

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

**Attività di formazione per i tecnici degli Enti Locali**

## **Modulo II - Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti**

coordinatori Proff. Edoardo Cosenza e Mauro Dolce

**Napoli  
16 settembre 2024**

### **Lezione 2**

## **Il rischio sismico dei ponti esistenti: aspetti applicativi**

**Maria Rosaria Pecce  
Ordinario di Tecnica delle Costruzioni  
Università di Napoli Federico II**

Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

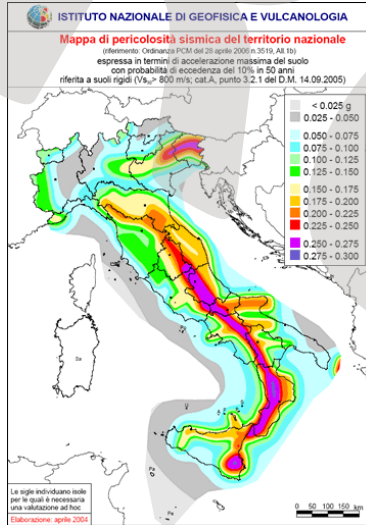
**Le linee guida per i ponti esistenti**

# Introduzione al rischio

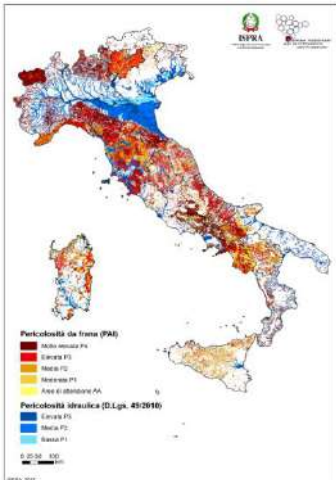
## Pericolosità

Dipende dall'azione e quindi dal contesto in cui è collocata l'opera

Pericolosità sismica



Mappe pericolosità idraulica e frane



## Vulnerabilità

Debolezze della struttura nei confronti del tipo di azione

La vulnerabilità è una caratteristica intrinseca della struttura che dipende dallo schema statico, dai materiali e dalla condizione di conservazione



## Esposizione

Conseguenze dovute alla crisi della struttura in seguito all'azione: numero di vittime, costo dei danni. Dipende dalla destinazione d'uso e dall'importanza della costruzione durante il suo esercizio.

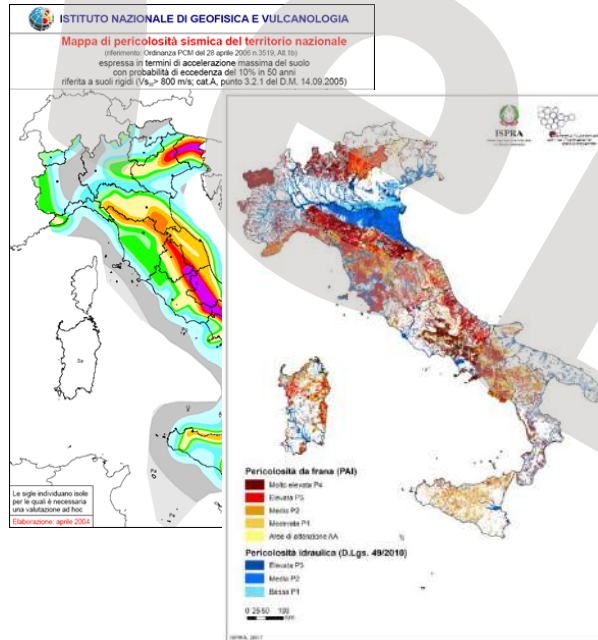


Tornando alla gestione delle strutture esistenti

Se le strutture di interesse sono tante e distribuite...



...le azioni a cui sono soggette variano significativamente da un sito all'altro...



...le conseguenze di eventuali danni variano da struttura a struttura...

Classe di conseguenza	Descrizione
CC3	Conseguenze elevate per la perdita di vite umane, o economica, sociale o conseguenze ambientali molto grandi
CC2	Conseguenze medie per la perdita di vite umane, o economica, sociale o conseguenze ambientali considerevoli
CC1	Conseguenze basse per la perdita di vite umane, o economica, sociale o conseguenze ambientali piccole o trascurabili

(EC0)

... i soldi e il tempo a disposizione sono limitati...

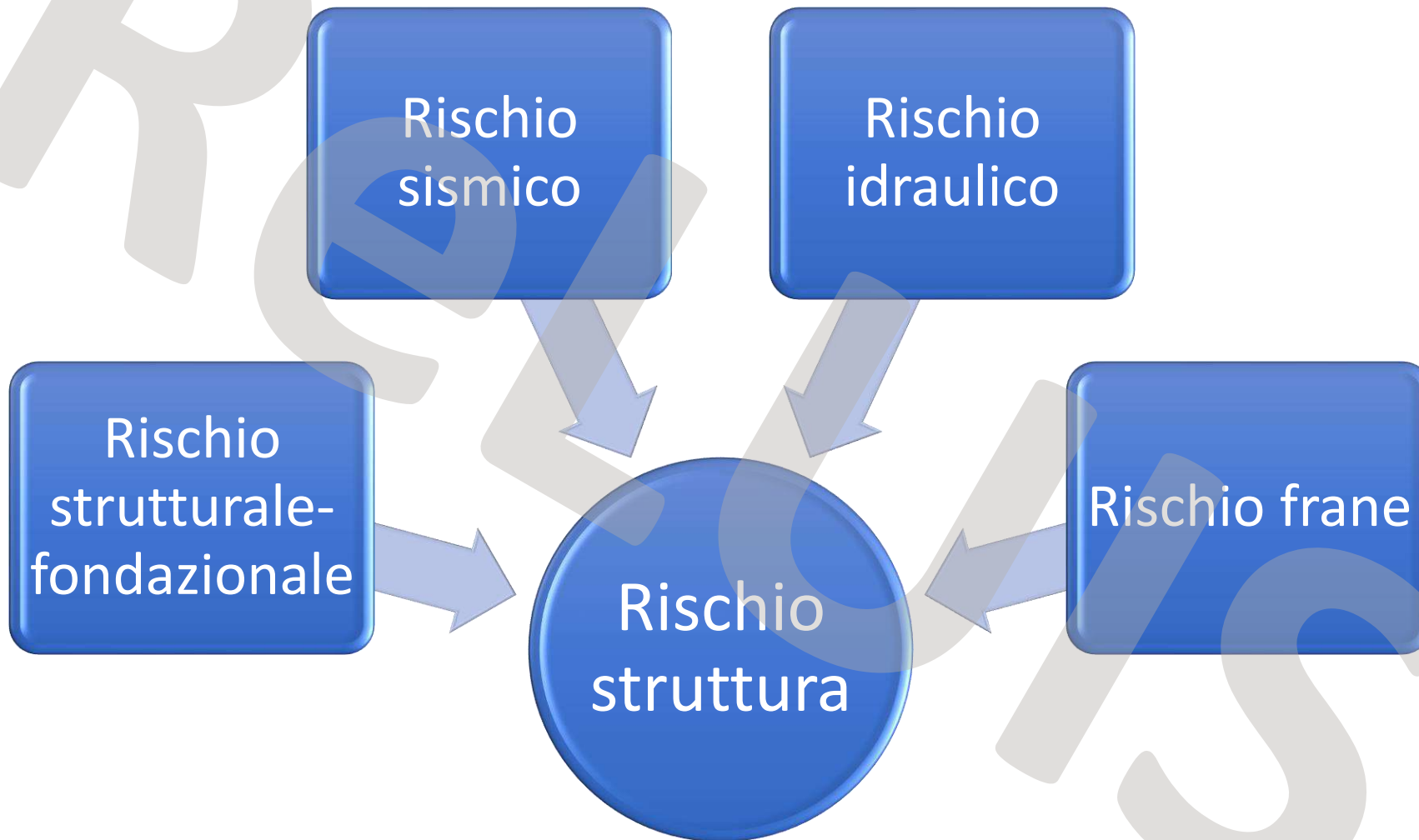


... gestire la sicurezza vuol dire ottimizzare tra affidabilità strutturale e economia. È quindi essenziale definire una **priorità di intervento**

L'approccio scientificamente più rigoroso consiste nel **calcolare il rischio** di ogni struttura e **intervenire prima su quelle a rischio più alto.**

# Linee guida per ponti esistenti

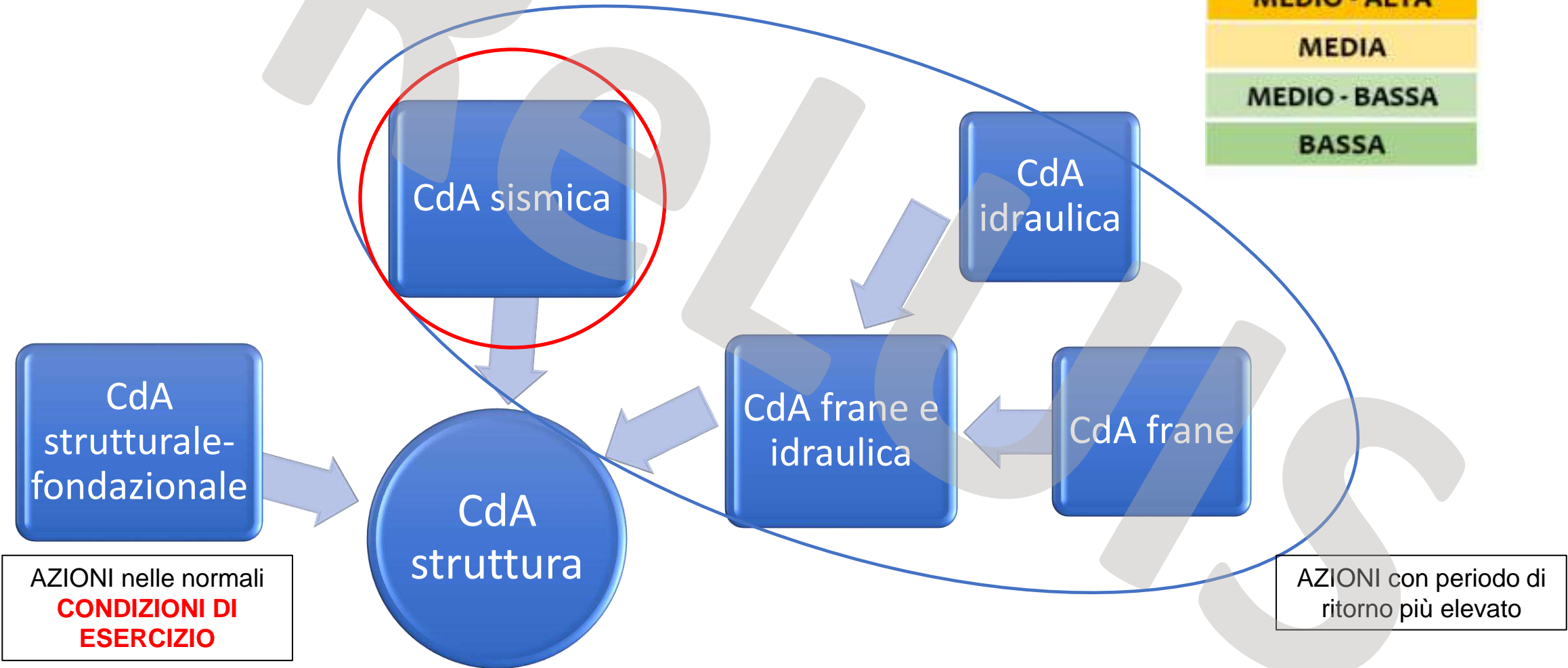
L'approccio seguito è multi-rischio...



*(Livello 2)*

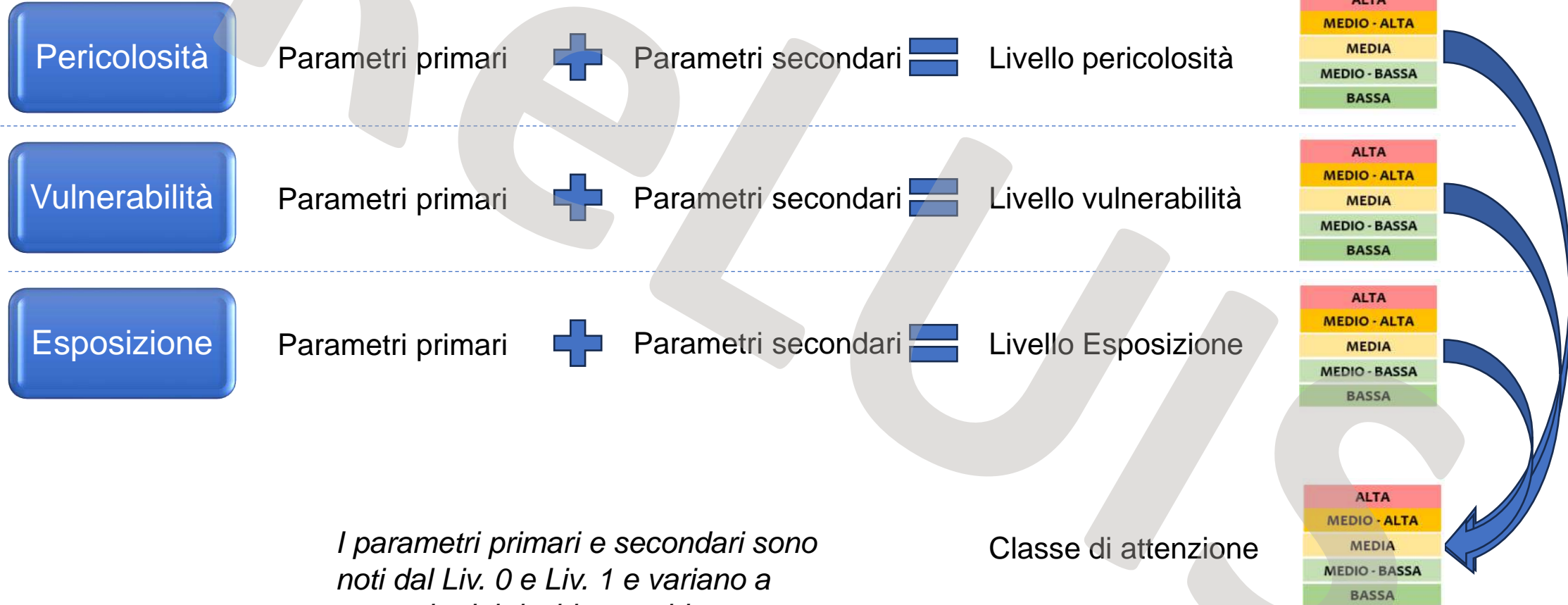
## Livello 2

Il rischio dell'opera viene stimato tramite la *Classe di Attenzione* (CdA)



## Livello 2

Per ciascun rischio, la CdA viene identificata applicando lo stesso processo logico



*I parametri primari e secondari sono noti dal Liv. 0 e Liv. 1 e variano a seconda del rischio considerato*

Classe di attenzione

# Linee guida per ponti esistenti

- **Livello 0:** è richiesto il **censimento** dalle informazioni rilevanti sul ponte.

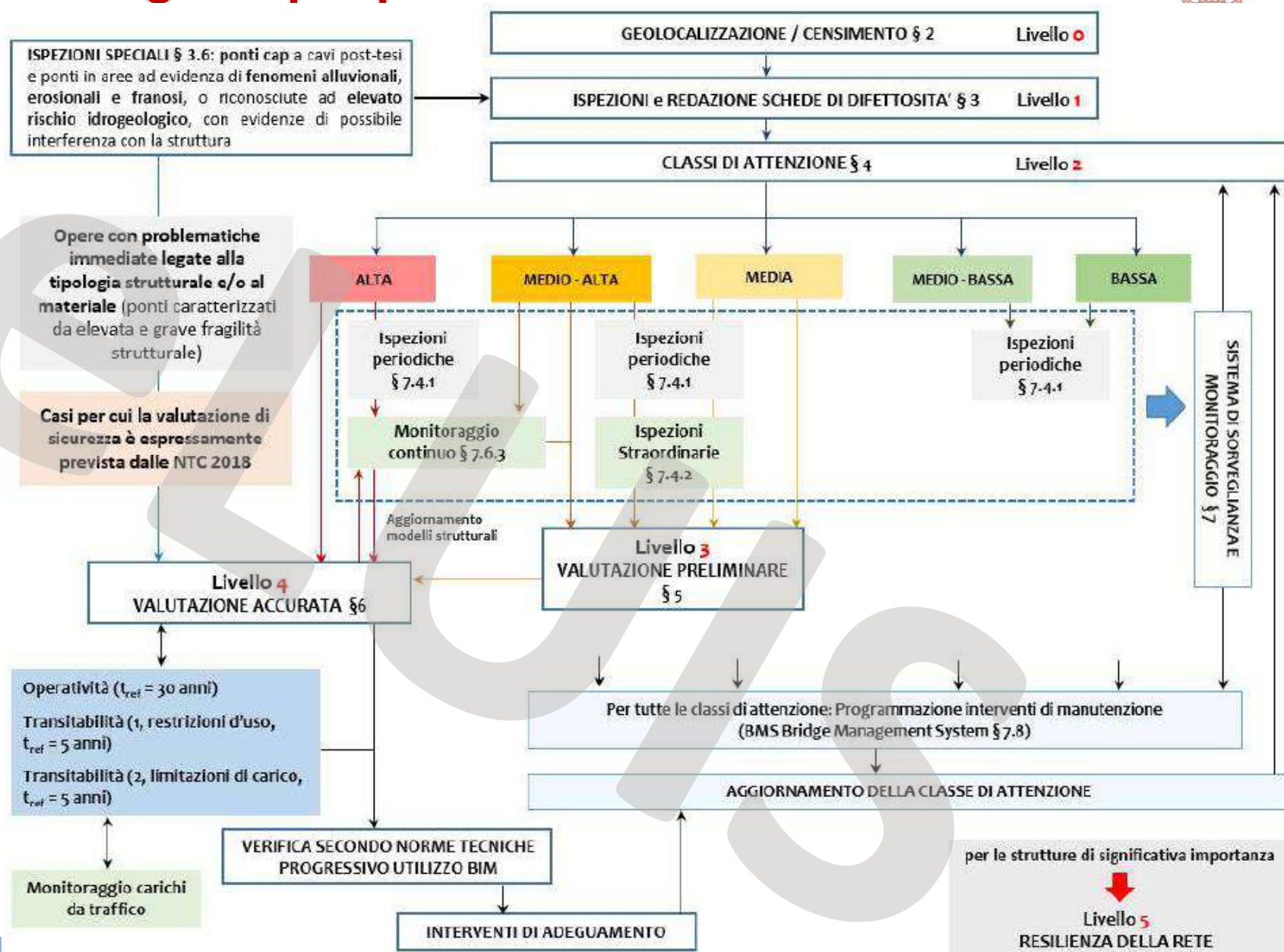
- **Livello 1:** sono condotte **ispezioni visive e rilievi** per individuare eventuali danni e compilare un rapporto di ispezione.

- **Livello 2:** la combinazione di dati relativi a pericolosità, vulnerabilità ed esposizione fornisce una valutazione semplificata della classe di attenzione del ponte, tenendo conto di più rischi.

- **Livello 3:** si applica in caso di classe di attenzione Medio e Medio-Alto: viene effettuata una **valutazione preliminare** della sicurezza strutturale.

- **Livello 4:** si applica in caso di classe di attenzione Alta o verifica di Livello 3 non soddisfatta: viene eseguita una verifica accurata di sicurezza secondo le NTC.

- Il **Livello 5** richiede uno studio specifico per la resilienza delle reti di ponti che non è trattato nell'attuale versione delle Linee Guida.

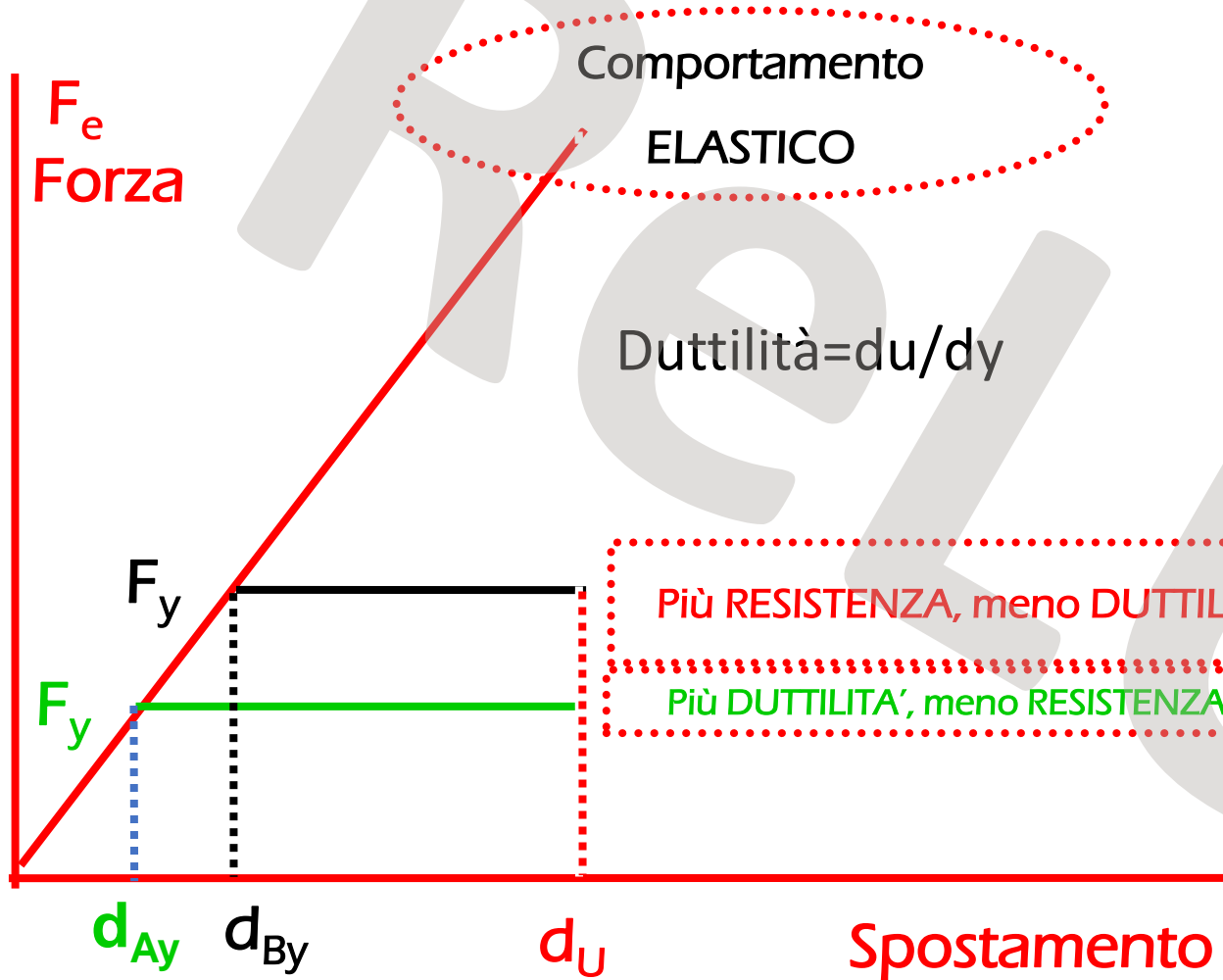


Le linee guida per i ponti esistenti

Per comprendere quali caratteristiche della struttura (schema statico, materiale, appoggi, geometria delle pile e dell'impalcato) influenzano la vulnerabilità sismica e quali difetti incidono rispetto alla vulnerabilità per carichi verticali si devono introdurre alcuni concetti di ingegneria sismica generali:

- ✓ richiamare alcuni principi sulle prestazioni sismiche delle strutture
- ✓ analizzare il comportamento degli elementi che costituiscono un ponte in presenza di azioni sismiche
- ✓ analizzare i danni post-sisma
- ✓ considerare alcuni concetti alla base della progettazione sismica
- ✓ Rivedere le indicazioni delle linee guida





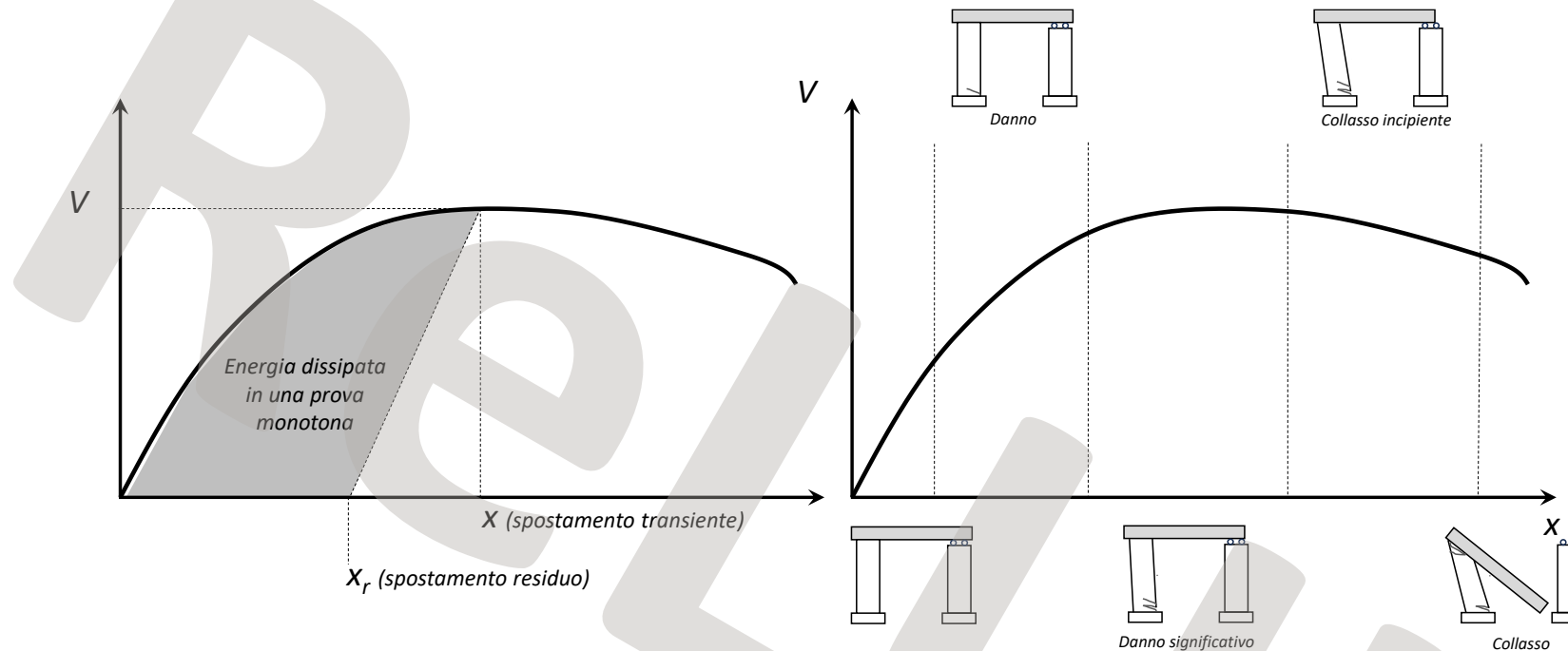
## Strutture dissipative e non dissipative

Ponti dissipativi:

- Ponti a travata con schema isostatico con pile dotate di duttilità
- schema iperstatico con parti dissipative
- ponti con impalcato collegato con dissipatori

-Ponti non dissipativi:

- Ponti a travata con schema isostatico e pile non duttili
- ponti ad arco isostatici
- ponti iperstatici senza zone dissipative
- Ponti con impalcato appoggiato su isolatori



Prestazioni da non violare per la costruzione soggetta al terremoto di progetto

Frequenza del terremoto di progetto al sito di costruzione	Operatività	Danno riparabile	Danno non riparabile	Collasso incipiente	
	Frequente (e.g., periodo di ritorno 30 anni)	●	✘	✘	✘
	Occasionale (e.g., periodo di ritorno 50 anni)	■	●	✘	✘
	Raro (e.g., periodo di ritorno 475 anni)	▲	■	●	✘
	Molto raro (e.g., periodo di ritorno 975 anni)		▲	■	●

Obiettivi ammissibili per costruzioni: ● ordinarie, ■ strategiche, ▲ critiche.

✘ Obiettivi inammissibili (irrazionali).

Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, Iunio Iervolino, Ed. Hoepli. Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021

# Progettazione sismica di ponti dissipativi

## Criteria

Il meccanismo dissipativo alla SLU riguarda solo le pile  
Diffusione della plasticizzazione nel maggior numero di elementi:  
ridistribuzione della domanda di non linearità e ridondanza

La dissipazione deve avvenire solo con meccanismi flessionali escludendo la rottura a taglio

Comportamento elastico dell'impalcato, dei vincoli, delle spalle e della fondazione

Capacity Design (gerarchia delle resistenze)

I cinematici devono essere controllati per evitare martellamenti (ad esempio delle campate giuntate) e la caduta dagli appoggi

# Schema strutturale dei ponti

## Classificazione in base allo schema statico

A travata  
(*struttura principale prevalentemente inflessa*)



Ad arco  
(*struttura ad asse curvilineo prevalentemente compressa*)



A telaio  
(*impalcato e piedritti sono in continuità*)



Sospesi  
(*l'impalcato è sostenuto da un cavo curvilineo*)



La risposta sismica può essere molto diversa in base allo schema statico e la vulnerabilità sismica dipende soprattutto dagli elementi in grado di trasferire le azioni orizzontali. Nel caso di campate molto lunghe può essere importante l'azione sismica verticale

Strallati  
(*l'impalcato è sostenuto da cavi rettilinei*)



# Materiali strutturali dei ponti

## Classificazione in base al materiale costruttivo

Cemento armato



Cemento armato precompresso



Muratura



Acciaio



Acciaio - calcestruzzo



Legno

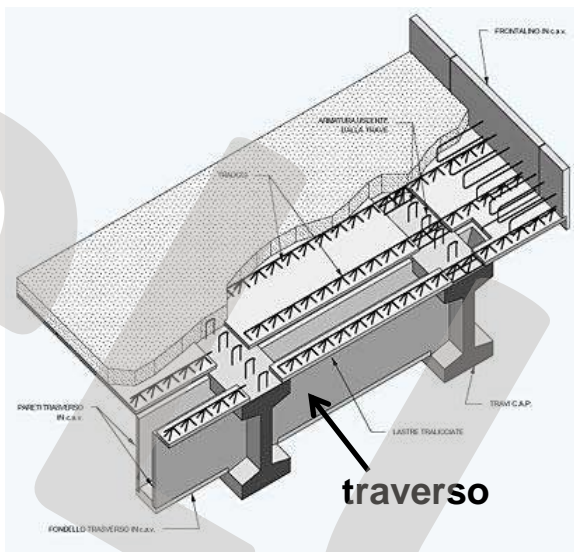
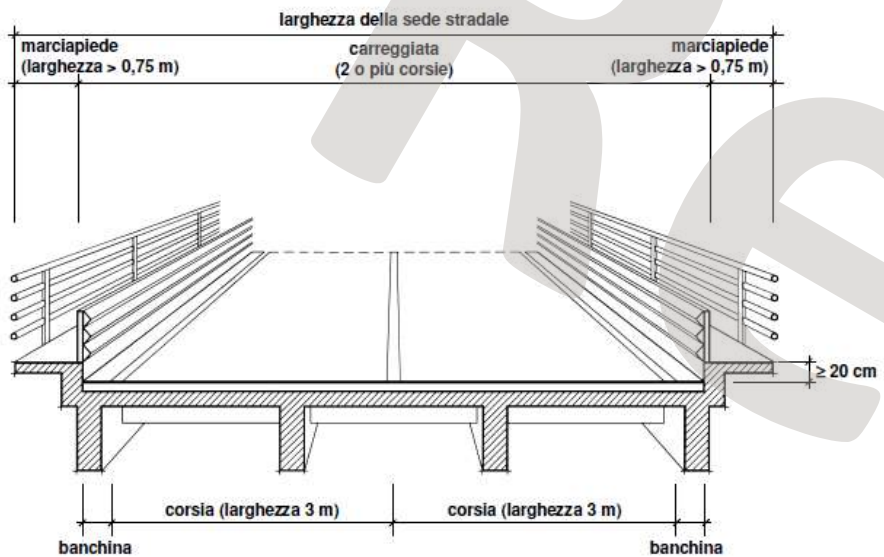


Il materiale può essere importante in termini di resistenza ma anche di duttilità e quindi capacità di dissipare energia. Ma si deve analizzare il materiale insieme con lo schema statico.

