



Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale

Convegno



La sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

**Accordo tra il CSLP ed il Consorzio ReLUIIS
attuativo dei DM 578/2020 e DM 204/2022**

**Roma
24 e 25 ottobre 2023**

IL DEGRADO DELLE OPERE E LE ATTIVITÀ DI ISPEZIONE

Beatrice Belletti, Università degli Studi di Parma

CONTENUTI

- IL RISCHIO INDOTTO DAL DEGRADO DEI PONTI ESISTENTI
- IL PROCESSO DI ATTRIBUZIONE DEL LIVELLO DI DIFETTOSITA' ATTUALE PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA' DEI PONTI
- IL DEGRADO NELL'AMBITO DELL' APPROCCIO MULTILIVELLO PER LA GESTIONE DEI PONTI ESISTENTI
- LA RICERCA SVILUPPATA IN AMBITO SCIENTIFICO
- ALCUNE OSSERVAZIONI

Pericolosità [H]

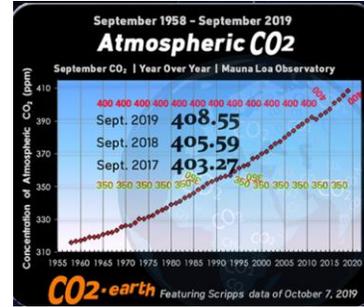
Vulnerabilità (V)

Esposizione (E)

$$R = [H] \times [E] \times [V]$$



Il rischio indotto dai problemi di durabilità tende ad aumentare nel tempo



from «Making Critical Infrastructure Resilient»
©2020 UNDRR, © Shutterstock, © Unsplash

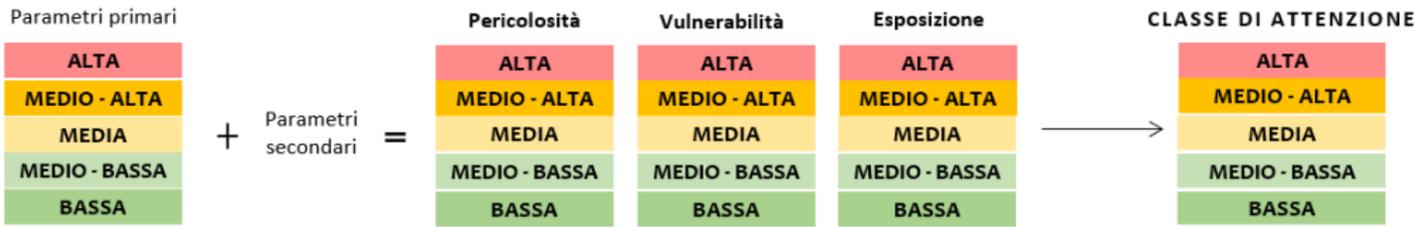


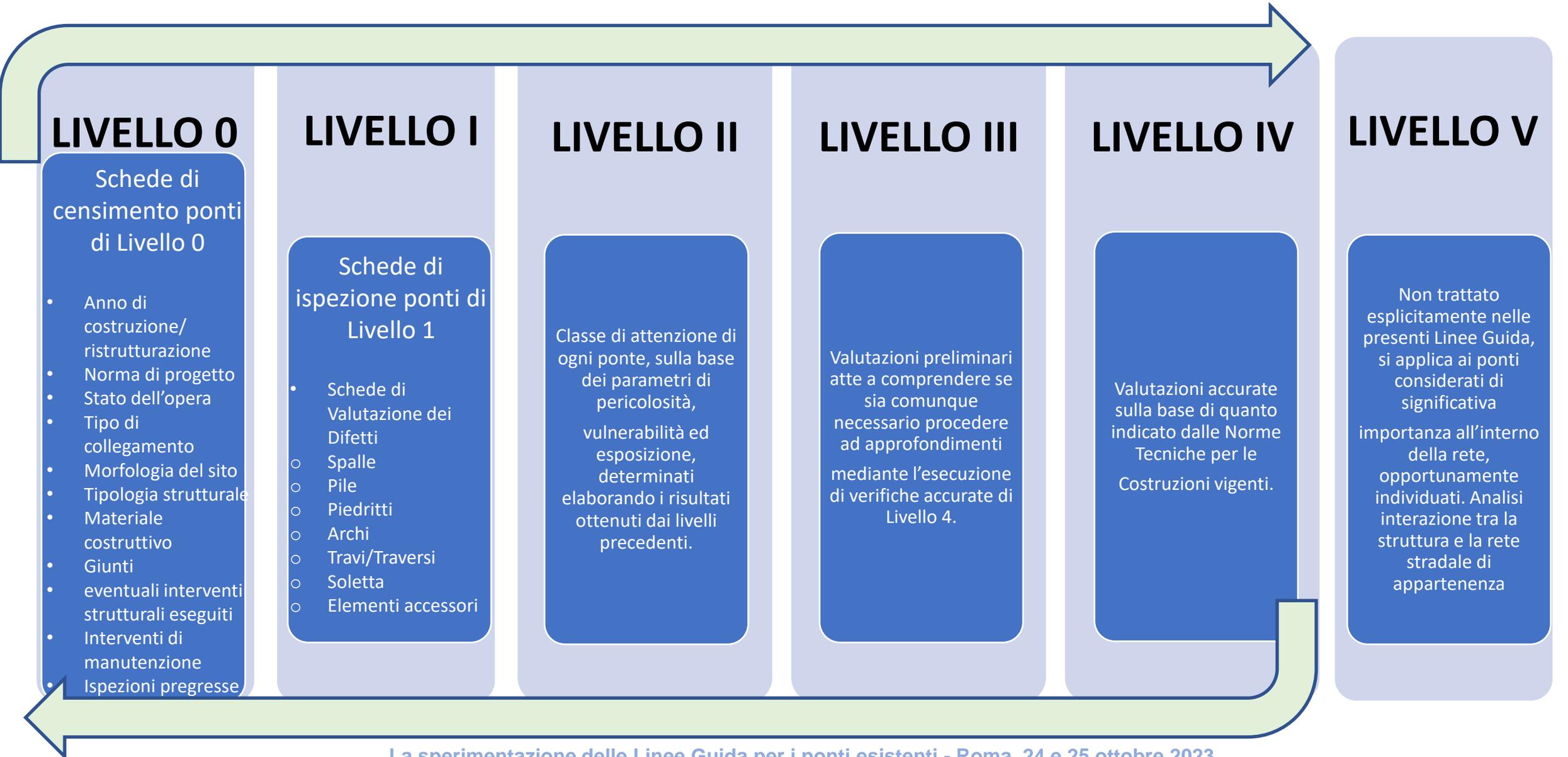
Figura 4.1. – Flusso logico per la determinazione della classe di attenzione

La vulnerabilità dipende dalla difettosità indotta anche dal degrado



- apparecchi di appoggio, rilevati e fondazioni,
- difetti generici, giunti,
- elementi accessori
- Schede di ispezione speciale - Ponti in c.a.p. a cavi post-tesi

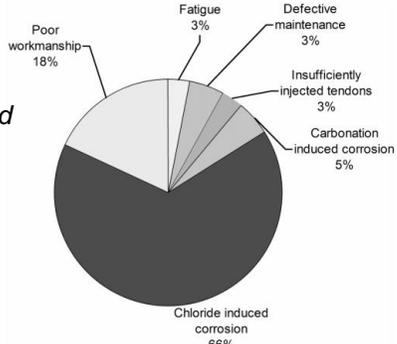
+
 Elementi in ACCIAIO o METALLO
 Elementi in MURATURA
 Elementi in C.A./C.A.P.
 Elementi in C.A.P.
 Elementi in LEGNO



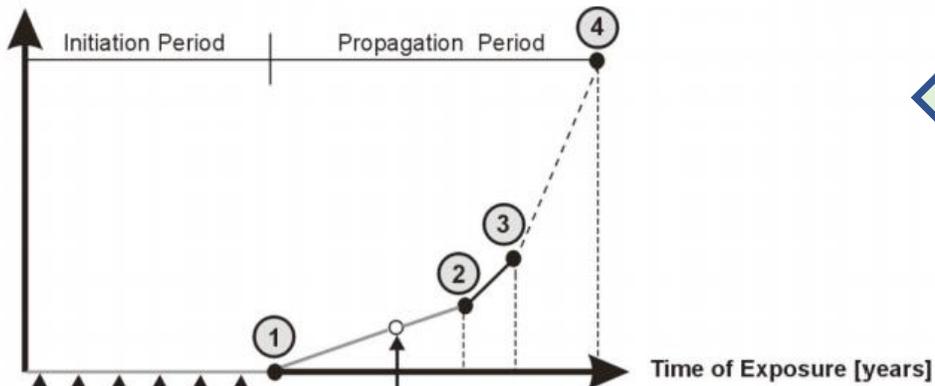
LE OPERE IN CA E CAP: DAL PROCESSO CORROSIVO LOCALE ALLA PRESTAZIONE GLOBALE DEL PONTE

Cause di degrado in ponti della rete stradale tedesca.

from fib Bulletin 59. Condition control and assessment of reinforced concrete structures exposed to corrosive environments (carbonation/chlorides). 2011



Level of Deterioration



Limit States	Description	Period
1	Depassivation of the reinforcement	Initiation Period
2	Formations of cracks	
3	Spalling of the concrete cover	Propagation Period
4	Collapse of the structure through bond failure or reduction of the cross section of the load bearing reinforcement	

from fib Bulletin 34. Model Code for Service Life Design. 2006

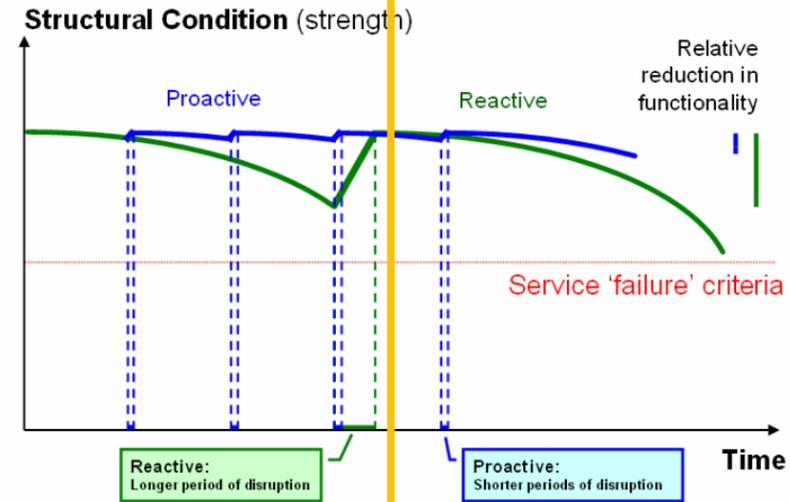
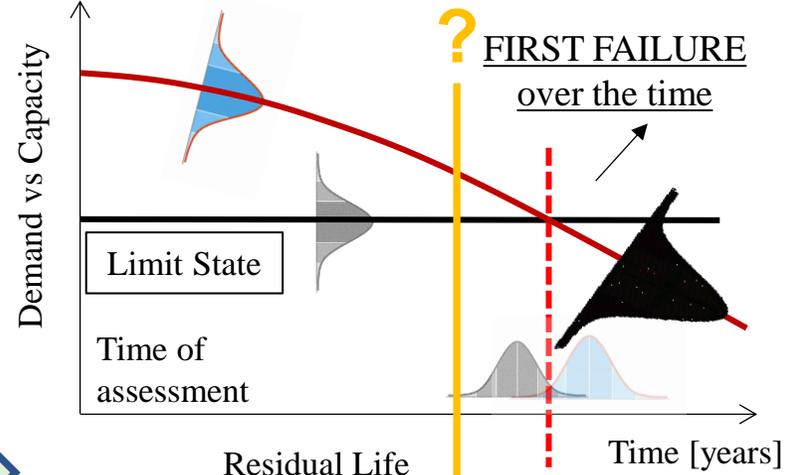


