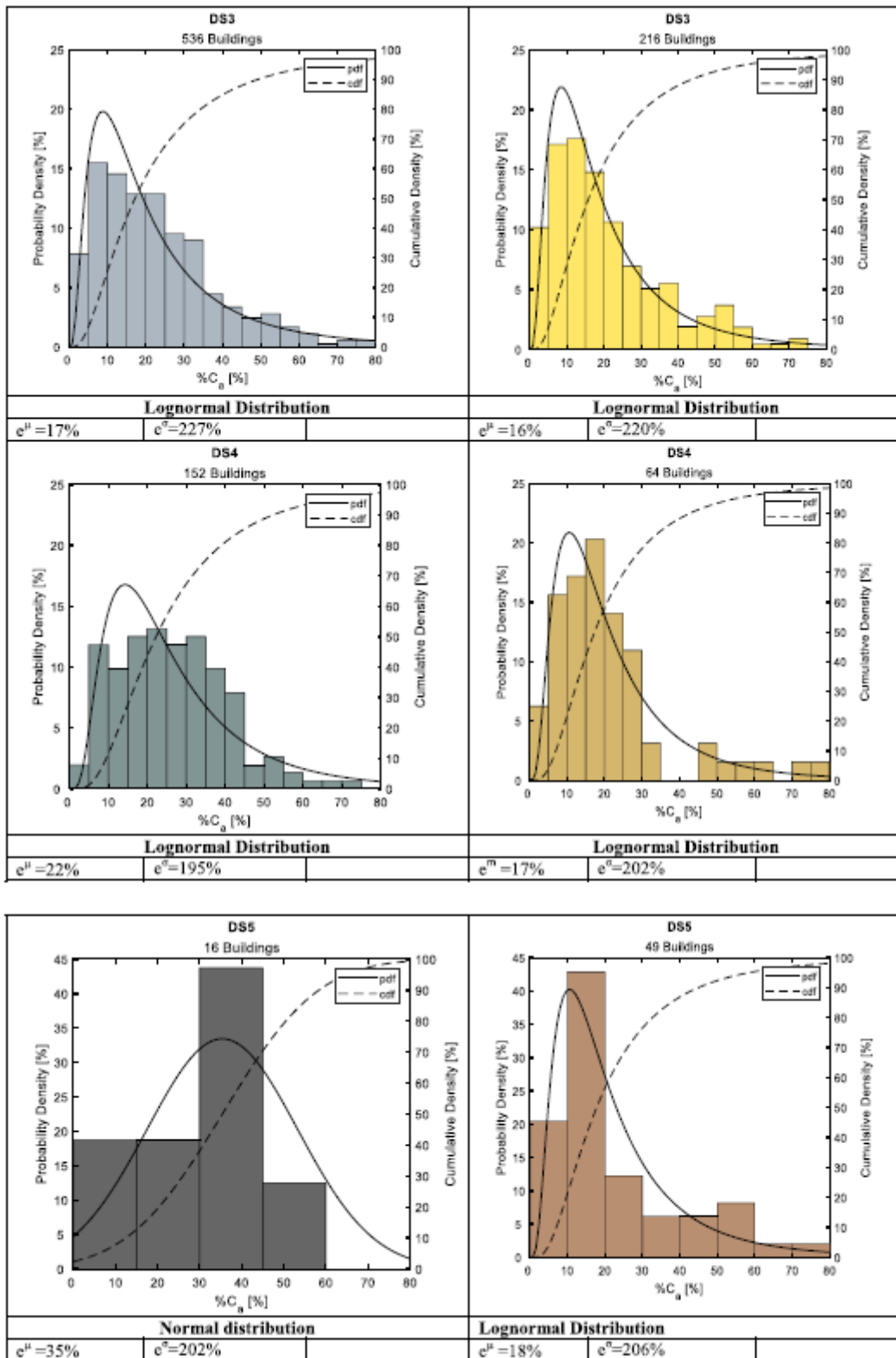


Figura 6.12 Densità di probabilità di %C<sub>a</sub> in funzione del livello di danno DS per gli edifici in c.a. e in muratura

Le funzioni di densità di probabilità di  $\%C_r$  e  $\%C_a$  possono essere utilizzate per valutare gli scenari di perdita su larga scala; esse consentono di correlare i costi di riparazione e di assistenza alla popolazione all'esito di agibilità o ai livelli di danno ottenuti mediante dati raccolti post sisma o tramite le curve di fragilità empiriche/analitiche.

Infine, tra le attività del Task 4.4 vi è stata la calibrazione di una relazione empirica per associare, a livello di edificio, i costi diretti (espressi come costi di riparazione) ai costi indiretti (espressi come costi di assistenza alla popolazione). Questa relazione, una volta calcolato il  $\%C_r$  utilizzando le procedure disponibili in letteratura (ad esempio Performance Assessment Calculation Tool (PACT) ecc.), consente immediatamente di determinare il  $\%C_a$ . Questa relazione  $\%C_r$ — $\%C_a$  assume un'espressione tri-lineare:

$$\begin{cases} \%C_a = 0 & \text{for } \%C_r \leq 5\% \\ \%C_a = 0.77 \cdot \%C_r & \text{for } 5\% < \%C_r \leq 25\% \\ \%C_a = 0.77 \cdot \%C_r + 0.15 & \text{for } \%C_r > 25\% \end{cases}$$

Vale la pena sottolineare che alcuni aspetti devono essere ulteriormente analizzati e particolare attenzione deve essere dedicata alle modalità di implementazione del modello nella piattaforma IRMA v2. Dunque, per la predisposizione delle mappe di rischio 2021, il modello adottato nel NRA 2018 (Dolce et al., 2021) e descritto sopra è stato utilizzato.

## 7 PERDITE OTTENUTE DAI MODELLI DI FRAGILITÀ A SCALA NAZIONALE

Nel presente capitolo si riporta un confronto in termini di conseguenze attese tra i modelli di fragilità a scala nazionale. Le Tabella 7.1 (per edifici in muratura) e Tabella 7.2 (per edifici in CA) riportano le UR e i coordinatori che hanno sviluppato un modello di fragilità a scala nazionale e l'approccio utilizzato nella derivazione del modello.

UR – RESPONSABILI (M)	APPROCCIO
UNIGE – Lagomarsino	Euristico-macrosismico
UNIPD – Da Porto	Ibrido
PLINIUS – Zuccaro	Ibrido
UNIPV – Penna	Empirico-osservazionale
UNIGEb – Cattari	Meccanico-analitico

Tabella 7.1 Modelli di fragilità per edifici in muratura utilizzati per le mappe di rischio

UR – RESPONSABILI (CA)	APPROCCIO
UNIGE – Lagomarsino	Euristico-macrosismico
UNIBAS – Masi	Meccanico-numerico
EUCENTRE - Borzi	Meccanico-analitico
UNINA – Verderame	Meccanico-analitico
UNINA-PV – Verderame/Penna	Empirico-osservazionale

Tabella 7.2 Modelli di fragilità per edifici in CA utilizzati per le mappe di rischio

### 7.1 Simulazione del danno (L'Aquila 2009) per edifici in muratura e CA

Per procedere ad un confronto dei risultati ottenuti dalle diverse UR è possibile simulare lo scenario di danno a seguito del terremoto che ha colpito L'Aquila nel 2009. Il confronto è stato svolto sia per gli edifici in M che in CA. A partire dagli edifici in CA (per i quali i risultati forniti dalle UR risultano più dispersi, come analizzato al capitolo 5.4, riguardo al terremoto del 2009) nel database DaDO sono presenti 12'425 edifici, dei quali 7'176 sono nel comune de L'Aquila, uno dei comuni più colpiti e nel quale i rilievi del danno post evento sono stati svolti “a tappeto”. Per alcuni di questi edifici non sono disponibili informazioni sulla classe di epoca e sul numero di piani, per cui il database resta popolato da 6'931 edifici. La shakemap più aggiornata presenta nei confini comunali una certa varietà di valori della PGA, ma il 98% degli

edifici ha subito valori pari a 0.3g, 0.36g e 0.42g. In questi tre bin di PGA, gli edifici per i quali è possibile associare la tipologia ISTAT sono 6'786.

A ciascun edificio, il danno è stato attribuito secondo tre diverse metriche:

- DaDO (che considera solo il danno strutturale e non il danno alle tamponature);
- Del Gaudio et al. 2017 (che considera anche il danno nelle tamponature, associandolo a tre livelli e assumendo come danno il maggiore tra quello strutturale e non strutturale);
- UniGE (è definito in modo analogo alla metrica Del Gaudio et al. 2017, ma con piccole differenze nell'associazione tra danno AeDES e danno EMS - questa metrica dà una diversa interpretazione delle descrizioni presenti nella EMS 98)

In Figura 7.1 sono mostrate le differenze tra le tre metriche. Le righe orizzontali nere sono quelle utilizzate dalla metrica DaDO, quelle blu da Del Gaudio et al. 2017 e quelle rosse da UniGE. In particolare, tra queste ultime due si nota una leggera differenza nel passaggio da D1 a D2 e da D2 e D3, ma la differenza più significativa è nel passaggio da D3 a D4.

Nella Tabella 7.3 è riportata la DPM (Damage Probability Matrix) ottenuta adottando la metrica del danno Del Gaudio et al. 2017.

DaDO	GE st.	NA st.	D4-D5 Gravissimo	D3-D2 Medio-Grave	D1 Leggero	Danno nullo	Livello danno	GE t.	NA t.
						✓	0		
						✓	0		
					<1/3		1		
					1/3-2/3		1		
					>2/3		1		
				<1/3			2		
				<1/3	<1/3		2		
				<1/3	1/3-2/3		2		
				<1/3	>2/3		2		
				1/3-2/3	<1/3		3		
				1/3-2/3			3		
				>2/3			3		
			<1/3				3		
			<1/3		<1/3		3		
			<1/3		1/3-2/3		3		
			<1/3	<1/3			3		
			<1/3	<1/3	<1/3		3		
			<1/3	1/3-2/3			4		
			<1/3	>2/3			4		
			1/3-2/3				4		
			1/3-2/3		1/3-2/3		4		
			1/3-2/3	<1/3			4		
			1/3-2/3	1/3-2/3			5		
			>2/3				5		
			>2/3		<1/3		5		
			>2/3	<1/3			5		

Figura 7.1 Differenze tra le metriche utilizzate per associare il livello di danno



DPM (metrica Del Gaudio et al.)							
PGA	D0	D1	D2	D3	D4	D5	numero
0.12	0	1	0	0	0	0	1
0.18	5	8	10	1	1	0	25
0.24	57	34	16	8	4	1	120
0.3	1335	1600	786	432	165	27	4345
0.36	408	448	254	239	113	16	1478
0.42	264	392	198	235	104	14	1207
						Totale	7176

**Tabella 7.3 DPM determinata con l'uso della metrica del danno di Del Gaudio et al. 2017**

È stato quindi calcolato lo scenario di danno usando i 5 modelli di vulnerabilità proposti dalle UR che contribuiscono alla definizione del modello integrato MARS per il calcolo del rischio a scala nazionale. La Figura 7.2 mostra il risultato ottenuto con l'uso delle curve di fragilità originali fornite dalle UR (immagine a sinistra) e con l'uso delle curve convertite nelle percentuali delle classi EMS (immagine a destra), nella quale in ascissa sono riportati i livelli di danno dal D0 al D5, mentre in ordinata si mostra la probabilità di superamento di ciascun livello di danno. Le barre dell'istogramma presentano i risultati ottenuti con i diversi modelli, mentre le linee mostrano i frattili empirici relativi alle tre diverse metriche del danno. Come mostra la figura, la metrica del danno DaDO (linea puntinata) contempla quasi l'80% degli edifici con danno D0, trascurando il danno associato alle tamponature. Le differenze tra le metriche del danno Del Gaudio et al. 2017 (linea continua) e UniGE (linea tratteggiata) sono invece limitate al livello di danno D1 e D4. Si può osservare che ciascun modello fornito è coerente con la metrica del danno con cui è stato calibrato:

- i risultati forniti dal modello di UniNA e UniNA-PV, coerenti alla metrica Del Gaudio;
- i risultati forniti da UniGE sono correlati invece alla metrica UniGE, portando ad avere più danni al livello di danno D1 e meno al D3 e D4;
- il modello UniBAS è tendenzialmente allineato con la metrica Del Gaudio, ma con alcune differenze avendo definito i livelli di danno da analisi dinamiche non lineari;
- il modello di Eucentre è più ottimistico rispetto agli altri poiché inizialmente sviluppato con la metrica DaDO, poi modificata per considerare il danno alle tamponature.

Inoltre, i grafici riportati in Figura 7.2 mostrano una buona coerenza dei risultati ottenuti a seguito della conversione in classi EMS definite nel progetto MARS.

La Figura 7.3 mostra analoghi risultati distinti per diversi bin di PGA, definiti nell'intervallo 0.27g-0.33g (PGA=0.3g), 0.33g-0.39g (PGA=0.36) e maggiori a 0.39g.

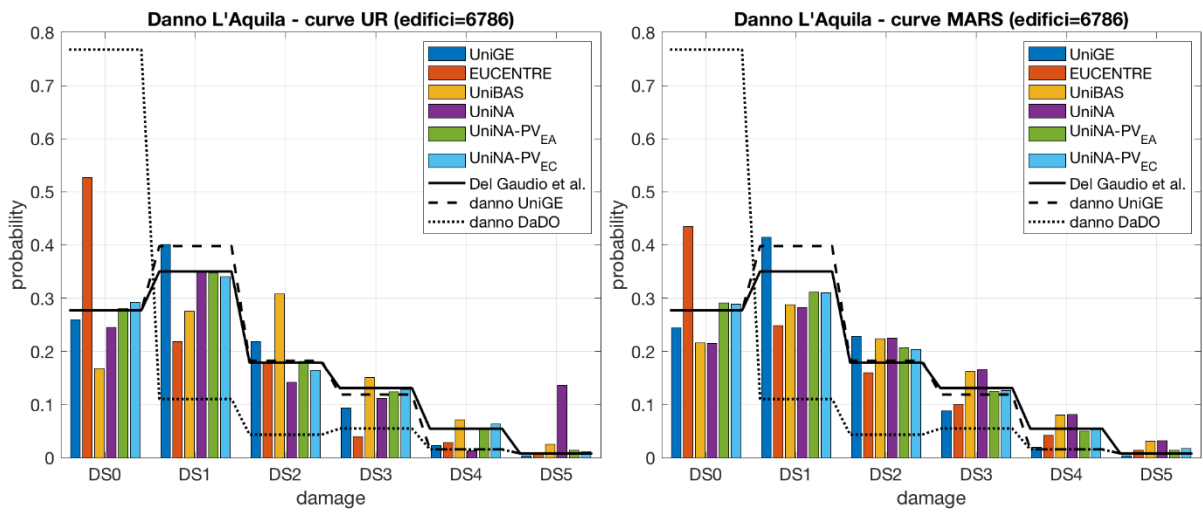


Figura 7.2 DPM calcolate con i diversi modelli forniti dalle UR nella loro configurazione originale (immagine a sinistra) e a seguito della conversione in classi EMS del progetto MARS (immagine a destra)

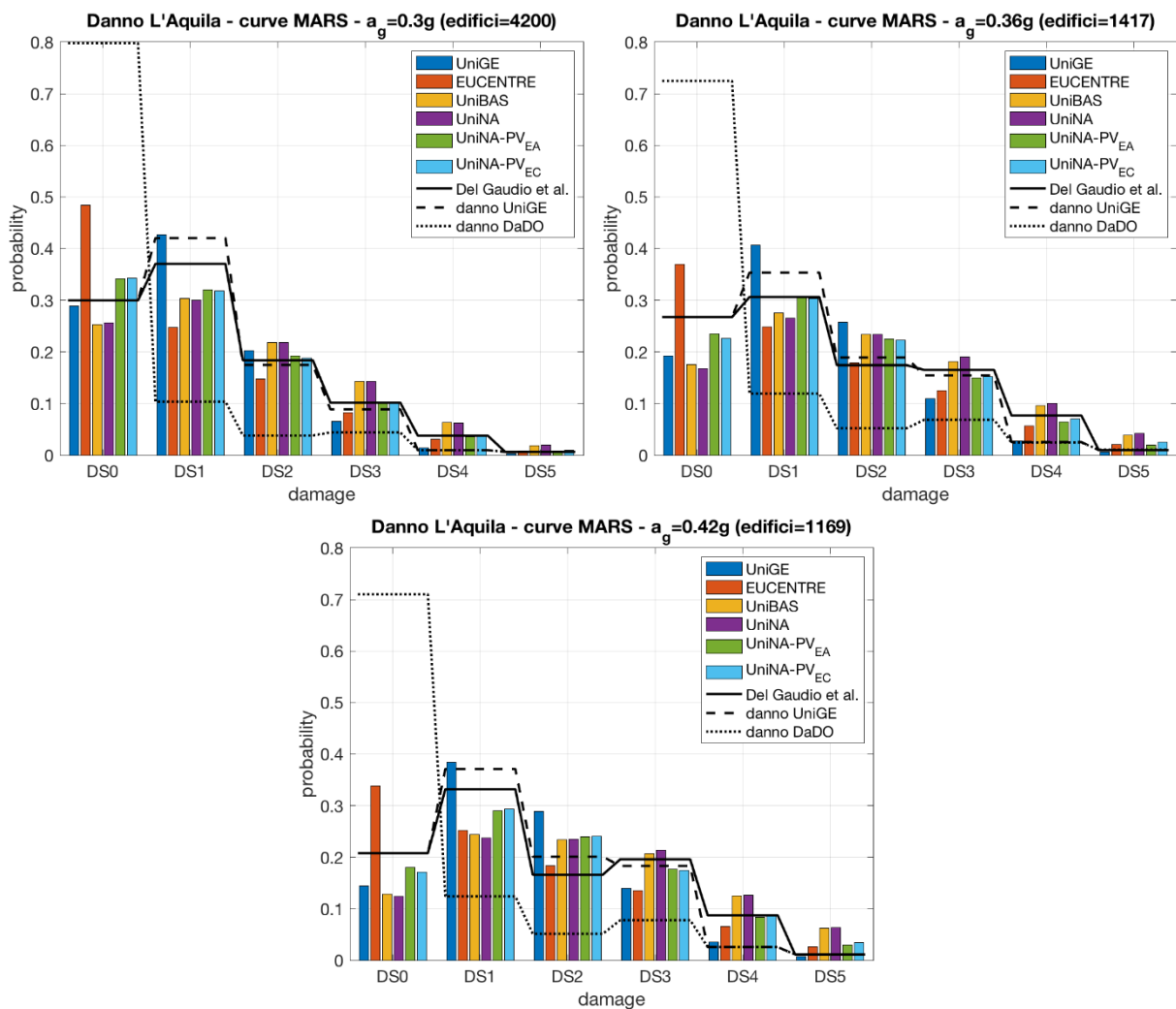
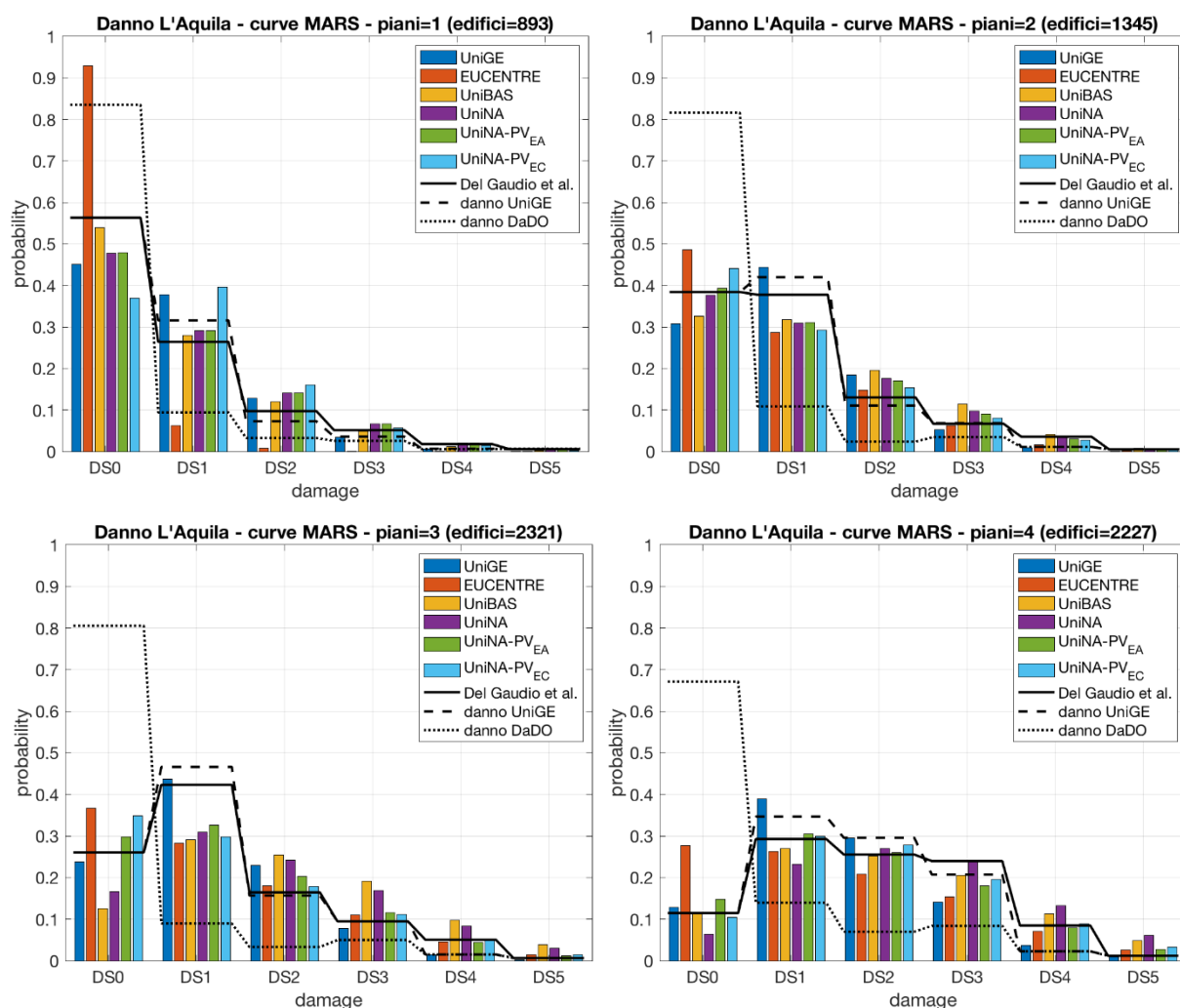


Figura 7.3 DPM ottenute per distinti valori di PGA registrate con l'uso dei modelli convertiti

In Figura 7.4 sono invece riportati i confronti ottenuti distinguendo gli edifici in funzione del numero di piani; anche le DPM ottenute dai dati osservati dimostrano un notevole incremento di vulnerabilità all'aumentare del numero di piani.

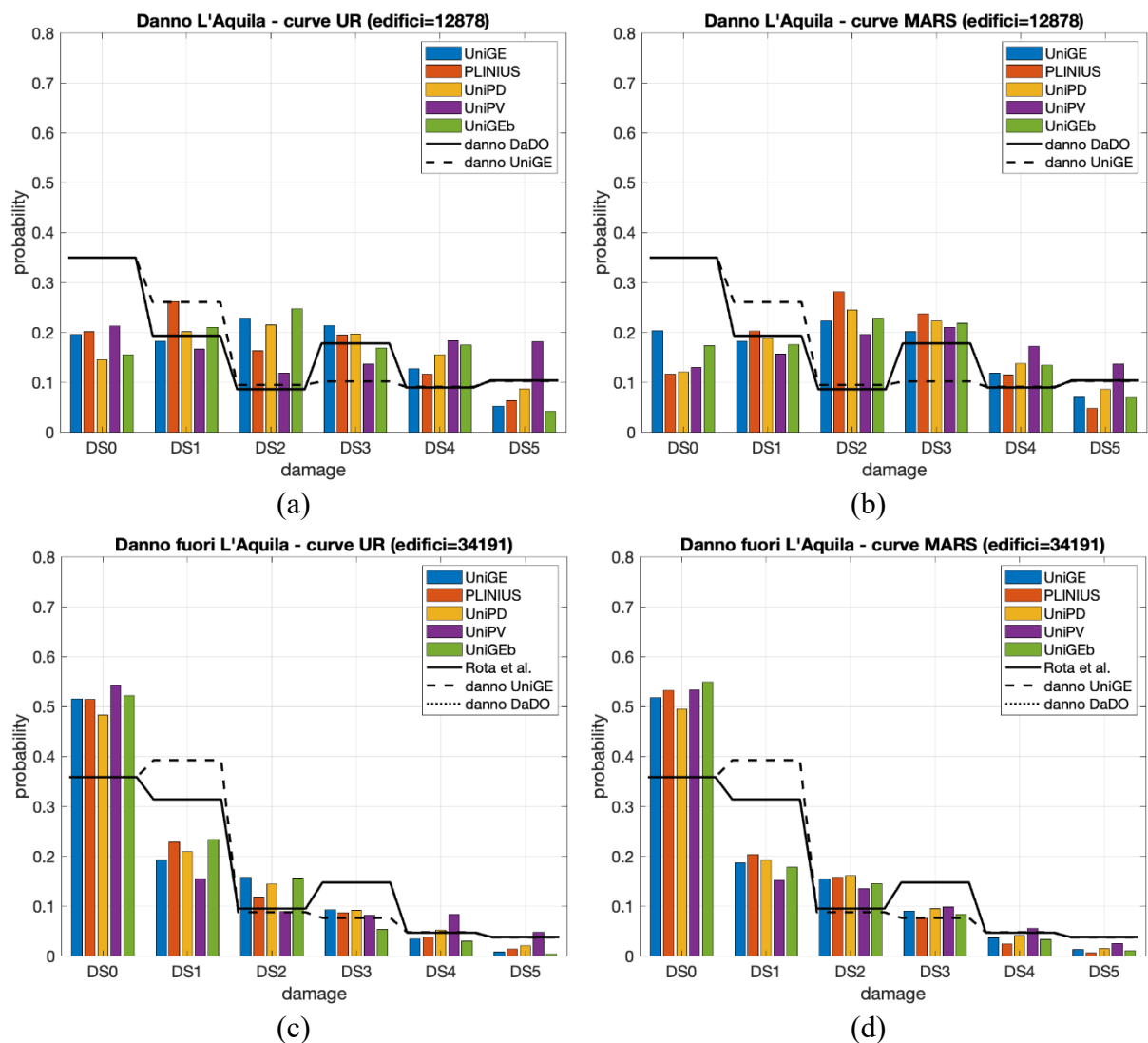


**Figura 7.4 DPM ottenute per gli edifici in CA distinti in funzione del numero di piani, con l'uso dei modelli convertiti**

Per quanto riguarda invece gli edifici in M, il numero di edifici del campione presente nel database DaDO riferito al terremoto de L'Aquila 2009 è 47'069, il quale è stato processato suddividendolo in funzione della PGA associata, in modo tale da considerare separatamente il campione riferito alla sola città de L'Aquila con quello "fuori L'Aquila". Gli edifici con PGA inferiore a 0.27g rientrano negli edifici "fuori L'Aquila" e corrispondono a 34'191 edifici, mentre appartengono alla città de L'Aquila tutti gli edifici che hanno registrato PGA superiori a 0.27g, pari a 12'878 edifici. In Figura 7.5 sono mostrate le DPM empiriche calcolate con l'uso

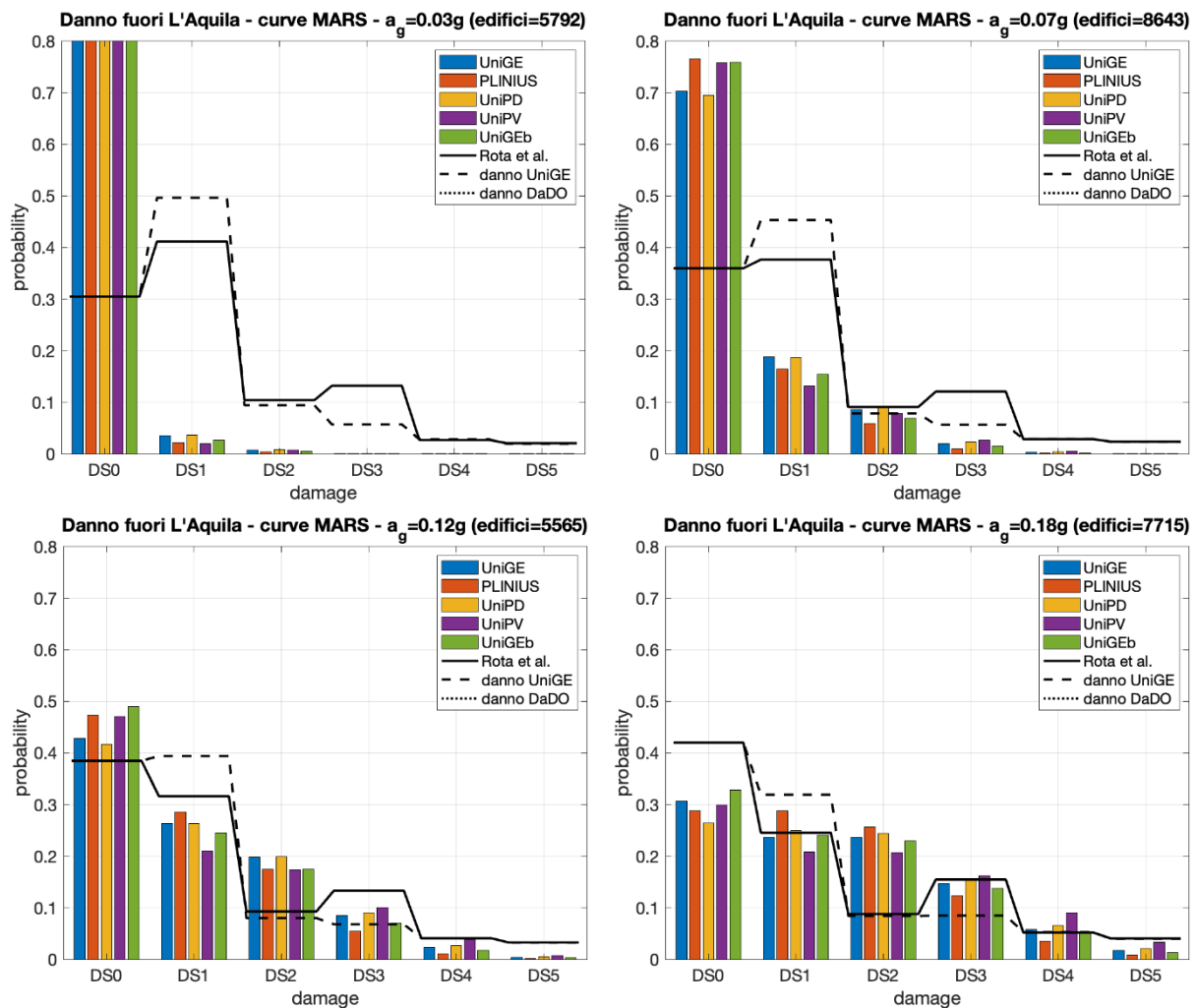
della metrica del danno DaDO (linea continua) e UniGE (linea tratteggiata) e le DPM ricavate dai modelli forniti dalle UR. In particolare, sono mostrate le DPM riferite:

- (a) al campione della città de L'Aquila ottenute con l'uso dei modelli originali delle UR;
- (b) al campione della città de L'Aquila ottenute con l'uso dei modelli convertiti in classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS;
- (c) al campione "fuori L'Aquila" ottenute con l'uso dei modelli originali forniti dalle UR;
- (d) al campione "fuori L'Aquila" ottenute con l'uso dei modelli convertiti in classi di vulnerabilità EMS del progetto MARS.



**Figura 7.5** DPM calcolate con i diversi modelli forniti dalle UR per gli edifici in M della città de L'Aquila nella loro configurazione originale (a) e a seguito della conversione in classi EMS del progetto MARS (b) e per gli edifici "fuori L'Aquila" nella configurazione originale (c) e convertita (d)

Dal confronto emerge una modesta sovrastima della vulnerabilità dai modelli forniti dalle UR per gli edifici riferiti alla città de L'Aquila, che però non si rileva per gli edifici "fuori L'Aquila". Questo risultato può essere associato ad una migliore qualità costruttiva degli edifici che caratterizzano la città de L'Aquila, rispetto a quella dei centri minori. Inoltre, è necessario segnalare che il database DaDO risulta incompleto per gli edifici "fuori L'Aquila" che non hanno subito danni, in quanto sono mancanti le relative schede. Non essendo presenti tali dati, il livello di danno D0 è inferiore rispetto a quello che ne risulterebbe se fossero presenti i dati degli edifici non danneggiati e ciò comporta una sovrastima del danno per gli edifici "fuori L'Aquila" nelle DPM empiriche. Tale risultato emerge maggiormente quando si osservano i risultati distinti per bin di PGA. In Figura 7.6 sono riportate le DPM ottenute per i diversi bin di PGA le quali sono derivate dal campione di edifici "fuori L'Aquila" per PGA inferiori a 0.27g e dal campione della città de L'Aquila per PGA superiori a 0.27g.