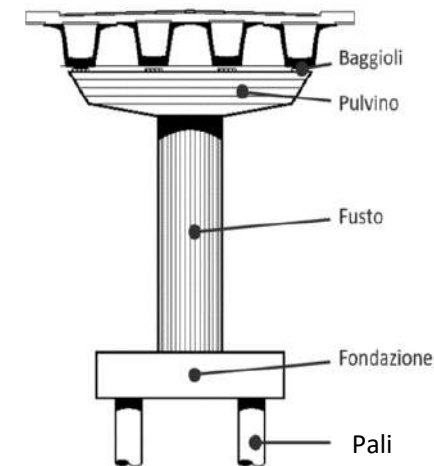
Se l'impalcato in acciaio è semplicemente appoggiato su pile in c.a. il ruolo principale è quello del c.a. ma l'impalcato è generalmente più leggero e quindi è minore la massa sismica

## Identificazione dei principali componenti

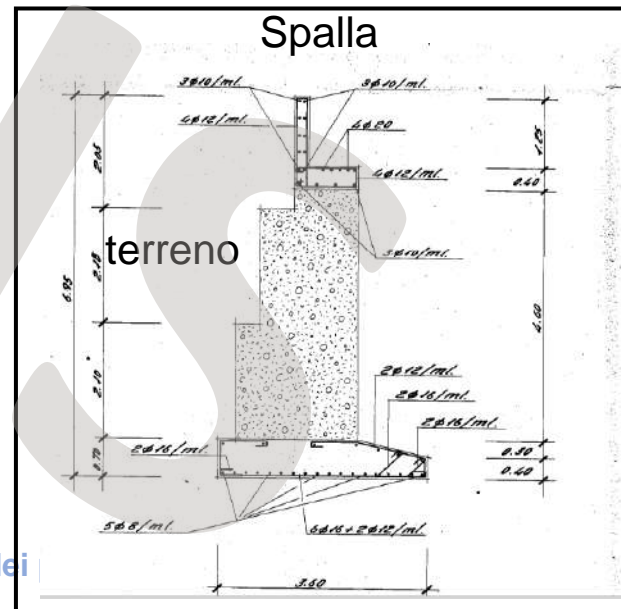
L'impalcato di un ponte a travata è costituito da: travi, soletta, traversi



### Pila



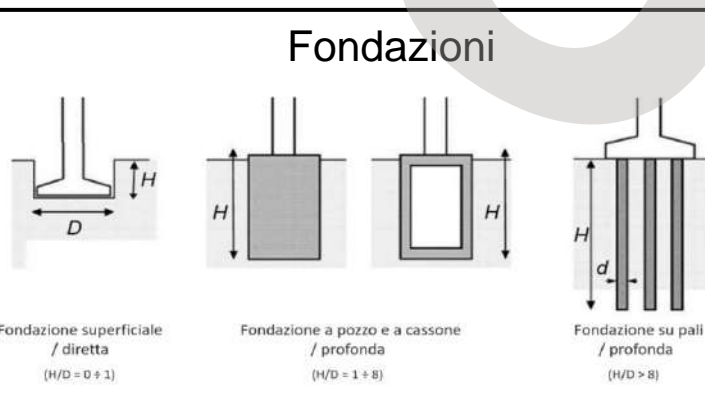
### Spalla



### Spartitraffico fisso



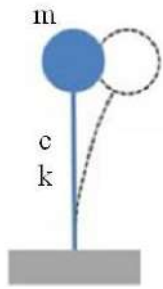
### Spartitraffico mobile



II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei

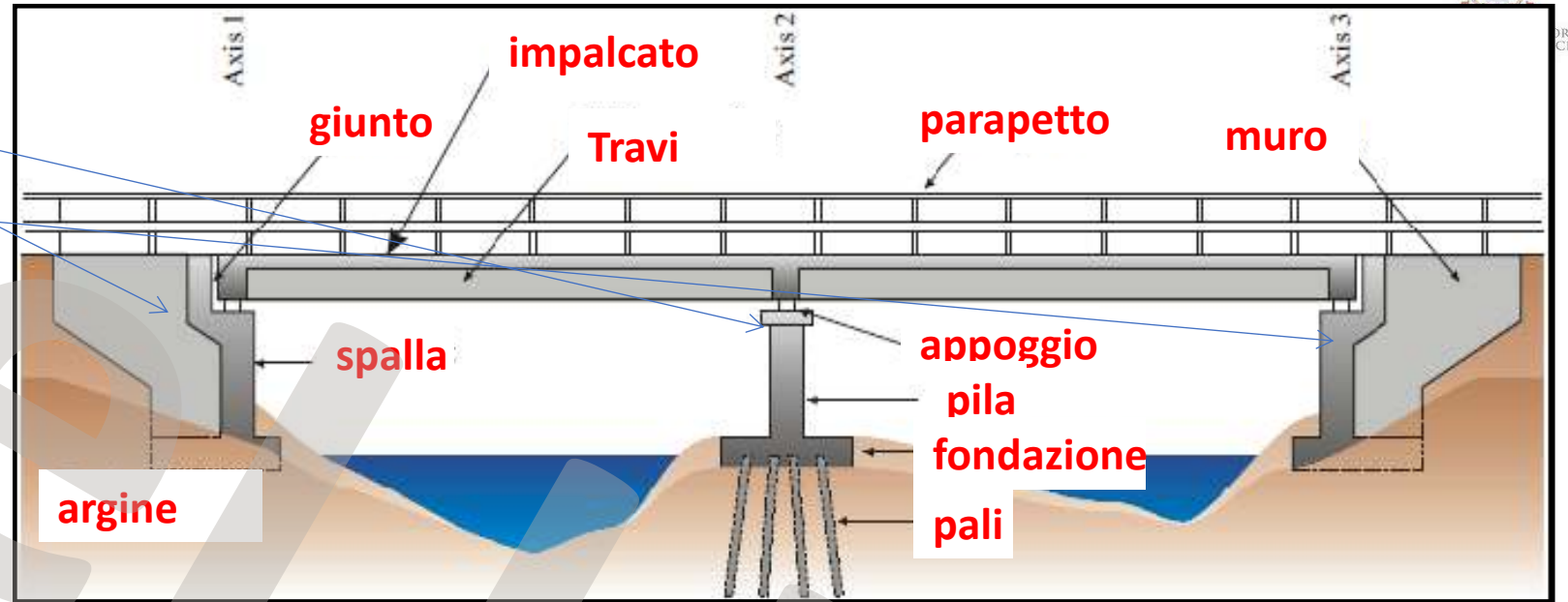
Le linee guida per i ponti esistenti

# Risposta sismica di ponti a travata : possono essere schematizzati come oscillatori semplici

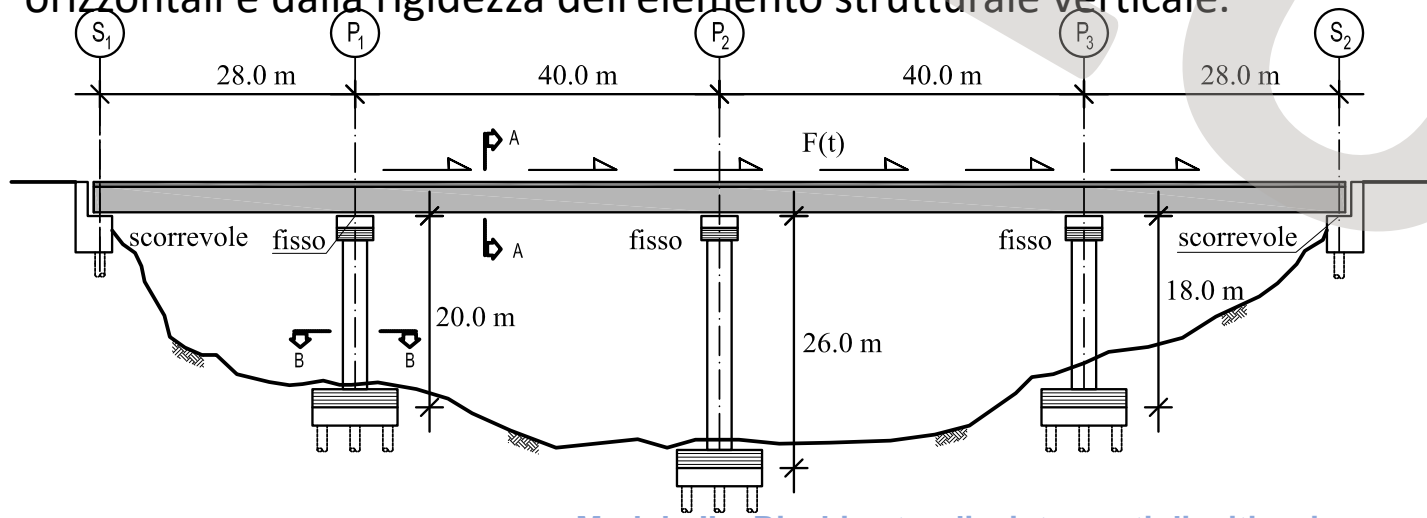


$$m \ddot{v}(t) + c \dot{v}(t) + k v(t) = -m \ddot{v}_g(t)$$

La massa dell'impalcato è molto grande rispetto a quella della pila



La massa è rappresentata dal peso dell'impalcato ma la risposta dipende dalla capacità del vincolo di trasferire le azioni orizzontali e dalla rigidità dell'elemento strutturale verticale.



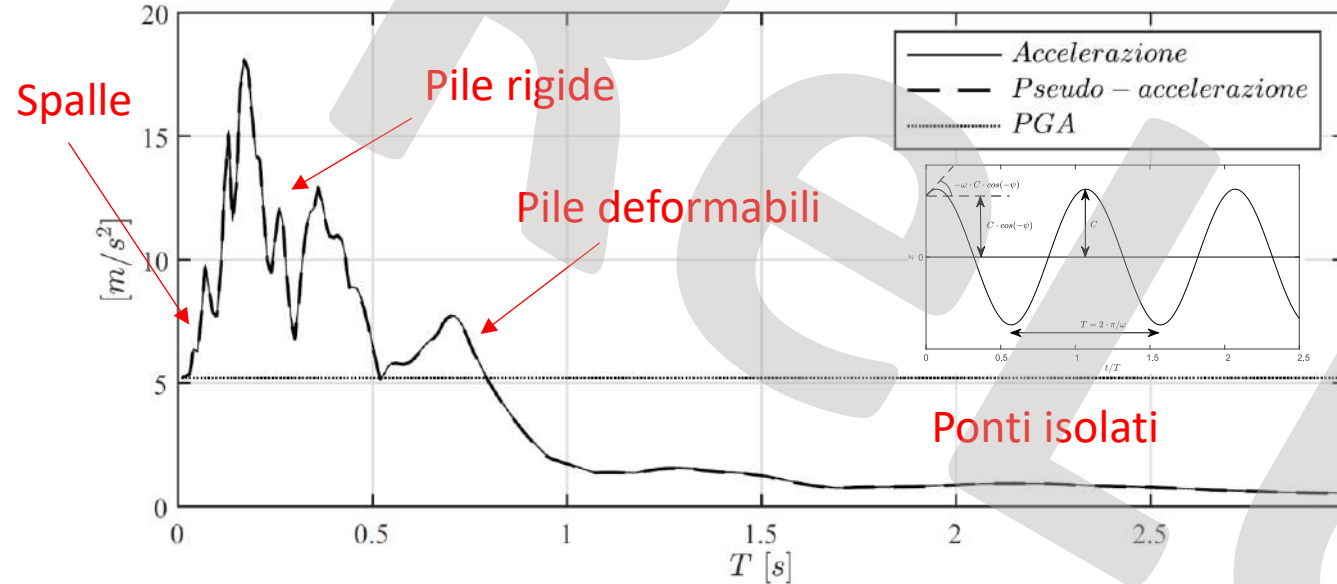
Solo gli appoggi che impediscono gli spostamenti orizzontali possono trasferire le azioni orizzontali

Se gli appoggi sono fissi le reazioni orizzontali sono maggiori sugli elementi portanti verticali più rigidi

# Spettri di risposta di un segnale

Si definiscono anche gli spettri di risposta in pseudo-accelerazione che, per bassi valori di smorzamento, approssimano gli spettri di risposta in accelerazione

Sovrapposizione spettri accelerazione e pseudo-accelerazione ( $\nu = 0.05$ ) calcolati per lo stesso segnale sismico



T è il periodo di vibrazione

Se la struttura è rigidissima (spalla) l'accelerazione è prossima a quella al suolo con sollecitazioni contenute

Se la struttura è rigida (T basso) l'accelerazione spettrale e quindi le sollecitazioni sono elevate

Se la struttura è deformabile (T alto) l'accelerazione spettrale e quindi le sollecitazioni sono basse ma gli spostamenti sono alti

$$T(s) = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

In cui m è la massa e k la rigidezza dell'oscillatore

Se consideriamo una pila a mensola di sezione rettangolare:

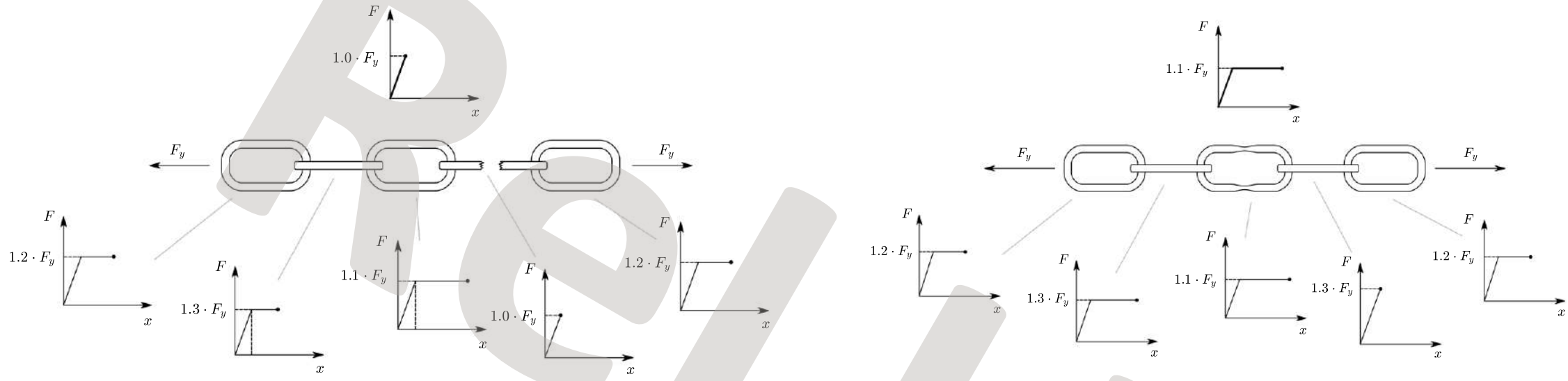
La rigidezza flessionale dipende dal modulo elastico E del materiale, dal momento di inerzia della sezione e dall'altezza H della pila.

$$k = \frac{3EI}{H^3}$$

Se la pila è molto tozza o realizzata con un setto può essere importante aggiungere la rigidezza tagliante

$$kt = \chi \frac{GA}{H}$$



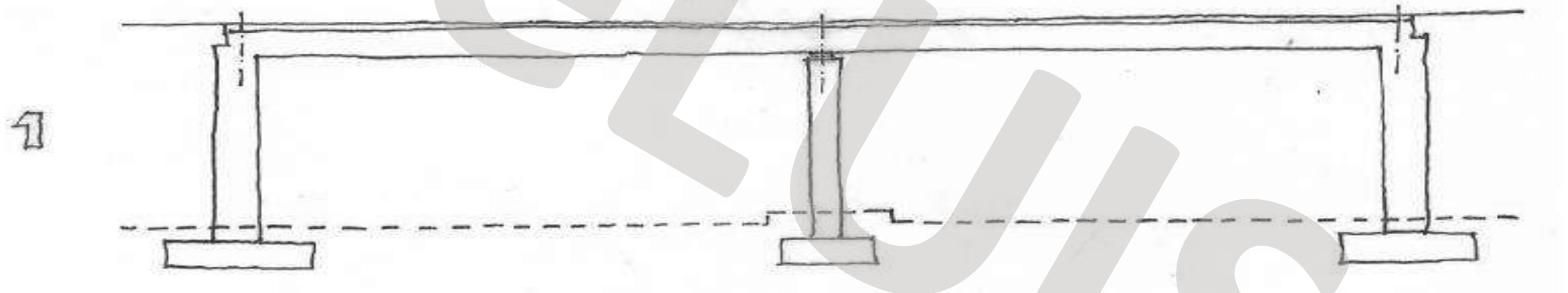


In una struttura in cui ci sono diversi componenti che possono arrivare a rottura si può avere comportamento fragile o duttile secondo il comportamento del primo componente che entra in crisi

Se la struttura è isostatica (ad esempio la pila a mensola) il comportamento dipende dalla duttilità dell'elemento

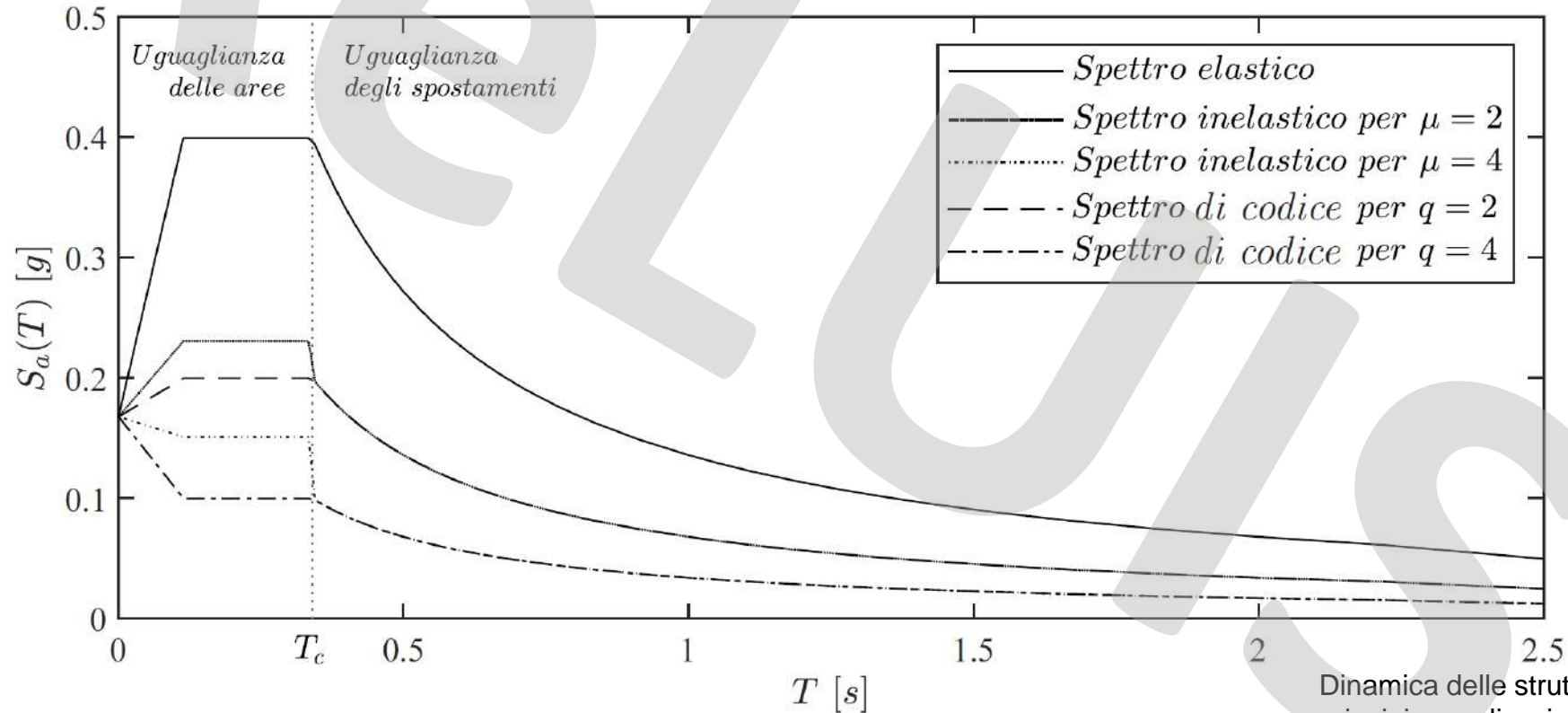
Nel caso di impalcato continuo e luce corta l'azione sismica si può portare sulle spalle per sfruttare le caratteristiche delle spalle

- La struttura della spalla risulta molto rigida e con accelerazioni prossime a quelle del terreno.
- Le pile intermedie, che hanno bassa rigidezza non contribuiscono a resistere al sisma.
- La spinta passiva nella direzione del sisma risulta efficace



La **capacità di dissipazione** (riduce la richiesta di resistenza utilizzando la duttilità per dissipare l'energia sismica) si può tenere in conto in un'analisi elastica introducendo il fattore di comportamento  $q$

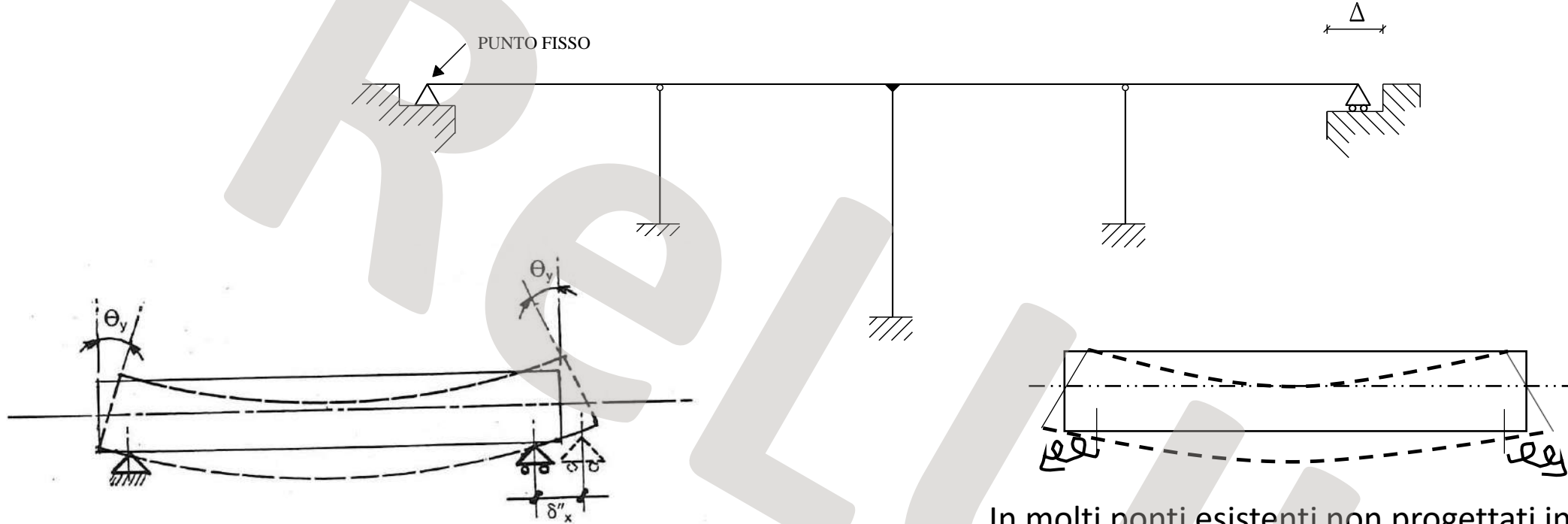
Se la struttura è esistente è complesso individuare il fattore di comportamento che può dipendere da specifici dettagli costruttivi, in genere carenti rispetto a quanto indicato dalle normative attuali



Dinamica delle strutture e ingegneria sismica – principi e applicazioni, *Iunio Iervolino*, Ed. Hoepli. Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2021

# I vincoli: gli appoggi

Solo gli appoggi in grado di bloccare gli spostamenti orizzontali trasferiscono le azioni sismiche



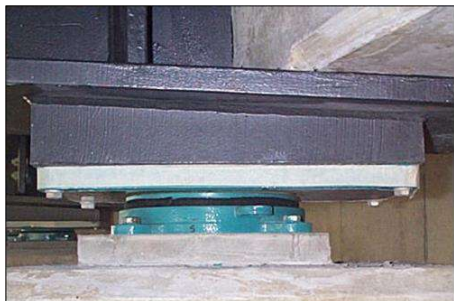
Negli impalcati realizzati da travi semplicemente appoggiate si possono trovare appoggi fissi e scorrevoli

In molti ponti esistenti non progettati in zona sismica gli appoggi sono cuscinetti di neoprene

Si possono considerare scorrevoli per distorsioni come la temperatura

Si devono considerare entrambe le direzioni

Si possono considerare vincoli elastici orizzontali per azioni sismiche in grado di trasferire per attrito



# I vincoli

Per i vincoli esistenti si possono trovare spesso sistemi che consentono spostamenti piccoli dovuti alle distorsioni (ad es. effetti della temperatura) ma bloccare gli spostamenti più elevati dovuti alle azioni sismiche.

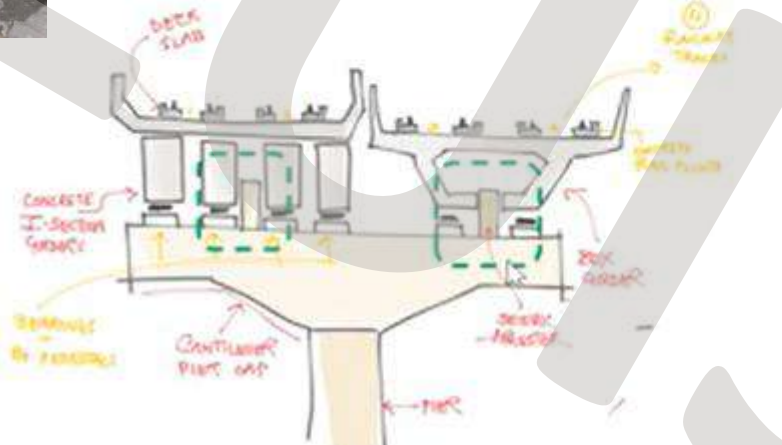
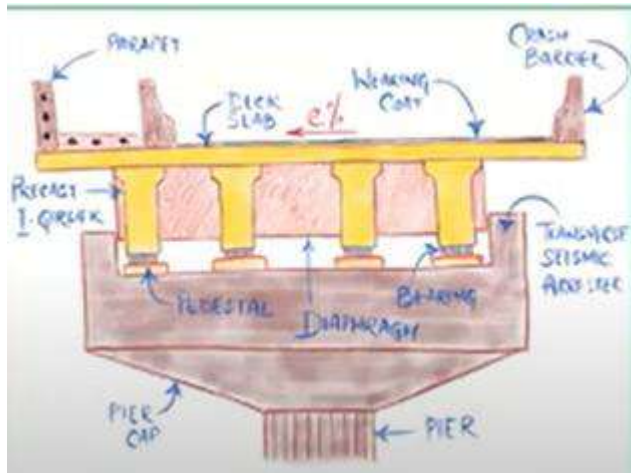
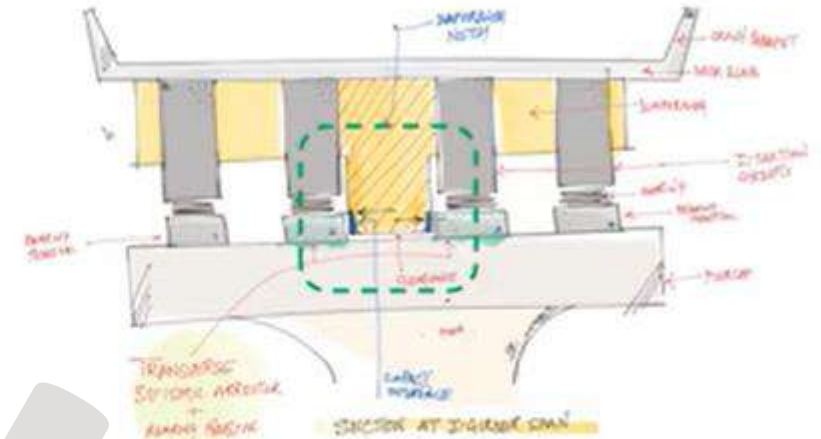
Vincoli in acciaio con uno spazio di alcuni mm tra i blocchi



↑ spostamento consentito.

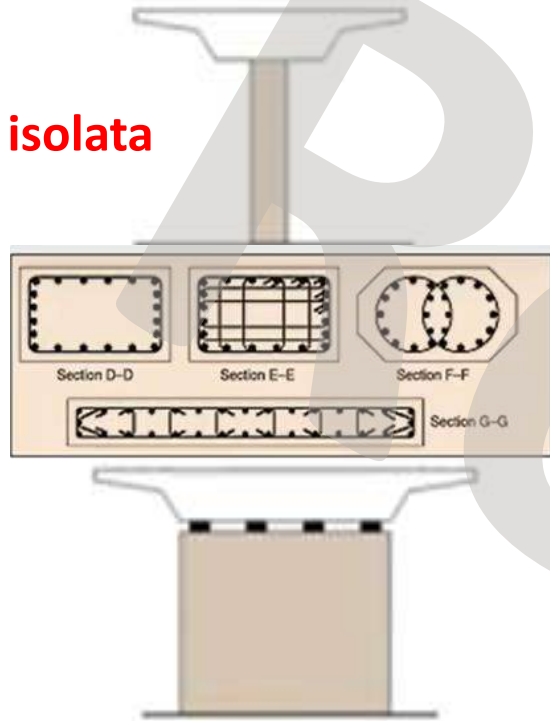


Ritegni in c.a.