Figure 23A: Comparison of reactive and proactive approaches to structure maintenance

Legato allo stato **attuale** di conservazione della struttura

IN ASSENZA DI INTERVENTI

IN PRESENZA DI INTERVENTI

PROCESSO DI ATTRIBUZIONE DEL LIVELLO DI DIFETTOSITA' NELLA FASE DI SPERIMENTAZIONE DELLE LINEE GUIDA PER I PONTI ESISTENTI

Scheda Ispezione Ponti di Livello 1

14	Travi/Traversi N _____ Strada di appartenenza: _____ Progressiva km: _____														
	C.a. Tecnico rilevatore: _____ Data ispezione: ___/___/___														
N°	Descrizione difetto	viso	G	Estensione K ₁			Intensità K ₂			N° foto	PS	NA	NR	NP	Note
c.a/c.a.p._1	Macchie di umidità passiva	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
c.a/c.a.p._2	Macchie di umidità attiva	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Dif. Gen_1	Tracce di scolo	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
c.a/c.a.p._3	Cls dilavato / ammalorato	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

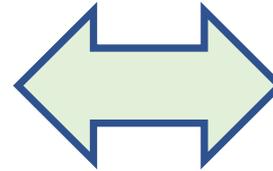


Tabella 4.5. – Classificazione del livello di difettosità

ALTO	Difetti di gravità alta o medio-alta (G=5 o G=4) e di qualsiasi intensità su elementi critici (selle Gerber, appoggi, cavi di precompressione, fondazioni scalzate, si veda definizione del § 3.3) o presenza di condizioni critiche (quadri fessurativi molto estesi ed intensi, cinematismi in atto, incipiente perdita di appoggio)
MEDIO-ALTO	Difetti di gravità alta o medio-alta (G=5 o G=4) e di intensità elevata su elementi la cui crisi può compromettere la statica dell'opera, come segnalato nella scheda di rilievo all'Allegato B
MEDIO	Difetti di gravità alta o medio-alta (G=5 o G=4) e di intensità elevata su elementi la cui crisi non può compromettere il comportamento statico globale dell'opera e difetti di gravità alta (G=5) e di intensità medio-bassa
MEDIO-BASSO	Difetti di gravità medio-alta (G=4) con intensità medio-bassa e difetti di gravità media e bassa (G=3, G=2, G=1) e di qualsiasi intensità, in numero elevato
BASSO	Difetti di gravità media e bassa (G=3, G=2, G=1) e di qualsiasi intensità, in numero esiguo

LA RICERCA SVOLTA NEL PROGETTO MIRA A FORNIRE INDICAZIONI ATTE A MIGLIORARE IL PROCESSO DI VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DEL DEGRADO SUL RISCHIO DEI PONTI E AD UNIFORMARE IL GIUDIZIO DEGLI ISPETTORI



**RACCOLTA/ANALISI DEI DATI A DISPOSIZIONE
ANALISI DELLA RICERCA SVILUPPATA IN AMBITO SCIENTIFICO**

7.4.3.1 Strutture precomprese a cavi post-tesi

Il rilevamento precoce della corrosione nei cavi di precompressione assume grande rilevanza nella valutazione della sicurezza delle strutture in esercizio ed è quindi oggetto di estensive ricerche e sperimentazioni nel campo dei metodi non distruttivi. E' pertanto necessario che i soggetti incaricati delle ispezioni siano costantemente aggiornati sui relativi sviluppi.

LA RICERCA SVILUPPATA IN AMBITO SCIENTIFICO



UNIVERSITÀ DI PARMA

INTERNATIONAL CACRCS DAY

Capacity Assessment of Corroded Reinforced Concrete Structures

9:00 – 18:30

25 March 2019

Parma, Italy

Italian Capital of Culture 2020

In collaboration with



Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia

with the support of



Fédération Internationale du Béton

Venue:

S. Elisabetta Conference Center
Campus- Via delle Scienze, 181, 43124 Parma
University of Parma
Italy



CACRCS DAYS 2023

4th Edition
www.cte-eventi.com
cacrcs@cte-eventi.com

13th -15th September 2023
Venue: University of Parma, Parma, Italy

Capacity Assessment of Corroded Reinforced Concrete Structures: from Research to Daily Engineering Evaluation

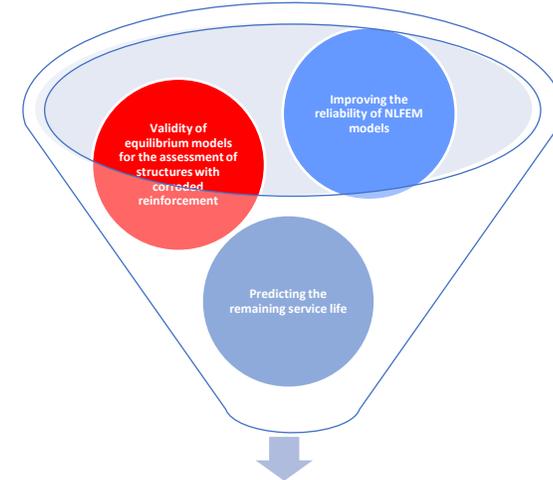


Round table on identifying the technical gaps for the structural evaluation of corroded concrete structures for future guidelines and code on short and long-term assessment of corroded structures

17:00 CHAIR: **Walraven J.**, Em. TU Delft

Since the main objective of this workshop is to move from research to daily engineering evaluation, this final Round Table aims to exchange some views and comments on the pending technical gaps for the structural evaluation of corroded concrete structures, in spite of the contributions to this workshop, in order to promote some guidelines and codes.

From needs identified on **CACRCS DAYS** to research goals



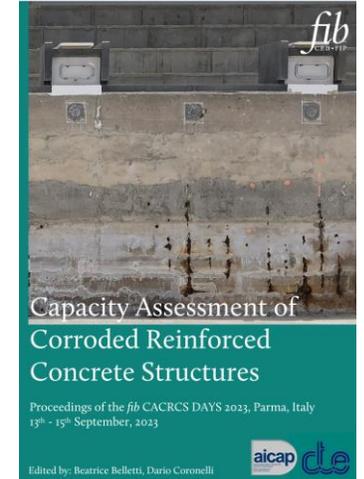
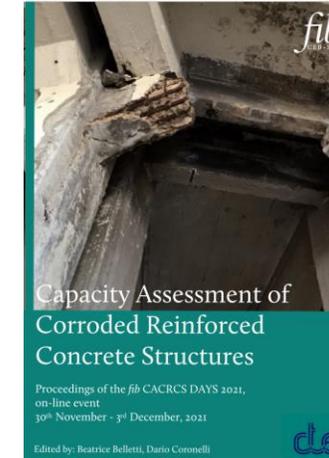
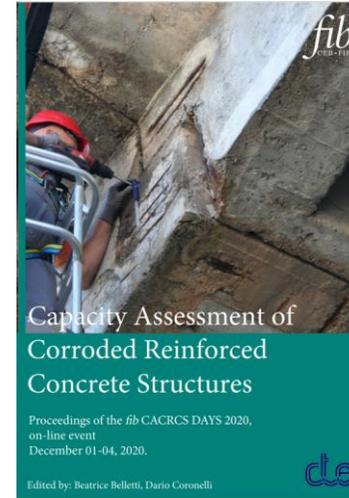
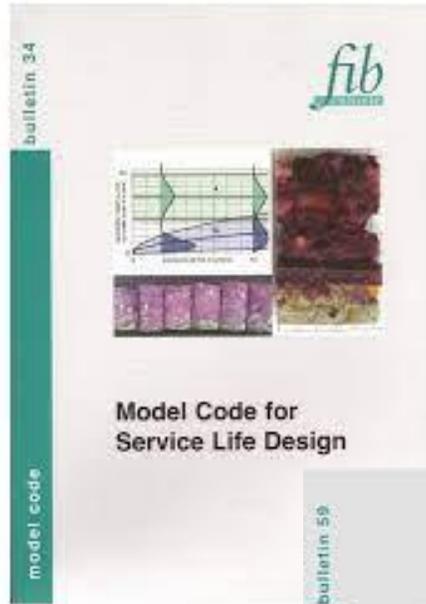
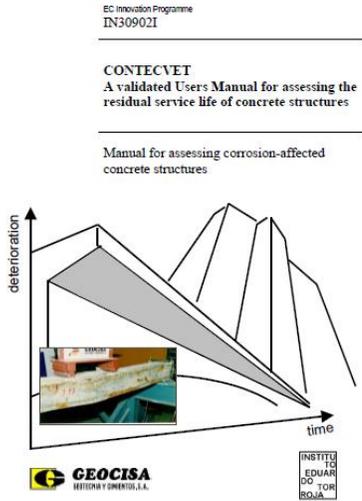
Derivation of reliable material models for the analysis of corroded structures
Analytical models of the capacity assessment of corroded members

.....