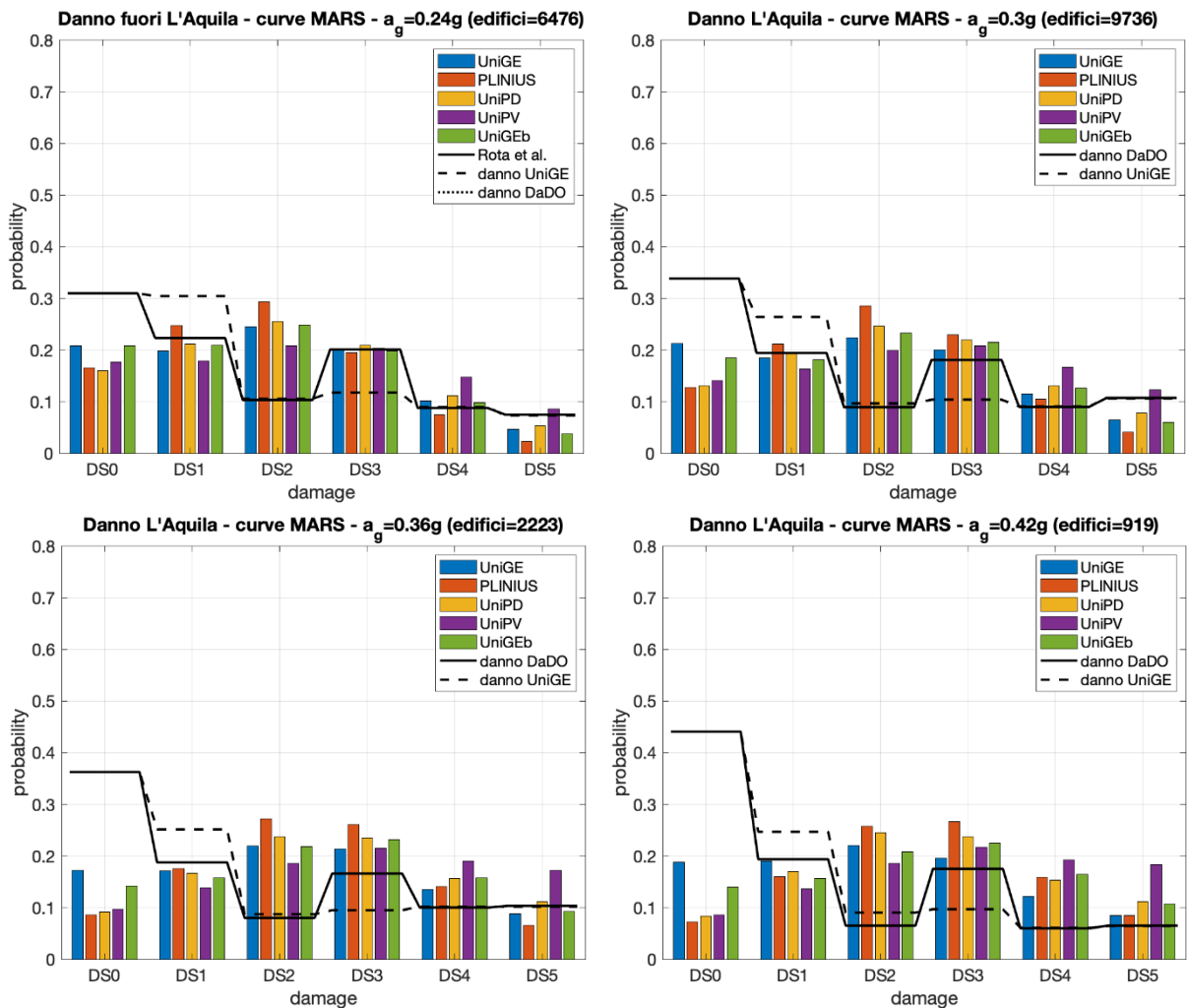
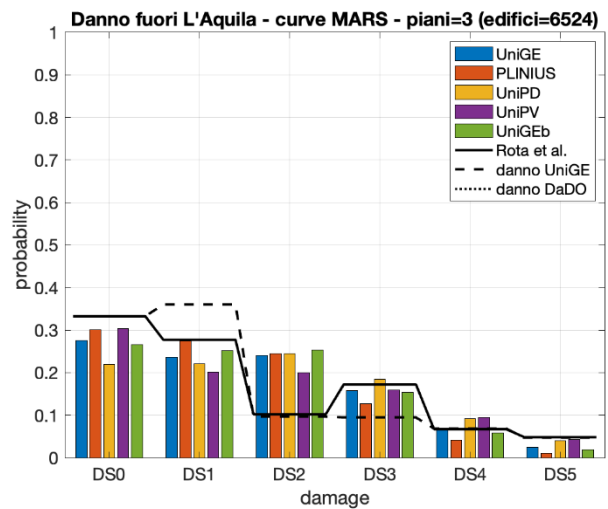
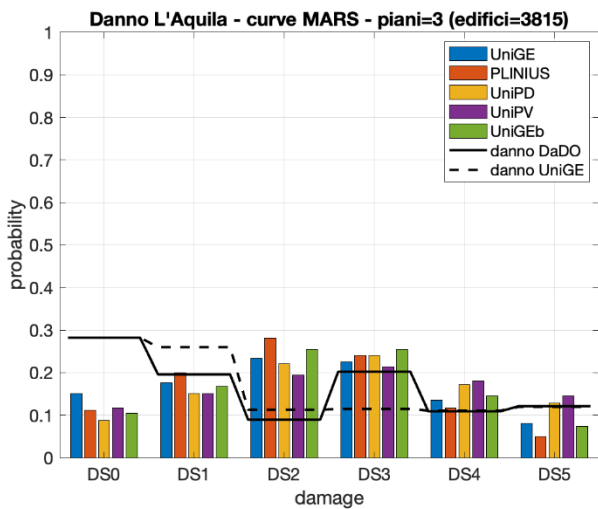
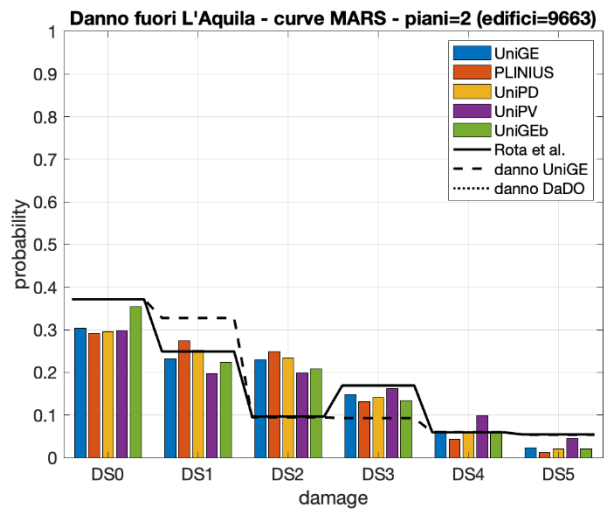
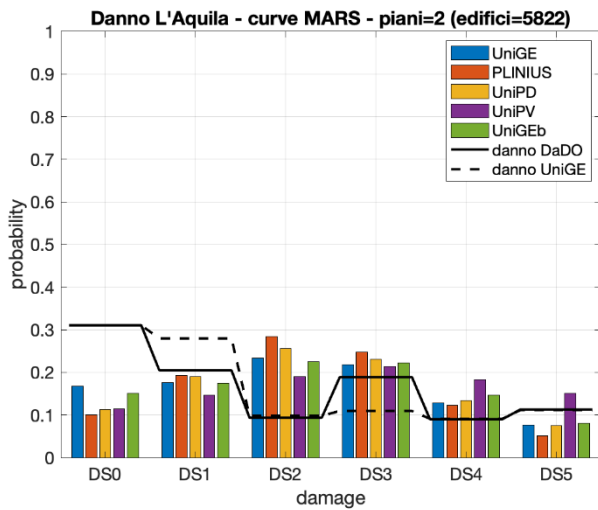
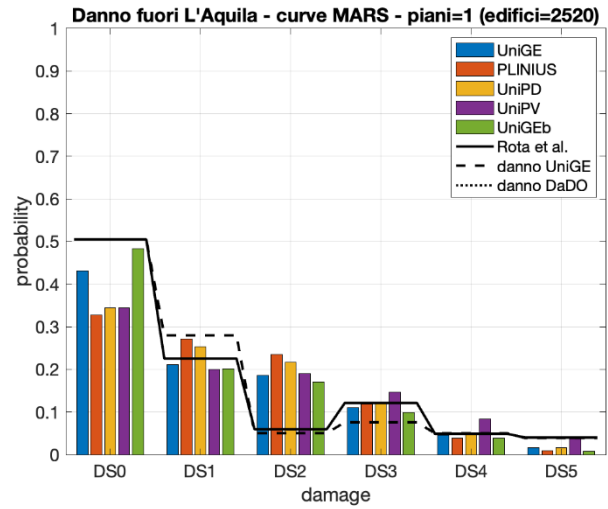
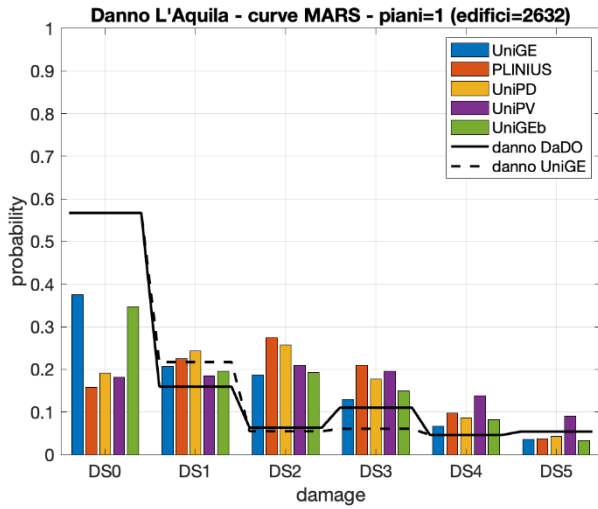


Figura 7.6 DPM ottenute per gli edifici in M per distinti valori di PGA registrate

Anche per gli edifici in muratura sono riportati i confronti ottenuti distinguendo gli edifici in funzione del numero di piani (Figura 7.7). Come si evince da tale confronto, l'influenza del numero di piani per gli edifici in muratura è minore rispetto a quella che si osserva per gli edifici in cemento armato (Figura 7.4). Inoltre, le DPM empiriche ottenute distinguendo il campione per numero di piani risultano “piatte”; questo è dovuto al fatto che all'interno di esse sono presenti sia edifici di epoche antiche che edifici moderni con vulnerabilità significativamente differenti. Pertanto, per gli edifici in muratura, sono stati svolti tali confronti anche distinguendo il campione in funzione dell'epoca di costruzione. In Figura 7.8 sono riportati i risultati inserendo sulla colonna di sinistra i confronti svolti con il campione di edifici presenti nella città de L'Aquila, mentre in quella di destra sono riportati i confronti con il campione “fuori L'Aquila”. Così come emergeva dai confronti tra le curve di fragilità fornite dalle UR, anche le

DPM empiriche mostrano una significativa influenza sulla vulnerabilità degli edifici in M in funzione dell'epoca di costruzione.





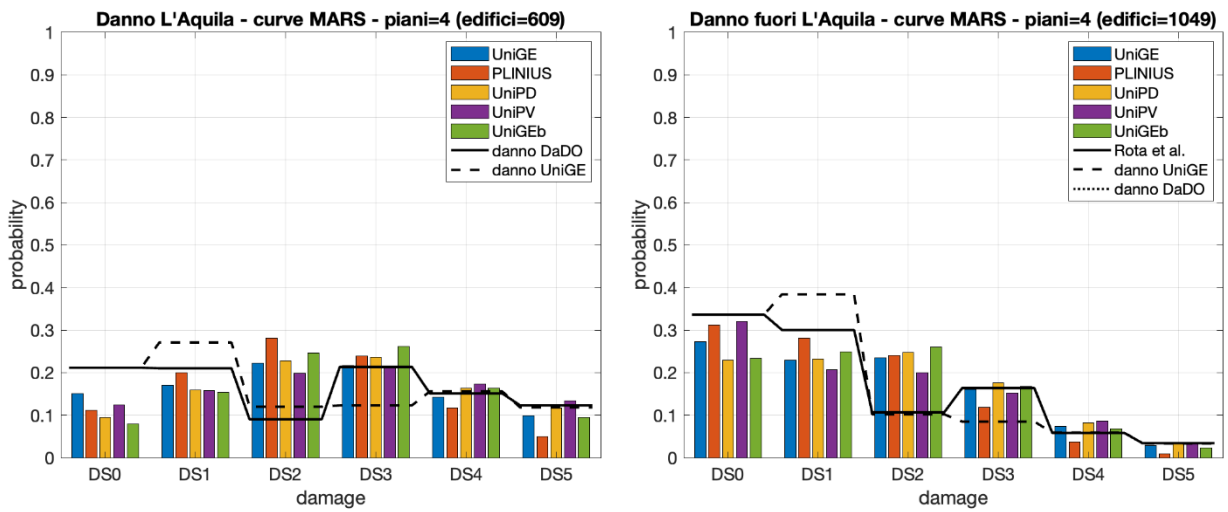
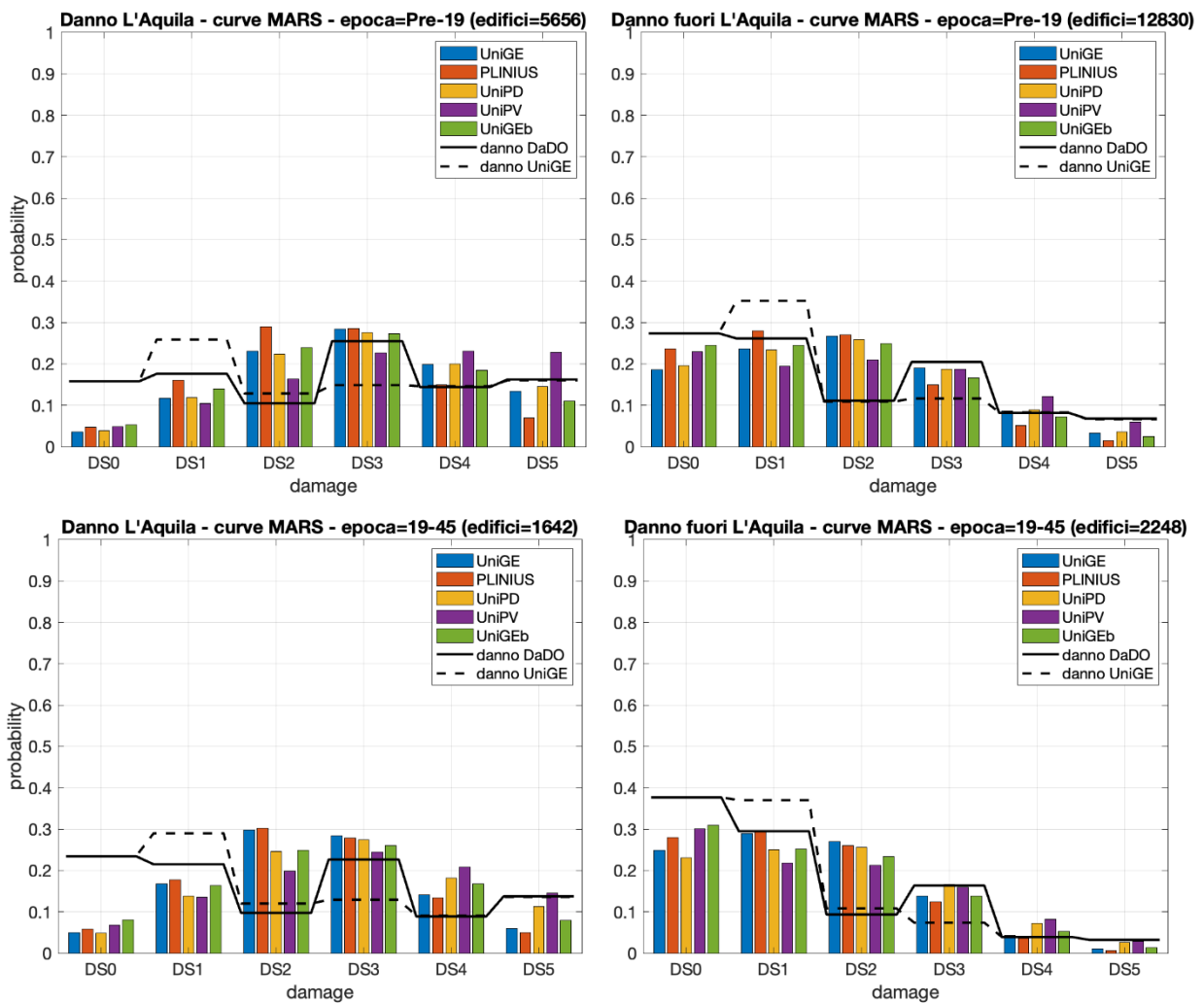


Figura 7.7 DPM ottenute per gli edifici in M distinti in funzione del numero di piani (colonna sinistra – campione de L’Aquila; colonna destra – campione “fuori L’Aquila“)



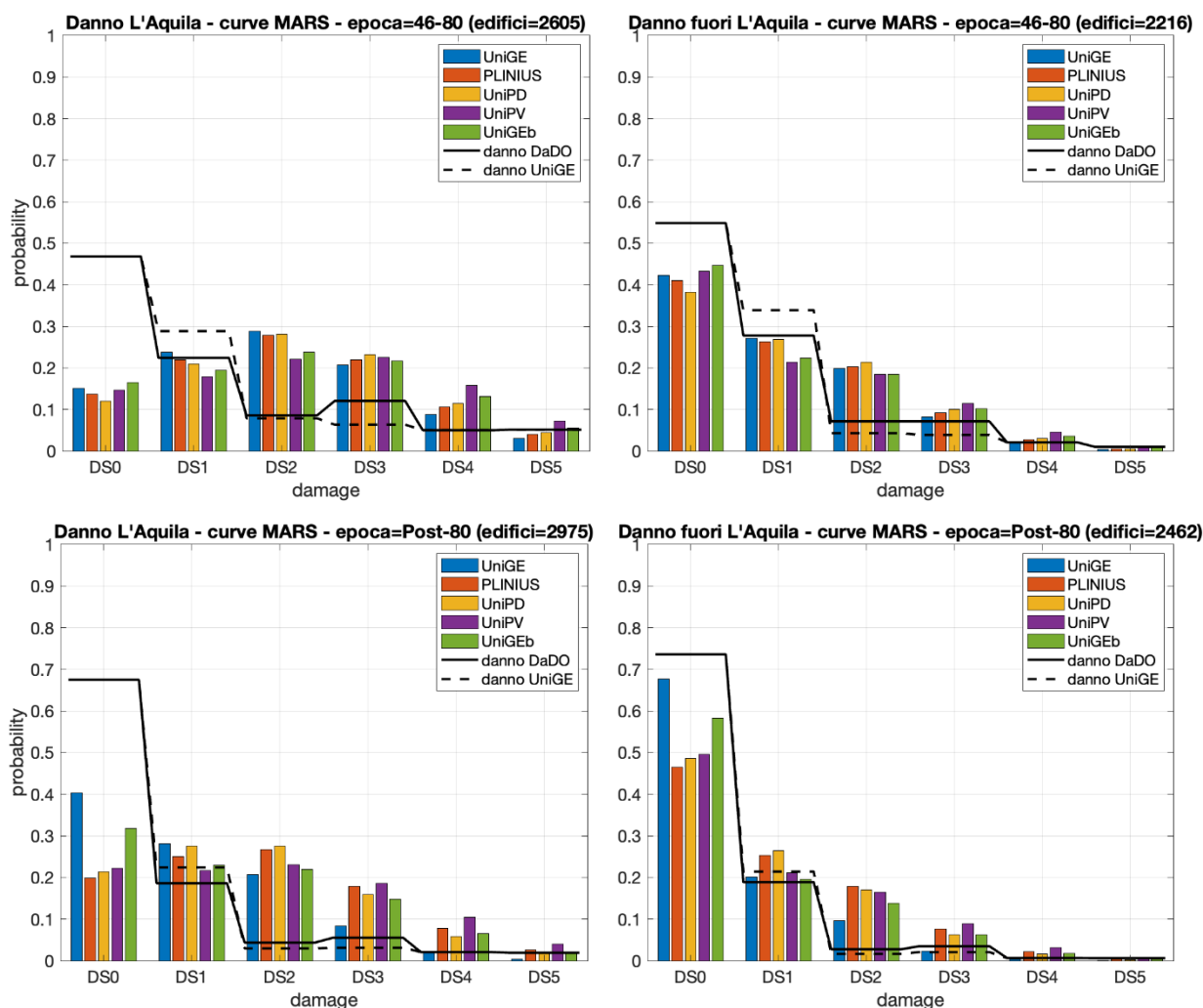
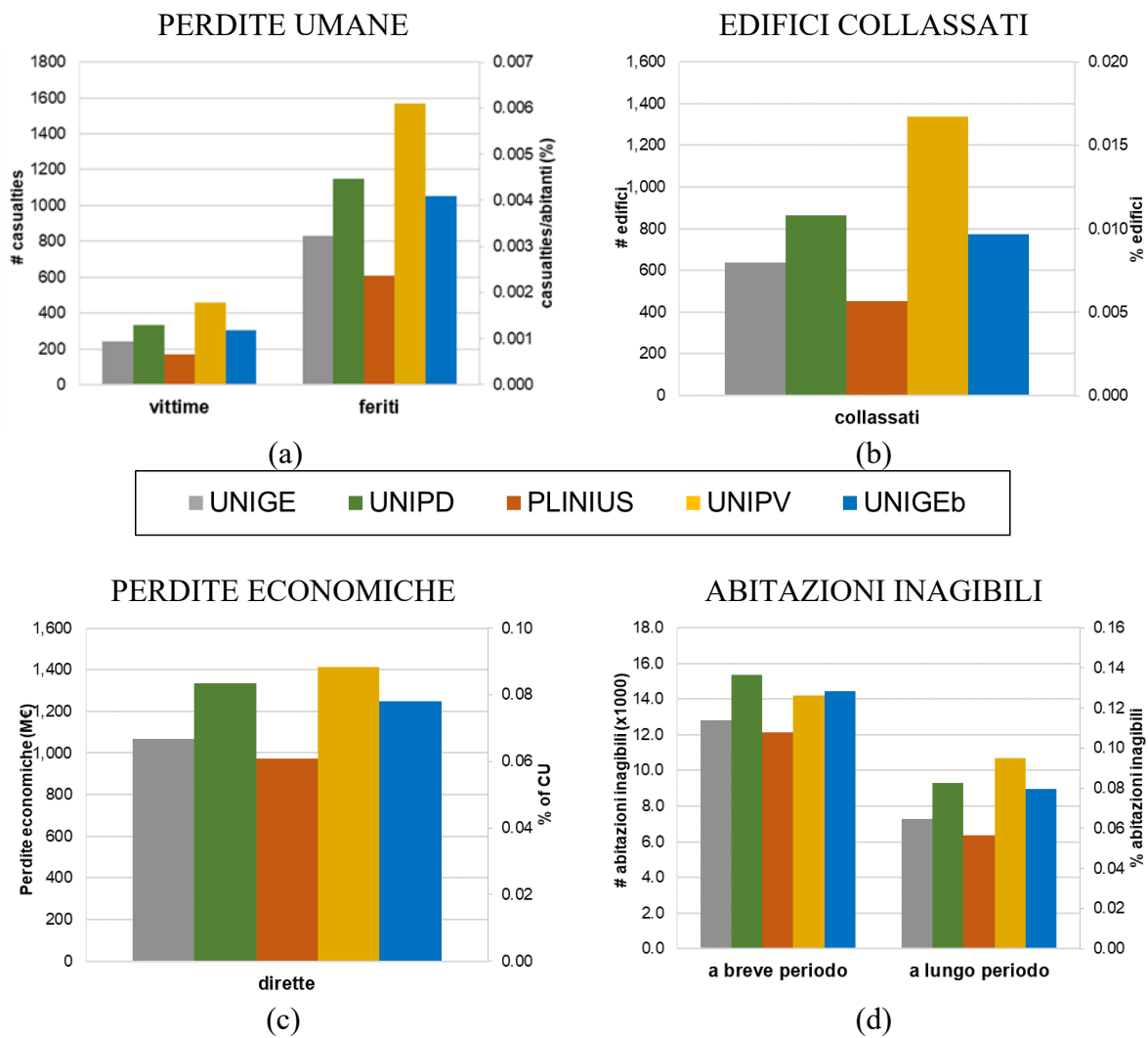


Figura 7.8 DPM ottenute per gli edifici in M distinti in funzione dell'epoca di costruzione (colonna sinistra – campione de L'Aquila; colonna destra – campione “fuori L'Aquila”)

## 7.2 Confronto in termini di rischio tra i modelli di fragilità per edifici in muratura

I modelli di fragilità per edifici in muratura proposti da UNIGE, UNIPD, PLINIUS, UNIPV e UNIGEb sono stati utilizzati nella predisposizione delle mappe di rischio sismico dell'edilizia residenziale. Nello specifico, sono stati utilizzati due modelli derivati con approccio empirico (UNIGE e UNIPV), due con approccio ibrido (UNIPD e PLINIUS) e uno con approccio analitico (UNIGEb) (Tabella 7.1). Al fine di confrontare i modelli di fragilità in termini di rischio, sono state effettuate sulla piattaforma IRMA (Allegato 13.1) specifiche analisi sul patrimonio edilizio residenziale in muratura dell'intero territorio italiano. Il confronto è stato effettuato sulla base dei risultati ottenuti da analisi di rischio incondizionato con finestra temporale di 1 anno (UR-1y; categoria di suolo B) in termini di perdite umane (vittime e feriti),

edifici collassati, perdite economiche dirette ed abitazioni inagibili (a breve e a lungo periodo). Sono stati adottati i modelli di perdite utilizzati nel NRA 2018 (Dolce et al. 2021; capitolo 6) e sono state applicate le curve di fragilità convertite secondo il modello MARS (capitolo 5). Figura 7.9 mostra il confronto in termini di rischio (casualties, perdite economiche, abitazioni inagibili ed edifici collassati) tra i 5 modelli di fragilità per la muratura. In generale, il modello proposto da UNIPV produce le stime più alte mentre il modello PLINIUS quelle più basse.



**Figura 7.9 Confronto in termini di rischio tra i modelli di fragilità per il patrimonio edilizio in muratura: (a) casualties; (b) edifici collassati; (c) perdite economiche dirette e (d) abitazioni inagibili**

Al fine di sintetizzare i risultati, Tabella 7.4 riporta i valori medi, massimi e minimi per ogni tipologia di perdita.

	<i>Impatto (# edifici)</i>	<i>Impatto (# abitazioni)</i>		<i>Perdite umane</i>		<i>Perdite economiche</i>
	<i>collassati</i>	<i>Inagibili breve periodo</i>	<i>Inagibili lungo periodo</i>	<i>vittime</i>	<i>feriti</i>	<i>Dirette (M€)</i>
<b><i>media</i></b>	810	13'790	8'510	300	1'040	1'210
<b><i>min</i></b>	450	12'130	6'340	170	610	970
<b><i>max</i></b>	1'340	15'370	10'680	460	1'570	1'410

Tabella 7.4 Valori medi, massimi e minimi delle perdite stimate con i 5 modelli di fragilità per la muratura

### 7.3 Confronto in termini di rischio tra i modelli di fragilità per edifici in cemento armato

I modelli di fragilità per edifici in cemento armato proposti da UNIGE, UNIBAS, EUCENTRE, UNINA e UNINA-PV sono stati utilizzati nella predisposizione delle mappe di rischio sismico dell'edilizia residenziale. Nello specifico, sono stati utilizzati due modelli derivati con approccio empirico (UNIGE e UNINA-PV) e tre con approccio analitico (UNIBAS, EUCENTRE e UNINA) (Tabella 7.2). Al fine di confrontare questi modelli di fragilità in termini di rischio, sono state effettuate sulla piattaforma IRMA specifiche analisi sul patrimonio edilizio residenziale in CA dell'intero territorio italiano. Il confronto è stato effettuato sulla base dei risultati ottenuti da analisi di rischio incondizionato con finestra temporale di 1 anno (UR-1y; categoria di suolo B) in termini di perdite umane (vittime e feriti), edifici collassati, perdite economiche dirette ed abitazioni inagibili (a breve e a lungo periodo). Sono stati adottati i modelli di perdite utilizzati nel NRA 2018 (Dolce et al. 2021; capitolo 6) e sono state applicate le curve di fragilità convertite secondo il modello MARS (capitolo 5). Figura 7.10 mostra il confronto in termini di rischio (casualties, perdite economiche, abitazioni inagibili ed edifici collassati) tra i 5 modelli di fragilità per il CA. In generale, il modello proposto da UNIPA-PV produce le maggiori conseguenze in termini di perdite umane, perdite economiche e abitazioni inagibili mentre il modello UNIBAS stima il maggior numero di edifici collassati. I valori minori sono osservati per il modello UNIGE.

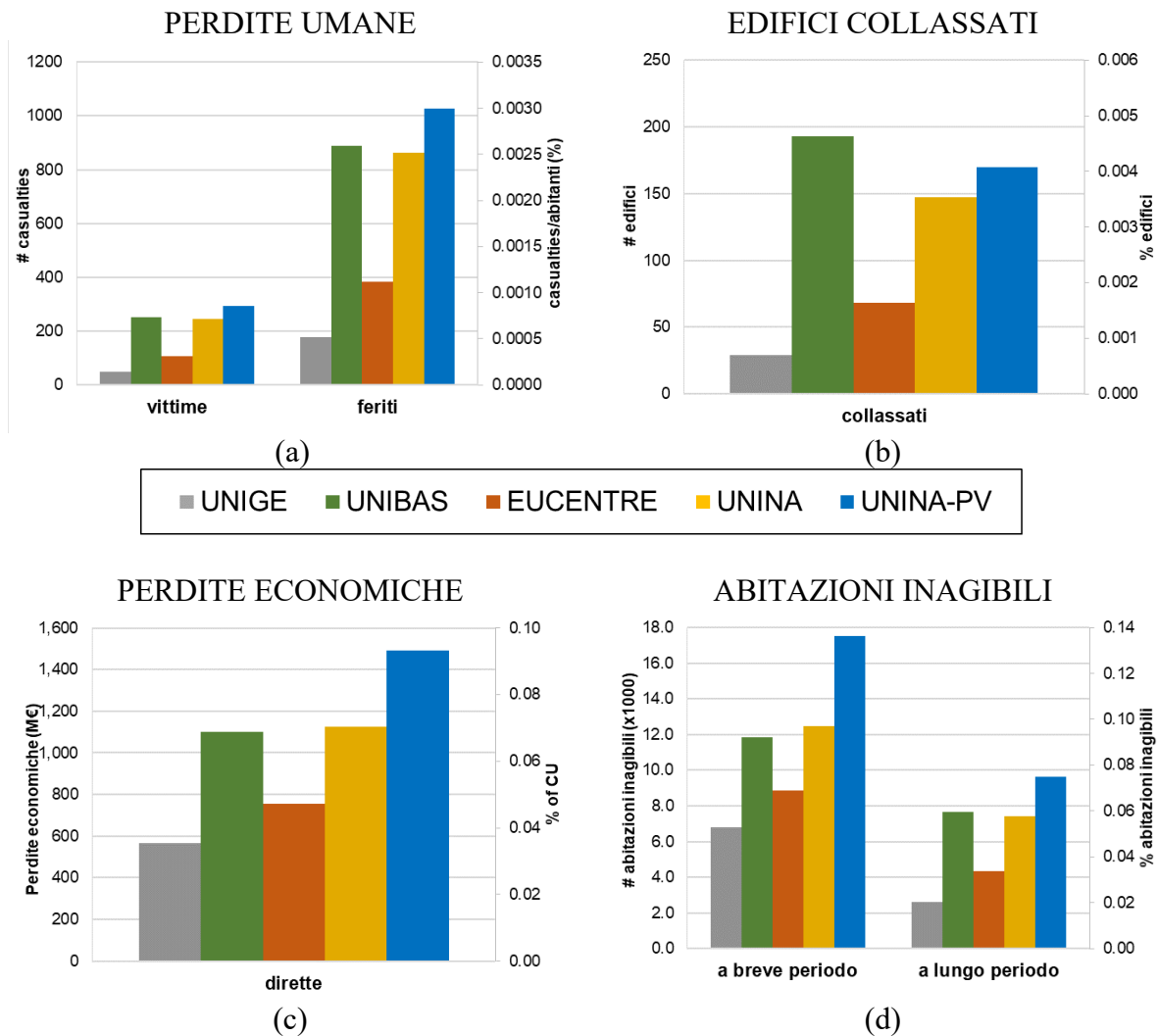


Figura 7.10 Confronto in termini di rischio tra i modelli di fragilità per il patrimonio edilizio in CA: (a) casualties; (b) edifici collassati; (c) perdite economiche dirette e (d) abitazioni inagibili

Al fine di sintetizzare i risultati, Tabella 7.5 riporta i valori medi, massimi e minimi per ogni tipologia di perdita.

	<i>Impatto</i> (# edifici)	<i>Impatto</i> (# abitazioni)		<i>Perdite</i> <i>umane</i>		<i>Perdite</i> <i>economiche</i>
	<i>collassati</i>	<i>Inagibili</i> <i>breve periodo</i>	<i>Inagibili</i> <i>lungo periodo</i>	<i>vittime</i>	<i>feriti</i>	<i>Dirette (M€)</i>
<b>media</b>	120	11'500	6'330	189	670	1'010
<b>min</b>	30	6'780	2'620	50	180	570
<b>max</b>	190	17'535	9'620	290	1'030	1'490

Tabella 7.5 Valori medi, massimi e minimi delle perdite stimate con i 5 modelli di fragilità per il CA

#### **7.4 Confronto tra le perdite in edifici in muratura e cemento armato**

Nel presente paragrafo, le perdite medie ottenute con i modelli forniti dalle UR per M e CA, su suolo B, sono state confrontate; tali perdite possono essere ottenute attraverso la piattaforma IRMA implementando direttamente il modello integrato. Nello specifico, il valore medio è stato considerato per ogni tipologia di perdita. La Figura 7.11 riporta il confronto tra le perdite attese relative al patrimonio edilizio in M e CA. Le conseguenze attese causate da edifici in M sono sempre maggiori di quelle causate da edifici in CA. In particolare, si osservano differenze significative per le perdite umane e gli edifici collassati mentre le differenze si riducono per le perdite economiche e le abitazioni inagibili. A tal proposito, va sottolineato che i modelli di perdite per la stima delle perdite umane e dei collassi sono basati solo sui livelli danno più severi (D4 e D5) invece i modelli per la stima delle perdite economiche e delle abitazioni inagibili considerano anche i livelli di danno più bassi (vedere capitolo 6).

I valori espressi in percentuale nei grafici riportati in Figura 7.11 sono calcolati facendo riferimento all'intero campione presente nell'inventario ISTAT 2011. Per poter rapportare le perdite ottenute con l'esposizione differenziata per M e CA, sono stati estratti i dati riferiti alla popolazione, superficie, numero di abitazioni e numero di edifici associati ciascuno alla M e al CA (Figura 7.12). Come mostrano i dati estratti, le differenze tra la M e il CA non sono sostanziali, eccetto sul numero di edifici che risultano per il 65% in M. In Figura 7.13 è mostrato il confronto delle perdite attese calcolate rispetto all'esposizione differenziata per M e CA, in modo da avere un confronto diretto sulla vulnerabilità. Da tale confronto emerge una vulnerabilità molto più marcata degli edifici in M rispetto a quelli in CA sugli edifici collassati, ma in misura minore sulle perdite economiche e sull'agibilità, definite dai primi livelli di danno.

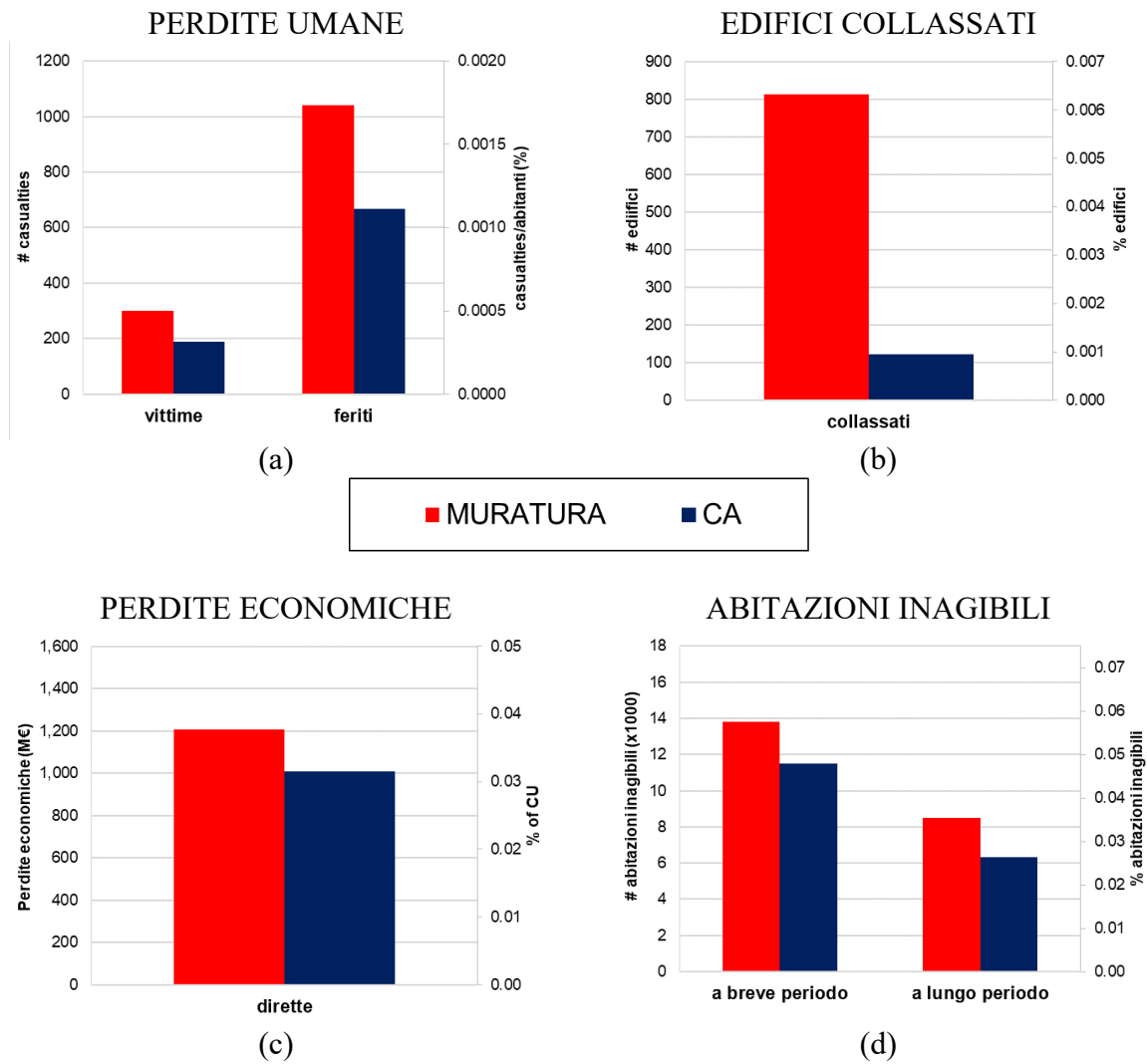


Figura 7.11 Confronto perdite attese tra M e CA

## Esposizione

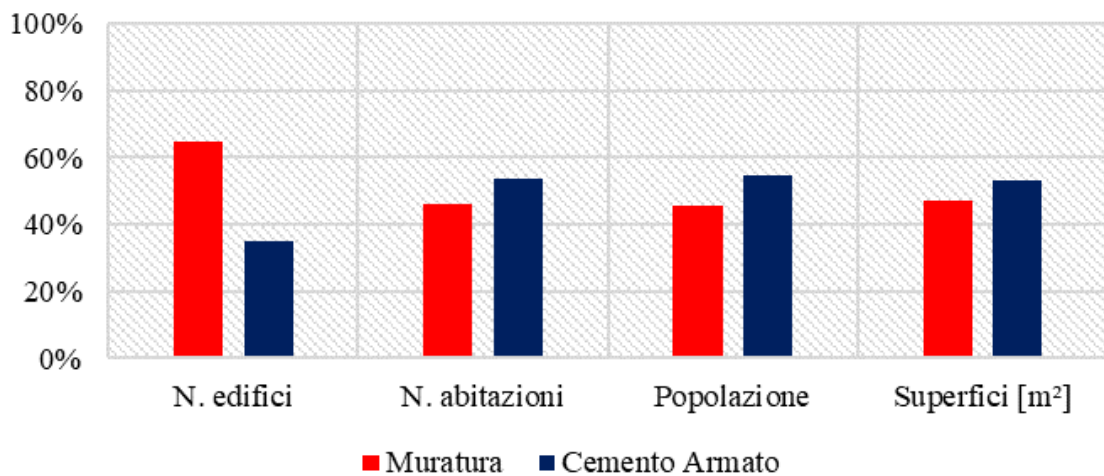
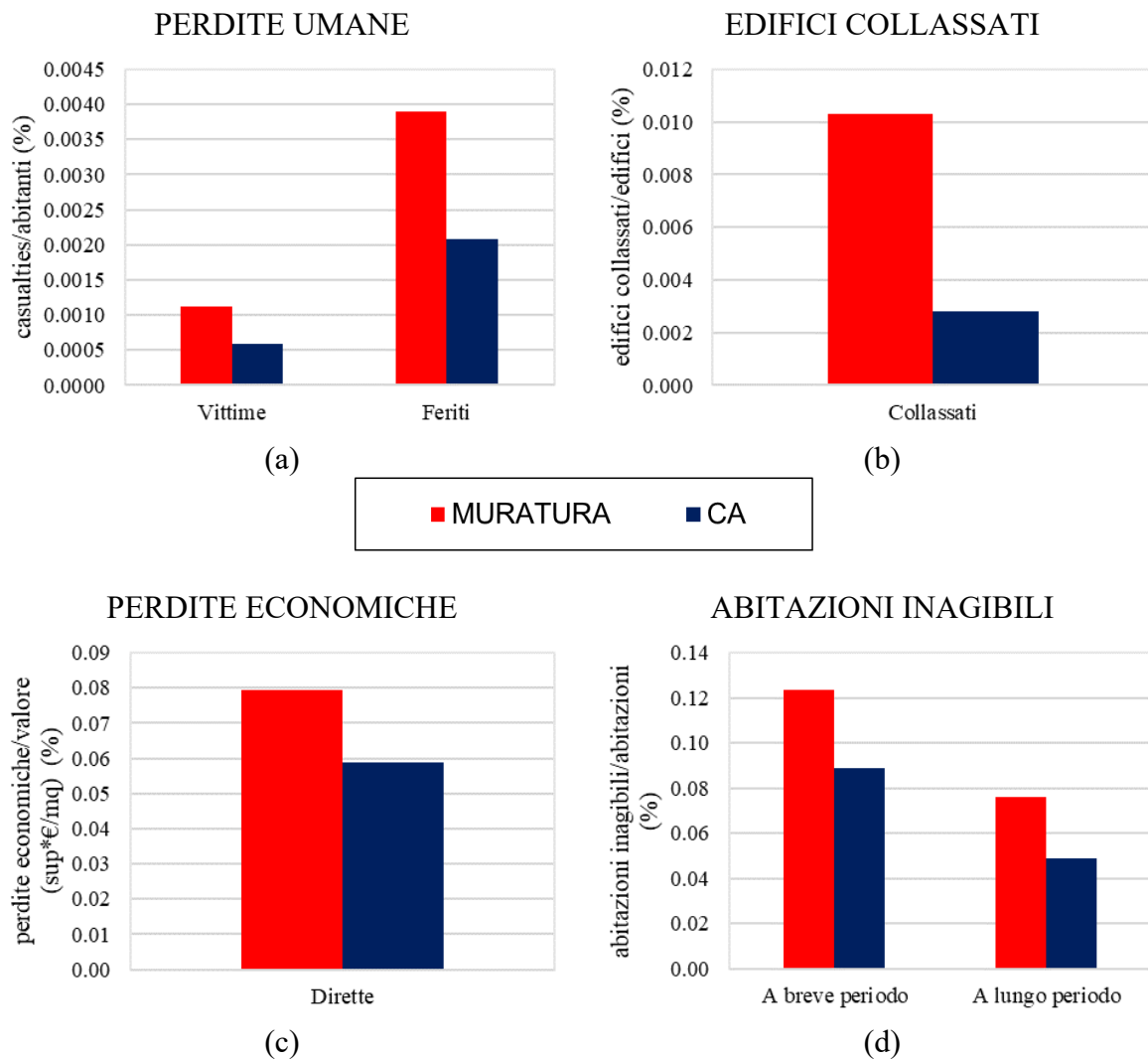


Figura 7.12 Distribuzione in termini percentuali dell'inventario ISTAT per numero di edifici, numero di abitazioni, popolazione e superficie differenziati per M e CA





**Figura 7.13 Confronto perdite attese tra M e CA espresse in percentuale rispetto all'esposizione differenziata per le due tipologie costruttive**

A titolo esemplificativo, è stato effettuato un confronto tra le mappe a livello nazionale relative ai risultati per M e CA. Figura 7.14 mostra la stima delle perdite economiche dirette per M e CA, aggregate per regione mentre Figura 7.15 la stima delle vittime, aggregate per provincia.