**Il tipo di pila è importante per il comportamento per azioni orizzontali**

**A colonna isolata**



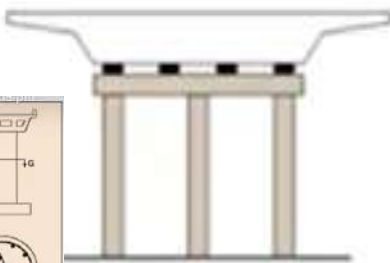
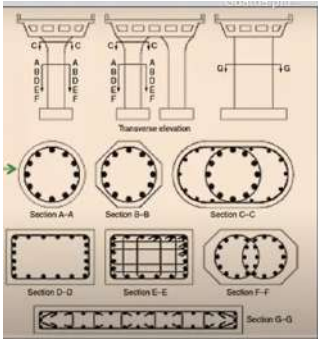
Comportamento a mensola con rigidezza analoga in entrambe le direzioni

**A parete**



Comportamento a mensola più rigido e resistente in direzione trasversale

**A telaio**

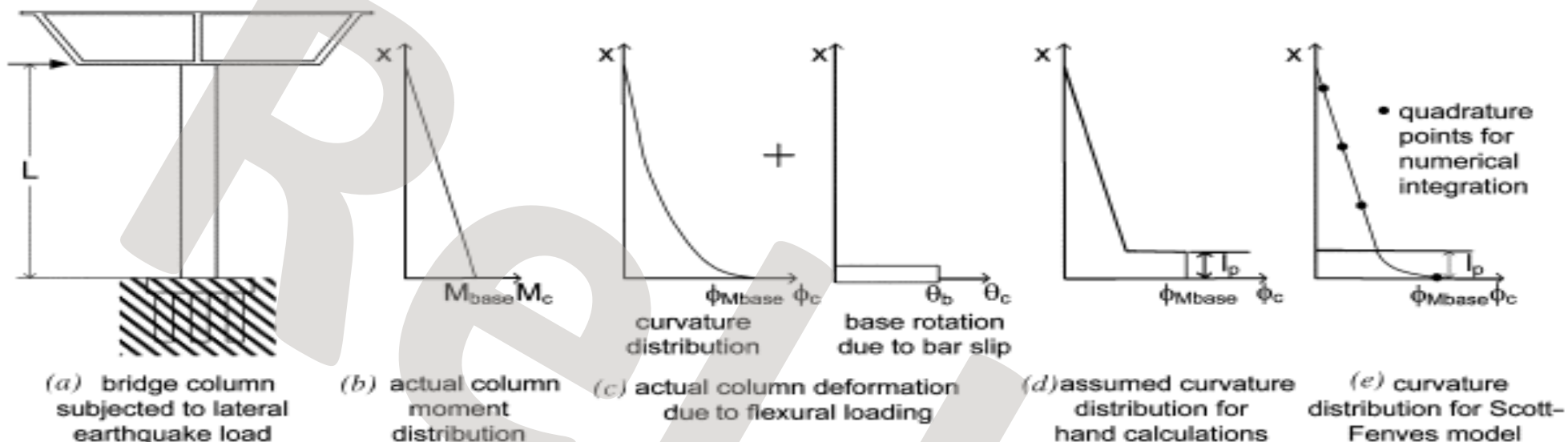


Comportamento a mensola in direzione longitudinale e a telaio più rigido e resistente in direzione trasversale

Modulo di rigidezza

**Le linee guida per i ponti esistenti**

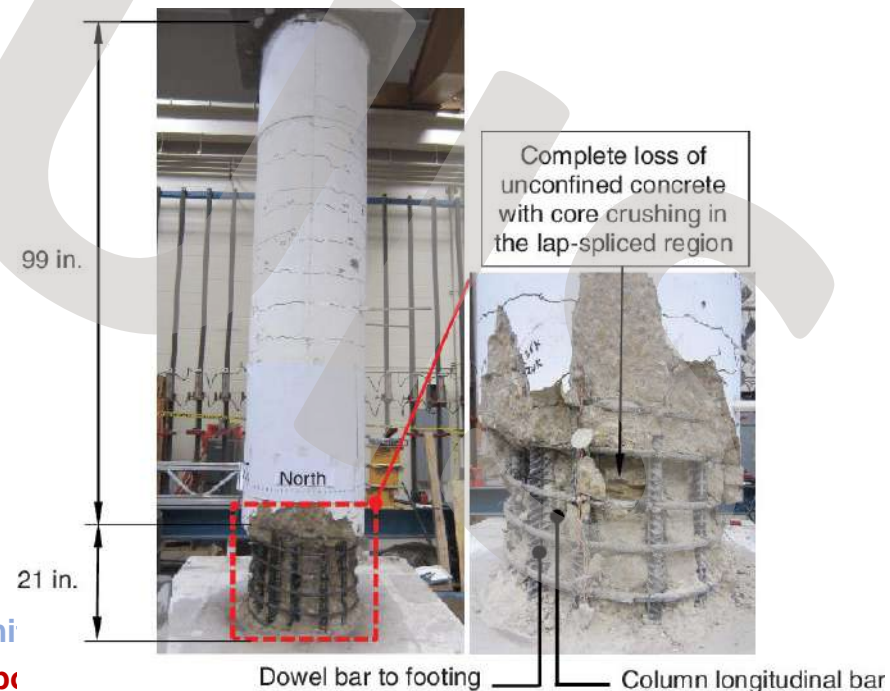
# Elementi dissipativi: Cerniera plastica alla base della pila

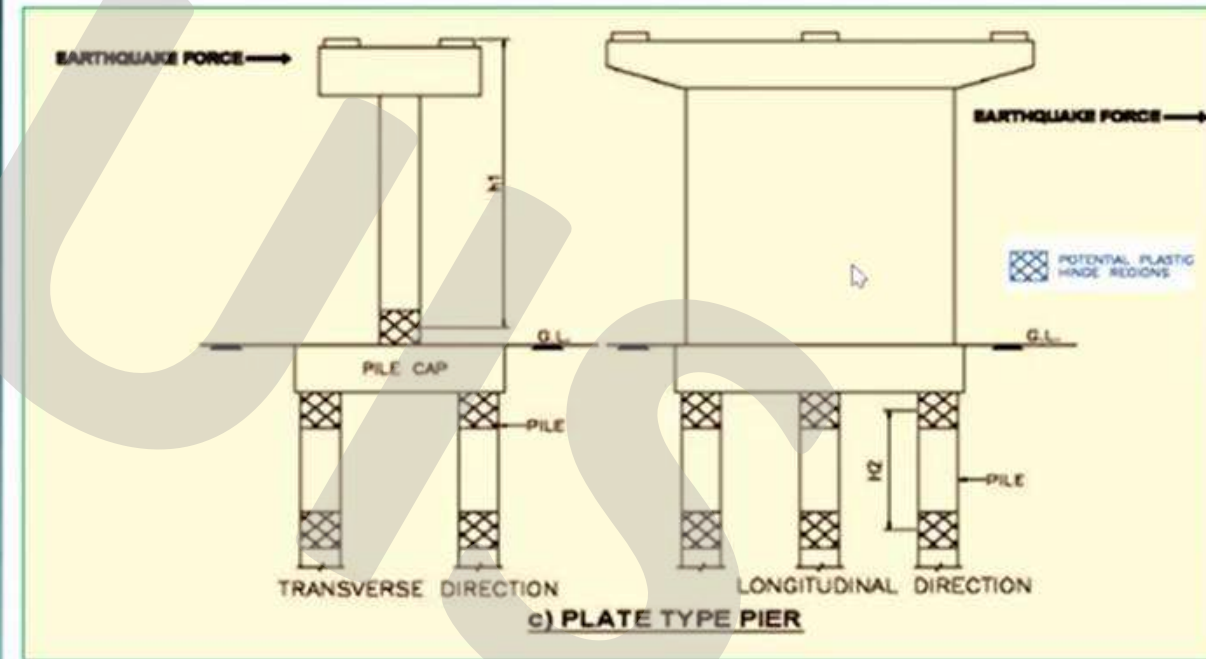
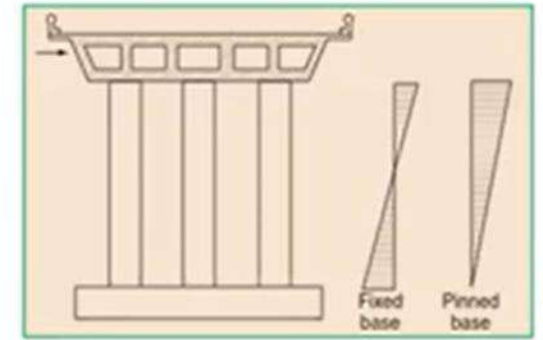
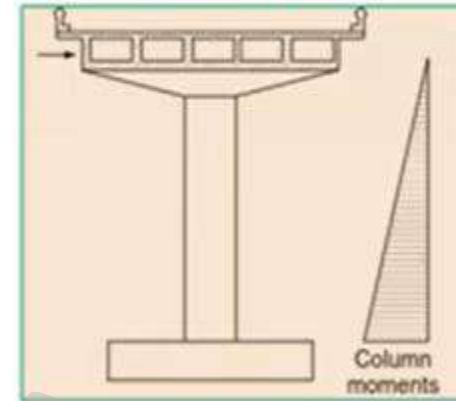
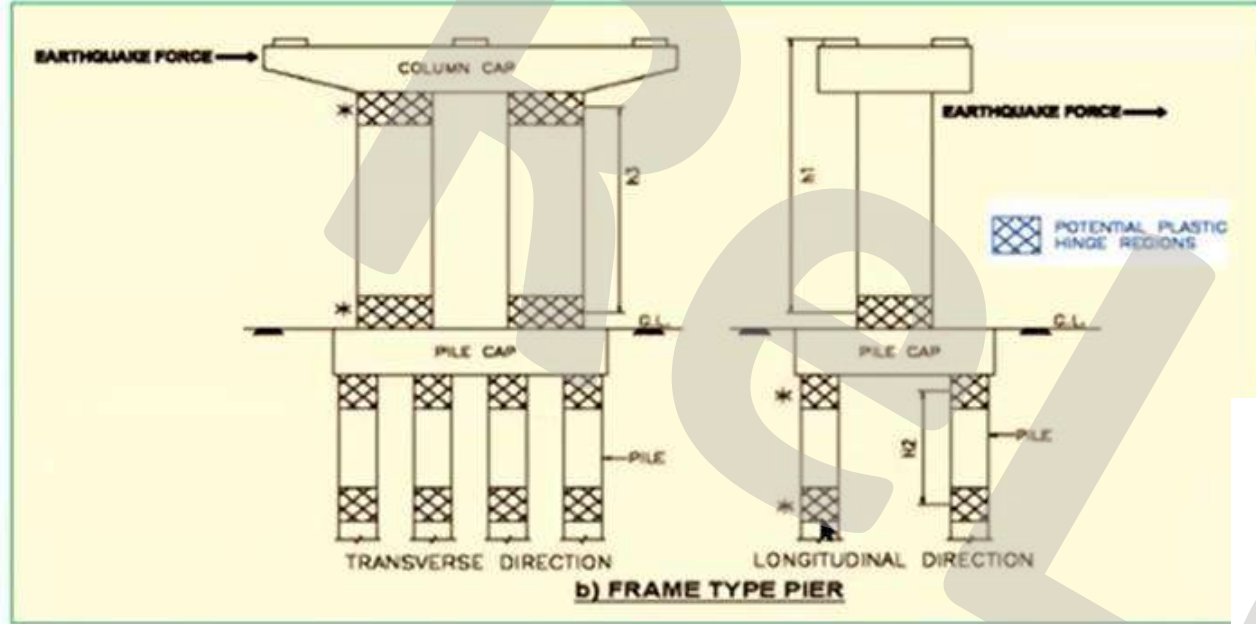


E' un problema ben noto e studiato per le pile dei ponti

La duttilità alla base della colonna dipende

- dalla quantità ed efficienza delle staffe (chiusure per il confinamento e per ridurre l'instabilità delle barre compresse)
- dall'ancoraggio e disposizione delle armature longitudinali





La zona plasticizzata dipende dal comportamento della pila

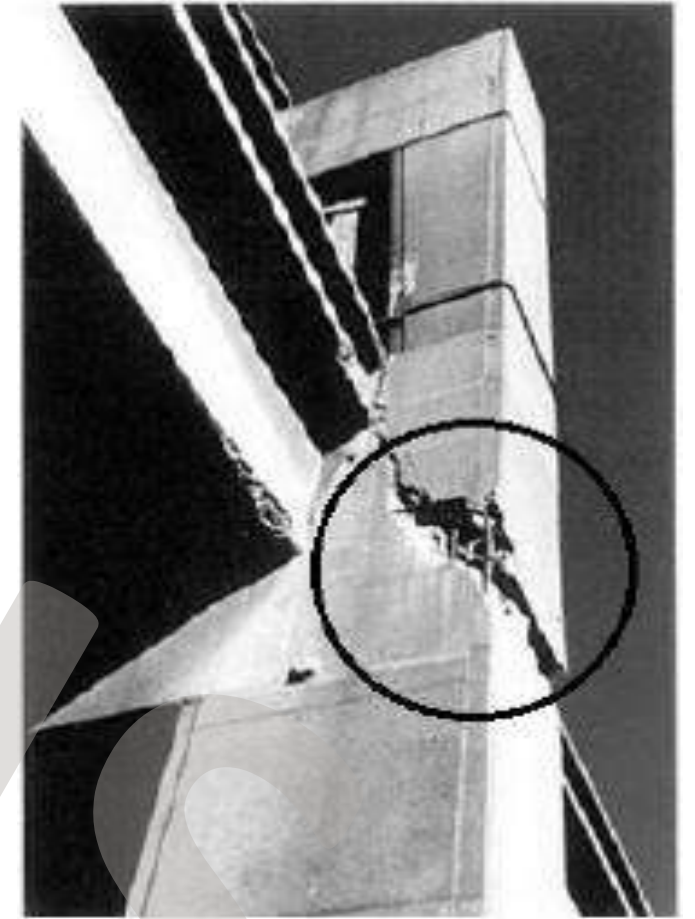
Zone plasticizzata al piede nello schema a mensola

Zone plasticizzate al piede e in testa nello schema a telaio





**Pila tozza: rottura a taglio non duttile**



**Collegamento solidale: crisi del nodo a taglio non duttile**

## *Esempi di danni post-terremoto*

Plasticizzazione nella sezione critica della pila



Fig. 1.5 Collasso della cerniera plastica per eccesso di deformazione flessionale ciclica, Viadotto Gothic Avenue (terremoto di Northridge, California, 1994)

Le staffe chiuse hanno il ruolo fondamentale di confinare il calcestruzzo e contenere l'instabilità delle barre compresse



Fig. 1.6 Collasso per flessione e taglio, Viadotto Gothic Avenue (terremoto di Northridge, California, 1994).

**Le linee guida per i ponti esistenti**



Fig. 1.8 Terremoto di Kobe, Giappone (1995): collasso del viadotto urbano Hanshin.

### Crisi alla base delle pile

Le staffe chiuse hanno il ruolo fondamentale di confinare il calcestruzzo e contenere l'instabilità delle barre compresse



Le linee guida Fig. 1.9 Terremoto di Kobe, Giappone (1995): viadotto urbano Hanshin, dettaglio.



**Crisi per taglio nei collegamenti solidali**

**Fig. 1.10** Terremoto di Kobe, Giappone (1995): danni su una pila a telaio, viadotto Shinkansen a Kobe.





**Danni alle pile**





Gli spostamenti degli appoggi devono essere compatibili con lo spazio sulla testa delle pile

**Fig. 1.3 Perdita di appoggio: ponte Nishinomiya-ko, Giappone, Kobe 1995. In questo caso erano presenti ritegni sismici assolutamente inadeguati costituiti da bulloni colleganti le lamiere terminali dell'arco e del traverso della campata crollata.**



**Fig. 1.1 Terremoto di San Fernando (1971).**

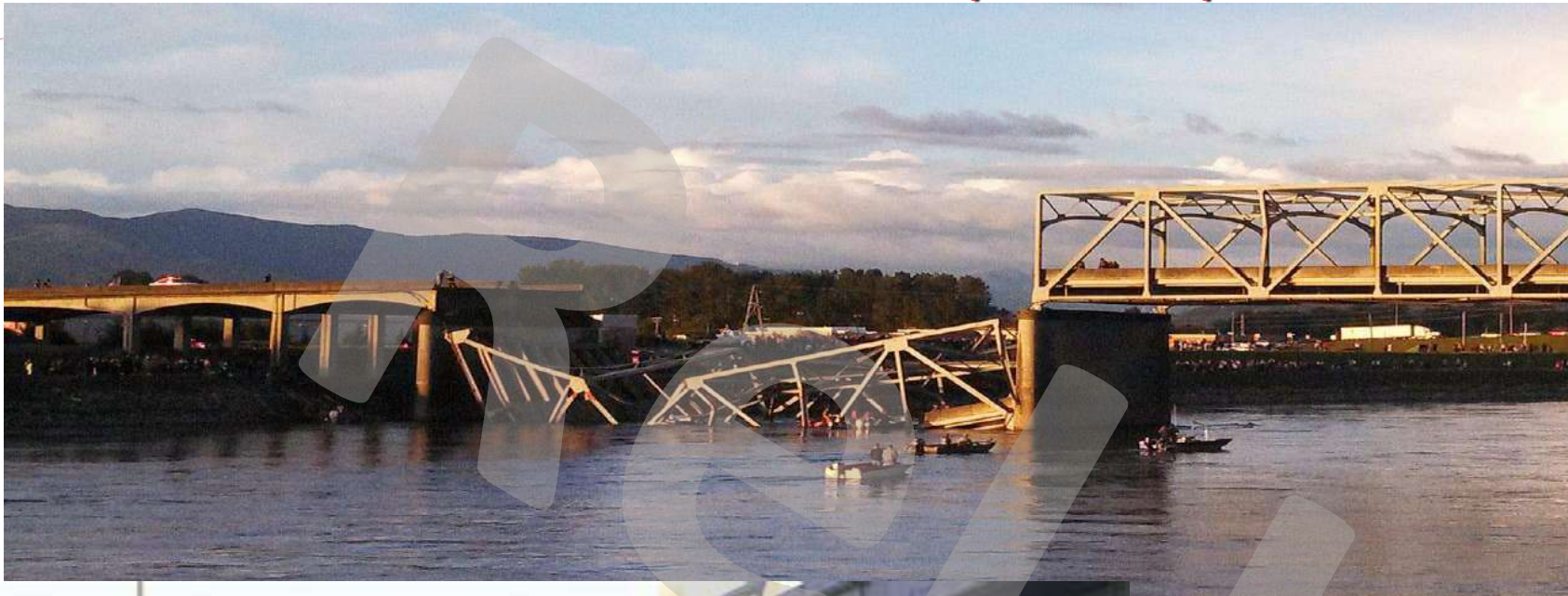


**Fig. 1.4 Rottura dell'appoggio: ponte Higashi-Kobe, Giappone, Kobe 1995.**

**Terremoto del Cile 2010**

**Caduta dagli appoggi**





**Caduta dagli appoggi**





**L'impalcato** generalmente non è compreso nello schema di resistenza del ponte in caso di azione sismica. Ciononostante occorre tenere conto almeno dei seguenti fattori.

In primo luogo è estremamente importante definire adeguatamente le condizioni di appoggio tra l'impalcato e l'infrastruttura, per garantire che si possano verificare le deformazioni necessarie dovute al sisma tenendo l'impalcato sempre appoggiato. La definizione dei punti di appoggio dell'impalcato, con un gioco adeguato, è molto importante per raggiungere questo scopo.

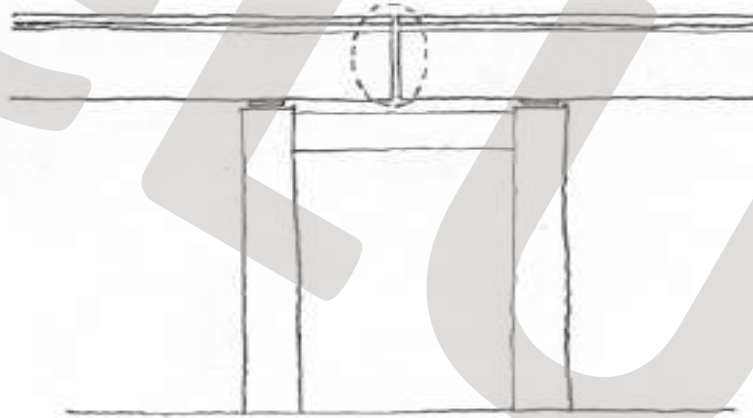


Figura 5.1 Condizioni di appoggio dell'impalcato sull'infrastruttura.

Un altro problema importante è la definizione dei giunti, per consentire i movimenti stimati ed evitare il martellamento tra l'impalcato e la parete della spalla o tra gli impalcati, lateralmente, nel caso di ponti a due carreggiate separate da una intermedia minima.



Figura 5.2 Giunti longitudinali tra vani o tra impalcato e spalla, o giunti trasversali tra impalcati.

Oltre a questi problemi geometrici, per i ponti di cemento precompresso è necessario verificare l'effetto che può avere l'azione sismica verticale. Generalmente il precompresso viene dimensionato in modo tale da compensare l'effetto dei carichi verticali, di solito quelli permanenti. Con l'azione sismica verticale l'effetto del carico permanente diminuisce e il precompresso può provocare sollecitazioni indesiderate in alcune zone, che devono essere tenute sotto controllo.

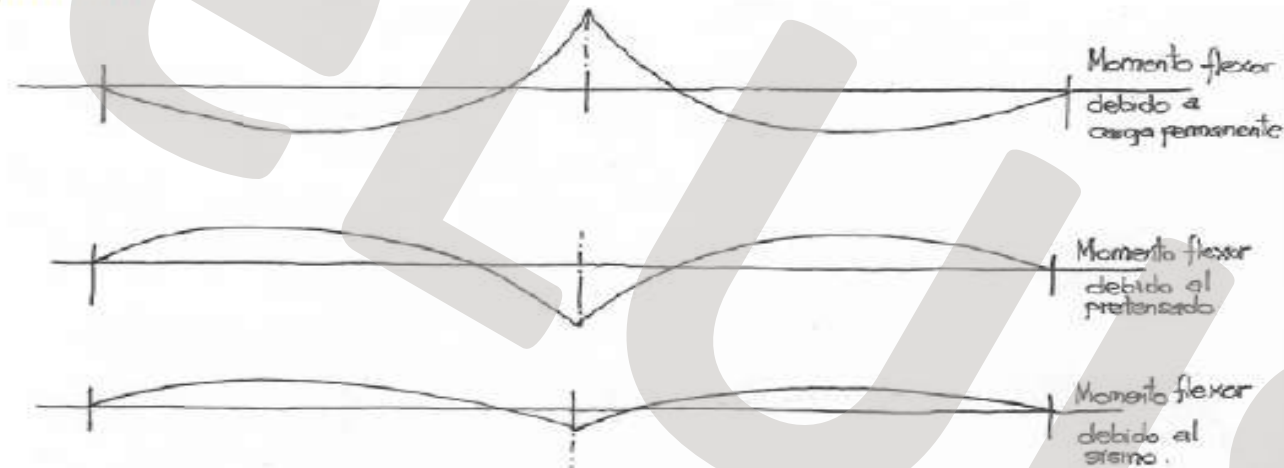
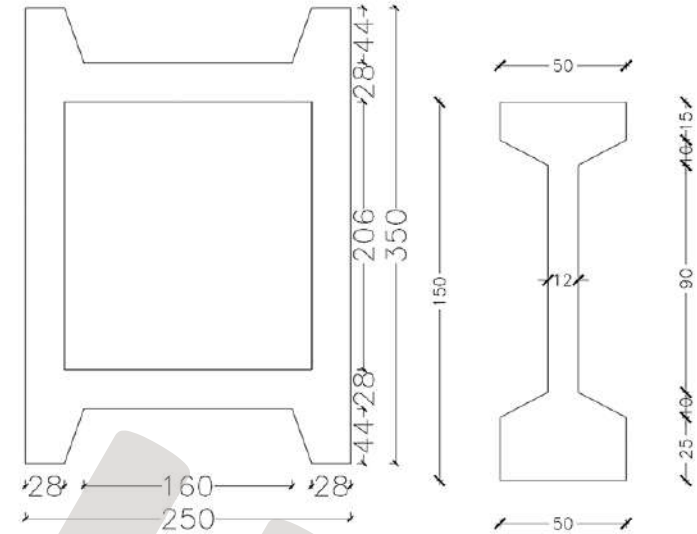


Figura 5.3 Effetto dell'azione del sisma verticale su ponti di cemento precompresso.

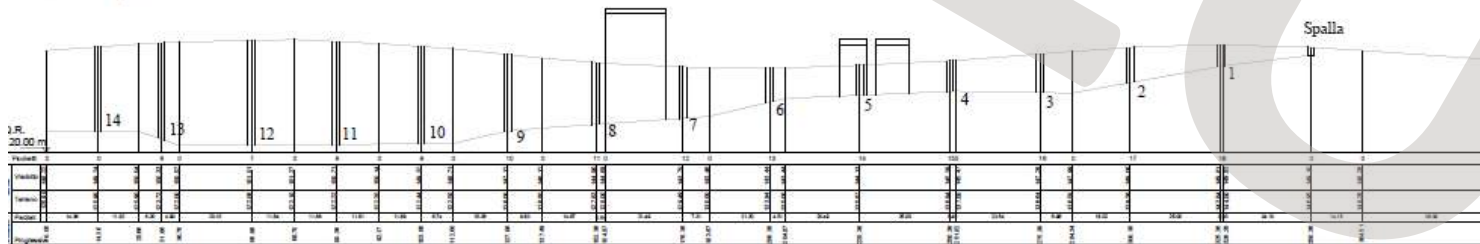
# Caso studio: ponte a travate appoggiate su cuscinetti di neoprene



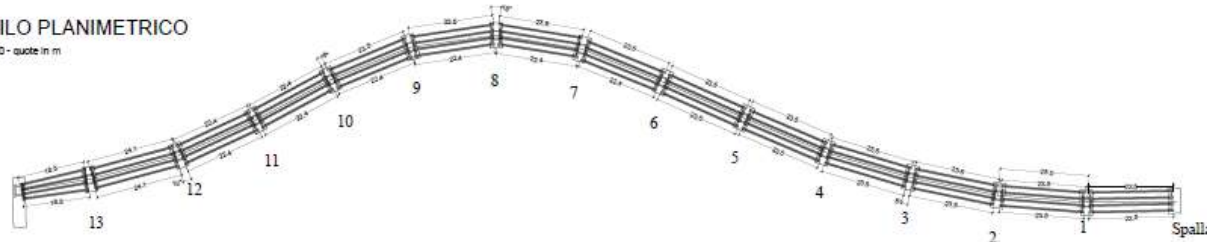
Travi appoggiate in precompresso di lunghezza 22-27m  
Pile cave di forma rettangolare



PROFILO ALTIMETRICO  
SCALA 1:100 - quote in m



PROFILO PLANIMETRICO  
SCALA 1:100 - quote in m

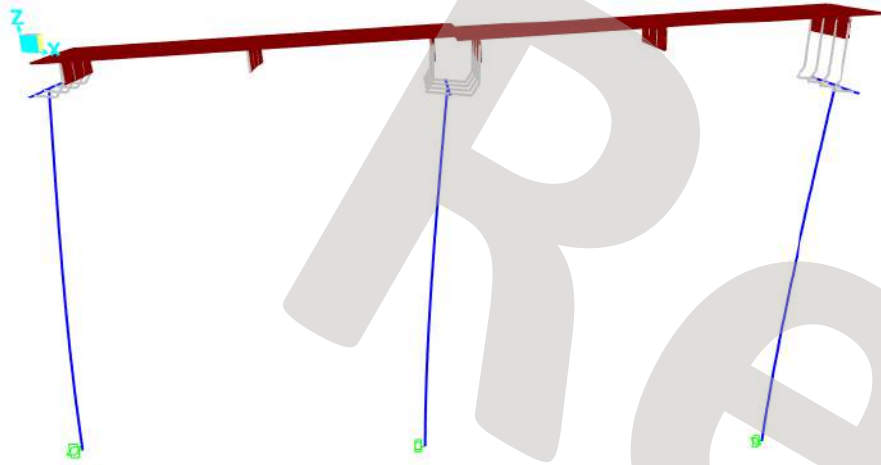


Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

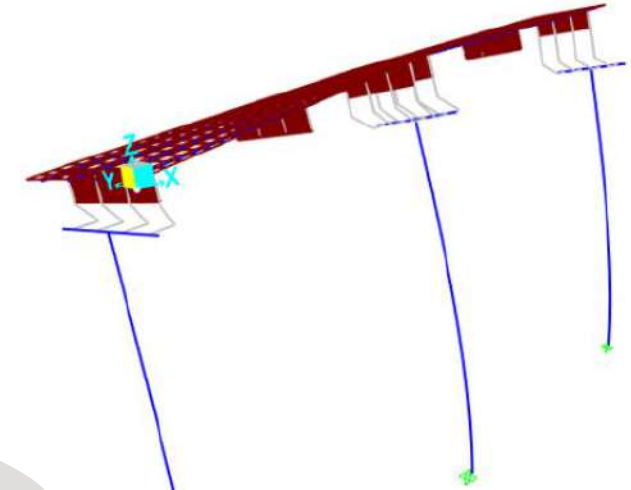
Le linee guida per i ponti esistenti

## Caso studio: risposta dinamica campate tipo

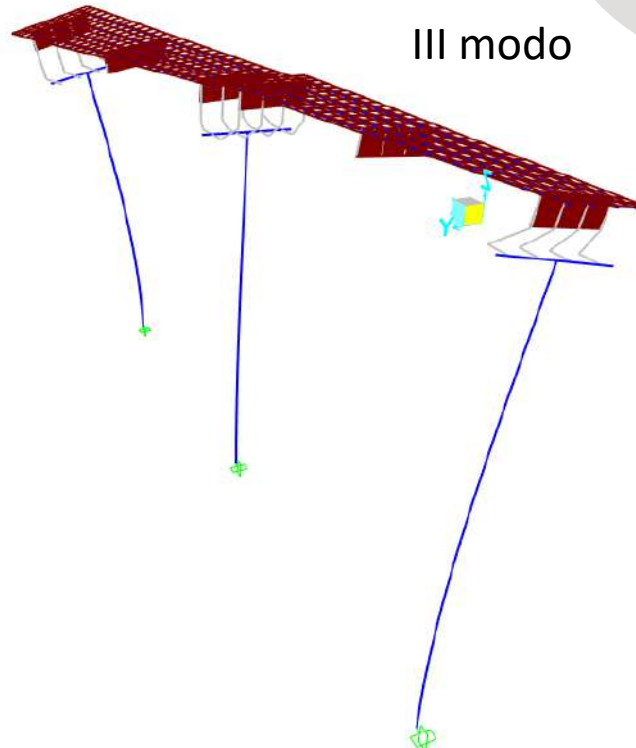
I modo longitudinale (la pila è meno rigida in questa direzione)



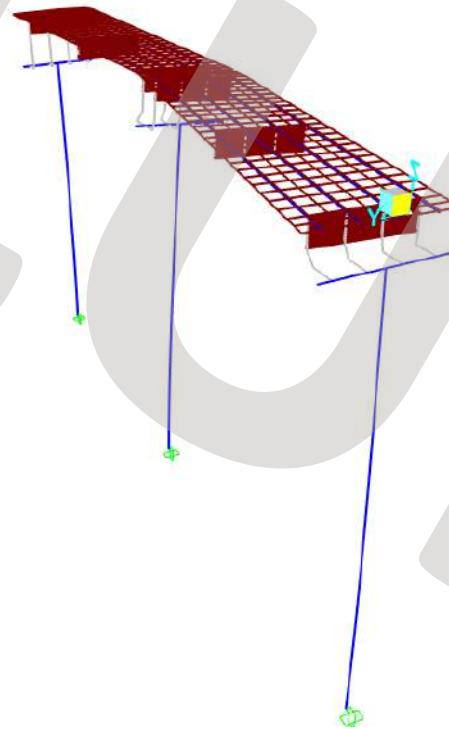
II modo trasversale (la pila è più rigida in questa direzione)