LA RICERCA SVILUPPATA IN AMBITO SCIENTIFICO

alcuni riferimenti

Manca normativa
che riporti
specifiche
valutazioni per le
verifiche di
sicurezza di
elementi soggetti
a corrosione



In fase di stampa:

- fib bulletin - Modelling Structural Performance of Existing Concrete Structures - State-of-the-Art Report
- Model Code 2020

In fase di scrittura:

- CNR - La valutazione della sicurezza di opere in CA e CAP soggette a corrosione





Class designation	Description of environment	Informative examples where exposure classes may occur
1.- No risk of corrosion or attack		
X0	For concrete without reinforcement or embedded metal: all exposures except where there's freeze/thaw, abrasion or chemical attack For concrete with reinforcement or embedded metal: very dry	Concrete inside buildings with very low air humidity
2.- Corrosion induced by carbonation		
XC1	Dry or permanently wet	Concrete inside buildings with low air humidity Concrete permanently submerged in water
XC2	Wet, rarely dry	Concrete surfaces subject to long-term water contact Many foundations
1.1.1.1 XC3	Moderate humidity	Concrete inside buildings with moderate or high air humidity External concrete sheltered from rain
XC4	Cyclic wet and dry	Concrete surfaces subject to water contact, not within exposure class XC2
3.- Corrosion induced by chlorides other than from sea water		
XD1	Moderate humidity	Concrete surfaces exposed to airborne chlorides
XD2	Wet, rarely dry	Swimming pools Concrete exposed to industrial waters containing chlorides
XD3	Cyclic wet and dry	Parts of bridges exposed to spray containing chlorides Pavements Car parks
4.- Corrosion induced by chlorides from sea water		
XS1	Exposed to airborne salt but not in direct contact with sea water	Structures near to or on the coast
XS2	Permanently submerged	Parts of marine structures
XS3	Tidal, splash and spray zones	Parts of marine structures

La conoscenza dell'anno di costruzione ci aiuta a stimare:

- Il periodo di innesco
- la velocità del fenomeno corrosivo

LIVELLO 0

Schede di censimento ponti di Livello 0

- Anno di costruzione/ ristrutturazione
- Norma di progetto
- Stato dell'opera
- Tipo di collegamento
- Morfologia del sito
- Tipologia strutturale
- Materiale costruttivo
- Giunti
- eventuali interventi strutturali eseguiti
- Interventi di manutenzione
- Ispezioni progressive

La corrosione viene spesso studiata tramite prove di **corrosione accelerata** eseguite su **provini di laboratorio**



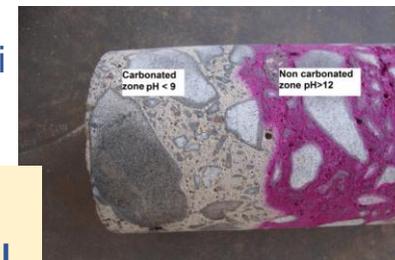
Un laboratorio su territorio nazionale per raccogliere dati sulla **corrosione naturale in strutture in opera** per:

- Definire le peculiarità degli ambienti aggressivi del territorio italiano (distanza dalla costa/ effetti stagionali, ecc.)
- Validare i modelli di letteratura (tempo innesco/velocità di corrosione) spesso ricavati da prove di laboratorio su provini non fessurati
- Valutare la dipendenza dal copriferro/tipo di cls/porosità/ecc.
- Valutare la dipendenza dallo stato fessurativo
- Valutare gli aspetti micro-climatici e la dipendenza delle forme e posizioni elementi strutturali
- Valutare la durabilità interventi eseguiti



DAL CENSIMENTO DELLE OPERE ISPEZIONATE ALLA RACCOLTA ORGANIZZATA DI DATI UTILI ALLA CALIBRAZIONE DI MODELLI PREDITTIVI

La sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti - Roma, 24 e 25 ottobre 2023



Phenolphthalein carbon test
(from <https://www.chemistryworld.com>)

IL MODELLO DI TUOTTI AIUTA AD UNIFORMARE IL GIUDIZIO SUI LIVELLI DI DEGRADO DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI

PUNTO 1: OSSIDAZIONE ARMATURE

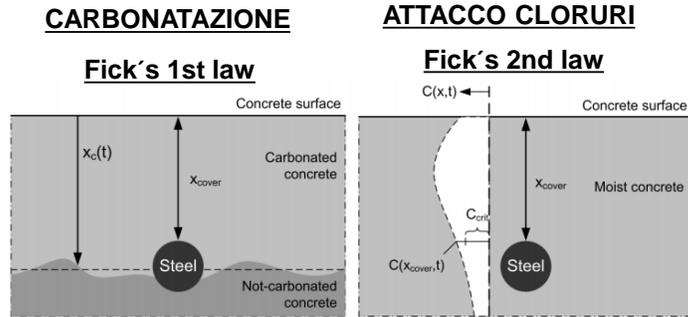


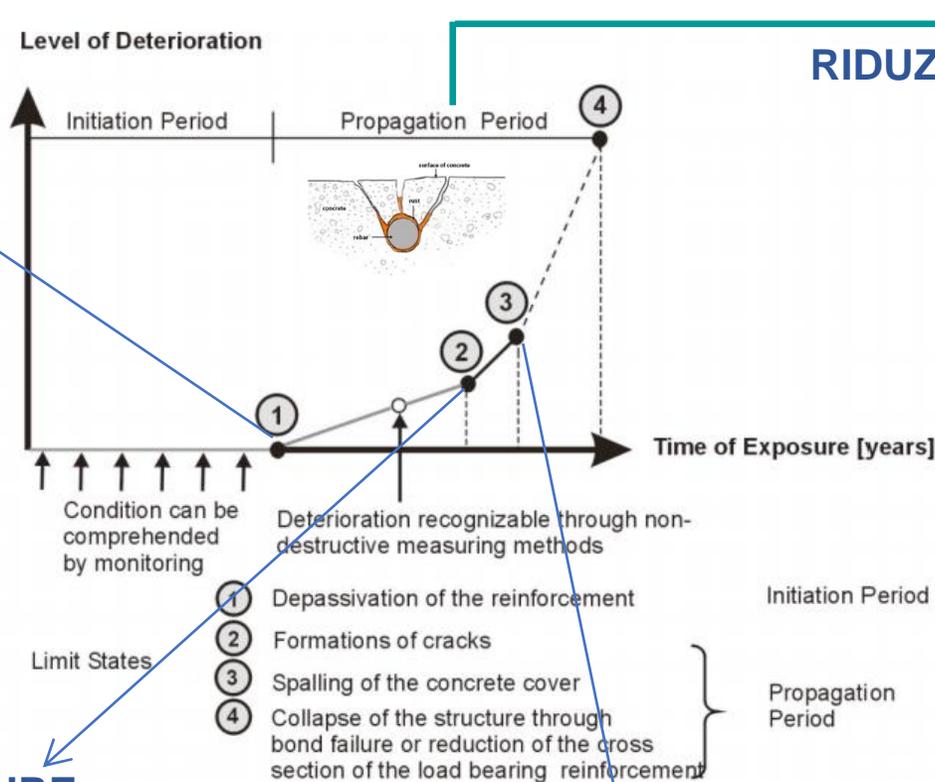
Figure 5-10: Limit states of depassivation due to carbonation (left) and chloride ingress (right) from fib Bulletin 34. Model Code for Service Life Design. 2006

Ex difetti correlati da linee guida:
 c.a./c.a.p._1: Macchie di umidità attiva
 c.a./c.a.p._2: Macchie di umidità passiva
 c.a./c.a.p._3: Cls dilavato/ammalorato
 ecc.

PUNTO 2: FORMAZIONE FESSURE

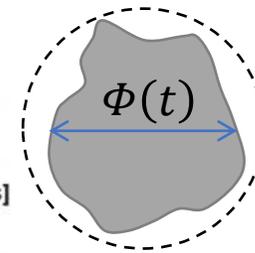


Ex difetti correlati da linee guida:
 c.a./c.a.p._15: Lesioni in corrispondenza staffe
 c.a./c.a.p._18: Fessure longitudinali
 ecc.

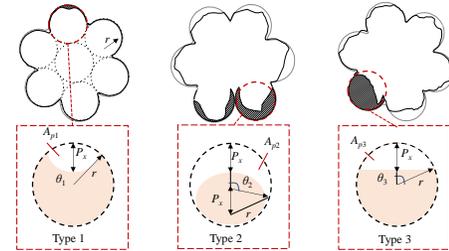


RIDUZIONE SEZIONE ARMATURE DA 1 A 4

$$\Phi(t) = \Phi_0 - \alpha v_{corr} t_p$$



Φ_0



Ex difetti correlati da linee guida:
 c.a./c.a.p._6: Armatura ossidata/corrosa
 c.a./c.a.p._18: Fessure longitudinali
 c.a./c.a.p._16: Staffe scoperte/ossidate
 ecc.

PUNTO 3: SPALLING DEL COPRIFERRO



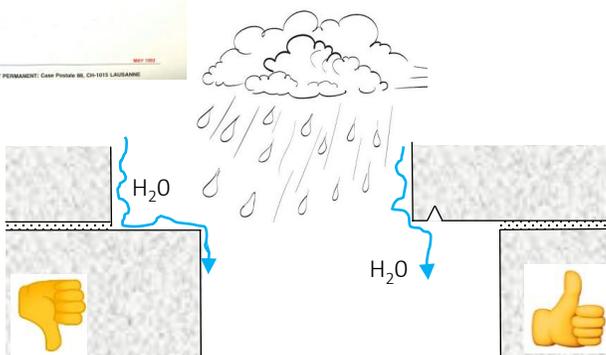
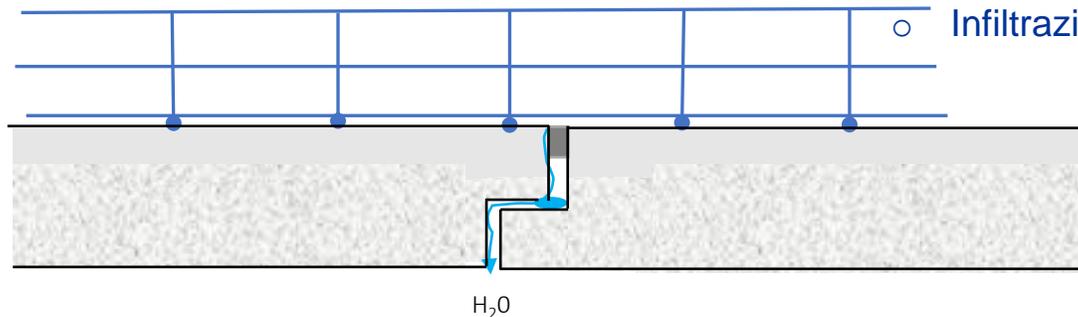
Ex difetti correlati da linee guida:
 c.a./c.a.p._5: Distacco del copriferro
 c.a./c.a.p._16: Staffe scoperte/ossidate
 ecc.