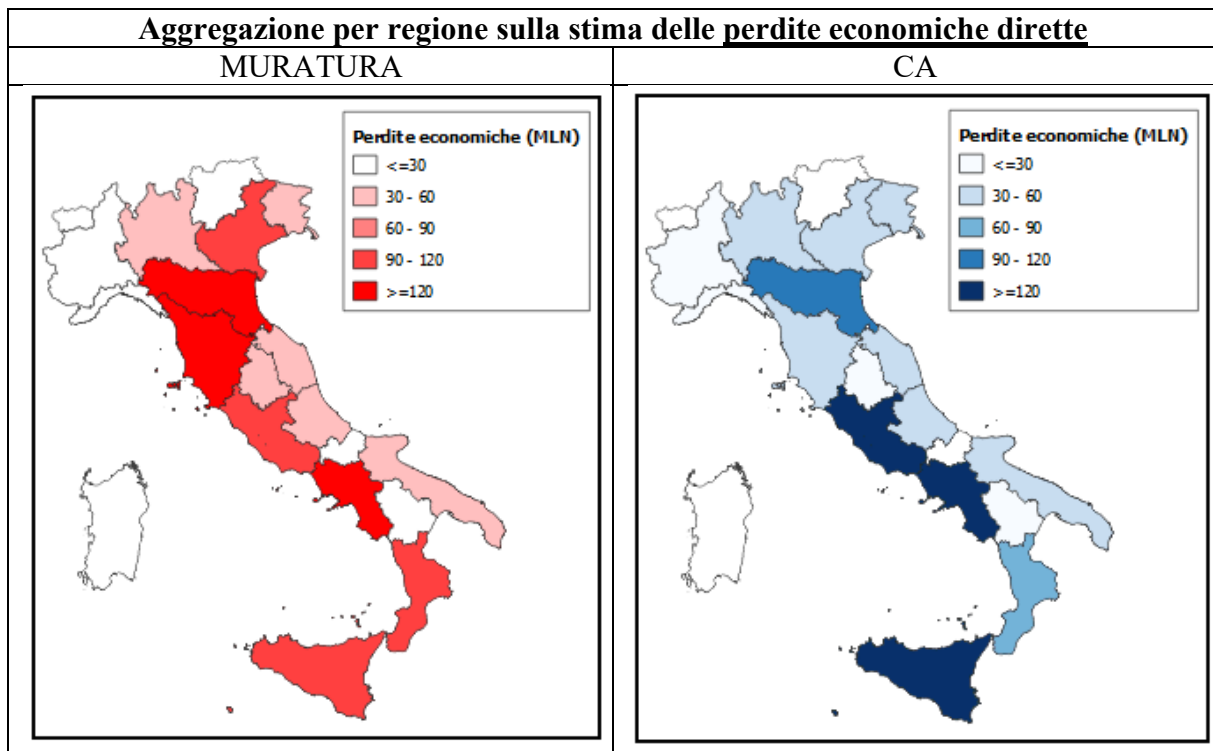


Figura 7.14 Perdite economiche dirette per M (sulla sinistra) e CA (sulla destra) aggregate per regione

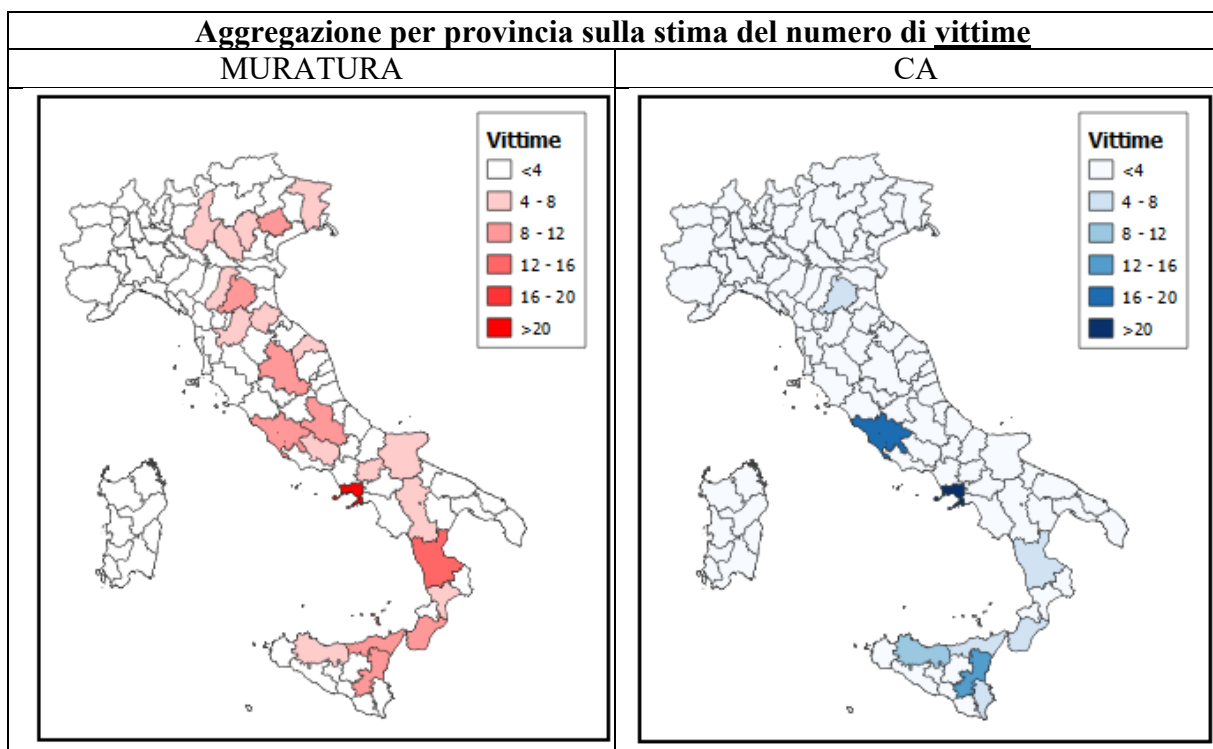


Figura 7.15 Vittime per M (sulla sinistra) e CA (sulla destra) aggregate per provincia

## 8 RISCHIO SISMICO IN TERMINI DI LIVELLI DI DANNO

Attraverso l'uso della piattaforma IRMA-v2 è stato valutato il rischio sismico in termini di livelli di danno sul territorio nazionale derivante dall'applicazione del modello di vulnerabilità integrato MARS per gli edifici in M e in CA. I risultati che saranno mostrati nei capitoli successivi sono stati determinati (i) sulla base dell'inventario ISTAT 2011 (presentato al capitolo 2.1), (ii) con riferimento al modello nazionale di pericolosità sismica MPS04 (descritto al capitolo 3) e con l'applicazione della mappa dei suoli definita in Mori et al., 2020a,b e (iii) utilizzando i modelli integrati determinati in termini di percentuali di classi di vulnerabilità EMS definite nel progetto MARS (mostrati al capitolo 5.5) combinando i risultati forniti dai gruppi di ricerca.

### 8.1 Danno condizionato

#### 8.1.1 Principali risultati

Nel presente paragrafo sono riportate le mappe di danno condizionato calcolate con riferimento al verificarsi di un terremoto con un tempo di ritorno pari a 475 anni su tutto il territorio nazionale. Le mappe in Figura 8.1 riportano il danno medio calcolato aggregando i risultati su scala provinciale in riferimento al numero di abitazioni rispettivamente in muratura e in cemento armato. Tali mappe sono state determinate come combinazione dei suoli A, B, C e D rispetto alla mappa dei suoli definita in Mori et al., 2020a,b. In Tabella 8.1 sono riportate le DPM (Damage Probability Matrix) estratte a scala nazionale sul numero di abitazioni, per gli edifici in M, in CA e totali.

	Abitazioni (x 1000)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	DM (0-5)
<b>Muratura</b>	#	7'416	1'449	1'187	694	297	109	0.97
	%	66.5	13.0	10.6	6.2	2.7	1.0	
<b>CA</b>	#	11'135	1'029	459	206	68	16	0.68
	%	86.2	8.0	3.6	1.6	0.5	0.1	
<b>Totale</b>	#	18'551	2'478	1'646	900	365	125	0.81
	%	77.1	10.3	6.8	3.7	1.5	0.5	

Tabella 8.1 Danno condizionato con tempo di ritorno 475 anni aggregato a scala nazionale rispetto al numero di abitazioni

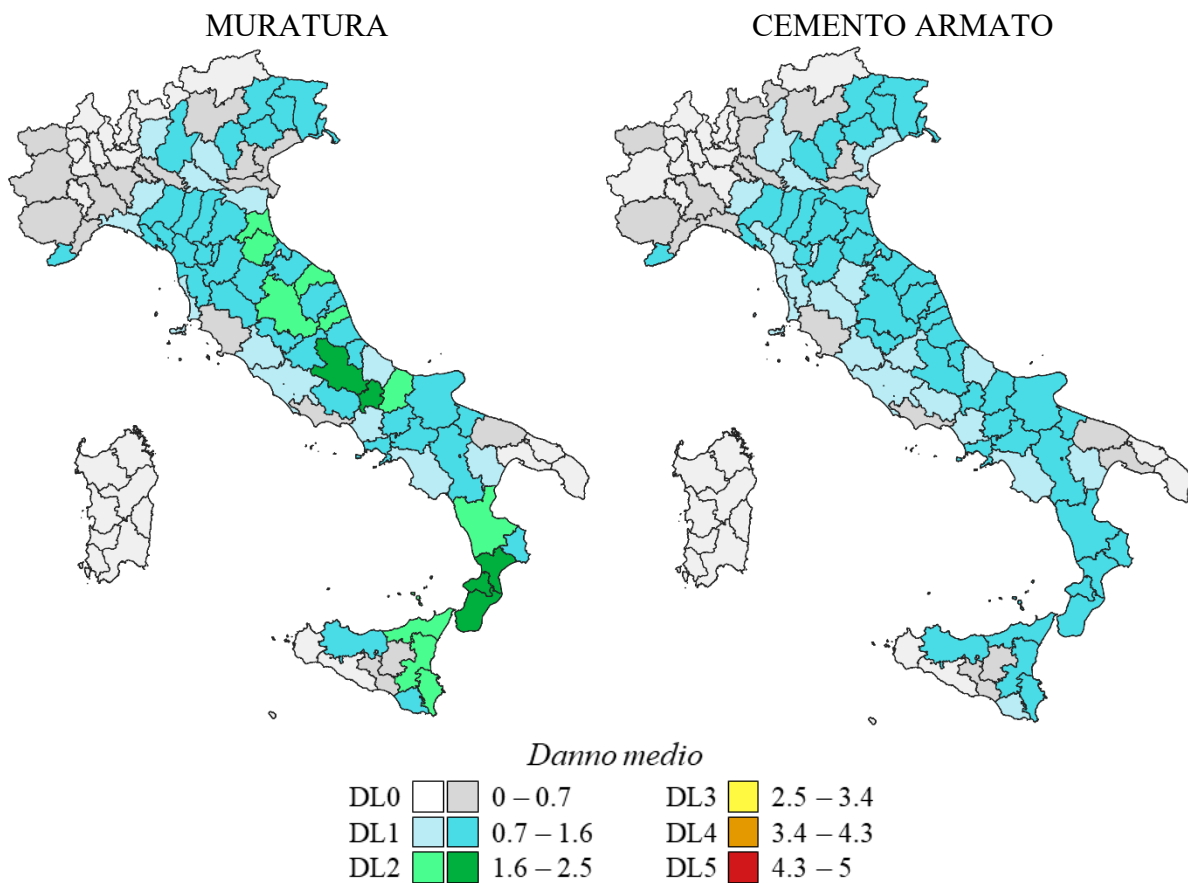
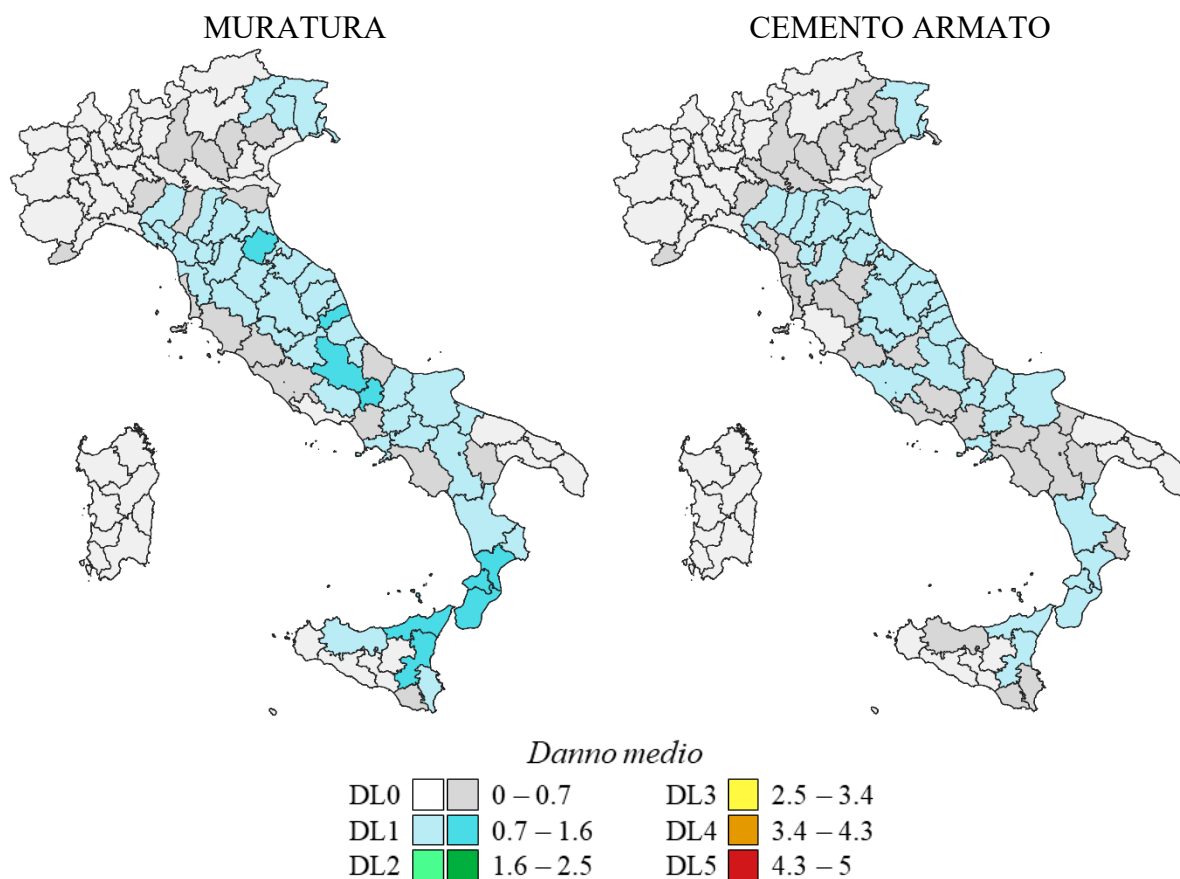


Figura 8.1 Mappe di danno condizionato con tempo di ritorno 475 anni rappresentanti il danno medio aggregato su scala provinciale rispetto al numero di abitazioni

## 8.2 Danno incondizionato

### 8.2.1 Principali risultati

Nel presente paragrafo sono riportate le mappe di danno incondizionato calcolate su una finestra temporale di 50 anni su tutto il territorio nazionale. Le mappe in Figura 8.2 riportano il danno medio calcolato aggregando i risultati su scala provinciale in riferimento al numero di abitazioni rispettivamente in muratura e in cemento armato, con l'uso della mappa dei suoli definita in Mori et al., 2020a,b. In Tabella 8.2 sono riportate le DPM (Damage Probability Matrix) estratte a scala nazionale sul numero di abitazioni, per gli edifici in M, in CA e totali.



**Figura 8.2** Mappe di danno incondizionato su finestra temporale di 50 anni, rappresentanti il danno medio aggregato su scala provinciale rispetto al numero di abitazioni

	Abitazioni (x 1000)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	DM (0-5)
<b>Muratura</b>	#	7'775	1'585	1'090	475	170	60	0.55
	%	69.7	14.2	9.7	4.3	1.5	0.5	
<b>CA</b>	#	8'715	2'595	1'035	405	125	35	0.51
	%	67.5	20.1	8.0	3.1	1.0	0.3	
<b>Totale</b>	#	16'490	4'180	2'125	880	295	95	0.53
	%	68.5	17.4	8.8	3.7	1.2	0.4	

**Tabella 8.2** Danno incondizionato su finestra temporale di 50 anni, aggregato a scala nazionale rispetto al numero di abitazioni

## 9 RISCHIO SISMICO IN TERMINI DI CONSEGUENZE

### 9.1 Rischio incondizionato

La valutazione del rischio in termini di livelli di danno è il punto di partenza per la valutazione delle conseguenze. La stima delle conseguenze è fondamentale per il DPC per definire efficaci strategie di mitigazione e per migliorare le misure in emergenza. Nel presente paragrafo sono mostrati i risultati di rischio sismico incondizionato a scala nazionale in termini di conseguenze. Analogamente al calcolo del rischio sismico in termini di livelli di danno, i risultati che saranno mostrati nei capitoli successivi sono stati determinati (i) sulla base dell'inventario ISTAT 2011 (presentato al capitolo 2.1), (ii) con riferimento al modello nazionale di pericolosità sismica MPS04 (descritto al capitolo 3) e con l'applicazione della mappa dei suoli definita in Mori et al., 2020a,b e (iii) utilizzando i modelli integrati per M e CA determinati in termini di percentuali di classi di vulnerabilità EMS definite nel progetto MARS (mostrati al capitolo 5.5) combinando i risultati forniti dai gruppi di ricerca e (iv) adottando i criteri di conversione danno-perdite, adottati nel NRA 2018 (Dolce et al., 2021) e descritti nel Capitolo 6. Inoltre, i risultati sono stati estratti dalla piattaforma IRMA per una finestra temporale di 1 anno.

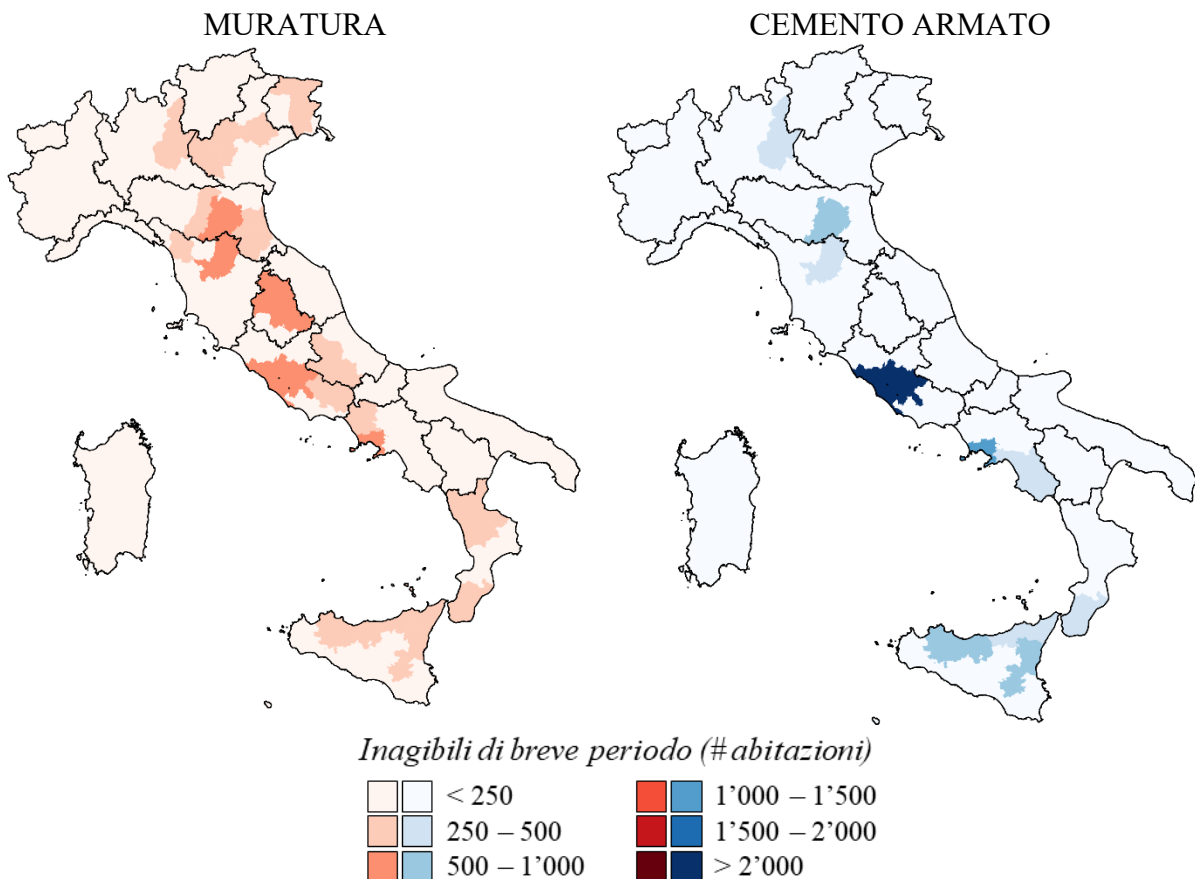
#### 9.1.1 Inagibilità e collassi

Le conseguenze in termini di inagibilità e collassi per il patrimonio edilizio in M e in CA a scala nazionale sono riportate in Tabella 9.1, per le quali, oltre al valore medio ottenuto dal modello integrato (mostrato al capitolo 5.5), è definito un valore di dispersione determinato a partire dai risultati ottenuti dall'applicazione di ciascun modello fornito dalle UR e le corrispondenti perdite associate al 16° e 84° percentile valutate a partire da una distribuzione lognormale. In tabella sono riportati anche i valori delle perdite associate all'intero patrimonio edilizio nazionale (M + CA). Nelle mappe riportate di seguito è possibile osservare i risultati aggregati su scala provinciale, in particolare: Figura 9.1, Figura 9.2 e Figura 9.3 mostrano rispettivamente le perdite in termini di inagibilità di breve periodo, lungo periodo e collassi determinate sul numero di abitazioni per gli edifici in M e in CA. Per gli edifici in CA è differente valutare le perdite sulle inagibilità e sui collassi se si considerano le abitazioni piuttosto che il numero di edifici, in quanto a parità di abitazioni corrisponde un minor numero di edifici rispetto alle strutture in M, come mostrato in Figura 7.12. Questo fattore è evidente confrontando i risultati ottenuti per gli edifici in CA in Figura 9.3, che riporta i collassi riferiti al numero di abitazioni, rispetto a quelli in Figura 9.4 nella quale sono mostrati i collassi associati al numero di edifici.

In Figura 9.5 sono sempre mostrate le perdite in termini di inagibilità di breve periodo, lungo periodo e collassi, ma considerando l'intero costruito italiano (M + CA); tali perdite sono valutate considerando il numero di abitazioni e su finestra temporale di 1 anno.

Tipologia costruttiva		Impatto (# abitazioni)		Impatto (# edifici)
		Inagibili breve p.	Inagibili lungo p.	Collassi
Muratura	Valore medio	16'580	10'430	950
	Dispersione	0.10	0.21	0.40
	16°percentile	15'010	8'460	640
	84°percentile	18'320	12'870	1'420
Cemento armato	Valore medio	14'230	8'075	150
	Dispersione	0.36	0.53	0.80
	16°percentile	9'930	4'770	70
	84°percentile	20'400	13'680	340
M + CA	Valore medio	30'810	18'505	1'100
	16°percentile	24'940	13'230	710
	84°percentile	38'720	26'540	1'750

**Tabella 9.1 Perdite ottenute in termini di agibilità (abitazioni) e collassi (edifici) a scala nazionale, su finestra temporale di 1 anno, per gli edifici in M, in CA e totale (M + CA)**



**Figura 9.1 Numero di abitazioni inagibili di breve periodo su finestra temporale di 1 anno**

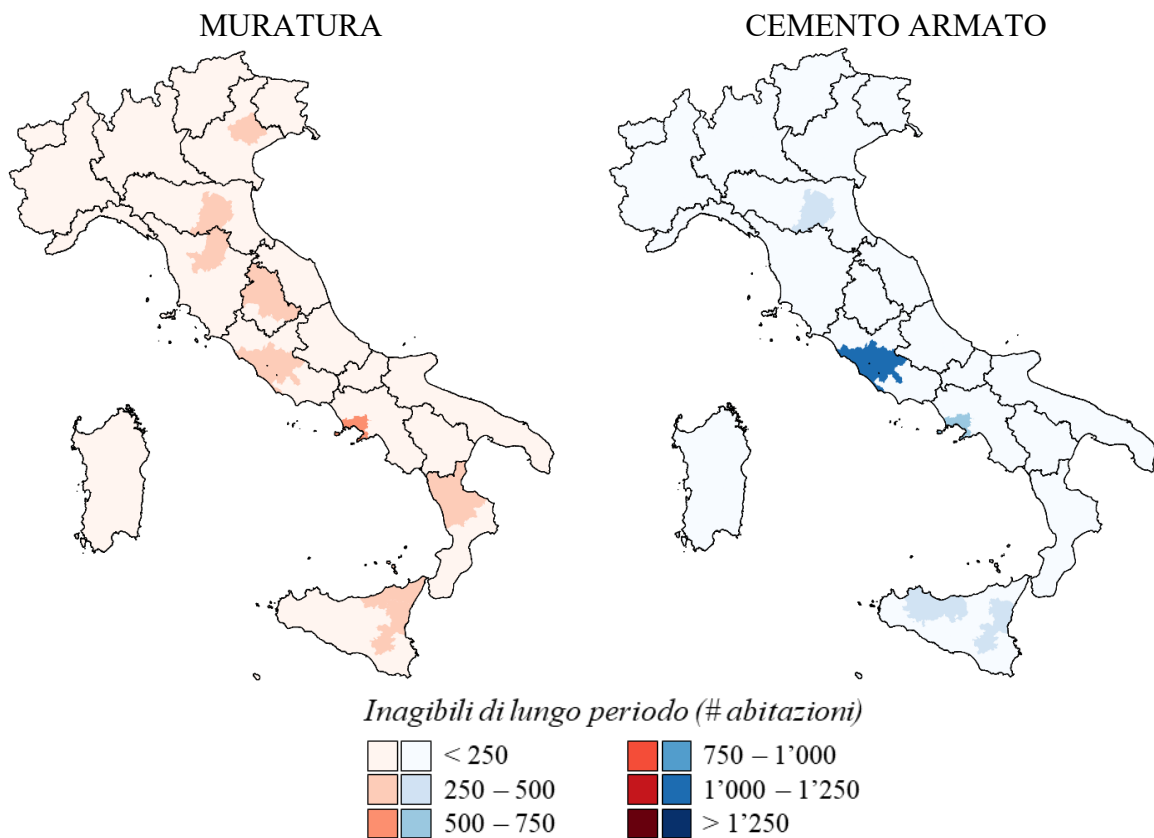


Figura 9.2 Numero di abitazioni inagibili di lungo periodo su finestra temporale di 1 anno

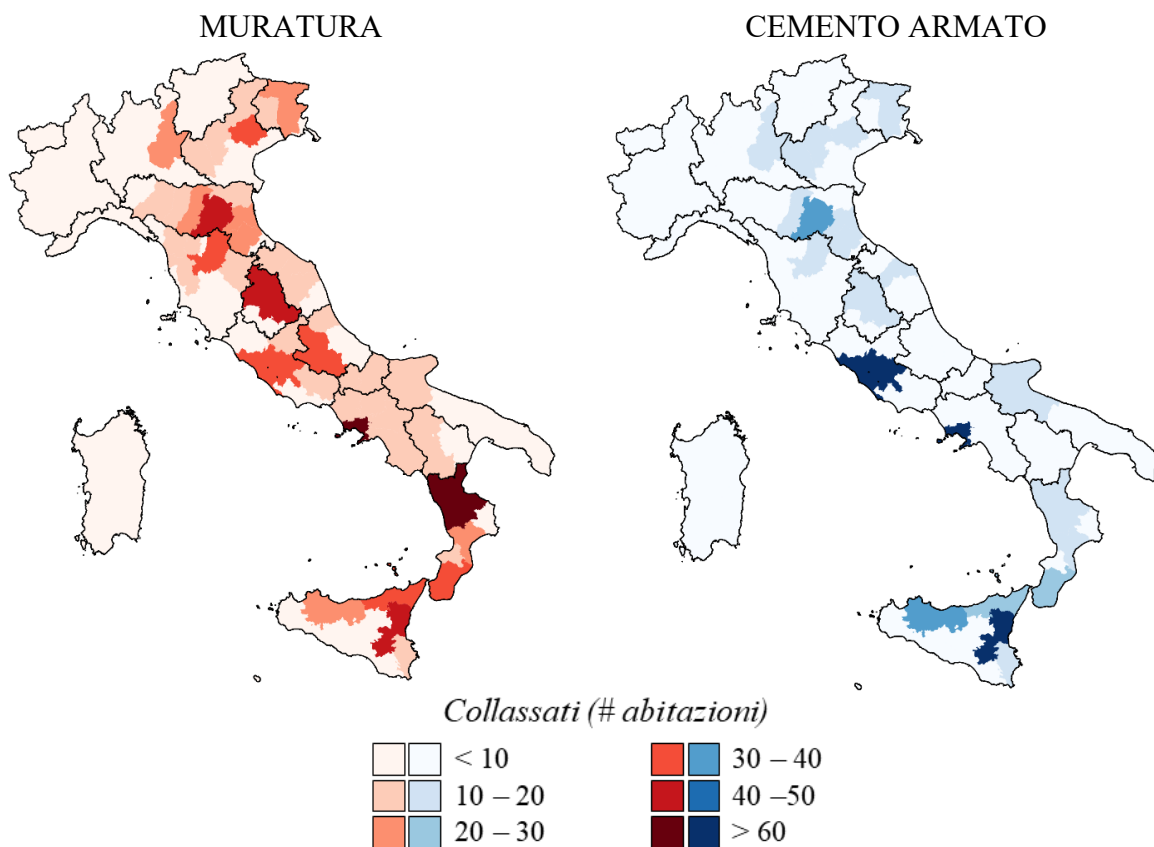


Figura 9.3 Numero di abitazioni collassate su finestra temporale di 1 anno



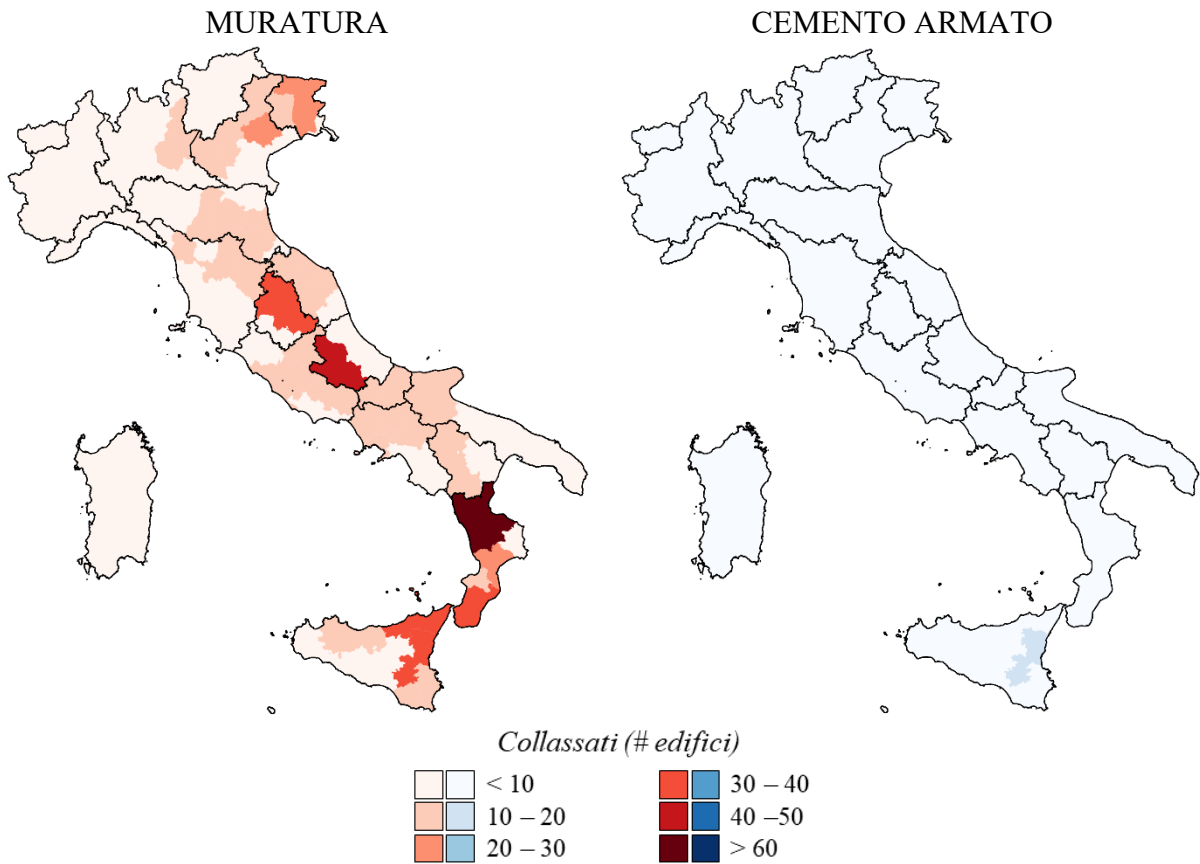


Figura 9.4 Numero di edifici collassati su finestra temporale di 1 anno

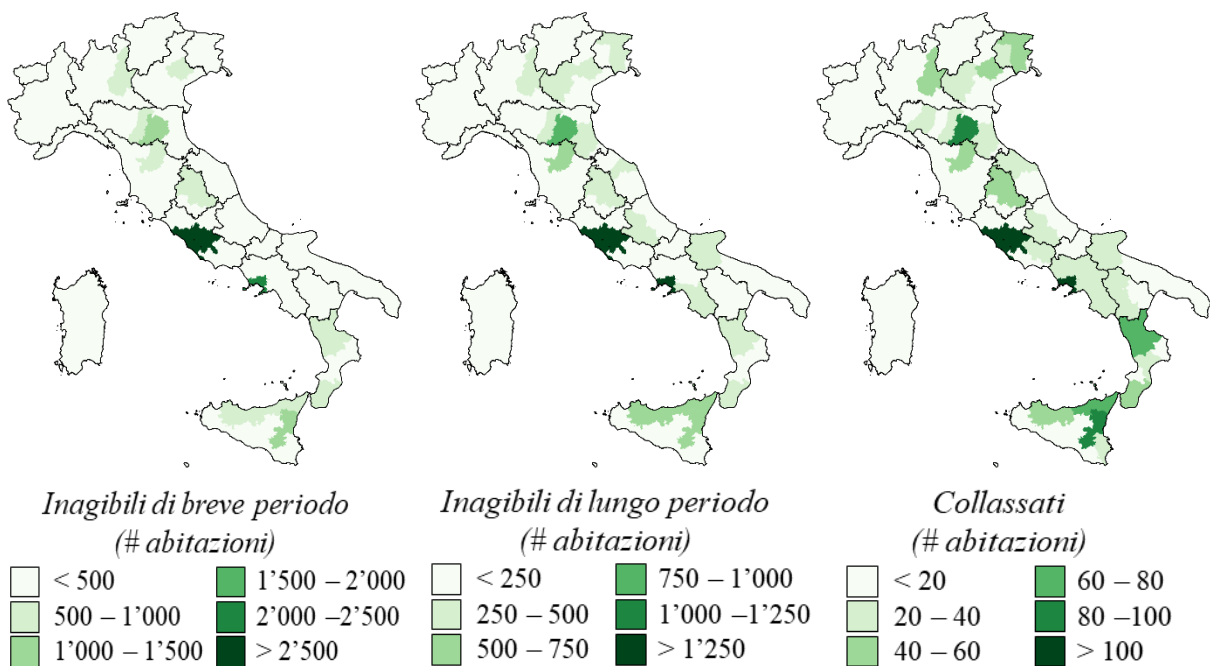


Figura 9.5 Conseguenze in termini di impatto (inagibili di breve periodo, inagibili di lungo periodo e collassi) calcolati sul numero di abitazioni a scala provinciale, su finestra temporale di 1 anno (M + CA)

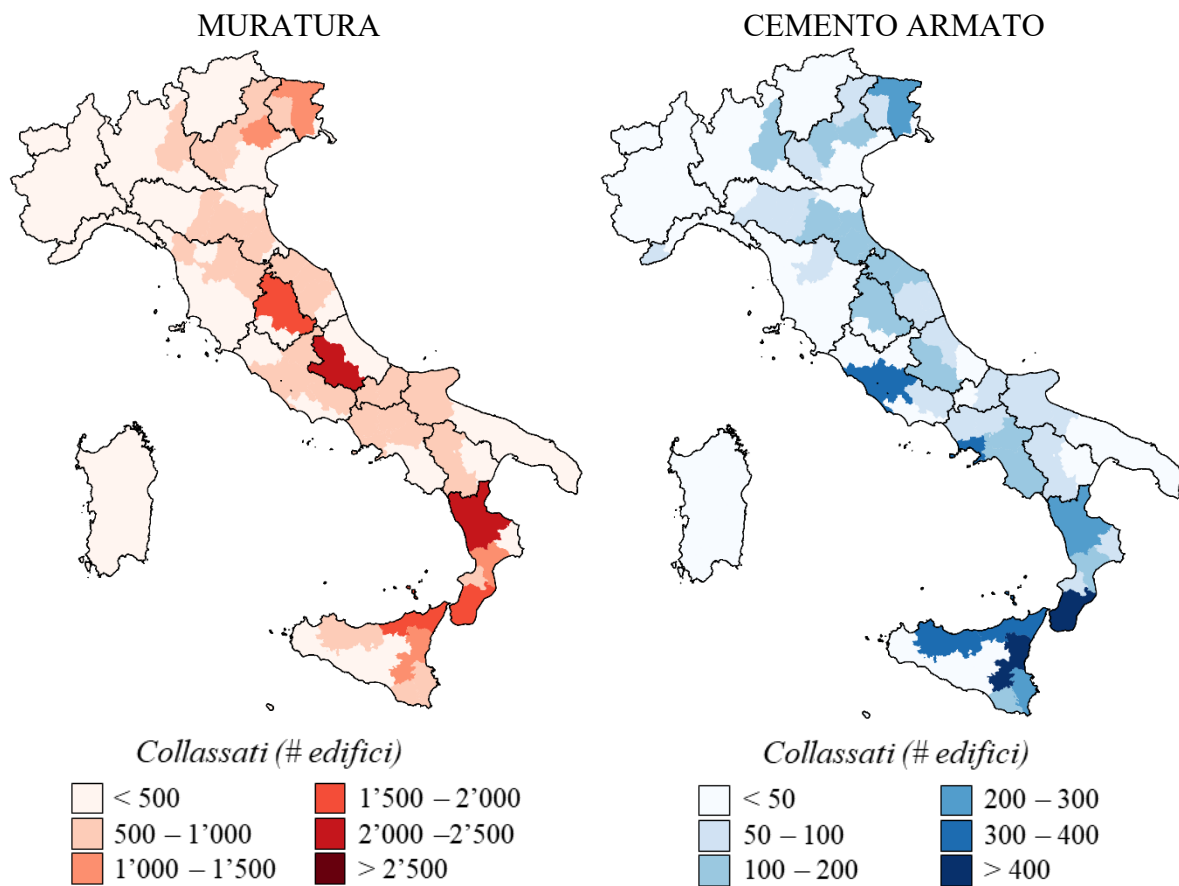


Figura 9.6 Numero di edifici collassati su finestra temporale di 50 anni

### 9.1.2 Casualties

Le conseguenze a scala nazionale in termini di casualties (vittime e feriti) sono mostrate in Tabella 9.2, distinte per gli edifici in M e in CA, per le quali, oltre al valore medio ottenuto dal modello integrato (mostrato al capitolo 5.5), è stato definito un valore di dispersione determinato a partire dai risultati ottenuti dall'applicazione di ciascun modello fornito dalle UR e le corrispondenti perdite associate al 16° e 84° percentile valutati a partire da una distribuzione lognormale. In tabella sono riportati anche i valori delle perdite associate all'intero patrimonio edilizio nazionale (M + CA). In Figura 9.7 e Figura 9.8 sono invece mostrate le mappe aggregate su scala provinciale che mostrano rispettivamente le perdite in termini di vittime e di feriti per gli edifici in M e in CA. Inoltre, Figura 9.9 riporta le mappe che mostrano la percentuale di vittime rispetto alla popolazione relativa al patrimonio edilizio residenziale italiano (M + CA) su scala comunale (a) e regionale (b).