III modo

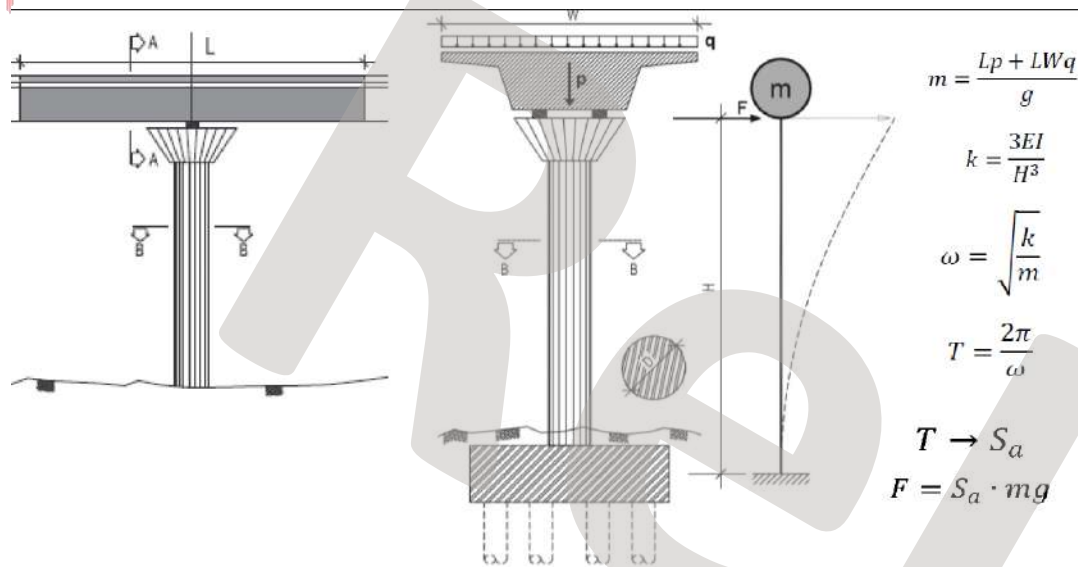


IV modo



II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Le linee guida per i ponti esistenti



$$m = \frac{Lp + LWq}{g}$$

$$k = \frac{3EI}{H^3}$$

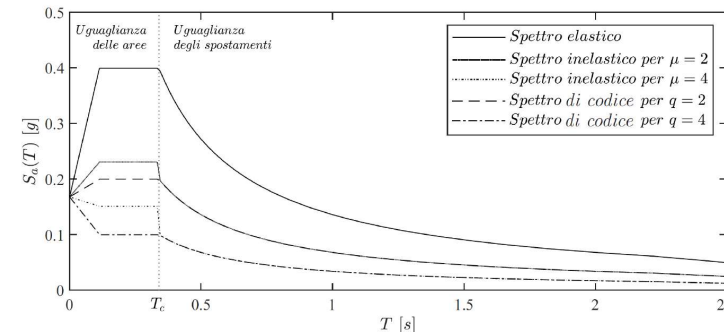
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$T \rightarrow S_a$$

$$F = S_a \cdot mg$$

14 pile con la stessa sezione e altezze variabili tra 3.7m e 28.2 m

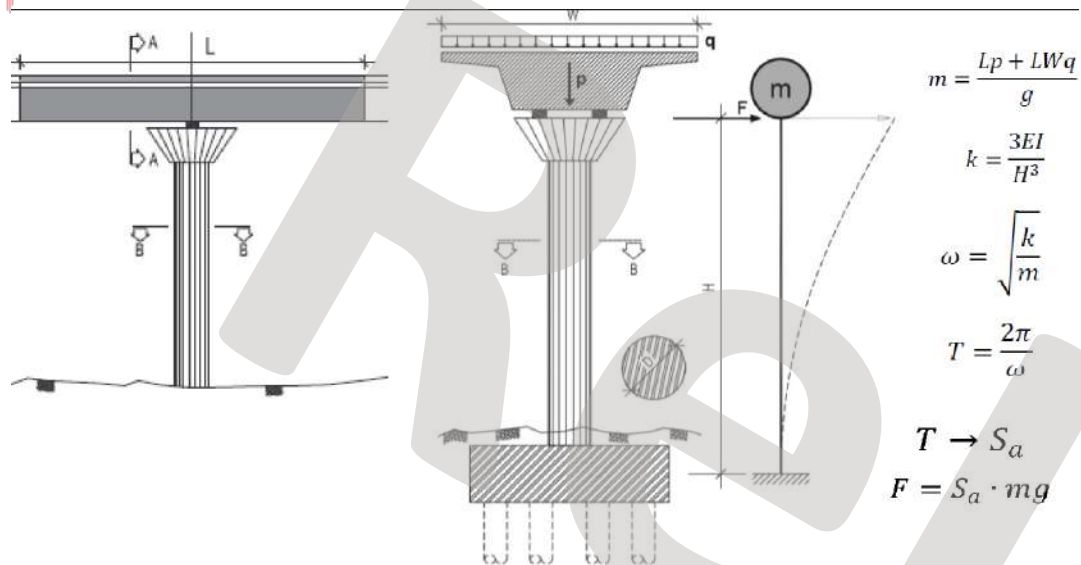


accelerazione  
periodo                      spettrale                      Forza statica

Pila	H pila	I y	I x	kY	kX	M impalcato	Tx	Ty	Sax	Say	Fx	Fy
	[m]						[m <sup>4</sup> ]	[m <sup>4</sup> ]	[kN/m]	[kN/m]	[ton]=[kNs <sup>2</sup> /m]	s
1	6.5	4.013	3.002	1254357	938346	5922.00	0.16	0.14	0.73	0.69	4349	4081
2	10.3			315246	235826		0.32	0.27	0.73	0.73	4349	4349
3	10.3			315246	235826		0.32	0.27	0.73	0.73	4349	4349
4	6.35			1345365	1006426		0.15	0.13	0.73	0.68	4348	4003
5	3.7			6800741	5087422		0.07	0.06	0.49	0.47	2929	2775
6	5			2755823	2061545		0.11	0.09	0.60	0.56	3578	3337
7	13.7			133968	100217		0.49	0.42	0.70	0.73	4119	4349
8	15.5			92505	69200		0.59	0.51	0.58	0.67	3423	3958
9	17.7			62121	46471		0.72	0.62	0.47	0.55	2805	3243
10	25.8			20059	15005		1.26	1.09	0.27	0.31	1594	1843
11	27.65			16296	12190		1.40	1.21	0.24	0.28	1437	1661
12	28.2			15361	11491		1.44	1.25	0.24	0.27	1395	1613
13	27			17501	13092		1.35	1.17	0.25	0.29	1489	1721
14	20			43060	32212		0.86	0.74	0.39	0.46	2335	2700

Si considera lo spettro elastico perché la pila non ha i dettagli costruttivi adeguati:  
**Importanti le staffe chiuse e il passo delle staffe**  
 le pile più alte presentano un periodo maggiore, una accelerazione più bassa e quindi un taglio inferiore ... ma il momento al piede può essere più alto

## Caso studio: calcolo sollecitazione su ogni pila



14 pile con la stessa sezione e altezze variabili tra 3.7m e 28.2 m

le pile più alte presentano un periodo maggiore, una accelerazione più bassa e quindi un taglio inferiore ... ma il momento al piede sarà maggiore

Pila	H pila	V <sub>RdX</sub>	V <sub>RdY</sub>	FSx		Mx	My	Mx+0.3My		My+0.3Mx	
	[m]			kN	kN			Verifica	[kNm]	[kNm]	Verifica
1	6.5	2106.75	2959.68	0.48	0.73	28269	26529	0.58	0.73		
2	10.3			0.48	0.68	44796	44796	0.37	0.44		
3	10.3			0.48	0.68	44796	44796	0.37	0.44		
4	6.35			0.48	0.74	27609	25416	0.72	0.78		
5	3.7			0.72	1.07	10837	10269	1.85	1.92		
6	5			0.59	0.89	17889	16683	0.93	1.18		
7	13.7			0.51	0.68	56433	59583	0.30	0.33		
8	15.5			0.62	0.75	53056	61342	0.31	0.33		
9	17.7			0.75	0.91	49649	57404	0.34	0.35		
10	25.8			1.32	1.61	41123	47546	0.40	0.42		
11	27.65			1.47	1.78	39724	45928	0.42	0.44		
12	28.2			1.51	1.84	39334	45478	0.42	0.44		
13	27			1.42	1.72	40199	46478	0.41	0.43		
14	20			0.90	1.10	46707	54002	0.36	0.37		

Per la verifica a flessione la prestazione peggiore è quella delle pile di altezza intermedia:13-15m

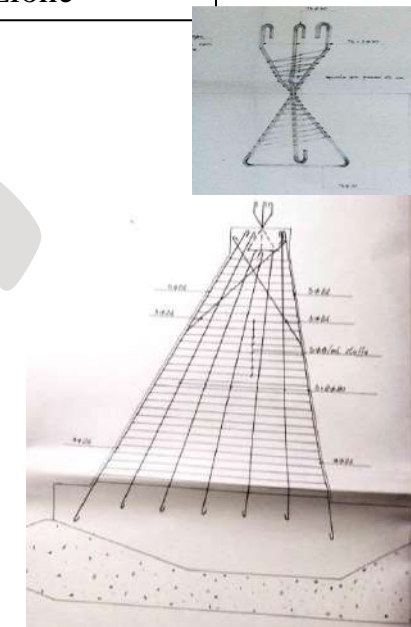
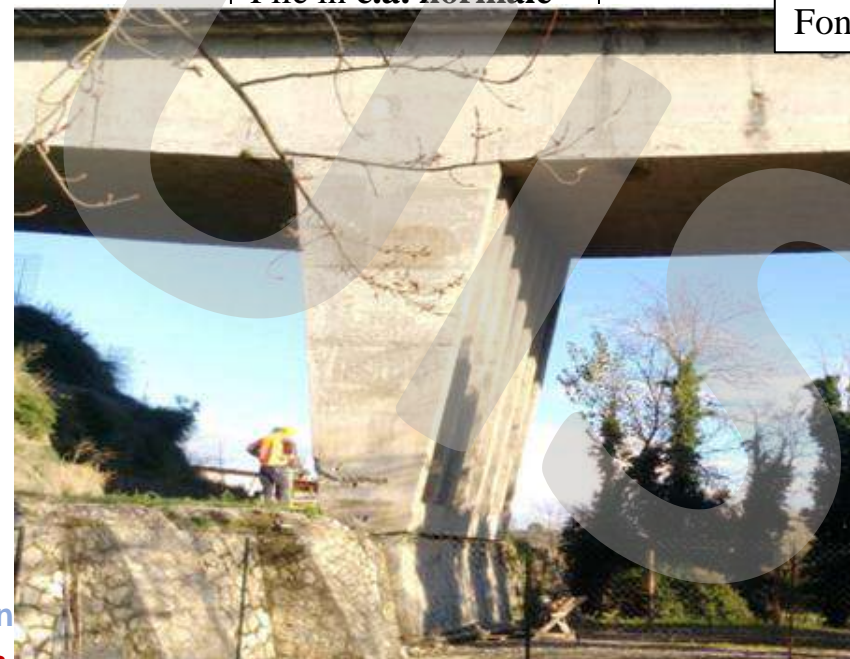
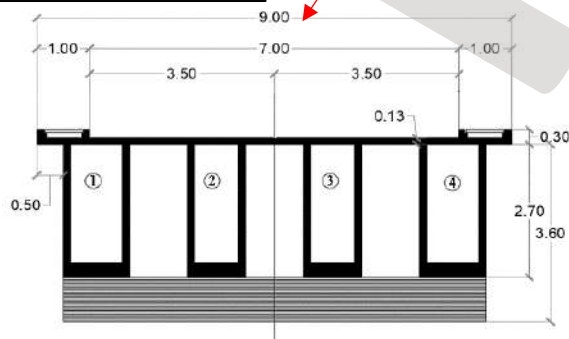
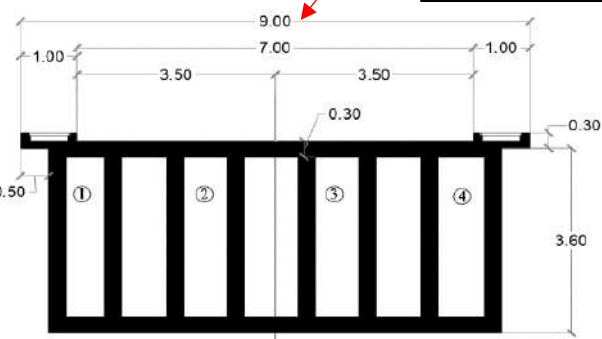
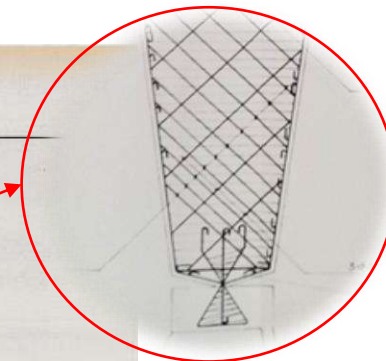
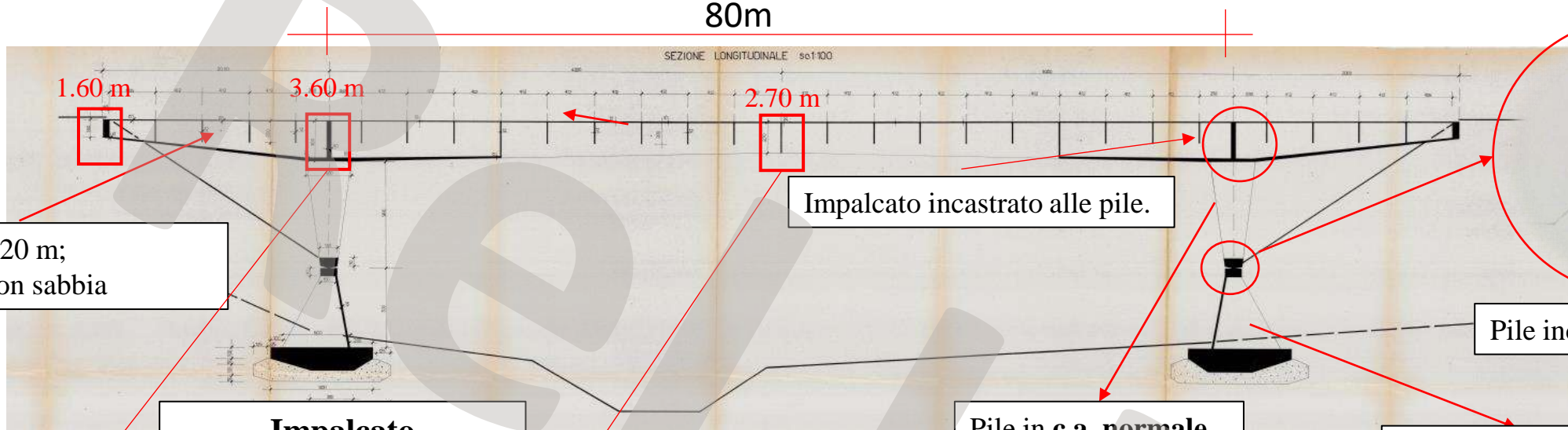
Per la verifica a taglio la prestazione peggiore è quella delle pile più basse.

# Strutture iperstatiche non dissipative

Ponte in c.a.p. realizzato negli anni '50 a Benevento: Progetto di Riccardo Morandi

Schema a telaio iperstatico con cerniere alla base

80m



## Geometria

- Soletta superiore ( $13 \div 30$  cm)
- Soletta inferiore ( $20 \div 30$  cm)
- Anime cassoni di spessore variabile  $13 \div 30$  cm

aturali e interven

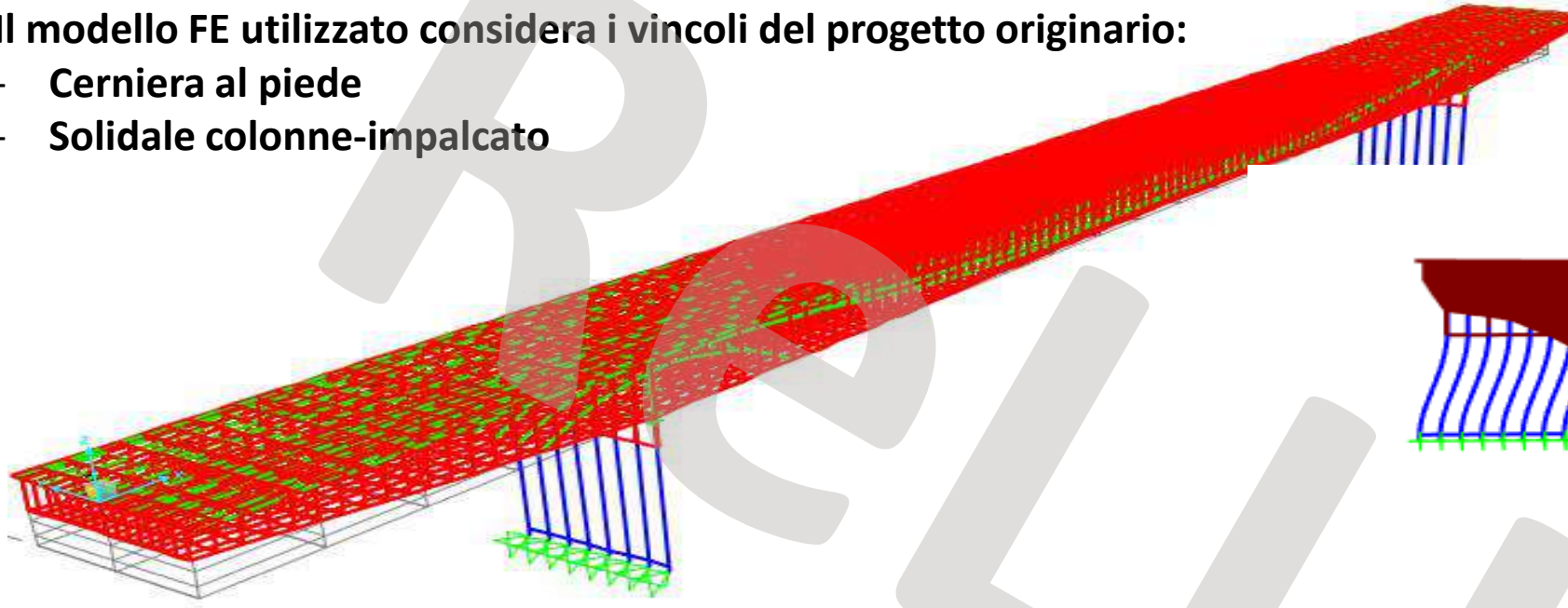
Le linee guida per i ponti esistenti



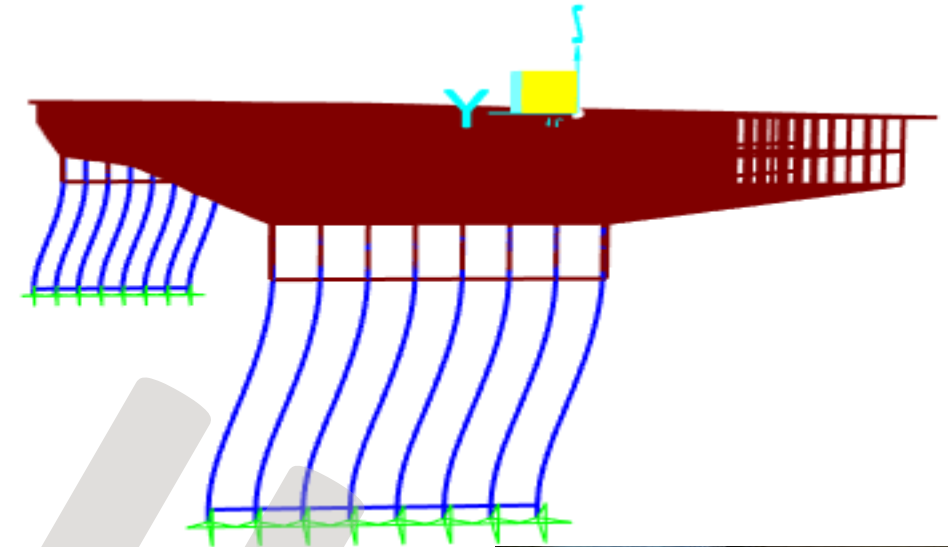
# Strutture iperstatiche non dissipative

Il modello FE utilizzato considera i vincoli del progetto originario:

- Cerniera al piede
- Solidale colonne-impalcato



I modo - trasversale



La pila è molto rigida nella direzione longitudinale e molto deformabile in quella trasversale.

III modo - longitudinale



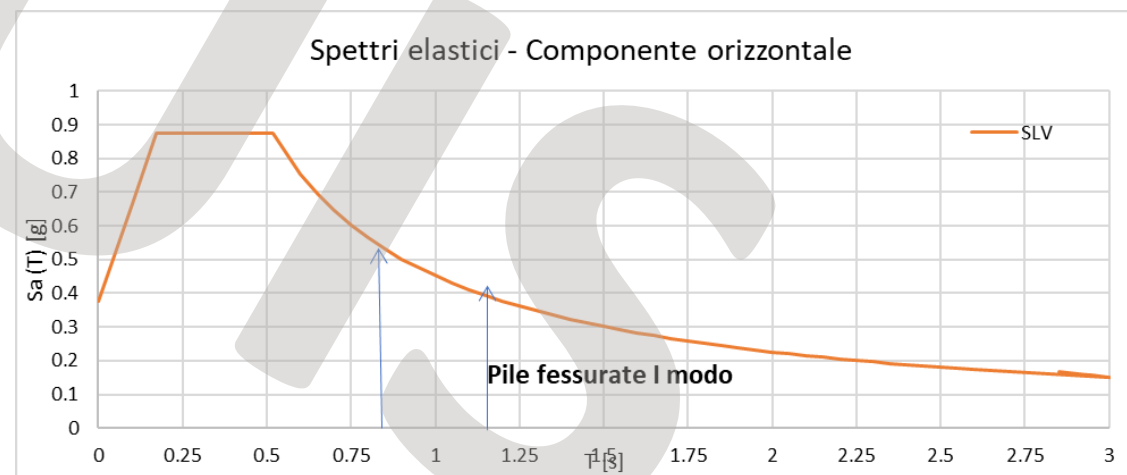
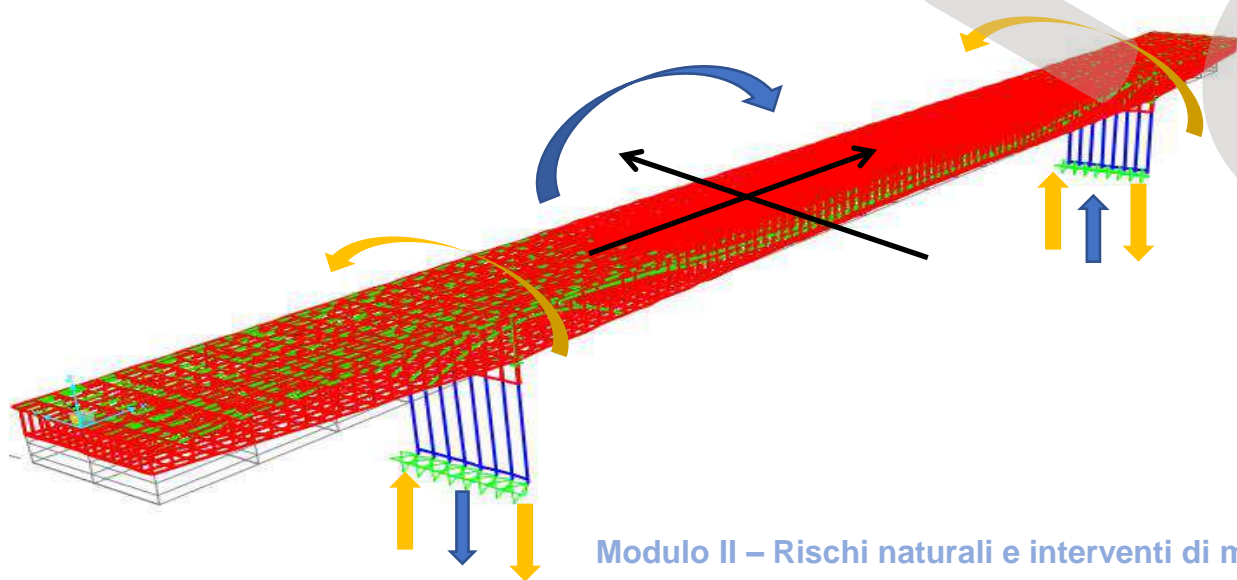
## Analisi modale

Pile fessurate (50% del momento di inerzia in accordo con NTC2018)

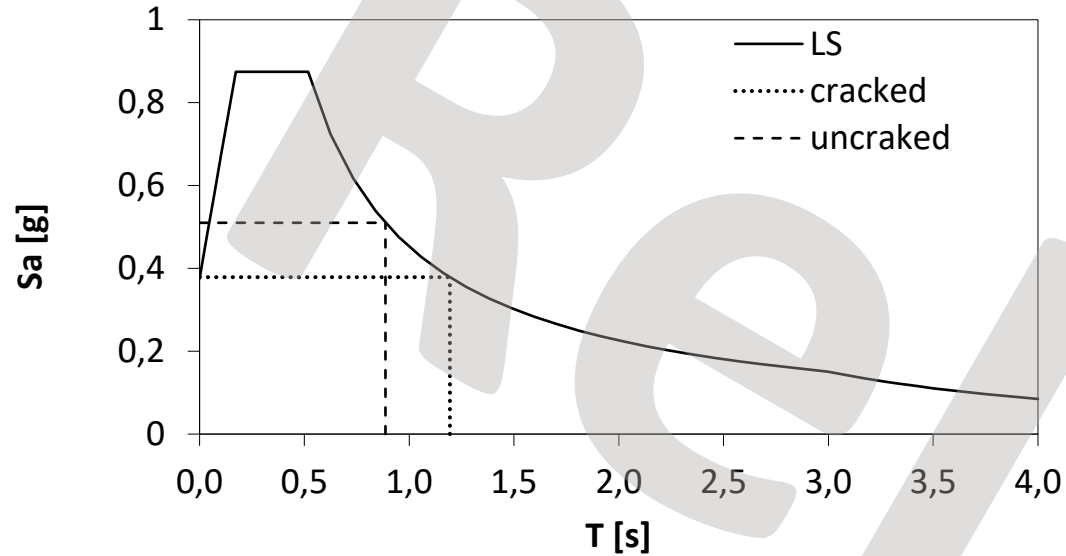
Mode #	Period	Frequency	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ	Mode #	Period	Frequency	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
-	s	Cyc/s	-	-	-	-	-	-	-	s	Cyc/s	-	-	-	-	-	-
1	0.89	1.13	0.00	0.96	0.00	0.01	0.00	0.00	1	1.19	0.84	0.00	0.96	0.00	0.01	0.00	0.00
2	0.87	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	2	1.16	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96
3	0.80	1.26	0.60	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	3	0.81	1.23	0.63	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00
4	0.47	2.12	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	4	0.51	1.95	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00
5	0.27	3.68	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	5	0.28	3.55	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00
6	0.22	4.57	0.27	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	6	0.25	4.08	0.31	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00
7	0.21	4.73	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	7	0.21	4.72	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
8	0.17	5.86	0.08	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	8	0.18	5.67	0.03	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00
9	0.13	7.94	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	9	0.13	7.88	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00
10	0.09	11.53	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	10	0.09	11.49	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00
Sum			0.95	0.96	0.47	0.51	0.52	0.96	Sum			0.96	0.96	0.47	0.52	0.52	0.96

transversale  
verticale

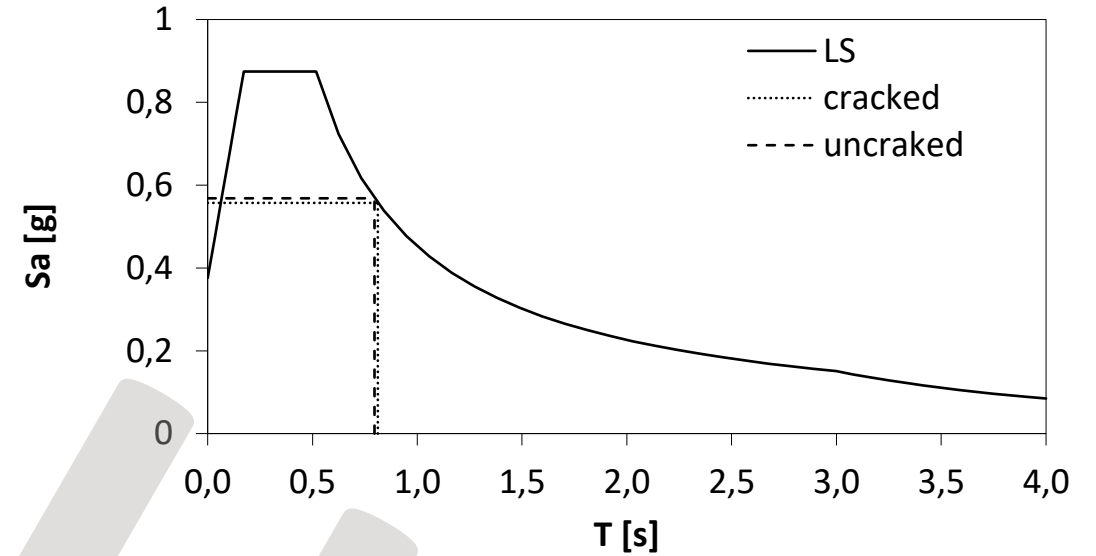
In questo caso la debolezza trasversale della pila rende affidabile l'ipotesi di fessurazione in condizioni di SLV



## Effetto della fessurazione sull'accelerazione spettrale



**Direzione trasversale**  
**Riduzione del 26% della domanda**



**Direzione longitudinale**  
**Riduzione del 2% della domanda**

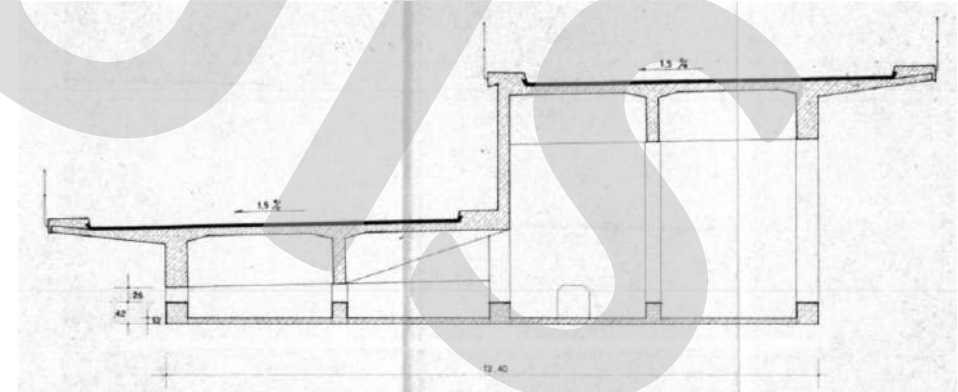
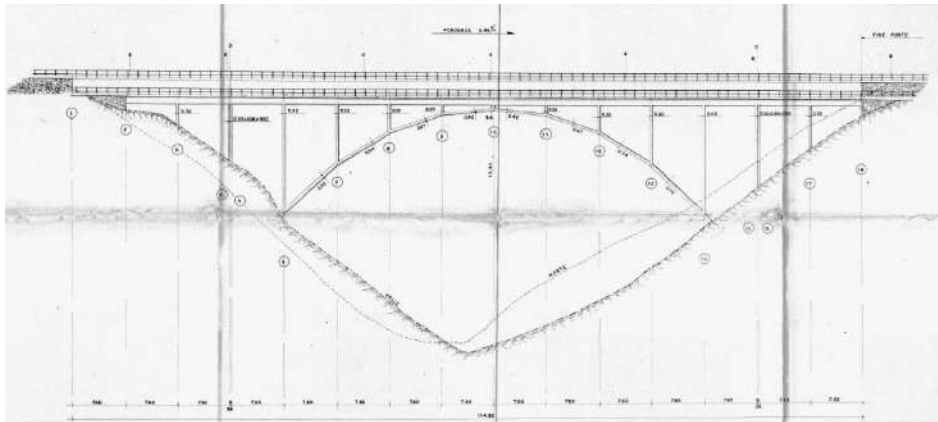
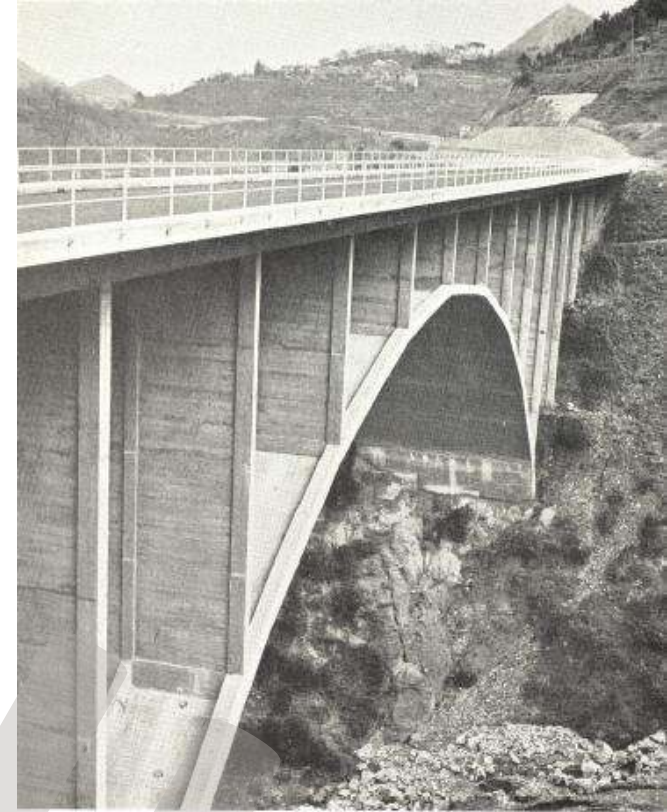
**Per il fattore di comportamento si assume  $q=1$  perché il ponte non presenta riserve di duttilità. Il vincolo alla base è una cerniera e nelle colonne delle pile si genera trazione in presenza di sisma trasversale**



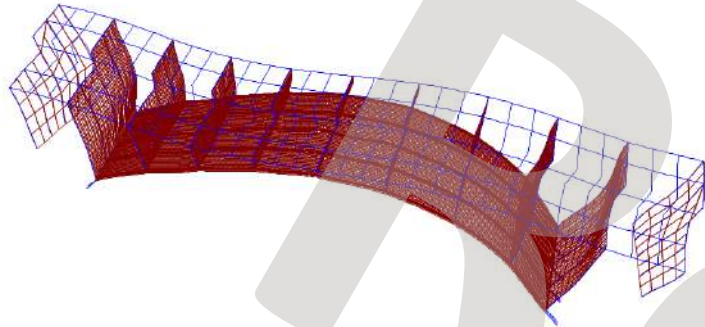
# Ponti ad arco in cemento armato a via superiore: volte sottile con impalcato irrigidente



struttura iperstatica



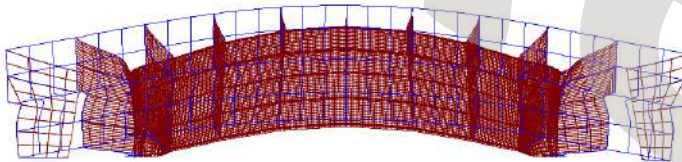
# Sezione trasversale impalcato in c.a., forma di trave a Z: flessionalmente rigida / torsionalmente flessibile



Modo dominante di traslazione longitudinale.

rapporto di massa partecipante (modello numerico) 69%

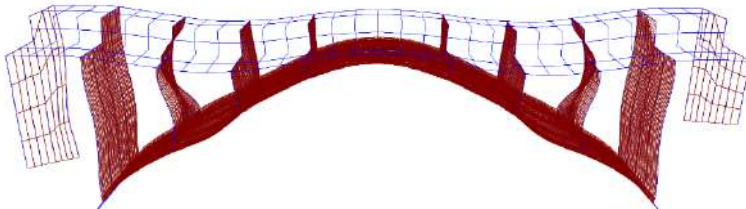
$$f_{\text{num}} = 2.49 \text{ Hz} - f_{\text{exp}} = 2.78 \text{ Hz}$$



Modo dominante di traslazione trasversale.

rapporto di massa partecipante 67%

$$f_{\text{num}} = 3.83 \text{ Hz} - f_{\text{exp}} = 3.62 \text{ Hz}$$



Modo dominante di traslazione verticale.

rapporto di massa partecipante 55%

$$f_{\text{num}} = 7.85 \text{ Hz} - f_{\text{exp}} = 7.70 \text{ Hz}$$

Modo 1 - f 2.78 [Hz]

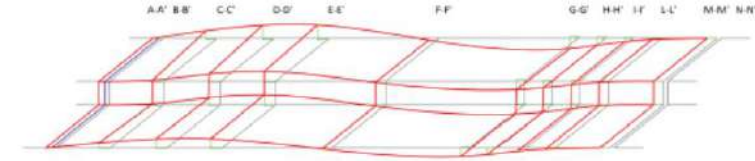


Figura 6. Rappresentazione grafica modo I

Modo 2 - f 3.62 [Hz]

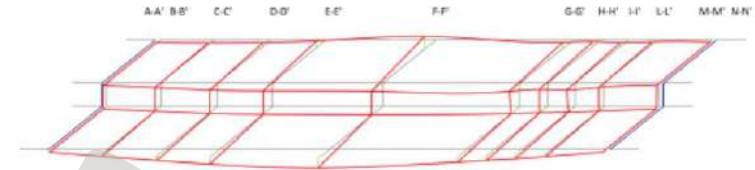


Figura 7. Rappresentazione grafica modo II

Modo 7 - f 7.7 [Hz]

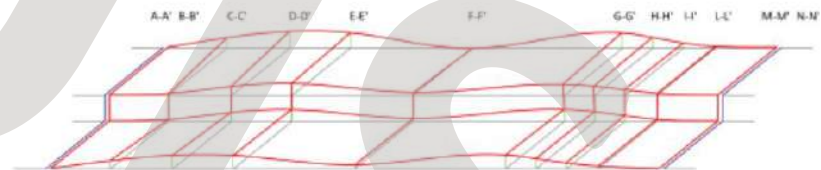


Figura 12. Rappresentazione grafica modo VII

Il rapporto alto rigidità flessionale/torsionale ha come risultato accoppiamento torsione-flessione, come si evince sia dall'analisi numerica sia dai risultati della identificazione dinamica.

Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

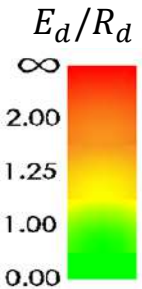
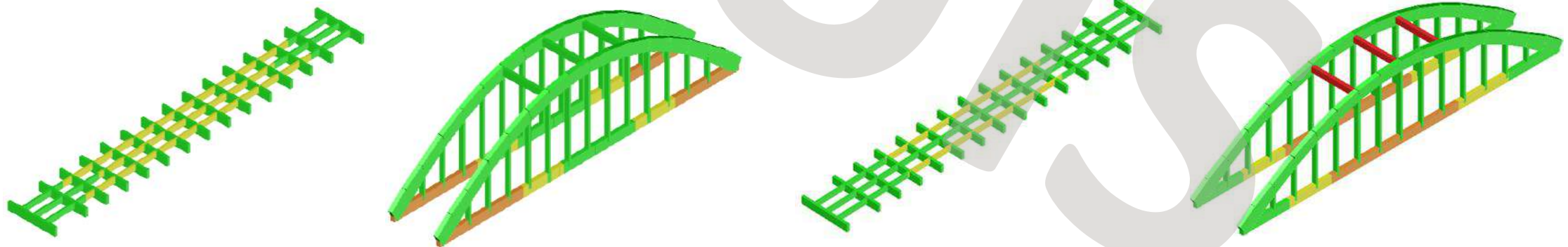
Le linee guida per i ponti esistenti

## Principali criticità strutturali

CRITICITA'		CAUSE
STATICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Pendini</li> <li>→ Travi longitudinali interne</li> <li>→ Soletta</li> <li>→ Catene</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumento carichi da traffico</li> <li>Scarsa capacità di ripartizione della soletta</li> </ul>
SISMA	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Controventi tra archi</li> <li>→ Sottostrutture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mancato dimensionamento o sottodimensionamento</li> </ul>
STATICA e SISMA	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Apparecchi di appoggio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Assenza</li> <li>Sottodimensionamento azioni statiche</li> <li>Mancato dimensionamento azioni sismiche</li> </ul>

### VERIFICHE STATICHE

### VERIFICHE SISMICHE



# Ponti ad arco in muratura

## Classificazione

La classificazione è basata su parametri geometrici, facilmente identificabili con semplici ispezioni visive e rilievo geometrico.

In particolare si considerano i seguenti parametri:

**N** - numero di campate

**L** – luce max campata

**F** - freccia

**s** – spessore dell'arco

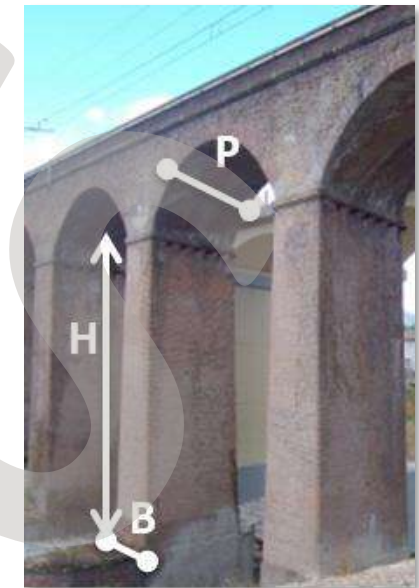
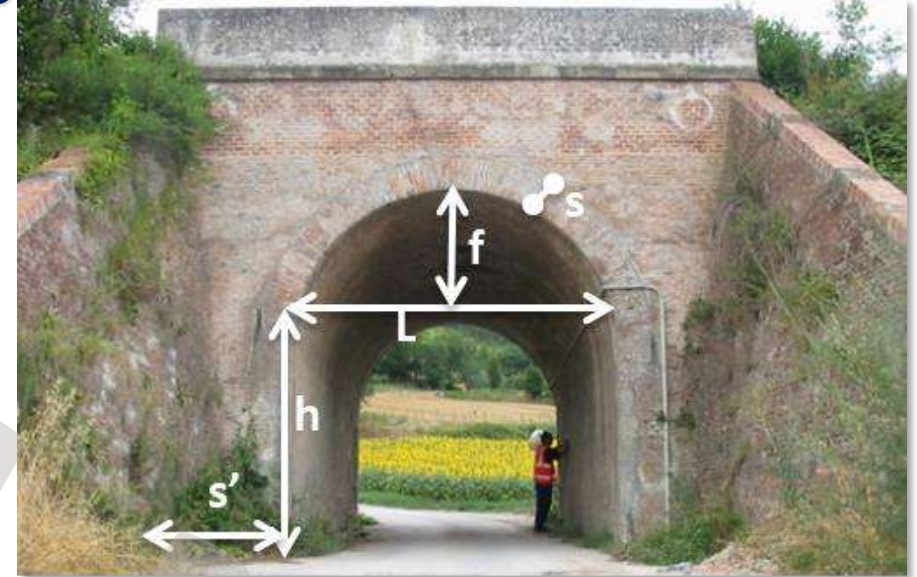
**H** – altezza della pila

**h** - altezza della spalla

**P** - dimensione trasversale (ponte/pila)

**B** - larghezza (long.) della pila

**s'** – larghezza (long.) della spalla



# Ponti ad arco in muratura

## Classificazione

### TIPOLOGIE RICORRENTI:

- a) Monocampata con spalle tozze
- b) Monocampata con spalle alte
- c) Ponti a 2-3 campate con pile tozze
- d) Ponti a 2-3 campate con pile snelle
- e) Ponti multicampata ( $n > 3$ ) con pile tozze
- f) Ponti multicampata ( $n > 3$ ) con pile snelle



a)



b)



c)



d)



e)



f)



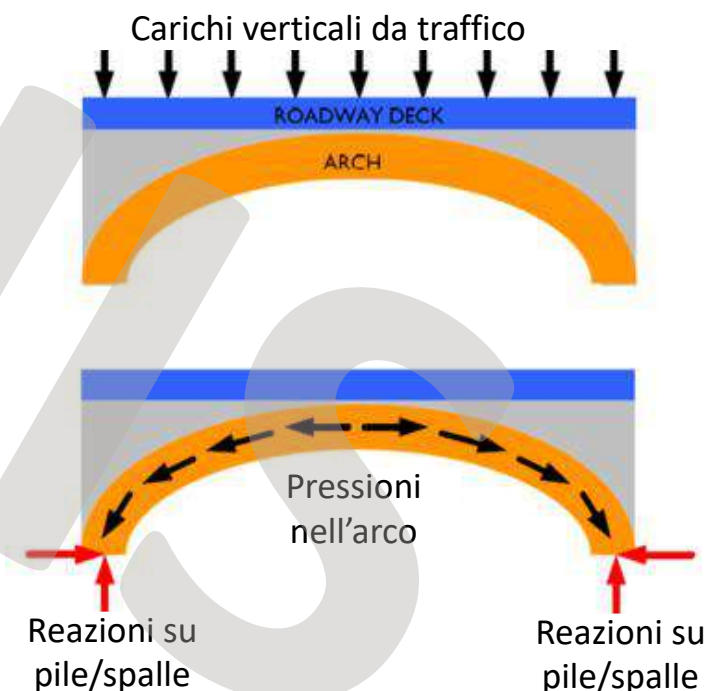
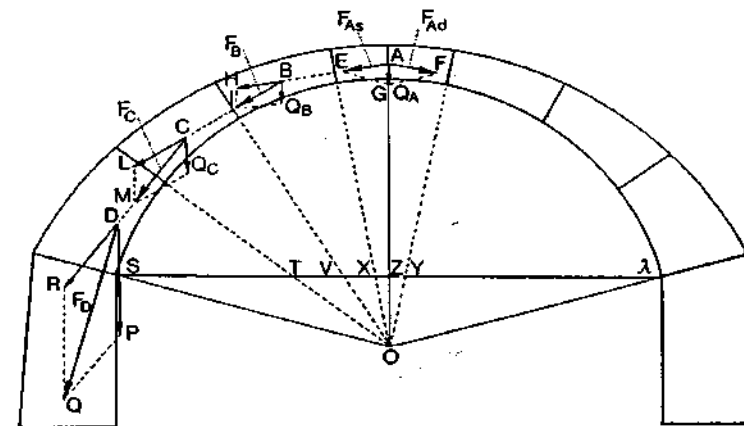
# Ponti ad arco in muratura

## Funzionamento strutturale

L'arco è sottoposto ad azioni verticali di peso (peso proprio e peso portato) e grazie alla sua conformazione trasmette queste forze alle spalle verticali con direzioni inclinate. Poiché il concio di chiave non può traslare verso il basso, a causa della presenza dei conci adiacenti, scarica il suo peso su di essi che a loro volta lo trasmettono, sommandovi il proprio, al concio successivo, fino alle spalle.

Le forze inclinate originate dal mutuo contrasto tra i conci determinano quindi una risultante totale, anch'essa inclinata, che una volta trasmessa alle spalle si scompone in una componente verticale e una orizzontale.

Quest'ultima componente rende l'arco un sistema spingente in quanto le spalle tendono a ribaltarsi verso l'esterno per effetto di tale forza.

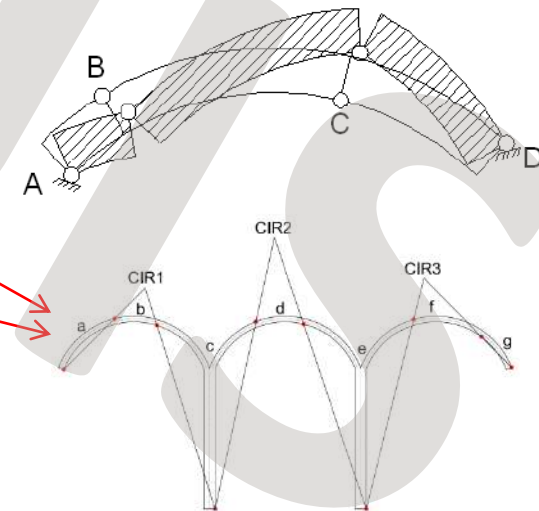


# Ponti ad arco in muratura

## Meccanismi di collasso

- I ponti in muratura generalmente hanno elevata rigidezza da garantire la quasi totale assenza di spostamenti relativi finché il valore dell'accelerazione sismica non è tale da trasformare la struttura in un **meccanismo**.
- L'insorgere di un numero sufficiente di cerniere plastiche porta al collasso della struttura. Il parametro decisivo per la determinazione della risposta strutturale è **l'accelerazione di picco al suolo** attesa per il sito.
- La risposta sismica di ponti in muratura è generalmente riconducibile a un problema di equilibrio e non a un problema legato a tensioni/deformazioni, per questo i parametri che maggiormente influenzano la risposta sismica sono quelli **geometrici**.

MECCANISMI DI COLLASSO PER PONTI AD ARCO IN MURATURA	Meccanismo cinematico dell'arco
	Meccanismo cinematico del timpano
	Rottura per taglio e flessione delle spalle/pile
	Ribaltamento della pila/fondazione
	Slittamento della pila/fondazione
	Ribaltamento della spalla/fondazione
	Slittamento della spalla/fondazione



# Ponti ad arco in muratura

## Meccanismi di collasso

### Parametri geometrici che influenzano la risposta sismica:

#### ✓ Meccanismi longitudinali:

##### ✓ Monocampata “spalle rigide”/ (2-3 e) multi-campata con “pile tozze”:

- ✓ Rapporto freccia/luce  $f/L$
- ✓ Rapporto spessore/luce  $S/L$

##### ✓ Monocampata “spalle alte”:

- ✓ Rapporto altezza spalla/spessore spalla  $h/s'$
- ✓ Rapporto spessore/luce  $S/L$

##### ✓ (2-3 e) multi-campata “pile snelle”:

- ✓ Rapporto altezza/base pila  $H/B$
- ✓ Rapporto freccia/luce  $f/L$
- ✓ Rapporto spessore/luce  $S/L$

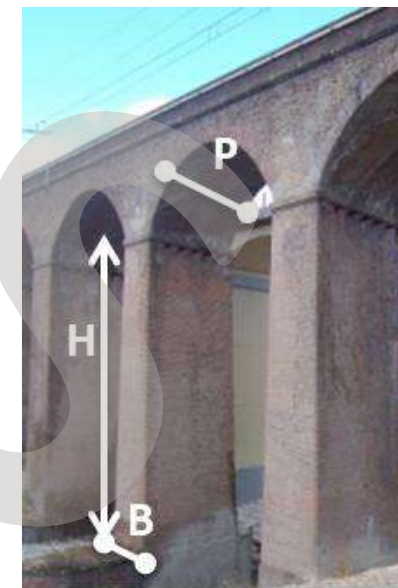
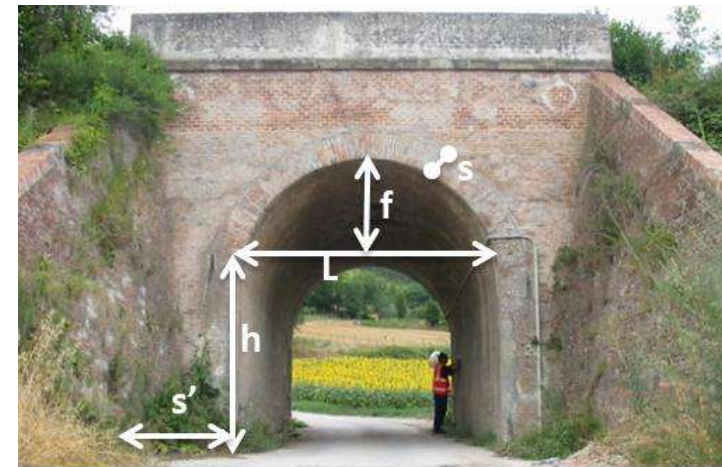
#### ✓ Meccanismi trasversali:

##### ✓ (2-3 e) multi-campata “pile snelle”:

- ✓ Rapporto altezza/base pila  $H/B$
- ✓ Luce  $L$

##### ✓ Meccanismo fuori piano del timpano:

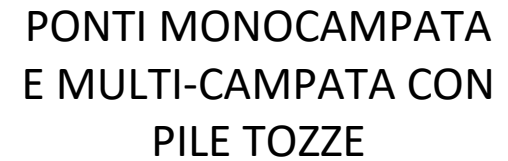
- ✓ Altezza e spessore timpano  $t, z$



# Ponti ad arco in muratura

## Meccanismi di collasso

- **A – L** : meccanismo di collasso longitudinale dell'arco
- **AA – L** : meccanismo di collasso longitudinale dell'arco – spalla
- **AP – L** : meccanismo longitudinale arco-pila
- **AP – T** : meccanismo trasversale arco-pila
- **SW – T** : meccanismo trasversale del timpani



PONTI MONOCAMPATA  
E MULTI-CAMPATA CON  
PILE TOZZE



PONTI  
MULTI –CAMPATA  
CON PILE SNELLE

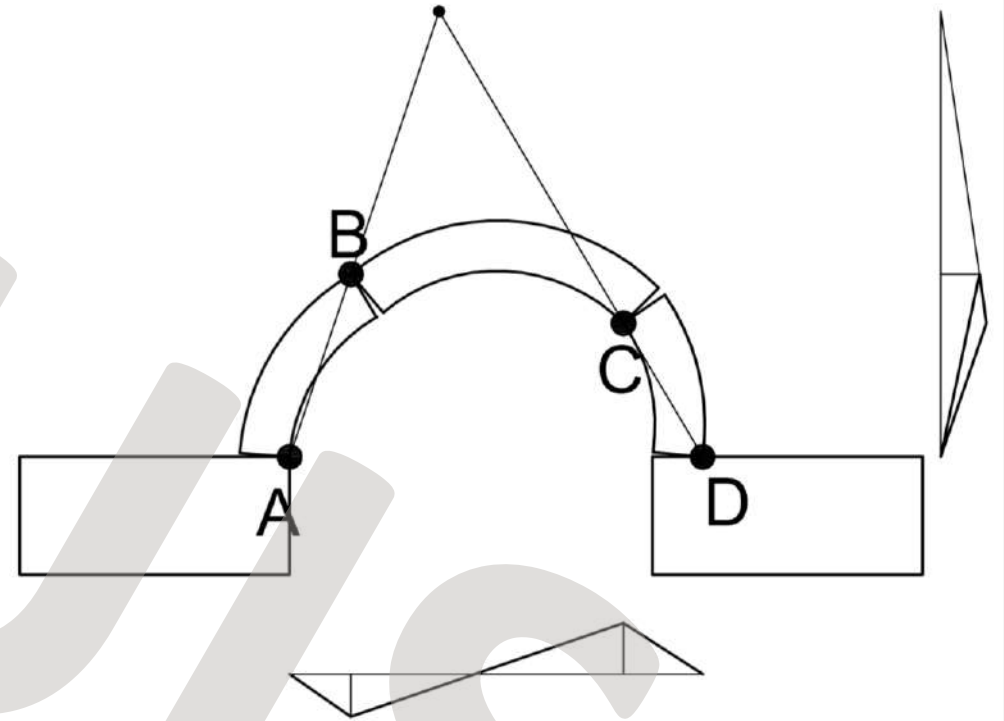
### MECCANISMO A – L : meccanismo di collasso longitudinale dell'arco

#### Ponti monocampata «Spalle Rigide» (meccanismo longitudinale):

I ponti a singola campata sono generalmente caratterizzati da imposte massive, che si possono considerare come vincolo rigido.

L'elemento maggiormente vulnerabile all'azione sismica longitudinale risulta essere l'arco, che può sviluppare un meccanismo di collasso antisimmetrico attraverso la formazione di quattro cerniere.

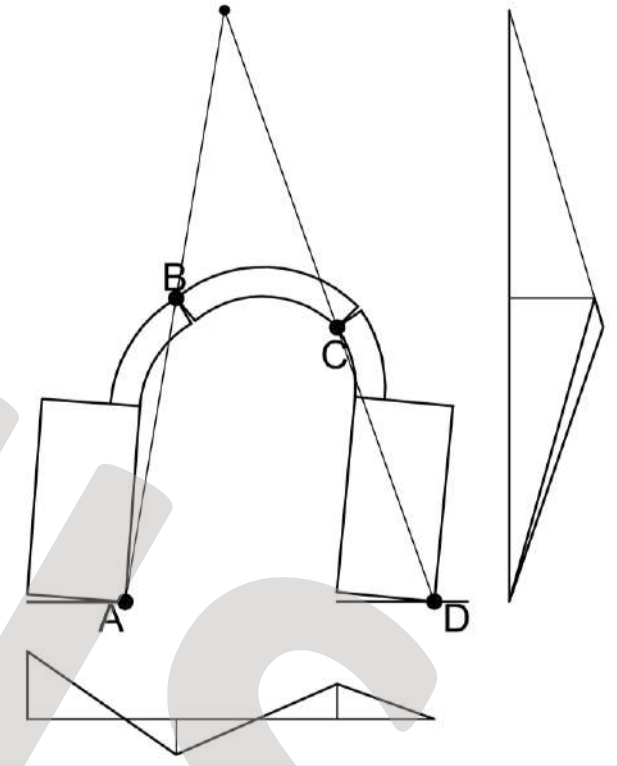
In questo caso la risposta sismica del ponte è influenzata prevalentemente dalle caratteristiche geometriche dell'arco; in particolare dal rapporto freccia-luce e dalle dimensioni dello spessore dell'arco.



### MECCANISMO AA – L : meccanismo di collasso longitudinale dell'arco-spalla

#### Ponti monocampata «Spalle Alte» (meccanismo longitudinale):

Quando nei ponti mono-campata il rapporto tra l'altezza e lo spessore nella direzione longitudinale della spalla è sufficientemente grande, il meccanismo più vulnerabile in direzione longitudinale è quello che coinvolge anche le imposte e non solo l'arco.

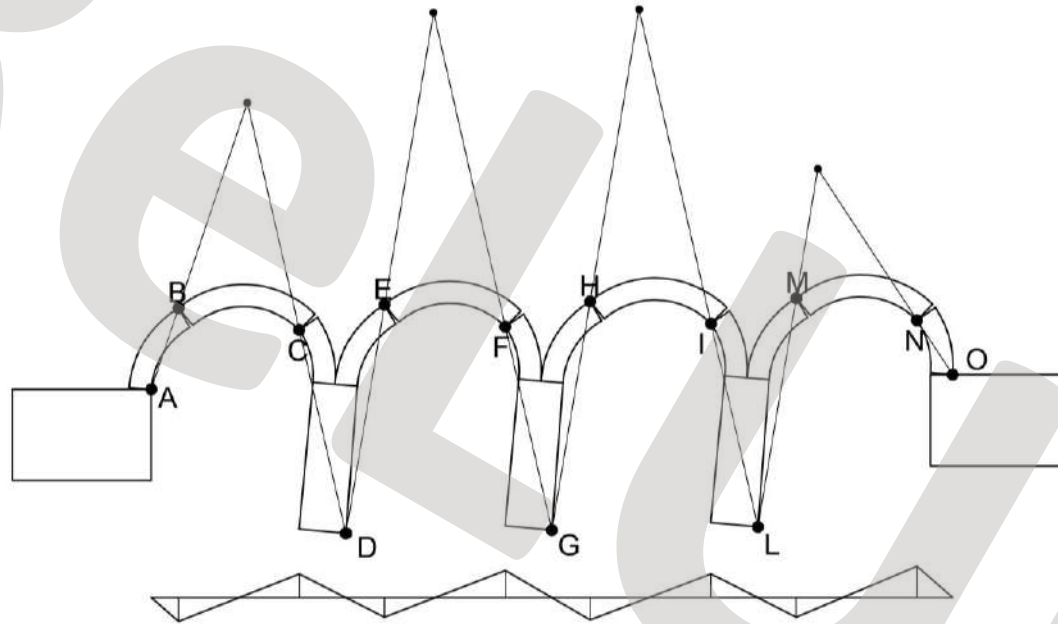


In questo caso la risposta sismica del ponte è influenzata prevalentemente dalle caratteristiche geometriche della spalla (in particolare il rapporto altezza-luce) e in maniera meno preponderante dalle caratteristiche dell'arco.

# Ponti ad arco in muratura

## Meccanismi di collasso

### MECCANISMO AP – L : meccanismo di collasso longitudinale dell'arco-pila



### **Ponti multi-campata con pile snelle (meccanismo longitudinale):**

la vulnerabilità sismica in direzione longitudinale è influenzata dalla snellezza delle pile, ovvero dal rapporto **altezza-larghezza** della pila: quanto più cresce tale rapporto tanto più il meccanismo di collasso della struttura diventa un meccanismo globale che, oltre all'arco, coinvolge anche le pile, che tendono a ribaltarsi per la formazione di cerniere plastiche alla base delle stesse.

### MECCANISMO AP – L : meccanismo di collasso longitudinale dell'arco-pila



Guantong Bridge, China



Guantong Bridge, China

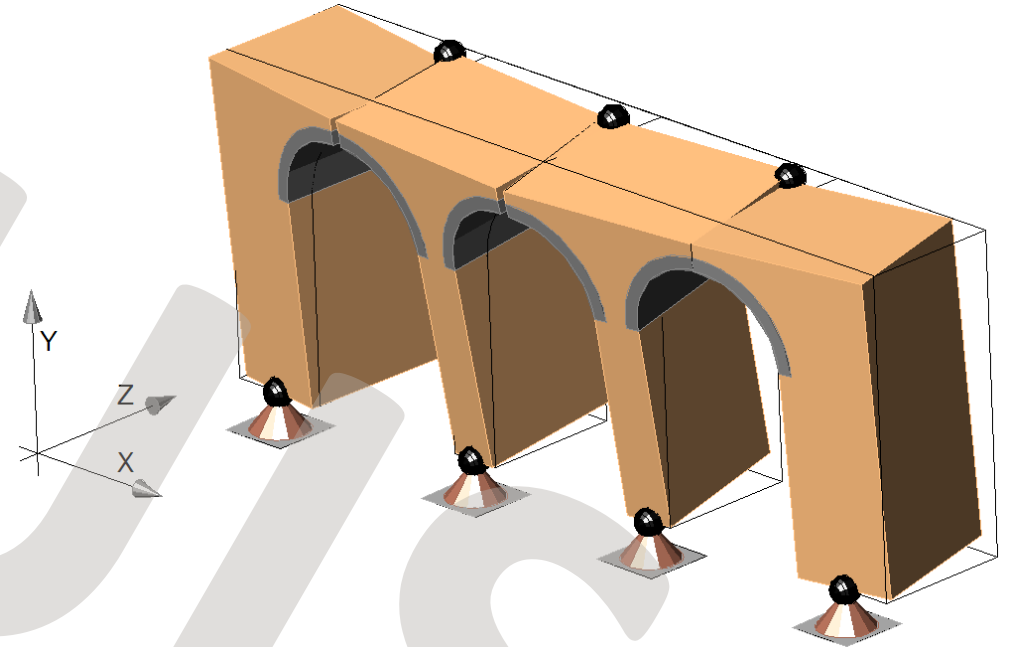
Di Sarno L., da Porto F., Guerrini G., Calvi P.M., Camata G. e Prota A. – Seismic performance of bridges during the 2016 Central Italy earthquakes – Bulletin of Earthquake Engineering – Agosto 2018



### MECCANISMO AP – T : meccanismo di collasso trasversale dell'arco-pila

#### Ponti multi-campata con pile snelle (meccanismo trasversale):

Per ponti con pile tozze l'unico elemento vulnerabile all'azione sismica trasversale è il timpano. Ponti multi-campata snelli posso essere vulnerabili all'azione sismica trasversale attraverso l'attivazione di un meccanismo di collasso che coinvolge le pile dove si formerà una cerniera alla base delle pile e la rottura delle arcate.



Il comportamento ad azione sismica trasversale di un ponte multi-campata è influenzato dalla **snellezza** delle pile e dalla **larghezza** del ponte.

# Ponti ad arco in muratura

## Meccanismi di collasso

### MECCANISMO AP – T : meccanismo di collasso trasversale dell'arco-pila

Collasso del ponte Rio Claro  
(terremoto Maule 2010)



Collasso del ponte Yingchun  
(terremoto Wenchuan 2008)



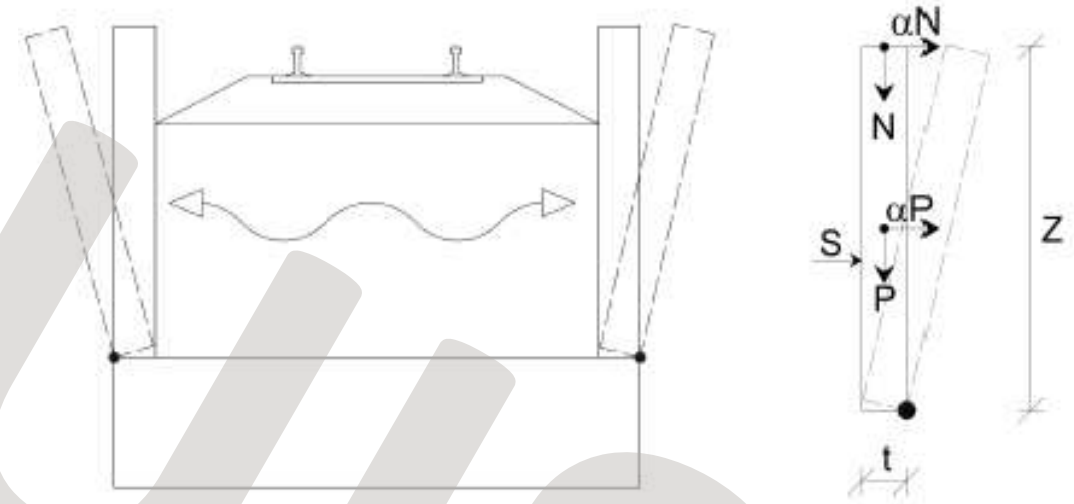
Collasso del ponte Rio Claro (terremoto Maule 2010)

### MECCANISMO SW – T : meccanismo trasversale del timpano

#### Meccanismo trasversale del timpano:

Il timpano nella maggior parte dei casi rappresenta l'elemento più vulnerabile all'azione sismica trasversale. La limitata inerzia fuori dal piano del timpano non è in grado di contrastare l'azione trasversale di terremoti di entità anche poco rilevanti.