NO WATER – NO TROUBLES

Rapidità di evoluzione \neq da quella legata a aggressività ambientale se causata da:

- Convogliamento acque assente
- Pozzetti intasati
- Scarichi corti/ostruiti/danneggiati
- Infiltrazioni da giunti

- Avoid standing water in joints



MAGGIORE IMPORTANZA ALLE SCHEDE DEDICATE AGLI ELEMENTI ACCESSORI CHE POSSONO CAUSARE AMMALORAMENTI “DELLO STATO DI SALUTE STRUTTURALE” DEL PONTE

Scheda Ispezione Ponti di Livello 1

20 Elementi accessori (indicare solamente se il difetto è presente)		Data: / /		
Strada di appartenenza: _____		Progressiva km: _____		
N° corsie _____		Tecnico rilevatore: _____		
Larghezza carreggiata _____				
Marciapiede _____	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO			
Larghezza marciapiede _____	1 (solo su un lato) 2 (su entrambi i lati)			
Altezza marciapiede _____				
		BARRIERE LATERALI <input type="checkbox"/> CASO 1 Marciapiede assente <input type="checkbox"/> CASO 2 Marciapiede sormontabile <input type="checkbox"/> CASO 3 Marciapiede non sormontabile		
Elemento ispezionato	N°	Descrizione difetto	N° foto	Note
Stato della pavimentazione	El.Acc_1	Dislivello rilevato impalcato	<input type="checkbox"/>	
		Presenza di dossi	<input type="checkbox"/>	
		Fessure - anomalie	<input type="checkbox"/>	
Cordoli	El.Acc_2	Assenti	<input type="checkbox"/>	
		Degradati	<input type="checkbox"/>	
Convogliamento acque	El.Acc_3	Assenti	<input type="checkbox"/>	
	El.Acc_4	Pozzetti intasati	<input type="checkbox"/>	
	El.Acc_5	Scarichi corti	<input type="checkbox"/>	
	El.Acc_6	Scarichi ostruiti	<input type="checkbox"/>	
	El.Acc_7	Scarichi danneggiati	<input type="checkbox"/>	

- Specifiche valutazioni danni imputabili alla carenza degli elementi secondari
- Specifiche valutazioni sulla rapidità di evoluzione in assenza o in presenza di intervento
- Specifiche valutazioni sulla variabilità spaziale del danno
- Specifiche valutazioni sugli elementi coinvolti e sulle prestazioni attese a seguito del danno

LIVELLO I

Schede di ispezione ponti di Livello 1

- Schede di Valutazione dei Difetti
- Spalle
- Pile
- Piedritti
- Archi
- Travi/Traversi
- Soletta
- Elementi accessori



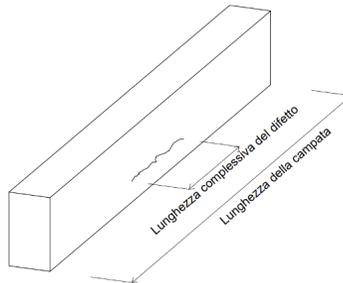
Fonte: PROGETTO RAM – Manuale di ispezione principale (Anas GRUPPO FS ITALIANE)



ELEMENTI COSTRUTTIVI

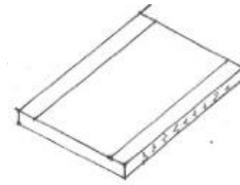
con i relativi difetti caratterizzati da:

- Estensione (K1)
- Intensità (K2)

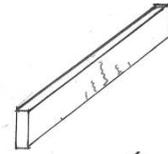


Scheda Ispezione Ponti di Livello 1

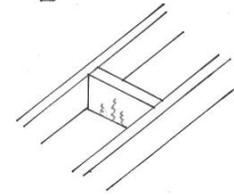
14		Travi/Traversi	N	Strada di appartenenza:	Progressiva km:									
		C.a.		Tecnico rilevatore:	Data ispezione:									
N°	Descrizione difetto	g	0	0,2	0,5	1	0,2	0,5	1	N° foto	PS	NA	NR	NP
c.a/c.a.p. 1	Macchie di umidità passiva	<input type="checkbox"/>												
c.a/c.a.p. 2	Macchie di umidità attiva	<input type="checkbox"/>												
Dif. Gen. 1	Tracce di scolo	<input type="checkbox"/>												
c.a/c.a.p. 3	Cis dilavato / ammolorato	<input type="checkbox"/>												
c.a/c.a.p. 21	Cis dilavato / ammolorato Testate	<input type="checkbox"/>												
Dif. Gen. 2	Ristagni d'acqua	<input type="checkbox"/>												
Dif. Gen. 5	Risagni d'acqua nei cassoni	<input type="checkbox"/>												
c.a/c.a.p. 4	Vespigi	<input type="checkbox"/>												
c.a/c.a.p. 5	Distacco del copriferro	<input type="checkbox"/>												
c.a/c.a.p. 6	Armatura ossidata/corrosa	<input type="checkbox"/>												



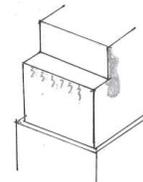
Solette



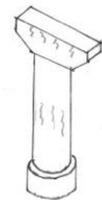
Travi



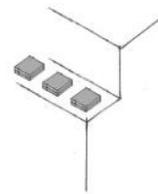
Traversi



Spalle

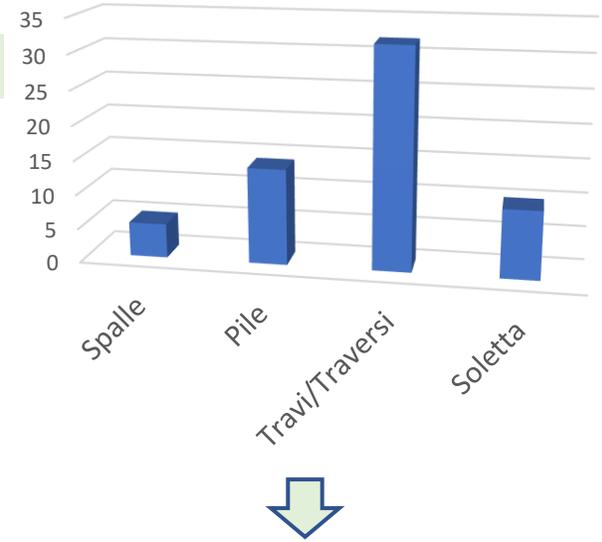


Pile



Appoggi

Numerosità difetto c.a./c.a.p. _6
Armatura ossidata/corrosa



RACCOLTA ORGANIZZATA DEI DATI DELLE SCHEDE DI ISPEZIONE RELATIVE AL DEGRADO OSSERVATO SUI VARI ELEMENTI COSTRUTTIVI

VULNERABILITÀ STRUTTURALE E FONDAZIONALE

LIVELLO II

Classe di attenzione di ogni ponte, sulla base dei parametri di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, determinati elaborando i risultati ottenuti dai livelli precedenti.

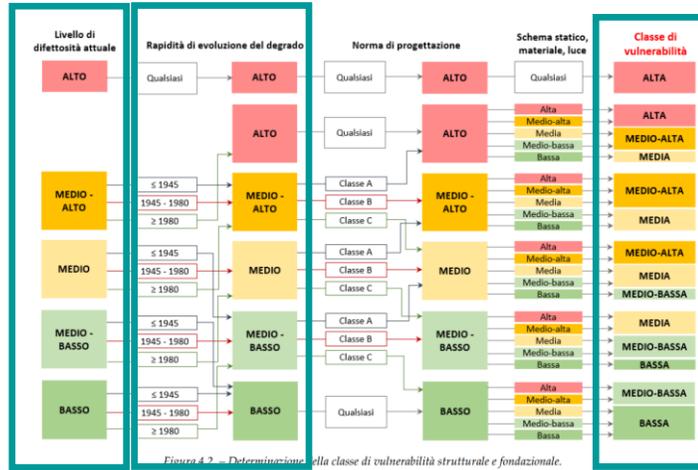


Tabella 4.5. – Classificazione del livello di difettosità

ALTO	Difetti di gravità alta o medio-alta ($G=5$ o $G=4$) e di qualsiasi intensità su elementi critici (selle Gerber, appoggi, cavi di precompressione, fondazioni scalzate, si veda definizione del § 3.3) o presenza di condizioni critiche (quadri fessurativi molto estesi ed intensi, cinematismi in atto, incipiente perdita di appoggio)
MEDIO-ALTO	Difetti di gravità alta o medio-alta ($G=5$ o $G=4$) e di intensità elevata su elementi la cui crisi può compromettere la statica dell'opera, come segnalato nella scheda di rilievo all'Allegato B
MEDIO	Difetti di gravità alta o medio-alta ($G=5$ o $G=4$) e di intensità elevata su elementi la cui crisi non può compromettere il comportamento statico globale dell'opera e difetti di gravità alta ($G=5$) e di intensità medio-bassa
MEDIO-BASSO	Difetti di gravità medio-alta ($G=4$) con intensità medio-bassa e difetti di gravità media e bassa ($G=3$, $G=2$, $G=1$) e di qualsiasi intensità, in numero elevato
BASSO	Difetti di gravità media e bassa ($G=3$, $G=2$, $G=1$) e di qualsiasi intensità, in numero esiguo

VULNERABILITÀ SISMICA

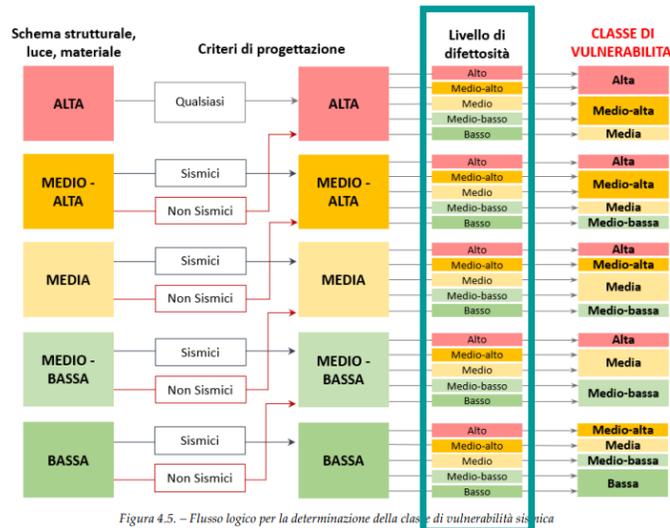


Tabella 4.14. – Livelli di difettosità ai fini della classificazione della vulnerabilità sismica

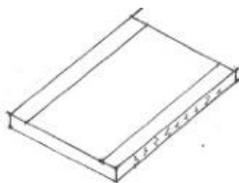
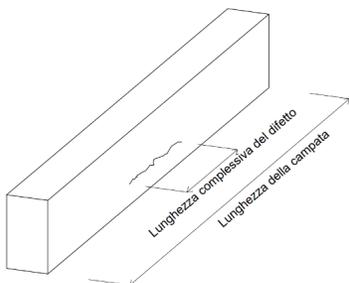
ALTO	Difetti di gravità alta o medio-alta ($G=5$ o $G=4$) e di qualsiasi intensità su elementi critici (apparecchi di appoggio, sezioni di estremità delle pile) o presenza di condizioni critiche (cinematismi in atto, incipiente perdita di appoggio)
MEDIO-ALTO	Difetti di gravità alta o medio-alta ($G=5$ o $G=4$) e di intensità elevata su elementi la cui crisi può compromettere il comportamento globale dell'opera nei confronti delle azioni sismiche
MEDIO	Difetti di gravità alta o medio-alta ($G=5$ o $G=4$) e di intensità elevata su elementi la cui crisi non può compromettere il comportamento globale nei confronti delle azioni sismiche dell'opera e difetti di gravità alta ($G=5$) e di intensità medio-bassa
MEDIO-BASSO	Difetti di gravità medio-alta ($G=4$) e di intensità medio-bassa e difetti di gravità media e bassa ($G=3$, $G=2$, $G=1$) e di qualsiasi intensità, in numero elevato
BASSO	Difetti di gravità media e bassa ($G=3$, $G=2$, $G=1$) e di qualsiasi intensità, in numero esiguo