Tipologia costruttiva		Perdite umane	
		Vittime	Feriti
Muratura	Valore medio	375	1'300
	Dispersione	0.37	0.36
	16°percentile	260	910
	84°percentile	540	1'855
Cemento armato	Valore medio	247	870
	Dispersione	0.77	0.75
	16°percentile	110	410
	84°percentile	530	1'840
M + CA	Valore medio	620	2'170
	16°percentile	370	1'320
	84°percentile	1'080	3'690

Tabella 9.2 Perdite ottenute in termini di perdite umane a scala nazionale, su finestra temporale di 1 anno, per gli edifici in M, in CA e totale (M + CA)

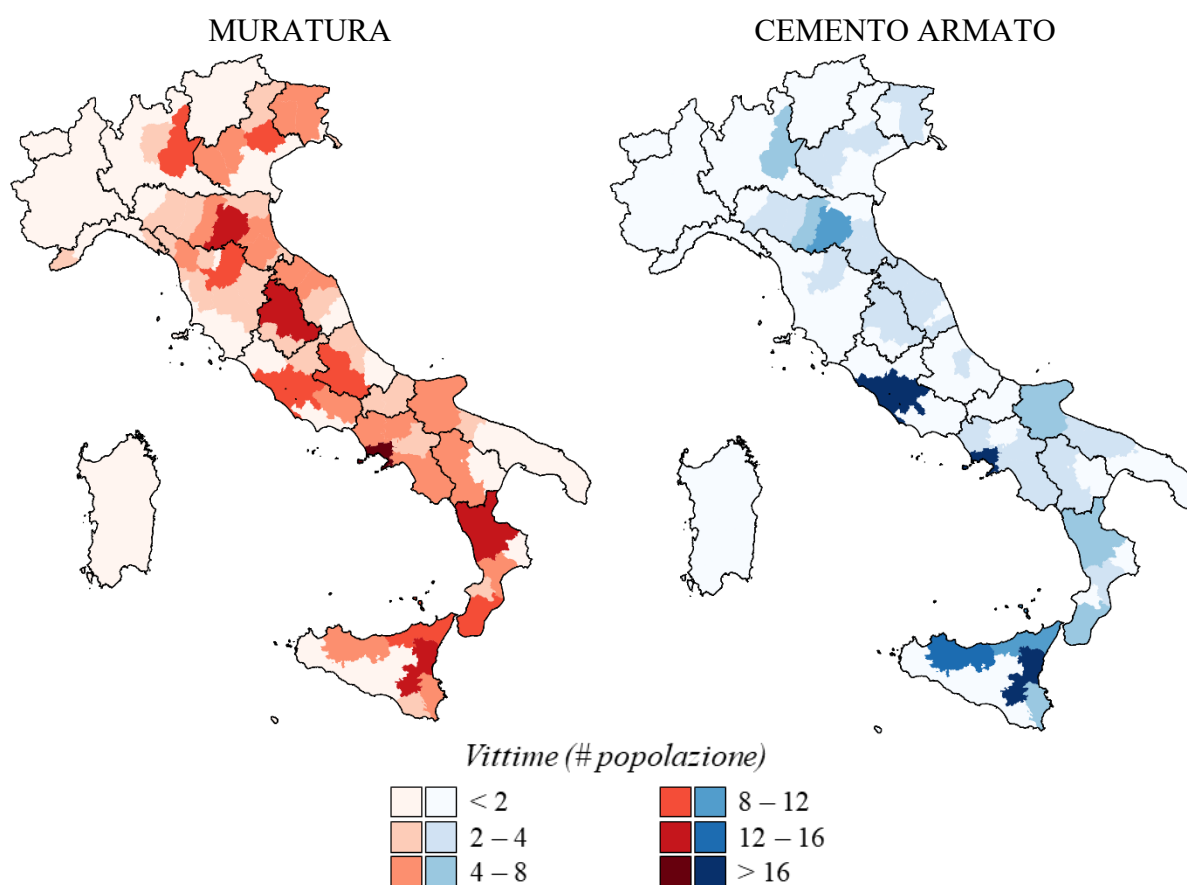
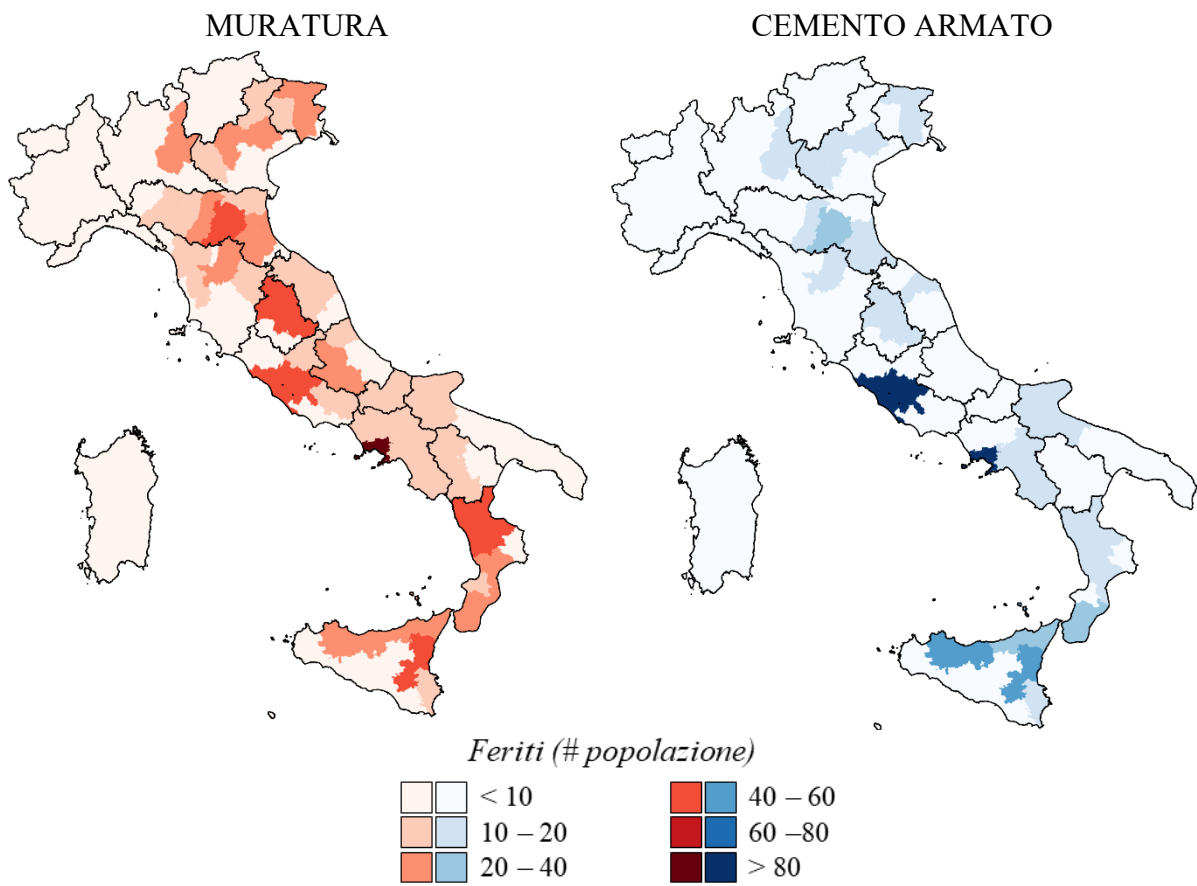
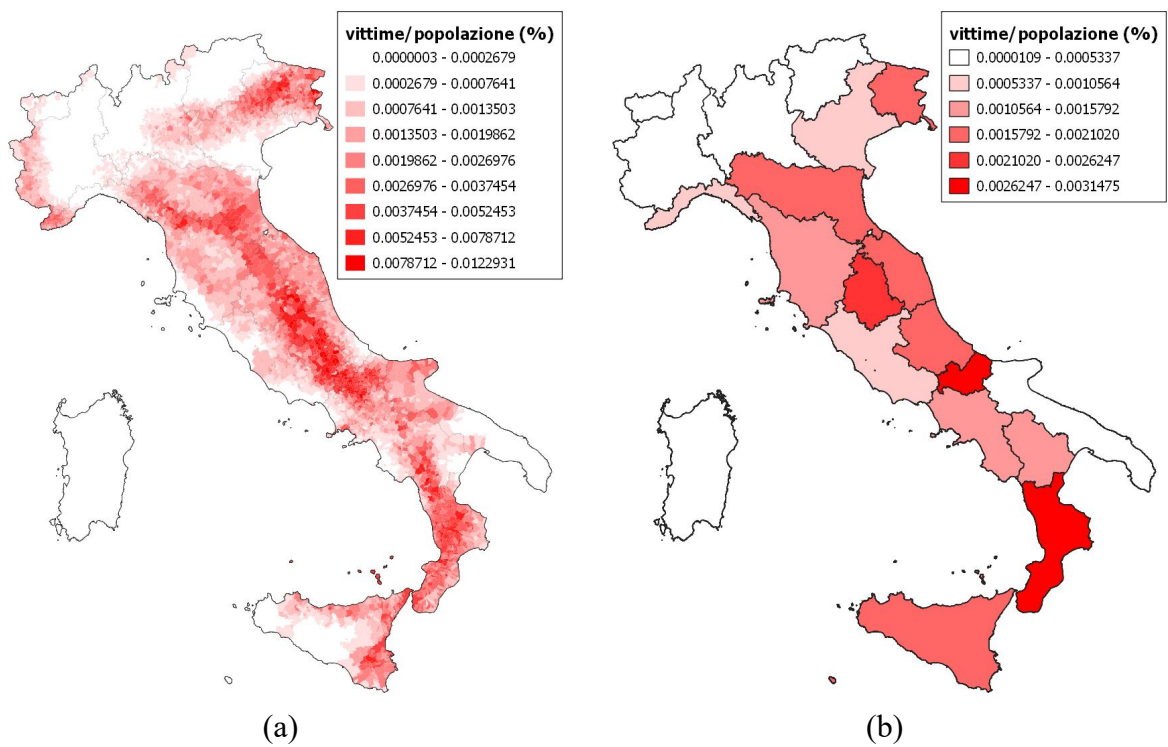


Figura 9.7 Numero di vittime su finestra temporale di 1 anno



**Figura 9.8** Numero di feriti su finestra temporale di 1 anno



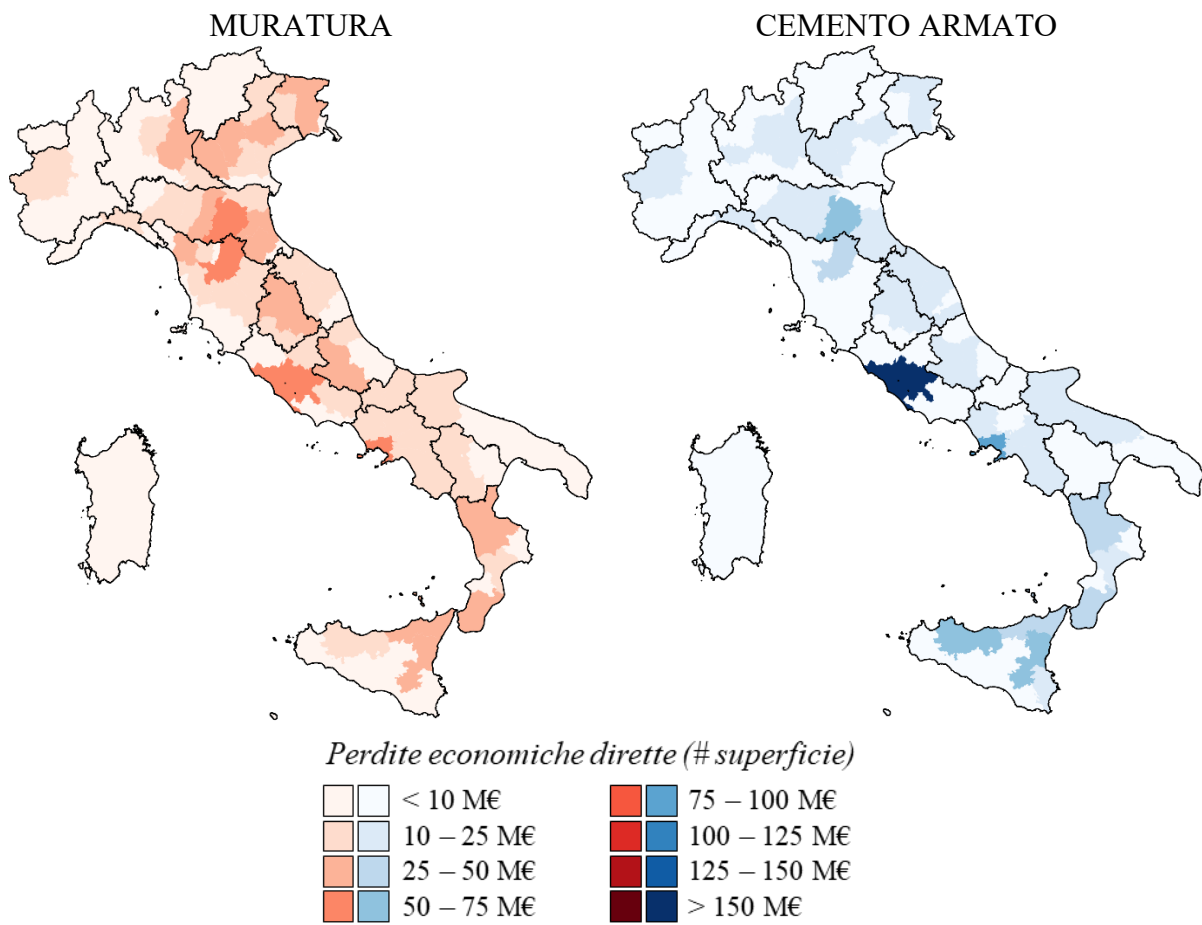
**Figura 9.9** Percentuale del numero di vittime rispetto alla popolazione per il patrimonio edilizio residenziale italiano a scala comunale (a) e regionale (b)

### 9.1.3 Perdite economiche

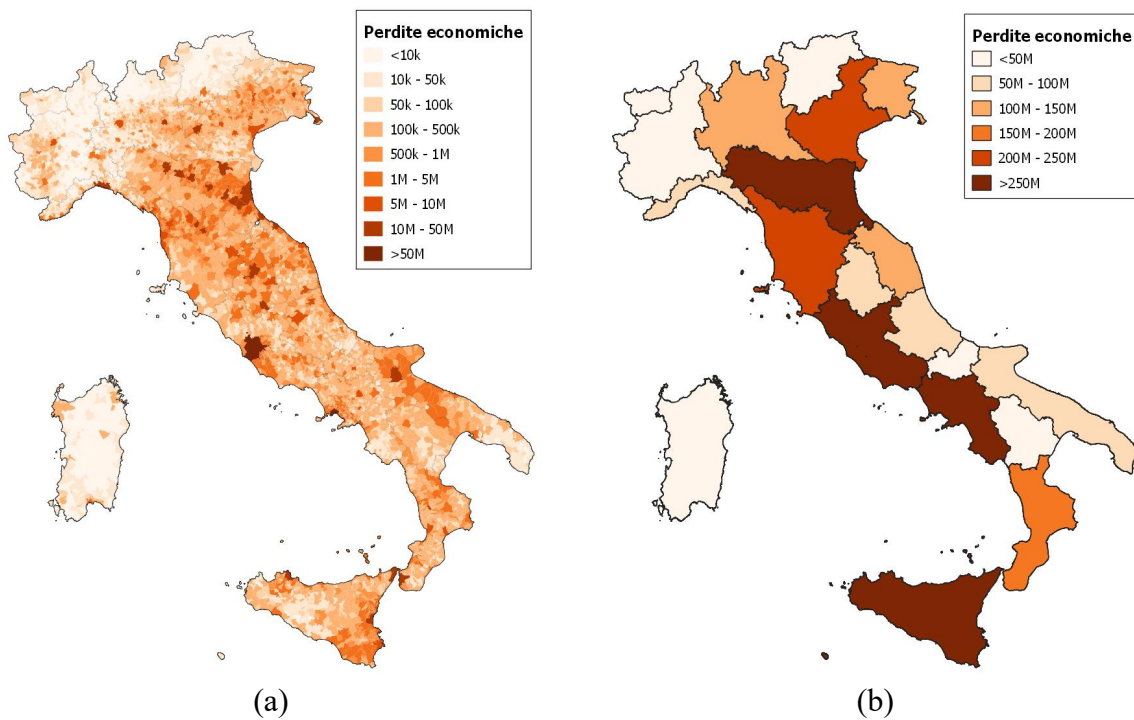
I risultati in termini di perdite economiche a scala nazionale ricavati dalla piattaforma IRMA sono mostrati in Tabella 9.3, distinte per gli edifici in M e in CA, per le quali, oltre al valore medio ottenuto dal modello integrato (mostrato al capitolo 5.5), è stato definito un valore di dispersione determinato a partire dai risultati ottenuti dall'applicazione di ciascun modello fornito dalle UR e le corrispondenti perdite associate al 16° e 84° percentile valutati a partire da una distribuzione lognormale. In tabella sono riportati anche i valori delle perdite associate all'intero patrimonio edilizio nazionale (M + CA). In Figura 9.10 sono riportate le mappe aggregate su scala provinciale che mostrano le perdite economiche dirette calcolate in funzione della superficie di edifici presenti, rispettivamente per quelli in M e in CA. Inoltre, la Figura 9.11 riporta le mappe che mostrano le perdite economiche dirette per il patrimonio edilizio residenziale italiano (M + CA) su scala comunale (a) e regionale (b).

Tipologia costruttiva		Perdite economiche
		Dirette (M€)
Muratura	Valore medio	1'470 €
	Dispersione	0.16
	16°percentile	1'260 €
	84°percentile	1'730 €
Cemento armato	Valore medio	1'250 €
	Dispersione	0.38
	16°percentile	860 €
	84°percentile	1'830 €
M + CA	Valore medio	2'730 €
	16°percentile	2'115 €
	84°percentile	3'560 €

**Tabella 9.3 Perdite economiche dirette ottenute a scala nazionale, su finestra temporale di 1 anno, per gli edifici in M, in CA e totale (M + CA)**



**Figura 9.10** Perdite economiche dirette calcolate su finestra temporale di 1 anno



**Figura 9.11** Perdite economiche dirette per il patrimonio edilizio residenziale italiano su scala comunale (a) e regionale (b)

## 9.2 Influenza della classe di suolo sulle conseguenze

I risultati mostrati nei capitoli 8 e 9 si riferiscono al rischio sismico calcolato con l'utilizzo della mappa dei suoli definita in Mori et al. 2020a,b. Come già anticipato al capitolo 3.2, nella piattaforma IRMA le informazioni sulla consistenza del costruito sono presenti a scala comunale e non è specificata la localizzazione di ogni singolo edificio, pertanto, per l'utilizzo della mappa dei suoli, sono state valutate le percentuali di superfici appartenenti a ciascuna classi di sottosuolo per ogni comune. Ad esempio, considerando la mappa dei suoli definita da Mori et al. 2020a,b, il territorio comunale di Roma appartiene alle classi di sottosuolo B (42%), C (57%) e D (1%). Figura 9.12 riporta anche le percentuali delle classi di sottosuolo per ogni regione e per l'intero territorio nazionale, estrapolati dalla piattaforma IRMA. Si evince che l'80% del territorio nazionale è su suolo B e il restante 20% su suolo C. Per ottenere quindi il rischio sismico caratterizzato in funzione della classe di sottosuolo a scala comunale, vengono combinate le mappe calcolate per ciascuna classe di suolo (A, B, C e D) in funzione delle percentuali suddette.

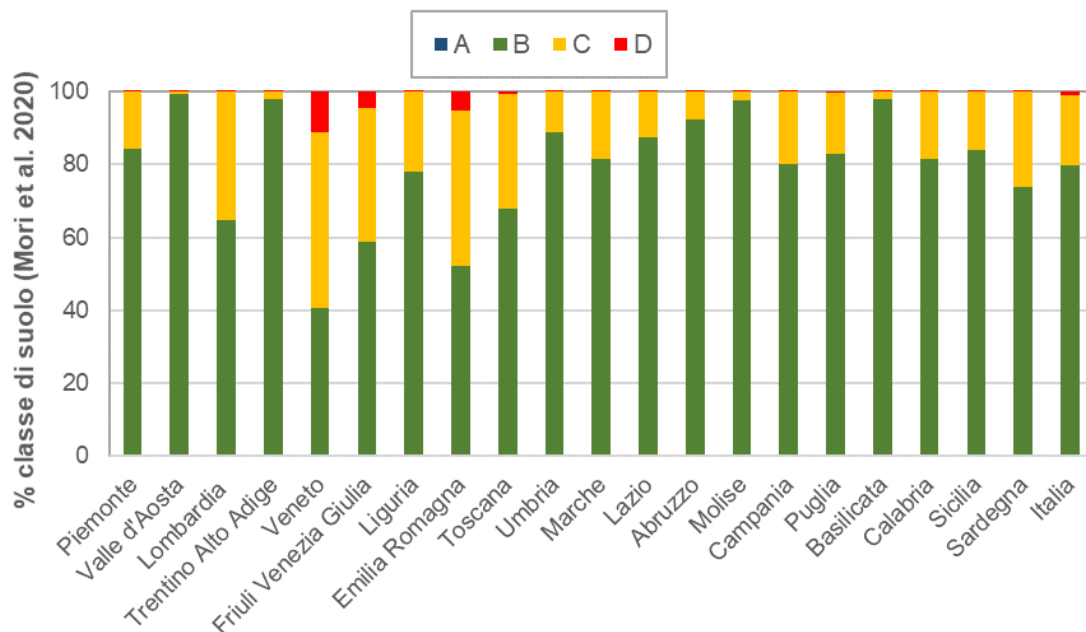


Figura 9.12 Percentuale classe di suolo per le regioni italiane e il territorio nazionale

In Tabella 9.4 e in Tabella 9.5 sono riportate le perdite calcolate ipotizzando uniformemente per tutti i comuni il suolo A, B, C e D e i valori che emergono combinando i suoli con l'uso della mappa dei suoli, rispettivamente per gli edifici in M e in CA. In Tabella 9.6 sono invece riportate le conseguenze a scala territoriale per l'intero patrimonio edilizio residenziale.



Classe di suolo	Perdite umane		Perdite economiche	Impatto (# abitazioni)		Impatto (# edifici)
	Morti	Feriti	Dirette (M€)	Inagibili breve periodo	Inagibili lungo periodo	Collassati
Suolo A	180	640	790 €	9'300	5'430	505
<b>Suolo B</b>	<b>300</b>	<b>1050</b>	<b>1'210 €</b>	<b>13'870</b>	<b>8'570</b>	<b>820</b>
Suolo C	520	1'800	1'920 €	21'210	13'885	1'400
Suolo D	820	2'810	2'775 €	29'500	20'410	2'165
<b>Mappa dei suoli</b>	<b>375</b>	<b>1'300</b>	<b>1'470 €</b>	<b>16'580</b>	<b>10'430</b>	<b>950</b>

Tabella 9.4 Perdite calcolate per ciascuna classe di sottosuolo e con l'uso della mappa dei suoli Mori et al. 2020a,b per gli edifici in M

Classe di suolo	Perdite umane		Perdite economiche	Impatto (# abitazioni)		Impatto (# edifici)
	Morti	Feriti	Dirette (M€)	Inagibili breve periodo	Inagibili lungo periodo	Collassati
Suolo A	110	400	650 €	7'510	3'910	75
<b>Suolo B</b>	<b>190</b>	<b>670</b>	<b>1'010 €</b>	<b>11'500</b>	<b>6'330</b>	<b>120</b>
Suolo C	330	1'180	1'610 €	18'070	10'550	210
Suolo D	535	1'880	2'340 €	25'750	15'950	330
<b>Mappa dei suoli</b>	<b>250</b>	<b>870</b>	<b>1'250 €</b>	<b>14'230</b>	<b>8'075</b>	<b>150</b>

Tabella 9.5 Perdite calcolate per ciascuna classe di sottosuolo e con l'uso della mappa dei suoli Mori et al. 2020a,b per gli edifici in CA

Classe di suolo	Perdite umane		Perdite economiche	Impatto (# abitazioni)		Impatto (# edifici)
	Morti	Feriti	Dirette (M€)	Inagibili breve periodo	Inagibili lungo periodo	Collassati
Suolo A	295	1040	1445	16805	9340	580
<b>Suolo B</b>	<b>490</b>	<b>1715</b>	<b>2220</b>	<b>25370</b>	<b>14900</b>	<b>940</b>
Suolo C	855	2980	3535	39280	24435	1615
Suolo D	1350	4685	5115	55250	36360	2500
<b>Mappa dei suoli</b>	<b>620</b>	<b>2165</b>	<b>2725</b>	<b>30815</b>	<b>18510</b>	<b>1100</b>

Tabella 9.6 Perdite calcolate per ciascuna classe di sottosuolo e con l'uso della mappa dei suoli Mori et al. 2020a,b per il patrimonio edilizio residenziale

Come è possibile osservare dai risultati ottenuti, le perdite corrispondenti all'aggregazione delle diverse classi di sottosuolo (mappa dei suoli) sono paragonabili a quelle ottenute ipotizzando il suolo B su tutto il territorio nazionale, essendo tale suolo quello più presente (variazione percentuale compresa tra il 15-25%). Pertanto, i risultati mostrati al capitolo 7 ottenuti dalla media dei risultati forniti dalle UR, utilizzando lo stesso peso per ogni modello, calcolati su



suolo B sono paragonabili a quelli mostrati nei paragrafi 8 e 9. Questo risultato si ottiene quando si confrontano i risultati a scala nazionale, mentre non è confermato quando si analizzano i risultati ad una scala territoriale più piccola, come quella provinciale o comunale. Tali risultati sono approfonditi al capitolo 10.

### 9.3 Confronto con i risultati di letteratura (NRA 2018 e GEM 2018)

Nel presente paragrafo, i risultati in termini di conseguenze ottenuti nel progetto MARS 2021 sono stati confrontati con quelli disponibili in letteratura. Tabella 9.7 riporta il confronto tra le conseguenze attese (casualties, perdite economiche ed inagibilità) stimate nel NRA 2018 (IPCD, 2018; Dolce et al., 2021) e in MARS 2021 per un'analisi di rischio incondizionato con finestra temporale di 1 anno.

	Perdite umane		Perdite economiche	Impatto (# abitazioni)	
	Morti	Feriti	Dirette (M€)	Inagibili breve periodo	Inagibili lungo periodo
NRA 2018	505	1745	2130	20940	15635
MARS 2021	620	2165	2725	30815	18510

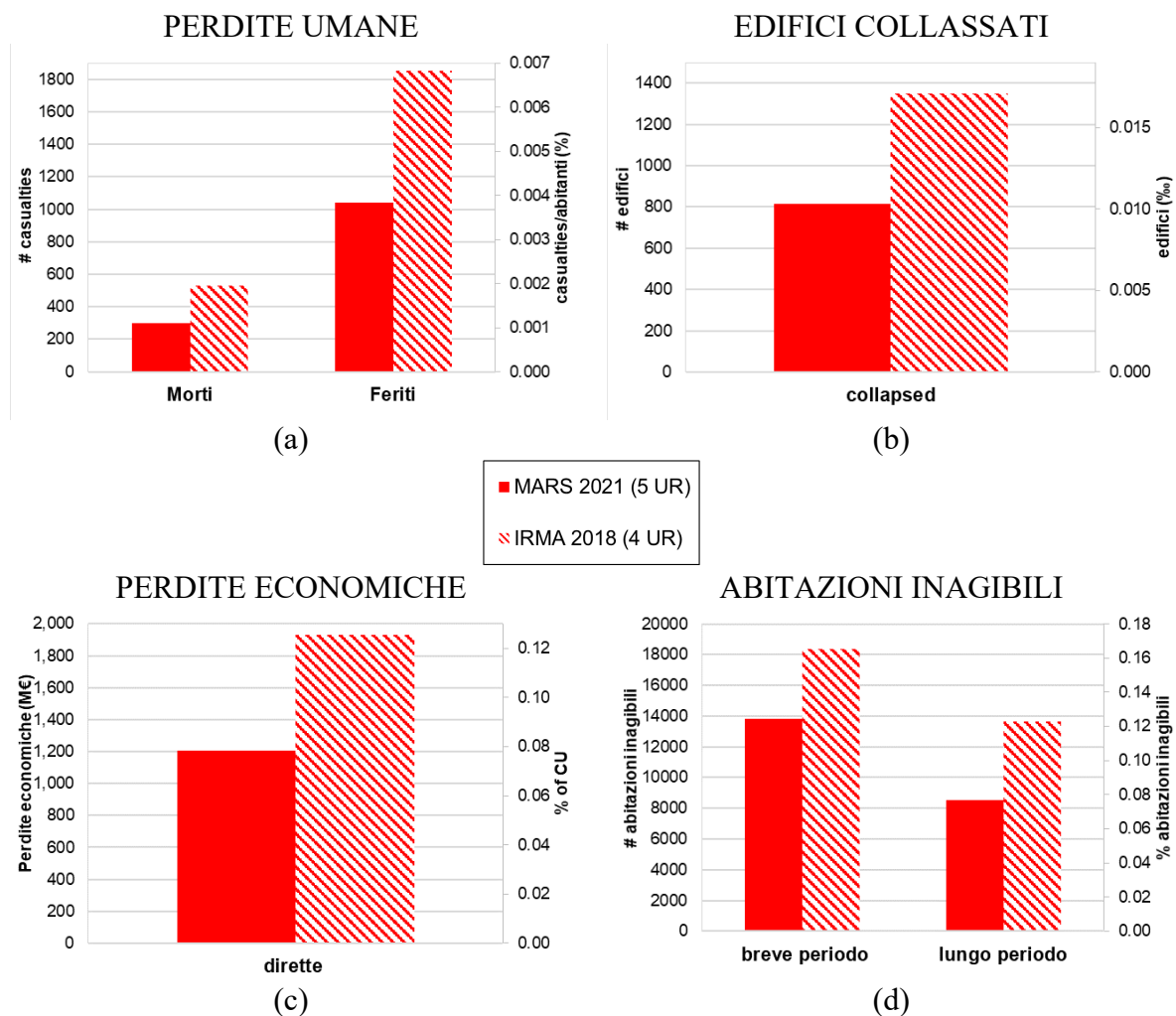
Tabella 9.7 Confronto in termini di conseguenze tra NRA 2018 e MARS 2021

Da notare che i risultati ottenuti nei due progetti derivano da una differente valutazione delle componenti del rischio. Tabella 9.8 riporta le principali differenze tra NRA 2018 e MARS 2021 nella definizione di vulnerabilità, esposizione e pericolosità.

	<u>NRA, 2018</u>	<u>MARS, 2021</u>
<b>VULNERABILITÀ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelli: 4 M + 2 CA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelli: 5 M + 5 CA</li> <li>• Nuova metrica "MARS"</li> </ul>
<b>ESPOSIZIONE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DB ISTAT 2001</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DB ISTAT 2011</li> </ul>
<b>PERICOLOSITÀ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mappa uniforme: suolo A</li> <li>• Curva di hazard (cut-off <math>PGA_{min}</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mappa con classi di suolo</li> <li>• Ridefinizione curva di hazard (cut-off <math>PGA_{min}</math> e <math>TR_{max}</math>)</li> </ul>

Tabella 9.8 Principali differenze tra NRA 2018 e MARS 2021

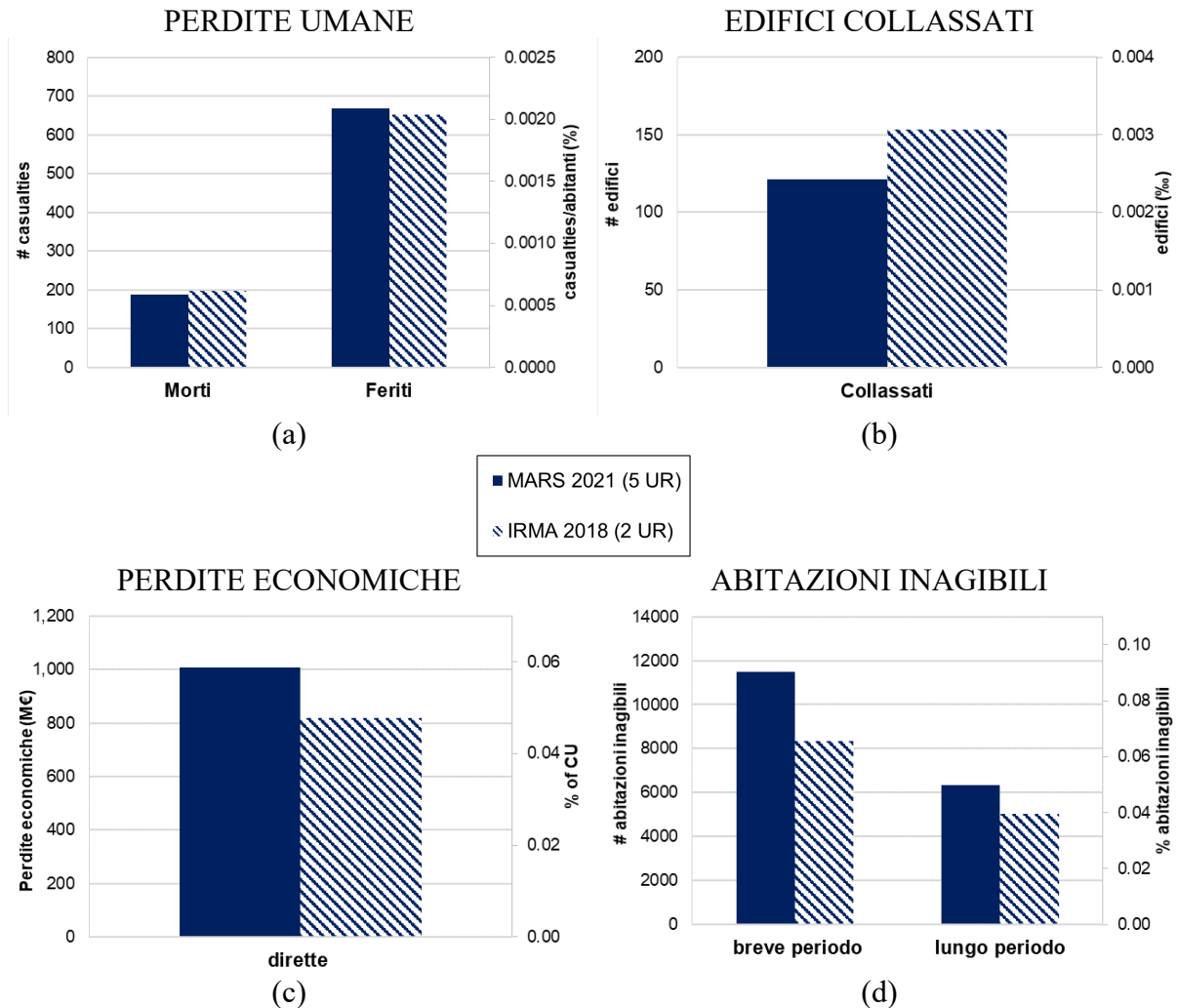
Al fine di effettuare un confronto omogeneo, sono stati quindi considerati i risultati ottenuti con il database ISTAT 2011 e il suolo B. Nel dettaglio, le conseguenze stimate con i modelli MARS 2021 (5 M + 5 CA) attraverso la piattaforma IRMA-v2 sono state confrontate con quelle stimate con i modelli del NRA 2018 (4 M + 2 CA) attraverso IRMA-v1 (indicate di seguito come IRMA 2018). Il confronto in termini di perdite umane, edifici collassati, perdite economiche ed abitazioni inagibili è stato effettuato considerando il patrimonio edilizio in muratura (Figura 9.13), in CA (Figura 9.14) e totale (M + CA; Figura 9.15).