Il collasso del timpano non compromette la sicurezza globale della struttura, ma ne impedisce l'accessibilità/utilizzo con conseguenze sulla funzionalità della rete ferroviaria.



*Peso proprio P del muro*  
*Spinta S del materiale di riempimento*  
*Forze sismiche generate dalle masse*  
*Spinta statica e dinamica del materiale di riempimento rappresentate da una unica forza S applicata ad h/2.*

### MECCANISMO SW – T : meccanismo trasversale del timpano



Collasso del timpano – terremoto 1977 Umbria e Marche



Danneggiamento del timpano – terremoto 2001  
Bhuj



Collasso del parapetto – terremoto 2011 Nuova  
Zelanda

# PONTE TRE OCCHI

Ponte in muratura a tre campate

Terremoto: Amatrice  
2016 Centro Italia

- a) parziale collasso del muro d'ala Sud-Est;
- b) parziale collasso del muro d'ala Nord-Est;
- c) lesioni sopra la spalla ad Est
- d) lesioni preesistenti sul manto stradale, in corrispondenza del giunto con la spalla.

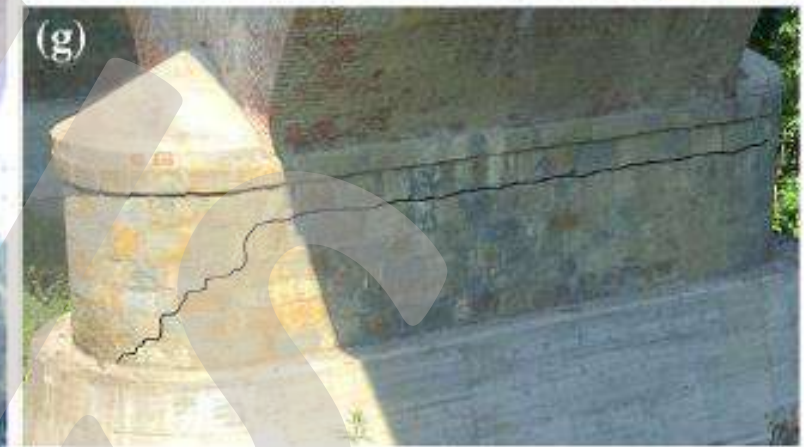


### PONTE TRE OCCHI

e) lesione sull'intradosso dell'arco;

f) lesione alla base dell'arco in corrispondenza della spalla;

g) in corrispondenza della pila



### PONTE CINQUE OCCHI

Ponte in muratura a  
cinque campate

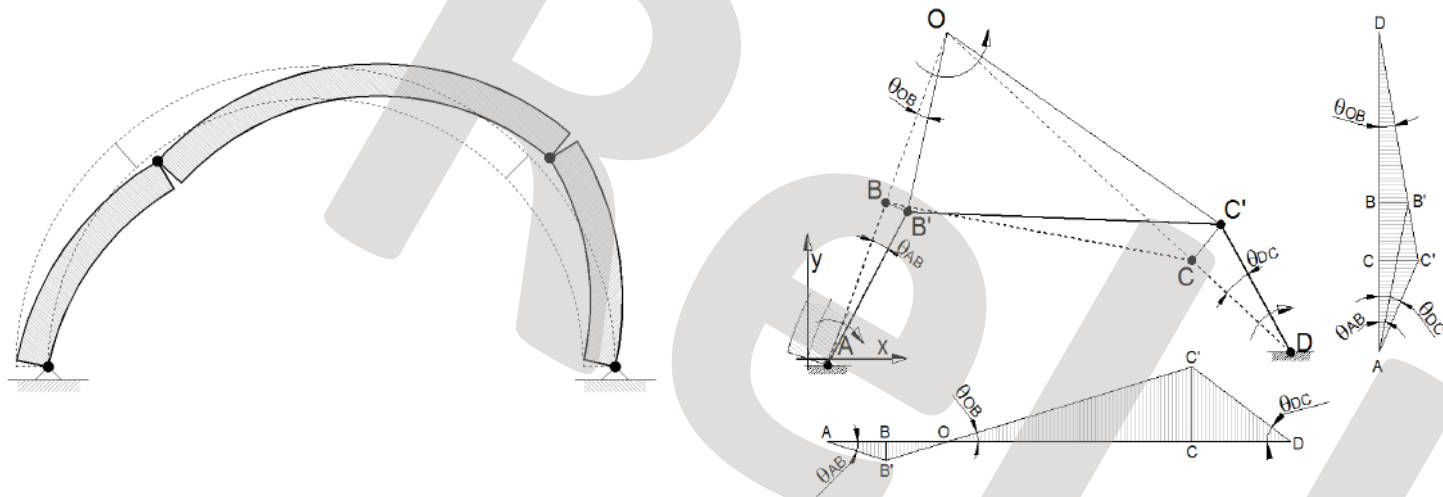
Terremoto: Amatrice  
2016 Centro Italia

- a) vista del ponte;
- b) e c) parziale collasso del timpano e perdita di materiale, che evidenzia un precedente intervento;
- d) collasso del timpano in corrispondenza della spalla sud.



# Ponti ad arco in muratura

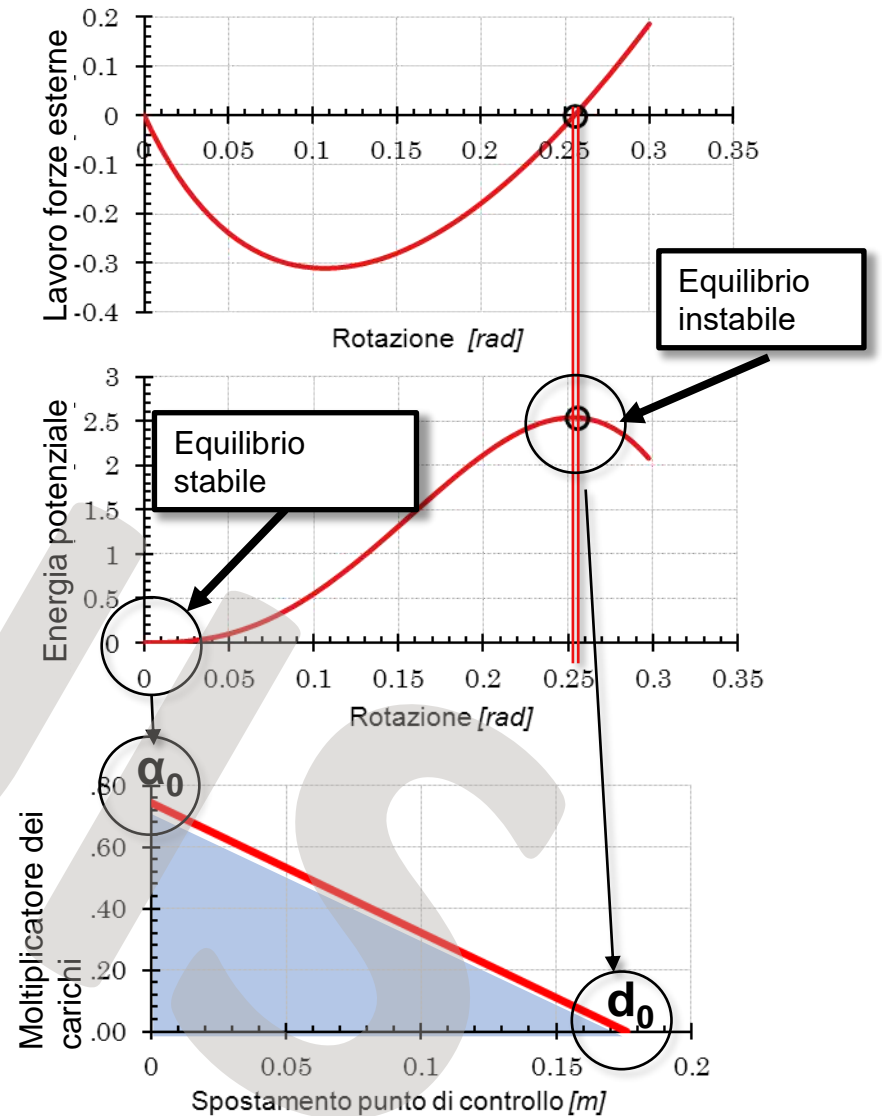
## Analisi limite: il metodo CINEMATICO



Raggiunto il valore critico del moltiplicatore dei carichi orizzontali la struttura si trasforma in meccanismo. Il cinematismo, sotto carichi orizzontali, continua a deformarsi fino a quando si ha la perdita di equilibrio.

La perdita di equilibrio coincide con:

- l'annullamento del moltiplicatore dei carichi;
- lavoro nullo delle forze esterne;
- punto di massimo dell'energia potenziale.

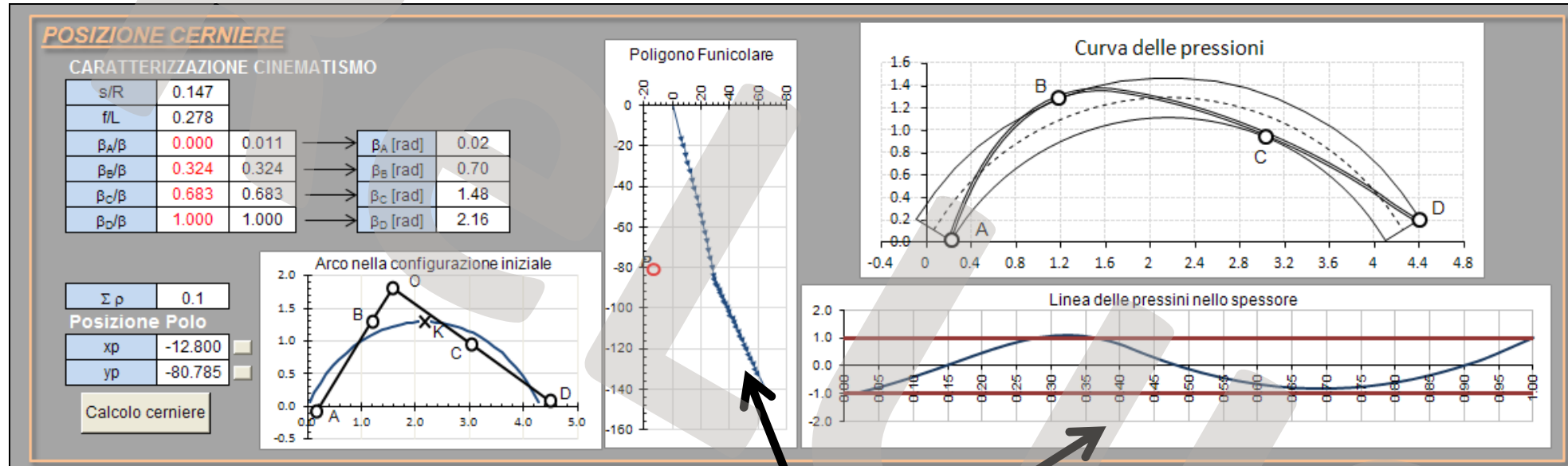




# Ponti ad arco in muratura

## Analisi limite: il metodo CINEMATICO

### ANALISI LIMITE: AUTOMATIZZAZIONE DELLA PROCEDURA

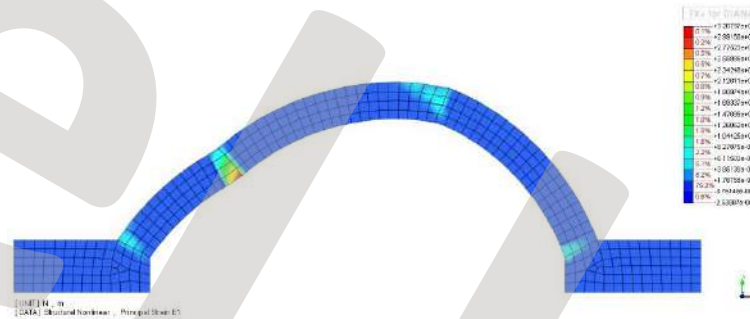


Macro per la risoluzione del poligono funicolare e tracciamento curva delle pressioni

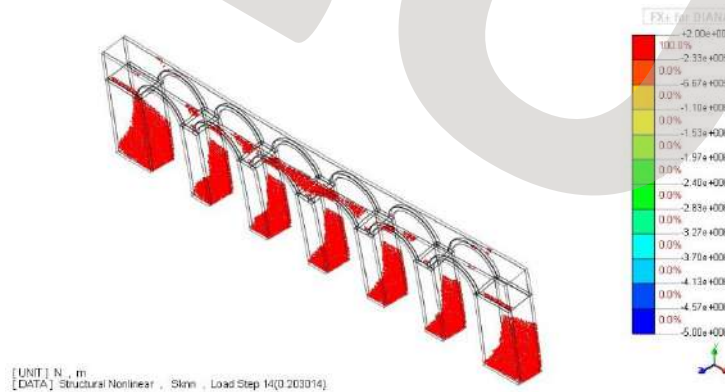
# Ponti ad arco in muratura

## Analisi agli elementi finiti: MODELLAZIONE

Modellazioni agli elementi finiti possono essere utili per descrivere la capacità, di un ponte in muratura, a resistere ad azione sismica in direzione longitudinale e/o trasversale.



-modello (2D) di un ponte monocampata, per analisi longitudinale



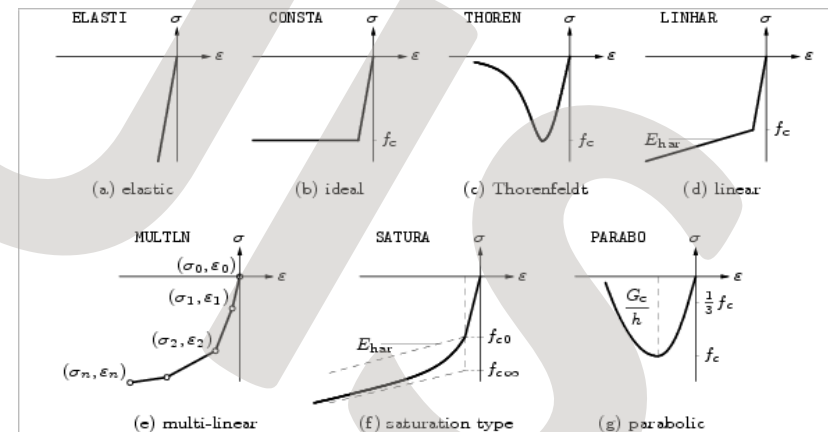
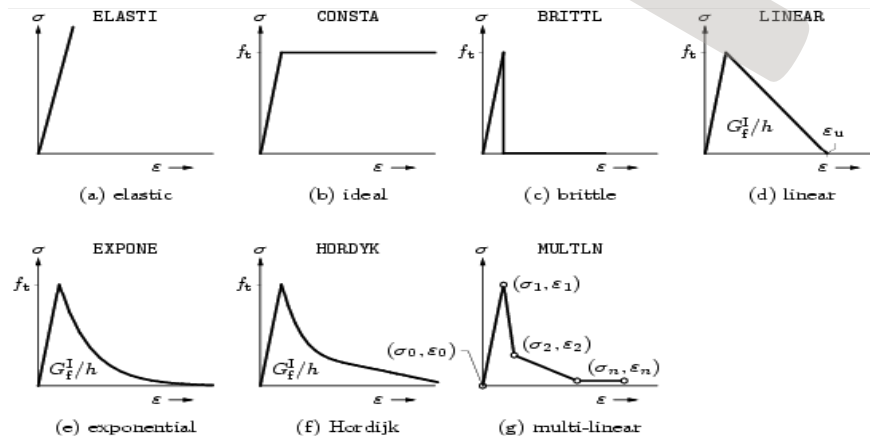
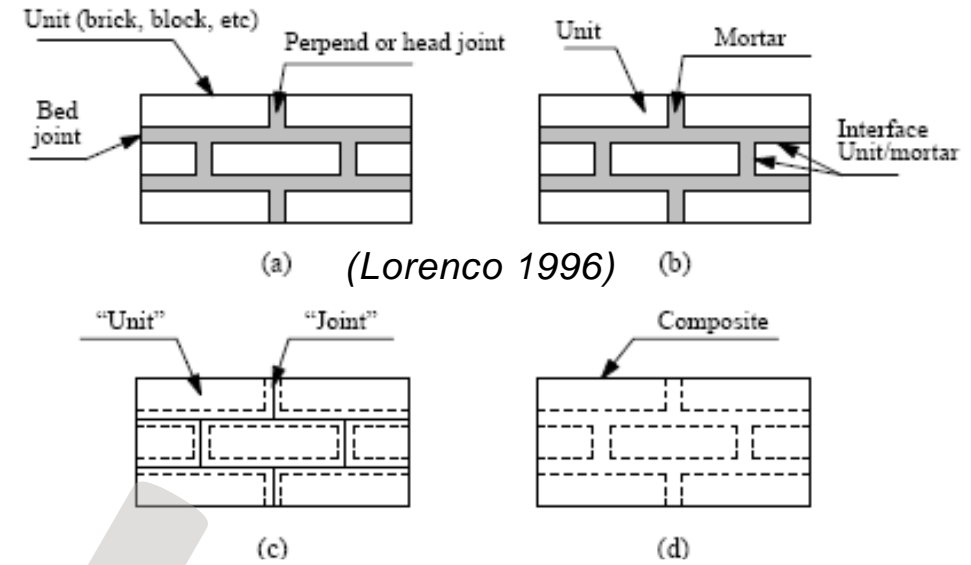
-modello (3D) di un ponte a 6 campate per l'analisi trasversale.

# Ponti ad arco in muratura

## Analisi agli elementi finiti: MODELLAZIONE

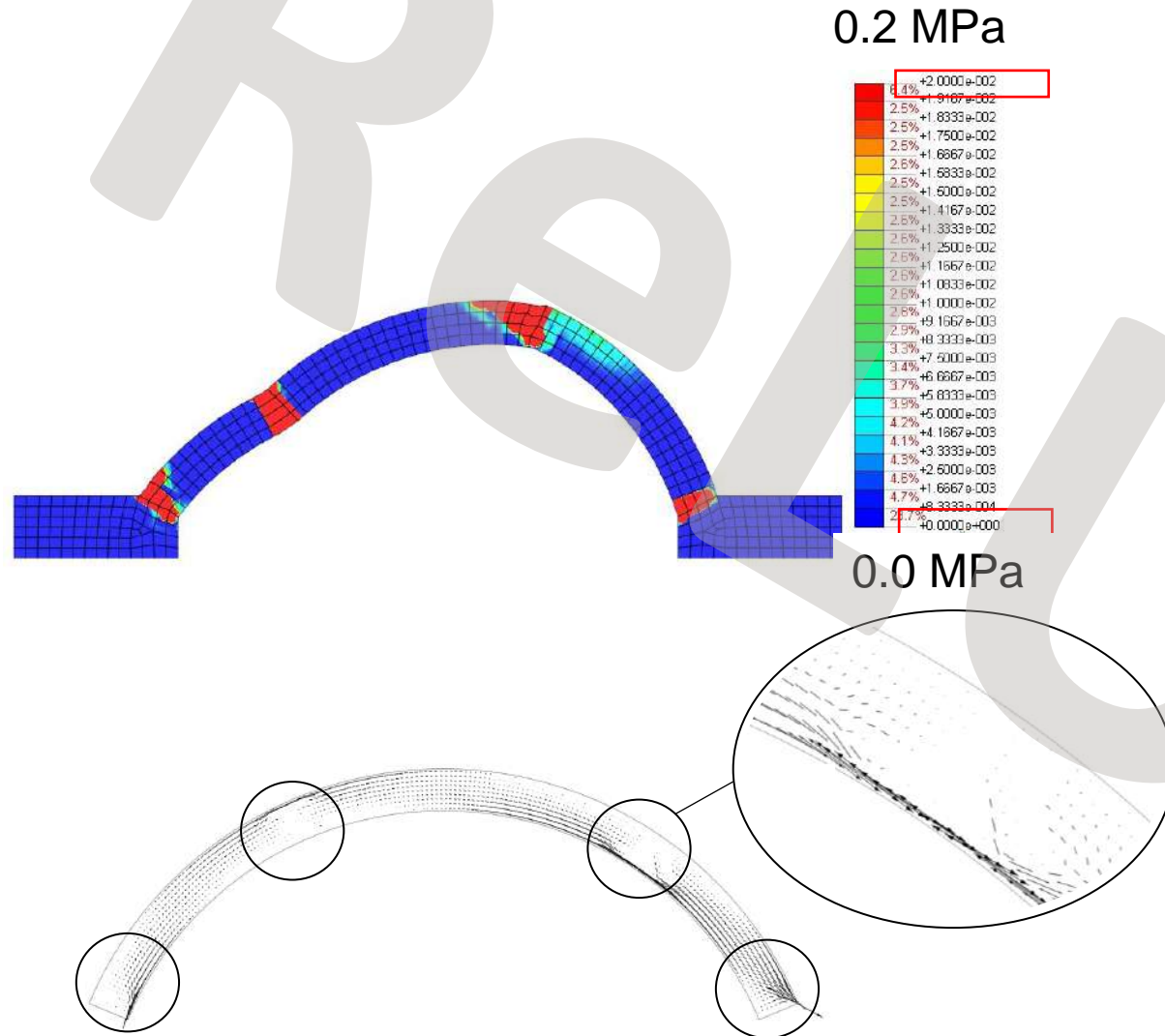
Muratura: materiale non omogeneo, anisotropo, fragile e caratterizzato da legami costitutivi non lineari.

L'analisi numerica può seguire due approcci differenti: la *macromodellazione* (la muratura è descritta da un mezzo continuo equivalente), o la *micromodellazione* (distinzione negli elementi finiti del modello tra giunto e mattone-blocco di pietra).



Comportamento a trazione e a compressione per il modello Total Strain Crack Model

## Analisi agli elementi finiti: MODELLAZIONE PONTE MONOCAMPATA

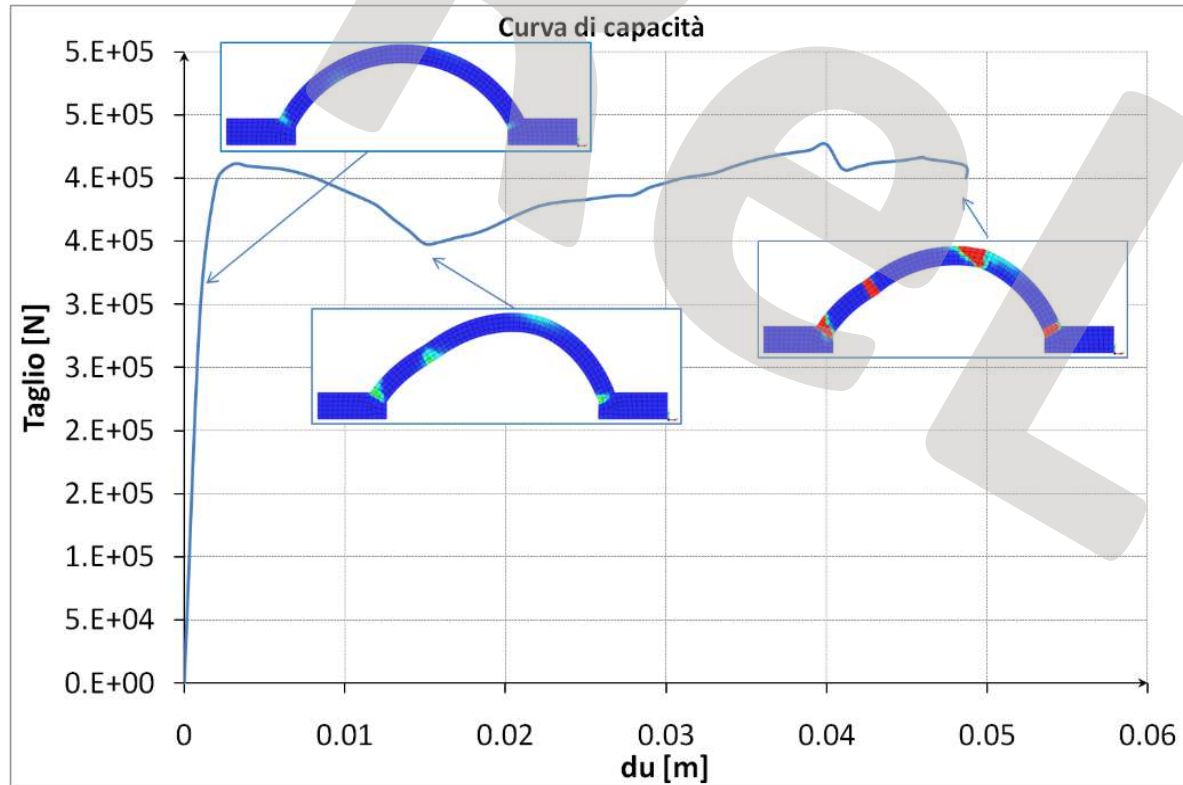


Configurazione a collasso: Mappatura delle tensioni principali di trazione. Formazione del meccanismo di collasso per la propagazione della fessurazione nei punti dove sono localizzate le 4 cerniere.

Vettore delle tensioni principali di compressione. In corrispondenza delle cerniere plastiche si può notare che esiste una concentrazione delle tensioni di compressione all'interno di una piccola porzione dello spessore dell'arco.

## Analisi agli elementi finiti: MODELLAZIONE PONTE MONOCAMPATA

### Curva di capacità:



- apertura delle prime fessure
- maturazione di deformazioni plastiche in corrispondenza delle cerniere
- collasso del ponte.

## Ponti ad arco in muratura

### Analisi agli elementi finiti: MICRO-MODELLAZIONE PONTE MONOCAMPATA

Sono rappresentati distintamente mattoni e giunti di malta. Per la modellazione sono stati adottati i seguenti parametri:

Caratteristiche del mattone:

$$E=20000\text{MPa}$$

$$\nu= 0.25$$

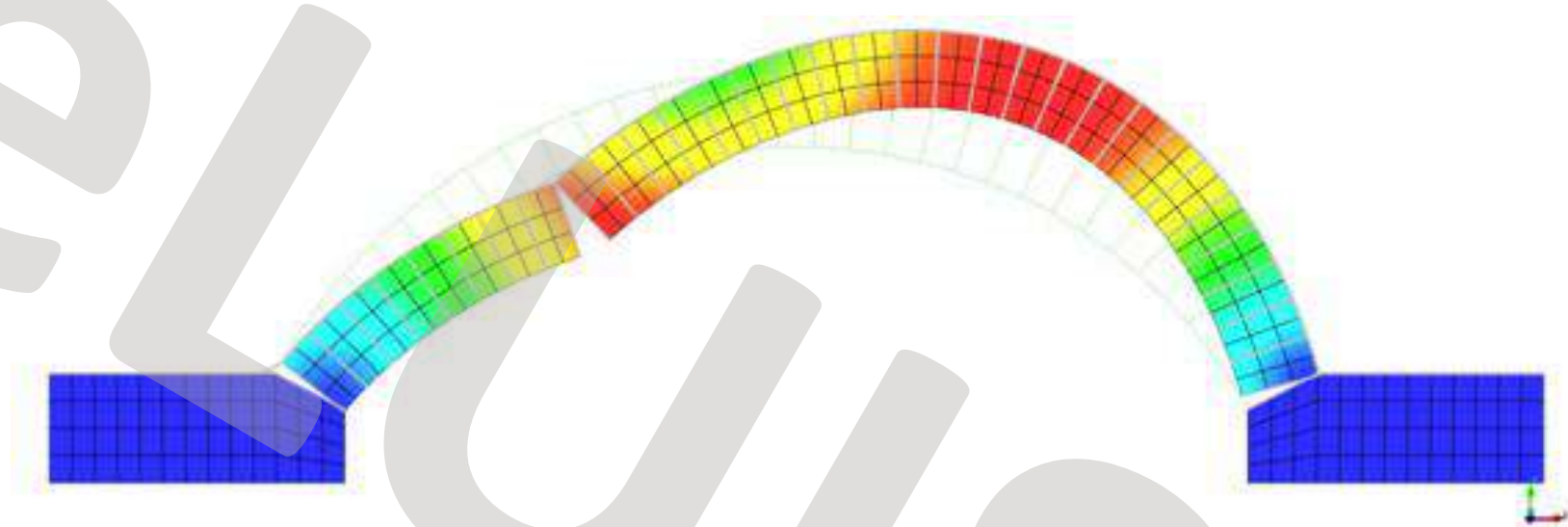
Caratteristiche del giunto:

$$K_n= 100 \text{ N/mm}^3$$

$$K_s= 1 \text{ N/mm}^3$$

dove  $k_n$  e  $k_s$  sono rispettivamente la rigidezza normale e la rigidezza a taglio del giunto.

La nuova modellazione porta a dei risultati ancora più accurati in termini di comportamento a collasso del ponte.



## Sintesi altre caratteristiche che influenzano la risposta sismica Indicazioni di progetto

- I ponti devono essere prevalentemente dritti. Il comportamento di ponti curvi e obliqui ha una risposta più complessa.
- Gli impalcati devono essere preferibilmente continui, con il minor numero di giunti possibile. Gli impalcati isostatici o con molti giunti non sono ridondanti e possono presentare problemi di sostegno se si sottovaluta la lunghezza della superficie da posare sugli appoggi.
- Le fondazioni devono essere eseguite su materiali adeguati. I terreni molli amplificano gli spostamenti, possono dare luogo a problemi di liquefazione e a movimento di terrapieni.
- L'altezza delle pile dovrebbe essere simile. La differenza di altezze comporta rigidità diverse e la concentrazione del danno sulle pile più rigide.
- Le pile dovrebbero avere la stessa rigidità e resistenza in tutte le direzioni. Rigidità e resistenze diverse in direzione longitudinale e trasversale comportano un'inefficienza strutturale.
- Le luci dei vani devono essere moderate. Grandi luci comportano grandi carichi verticali, con una potenziale diminuzione della duttilità.
- Quando si adotta un comportamento duttile, le articolazioni plastiche devono apparire fondamentalmente sulle pile e in zone accessibili agli interventi di ispezione e riparazione.