IL PROCESSO DI ATTRIBUZIONE DEL LIVELLO DI DIFETTOSITA' ATTUALE

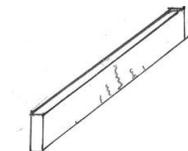
ELEMENTI COSTRUTTIVI

con i relativi difetti caratterizzati da:

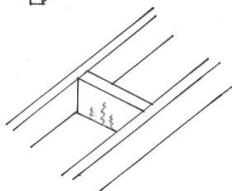
- Estensione (K1)
- Intensità (K2)



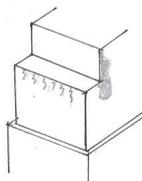
Solette



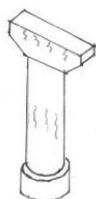
Travi



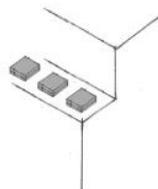
Traversi



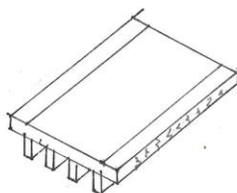
Spalle



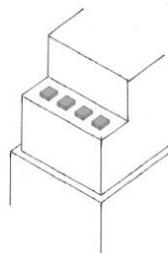
Pile



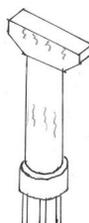
Appoggi



CAMPATE



SPALLE



PILE

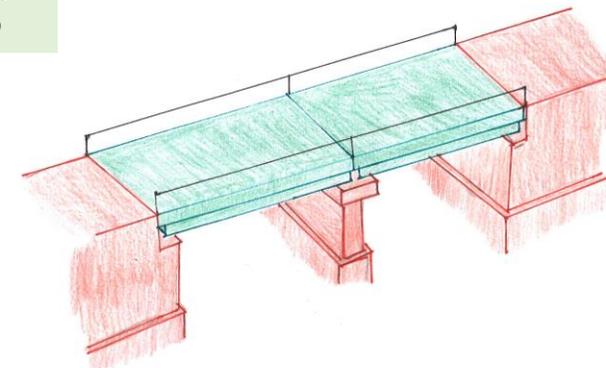
SOTTOGRUPPI

insiemi di elementi costruttivi facenti riferimento a un elemento omogeneo dell'opera

SOVRASTRUTTURA

raggruppa tutti gli elementi e le strutture orizzontali che costituiscono l'impalcato

INTERA OPERA



SOTTOSTRUTTURA

raggruppa pile, spalle, antenne e relative fondazioni

Scheda Ispezione Ponti di Livello 1

N°	C.a.	Descrizione difetto	Legg	Estensione K1		Intensità K2		N° foto	PS	NA	NR	NP
				0,2	0,5	1	0,2					
c.a./c.a.p._1		Macchie di umidità passiva	<input type="checkbox"/>									
c.a./c.a.p._2		Macchie di umidità attiva	<input type="checkbox"/>									
Dif. Gen_1		Tracce di scolo	<input type="checkbox"/>									
c.a./c.a.p._3		Cls dilavato / ammalorato	<input type="checkbox"/>									
c.a./c.a.p._21		Cls dilavato / ammalorato Testate	<input type="checkbox"/>									
Dif. Gen_2		Ristagni d'acqua	<input type="checkbox"/>									
Dif. Gen_5		Ristagni d'acqua nei cassoni	<input type="checkbox"/>									
c.a./c.a.p._4		Vespai	<input type="checkbox"/>									
c.a./c.a.p._5		Distacco del copriferro	<input type="checkbox"/>									
c.a./c.a.p._6		Armatura ossidata/corrosiva	<input type="checkbox"/>									

ELEMENTI COSTRUTTIVI

(travi, traversi, solette, pile, appoggi, ecc)



ALTO
MEDIO-ALTO
MEDIO
MEDIO-BASSO
BASSO

ALTO Difetti di gravità alta o medio-alta (G=5 o G=4) e di qualsiasi intensità su **elementi critici** (selle Gerber, appoggi, cavi di precompressione, ecc) o presenza di **condizioni critiche** (quadri fessurativi molto estesi ed intensi, cinematismi in atto, ecc)

MEDIO-ALTO Difetti di gravità alta o medio-alta (G=5 o G=4) e di **intensità elevata** su elementi la cui crisi può **compromettere la statica dell'opera**, come segnalato nella scheda di rilievo all'Allegato B

MEDIO Difetti di gravità alta o medio-alta (G=5 o G=4) e di **intensità elevata** su elementi la cui crisi non può compromettere il comportamento statico globale dell'opera e difetti di gravità alta (G=5) e di **intensità medio-bassa**

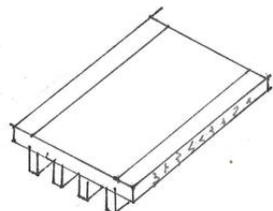
MEDIO-BASSO Difetti di gravità medio-alta (G=4) con **intensità medio-bassa** e difetti di gravità media e bassa (G=3, G=2, G=1) e di **qualsiasi intensità**, in numero elevato

BASSO Difetti di gravità media e bassa (G=3, G=2, G=1) e di **qualsiasi intensità**, in numero esiguo



SOTTOGRUPPI

(campate, spalle, pile)



ALTO
MEDIO-ALTO
MEDIO
MEDIO-BASSO
BASSO

ALTO Almeno un elemento costruttivo con difettosità alta

MEDIO-ALTO Almeno un elemento costruttivo con difettosità medio-alta

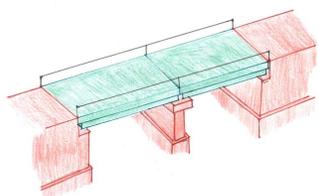
MEDIO Almeno **50% degli elementi** con difettosità media

MEDIO-BASSO Meno del **50% degli elementi** con difettosità media, con prevalenza di elementi con difettosità medio-bassa

BASSO Meno del **50% degli elementi** con difettosità media, con prevalenza di elementi con difettosità bassa



INTERA OPERA

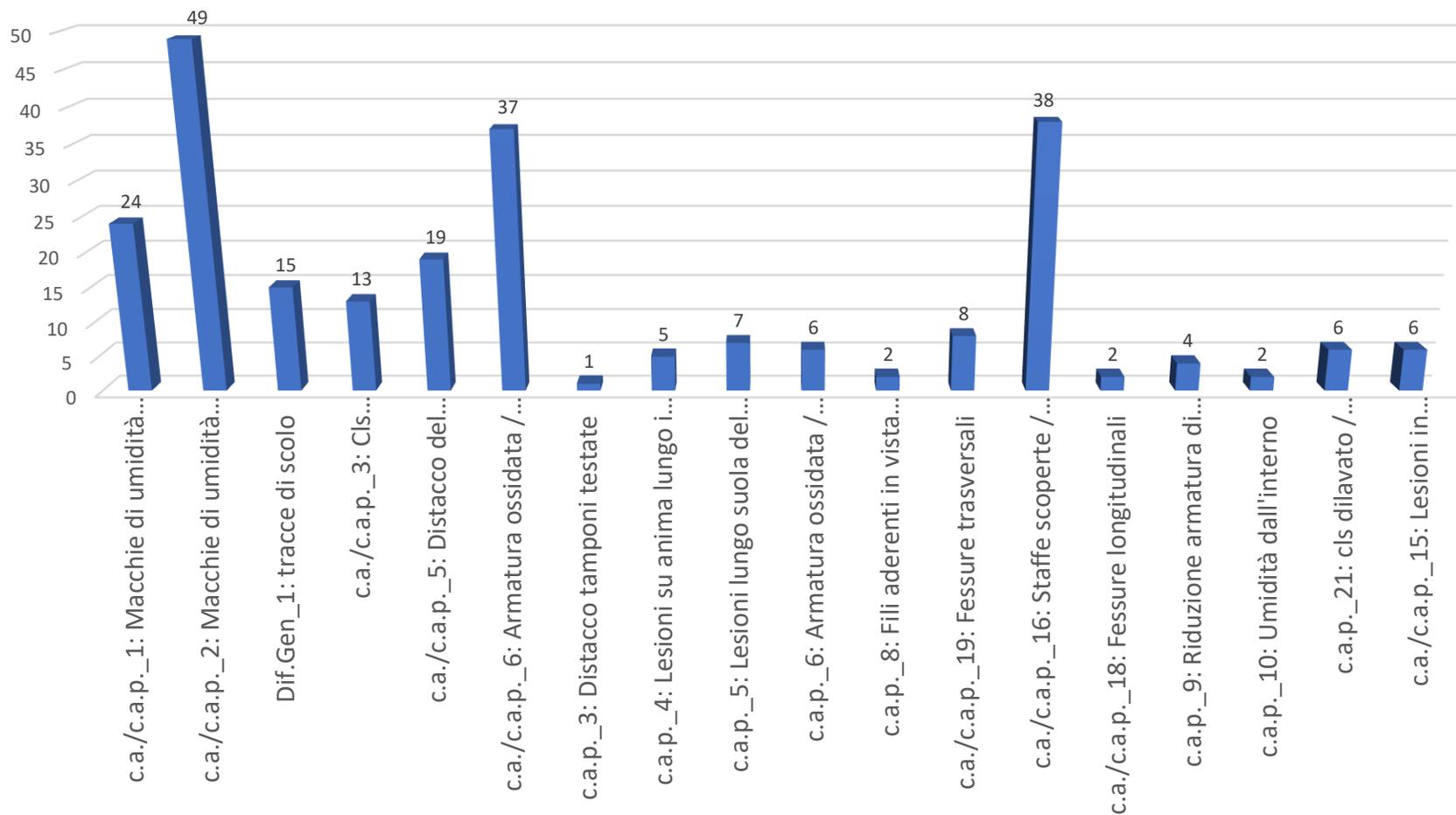


ALTO
MEDIO-ALTO
MEDIO
MEDIO-BASSO
BASSO

È assegnato il livello di difettosità massimo riscontrato tra i SOTTOGRUPPI

LA RACCOLTA DEI DATI PER ELEMENTO COSTRUTTIVO

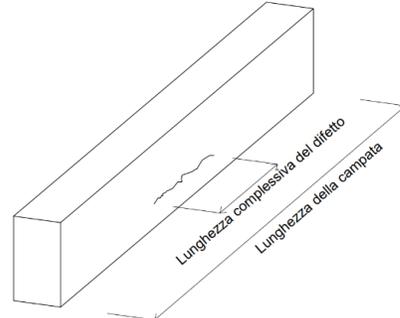
Numerosità difetti travi/traversi



RACCOLTA ORGANIZZATA DEI DATI PER OGNI ELEMENTO COSTRUTTIVO PERMETTE DI CALIBRARE INDICATORI NUMERICI DELLO STATO DI CONDIZIONE

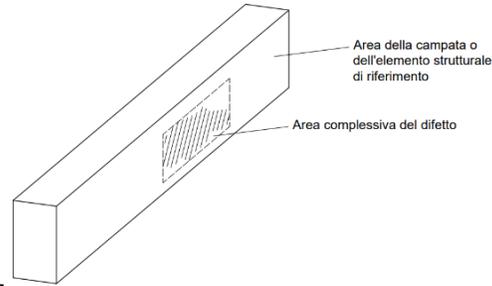
Ex: "Difettosità relativa" D_R
 $G \times k_1 \times k_2$

Difetto con **sviluppo lineare**
(fessure, lesioni, difetti in
corrispondenza dei giunti,
inflexione di una trave...)



$$k_1 = \frac{\text{lunghezza complessiva del difetto}}{\text{lunghezza della campata o della sezione di riferimento}}$$

Difetto con **sviluppo areale**
(deterioramenti, distacchi,
etc.)