**Figura 9.13 Confronto in termini di conseguenze attese tra MARS 2021 e IRMA 2018 per patrimonio edilizio in muratura (su suolo B)**

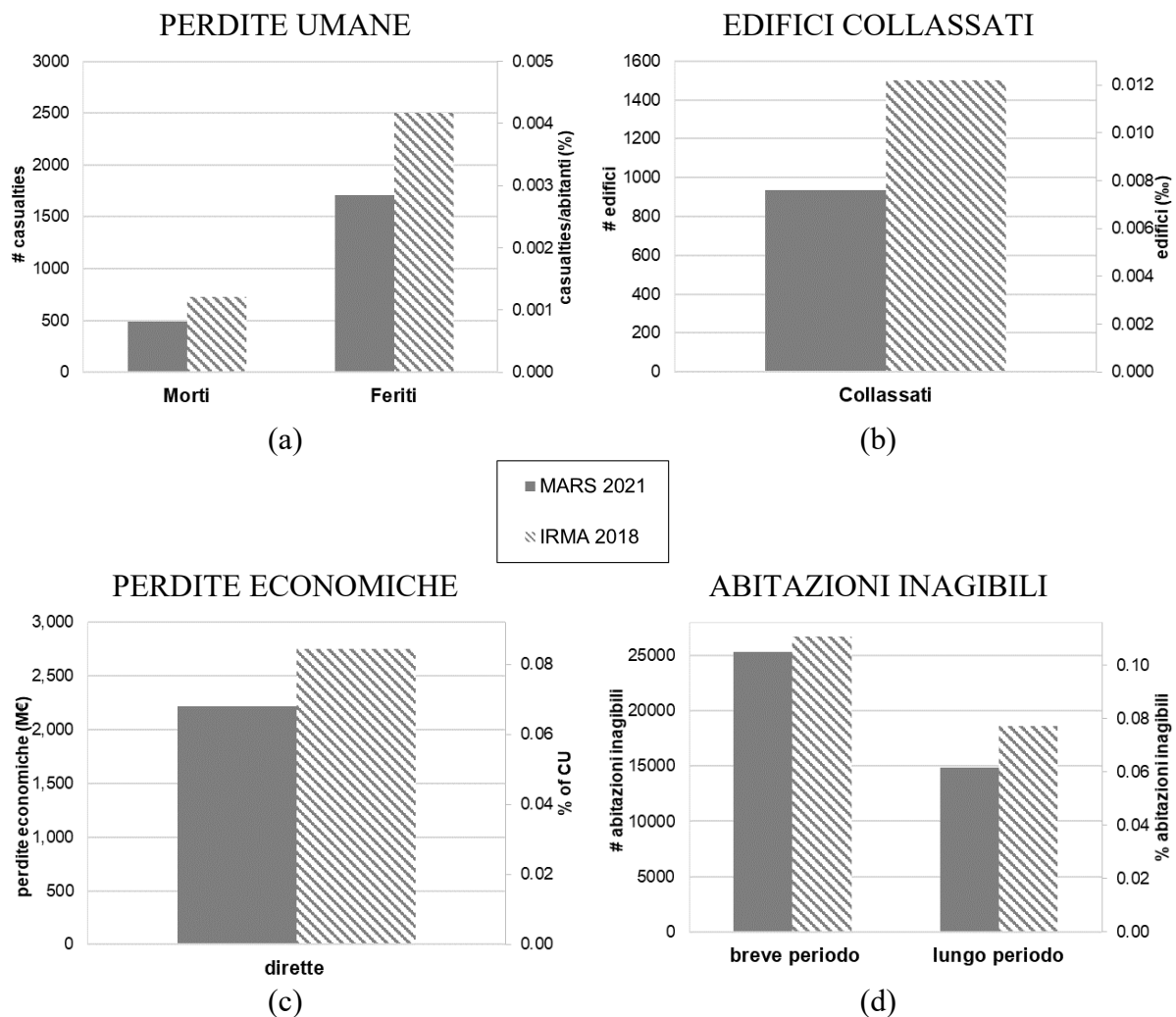
Per il patrimonio edilizio residenziale in muratura, sebbene sia stato considerato soltanto un modello di vulnerabilità aggiuntivo (quello proposto da UNIGEb), si osservano differenze tra le conseguenze stimate in MARS 2021 e quelle con IRMA 2018. Tali differenze sono dovute

principalmente alla ridefinizione della curva di hazard che produce una riduzione delle conseguenze attese in MARS 2021.



**Figura 9.14 Confronto in termini di conseguenze attese tra MARS 2021 e IRMA 2018 per patrimonio edilizio in CA (su suolo B)**

Per il patrimonio edilizio in CA, le stime ottenute in MARS 2021 sono confrontabili con quelle di IRMA 2018 per le conseguenze funzione dei livelli di danno più severi (i.e., perdite umane ed edifici collassati) mentre sono leggermente maggiori per le conseguenze funzione anche dei livelli di danno più bassi (i.e., perdite economiche ed abitazioni inagibili). In questo caso, il contributo riduttivo dovuto alla ridefinizione della curva di hazard è bilanciato dalle condizioni generalmente più elevate della fragilità del CA, grazie alla disponibilità di un ventaglio più diversificato e verificato di modelli di vulnerabilità.



**Figura 9.15** Confronto in termini di conseguenze attese tra MARS 2021 e IRMA 2018 per patrimonio edilizio residenziale italiano (M + CA) (su suolo B)

Un altro confronto interessante è stato effettuato considerando la valutazione del rischio per l'Italia (<https://downloads.openquake.org/countryprofiles/ITA.pdf>) definita dalla Fondazione Global Earthquake Model (GEM) (Silva et al. 2018). Tale valutazione utilizza la pericolosità ESHM13 del progetto SHARE (che incorpora l'MPS04). Tabella 9.9 riporta un confronto in termini di perdite economiche tra i risultati ottenuti da GEM 2018 e MARS 2021. La perdita economica annua stimata per i danni attesi al patrimonio edilizio residenziale con GEM ammonta a 1,67 miliardi di dollari. Da notare che GEM attribuisce un valore inferiore al costo di ricostruzione del patrimonio edilizio residenziale (2455 mld) rispetto ai valori utilizzati in MARS 2021 (3235 mld). Tale valore per MARS è stato valutato considerando la superficie totale secondo i dati ISTAT 2011, e ipotizzando un costo di ricostruzione di 1350 €/mq. Dunque, al fine di effettuare un confronto omogeneo, le perdite economiche medie annue sono

state normalizzate rispetto al costo totale di ricostruzione del patrimonio edilizio residenziale. I valori ottenuti sono pari a 0,68‰ e 0,842‰ rispettivamente per GEM 2018 e MARS 2021.

	<b>GEM, 2018</b>	<b>MARS, 2021</b>
<b>Costo ricostruzione totale (Mld)</b>	2'455	3'235
<b>Perdite economiche annue medie (Mln)</b>	1'670	2'725
<b>Rapporto perdite (‰)</b>	0.680	0.842

Tabella 9.9 Confronto in termini di perdite economiche tra GEM 2018 e MARS 2021

Infine, viene proposto un confronto in termini di perdite economiche annue per 5 regioni d'Italia per le quali si ha a disposizione il dato GEM. Figura 9.16 mostra che, per alcune regioni (es Emilia-Romagna e Campania), i risultati ottenuti in MARS 2021 confermano un buon accordo con le stime GEM (normalizzate rispetto al costo di ricostruzione del patrimonio edilizio residenziale e convertite in euro) mentre si hanno differenze significative per altre regioni (es Calabria).

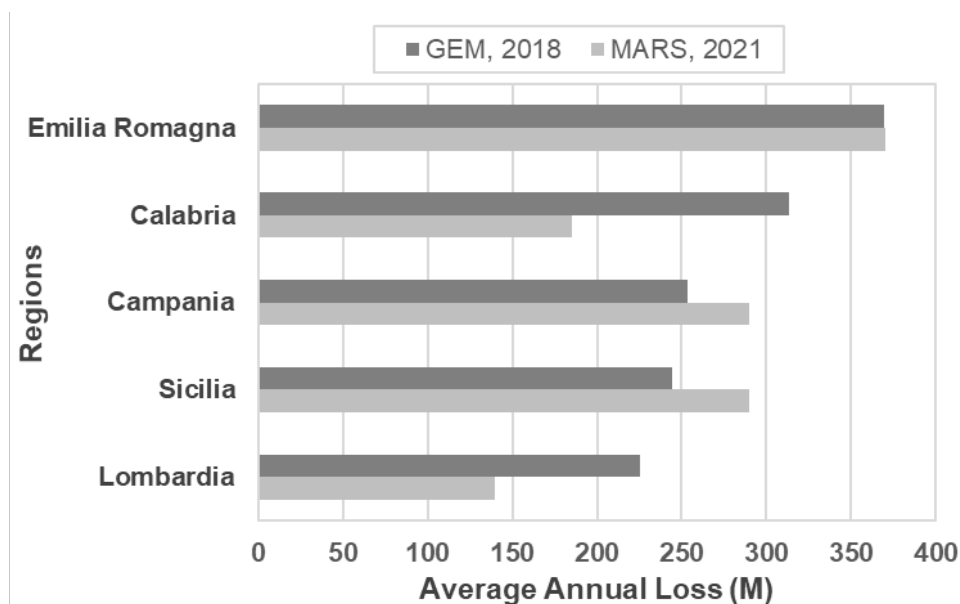


Figura 9.16 Confronto in termini di perdite economiche annue tra GEM 2018 e MARS 2021 per 5 regioni

## 10 PRIMI RISULTATI OTTENUTI CON IL MODELLO REGIONALIZZATO

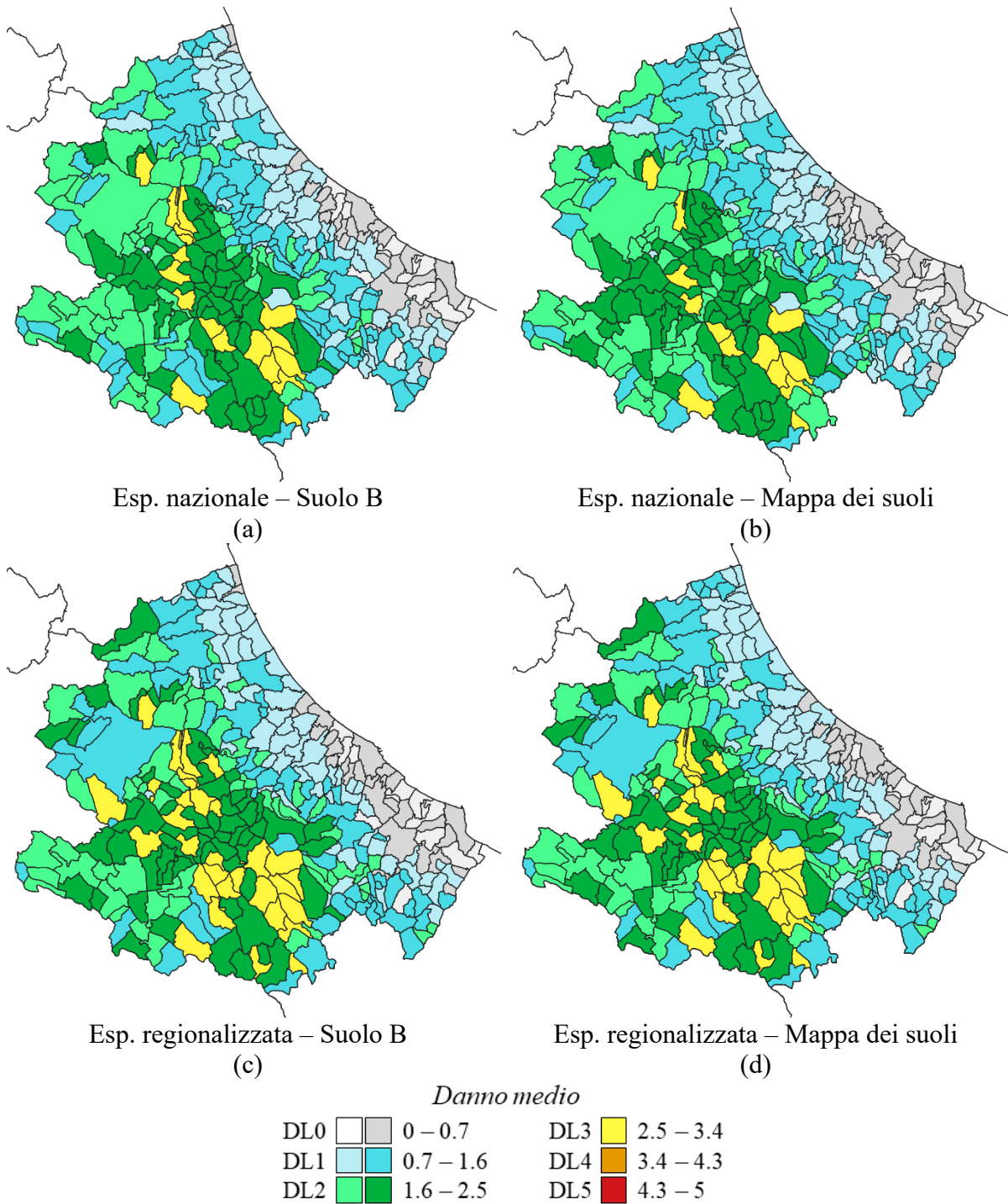
Come già introdotto al capitolo 2.3 e al capitolo 5.6, sono stati forniti dalle UR due modelli con i quali è stato distinto il comportamento strutturale degli edifici in muratura non solo in funzione del numero di piani e dell'epoca di costruzione (tassonomia dell'inventario ISTAT), ma anche in funzione delle tipologie murarie e di solai al variare dell'epoca di costruzione e del numero di piani (tassonomia CARTIS). I due modelli utilizzati sono quello euristico-macrosismico del Prof. Lagomarsino (UniGEa) e il modello meccanico-analitico della Prof.ssa Cattari (UniGEb). I due modelli regionalizzati sono stati applicati per i comuni della regione Abruzzo e della regione Emilia-Romagna nei 12 ambiti territoriali (4 classi demografiche e 3 classi altimetriche). Le due regioni sono state selezionate in quanto si è ritenuto fossero le regioni per cui potesse essere massimizzato l'effetto della regionalizzazione. La regione Abruzzo è la regione per la quale si hanno maggiormente a disposizione dati osservazionali, riferiti al terremoto de L'Aquila del 2009, e sui quali molti dei modelli forniti dalle UR sono stati derivati e calibrati a scala nazionale (in particolare quelli empirici). Per tale regione è quindi auspicabile attendersi una risposta simile a quella fornita dal modello a scala nazionale, pur essendo presenti all'interno della regione diversi ambiti territoriali. La regione Emilia-Romagna invece, è stata selezionata poiché caratterizzata da costruzioni aventi tipologie murarie molto differenti da quelle che contraddistinguono la regione Abruzzo (elevata presenza di murature in mattoni pieni, rispetto alla pietra che caratterizza i centri urbani dell'Abruzzo), ma anche poiché è notevolmente influenzata dalla categoria di sottosuolo (elevata presenza di suolo C).

### 10.1 Danno condizionato

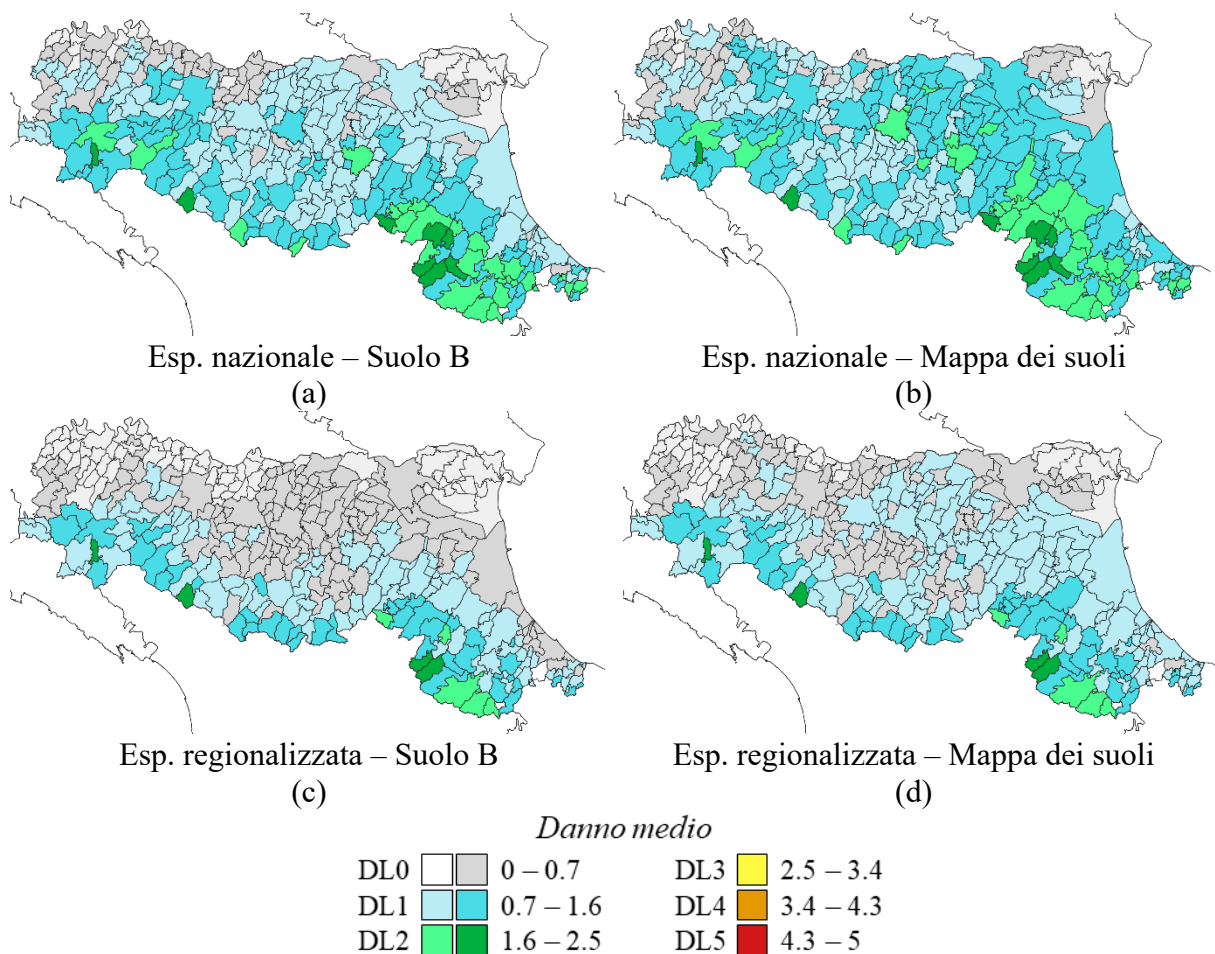
Nel presente paragrafo sono riportati i risultati ottenuti in termini di danno condizionato con l'applicazione dell'esposizione regionalizzata. Le mappe in Figura 10.1 per la regione Abruzzo e in Figura 10.2 per la regione Emilia-Romagna riportano il danno medio condizionato aggregato a scala comunale sul numero di edifici, ottenuto per tempo di ritorno pari a 475 con il modello euristico-macrosismico sviluppato dall'UR UniGEa, per le seguenti combinazioni:

- a) esposizione nazionale (inventario ISTAT) con classe di sottosuolo B;
- b) esposizione nazionale (inventario ISTAT) con l'uso della mappa dei suoli;
- c) esposizione regionalizzata (database CARTIS) con classe di sottosuolo B;
- d) esposizione regionalizzata (database CARTIS) con l'uso della mappa dei suoli.





**Figura 10.1** Mappe di danno medio condizionato con tempo di ritorno 475 anni calcolate a scala comunale sul numero di edifici per la regione Abruzzo considerando l'esposizione a scala nazionale su suolo B (a) e con la mappa dei suoli (b) e con l'esposizione regionalizzata su suolo B (c) e con la mappa dei suoli (d) attraverso il modello di UniGEa

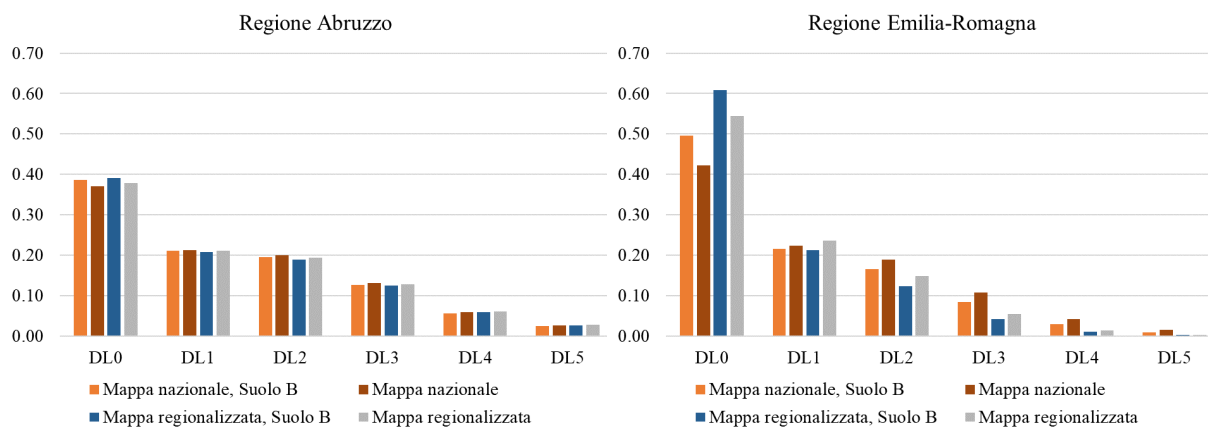


**Figura 10.2** Mappe di danno medio condizionato con tempo di ritorno 475 anni calcolate a scala comunale sul numero di edifici per la regione Emilia-Romagna considerando l'esposizione a scala nazionale su suolo B (a) e con la mappa dei suoli (b) e con l'esposizione regionalizzata su suolo B (c) e con la mappa dei suoli (d) attraverso il modello di UniGEa

Analizzando i risultati ottenuti per la regione Abruzzo, emerge una leggera differenza tra le mappe (a) e (c) per le quali entra in gioco la regionalizzazione, in particolare nei comuni piccoli di montagna, nei quali si osserva un peggioramento del comportamento, e nei comuni sulla costiera per i quali il livello di danno medio diminuisce; non si rilevano invece sostanziali differenze in funzione dei suoli (mappe (a) e (b) oppure (c) e (d)). Anche dalle DPM riportate in Figura 10.3 calcolate a scala regionale, non emergono significative differenze né con l'uso della mappa dei suoli tantomeno con la regionalizzazione, per la regione Abruzzo, mentre si rilevano notevoli variazioni dalle DPM calcolate a scala regionale per la regione Emilia-Romagna. Infatti, anche dalle mappe di danno estratte per la regione Emilia-Romagna, Figura 10.2, è possibile osservare una significativa differenza sia quando viene introdotta l'esposizione regionalizzata, che quando si utilizza la mappa dei suoli. Con l'introduzione della regionalizzazione (mappe (a) e (c)) si determina una sostanziale riduzione del danno medio



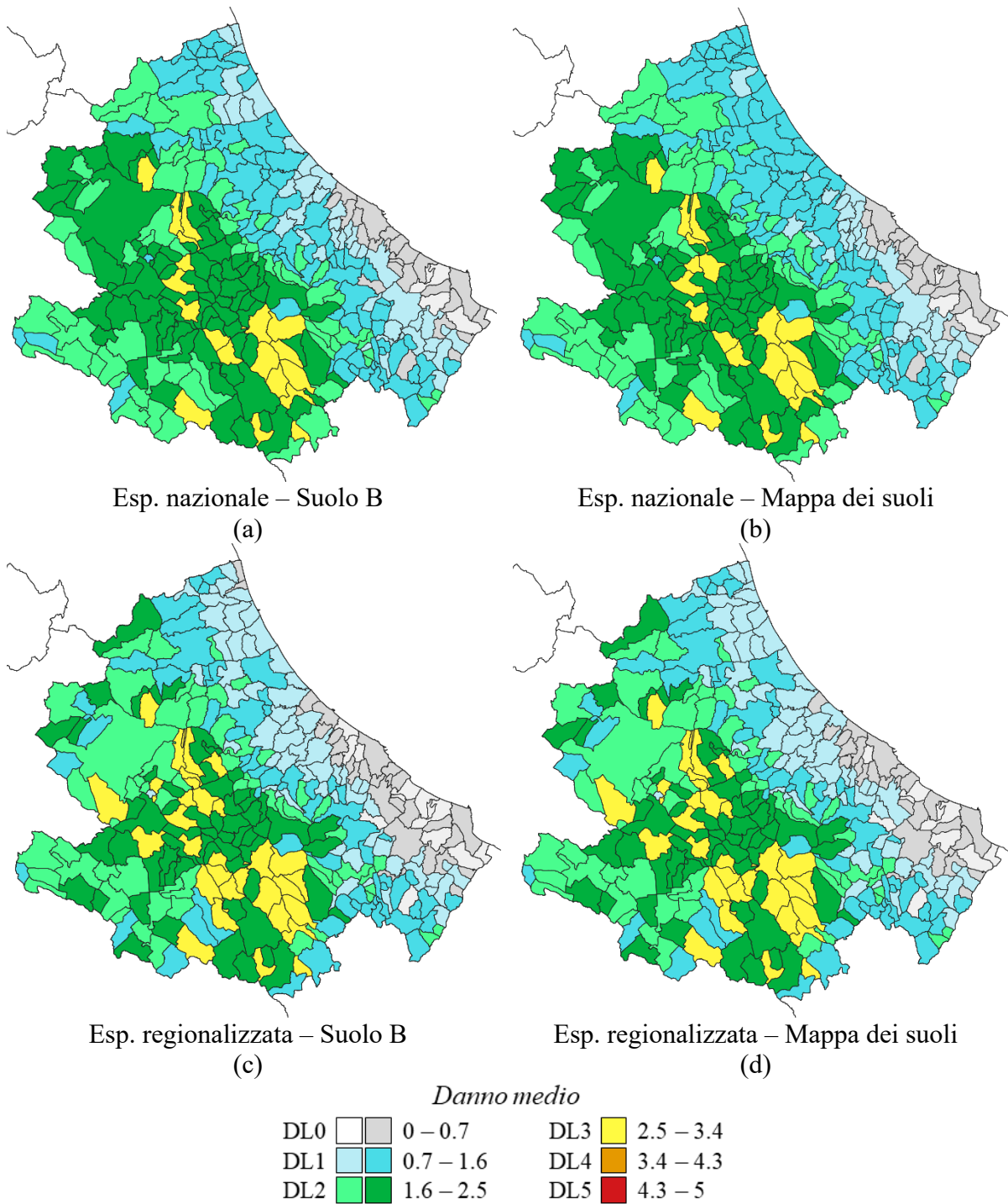
nella zona della pianura padana e, in misura minore, anche nelle zone collinari a sud della regione. Per quanto riguarda invece l'utilizzo delle diverse classi di sottosuolo (mappe (a) e (b) oppure (c) e (d)), è possibile osservare un peggioramento del livello di danno medio sia nella zona della pianura padana che nella zona di Ravenna, ove sono più rilevanti i suoli C e D.



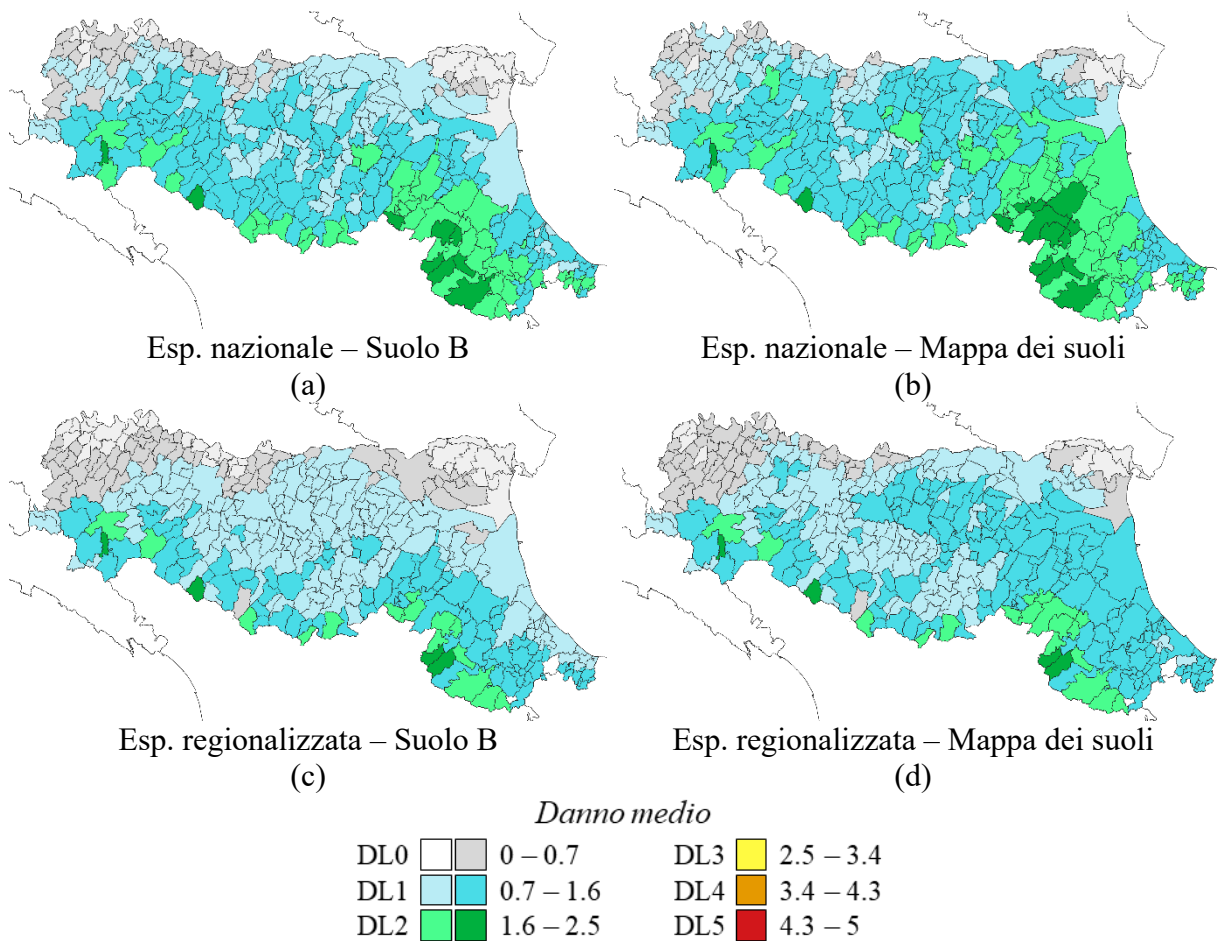
**Figura 10.3** Matrici di probabilità di occorrenza del danno condizionato con tempo di ritorno pari a 475 anni, calcolate a scala regionale per la regione Abruzzo e Emilia-Romagna con l'uso del modello dell'UR UniGEa

Analogamente a quanto svolto con il modello euristico-macrosismico sviluppato dall'UR UniGEa, anche con il modello meccanico-analitico di UniGEb sono state calcolate ed estratte le mappe di danno per la regione Abruzzo e per la regione Emilia-Romagna, per le quattro combinazioni elencate precedentemente. In Figura 10.4 sono mostrati i risultati ottenuti per la regione Abruzzo dai quali emergono effetti simili a quelli individuati dal modello di UniGEa, ovvero una leggera riduzione della vulnerabilità per gli ambiti territoriali che considerano le grandi città (vedi il comune de L'Aquila) e per quelli caratterizzati da classe altimetrica "collina" (vedi i comuni sulla costa), ma anche un lieve incremento della vulnerabilità per i piccoli centri urbani che caratterizzano le zone di montagna della regione.

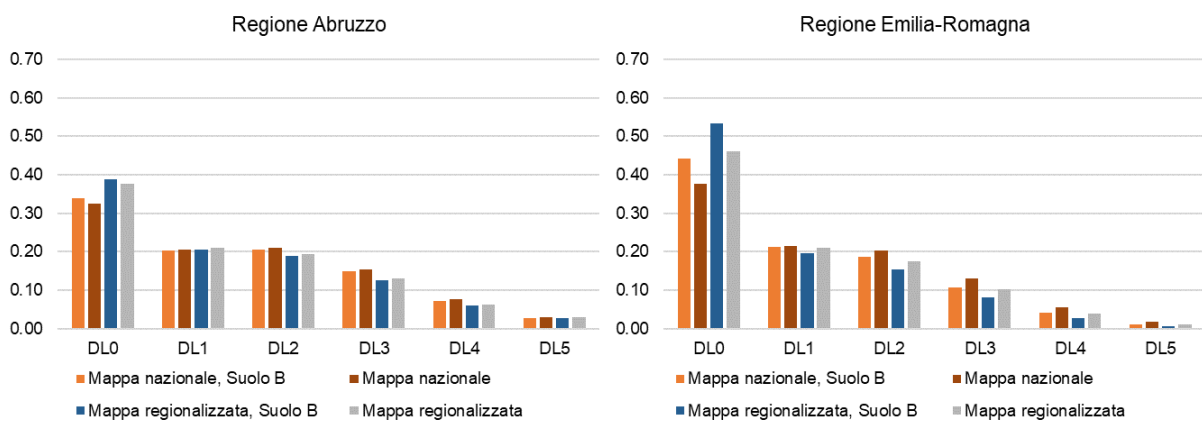
Anche per la regione Emilia-Romagna risultano considerazioni analoghe a quelle determinate dal modello UniGEa, seppure con vulnerabilità del costruito differenti; il modello meccanico-analitico di UniGEb individua livelli di danno leggermente maggiori omogeneamente su tutto il territorio della regione (come emerge confrontando la Figura 10.2a con la Figura 10.5a). Anche con il modello di UniGEb sono state estratte le DPM a scala regionale (Figura 10.6).



**Figura 10.4** Mappe di danno medio condizionato con tempo di ritorno 475 anni calcolate a scala comunale sul numero di edifici per la regione Abruzzo considerando l'esposizione a scala nazionale su suolo B (a) e con la mappa dei suoli (b) e con l'esposizione regionalizzata su suolo B (c) e con la mappa dei suoli (d) attraverso il modello di UniGEb



**Figura 10.5** Mappe di danno medio condizionato con tempo di ritorno 475 anni calcolate a scala comunale sul numero di edifici per la regione Emilia-Romagna considerando l'esposizione a scala nazionale su suolo B (a) e con la mappa dei suoli (b) e con l'esposizione regionalizzata su suolo B (c) e con la mappa dei suoli (d) attraverso il modello di UniGEb



**Figura 10.6** Matrici di probabilità di occorrenza del danno condizionato con tempo di ritorno pari a 475 anni, calcolate a scala regionale per la regione Abruzzo e Emilia-Romagna con l'uso del modello dell'UR UniGEb

## 10.2 Conseguenze da rischio incondizionato

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati ottenuti in termini conseguenze, sulla base di analisi di rischio incondizionato con finestra temporale differente (1 anno o 50 anni) in funzione delle perdite esaminate. In particolare, sono stati estratti dalla piattaforma IRMA i risultati ottenuti in termini di perdite umane (vittime e feriti), perdite economiche dirette, abitazioni inagibili (a breve e a lungo periodo) ed edifici collassati adottando i modelli di perdite utilizzati nel NRA 2018 (Dolce et al. 2021; capitolo 0). Anche per l'estrazione dei risultati riferiti alle perdite sono state analizzate le quattro combinazioni mostrate al capitolo 10.1 (a. esposizione nazionale (inventario ISTAT) con classe di sottosuolo B; b. esposizione nazionale (inventario ISTAT) con l'uso della mappa dei suoli; c. esposizione regionalizzata (database CARTIS) con classe di sottosuolo B; d. esposizione regionalizzata (database CARTIS) con l'uso della mappa dei suoli) sia con l'uso del modello euristico-macosismico di UniGEa che con il modello meccanico-analitico di UniGEb. In Tabella 10.1 e in Tabella 10.2 sono riportati i risultati estratti per alcuni comuni della regione Abruzzo appartenenti ad ambiti territoriali differenti, ottenuti rispettivamente con il modello di UniGEa e UniGEb. In particolare: il comune de L'Aquila avente classe demografica >50'000 abitanti e classe altimetrica "montagna"; il comune di Pescara con classe demografica >50'000 abitanti e classe altimetrica "collina"; il comune di Poggio Picenze (AQ) avente classe demografica <2'000 abitanti e classe altimetrica "montagna". Come è possibile osservare dai risultati ottenuti, non emergono significative differenze né con l'introduzione della mappa dei suoli né con l'uso dell'esposizione regionalizzata, ma si osservano comunque alcune differenze a scala comunale. In particolare, con l'introduzione della regionalizzazione si osservano minime riduzioni delle perdite per il comune de L'Aquila e di Pescara e un lieve incremento per il comune di Poggio Picenze (centri minori in montagna); l'uso della mappa dei suoli influisce principalmente per il comune di Pescara, caratterizzato dalla presenza di circa l'11% di suoli B e l'89% di suoli C, mentre il comune de L'Aquila e di Poggio Picenze sono caratterizzati da quasi il 100% di suoli B.