## Livello 2 – CdA sismica - Pericolosità

	Parametri primari	Parametri secondari
<b>Pericolosità</b>	Accelerazione di picco al suolo e categoria topografica	Categoria di sottosuolo
<b>Vulnerabilità</b>	Schema strutturale, luce e materiale Livello di difettosità	Criteri di progettazione
<b>Esposizione</b>	Livello di TGM e luce media della campata	Alternative stradali Tipologia di ente scavalcato Trasporto di merci pericolose Strategicità dell'opera



## Livello 2 – CdA sismica - Pericolosità

Accelerazione di picco al suolo e categoria topografica

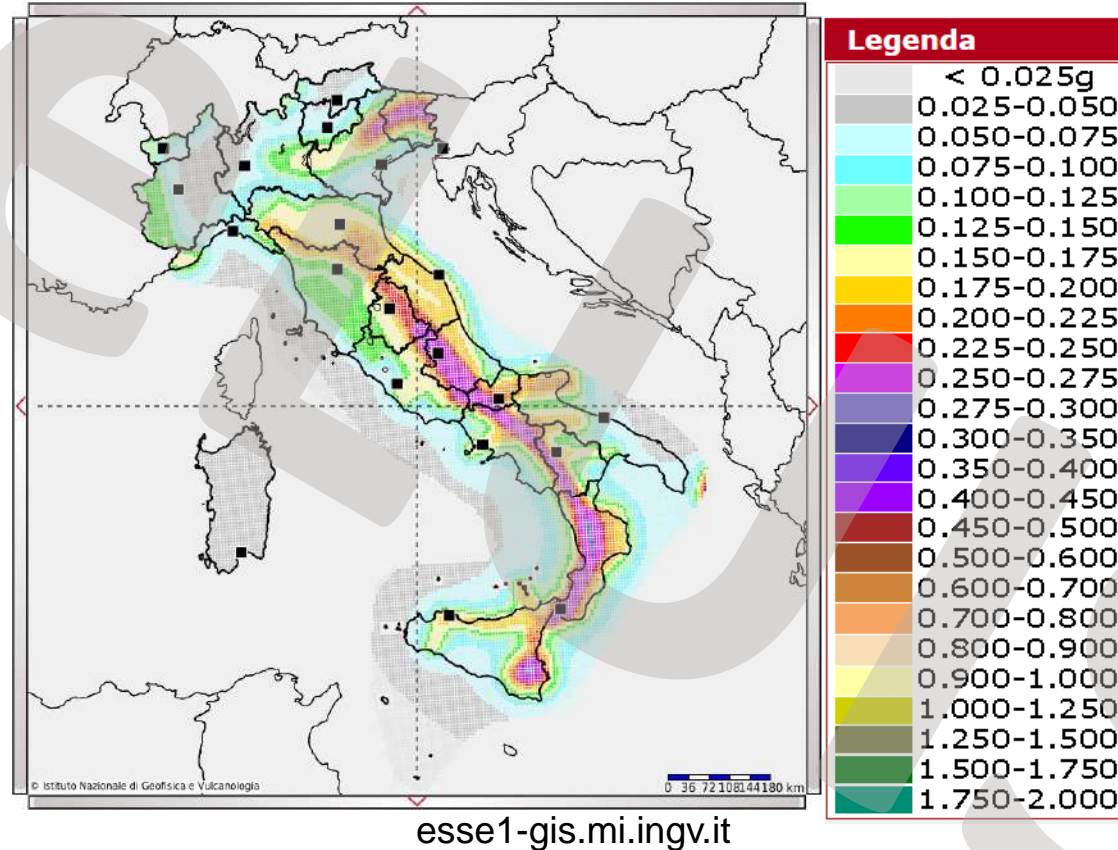
- 1) Coordinate geografiche opera
- 2) Topografica
- 3) Stratigrafia



D.M. 17/01/2018 (NTC2018)



1. Accelerazione di picco su suolo rigido con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni ( $a_g$ )



$$0 \leq T < T_B$$

$$T_B \leq T < T_C$$

$$T_C \leq T < T_D$$

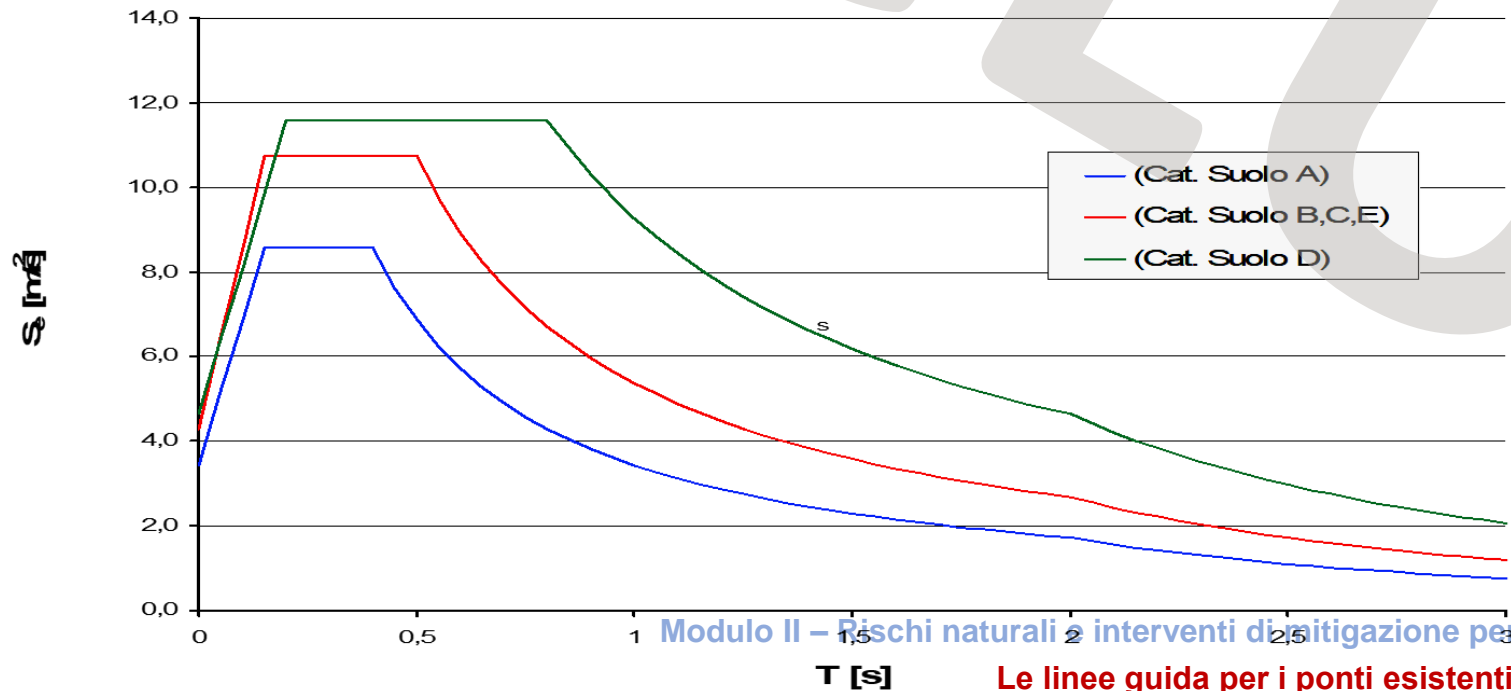
$$T_D \leq T$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left( 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right)$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

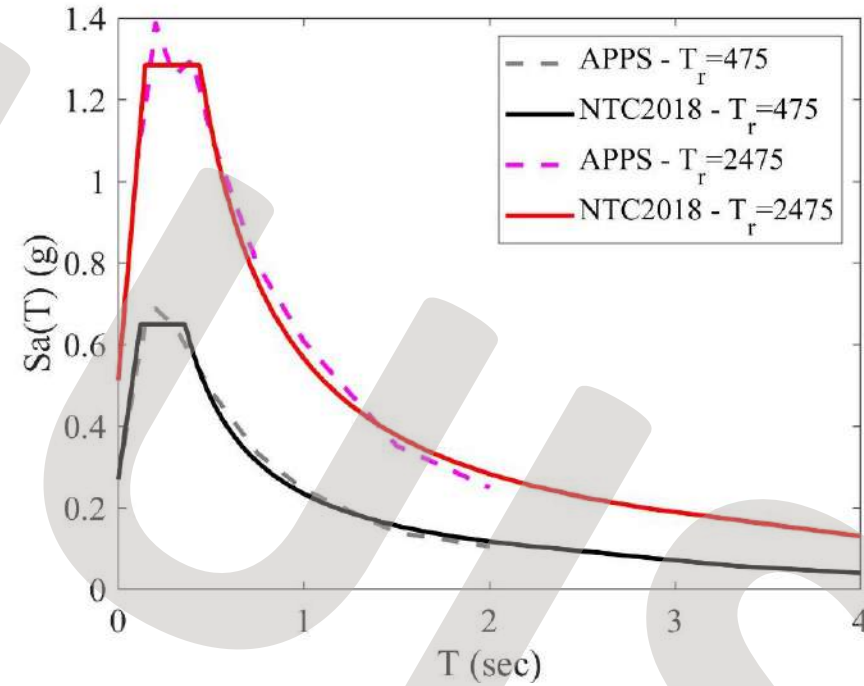
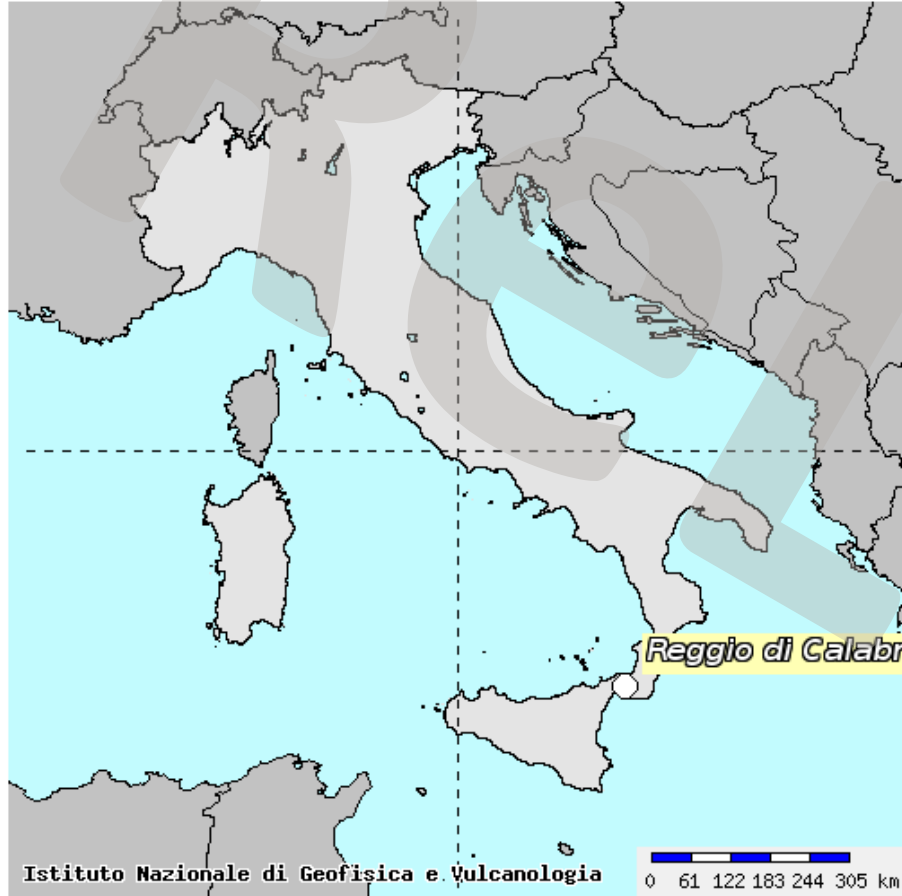
$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

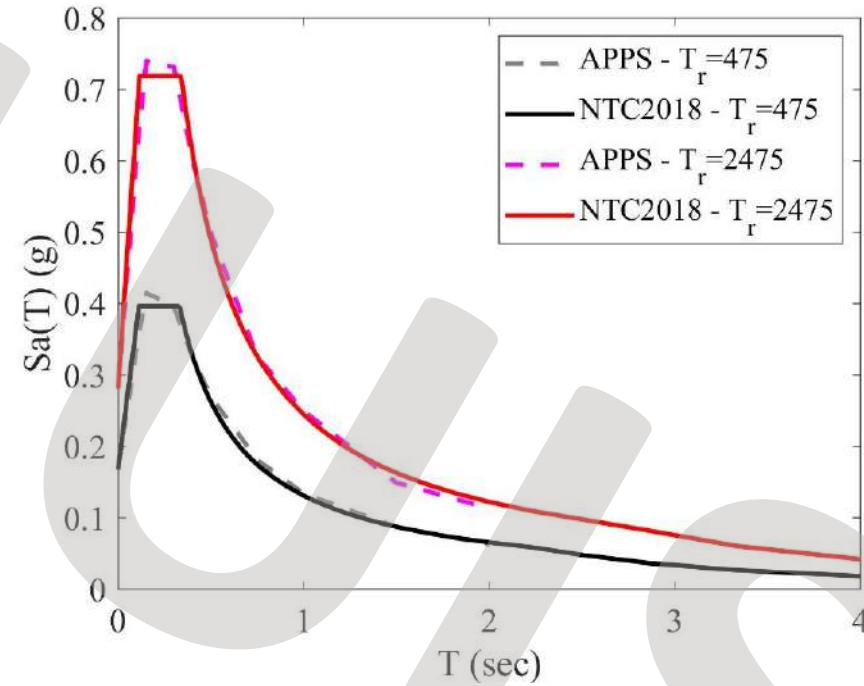
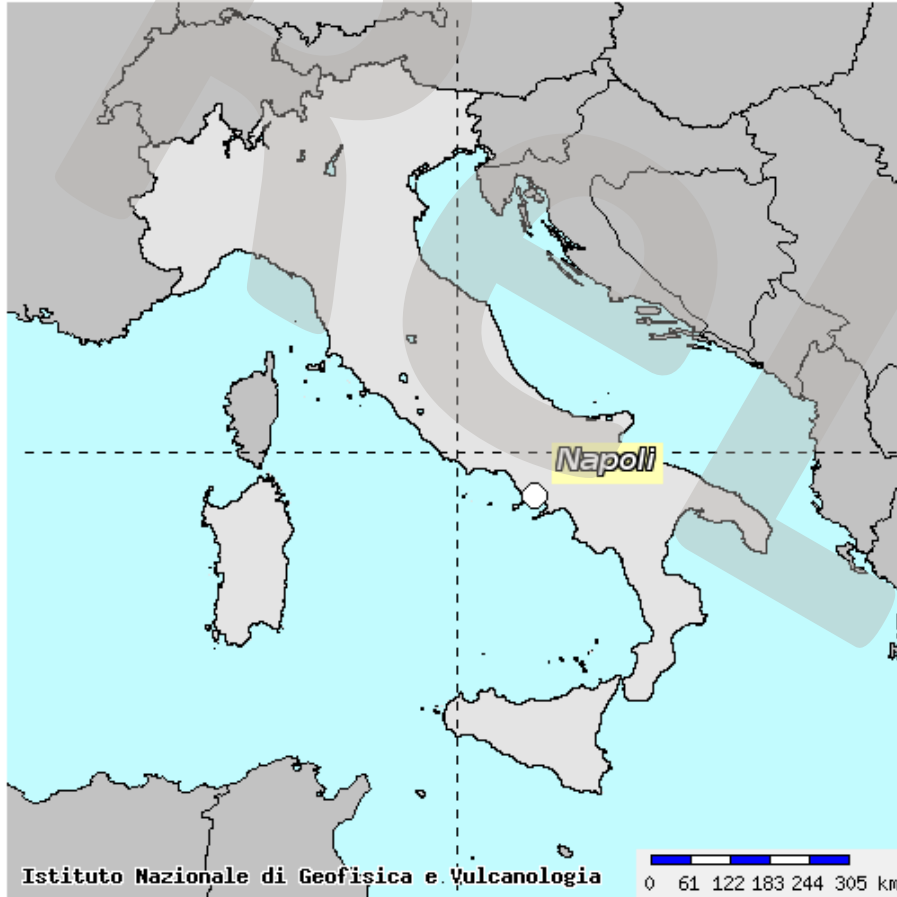
$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

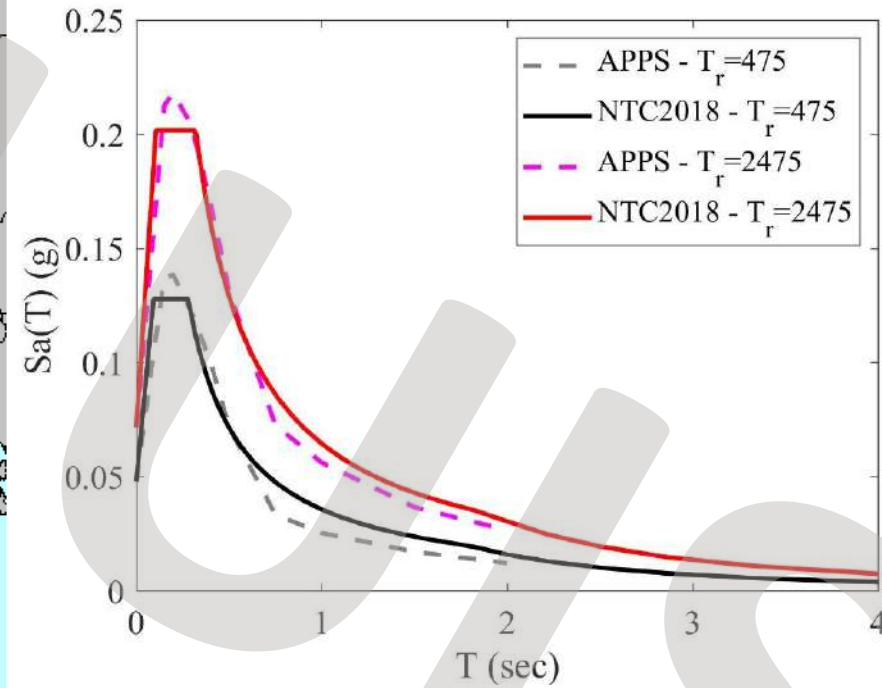
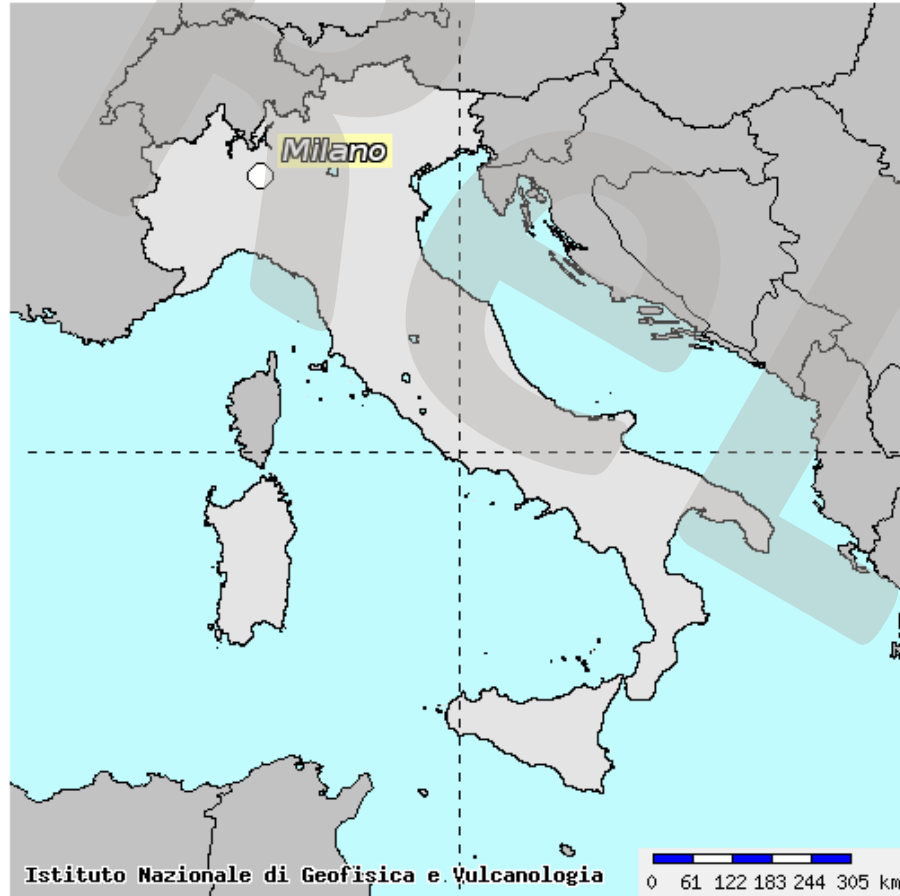


$\eta = 1$

$a_g = 0,35 \text{ g}$







## Livello 2 – CdA sismica - Pericolosità

Accelerazione di picco al suolo e categoria topografica

- 1) Coordinate geografiche opera
- 2) Topografica
- 3) Stratigrafia

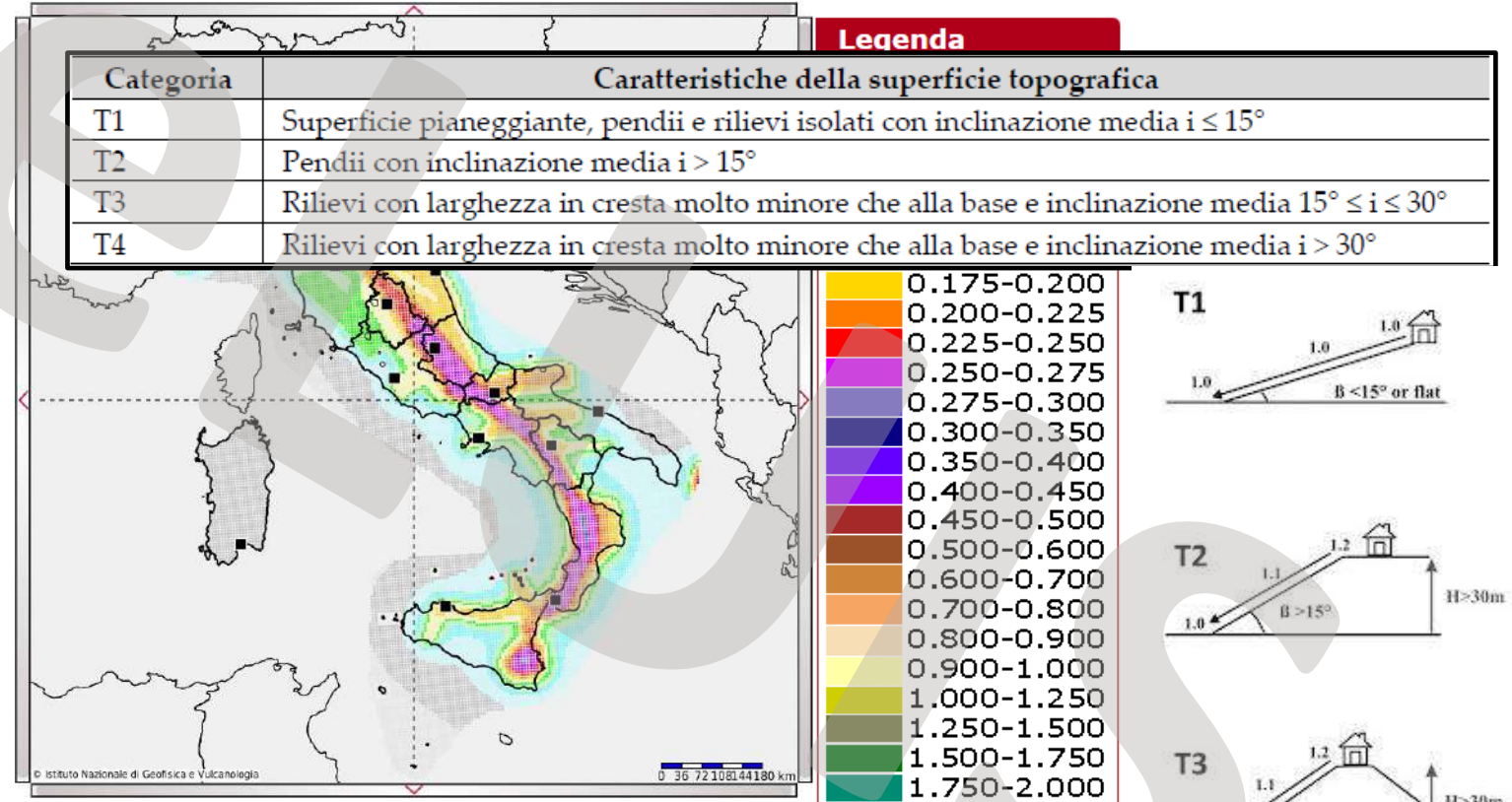


D.M. 17/01/2018 (NTC2018)



1. Accelerazione di picco su suolo rigido con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni ( $a_g$ )
2. Categoria topografica ( $T_i$ )

**Attenzione alla definizione della categoria topografica: per i ponti è necessario esaminare il piano di fondazione delle pile**



esse1-gis.mi.ingv.it

## Livello 2 – CdA sismica - Pericolosità

Accelerazione di picco al suolo e categoria topografica

- 1) Coordinate geografiche opera
- 2) Topografica
- 3) Stratigrafia



D.M. 17/01/2018 (NTC2018)

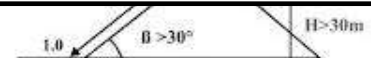


1. Accelerazione di picco su suolo rigido con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni ( $a_g$ )
2. Categoria topografica ( $T_i$ )
3. Classe di suolo

Legenda	
Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.



## Livello 2 – CdA sismica - Pericolosità

Accelerazione di picco al suolo e categoria topografica

- 1) Coordinate geografiche opera
- 2) Topografica
- 3) Stratigrafia



D.M. 17/01/2018 (NTC2018)



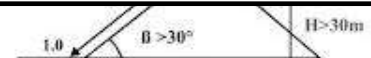
1. Accelerazione di picco su suolo rigido con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni ( $a_g$ )
2. Categoria topografica ( $T_i$ )
3. Classe di suolo

Legenda	
Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

© Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia



**Se la stratigrafia non è disponibile, procedere in via cautelativa assumendo la peggiore tra le categorie di sottosuolo ragionevolmente prevedibili per quel sito**



## Schede di censimento ponti di Livello 0



Codice IOP \_\_\_\_\_ Nome Ponte/Viadotto \_\_\_\_\_  
 Strada di appartenenza: \_\_\_\_\_ Progressiva km iniziale: \_\_\_\_\_ Progressiva km finale: \_\_\_\_\_

### Localizzazione

Provincia/Regione: _____	<b>Coordinate Geografiche</b> <input type="radio"/> ETRF2000 <input type="radio"/> WGS84	Centro	Quota s.l.m. [m]: _____ Longitudine: _____ Latitudine: _____
Comune: _____		Iniziale	Quota s.l.m. [m]: _____ Longitudine: _____ Latitudine: _____
Località: _____		Finale	Quota s.l.m. [m]: _____ Longitudine: _____ Latitudine: _____

Fenomeni erosivi e di alluvionamento  Assenti  Già valutati  Da verificare  
 Fenomeni franosi  Assenti  Già valutati  Da verificare

### Informazioni generali

Proprietario _____	<b>Anno di costruzione/ ristrutturazione</b>	Ultimazione costruzione (collaudo)	Eventuali interventi sostanziali
Concessionario _____		<input type="radio"/> Effettivo	<input type="radio"/> Effettivo
Ente vigilante _____		<input type="radio"/> Presunto	<input type="radio"/> Presunto

Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Le linee guida per i ponti esistenti

L'accelerazione di picco al suolo è il principale parametro di pericolosità

Parametri che influenzano la categoria topografica e quindi la pericolosità

## Dati Geomorfologici

### Morfologia del sito

- |   |  |
|---|--|
| <input type="radio"/> Cresta                      | <input type="radio"/> Pendio dolce (0 – 10°)         |
| <input type="radio"/> Pendio moderato (10° - 25°) | <input type="radio"/> Pendio ripido (> 25°)          |
| <input type="radio"/> Pianura                     | <input type="radio"/> Pianura alla base dei versanti |

## Caratteristiche geometriche

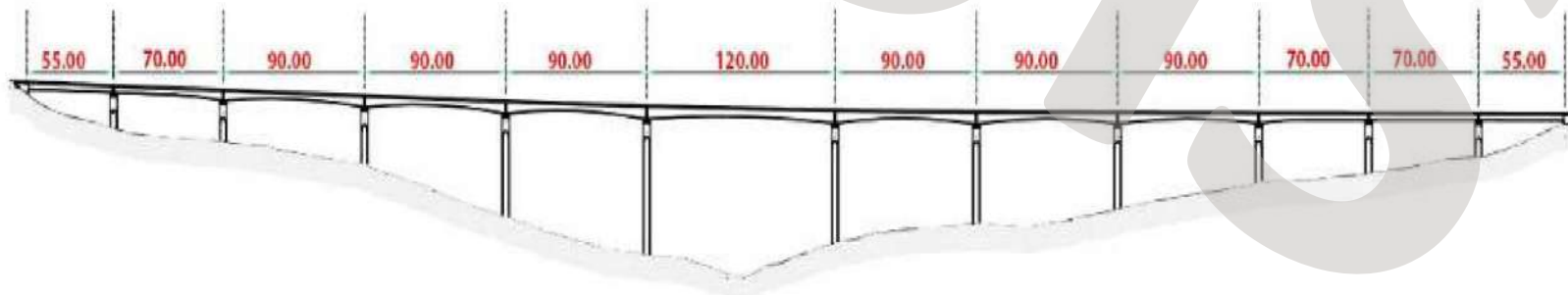
Luce complessiva (Estesa) [m] \_\_\_\_\_ N° campate \_\_\_\_\_  
 Larghezza totale impalcato [m] \_\_\_\_\_ Luce campate \_\_\_\_\_  
 Tracciato  Rettilineo  In curva

### ISTRUZIONE OPERATIVA 3.2.2

La luce complessiva dell'opera deve essere misurata in metri da considerando la distanza tra gli assi di appoggio o di imposta:



La luce delle singole campate deve essere misurata in metri dall'interasse delle pile:



Le linee guida per i ponti esistenti

## Schede descrittive di ispezione ponti di Livello 1

<i>Impalcato - Materiale costruttivo</i>	
<input type="radio"/> Muratura	<input type="radio"/> C.a.
<input type="radio"/> Legno	<input type="radio"/> Altro: _____
<input type="radio"/> C.A.P.	<input type="radio"/> Acciaio
<input type="radio"/> Misto (C.a./acciaio)	

<i>Tipologia delle Fondazioni</i>	<i>Classificazione delle vie di attacco</i>
<input type="radio"/> Fondazioni dirette	<input type="radio"/> Rilevato in terra
<input type="radio"/> Murature	<input type="radio"/> Rilevato in terra rinforzata/armata
<input type="radio"/> Pile in alveo	<input type="radio"/> Rilevato in golena
<input type="radio"/> Non nota	<input type="radio"/> Su roccia
	<input type="radio"/> Viadotto in pendenza/curva
	<input type="radio"/> Altro: _____
<input type="radio"/> Fondazioni Indirette	

<i>Dati Geomorfologici</i>	
<b>Morfologia del sito</b>	
<input type="radio"/> Cresta	<input type="radio"/> Pendio dolce (0 - 10°)
<input type="radio"/> Pendio moderato (10° - 25°)	<input type="radio"/> Pendio ripido (> 25°)
<input type="radio"/> Pianura	<input type="radio"/> Pianura alla base dei versanti

<i>Tipologia di ente scavalcato</i>	
<input type="radio"/> Corso d'acqua	<input type="radio"/> Zona edificata
<input type="radio"/> Specchio d'acqua marina	<input type="radio"/> Zona urbanizzata
<input type="radio"/> Discontinuità orografica (vallata, piccoli canali, ecc.)	<input type="radio"/> Altra via di comunicazione
<input type="radio"/> Ferrovia	<input type="radio"/> Altro: _____

Parametri che influenzano la categoria topografica e quindi la pericolosità

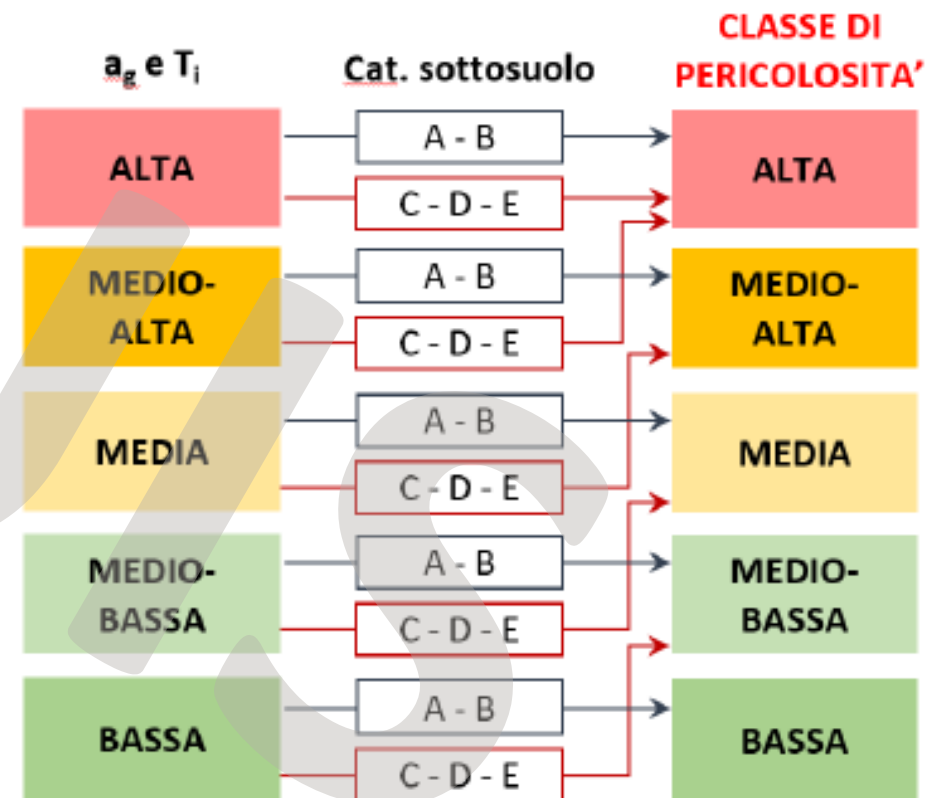
## Livello 2 – CdA sismica - Pericolosità