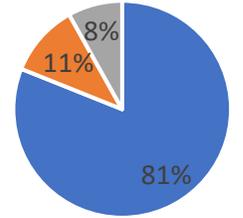


$$k_1 = \frac{\text{area complessiva del difetto}}{\text{area della campata o dell'elemento strutturale di riferimento}}$$

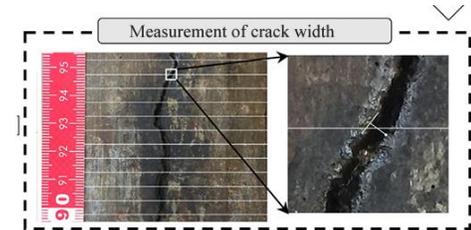
**RACCOLTA ORGANIZZATA DEI DATI SU
ESTENSIONE E POSIZIONE DEL
DEGRADO E CORRELAZIONE FRA
CORROSIONE E QUADRO FESSURATIVO**

14/15	Travi/traversi	Estensione K_1		
		G	Sviluppo lineare	Sviluppo areale
c.a./c.a.p._1	Macchie di umidità passiva	1		X
c.a./c.a.p._2	Macchie di umidità attiva	3		X
Dif. Gen_1	Tracce di scolo	3		
c.a./c.a.p._3	Cis dilavato/ammalorato	3		X
c.a./c.a.p._21	Cis dilavato/ammalorato testate	4	-	-
Dif. Gen_2	Ristagni d'acqua	2		X
Dif. Gen_5	Ristagni d'acqua nei cassoni	4		X
c.a./c.a.p._4	Vespai	2		X
c.a./c.a.p._5	Distacco del copriferro	2		X
c.a./c.a.p._6	Armatura ossidata/corrosa	5		X
c.a./c.a.p._15	Lesioni in corrispondenza staffe	2	X	
c.a.p._1	Lesioni capillari agli ancoraggi	1		X
c.a.p._2	Testate di ancoraggio non sigillate	2	-	-
c.a.p._3	Distacco tamponi testate	1	-	-
c.a.p._4	Lesioni su anima lungo i cavi	2		X
c.a.p._5	Lesioni lungo suola del bulbo	2		X
c.a.p._6	Guaine in vista	2		X
c.a.p._7	Guaine degradate e fili ossidati	4		X
c.a.p._8	Fili aderenti in vista ossidati	4		X
c.a./c.a.p._10	Fessure diagonali	5	X	
c.a./c.a.p._19	Fessure trasversali	5	X	
c.a./c.a.p._16	Staffe scoperte/ossidate	3		X
c.a./c.a.p._23	Rottura staffe	4		X
c.a.p._9	Riduzione armatura di precompressi	5		X
c.a.p._10	Umidità dall'interno	2		X
c.a.p._11	Armatura scoperta/ossidata testate	2		X
c.a.p._12	Fuoriuscita barre ancoraggio	5		X

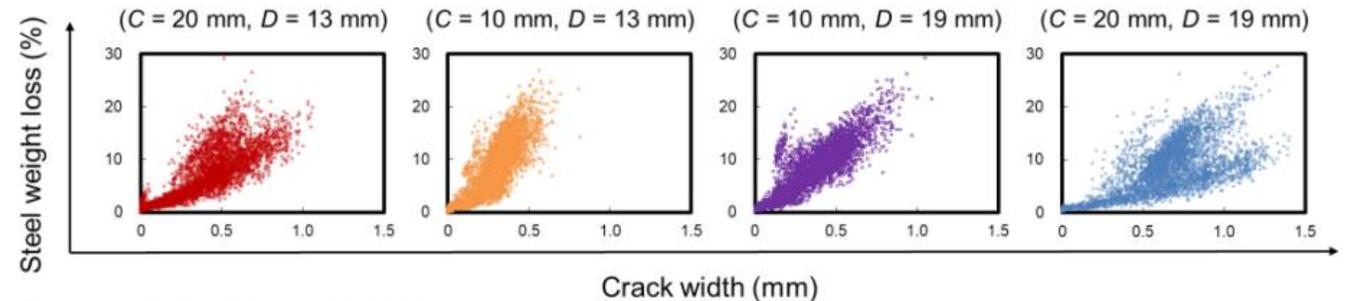
Ex: c.a./c.a.p. 6 Armatura
ossidata/corrosa: estensione K_1



■ 0,2 ■ 0,5 ■ 1



Zhang M., Song H., Lim S., Akiyama M., Frangopol D.M. 2019.



Frangopol D.M., Akiyama M., 2023

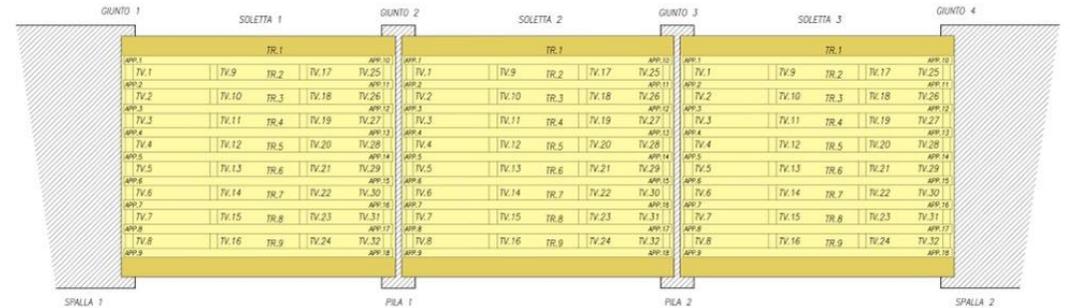
SOLETTE



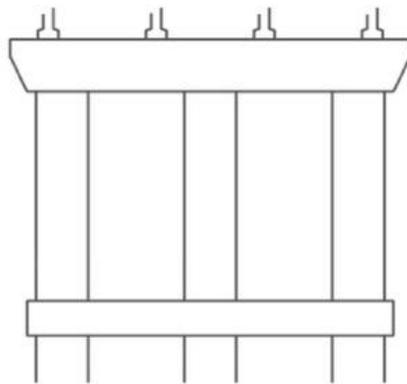
Le LLGG non prevedono schede specifiche per le parti a sbalzo delle solette



- Gli sbalzi, spesso ammalorati, tendono a peggiorare il giudizio sull'intera soletta pur rappresentandone una parte modesta
- Uno sbalzo completamente degradato viene schedato con estensione ridotta in ragione del rapporto areale fra sbalzo e soletta



PILE

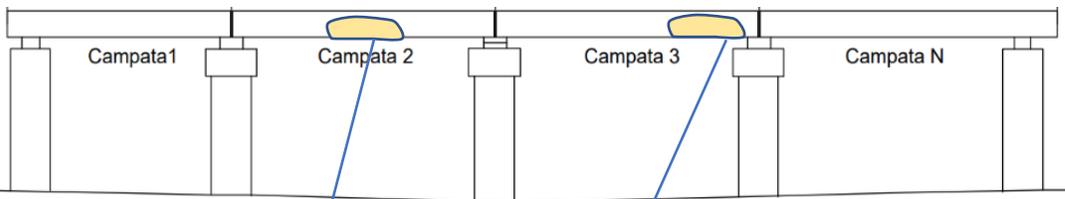


Le LLGG non prevedono schede specifiche per i pulvini, che sono considerati unitamente alla pila

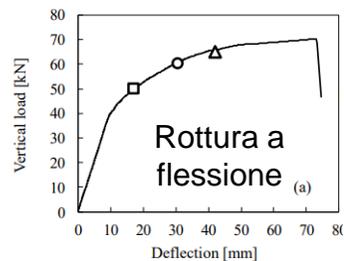


- Difetti marcati e diffusi sui pulvini, venendo distribuiti sull'area complessiva di pila e pulvino, possono risultare di estensione bassa.
- Il comportamento strutturale dei pulvini risulta molto diverso da quello della pila e di conseguenza il ruolo del difetto può essere diverso

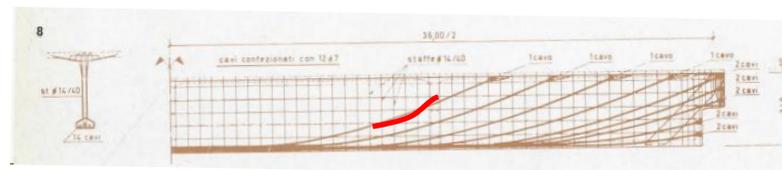
LA LOCALIZZAZIONE DEL DIFETTO



Trave non corrosa



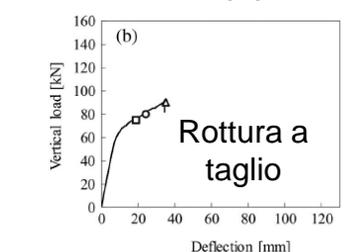
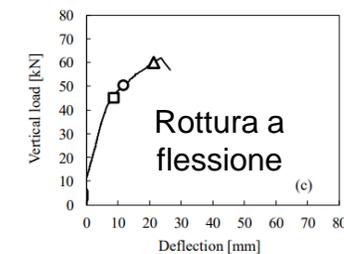
IL RUOLO FONDAMENTALE DELLA CONOSCENZA



La mancanza di documentazione tecnica (relativa a progetto, esecuzione, successivi interventi, ecc.) rende più incerto il giudizio. Da approfondire la ricerca documentaria e indagini conoscitive, rilievo in situ, ecc.