Regione Abruzzo		L'Aquila (>50'000ab – Montagna)		Pescara (>50'000ab – Collina)		Poggio Picenze (<2'000ab – Montagna)	
		Nazionale	Regionale	Nazionale	Regionale	Nazionale	Regionale
Vittime (50 anni)	B	66	63	5	2	2	3
	S	66	63	8	4	2	3
Feriti (50 anni)	B	221	212	15	7	7	8
	S	223	213	28	14	7	8
Perdite economiche (x1000 €) (1 anno)	B	4'678	4'440	717	437	127	148
	S	4'711	4'471	1'150	715	127	148
Inagibili breve periodo (50 anni)	B	1'433	1'351	417	272	29	30
	S	1'437	1'355	613	419	29	30
Inagibili lungo periodo (50 anni)	B	1'303	1'223	199	111	28	32
	S	1'310	1'230	327	189	28	32
Collassati (#ed) (50 anni)	B	188	184	6	3	7	9
	S	190	185	12	6	7	9

**Tabella 10.1** Confronto in termini di conseguenze per alcuni comuni specifici appartenenti ad ambiti territoriali differenti della regione Abruzzo, con il modello UniGEa

Regione Abruzzo		L'Aquila (>50'000ab – Montagna)		Pescara (>50'000ab – Collina)		Poggio Picenze (<2'000ab – Montagna)	
		Nazionale	Regionale	Nazionale	Regionale	Nazionale	Regionale
Vittime (50 anni)	B	81	69	8	5	3	3
	S	82	69	14	9	3	3
Feriti (50 anni)	B	274	233	27	17	8	8
	S	276	235	50	31	8	8
Perdite economiche (x1000 €) (1 anno)	B	5'237	4'356	1'005	633	134	130
	S	5'275	4'388	1'618	1'039	134	130
Inagibili breve periodo (50 anni)	B	1'602	1'338	549	355	31	29
	S	1'607	1'342	797	534	31	29
Inagibili lungo periodo (50 anni)	B	1'589	1'328	314	204	32	31
	S	1'598	1'335	512	339	32	31
Collassati (#ed) (50 anni)	B	217	188	10	6	7	8
	S	219	190	20	12	7	8

**Tabella 10.2** Confronto in termini di conseguenze per alcuni comuni specifici appartenenti ad ambiti territoriali differenti della regione Abruzzo, con il modello UniGEb

Analogo confronto è stato svolto scegliendo tre comuni appartenenti alla regione Emilia-Romagna. In particolare: il comune di Ravenna con classe demografica >50'000 abitanti e classe altimetrica “pianura”; il comune di Bologna avente classe demografica >50'000 abitanti e classe altimetrica “collina”; il comune di Monzuno (BO) con classe demografica compresa tra 2'000 e 10'000 abitanti e classe altimetrica “montagna”. Dai risultati riportati in Tabella 10.3 e in Tabella 10.4, ottenuti rispettivamente con il modello di UniGEa e UniGEb, emergono significative differenze al variare dei tre ambiti territoriali che caratterizzano i tre territori comunali selezionati. Per quanto riguarda l'introduzione della regionalizzazione, in tutti e tre

gli ambiti territoriali si rilevano notevoli riduzioni delle perdite poiché nel territorio della regione Emilia-Romagna sono molto presenti le murature in mattoni pieni che hanno un comportamento migliore rispetto a quelle in pietra. Con l'introduzione invece della mappa dei suoli, le differenze che emergono sono diverse per i tre comuni analizzati in quanto sono diverse le classi di sottosuolo che li caratterizzano; in particolare, nei comuni di Bologna (caratterizzato dal 65% di suoli B e dal 35% di suoli C) e di Ravenna (caratterizzato dal 36% di suoli C e dal 64% di suoli D) si denotano sostanziali incrementi delle perdite, mentre nel comune di Monzuno (BO), nel quale il 100% del territorio è di suolo B, non si rileva alcuna influenza.

Regione Emilia-Romagna		Ravenna (>50'000ab – Pianura)		Bologna (>50'000ab – Collina)		Monzuno (2-10'000ab – Montagna)	
		Nazionale	Regionale	Nazionale	Regionale	Nazionale	Regionale
Vittime (50 anni)	B	26	4	169	27	2	1
	S	62	11	218	37	2	1
Feriti (50 anni)	B	91	16	587	99	5	3
	S	213	41	751	134	5	3
Perdite economiche (x1000 €) (1 anno)	B	3'593	1'327	17'652	5'817	177	113
	S	7'335	2'910	21'311	7'193	177	113
Inagibili breve periodo (50 anni)	B	1'610	788	8'432	3'963	82	60
	S	2'758	1'607	9'380	4'694	82	60
Inagibili lungo periodo (50 anni)	B	929	300	5'966	1'811	49	29
	S	1'876	701	7'100	2'279	49	29
Collassati (#ed) (50 anni)	B	66	8	124	16	3	1
	S	160	22	162	23	3	1

**Tabella 10.3 Confronto in termini di conseguenze per alcuni comuni specifici appartenenti ad ambiti territoriali differenti della regione Emilia-Romagna, con il modello UniGEa**

Regione Emilia-Romagna		Ravenna (>50'000ab – Pianura)		Bologna (>50'000ab – Collina)		Monzuno (2-10'000ab – Montagna)	
		Nazionale	Regionale	Nazionale	Regionale	Nazionale	Regionale
Vittime (50 anni)	B	43	25	201	80	2	2
	S	105	63	258	106	2	2
Feriti (50 anni)	B	150	89	698	286	7	7
	S	362	223	892	378	7	7
Perdite economiche (x1000 €) (1 anno)	B	4'648	3'010	20'238	9'645	233	210
	S	9'712	6'510	24'399	11'877	233	211
Inagibili breve periodo (50 anni)	B	1'999	1'463	9'558	5'585	112	102
	S	3'419	2'699	10'558	6'451	112	103
Inagibili lungo periodo (50 anni)	B	1'394	960	6'999	3'618	73	68
	S	2'846	2'062	8'308	4'451	73	68
Collassati (#ed) (50 anni)	B	103	48	142	50	4	3
	S	258	126	185	68	4	3

**Tabella 10.4 Confronto in termini di conseguenze per alcuni comuni specifici appartenenti ad ambiti territoriali differenti della regione Emilia-Romagna, con il modello UniGEb**

In generale, i risultati ottenuti sia in termini di danno atteso che di conseguenze rivelano una notevole importanza dell'uso di dati regionalizzati per la costruzione del database di esposizione da utilizzare nella definizione del rischio sismico a scala territoriale, tenendo in considerazione che le due regioni scelte a titolo d'esempio sono state individuate per massimizzare tale effetto.



## 11 ANALISI COSTI-BENEFICI SU EDIFICI IN MURATURA RINFORZATI

**(redatto in collaborazione con la UR di cui è responsabile Francesca da Porto)**

Il Task 4.6 *Strategie preventive: analisi comparata in termini di rischio a scala nazionale* del WP4 MARS si focalizza nello sviluppo di modelli di vulnerabilità su larga scala per edifici consolidati, per poi eseguire analisi costi-benefici che possano dare una stima del tempo di recupero degli interventi di retrofit sismico (DPC 2018; Dolce et al. 2021; da Porto et al. 2021). Lo scopo finale è quello di elaborare mappe di rischio mitigato che simulino diverse strategie di intervento, permettendo così di stabilire scale di prioritizzazione e graduatorie di convenienza per le diverse possibilità di intervento.

Per arrivare a questo tipo di risultato, si deve innanzi tutto valutare la variazione di vulnerabilità sismica tra la configurazione as-built e il caso in cui siano stati eseguiti particolari interventi anti-sismici. La stima della vulnerabilità sismica, cioè la propensione delle strutture a subire danni dopo un evento sismico di una data intensità, è spesso definita da curve di fragilità, definite come distribuzioni probabilistiche che esprimono la probabilità di verificarsi di un certo stato di danno in relazione ad una certa intensità sismica (Donà et al. 2021; Lagomarsino et al. 2021; Rosti et al. 2021a; Zuccaro et al. 2021b; Borzi et al. 2021b; Rosti et al. 2021b).

Questo report si propone quindi di illustrare il lavoro svolto all'interno del Task 4.6 che ha permesso di giungere alla definizione di curve di fragilità mitigate per edifici residenziali in Italia.

Nel capitolo 11.1 vengono identificate le macro-tipologie di edifici in muratura e in cemento armato sulle quali si sono concentrate le unità di ricerca che hanno lavorato all'interno del Task 4.6. Le macro-tipologie sono definite su parametri presenti nel database ISTAT (materiale, epoca, numero di piani), in modo da poter interfacciarsi con la piattaforma IRMA. Vengono anche riportate le scelte effettuate nella definizione di sub-tipologie e tipologie edilizie, ovvero di classi di edifici definite da parametri più specifici rispetto a quelli utilizzati per le macro-tipologie. Queste ulteriori suddivisioni sono state impostate in modo da poter collocare in maniera adeguata modelli di maggior dettaglio nel contesto nazionale. Vengono inoltre presentati gli interventi di retrofit selezionati per edifici in muratura e in cemento armato, riportando quali UR hanno implementato nei propri modelli gli specifici interventi per ciascuna macro-tipologia di edifici.

Il capitolo 11.2 è dedicato alla presentazione dei risultati del Task 4.6 in termini di fragilità mitigata per edifici in muratura. In particolare, vengono mostrati i grafici delle curve di fragilità



ottenute dalle UR per le varie macro-tipologie, sia nella configurazione as-built sia per alcuni esempi di intervento. Vengono poi riportati degli istogrammi di confronto tra i modelli, in termini di: percentuale di classi EMS definite nel Task 4.3; aumento percentuale della mediana delle curve di fragilità DS1, DS3 e DS5 dalle curve as-built alle curve che rappresentano gli interventi di retrofit considerati; variazione relativa di classe EMS di ciascun intervento rispetto all'as-built; variazione percentuale relativa tra curve EMS duttili e fragili.

Il Task 4.6 si è dimostrato capace di produrre risultati di fragilità mitigata, favorendo la collaborazione di diverse unità di ricerca. I modelli elaborati potranno rivelarsi di grande utilità nello sviluppo di mappe di rischio mitigato, le quali rappresenteranno strumenti efficaci per la gestione e la pianificazione di strategie di mitigazione sismica a livello nazionale.

### **11.1 Alberi tipologici e interventi di mitigazione sismica**

Durante l'attività IRMA svolta e conclusasi nell'annualità 2018 (Borzi et al. 2021a), si è giunti alla definizione di curve di fragilità rappresentative del territorio nazionale italiano, sia per edifici residenziali in muratura sia per edifici residenziali in cemento armato.

Queste curve sono state prodotte con il principale scopo di essere implementate e utilizzate all'interno della piattaforma IRMA, la quale estrae dati ISTAT a livello comunale. Per inserire i dati di vulnerabilità ed esposizione e i set di curve di fragilità in piattaforma, è necessario dunque che questi siano riferiti a specifiche tipologie di edifici basate su dati reperibili dai censimenti ISTAT. In particolare, le possibili classi di epoche previste da ISTAT sono:

- <1919
- 1919-1945
- 1946-1960
- 1961-1970
- 1971-1980
- 1981-1990
- 1991-2000
- 2000-2005
- >2005

Il database di esposizione da caricare in IRMA prevede inoltre che possa esserci una distinzione tra muratura e muratura classificata sismicamente a partire dal decennio 1981-1990, mentre per il cemento armato questa distinzione parte dall'epoca 1946-1960.

Le curve possono poi essere riferite a edifici aventi numero di piani pari a:

- 1
- 2
- 3
- 4 o più

sia per la muratura, sia per il cemento armato.

Nonostante la scelta di questi parametri considerati significativi permetta di associare delle misure di vulnerabilità degli edifici a dati estraibili da ISTAT, e quindi estendibili a tutto il territorio nazionale, sono evidenti alcune criticità che questa decisione comporta.

Innanzitutto, quando si derivano curve di fragilità tramite metodi empirici (ovvero a partire da dati osservati, in particolare da schede di rilievo del danno post-sisma), è chiaro che alcune di queste tipologie potrebbero non risultare coperte dalle informazioni disponibili. Ciò può dunque portare alla definizione di curve di fragilità che non descrivono l'intero patrimonio edilizio italiano, rendendo impossibili o comunque parziali eventuali stime di danno e di rischio a larga scala. D'altra parte, è anche vero che molto spesso per le tipologie di edifici rilevati la quantità di informazioni disponibili è maggiore rispetto alla semplice definizione di materiale, epoca di costruzione e numero di piani. Dovendo tuttavia associare delle curve di fragilità a un database di informazioni scarno come quello fornito da ISTAT, le peculiarità degli edifici rilevati si perdono, portando a stime di vulnerabilità che necessariamente non riescono a tenere in considerazione le informazioni di dettaglio disponibili.

Questo è vero in realtà non solo per curve di fragilità derivate con metodi empirici, ma anche per quelle prodotte attraverso metodi analitici, nei quali solitamente vengono sviluppati e calibrati modelli meccanici che al loro interno contengono molte più informazioni rispetto a quelle richieste dalla piattaforma IRMA.

In secondo luogo, questa suddivisione tipologica a livello nazionale non permette di cogliere eventuali differenze che possono essere apprezzate solo a scala più ristretta, ad esempio regionale o territoriale. In altre parole, applicare le stesse curve di fragilità a tutto il patrimonio edilizio in Italia potrebbe condurre a stime di rischio sismico imprecise, poiché quest'operazione tende ad appianare le ben note differenze che ci sono a livello locale tra edifici (ad esempio, in termini di caratteristiche specifiche dei materiali utilizzati, tipologie costruttive, dettagli, copertura, ecc.). Questa criticità va a influire direttamente sul lavoro dei gruppi di ricerca che si occupano di sviluppare curve di fragilità regionalizzate (Vettore et al. 2020) o con

particolari approfondimenti su specifiche tipologie (definendo quindi modelli di vulnerabilità che non sono validi per tutte le tipologie e/o per tutto il territorio nazionale).

Questa problematica, già emersa durante l'annualità 2018, ha portato alla definizione di una versione aggiornata di IRMA, in cui innanzi tutto il database ISTAT è stato aggiornato ai dati del 2011 (mentre nella prima versione della piattaforma i dati di riferimento erano quelli raccolti nel 2001), ed è stata inoltre inserita la possibilità di filtrare i calcoli per regione di interesse, per demografia e per altimetria. È possibile infatti applicare un determinato modello di vulnerabilità a comuni con diversa configurazione demografica, in particolare:

- comuni piccoli con meno di 2000 abitanti
- comuni medio piccoli fra i 2000 e i 10000 abitanti
- comuni medio grandi fra 10000 e 50000 abitanti
- comuni grandi con più di 50000 abitanti

È inoltre possibile applicare un filtro ai comuni di interesse anche in relazione alla loro altimetria, in particolare selezionando solo i comuni di:

- montagna
- collina
- pianura

Queste operazioni sono state affrontate con il Task 4.3 e con il Task 4.1 del WP4 MARS, i quali nel corso delle varie annualità hanno fornito un contributo allo sviluppo di curve regionalizzate, processando i dati raccolti negli anni precedenti dal progetto CARTIS. Più nello specifico, il Task 4.1 ha infatti permesso di definire i parametri tipologico-costruttivi (tassonomia) per una più precisa definizione della vulnerabilità tipologica (Zuccaro et al. 2015b). Il lavoro svolto tramite CARTIS ha anche permesso di conoscere le percentuali di correlazione tra i vari parametri tipologici considerati significativi, permettendo così di escludere le combinazioni di parametri non possibili o statisticamente non rappresentative.

Tenendo presente che il dato che l'utente deve fornire come input in IRMA rimane il set di curve di fragilità definito a partire dai parametri ISTAT, all'interno del Task 4.6 è stato svolto un lavoro atto a gestire le possibili combinazioni tipologiche di edifici studiate dalle diverse unità di ricerca, considerando le varie scale per le quali sono stati sviluppati modelli (meccanico-analitici, di dettaglio o semplificati). In particolare, sia per la muratura sia per il cemento armato sono stati individuati tre livelli ai quali le UR hanno lavorato:

- macro-tipologie ISTAT
- sub-tipologie edilizie

- tipologie edilizie

La scelta di definire sub-tipologie e tipologie edilizie è nata per la necessità di collocare in maniera adeguata i modelli di dettaglio nel contesto nazionale.

A seguire, vengono esplicitati i parametri che hanno portato alla suddivisione in classi tipologiche ai vari livelli di dettaglio, separatamente per muratura e cemento armato.

### 11.1.1 Muratura

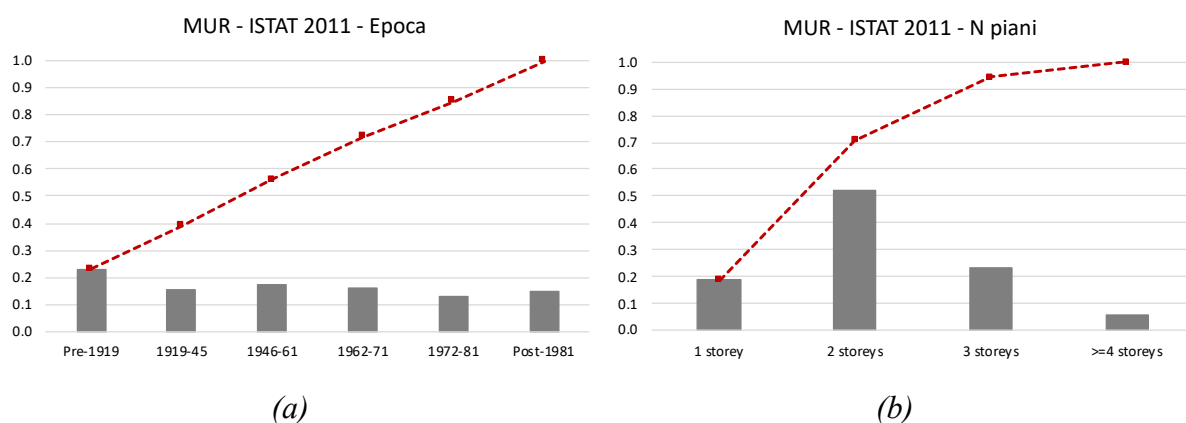
#### 11.1.1.1 Tipologie ISTAT

Per questo livello di dettaglio, le curve di fragilità si devono appoggiare esclusivamente a dati ricavabili dai database ISTAT. Come già anticipato, ISTAT fornisce solo epoca di costruzione e numero di piani degli edifici, a scala non più dettagliata di quella comunale. Sono state pertanto definite le seguenti macro-tipologie illustrate in Tabella 11.1, per un totale di 24 macro-tipologie. Alcune di queste sono state accorpate da alcune UR, ad esempio unendo edifici con 1 e 2 piani (Low-Rise) e con 3 o 4 o più piani (Mid-Rise), oppure ancora accorpendo tra loro alcuni decenni relativi alle diverse epoche di costruzione.

<i>1 piano</i>	<i>2 piani</i>	<i>3 piani</i>	<i>4 piani e più</i>
<b>Pre 1919</b>			
<b>1919 - 1945</b>			
<b>1946 - 1960</b>			
<b>1961 - 1970</b>			
<b>1971 - 1980</b>			
<b>Post 1980</b>			

**Tabella 11.1 Macro-tipologie ISTAT per edifici in muratura**

Vengono qui di seguito in Figura 11.1 riportate le distribuzioni del costruito residenziale in muratura in Italia per epoca di costruzione e per numero di piani, dove l'istogramma rappresenta la percentuale della singola classe di epoca o di altezza, mentre la linea spezzata rappresenta la percentuale cumulata.



**Figura 11.1** Distribuzione per classe e cumulata degli edifici in muratura per epoca di costruzione (a) e per numero di piani (b)

### 11.1.1.2 Sub-tipologie edilizie

A partire dalle macro-tipologie ISTAT precedentemente individuate, si sono andati a definire ulteriori parametri di dettaglio per identificare delle sub-tipologie edilizie rappresentative del costruito italiano. Oltre al numero di piani e all'epoca di costruzione, sono stati individuati come significativi i parametri relativi a:

- regolarità della muratura (muratura regolare VS muratura irregolare);
- deformabilità dei solai (orizzontamenti deformabili VS orizzontamenti rigidi).

È stato valutato che tutte le sub-tipologie che si vengono così a formare risultano statisticamente significative, eccetto nell'epoca Post 1980, in cui l'unica sub-tipologia che può necessitare di uno studio più approfondito è quella caratterizzata da edifici con muratura regolare e orizzontamenti rigidi. Essendo questa l'ultima epoca presa in considerazione, qui ricadono tutti gli edifici in muratura più recenti e moderni, per cui risulterebbe insensato prendere in considerazione sub-tipologie appartenenti a quest'epoca in cui gli edifici presentano muratura irregolare o orizzontamenti deformabili (o quanto meno, non vengono considerati statisticamente significativi per la definizione del patrimonio edilizio in muratura italiano).

In questa sede, inoltre, sono state accorpate le epoche 1961-1970 e 1971-1980 in un'unica epoca (1961-1980), come mostrato in Tabella 11.2.

Nel caso in cui si arrivasse a questo livello di dettaglio per la definizione della vulnerabilità degli edifici, si ricorda che se si volessero inserire in piattaforma IRMA dei set di curve di fragilità per elaborare scenari di danno e di rischio, risulterebbe necessario far riferimento alle percentuali fornite da CARTIS per far riconfluire le varie sub-tipologie edilizie in macro-tipologie ISTAT.

<i>1 piano</i>	<i>2 piani</i>	<i>3 piani</i>	<i>4 piani e più</i>
<b>Pre 1919</b>			
Muratura regolare		Muratura irregolare	
Orizzontamenti deformabili	Orizzontamenti rigidi	Orizzontamenti deformabili	Orizzontamenti rigidi
<i>1 piano</i>	<i>2 piani</i>	<i>3 piani</i>	<i>4 piani e più</i>
<b>1919 - 1945</b>			
Muratura regolare		Muratura irregolare	
Orizzontamenti deformabili	Orizzontamenti rigidi	Orizzontamenti deformabili	Orizzontamenti rigidi
<i>1 piano</i>	<i>2 piani</i>	<i>3 piani</i>	<i>4 piani e più</i>
<b>1946 - 1960</b>			
Muratura regolare		Muratura irregolare	
Orizzontamenti deformabili	Orizzontamenti rigidi	Orizzontamenti deformabili	Orizzontamenti rigidi
<i>1 piano</i>	<i>2 piani</i>	<i>3 piani</i>	<i>4 piani e più</i>
<b>1961 - 1980</b>			
Muratura regolare		Muratura irregolare	
Orizzontamenti deformabili	Orizzontamenti rigidi	Orizzontamenti deformabili	Orizzontamenti rigidi
<i>1 piano</i>	<i>2 piani</i>	<i>3 piani</i>	<i>4 piani e più</i>
<b>Post 1980</b>			
Muratura regolare			
	Orizzontamenti rigidi		

**Tabella 11.2 Sub-tipologie edilizie per edifici in muratura**

In Tabella 11.3 viene mostrato come le varie sub-tipologie sono state coperte dai modelli di vulnerabilità sviluppati dalle UR che si sono occupate di edifici in muratura nel Task 4.6, ovvero:

- UniPD: Università degli Studi di Padova (coordinata da Francesca da Porto)
- UniGEa: Università degli studi di Genova (coordinata da Sergio Lagomarsino)
- UniGEB: Università degli studi di Genova (coordinata da Serena Cattari)
- UniCH: Università degli Studi di Chieti – Pescara (coordinata da Enrico Spacone / Giuseppe Brando)

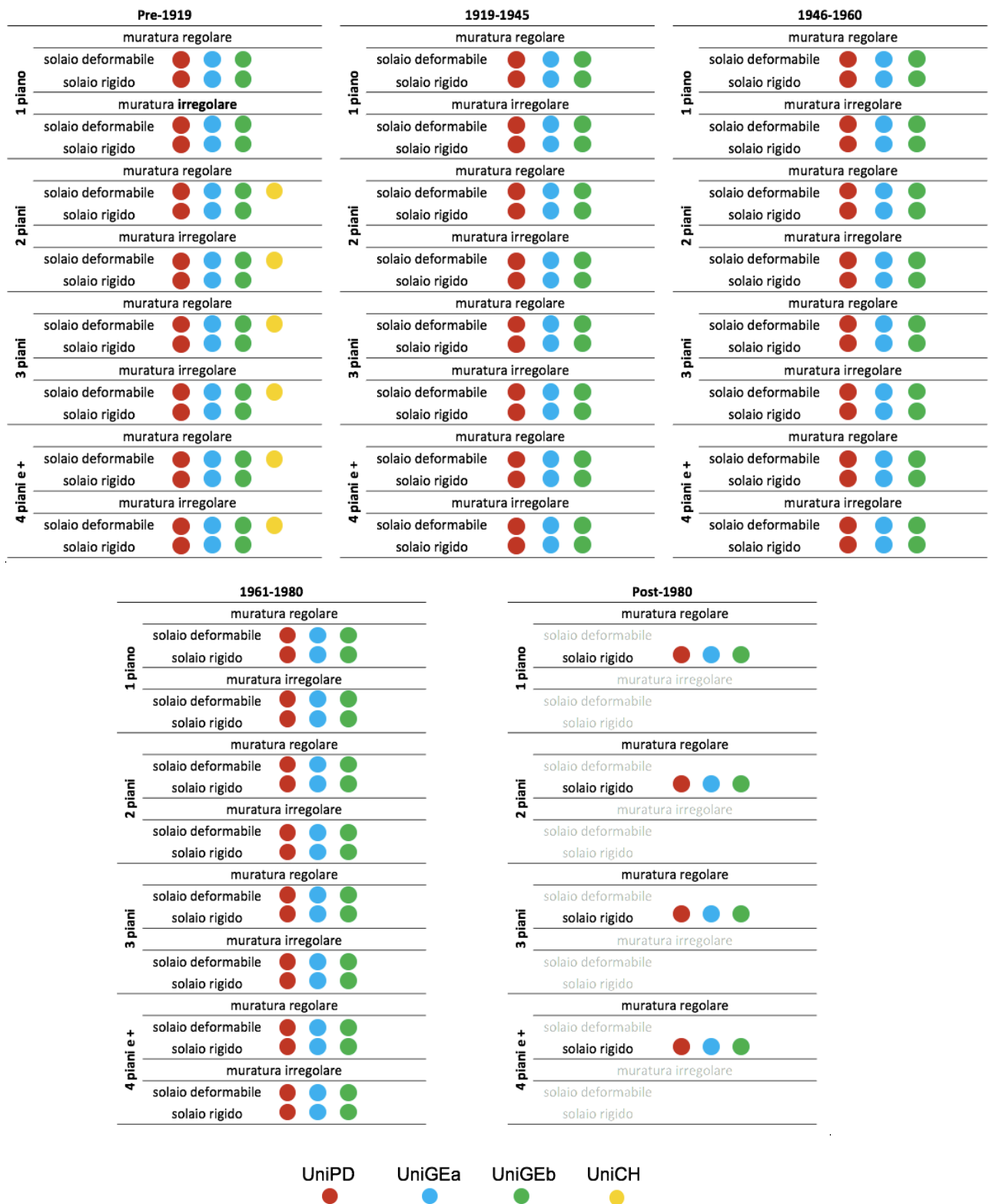


Tabella 11.3 Sub-tipologie analizzate da parte delle UR impegnate nel Task 4.6 - muratura

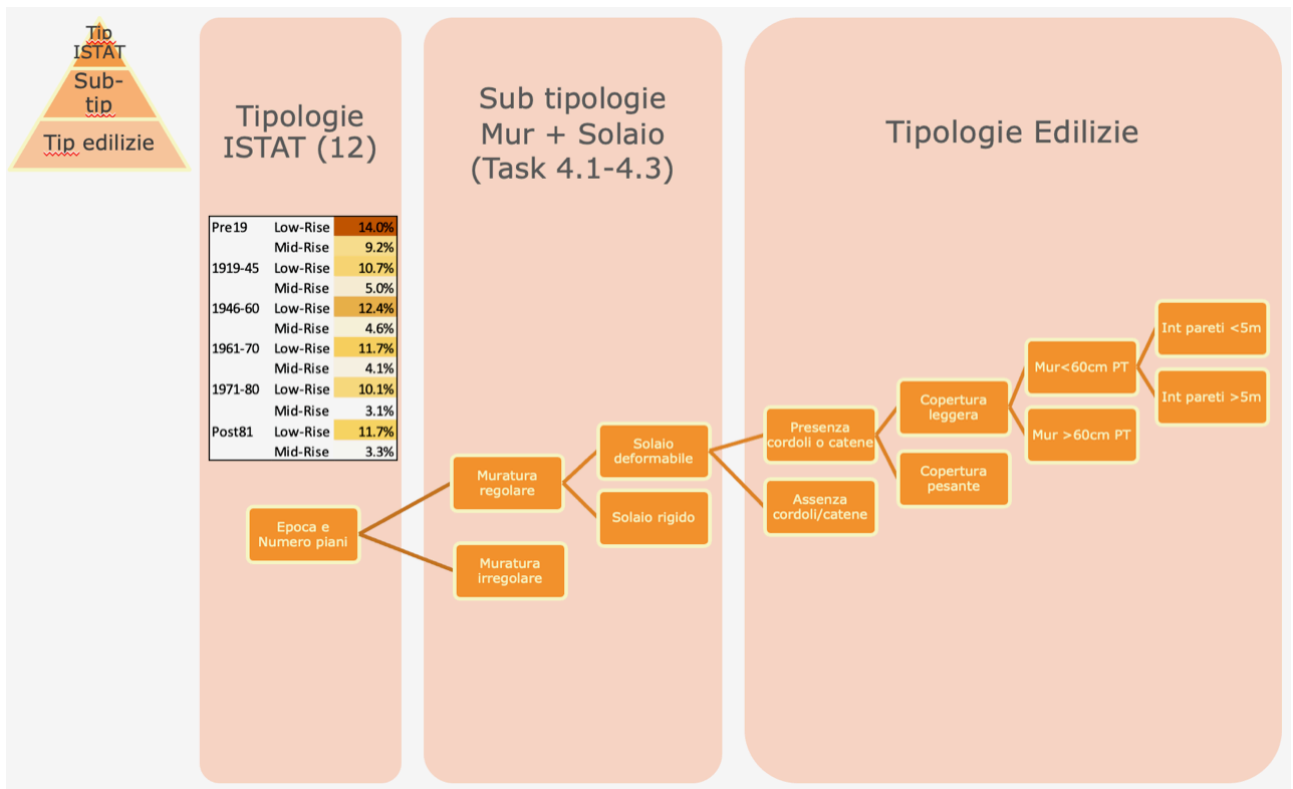
### 11.1.1.3 Tipologie edilizie

In quest'ultimo livello di dettaglio per la definizione di tipologie di edifici in muratura, vengono ulteriormente specificati i parametri relativi ad altre componenti della struttura o a dettagli costruttivi. A titolo d'esempio, sono stati presi in considerazione parametri quali:

- presenza VS assenza di catene o cordoli
- copertura leggera VS copertura pesante
- diversi spessori della muratura al piano terra (e.g.  $< 60$  cm o  $\geq 60$  cm)
- diversi interassi tra pareti (e.g.  $< 5$  m o  $\geq 5$  m)
- ...

Come già spiegato nel caso delle sub-tipologie edilizie, anche per le tipologie edilizie diventa necessario utilizzare le percentuali di ricombinazione tassonomica derivanti da CARTIS per l'inserimento dei set di fragilità creati all'interno della piattaforma IRMA.

Viene mostrato in Figura 11.2 uno schema grafico che riassume i possibili livelli di dettaglio secondo i quali possono essere sviluppati modelli per l'elaborazione di curve di fragilità all'interno del Task 4.6.



**Figura 11.2** Schema riassuntivo delle possibili suddivisioni in macro-tipologie ISTAT, sub-tipologie edilizie, tipologie edilizie



#### 11.1.1.4 Interventi sulla muratura

Al fine di sviluppare i nuovi modelli di fragilità per edifici con interventi, ed elaborare strategie di mitigazione del rischio, sono stati individuati interventi per ogni tipologia di edificio, sulla base della letteratura e di osservazioni sul campo (Saretta et al. 2021a,b; Valluzzi et al. 2021). In particolare, le tipologie di edifici considerate in questa fase sono quelle precedentemente ricavate secondo suddivisione ISTAT: 5 epoche di costruzione (pre-1919, 1919-45, 1945-60, 1961-70, 1971-80) e 4 classi di altezza (1 piano, 2 piani, 3 piani, 4 e più piani). Date le similitudini tipologiche di alcune delle classi appena elencate, sono stati selezionati interventi diversi per edifici storici costruiti pre 1945 e per edifici più moderni costruiti post 1945.

Per selezionare le tipologie di intervento si è fatto riferimento alla Circolare NTC (2019), che al capitolo 8.7.4.1 (“Criteri per gli interventi di consolidamento degli edifici in muratura”) definisce gli interventi più efficaci ai fini di miglioramento sismico, raggruppati come segue:

- interventi sulle murature (MUR1, MUR2, MUR): volti all’incremento della resistenza delle pareti murarie;
- interventi di connessione (CAT, CORD, CERCH): interventi che incrementano l’efficacia delle connessioni tra le pareti o volti al contenimento delle spinte esistenti;
- interventi sugli orizzontamenti (SOL): interventi volti alla formazione di diaframmi di piano a livello dei solai e della copertura e relativa connessione con le pareti d’ambito.

Queste tipologie di intervento sono state poi applicate singolarmente o in particolari configurazioni combinate per ottimizzare la loro efficacia (Tabella 11.4).

<i>Pre - 1945</i>	<i>Interventi singoli</i>	MUR1	Step 1	di rinforzo della muratura (pietra: iniezioni – mattoni: intonaci armati/FRP-FRCM)	
		MUR2	Step 2		
		CAT	aggiunta di catene e tiranti		
		CORD	aggiunta dei cordoli		
		SOL	irrigidimento dei solai		
<i>Interventi combinati</i>	MUR1+CAT	Step 1 di rinforzo della muratura + aggiunta di catene			
	MUR1+SOL	Step 1 di rinforzo della muratura + irrigidimento dei solai			
	MUR2+CAT	Step 2 di rinforzo della muratura + aggiunta di catene			
	MUR2+SOL	Step 2 di rinforzo della muratura + irrigidimento dei solai			
<i>Post - 1945</i>	<i>Interventi singoli</i>	MUR	rinforzo della muratura (intonaci armati/FRP-FRCM)		
		CERCH	aggiunta di catene/cerchiature		
		SOL	irrigidimento dei solai		
	<i>Interventi combinati</i>	MUR+CERCH	rinforzo della muratura + aggiunta di catene/cerchiature		
		MUR+SOL	rinforzo della muratura + irrigidimento dei solai		

**Tabella 11.4 Interventi di retrofit selezionati per edifici in muratura e per diversi periodi di costruzione**

In Tabella 11.5 sono riportate le macro-tipologie ISTAT, con indicato il contributo delle UR aderenti al task. Come si può osservare, la copertura è molto estesa, ad eccezione dell'intervento relativo al cordolo (CORD), analizzato solo dall'unità UNIGEB.

UR:    X UNICH        X UNIGeA        X UNIGEB        X UNIPD

		AB	MUR1	MUR2	SOL	CAT	MUR1+ SOL	MUR2+ SOL	MUR1+ CAT	MUR2+ CAT	CORD
pre-1919	1	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	X
	2	XXXX	XXX	XXX	XXX	XXXX	XXX	XXX	XXX	XXX	X
	3	XXXX	XXX	XXX	XXX	XXXX	XXX	XXX	XXX	XXX	X
	4+	XXXX	XXX	XXX	XXX	XXXX	XXX	XXX	XXX	XXX	X
1919-45	1	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	X
	2	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	X
	3	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	X
	4+	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	X
		AB	MUR	SOL	CERCH	MUR+ SOL	MUR+ CERCH				
1946-60	1	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
	2	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
	3	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
	4+	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
1961-70	1	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
	2	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
	3	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
	4+	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
1971-80	1	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
	2	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
	3	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				
	4+	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX				

Tabella 11.5 Macro-tipologie ISTAT e interventi analizzati dalle diverse UR per edifici in muratura

## 11.1.2 Cemento armato

### 11.1.2.1 Tipologie ISTAT

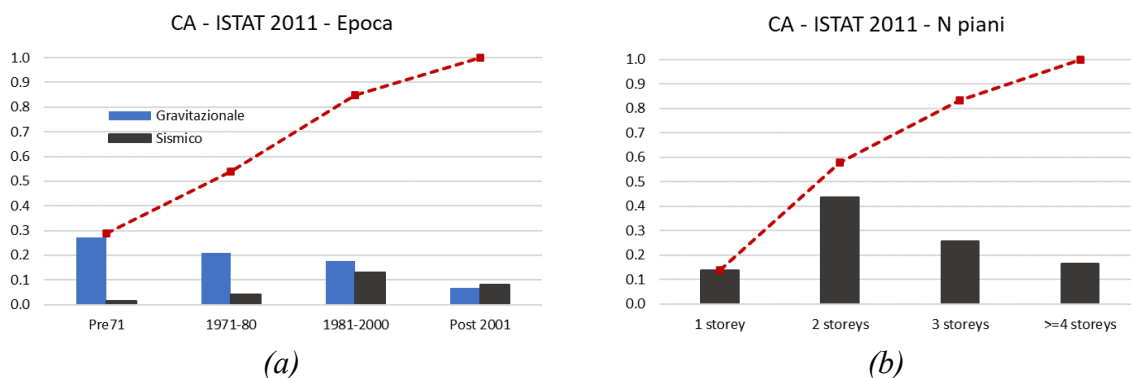
Come già spiegato per le tipologie ISTAT di edifici in muratura, anche nel caso di edifici in cemento armato le curve di fragilità si devono appoggiare a dati ricavabili dai database ISTAT per essere correttamente implementate nella piattaforma IRMA. Anche in questo caso le macro-tipologie sono state divise secondo il numero di piani (1, 2, 3, 4 o più, come previsto dal database di esposizione di IRMA), mentre sono state suddivise secondo epoche diverse rispetto a quelle definite per la muratura, a causa della significativa differenza in termini di presenza di particolari tipologie di edifici nel territorio italiano, ma anche a causa della diversa tradizione

progettuale tipica dei due materiali e delle differenti normative che ne hanno regolato la progettazione nel corso degli anni (Tabella 11.6).

<i>1 piano</i>	<i>2 piani</i>	<i>3 piani</i>	<i>4 piani e più</i>
<b>Pre 1971</b>			
<b>1972 – 1981</b>			
<b>1982 – 2000</b>			
<b>Post 2001</b>			

**Tabella 11.6 Macro-tipologie ISTAT per edifici in cemento armato**

In questo caso, più significativa rispetto alla muratura è la distinzione fra edifici in cemento armato progettati secondo criteri gravitazionali ed edifici progettati seguendo criteri anti-sismici. Di seguito (Figura 11.3) vengono riportate le distribuzioni del costruito residenziale in cemento armato in Italia per epoca di costruzione e per numero di piani, per singola classe e mostrando la distribuzione cumulata. Nel grafico relativo all'epoca di costruzione, vengono rappresentate separatamente le percentuali di edifici progettati in modo gravitazionale rispetto a quelli progettati sismicamente.