Per livelli di difettosità alto e medio-alto devono intendersi quei difetti che possono pregiudicare la sicurezza o la funzionalità di una campata o dell'opera. La compromissione della statica dell'opera si segnala nelle schede di rilievo all'Allegato B tramite la casella PS - "Pregiudica la statica"

14		Travi/Traversi N ____ Strada di appartenenza: _____ Progressiva km: _____		C.a. Tecnico rilevatore: _____		Data ispezione: ____/____/____		Mims Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibile							
N°	Descrizione difetto	visio	G	Estensione K1			Intensità K2			N° foto	PS	NA	NR	NP	Note
				0,2	0,5	1	0,2	0,5	1						
c.a./c.a.p._1	Macchie di umidità passiva	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p._2	Macchie di umidità attiva	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dif. Gen_1	Tracce di scolo	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p._3	Clis dilavato / ammalorato	<input type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p._21	Clis dilavato / ammalorato Testate	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dif. Gen_2	Ristagni d'acqua	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dif. Gen_5	Ristagni d'acqua nei cassoni	<input type="checkbox"/>	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p._4	Vespai	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p._5	Distacco del copriferro	<input type="checkbox"/>	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
c.a./c.a.p._6	Armatura ossidata/corrosa	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

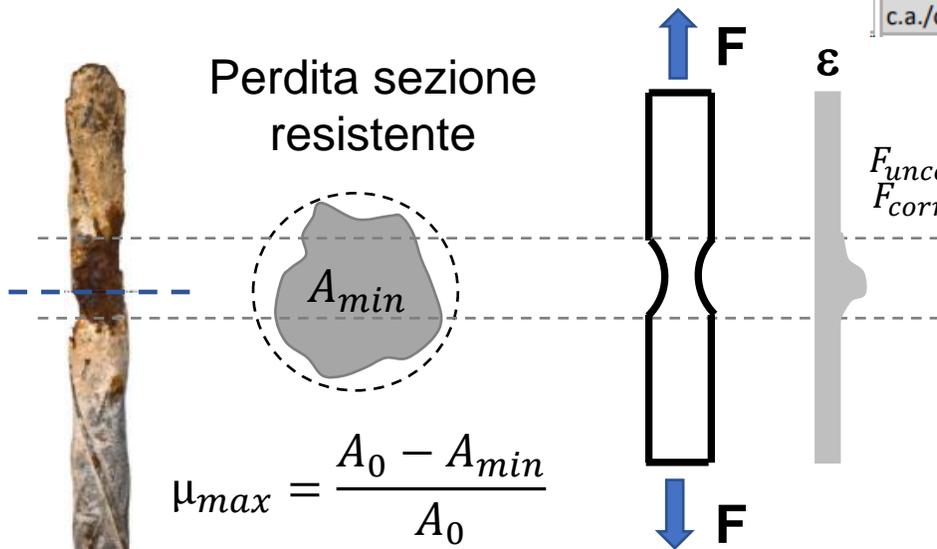


INTENSITA' K₂: ALCUNE OSSERVAZIONI

Ex: Effetto del degrado sul comportamento a trazione

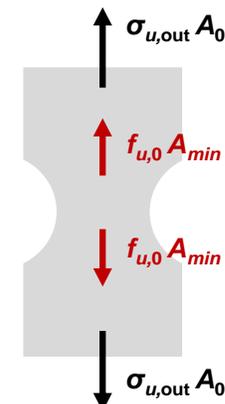
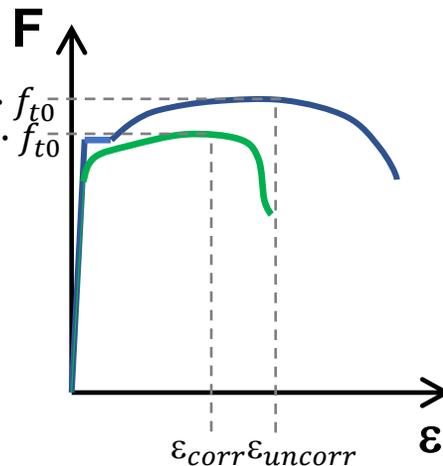
Scheda Ispezione Ponti di Livello 1

14	Travi/Traversi	N _____	Strada di appartenenza: _____	Progressiva km: _____							
	C.a.	Tecnico rilevatore: _____		Data ispezione: _____							
N°	Descrizione difetto	visto	G	Estensione K ₁			Intensità K ₂			N° foto	PS
				0,2	0,5	1	0,2	0,5	1		
c.a./c.a.p._6	Armatura ossidata/corrosiva	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>



$$\mu_{max} = \frac{A_0 - A_{min}}{A_0}$$

$$\frac{F_{uncorr}}{F_{corr}} = \frac{A_0 \cdot f_{t0}}{A_{min} \cdot f_{t0}}$$

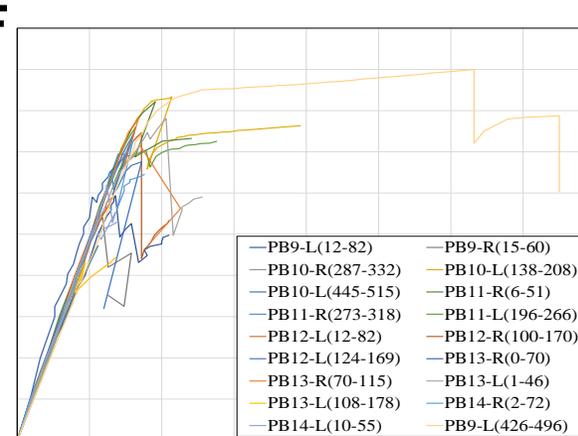
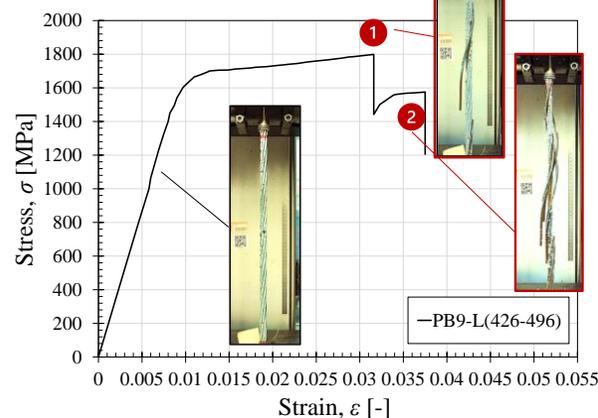
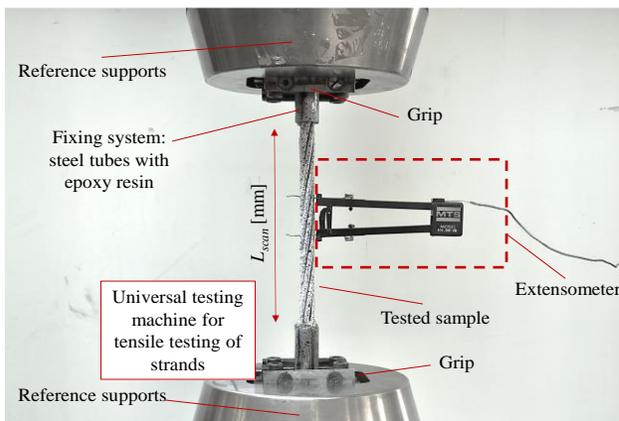
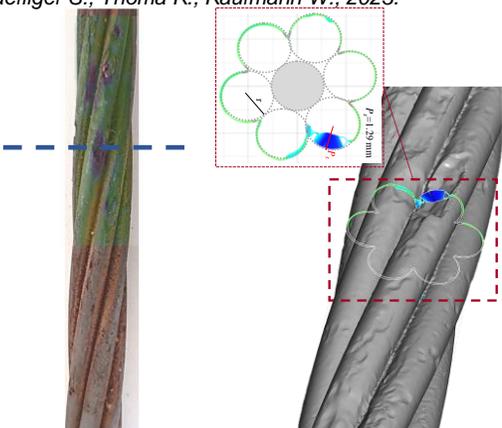


$$\mu_{crit} = 1 - \frac{f_{y0}}{f_{t0}}$$

$\mu > \mu_{crit}$

Rottura in campo elastico

Haefliger S., Thoma K., Kaufmann W., 2023.



LE ISPEZIONI SPECIALI

ISPEZIONI ORDINARIE

ISPEZIONI STRAORDINARIE



**OGNI DATO E' IMPORTANTE
E NON VA DISPERSO
ANALIZZARE I DATI
RACCOLTI CI PERMETTE DI
RIDURRE LE INCERTEZZE
ANCHE DELLE INDAGINI
VISIVE!**

- indagini pacometriche, indagini Georadar, tomografie ultrasoniche o tecniche di Impact-Echo,
- metodi elettrochimici, ex misura del potenziale di corrosione che consente di stimare la velocità di corrosione delle armature,
- indagini endoscopiche e prove vacuometriche,
- saggi localmente distruttivi, con rimozione del calcestruzzo e della guaina
- esame dello stato dei fili
- prelievo di campioni del materiale di iniezione
- prove chimiche per determinarne composizione e presenza di umidità e cloruri
- Ispezione testate di ancoraggio dei cavi
- ecc.



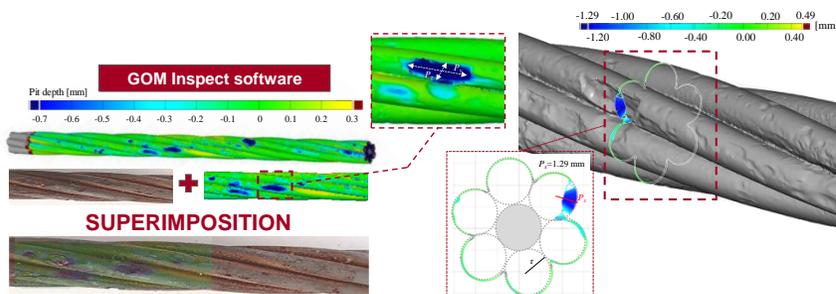
Chloride ingress in a beam with bending cracks



Chloride ingress due to diffusion through the concrete cover in a beam without bending cracks

Courtesy by Joost Walraven

3D SCANNING



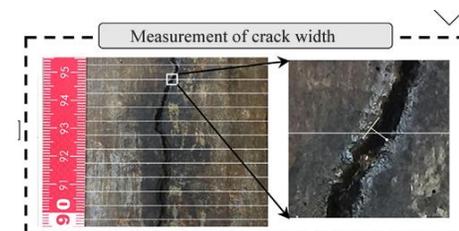
METODI GRAVIMETRICI



CONTENUTO DI CLORURI



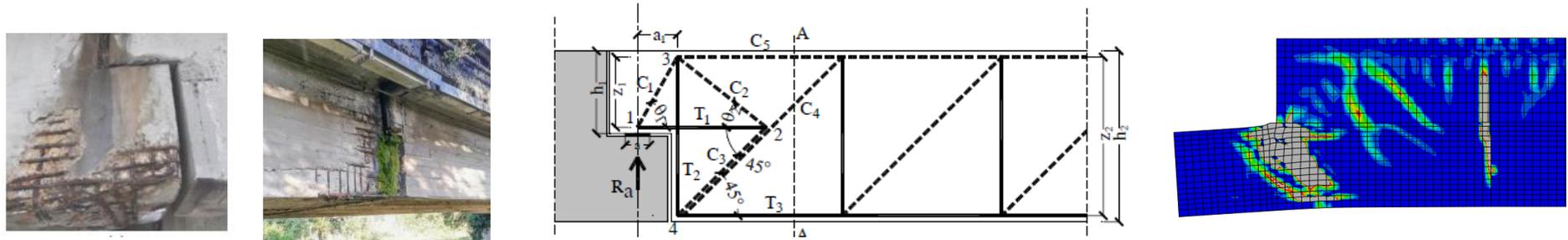
APERTURE DI FESSURA



LIVELLO IV

Valutazioni accurate sulla base di quanto indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti.

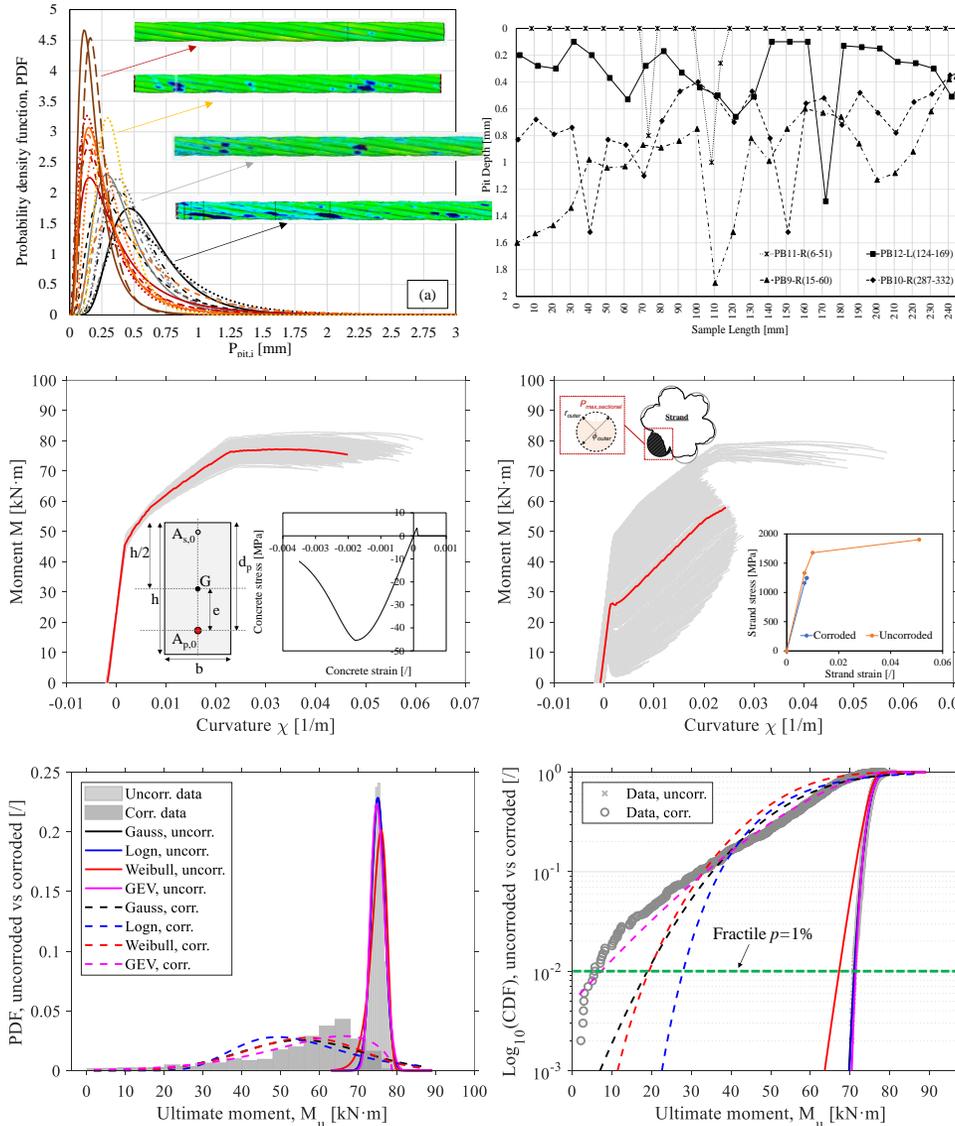
- ✓ La normativa non fornisce indicazioni precise in merito alla verifica delle strutture soggette a degrado indotto dalla corrosione. Esistono documenti pre-normativi, quali il Model Code 2020 che propongono alcuni approcci per la verifica delle strutture corrose.
- ✓ Le normative propongono approcci per la valutazione della capacità degli elementi strutturali la cui affidabilità è stata verificata tramite prove di laboratorio su elementi non corrosi. Da approfondire la possibilità di una diretta applicazione di questi modelli agli elementi corrosi (ex. modelli strut & tie, modelli a traliccio equivalente, ecc.)



- ✓ I modelli che regolano il comportamento delle armature e dell'aderenza acciaio-calcestruzzo in caso di corrosione devono dipendere da parametri di input (ex mass loss, section loss, pit depth, ecc.) correlabili alle grandezze misurabili in situ e essere opportunamente validati.
- ✓ La calibrazione di modelli numerico/analitici (ex. NLFEM) tramite confronto dei risultati numerici con prove di laboratorio o misure in situ è fondamentale per disporre di strumenti affidabili e capaci di valutare la dipendenza della risposta strutturale dal livello di difettosità.
- ✓ La calibrazione di tali modelli numerico/analitici permette di migliorare la definizione di soglie di attenzione e di allarme per il monitoraggio strutturale e di utilizzare i modelli predittivi per definire le priorità di intervento.

SICUREZZA

EX: ANALISI MONTECARLO



LIVELLO IV

Valutazioni accurate sulla base di quanto indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti.

STIMA RESISTENZE DI PROGETTO

$$f_d = \min \left(\frac{f_m}{FC \cdot \gamma_M}; \frac{f_k}{FC} \right)$$

6.2.3 LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

Naturalmente quanto detto vale laddove si sia verificato che l'acciaio non abbia chiari segni di corrosione, nel qual caso la variabilità del risultato che si ottiene dalle prove può essere elevata, ma non a causa della variabilità delle caratteristiche meccaniche

EX: STIMA DI COEFFICIENTI PARZIALI PER TREFOLI CORROSI (approccio Model Code 2020)

$$f_{pu,corr,des} = \frac{f_{pu,corr,an}}{\gamma_{m,corr}}$$

$$\gamma_{m,corr} = \frac{\exp(-1.645V_s)}{\mu_{mod} \mu_a \mu_{9R} \cdot \exp \left(-\alpha \beta_{target} \sqrt{V_{mod}^2 + V_a^2 + V_s^2 + V_{9R}^2} \right)}$$

Franceschini L., Botte W., Caspele R., Belletti B., Tondolo F. & Sanchez J. 2023.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Haefliger S., Thoma K., Kaufmann W. 2023. Influence of a triaxial stress state on the load-deformation behaviour of axisymmetrically corroded reinforcing bars. *Construction and Building Materials* 407, 132737
- [2] Franceschini L., Vecchi F., Tondolo F., Belletti B., and Montero J.S. 2022. Mechanical Behaviour of Corroded Strands under Chloride Attack: A New Constitutive Law. *Construction and Building Materials*, 316.
- [3] Vecchi F., Franceschini L., Tondolo F., Belletti B., Montero J.S., Minetola P. 2021. Corrosion Morphology of Prestressing Steel Strands in Naturally Corroded PC Beams. *Construction and Building Materials* 296, 16 August 2021, 123720
- [4] Frangopol D.M., Akiyama M. 2023. Life-cycle performance assessment of corroded RC structures using machine learning, experimental evidence, probabilistic analysis and finite element method. *Proceedings of CACRCS DAYS 2023, 13-15 Sept. 2023, Parma, Italy: 263-266*
- [5] Zhang M., Song H., Lim S., Akiyama M., Frangopol D.M. 2019. Reliability estimation of corroded RC structures based on spatial variability using experimental evidence, probabilistic analysis and finite element method. *Engineering Structures* 192: 30-52
- [6] *Proceedings of the fib CACRCS DAYS 2020 - Capacity Assessment of Corroded Structures, 1-4 December 2020*
- [7] *Proceedings of the fib CACRCS DAYS 2021 - Capacity Assessment of Corroded Structures, 30 November-3 December 2021*
- [8] *Proceedings of CACRCS DAYS 2023: Capacity Assessment of Corroded Reinforced Concrete Structures, 13th – 15th September 2023, Parma, Italy*
- [9] CEB bulletin N° 183. *Durable concrete Structures*. Thomas Telford Ed., 1992
- [10] CONTECVET IN30902I, 2001. A validated user's manual for assessing the residual life of concrete structures, DG Enterprise, CEC, available on-line: www.ietcc.csic.es or www.geocisa.es.
- [11] fib Bulletin 34. *Model Code for Service Life Design*. 2006
- [12] fib Bulletin 44. *Concrete structure management: Guide to ownership and good practice*. 2008
- [13] fib Bulletin 49. *Corrosion protection of reinforcing steels*. 2009
- [14] fib Bulletin 59. *Condition control and assessment of reinforced concrete structures exposed to corrosive environments (carbonation/chlorides)*. 2001
- [15] Walraven J., Blagojevic A. *The role of crack width on the service life of concrete structures*. The New Zealand Concrete Industry. Auckland, 6-8 2016
- [16] Franceschini L., Botte W., Caspeele R., Belletti B., Tondolo F. & Sanchez J. 2023. Partial safety factor for the design strength prediction of naturally corroded prestressing strands. *Proceedings of the 14th International Conference on Application of Statistics and Probability in civil engineering (ICASP14), 9th – 13th July 2023, Dublin, Ireland*.
- [17] Ravasini S., Franceschini L. & Belletti B. 2023. Simplified analytical method for moment-curvature response of corroded prestressed concrete beams. *Proceedings of the 8th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCEE2023), 11th – 15th July 2023, Milan, Italy*
- [18] Charis Alk. Apostolopoulos, Konstantinos F. Koulouris, and Alkiviadis Ch. Apostolopoulos, 2019. *Correlation of Surface Cracks of Concrete due to Corrosion and Bond Strength (between Steel Bar and Concrete)*, Hindawi publishing corporation.

RINGRAZIAMENTI



Vincenzo De Lillo

Maringlen Kalemi

Ruggero Macaluso

Federico Pagliari

Simone Ravasini

Simone Sandrini

RINGRAZIO RELUIS, I COLLEGGI COINVOLTI NEL PROGETTO, GLI STUDENTI E LAUREATI CHE HANNO BENEFICIATO E BENEFICIANO DELLE BORSE DI STUDIO E ASSEGNI DI RICERCA ASSEGNATI DA RELUIS