**Figura 11.3 Distribuzione per classe e cumulata degli edifici in cemento armato per epoca di costruzione, gravitazionali e sismici (a) e per numero di piani (b)**

### 11.1.2.2 Sub-tipologie edilizie

In questa ulteriore suddivisione tipologica, sono state individuate le caratteristiche che maggiormente influenzano la vulnerabilità degli edifici in c.a. (Tabella 11.7).

In particolare, le macro-tipologie ISTAT sono state ulteriormente suddivise considerando:

- tipo di progettazione (gravitazionale VS sismica)
- tipologia di telaio (monodirezionale VS bidirezionale)
- tamponature (consistenti VS non consistenti)

Tuttavia, alcune delle sub-tipologie che si vengono così a creare sono state ritenute poco significative o addirittura assenti nel costruito residenziale in c.a. in Italia.

In particolare, per l'epoca Pre 1971, la tipologia "sismica" non è stata presa in considerazione poiché difficilmente riscontrabile su scala nazionale (come si può evincere dal grafico in Tabella 11.3a). Sempre per la stessa epoca, non sono stati presi in considerazione edifici in c.a. gravitazionali con telaio bidirezionale. Per l'epoca 1972-1981, non sono state considerate significative le sub-tipologie "gravitazione bidirezionale" e "sismico monodirezionale", e in generale non si è tenuto conto di tamponature consistenti. Anche per l'epoca 1982-2000 le tamponature consistenti non sono state considerate. Infine, per l'epoca più recente (Post 2001), sono stati esclusi dall'albero tipologico i telai monodirezionali, sia per edifici gravitazionali sia per edifici sismici. Qui di seguito vengono riportate le tabelle che riassumono le scelte fatte per la definizione delle classi sub-tipologiche di edifici residenziali in cemento armato.

<i>1 piano</i>		<i>2 piani</i>		<i>3 piani</i>		<i>4 piani e più</i>	
<b>Pre 1971</b>							
Gravitazionale							
Monodirezionale							
Tamp. consistenti	Tamp. non consistenti						
<i>1 piano</i>		<i>2 piani</i>		<i>3 piani</i>		<i>4 piani e più</i>	
<b>1972 - 1981</b>							
Gravitazionale				Sismico			
Monodirezionale						Bidirezionale	
	Tamp. non consistenti						Tamp. non consistenti
<i>1 piano</i>		<i>2 piani</i>		<i>3 piani</i>		<i>4 piani e più</i>	
<b>1982 - 2000</b>							
Gravitazionale				Sismico			
Monodirezionale		Bidirezionale				Bidirezionale	
	Tamp. non consistenti		Tamp. non consistenti				Tamp. non consistenti
<i>1 piano</i>		<i>2 piani</i>		<i>3 piani</i>		<i>4 piani e più</i>	
<b>Post 2001</b>							
Gravitazionale				Sismico			
		Bidirezionale				Bidirezionale	
		Tamp. consistenti	Tamp. non consistenti			Tamp. consistenti	Tamp. non consistenti

**Tabella 11.7 Sub-tipologie edilizie per edifici in c.a.**

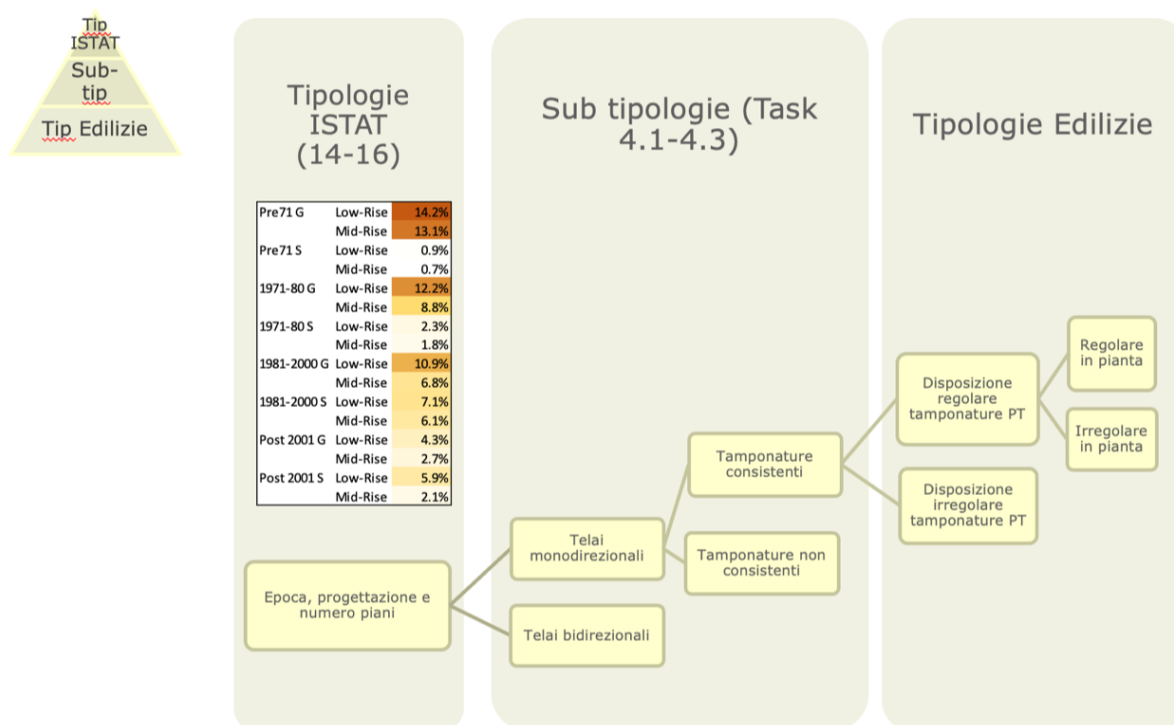
### 11.1.2.3 Tipologie edilizie

Le sub-tipologie definite per edifici in c.a. nella sezione precedente possono essere ulteriormente suddivise tenendo in considerazione parametri aggiuntivi che possono influenzare la vulnerabilità dell'edificio.

Ad esempio, sono ritenuti importanti per la caratterizzazione del comportamento:

- regolarità VS irregolarità nella disposizione delle tamponature al piano terra
- regolarità VS irregolarità in pianta
- ...

In Figura 11.4 si riporta uno schema grafico dei diversi livelli di dettaglio analizzabili per produrre curve di fragilità nell'ambito del Task 4.6.



**Figura 11.4 Schema riassuntivo delle possibili suddivisioni in macro-tipologie ISTAT, sub-tipologie edilizie, tipologie edilizie**

### 11.1.2.1 Interventi sul cemento armato

Vengono di seguito riportati gli interventi di retrofit sismico applicabili su edifici in cemento armato (Tabella 11.8). Più nello specifico, esempi di interventi per ogni categoria possono essere:

- rinforzo locale: interventi con FRP volti alla eliminazione delle crisi fragili dei pilastri, anche legati all'interazione tra tamponatura e telaio;
- nuovi elementi strutturali: ringrosso dei pilastri (incremento della sezione dei pilastri perimetrali), inserimenti di pareti e/o controventi, interventi volti ad eliminare le crisi fragili

Queste tipologie di intervento in prima battuta possono essere applicate come riportato in Tabella 11.8.

Interventi su tamponature con rinforzo nodi esterni
Rinforzo locale di elementi strutturali
Inserimento di nuovi elementi strutturali
Isolamento sismico

**Tabella 11.8 Interventi di retrofit selezionati per edifici in c.a.**

In Tabella 11.9 vengono riportate le macro-tipologie ISTAT, con indicato il contributo delle UR aderenti al task.

**UR:** X UNINA

		AB	Rinforzo locale	Nuovi elementi strutturali
Pre-1971	1			
	2	X	X	X
	3			
	4+	X	X	X
1972-81	1			
	2	X	X	X
	3			
	4+	X	X	X

**Tabella 11.9 Macro-tipologie ISTAT e interventi analizzati dalle diverse UR per edifici in c.a.**

Nel seguito si farà riferimento solo agli edifici in muratura per completezza delle analisi svolte (curve di fragilità e confronti). Si rimanda ai report delle singole UR per la trattazione degli specifici casi legati alla modellazione di interventi su edifici in cemento armato.

### **11.1.3 Considerazioni sulle suddivisioni tipologiche**

Come è già stato più volte ribadito nei paragrafi precedenti, le curve di fragilità prodotte dalle varie UR devono essere riferite a macro-tipologie ISTAT (definite quindi da materiale, numero di piani ed epoca di costruzione) per essere utilizzabili all'interno della piattaforma IRMA ai fini di produrre scenari di danno e di rischio.

In questo senso, il Task 4.6 ha lavorato innanzi tutto in sinergia con il Task 4.1 del WP4 MARS per poter riferire curve di fragilità tipologiche o sub-tipologiche a macro-tipologie ISTAT (quindi associando le percentuali di tali tipologie ricavate dalle indagini CARTIS), ma anche con il 4.3 per poter effettuare analisi più regionalizzate e specifiche a livello territoriale.

Il progetto CARTIS dispone al momento di dati di tassonomia non ancora del tutto completi, ma sta giungendo alla definizione di un database robusto che si rivelerà sicuramente fondamentale per le operazioni di definizione delle tipologie edilizie. È evidente come, tuttavia, nel caso in cui si usassero i dati CARTIS per la definizione delle percentuali di ricombinazione delle classi tipologiche, sarà necessario far confluire i modelli di vulnerabilità derivati per varie tipologie nelle classi individuate dalla CARTIS.

Va ricordato infine come nell'ambito del Task 4.6 l'obiettivo principale non è stato quello di arrivare ad un modello unico che risultasse dai modelli delle diverse UR per tutte le tipologie, bensì quello di riuscire a coprire il più possibile le classi rappresentative e, per ciascuna di queste, diverse strategie di intervento.

## 11.2 Risultati e commenti

A seguire sono presentati alcuni esempi dei set di fragilità elaborati per macro-tipologie di edifici residenziali in muratura.

Le metodologie utilizzate dalle UR che hanno contribuito al Task 4.6 "Muratura" sono le seguenti:

- UniPD: metodo meccanico-euristico semplificato (Vulnus);
- UniGEa: metodo macrosismico-euristico;
- UniGEb: metodo meccanico-analitico semplificato (DBV masonry);
- UniCH: analisi cinematiche per meccanismi locali di edifici rappresentativi (modellazione D-FE).

In particolare, in Figura 11.5 sono stati raccolti i set di fragilità elaborati dalle 4 UR partecipanti al task per tutte le macro-tipologie proposte, nella condizione as-built. Si può osservare che nelle macro-tipologie meno recenti i modelli risultano tendenzialmente coerenti tra di loro, mentre maggiori variabilità si notano nelle epoche più recenti (1961-70 e 1971-80).



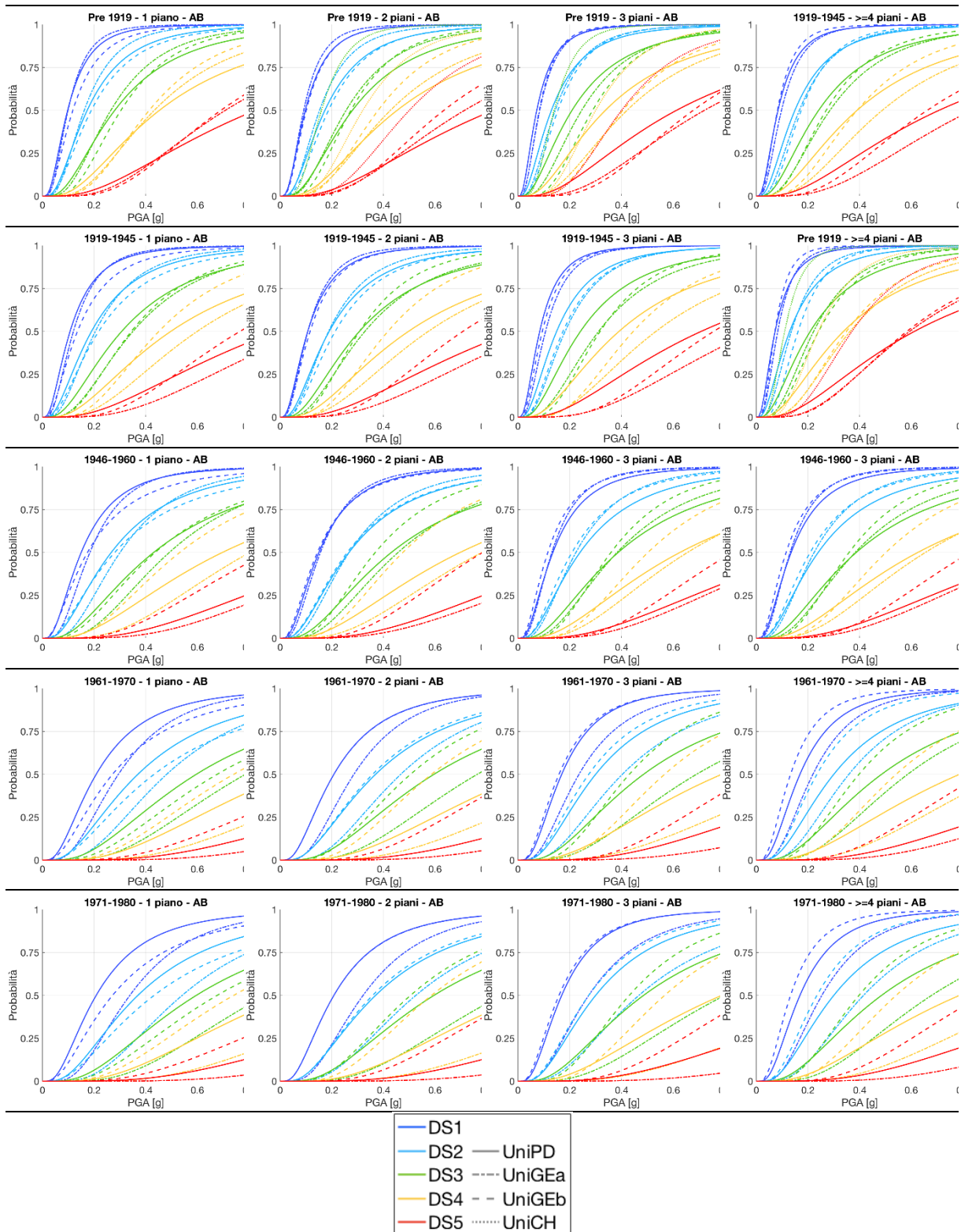
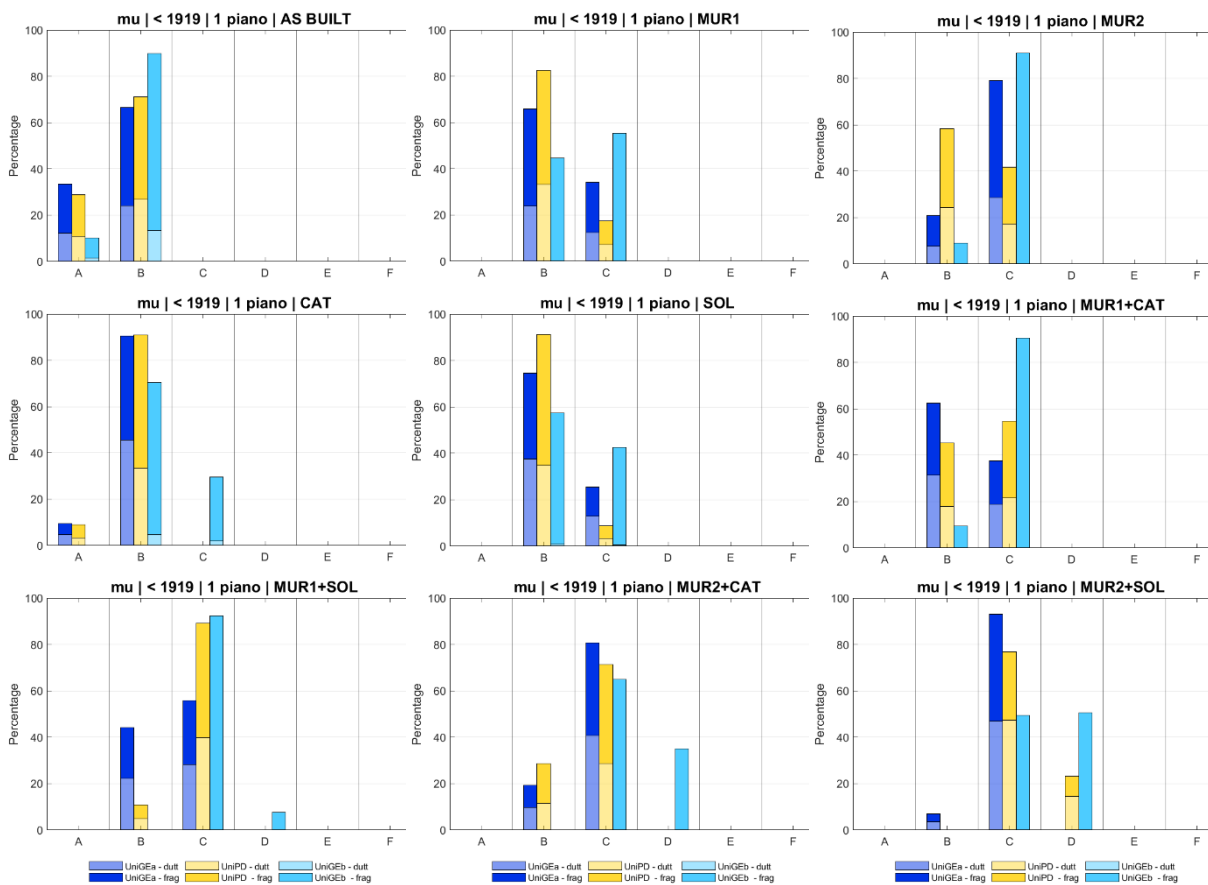


Figura 11.5 Confronto dei set di fragilità per la condizione as-built, per edifici in muratura

In allegato 13.6 (da Figura 2 a Figura 9) sono stati raccolti i set relativi ai vari interventi, divisi per classi di epoche. In via esemplificativa, sono state presentate solo le curve di fragilità associate a particolari macro-tipologie di edifici. Dai grafici si possono notare alcune differenze nei risultati, frutto delle diverse metodologie adottate, nonostante tendenzialmente i risultati delle diverse UR risultino coerenti tra loro.

In particolare emerge come i diversi modelli di retrofit, anche riferiti allo stesso intervento, non siano tutti ugualmente distribuiti. Questa differenza è chiaramente leggibile, per esempio, nei set di fragilità riferiti agli interventi combinati di muratura e solaio (MUR1+SOL, MUR2+SOL) e muratura più catene (MUR1+CAT, MUR2+CAT) delle epoche pre-1919 e 1919-1945, in cui i DS3 e DS4 del modello di UNIGEb risultano molto vicini tra di loro, mentre i modelli UNIPD e UNIGEa mantengono una distribuzione del danno più uniforme. Tale differenza deriva dalla metodologia utilizzata, empirica-euristica nel caso di UNIGEa e UNIPD (nonostante le curve siano meccaniche, la distribuzione del danno avviene attraverso calibrazione macrosismica), meccanica nel caso di UNIGEb. La stessa caratteristica si può osservare anche negli interventi applicati alle epoche successive al 1945.

A seguire sono riportati i modelli sopra presentati in termini di classi EMS definite in MARS Task 4.3, ovvero convertiti nel formato utilizzato dalla piattaforma IRMA (Borzi et al. 2021b) per l'elaborazione delle mappe di danno e rischio. Riferire tutti i modelli agli stessi set di curve di fragilità per le classi di vulnerabilità EMS favorisce un più agevole confronto e calibrazione, con la potenzialità anche di distinguere la diversa duttilità/fragilità tra i modelli e tra i vari interventi di retrofit. In Figura 11.6 vengono quindi mostrati alcuni esempi di confronti tra i modelli in termini di percentuale di classi EMS, come definite in MARS Task 4.3, in particolare l'epoca pre-1919; le altre epoche sono riportate in allegato 13.6 da Figura 14 a Figura 21. Dai grafici si conferma ancora una volta la coerenza complessiva dei risultati dei diversi modelli; inoltre, con l'implementazione dei diversi interventi analizzati, si nota la progressiva traslazione verso classi meno vulnerabili.



**Figura 11.6** Modelli as-built e con retrofit dell'epoca pre-1919, 1 piano, espressi in termini di classi EMS (MARS Task 4.3)

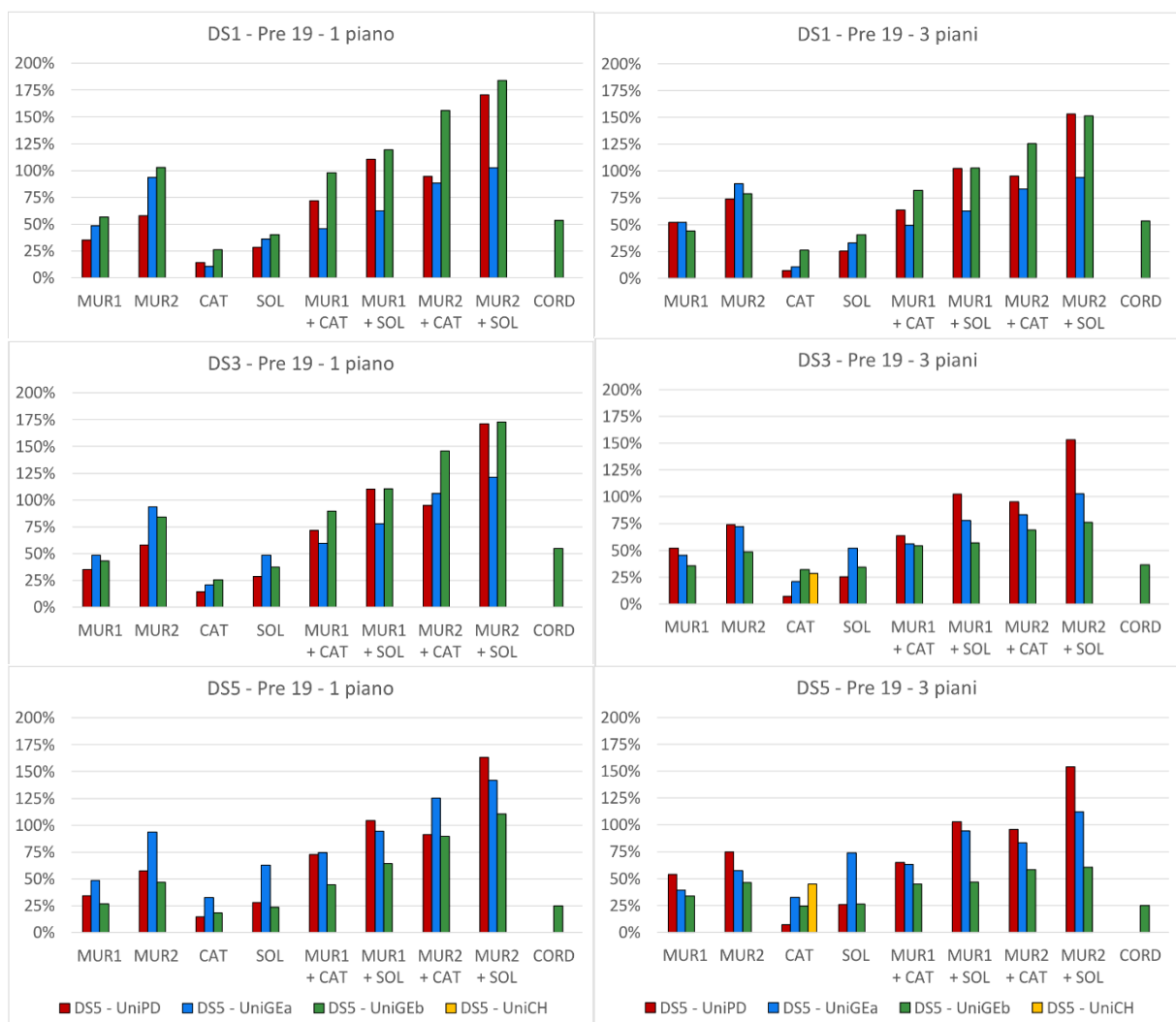
Un altro modo di presentare i risultati ottenuti facilitando la visualizzazione e il confronto è presentato in Figura 11.7 (in allegato 13.6 da Figura 22 a Figura 26). Gli istogrammi mostrano l'aumento (%) della mediana delle curve di fragilità DS1, DS3 e DS5 dalle curve as-built alle curve che rappresentano gli interventi di retrofit considerati. In altre parole, possono essere visti come una rappresentazione grafica di quanto un particolare intervento migliora il comportamento sismico dell'edificio rispetto alla configurazione in cui non viene applicato alcun intervento. Si sottolinea quindi che questi istogrammi rappresentano l'aumento percentuale rispetto alla configurazione as-built, ma che avendo ogni modello le proprie curve di fragilità as-built tali risultati vanno letti in termini relativi, e non in termini di vulnerabilità assoluta.

Le immagini confermano la coerenza dei risultati tra le UR, così come confermano le osservazioni già citate in precedenza sulla diversa distribuzione dei vari DS. Nelle figure a seguire si possono invece notare alcune altre differenze, sulla base del numero di piani. Per esempio, si può vedere che per UNIGEb, gli interventi sulla muratura (MUR1, MUR2 e MUR)

hanno un'influenza più forte su DS1 piuttosto che su DS3 e DS5, ma questo effetto diminuisce all'aumentare del numero di piani.

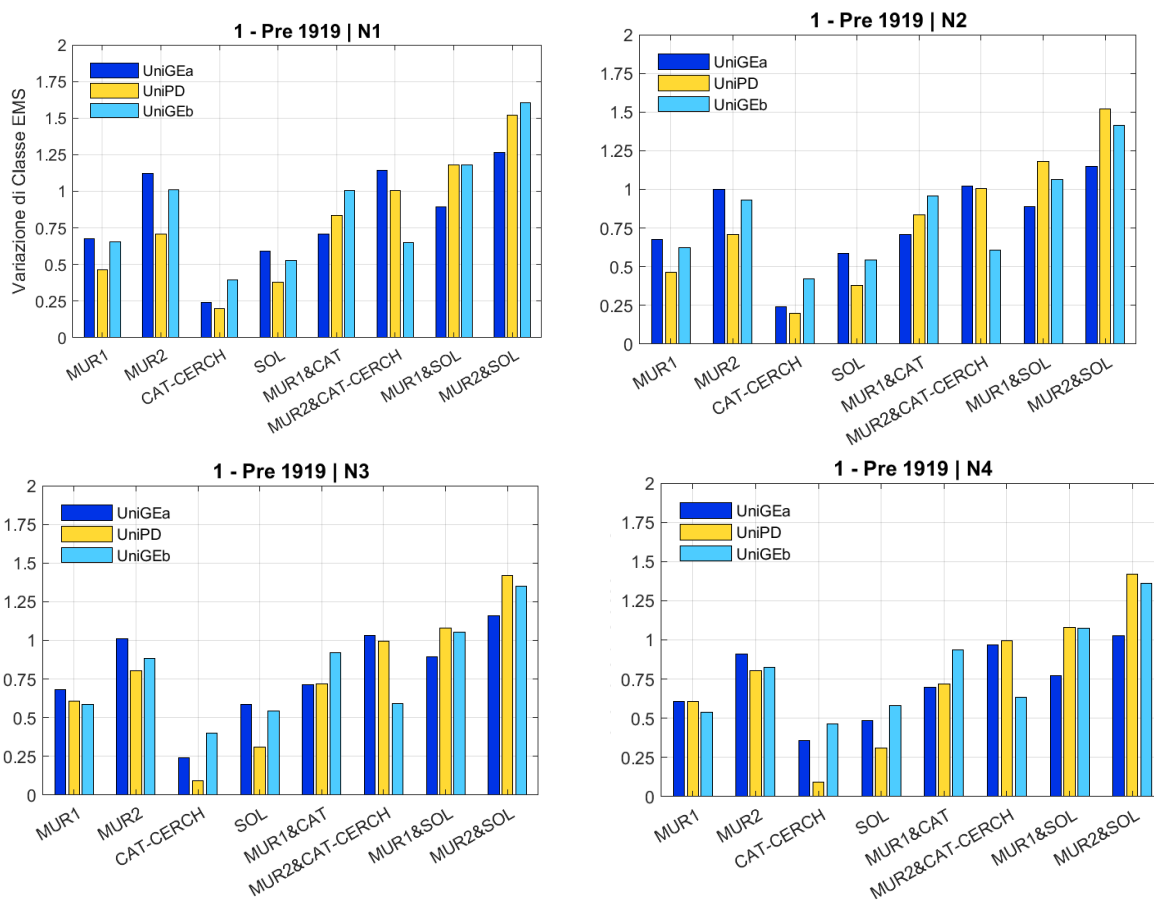
Inoltre, si ricorda che il modello sviluppato da UNIPD fornisce curve per macro-tipologie di edifici di 1 o 2 piani, e per edifici di 3 o  $\geq 4$  piani, mentre UNIGEa e UNIGEb hanno diversi set di fragilità per ogni numero di piani.

Un'altra caratteristica che emerge dai grafici è la ridotta efficacia degli interventi nelle epoche più recenti rispetto a quelle meno recenti, condizione giustificata dal fatto che in questi casi si parte da tipologie già maggiormente performanti nella condizione as-built.



**Figura 11.7 Incremento percentuale delle mediane rispetto al caso as-built, per edifici in muratura pre-1919 a 1 e 3 piani**

Riprendendo i confronti in termini di classi EMS, a seguire sono riportati degli istogrammi che mostrano la variazione relativa di ciascun intervento rispetto all'as-built, ovverosia in ordinata è rappresentato il numero di classi di cui ci si sposta con l'intervento rispetto alla condizione di partenza (es: quando si legge 1 ciò significa un miglioramento equivalente allo scatto di 1 classe). In Figura 11.8 è riportata l'epoca pre-1919; le altre epoche sono inserite in allegato 13.6 da Figura 27 a Figura 31).



**Figura 11.8** Incremento di classe portato dall'intervento rispetto al modello as-built, per l'epoca pre-1919 (con N numero di piani)

A seguito sono mostrate invece le variazioni in termini di "duttilità", ovvero quanto cambia la percentuale relativa tra duttile e fragile; come già era stato osservato, il modello UNIPD non interviene sulla distanza tra i DS; nel caso di UNIGEb si registra in molti casi una riduzione di duttilità, giustificata dal fatto che il modello meccanico non impone una distanza predefinita tra i DS; al contrario poi, il modello di UNIGEa presenta quasi sempre un incremento di duttilità. In Figura 11.9 è riportata l'epoca pre-1919; le altre epoche sono inserite in allegato 13.6 da Figura 32 a Figura 36).

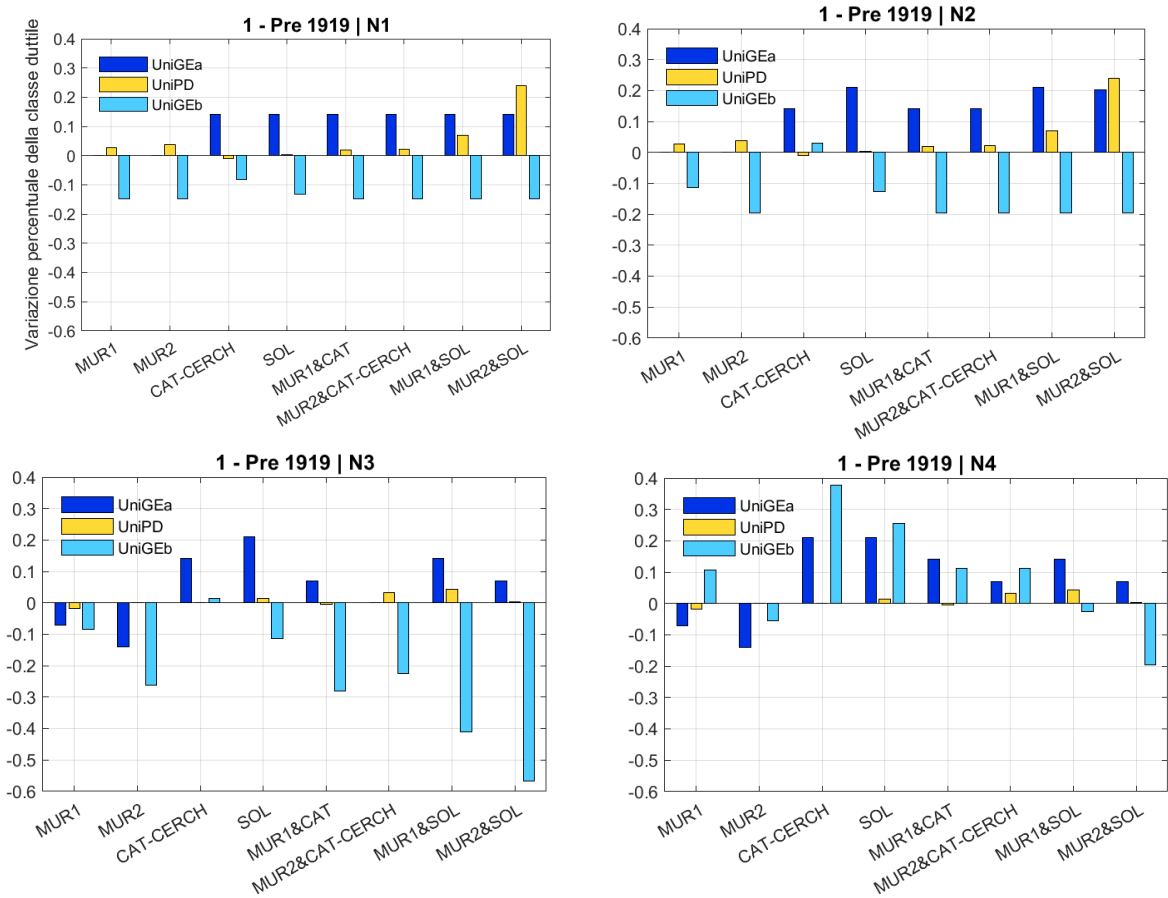


Figura 11.9 Variazione di duttilità rispetto al modello as-built, per l'epoca pre-1919 (con N numero di piani)

## 12 CONCLUSIONI

Il presente report descrive le attività svolte e analizza i principali risultati ottenuti dal Work Package WP4 “Mappe di rischio e scenari di danno sismico – MARS”, nell’ambito del progetto di ricerca DPC-ReLUIIS 2019-2021. Obiettivo principale di MARS era aggiornare il National Risk Assessment (NRA) predisposto nel 2018 dal DPC, al cui sviluppo ReLUIIS ha concorso per la parte relativa al rischio sismico, partendo dalla revisione critica dei modelli allora utilizzati e tenendo conto del progresso delle conoscenze, ottenuto anche utilizzando i risultati di altri WP del progetto DPC-ReLUIIS 2019-2021.

Nello specifico, le principali attività svolte sono:

- ✓ derivazione di un numero più ampio di modelli di fragilità, in particolare per il cemento armato, che, utilizzando diversi approcci, siano ben rappresentativi dell’intero costruito residenziale nazionale;
- ✓ definizione di una metrica della vulnerabilità che consente un chiaro confronto relativo dei modelli di fragilità ottenuti dai diversi approcci e la loro integrazione in un modello unitario;
- ✓ aggiornamento dei dati di esposizione e della pericolosità sismica sulla base dei nuovi studi disponibili.

A differenza dello studio precedente (nel quale furono considerati i risultati del censimento ISTAT del 2001), nelle analisi di rischio svolte in MARS l’**esposizione** è stata definita attraverso i dati del censimento ISTAT 2011. Inoltre, sebbene non considerata nella predisposizione delle mappe nazionali di rischio ottenute al termine del 2021, per la muratura è stata svolta un’analisi approfondita delle tipologie edilizie rilevate dal WP2 “Inventario delle tipologie strutturali ed edilizie esistenti (CARTIS)”, che mira a raccogliere dati sul patrimonio edilizio residenziale, in grado di evidenziare le caratteristiche strutturali distintive locali e/o regionali non incluse nei dati ISTAT ma determinanti per una stima più affidabile della vulnerabilità sismica.

Sebbene il modello di **pericolosità** sia il medesimo utilizzato per il NRA 2018 (MPS04 definito dall’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV), al fine di migliorare le stime di rischio è stato effettuato uno studio approfondito per l’estensione della curva di pericolosità a periodi di ritorno inferiori e superiori rispetto ai 9 periodi disponibili nella mappa MPS04. Inoltre, la pericolosità sismica ha considerato anche gli effetti di amplificazione stratigrafica per l’intero territorio nazionale secondo le classi di suolo definite dalle NTC 2018, ricavate a



partire dalla mappa delle  $V_{S30}$  elaborata dal Centro per la Microzonazione Sismica (CNR-IGAG).

La **vulnerabilità** degli edifici residenziali è stata definita considerando 10 modelli di fragilità a scala nazionale (5 per gli edifici in muratura e 5 per gli edifici in cemento armato), ottenuti con approcci empirici (i.e. utilizzando i dati dei danni osservati durante le campagne di sopralluogo post-sisma degli ultimi 50 anni e raccolti nella piattaforma Da.D.O.), da simulazioni numeriche (approcci analitico/meccanico) e da una combinazione “esperta” tra diversi metodi (approcci ibridi o euristico-macrosismico). Le curve di fragilità prodotte da ciascun modello, per ogni tipologia ISTAT, sono state espresse come combinazione lineare di curve di fragilità associate alle sei classi di vulnerabilità della scala EMS-98 (e ulteriormente suddivise considerando possibile, per ogni classe EMS, un comportamento “duttile” o “fragile”). Questa nuova metrica della vulnerabilità, che rappresenta uno dei risultati originali di MARS, consente una definizione omogenea e misurabile della vulnerabilità per le diverse tipologie considerate, utile per un confronto tra le stime di vulnerabilità fornite dai diversi modelli e per la loro integrazione nel modello unitario MARS. Secondo tale modello, al variare dell’epoca di costruzione la vulnerabilità degli edifici in muratura passa da una classe di vulnerabilità compresa tra A e B, per le epoche precedenti al 1919, ad una classe compresa tra C e D, per le epoche più moderne (1981-1990). Inoltre, risulta che la vulnerabilità degli edifici in muratura è maggiormente influenzata dall’epoca rispetto al numero di piani. Di contro, negli edifici in cemento armato, aventi in genere una minore vulnerabilità rispetto ai corrispondenti edifici in muratura, l’epoca di costruzione non determina una rilevante differenza nel comportamento strutturale mentre risultano più influenti il numero di piani e il livello di progettazione (gravitazionale o sismico).

Attraverso l’uso della piattaforma IRMA-v2, sviluppata da EUCENTRE e già utilizzata nel precedente studio del 2018, ma significativamente aggiornata ed implementata grazie agli sviluppi relativi alle tre componenti del rischio ottenuti in MARS e prima descritti, sono state prodotte le mappe di rischio sismico nazionale in termini di danno e di conseguenze per il patrimonio edilizio residenziale. In particolare, utilizzando le medesime funzioni di conseguenza adottate nel NRA 2018, con riferimento ad una finestra temporale di un anno (rischio incondizionato) sono stati ottenuti i seguenti risultati principali (si noti che in parentesi sono riportati i valori ottenuti separatamente per gli edifici in muratura, M, e in cemento armato, CA):

- *Edifici collassati*: 1'100 (950 M + 150 CA) con intervallo 16°-84° percentile pari a 710-1'750;
- *Abitazioni inagibili di breve periodo*: 30'810 (16'580 M + 14'230 CA) con intervallo 16°-84° percentile pari a 24'940-38'720;
- *Abitazioni inagibili di lungo periodo*: 18'505 (10'430 M + 8'075 CA) con intervallo 16°-84° percentile pari a 13'230-26'540;
- *Vittime*: 620 (375 M + 245 CA) con intervallo 16°-84° percentile pari a 370-1'080;
- *Feriti*: 2'170 (1'300 M + 870 CA) con intervallo 16°-84° percentile pari a 1'320-3'690;
- *Perdite economiche dirette*: 2'730M€ (1'470 M + 1'250 CA) con intervallo 16°-84° percentile pari a 2'115M€-3'560M€.

Tali risultati sono sostanzialmente in linea con quelli ottenuti nel NRA 2018, sebbene siano stati considerati valori più elevati di pericolosità, in conseguenza dell'introduzione degli effetti di amplificazione locale (in assenza di dati sul terreno, nel NRA 2018 si era considerato suolo A su tutto il territorio nazionale mentre la mappa del CNR-IGAG evidenzia una sostanziale prevalenza di suolo B). Valori un poco più elevati del rischio sono stati ottenuti sugli edifici in cemento armato, derivanti dall'aver stimato condizioni generalmente più elevate della fragilità grazie alla disponibilità di un ventaglio più diversificato e verificato di modelli.

Come detto in precedenza, sulla base dei dati ottenuti nel WP2 CARTIS è stato possibile sviluppare un modello di esposizione che considera le specifiche tipologie degli edifici in muratura nelle diverse aree geografiche (frutto di una combinazione tra regione amministrativa, zona altimetrica e classe demografica comunale). Avendo a disposizione due modelli di vulnerabilità in grado di differenziare le curve di fragilità per ciascuna sub-tipologia definita dalla taxonomy CARTIS, è possibile valutare il rischio tenendo conto della diversa fragilità del costruito in ciascun ambito territoriale. Per valutare l'impatto della regionalizzazione, tali modelli sono stati applicati ai comuni della regione Abruzzo e della regione Emilia-Romagna con riferimento ai 12 ambiti territoriali derivanti dal considerare 4 classi demografiche e 3 classi altimetriche. I risultati ottenuti, sia in termini di danno che di conseguenze, hanno evidenziato l'importanza dell'uso di dati regionalizzati per il calcolo del rischio sismico a scala nazionale. Inoltre, nell'ambito delle attività di MARS sono stati definiti set di curve di fragilità "mitigate" per alcune tipologie di edifici residenziali in Italia, con lo scopo di valutare la variazione di vulnerabilità sismica tra la configurazione *as-built* e quella rinforzata a seguito di interventi di consolidamento sismico preventivo. Nello specifico, sono state identificate le macro-tipologie

di edifici in muratura e in cemento armato sulla base dei parametri presenti nel database ISTAT (epoca e numero di piani) e sono stati selezionati gli interventi di retrofit da implementare per ciascuna di esse. Attraverso tre diversi modelli di vulnerabilità è stato possibile eseguire confronti preliminari per alcune tipologie di edifici in muratura, nella configurazione *as-built* e rinforzata; i risultati mostrano interessanti analogie nella stima di efficacia dei diversi interventi e confermano l'utilità di sviluppare mappe di rischio mitigato quale strumento per la gestione e la pianificazione di strategie di mitigazione sismica a livello nazionale.

Infine, alla luce dei risultati ottenuti in MARS e con l'obiettivo di fornire valutazioni del rischio e delle conseguenze attese nel costruito residenziale utili alle diverse attività di protezione civile, il WP4 MARS-2, nell'ambito del nuovo progetto DPC-ReLuis 2022-24, prevede le seguenti attività:

- mappe di scuotimento per l'elaborazione di scenari delle conseguenze attese a seguito di uno specifico evento simulato, definito da epicentro, magnitudo e meccanismo focale;
- aggiornamento delle funzioni di conseguenza e sviluppo di modelli di calcolo delle perdite socio-economiche, da applicare in particolare a scenari di rischio, considerando quindi non solo le perdite dirette ma anche quelle legate all'assistenza alla popolazione;
- regionalizzazione della vulnerabilità attraverso l'integrazione dei dati di esposizione ottenuti nell'ambito del WP2 CARTIS, eventualmente estesa anche agli edifici in cemento armato, e la validazione dei modelli così ottenuti; il calcolo del rischio a scala nazionale con modelli specifici di ciascun ambito territoriale sarà confrontato con quello ottenuto in MARS da un unico modello indifferenziato di vulnerabilità;
- valutazione della vulnerabilità degli edifici in aggregato attraverso la derivazione di curve di fragilità specifiche e la stima della loro incidenza a scala comunale tramite un conteggio della consistenza del costruito alla scala della sezione censuaria;
- derivazione di modelli di vulnerabilità per edifici residenziali rinforzati, al fine di costruire mappe di rischio mitigato e, grazie ad analisi costi-benefici, proporre strategie di intervento da attuarsi a scala nazionale o regionale;
- valutazioni e strategie preventive multirischio, considerando metriche ed interazioni multihazard e multirischio (es. frane, liquefazione, tsunami).

## RINGRAZIAMENTI

Il report descrive le attività del triennio 2019-2021, svolte nell'ambito dei seguenti Task: 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.10, 4.11.

Si ringraziano Mauro Dolce ed Elena Speranza, referente del DPC per il WP4, per la costante presenza alle riunioni ed i preziosi commenti e suggerimenti.

Inoltre, si desidera ricordare e ringraziare tutto il personale che ha collaborato alla ricerca, nell'ambito delle UR coinvolte:

- UR1 (UniBAS) - Angelo Masi (responsabile), Vincenzo Manfredi, Giuseppe Nicodemo, Giuseppe Ventura
- UR2 (UniGE-a) - Sergio Lagomarsino (responsabile), Chiara Calderini, Daria Ottonelli, Michele Angiolilli, Matteo D'Andrea
- UR3 (UniNA-f) - Giulio Zuccaro (responsabile), Daniela De Gregorio, Francesca Linda Perelli, Francesco Cacace
- UR4 (PoliMI) - Roberto Paolucci (responsabile), Chiara Smerzini, Ali Güney Özcebe
- UR8 (UniCH) - Giuseppe Brando (responsabile), Giulia Cocco, Giorgia Cianchino, Davide Rapone, Ylenia Di Lallo
- UR9 (UniGE-b) - Serena Cattari (responsabile), Sara Alfano
- UR10 (UniNA-a) - Gerardo Verderame (responsabile), Carlo Del Gaudio, Paolo Ricci
- UR11 (UniNA-b) - Andrea Prota / Marco Di Ludovico / Maria Polese (responsabili), Ciro Del Vecchio, Giuseppina De Martino, Marco Gaetani d'Aragona, G. Tocchi
- UR13 (UniNA-d) - Fulvio Parisi (responsabile), Elia Acconcia, Valentina Buonocunto
- UR16 (UniPD) - Francesca da Porto (responsabile), Pietro Carpanese, Marco Donà, Veronica Follador, Elisa Saler
- UR19 (UniPR) - Beatrice Belletti (responsabile), Elena Michelini
- UR20 (UniPV) – Andrea Penna / Francesco Graziotti (responsabili), Annalisa Rosti, Maria Rota
- UR21 (UniRM1-a) - Giorgio Monti (responsabile), Raihan Rahmat Rabi, Cristoforo Demartino, Marco Vailati, Gabriele Candela, Giorgia Di Gangi
- UR22 (UniRM1-b) - Luigi Sorrentino (responsabile), Domenico Liberatore, Alessandra Marotta, Maria Zucconi
- UR23 (UniSA) - Enzo Martinelli (responsabile), Salvatore Russo
- EUCENTRE - Barbara Borzi (responsabile), Marta Faravelli, Antonella Di Meo, Diego Polli, Mauro Onida, Davide Quaroni, Marco Pagano, Alessio Cantoni

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Amanti M, Battaglini L, et al. (2008) The lithological map of Italy at 1:100 000 scale: an example of re-use of an existing paper geological map. In: 33<sup>rd</sup> International Geological Conference IEI02310L, 6–14 August, Oslo (Norway).
- ATC (Applied Technology Council) (2005) ATC-20-1. Field manual: post-earthquake safety evaluation of buildings, 2nd edition. Applied Technology Council, Redwood City, CA, USA
- Baggio C, Bernardini A, Colozza R, Coppari S, Corazza L, Della Bella M, Di Pasquale G, Dolce M, Goretti A, Martinelli A, Orsini G, Papa F, Zuccaro G (2007) Field manual for post-earthquake damage and safety assessment and short-term countermeasures. In: Pinto A, Taucer F (eds) Translation from Italian: Goretti A., Rota M., JRC Scientific and Technical Reports, EUR 22868 EN-2007
- Benson C, Clay EJ (2004) Understanding the economic and financial impacts of natural disasters. Disaster Risk Management series; 4. Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/15025> License: CC BY 3.0 IGO”
- Bernardini A, Gori R, Modena C (1989) A structural model for continuous masonry building systems in historical centres. Structural conservation of stone masonry. International technical conference. October 31–November 3, 1989, Athens, Greece, 29–36.
- Borzi B, Pinho R, Crowley H (2008) Simplified pushover-based vulnerability analysis for large scale assessment of RC buildings. *Eng Struct* 30(3): 804–820
- Borzi B, Onida M, Faravelli M, Polli D, Pagano M, Quaroni D, Cantoni A, Speranza E, Moroni C (2021a) IRMA platform for the calculation of damages and risks of residential buildings. *Bull Earthq Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00924-x>
- Borzi B, Faravelli M, Di Meo A (2021b) Application of the SP-BELA methodology to RC residential buildings in Italy to produce seismic risk maps for the national risk assessment. *Bull Earthq Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00953-6>
- Braga F, Dolce M, Liberatore D (1982) A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the M.S.K.-76 scale. 7th European Conf on Earthq Eng, Athens, Greece.
- Bramerini F, Di Pasquale G (2008) Updated seismic risk maps for Italy. *Ingegneria Sismica*, XXV(2): 5–23 (in Italian)
- Brando G, De Matteis G, Spacone E (2016) Predictive model for the seismic vulnerability assessment of small historic centres: Application to the inner Abruzzi Region in Italy. *Eng. Struct.*, vol. 153, December 2016, pp. 81–96, 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.10.013.
- Cacace F, Zuccaro G, De Gregorio D, Perelli FL (2018) Building Inventory at National scale by evaluation of seismic vulnerability classes distribution based on Census data analysis: BINC procedure. *Int J Disaster Risk Reduct*, 28:384–393
- Chaulagain H, Rodrigues H, Silva V, Spacone E, Varum H (2015) Seismic risk assessment and hazard mapping in Nepal. *Nat Hazards* 78(1):583–602
- Calvi GM, Pinho R, Magenes G, Bommer JJ, Restrepo-Vélez LF, Crowley H (2006) Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET J Earthq Technol*, 43(3):75–104
- Cattari S, Lagomarsino S (2013) Masonry structures. In: Sullivan T and Calvi GM, eds. *Developments in the Field of Displacement based Seismic Assessment*. Pavia, Italy: IUSS Press; 2013:151–200
- Catenacci V (1992) Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d’Italia, Servizio Geologico Nazionale*, (in Italian), 47, 301, 1992.

- Chiauzzi L., Masi A., Mucciarelli M., Vona M., Pacor F., Cultrera G., Gallovic F. and Emolo A., (2012) Building damage scenarios based on exploitation of Housner intensity derived from finite faults ground motion simulations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(2), 517-545
- Coburn, A. and Spence R., (2002) *Earthquake Protection (Second Edition)*, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, England.
- Cornell CA (1968) Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58:1583-1606, 1968
- da Porto F, Donà M, Rosti A, Rota M, Lagomarsino S, Cattari S, Borzi B, Onida M, De Gregorio D, Perelli FL, Del Gaudio C, Ricci P, Speranza E (2021) Comparative analysis of the fragility curves for Italian masonry and RC buildings. *Bull Earthq Eng* 19(7):219–231
- D’Ayala D, Meslem A, Vamvatsikos D, Porter K, Rossetto T (2015) Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment—Low/Mid-Rise, Vulnerability Global Component Project (available at [www.globalquakemode1.org](http://www.globalquakemode1.org))
- De Risi MT, Di Domenico M, Manfredi V, Terrenzi M, Camata G, Mollaioli F, Noto F, Ricci P, Franchin P, Masi A, Spacone E, Verderame GM (2022) Modelling and seismic response analysis of Italian pre-code and low-code reinforced concrete buildings. Part I: bare frames, *Journal of Earthquake Engineering* (accepted for publication)
- De Martino G, Di Ludovico M, Prota A, Moroni C, Manfredi G, Dolce M (2017) Estimation of repair costs for RC and masonry by post-earthquake visual inspection. *Bull Earthq Eng* 15:1681–1706
- Decanini LD and Fantin GE (1986) Modelos simplificados de la mampostería incluidas en porticos. Características de rigidez y resistencia lateral en estado límite, *Actas de las VI Jornadas Argentinas de Ingenieria Estructural*, Volume 2, October 1–3, Buenos Aires, Argentina, pp. 817–836 (in Spanish).
- Del Gaudio C., Ricci P., Verderame G.M., Manfredi G., (2015). Development and urban-scale application of a simplified method for seismic fragility assessment of RC buildings. *Engineering Structures*, 91, 40-57.
- Del Gaudio C., Ricci P., Verderame G.M., Manfredi G., (2016). Observed and predicted earthquake damage scenarios: the case study of Pettino (L’Aquila) after the 6th April 2009 event. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Del Gaudio C., Ricci P., Verderame G.M., Manfredi G., (2017a). Urban-scale seismic fragility assessment of RC buildings subjected to L’Aquila earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 96, 49–63.
- Del Gaudio C, De Martino G, Di Ludovico M. et al. (2017b) Empirical fragility curves from damage data on RC buildings after the 2009 L’Aquila earthquake. *Bull Earthquake Eng* 15, 1425–1450 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0026-1>
- Del Gaudio, C., Ricci, P., & Verderame, G. M. (2018). A class-oriented mechanical approach for seismic damage assessment of RC buildings subjected to the 2009 L’Aquila earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(10), 4581-4605.
- Del Gaudio, C., De Risi, M. T., Ricci, P., & Verderame, G. M. (2019a). Empirical drift-fragility functions and loss estimation for infills in reinforced concrete frames under seismic loading. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(3), 1285-1330.
- Del Gaudio C, De Martino G, Di Ludovico M, Manfredi G, Prota A, Ricci P, Verderame GM (2019b) Empirical fragility curves for masonry buildings after the 2009 L’Aquila, Italy, earthquake. *Bull Earthq Eng* 17(11):6301–6330
- Del Gaudio C, Di Ludovico M, Polese M, Manfredi G, Prota A, Ricci P, Verderame GM (2020) Seismic fragility for Italian RC buildings based on damage data of the last 50 years. *Bull Earthq Eng* 18:4547–4548. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00890-4>



- Del Vecchio C, Eeri M, Di Ludovico M, Prota A (2020) Repair costs of reinforced concrete building components: From actual data analysis to calibrated consequence functions. *Earthq Spectra* 36:353–377. <https://doi.org/10.1177/8755293019878194>
- Di Domenico M., Ricci P., and Verderame G.M., 2021. Assessment of the response envelope of reinforced concrete members with different failure modes. 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.) Streamed from Athens, Greece, 27–30 June 2021.
- Di Domenico M, De Risi MT, Manfredi V, Terrenzi M, Camata G, Mollaioli F, Noto F, Ricci P, Franchin P, Masi A, Spacone E, Verderame GM (2022) Modelling and seismic response analysis of Italian pre-code and low-code reinforced concrete buildings. Part II: infilled frames, *Journal of Earthquake Engineering* (accepted for publication).
- Di Ludovico M, Prota A, Moroni C, Manfredi G, Dolce M (2017a) Reconstruction process of damaged residential buildings outside the historical centres after L’Aquila earthquake - part I: “light damage” reconstruction. *Bull Earthq Eng* 15:667–692
- Di Ludovico M, Prota A, Moroni C, Manfredi G, Dolce M (2017b) Reconstruction process of damaged residential buildings outside the historical centres after L’Aquila earthquake - part II: “heavy damage” reconstruction. *Bull Earthq Eng* 15:693–729
- Di Ludovico M., De Martino G., Prota A., Manfredi G., Dolce M., (2022), “Relationships between empirical damage and direct/indirect costs for the assessment of seismic loss scenarios”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20, 229-254, DOI: 10.1007/s10518-021-01235-5
- DM 14.02.1992 Norme tecniche per l’esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche, Pubblicato sul Suppl. Ord. n. 55 della G.U. n. 65 del 18/3/92
- DM 9.01.1996. Norme tecniche per il calcolo, l’esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche, Pubblicato sul Suppl. Ord. G.U. n.29 del 5/2/96
- D.M.14.01.2008 - Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC08), G.U.04.02.2008 n. 29, Suppl. Ordinario n. 30
- D.M.17.01.2018 - Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni (NTC18), G.U. 20.02.2018 n. 42, Suppl. Ordinario n. 8
- Dolce M, Masi A, Marino M, Vona M (2003). Earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) including site effects, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Kluwer, 1/2003
- Dolce M (2010) Gestione dell’emergenza e del post-emergenza. In L’Aquila. Il Progetto C.A.S.E. Complessi Antisismici Sostenibili ed Ecocompatibili, ed. R. Torino, 43-54. Pavia: IUSS Press
- Dolce M., Speranza E., Giordano F., Borzi B., Bocchi F., Conte C., Di Meo A., Faravelli M., Pascale V. (2019) Observed damage database of past Italian earthquakes: the Da.D.O. Webgis. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, 60(2): 141-164.
- Dolce M, Prota A, Borzi B, da Porto F, Lagomarsino S, Magenes G, Moroni C, Penna A, Polese M, Speranza E, Verderame GM, Zuccaro G (2021) Seismic risk assessment of residential buildings in Italy. *Bull Earthq Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-01009-5>
- Donà, M., Carpanese, P., Follador, V., Sbrogiò, L., & da Porto, F. (2020). Mechanics-based fragility curves for Italian residential URM buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(8), 3099-3127. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00928-7>
- Eucentre (2018) I.R.MA. (Italian Risk Maps), Manuale di navigazione utente. (in Italian)
- Forte, G., Chioccarelli, E., De Falco, M., Cito, P., Santo, A., Iervolino, I. [2019] “Seismic soil classification of Italy based on surface geology and shear-wave velocity measurements,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 122,79-93 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.04.002>.



- Freeman SA (1998) The capacity spectrum method as a tool for seismic design. In: Proc. of 11th European Conference of Earthquake Engineering, Paris, France.
- Galli P. and Camassi R., (2009) Report on the effects of the Aquilano earthquake of 6 April 2009. Quick Earthquake Survey Team—Final Report (in Italian). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Web report available at [www.mi.ingv.it](http://www.mi.ingv.it)
- Goretti A, Inukai M (2002) Post-earthquake usability and damage evaluation of reinforced concrete buildings designed not according to modern seismic codes. JSPS Short Term Fellowship, Final report, Servizio Sismico Nazionale, Dipartimento di Protezione Civile, Roma, Italy
- Grünthal G. (ed.), Musson R.M.W., Schwarz J., and Stucchi M. (1998) European Macroseismic Scale. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15 - European Macroseismic Scale 1998. European Center for Geodynamics and Seismology, Luxembourg.
- Gruppo di Lavoro MPS (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003, Rapporto conclusivo per il dipartimento di Protezione Civile, INGV, Milano–Roma, 65 pp + 5 appendici, [http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/rapporto\\_conclusivo.pdf](http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/rapporto_conclusivo.pdf)
- Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G. (2019), CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area, *Scientific Data* 6, Article number: 80 (2019). doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>
- Iervolino I, Baraschino R, Spillatura A (2022). Evolution of seismic reliability of code-conforming Italian buildings, *Journal of Earthquake Engineering* (accepted for publication).
- ISTAT (National Institute of Statistics) (2001) 14° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni, released by ISTAT on December 9, 2004, download from [dawinci.istat.it](http://dawinci.istat.it) (in Italian)
- ISTAT (National Institute of Statistics). (2011) 15° Censimento generale della popolazione—Dati sulle caratteristiche strutturali della popolazione, delle abitazioni e variabili. <http://www.istat.it/it/archivio/104317>. Accessed 10 May 2020 (in Italian)
- ISTAT (Italian National Institute of Statistics) (2013) Vita quotidiana e opinione dei cittadini, available at website: <http://dati.istat.it/#>
- Italian Civil Protection Department (2018) National Risk Assessment 2018. Overview of the potential major disasters in Italy. Updated December 2018
- Iwahashi, J, Kamiya, I, Matsuoka, M, Yamazaki, D, 2018. Global terrain classification using 280 m DEMs: segmentation, clustering, and reclassification. *Prog. Earth Planet. Sci.* doi:10.1186/s40645-017-0157-2.
- Jaiswal K.S, and Wald D.J., (2010) An Empirical Model for Global Earthquake Fatality Estimation *Earthquake Spectra*, 26(4):1017-1037
- Jalayer F, Ebrahimian H, Miano A, Manfredi G, Sezen H (2017) Analytical fragility assessment using un-scaled ground motion records. *Earthq Eng Struct Dyn*. 2017;46(15):2639-2663.
- Kappos AJ, Panagopoulos G, Panagiotopoulos C et al (2006) A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings. *Bull Earthq Eng* 4:391–413. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9023-0>
- Kappos AJ, Panagopoulos G (2010) Fragility curves for R/C buildings in Greece. *Structure & Infrastructure Engineering*, 6, 39–53.
- Khazai B., (eds). (2013) Guidelines for the consideration of socio-economic impacts in seismic risk analysis SYNER-G reference report 5, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-79-28968-2. doi: 10.2788/43216

- Lagomarsino S, Cattari S (2014) Fragility Function of Masonry Buildings. SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk: Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities, K. Pitilakis, H. Crowley, and A. M. Kaynia, eds.
- Lagomarsino S, Cattari S (2015) Seismic Performance of Historical Masonry Structures Through Pushover and Nonlinear Dynamic Analyses. In: Ansal A (ed) Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology Geotechnical Geological and Earthquake Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16964-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16964-4_11)
- Lagomarsino S, Cattari S, Ottonelli D (2021) The heuristic vulnerability model: fragility curves for masonry buildings. Bull Earthq Eng. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01063-7>
- Lucantoni A, Bosi V, Bramerini F, De Marco R, Lo Presti T, Naso G, Sabetta F (2001) Seismic risk in Italy. Ing Sismica XVI I(1):5–36 (in Italian)
- Manfredi V, Masi A, Özcebe AG, Paolucci R, Smerzini C (2022) Selection and spectral matching of recorded ground motions for seismic fragility analyses. Bull Earthquake Eng (2022). <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01393-0>.
- Mannella A, Di Ludovico M, Sabino A, Prota A, Dolce M, Manfredi G (2017) Analysis of the population assistance and returning home in the reconstruction process of the 2009 L’Aquila earthquake Sustainability 9(8):1395
- Margottini, C., Molin, D., and Serva, L. (1992) Intensity versus ground motion: A new approach using Italian data. Engineering Geology, 33(1).
- Marino S., Cattari S., Lagomarsino S. (2019) Are the nonlinear static procedures feasible for the seismic assessment of irregular masonry buildings? Engineering Structures, 200, 109700.
- Masi A, Digrisolo A, Manfredi V (2015) Fragility curves of gravity-load designed RC buildings with regularity in plan. Earthq Struct 9(1):1–27
- Masi, A., Digrisolo, A., & Santarsiero, G. (2019). Analysis of a large database of concrete core tests with emphasis on within-structure variability. Materials, 12(12), 1985.
- Masi A, Lagomarsino S, Dolce M, Manfredi V, Ottonelli D (2021) Towards the updated Italian seismic risk assessment: exposure and vulnerability modelling. Bull Earthq Eng. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01065-5>
- Masi A, Manfredi V, Nicodemo G, Digrisolo A (2022) Seismic fragility curves for the Italian RC residential buildings based on non-linear dynamic analyses. Bulletin of Earthquake Engineering (sottomesso)
- McKenna F (2011) OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation. Computing in Science & Engineering, Vol. 13, Issue 4, pp 58-66, 2011.
- Michelini, A., Faenza, L., Lanzano, G., Lauciani, V., Jozinovic, D., Puglia, R., & Luzi, L. (2020). The New ShakeMap in Italy: Progress and Advances in the Last 10 Yr. Seismological Research Letters, 91(1), 317-333. <http://doi.org/10.1785/0220190130>
- Ministero delle Infrastrutture e Trasporti. Circolare 2019/01/21 n. 7 (GU n. 35 of 2019/02/11 Suppl. Ordinario n. 5). Istruzioni per L’applicazione dell’Aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al DM 17/1/ 2018. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2019/02/11/19A00855/sg> (In Italian)
- Morandi P., Albanesi L., Graziotti F., Piani T. L., Penna A., Magenes G., Development of a dataset on the in-plane experimental response of urm piers with bricks and blocks, Construction and Building Materials 190 (2018) 593-611.
- Mori F., Mendicelli A., Moscatelli M., Romagnoli G., Peronace E., Naso G. (2020a) “A new Vs30 map for Italy based on the seismic microzonation dataset,” Engineering Geology, Volume 275, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105745>

- Mori F., Mendicelli A., Moscatelli M., (2020b) Carta nazionale dei valori attesi dei Vs30 - Elaborato 01. Relazione Scientifica. Prodotto 1 del WP19 “Definizione della carta di pericolosità sismica locale a scala nazionale” del progetto DPC/ReLUIS 2019-2021
- Nicodemo G., Pittore M., Masi A., Manfredi V., (2020) Modelling exposure and vulnerability from post-earthquake survey data with risk-oriented taxonomies: AeDES form, GEM taxonomy and EMS-98 typologies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101894  
[doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101894](https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101894)
- NZSEE (New Zealand Society for Earthquake Engineering) (2009) Building safety evaluation during a state of emergency guidelines for Territorial Authorities.  
<http://www.dbh.govt.nz/UserFiles/File/Building/information20%for/Building-Safety-Evaluation-during-State-of-Emergency.pdf>
- OPCM n. 3519 del 28-04-2006 (2006) - Criteri generali per l’individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l’aggiornamento degli elenchi delle stesse zone, G.U. 11.05.2006 n. 108
- Pagnini L. C., Vicente R. S., Lagomarsino S., Varum H. (2011) A mechanical model for the seismic vulnerability assessment of old masonry buildings. *Earthq Struct* 2(1):25–42.
- Panagiotakos T.B., Fardis M.N., 1996. Seismic response of infilled RC frames structures. *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México*. Paper No. 225.
- Pitilakis K, Alexoudi Argyroudis MS (2006) Anastasiadis Seismic risk scenarios for an efficient seismic risk management: the case of Thessaloniki (Greece) *Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction*. Springer, Dordrecht, pp 229–244
- Pitilakis K, Crowley H, Kaynia AM (2014) Introduction in: SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk, Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities, Pitilakis K, Crowley H, Kaynia AM (editors) Springer Science+Business Media Dordrecht 2014
- Polese M, Verderame GM, Mariniello C, Iervolino I, Manfredi G (2008) Vulnerability analysis for gravity load designed RC buildings in Naples—Italy. *J Earthq Eng* 12(S2):234–245
- Rahmat Rabi, R.; Bianco, V.; Monti, G. Mechanical-Analytical Soil-Dependent Fragility Curves of Existing RC Frames with Column-Driven Failures. *Buildings* 2021, 11, 278. <https://doi.org/10.3390/buildings11070278>
- Ramirez CM, Liel AB, Mitrani-Reiser J, et al (2012) Expected earthquake damage and repair costs in reinforced concrete frame buildings. *Earthq Eng Struct Dyn* 41:1455–1475. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- Ricci, P., Verderame, G. M., & Manfredi, G. (2011). Analisi statistica delle proprietà meccaniche degli acciai da cemento armato utilizzati tra il 1950 e il 1980. XIV Convegno ANIDIS L’Ingegneria Sismica in Italia, 18-22.
- Ricci P, Manfredi V, Noto F, Terrenzi M, Petrone C, Celano F, De Risi MT, Camata G, Franchin P, Magliulo G, Masi A, Mollaioli F, Spacone E, Verderame GM (2018) Modeling and seismic response analysis of Italian code-conforming reinforced concrete buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, 22(S2), 105-139.
- RISK-UE (2001–2004). An advanced approach to earthquake risk scenarios, with applications to different European cities. <http://www.risk>
- Rossetto T, Elnashai A (2003) Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Eng Struct* 25(10):1241–1263
- Rossetto T, Elnashai A (2005) A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures. *Eng Struct* 27(3):397–409
- Rossetto T, D’Ayala D, Ioannou I, Meslem A (2014). Evaluation of existing fragility curves in: SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk, Buildings,

- Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities, Pitilakis K, Crowley H, Kaynia AM (editors) Springer Science+Business Media Dordrecht 2014
- Rosti A, Rota M, Penna A (2018) Damage classification and derivation of damage probability matrices from L'Aquila (2009) post-earthquake survey data. *Bull Earthq Eng* 16(9):3687–3720
- Rosti A, Rota M, Penna A. (2021a) Empirical fragility curves for Italian URM buildings. *Bull Earthq Eng*;19:3057–3076. doi:10.1007/s10518-020-00845-9.
- Rosti A, Del Gaudio C, Rota M. & Verderame, G.M. (2021b) Empirical fragility curves for Italian residential RC buildings. *Bull Earthquake Eng* 19, 3165–3183. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00971-4>
- Rota M, Penna A, Strobbia C (2008) Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dyn Earthq Eng* 28(10–11):933–947
- Rota M, Penna A, Magenes G (2010) A methodology for deriving analytical fragility curves for masonry buildings based on stochastic nonlinear analyses. *Eng Struct* 32(5):1312–132
- Saretta, Y., Sbrogiò, L., & Valluzzi, M.R. (2021a). Seismic response of masonry buildings in historical centres struck by the 2016 Central Italy earthquake. Calibration of a vulnerability model for strengthened conditions. *Construction and Building Materials*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123911>
- Saretta, Y., Sbrogiò, L., & Valluzzi, M.R. (2021b). Assigning the macroseismic vulnerability classes to strengthened ordinary masonry buildings: an update from extensive data of the 2016 Central Italy earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102318>
- Shakib H, Joghian SD, Pirizadeh M (2011) Proposed seismic risk reduction program for the megacity of Tehran, Iran. *Nat Hazards Rev* 12(3):140–145
- Silva V, Crowley H, Varum H, Pinho R, Sousa R (2014) Evaluation of analytical methodologies used to derive vulnerability functions. *Earthq Eng Struct Dyn* 43:181–204
- Silva V, Crowley H, Varum H, Pinho R (2015) Seismic risk assessment for mainland. Portugal *Bull Earthq Eng* 13(2):429–457
- Silva V, Amo-Oduro D, Calderon A, et al. (2018) Global earthquake model (GEM). Seismic risk map (version 2018.1). <https://doi.org/10.13117/gemglobal-seismic-risk-map-2018>
- Silva V, Pagani M, Schneider J, Henshaw P (2019) Assessing seismic hazard and risk globally for an earthquake resilient world. Global Earthquake Model Foundation (GEM), <https://www.globalquakemodel.org/Zuccaro>
- Zuccaro G (2004) Inventory and vulnerability of the residential building stock at a national level, seismic risk and social/economic loss maps. CD-ROM, Naples, Italy
- Smerzini C, Galasso C, Iervolino I, Paolucci (2014) Ground motion record selection based on broadband spectral compatibility, *Earthquake Spectra*, 30(4):1427-1448.
- So E., Spence R., (2013) “Estimating shaking-induced casualties and building damage for global earthquake events: a proposed modelling approach,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11, 347-363
- Spence R, So E, Scawthorn C (eds) (2011a) Human casualties in earthquakes: progress in modelling and mitigation, vol 29. Springer, Berlin
- Spence R, So E, Jenkins S, Coburn A and Ruffle S (2011b) A global earthquake building damage and casualty database, Chapter 5 in Spence R, So E and Scawthorn C (eds), Human casualties in earthquakes: progress in modelling and mitigation, Springer 2011, link: <http://www.ceqid.org/CEQID/Home.aspx>
- Stannard M, Galloway B, Brunson D, et al (2014) Field Guide: Rapid Post Disaster Building Usability Assessment - Earthquakes. Ministry of Business, Innovation and Employment, Wellington, New Zealand.

- Stucchi M, Akinci A, Faccioli E, Gasperini P, Malagnini L, Meletti C, Montaldo V, Valensise G (2004) Mappa di Pericolosità sismica del territorio Nazionale [http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/rapporto\\_conclusivo .pdf](http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/rapporto_conclusivo.pdf) (in italian)
- Stucchi M, Meletti C, Montaldo V, Crowley H, Calvi GM, Boschi E (2011) Seismic hazard assessment (2003-2009) for the Italian building code. *Bull Seism Soc of Am* 101:1885–1911
- Tavani C, Brando G, De Matteis G, and Spacone E (2017) Damage Probability Matrices for Eight Historic Centers After the 2009 L’Aquila Earthquake.
- Tertulliani A, Arcoraci L, Berardi M, Bernardini F, Camassi R, Castellano C, Del Mese S, Ercolani M, Graziani L, Leschiutta I, Rossi A, Vecchi M (2010) An application of EMS 98 in a medium size city: the case of L’Aquila (Italy) after the April 6, 2009 Mw 6.3 earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*. DOI: 10.1007/s10518-010-9188-4.
- Valluzzi, M. R. (2009) User Manual of Vulnus\_4.0, original program by Bernardini Gori A, Modena R C, Vb version edited by Valluzzi MR, with contributions by Benincà G, Barbetta E, Munari M (in Italian).
- Valluzzi, M.R., Sbrogiò, L., Saretta, Y., & Wenliuhan, H. (2021). Seismic Response of Masonry Buildings in Historical Centres Struck by the 2016 Central Italy Earthquake. Impact of Building Features on Damage Evaluation. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1916852>
- Vamvatsikos D., Cornell C.A., 2006. Direct estimation of the seismic demand and capacity of oscillators with multi-linear static pushovers through IDA. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(9), 1097-1117.
- Vanin F., Zaganelli D., Penna A., Beyer K., Estimates for the stiffness, strength and drift capacity of stone masonry walls based on 123 quasi-static cyclic tests reported in the literature, *Bulletin of Earthquake Engineering* 15 (12) (2017) 5435 {5479.
- Verderame GM, Polese M, Mariniello C, Manfredi G (2010) A simulated design procedure for the assessment of seismic capacity of existing reinforced concrete buildings. *Adv Eng Softw* 41(2):323–335
- Verderame GM, Ricci P, Esposito M, Manfredi G (2012) STIL v1.0 – Software per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche degli acciai da c.a. tra il 1950 e il 2000. ReLUIS, Naples, Italy. Available at <http://www.reluis.it/>.
- Vettore, M., Donà, M., Carpanese, P., Follador, V., da Porto, F., & Valluzzi, M.R. (2020). A Multi-level Procedure at Urban Scale to Assess the Vulnerability and the Exposure of Residential Masonry Buildings: The Case Study of Pordenone, Northeast Italy. *Heritage*, 3, 1433–1468. <https://doi.org/10.3390/heritage3040080>
- Zuccaro G (2004) Inventory and vulnerability of the residential buildings in Italy. Risk maps and socioeconomic losses. Final Report SAVE Project, Task 1. GNDT, Rome
- Zuccaro, G., Cacace, F., (2011) Seismic Casualty Evaluation: The Italian Model, an Application to the L’Aquila 2009 Event. In R Spence, E So, & C Scawthorn, *Human Casualties in Earthquakes Progress in Modelling and Mitigation* (pp. 171-184), Springer.
- Zuccaro G, Cacace F (2015a) Seismic vulnerability assessment based on typological characteristics. First level procedure S.A.V.E.. *Soil Dyn Earthquake Eng*, pp 262–269
- Zuccaro, G., Dolce, M., De Gregorio, D., Speranza, E., & Moroni, C. (2015b). La Scheda Cartis Per La Caratterizzazione Tipologico- Strutturale Dei Comparti Urbani Costituiti Da Edifici Ordinari. Valutazione dell’esposizione in analisi di rischio sismico. *GNGTS 2015, Trieste, 17-19 November*, 281–287.



- Zuccaro G, De Gregorio D, Leone MF, Sessa S, Nardone S, Perelli FL (2021) CAESAR II tool: complementary analyses for emergency planning based on seismic risks impact evaluations. *Sustainability* 13(17):9838. <https://doi.org/10.3390/su13179838>
- Zucconi M, Ferlito R, Sorrentino L (2018) Simplified survey form of unreinforced masonry buildings calibrated on data from the 2009 L'Aquila earthquake. *Bull Earthq Eng* 16:2877–2911. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0283-7>.
- Zucconi M, Ferlito R, Sorrentino L (2020) Validation and extension of a statistical usability model for unreinforced masonry buildings with different ground motion intensity measures. *Bull Earthq Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00669-2>.
- Zucconi M, Ferlito R, Sorrentino L. (2021a) Typological Damage Fragility Curves for Unreinforced Masonry Buildings affected by the 2009 L'Aquila, Italy Earthquake. *Open Civ Eng J* 2021; 15:117–34. doi:10.2174/1874149502115010117.
- Zuccaro, G., Perelli, F.L., De Gregorio, D., & Cacace, F. (2021b). Empirical vulnerability curves for Italian masonry buildings: evolution of vulnerability model from the DPM to curves as a function of acceleration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(8), 3077-3097. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00954-5>
- Zucconi M, Di Ludovico M, Sorrentino (2022) L. Census-based typological usability fragility curves for Italian unreinforced masonry buildings. *Bull Earthq Eng*:1–20. doi:10.1007/s10518-022-01361-8.