Accelerazione di picco al suolo e categoria topografica

Tabella 4.12. – Classificazione sulla base dell'accelerazione di picco al suolo ( $a_g$ ) e categoria topografica ( $T_i$ )

	T1, T2, T3	T4
$a_g \geq 0,25 \text{ g}$	ALTA	ALTA
$0,15 \text{ g} \leq a_g < 0,25 \text{ g}$	MEDIO-ALTA	ALTA
$0,10 \text{ g} \leq a_g < 0,15 \text{ g}$	MEDIA	MEDIO-ALTA
$0,05 \text{ g} \leq a_g < 0,10 \text{ g}$	MEDIO-BASSA	MEDIA
$a_g < 0,05 \text{ g}$	BASSA	MEDIO-BASSA

Attenzione alla definizione della categoria topografica T4



## Livello 2 – CdA sismica - Vulnerabilità

	Parametri primari	Parametri secondari
<b>Pericolosità</b>	Accelerazione di picco al suolo e categoria topografica	Categoria di sottosuolo
<b>Vulnerabilità</b>	<p>Schema strutturale, luce e materiale</p> <p>Livello di difettosità</p>	Criteri di progettazione
<b>Esposizione</b>	Livello di TGM e luce media della campata	<p>Alternative stradali</p> <p>Tipologia di ente scavalcato</p> <p>Trasporto di merci pericolose</p> <p>Strategicità dell'opera</p>

Alcuni parametri sono formalmente comuni a quelli usati per la CdA strutturale-fondazionale ma vengono valutati con criteri diversi

## Livello 2 – CdA sismica - Vulnerabilità



M6.8 Kobe 1995



M7.3  
Taiwan Chi-Chi 1991



M6.8 Taiwan Chi-Chi 2022

Il comportamento sismico dei ponti è influenzato principalmente dalle caratteristiche di pile e apparecchi di appoggio, fondazioni, massa della sovrastruttura, ridondanza degli schemi statici, numero di campate. Gli stessi elementi hanno ruolo e importanza diversa nel caso di risposta ai carichi verticali (vulnerabilità strutturale-fondazionale)

## Tipologia strutturale

- |   |  |   |  |  |
|---|--|---|--|--|
| <input type="radio"/> Arco in Muratura    | <input type="radio"/> Travate appoggiate | <input type="radio"/> Travate continue        | <input type="radio"/> Soletta in C.A.                    | <input type="radio"/> Sezione tubolare in c.a. |
| <input type="radio"/> Arco in C.A.        | <input type="radio"/> Travate Gerber     | <input type="radio"/> Cassone in Precompresso | <input type="radio"/> Sezione tubolare in acciaio        | <input type="radio"/> Arco in acciaio          |
| <input type="radio"/> Strallato o sospeso | <input type="radio"/> Altro _____        |   | <input type="radio"/> Travate in c.a.p. a cavi post-tesi |  |



**Importante per la vulnerabilità sismica  
soprattutto isostatico o iperstatico**

Capitolo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

**Le linee guida per i ponti esistenti**

*Pile - Materiale costruttivo*

<input type="radio"/> Muratura	<input type="radio"/> C.a.	<input type="radio"/> C.A.P.	<input type="radio"/> Acciaio	<input type="radio"/> Misto (C.a./acciaio)
<input type="radio"/> Legno	<input type="radio"/> Altro: _____			

*Pile*

Tipologia sezione _____	Geometria sezione (circolare, rettangolare, etc.): _____
Tipologia fondazioni _____	Numero fondazioni _____
Altezza pile [m] _____	Evoluzione eventuale rispetto al fondo alveo* _____

**Pila a fusto semplice**



**Pila a setto**



**Pila a Fusti multipli**



**Pila a telaio**



\*Variazione di quote del fondo alveo rispetto al piano di imposta della fondazione

**Pila a Cavalletto**



**Importante per la vulnerabilità sismica**

**Per il tipo di rottura e le differenze tra le 2 direzioni**

Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

**Le linee guida per i ponti esistenti**



## Descrizione degli eventuali interventi strutturali eseguiti

<input type="radio"/>	Volta in muratura	Descrizione: _____
<input type="radio"/>	Riparazione/Sostituzione di elementi strutturali	Descrizione: _____
<input type="radio"/>	Ampliamento di carreggiata e delle strutture	Descrizione: _____
<input type="radio"/>	Elementi strutturali aggiuntivi/consolidamento	Descrizione: _____
<input type="radio"/>	Interventi di carattere geotecnico in fondazione e/o in corrispondenza delle spalle	Descrizione: _____
<input type="radio"/>	Interventi di mitigazione/protezione dall'erosione di spalle e pile	Descrizione: _____
<input type="radio"/>	Altro: _____	

## Interventi di manutenzione

<input type="radio"/>	Presenti	<input type="radio"/>	Assenti	<input type="radio"/>	Non noti
<b>Piano di manutenzione</b>					
Numero di interventi manutentivi effettuati _____		Data ultimo intervento _____		Periodicità (se più di 1 intervento) _____	
				<b>Tipo di manutenzione</b>	
Intervento n. 1 (data _____)				Allegato n. _____	
Intervento n. 2 (data _____)				Allegato n. _____	
Intervento n. ... (data _____)				Allegato n. _____	

E' molto importante indicare se è stato effettuato un intervento di adeguamento sismico

## Impalcato - Materiale costruttivo

Muratura   
  C.a.   
  C.A.P.   
  Acciaio   
  Misto (C.a./acciaio)

Legno   
  Altro: \_\_\_\_\_

## Impalcato - Tipologia soletta

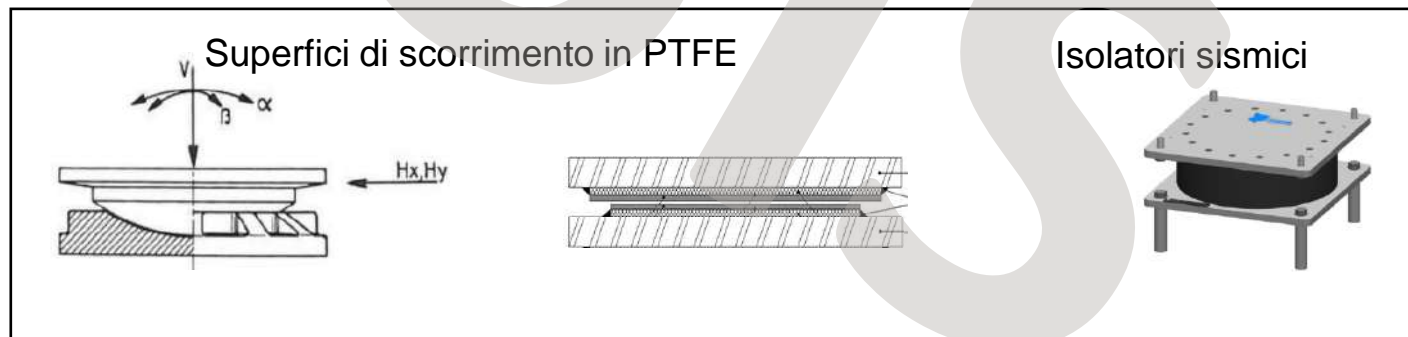
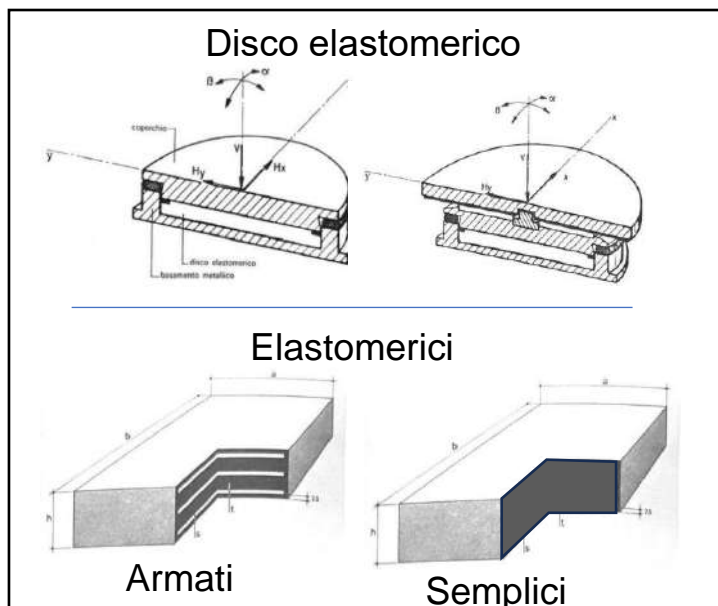
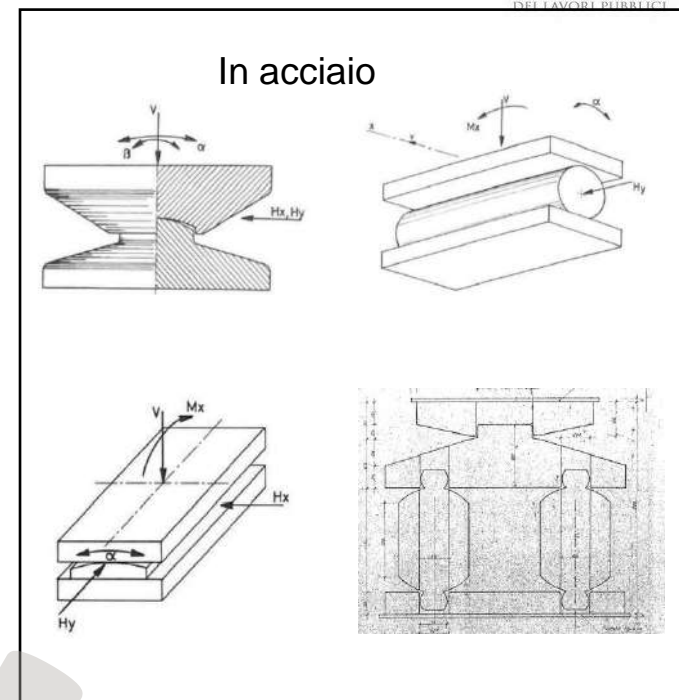
C.a.   
  C.A.P.   
  Misto (c.a./acciaio)   
  Acciaio   
  Legno

Altro: \_\_\_\_\_

## Sistemi di protezione ed apparecchi di appoggio

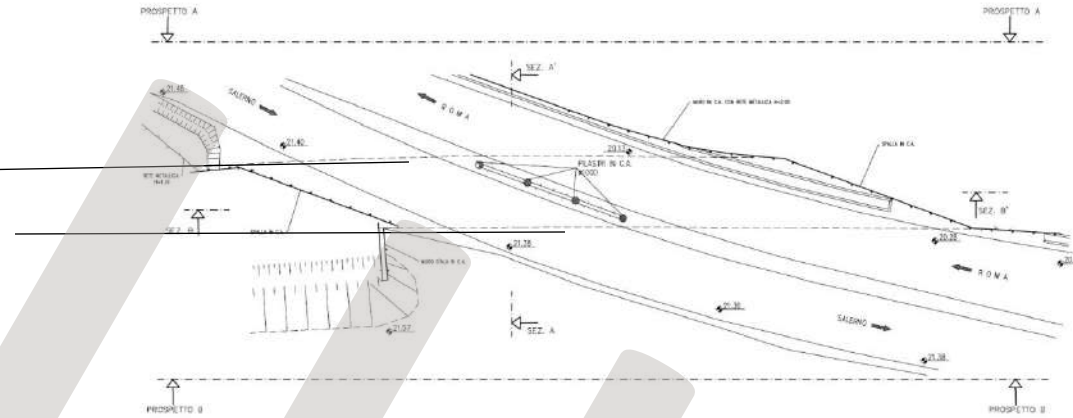
Tipo sistemi di protezione \_\_\_\_\_ Larghezza carreggiata [m] \_\_\_\_\_

Tipologia apparecchi di appoggio \_\_\_\_\_ Tipologia dispositivi antisismici \_\_\_\_\_



## Schede descrittive di ispezione ponti di Livello 1

Pianta



*Rilievo caratteristiche geometriche*

Luce complessiva (spalla – spalla) [m]:	_____	N° campate:	_____
Luce media campata [m]:	_____	Altezza max pile [m]:	_____
Luce massima campata [m]:	_____	Larghezza impalcato [m]:	_____
Lunghezza sbalzo soletta [m]:	_____	(dalla sede stradale)	_____
		Presenza di curve:	_____

*Rilievo caratteristiche geometriche*

Luce complessiva (spalla – spalla) [m]:	_____	N° campate:	_____
Luce media campata [m]:	_____	Altezza max pile [m]:	_____
Lunghezza sbalzo soletta [m]:	_____	Larghezza impalcato [m]:	_____
Lunghezza sbalzo soletta [m]	_____	(dalla sede stradale)	_____

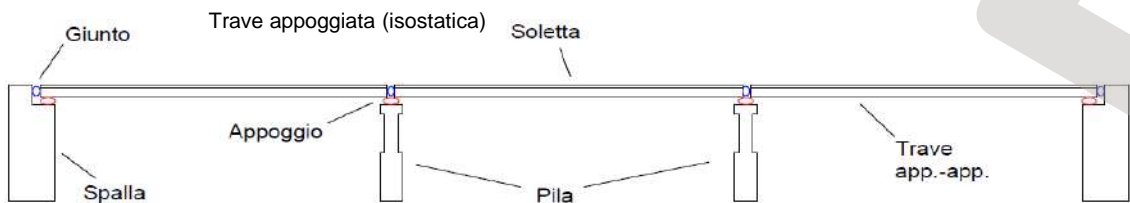
Dati importanti per la vulnerabilità

## Schede descrittive di ispezione ponti di Livello 1

*Tipologia strutturale*

<input type="radio"/> Arco Massiccio	<input type="radio"/> Travate appoggiate	<input type="radio"/> Travate continue/Telaio	<input type="radio"/> Soletta appoggiata	<input type="radio"/> Soletta incastrata
<input type="radio"/> Arco sottile	<input type="radio"/> Travate Gerber/Ponti a stampella con travi tampone		<input type="radio"/> Sezione tubolare	<input type="radio"/>
<input type="radio"/> Strallato o sospeso	<input type="radio"/> Altro _____		<input type="radio"/> Travate in c.a.p. a cavi post-tesi	

Schema isostatico      |       Schema iperstatico



Lo schema statico è importante per la vulnerabilità sismica

## Schede descrittive di ispezione ponti di Livello 1

Tipologia elementi strutturali								
Materiale	Spalle n° elementi		Pile n° elementi			Impalcato n° campate		
C.A.								
C.A.P.								
Acciaio								
Acciaio – Calcestruzzo								
Muratura								
Legno								
Altro								

Tipologia elementi strutturali IMPALCATO								
Elemento strutturale	n° elementi totali	C.A.	C.A.P.	Acciaio	Acciaio - Calcestruzzo	Muratura	Legno	Altro
Soletta [n° campate]								
Travi [n° elementi]								
Traversi [n° elementi]								
Arco [n° elementi]								
Altro								

*Apparecchi di appoggio*

---

<input type="radio"/> Assenti						
<input type="radio"/> Presenti	Tipo di apparecchi		n° apparecchi tot			
	n° apparecchi rilevabili		Nessun apparecchio visibile			

→ Dati importanti per la vulnerabilità

## Livello 2 – CdA sismica - Vulnerabilità

### Schema strutturale, luce e materiali

È evidente che ponti caratterizzati da schemi statici, luci e materiali differenti hanno comportamenti diversi nei confronti delle azioni sismiche. Ciò dipende essenzialmente dalla ridondanza degli schemi statici e dal loro comportamento dinamico, dal numero di elementi vulnerabili soggetti all'azione sismica, quali pile ed apparecchi di appoggio, dalla massa delle strutture, dal livello di conservazione dei manufatti al momento dell'evento sismico e dalla presenza di eventuali altri elementi che contribuiscono ad incrementare la vulnerabilità del ponte alle azioni sismiche; è questo il caso, ad esempio, degli impalcati sghembi. Per tener conto di tali differenze di comportamento, la prima classificazione che occorre fare dipende da schema statico, luce e materiale, secondo le indicazioni in *Tabella 4.13*.

		Schema isostatico		Schema iperstatico	
		L medio-piccola $L \leq 20m$	L elevata $L > 20m$	L medio-piccola $L \leq 20m$	L elevata $L > 20m$
C.A.	Singola campata	Media	Medio-alta	Bassa	Medio-bassa
	Multi-campata	Medio-alta	Alta	Medio-bassa	Media
C.A.P.	Singola campata	Media	Medio-alta	-	-
	Multi-campata	Medio-alta	Alta	Medio-bassa	Media
Muratura	Singola campata	-	-	Bassa	Medio-bassa
	Multi-campata	-	-	Medio-bassa	Media
Acciaio	Singola campata	Medio-bassa	Medio-bassa	Bassa	Bassa
	Multi-campata	Media	Media	Medio-bassa	Medio-bassa

dove per luci medio-piccole si intendono luci non maggiori di 20 m, per luci elevate le luci maggiori di 20 m.

## Le tipologie sono quelle introdotte per la vulnerabilità per azioni da traffico

ISTRUZIONE OPERATIVA 4.3.1

Schema statico	Materiale
Travate appoggiate	C.a.
	C.a.p.
	Acciaio
	Metallo (Ponti storici)
	Legno
	Misto*
Travate continue / Telaio	C.a.
	C.a.p.
	Acciaio
	Metallo (Ponti storici)
	Misto*
Arco massiccio	Muratura
	C.a.
Arco sottile	C.a.
Travate Gerber / Ponti a stampella con travi tampone	C.a.
	C.a.p.
	Acciaio
	Metallo (Ponti storici)
	Misto*
Soletta appoggiata	C.a.
Soletta incastrata	C.a.

Con riferimento alla *Tabella 4.13* e in accordo alle definizioni di cui alla *Tabella 4.6*, si può considerare:

- Schema isostatico: tutti quei ponti rientranti nelle categorie a travate appoggiate, a travate Gerber/ponti a stampella con travi tampone e a soletta appoggiata;
- Schema iperstatico: tutti quei ponti rientranti nelle categorie ponti a travate continue/telaio, ponti ad arco massiccio, e ponti a soletta incastrata.

Con riferimento ai ponti ad arco sottile si considerino come isostatici ponti ad arco a tre cerniere e ponti ad arco a via inferiore (a spinta eliminata) con impalcato in semplice appoggio su elementi verticali. Per le altre tipologie di ponti ad arco sottile si consideri uno schema iperstatico.

In caso di schemi statici non contemplati nella *Tabella 4.6*, la scelta della classificazione sulla base di schema statico, luce e materiale è effettuata e lasciata al valutatore.

Nel caso di tipologie strutturali che prevedono la presenza di diversi materiali, come ad esempio i ponti in sistema misto acciaio-calcestruzzo, si procede in analogia con le considerazioni fatte per uno dei due materiali ritenuto, dal valutatore, prevalente nella determinazione del comportamento strutturale sismico.

Nella Tab.4.13 "L" indica la luce della campata più lunga.

### Linee guida Ponti

Secondo la classificazione proposta, ponti multi-campata, ad esempio, sono da considerare più vulnerabili di ponti a singola campata, in quanto caratterizzati da un maggior numero di pile, elementi particolarmente vulnerabili alle azioni sismiche.

La *Tabella 4.13* è da considerarsi indicativa ma non esaustiva di tutte le possibili situazioni che possono verificarsi. Casi non previsti devono essere valutati opportunamente e, se possibile, ricondotti a quelli considerati in *Tabella 4.13*.

Qualora il ponte abbia campate con diverso schema statico (ad esempio, campate centrali ad arco e campate di riva con travate appoggiate), si consideri la classe di vulnerabilità più gravosa tra quelle associate ai due differenti schemi statici.

La presenza di ulteriori parametri di vulnerabilità sismica che caratterizzano specificatamente lo schema strutturale del ponte, quali impalcato sghembi o in curva, pile a singola colonna o con altezza molto disuniforme, presenza di appoggi particolarmente soggetti a degrado (quali appoggi a pendolo interamente in metallo, tipicamente soggetti ad elevata corrosione) o comunque situazioni che determinano concentrazioni di sforzo, moti rotazionali o quant'altro costituisce un aggravante alla vulnerabilità del ponte è da tenersi in debito conto.

A tal fine, la classificazione basata su schema statico, luce e materiale, riportata in *Tabella 4.13*, si modifica nella seguente maniera:

- la classe di vulnerabilità di schema statico, luce e materiale aumenta di un livello nel caso siano presenti elementi di vulnerabilità (da Bassa a Medio-bassa, da Medio-bassa a Media, e così via);
- la classe di vulnerabilità di schema statico, luce e materiale resta invariata nel caso gli elementi di vulnerabilità siano assenti o poco influenti sul comportamento del sistema strutturale.

## Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

### Le linee guida per i ponti esistenti

## Schede descrittive di ispezione ponti di Livello 1

Elementi di vulnerabilità sismica (vedi § 4.3.3 delle Linee Guida)

- Assenti
- Presenti (influenti sul comportamento sismico)

Descrizione:

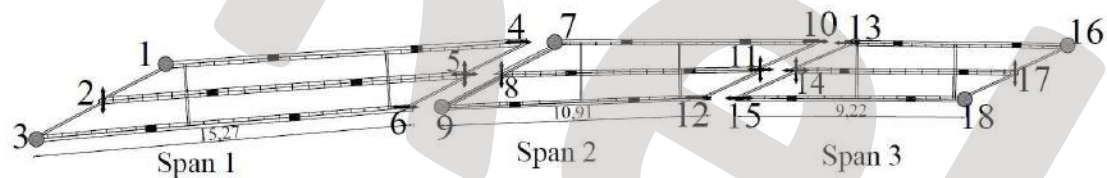


La presenza di ulteriori parametri di vulnerabilità sismica che caratterizzano specificatamente lo schema strutturale del ponte, quali impalcati sghembi o in curva, pile a singola colonna o con altezza molto disuniforme, presenza di appoggi particolarmente soggetti a degrado o comunque situazioni che determinano concentrazioni di sforzo, moti rotazionali o quant'altro costituisce un aggravante alla vulnerabilità del ponte è da tenersi in debito conto.

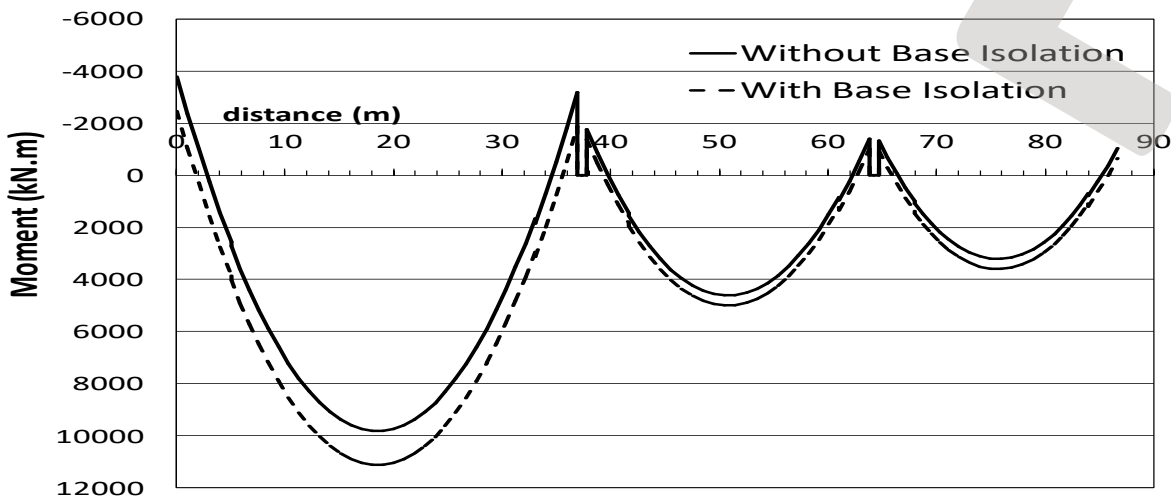


# Impalcato sghembo (skewness)

La presenza di ulteriori parametri di vulnerabilità sismica che caratterizzano specificatamente lo schema strutturale del ponte, quali impalcato sghembi o in curva, pile a singola colonna o con altezza molto disuniforme, presenza di appoggi particolarmente soggetti a degrado o comunque situazioni che determinano concentrazioni di sforzo, moti rotazionali o quant'altro costituisce un aggravante alla vulnerabilità del ponte è da tenersi in debito conto aumentando di un livello la classe di vulnerabilità da schema statico.



- + Multidirectional support
- | Free lateral support
- Free longitudinal support
- Fixed support

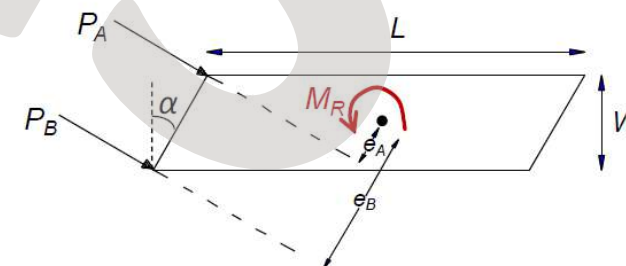


Momenti negativi sugli appoggi

Link	$F_z$ (kN)	$F_z(BI)/F_z$	$V_x$ (kN)	$V_y$ (kN)	$V_x(BI)/V_x$	$V_y(BI)/V_y$
1	1282	0.89	624	354	0.08	0.17
	3109	0.86	6232	-1179	0.01	0.07
2	484	1.51	927	0	0.06	-
	2011	0.91	753	0	0.09	-
3	24	16.18	5644	604	0.01	0.12
	898	1.13	734	-889	0.09	0.07
4	501	1.16	0	386	-	0.17
	1304	1.15	0	82	-	0.86
5	584	1.40	0	0	-	-
	1727	1.10	0	0	-	-
6	1283	0.76	0	765	-	0.10
	2597	0.82	0	182	-	0.33

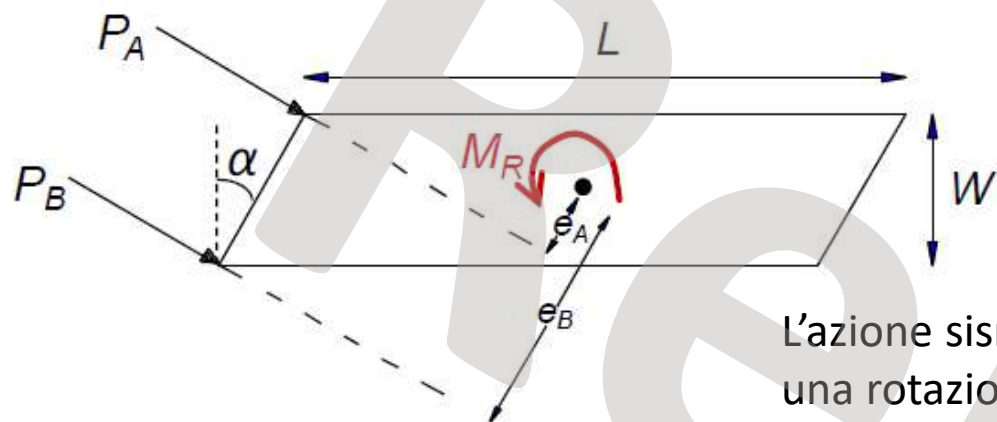
Le reazioni vincolari orizzontali sono molto elevate soprattutto sulla spalla (punti 1-2-3). La reazione orizzontale longitudinale è il doppio di quella verticale.

La somma delle reazioni orizzontali è nulla, l'impalcato tende a ruotare intorno all'asse verticale.



# Impalcato sghembo (skewness)

Risposta sismica



L'azione sismica provoca una rotazione intorno all'asse verticale del ponte con reazioni vincolari elevate in direzione longitudinale e trasversale soprattutto su elementi rigidi come le spalle



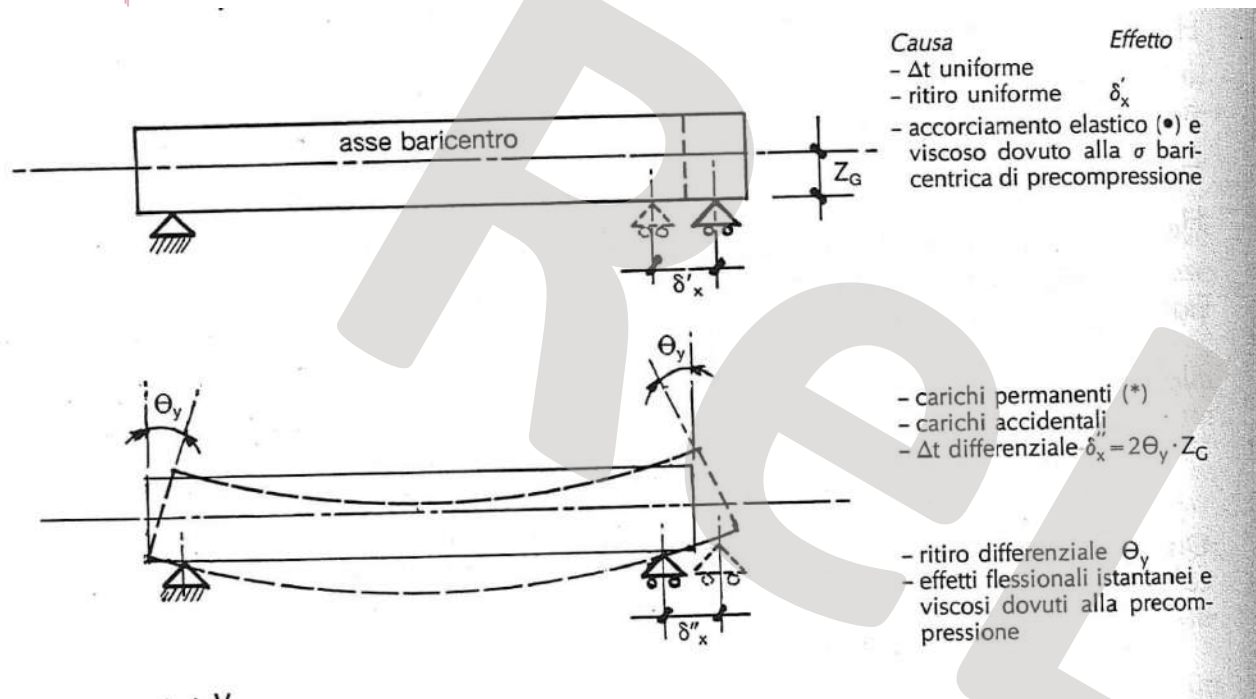
1.5 Damage to a skewed bridge after the Chile Earthquake of February 27, 2010 (source: Yashinsky et al. [2010]).



1.3 Santa Clara River Bridge pounding damage to the abutment in 1994 Northridge Earthquake (source: Chen and Duan [2000]).



1.2 Gavin Canyon Undercrossing collapse in the 1994 Northridge Earthquake (source: Chen and Duan [2000]).



I vincoli scorrevoli consentono di avere un comportamento isostatico annullando gli effetti delle distorsione

I vincoli scorrevoli consentono spostamenti anche per effetto dei carichi verticali

Le azioni sismiche possono essere trasmesse alle strutture verticali portanti (pile e spalle) solo dai vincoli che non consentono spostamenti orizzontali. Tali vincoli possono essere danneggiati ed arrivare a collasso se l'azione è maggiore della capacità. In tal caso la struttura isostatica diventa labile e può cadere dalla pila

Se il vincolo è scorrevole gli spostamenti elevati possono portare alla perdita di appoggio sulle pile o spalle



## Livello 2 – CdA sismica - Vulnerabilità

### Livello di difettosità

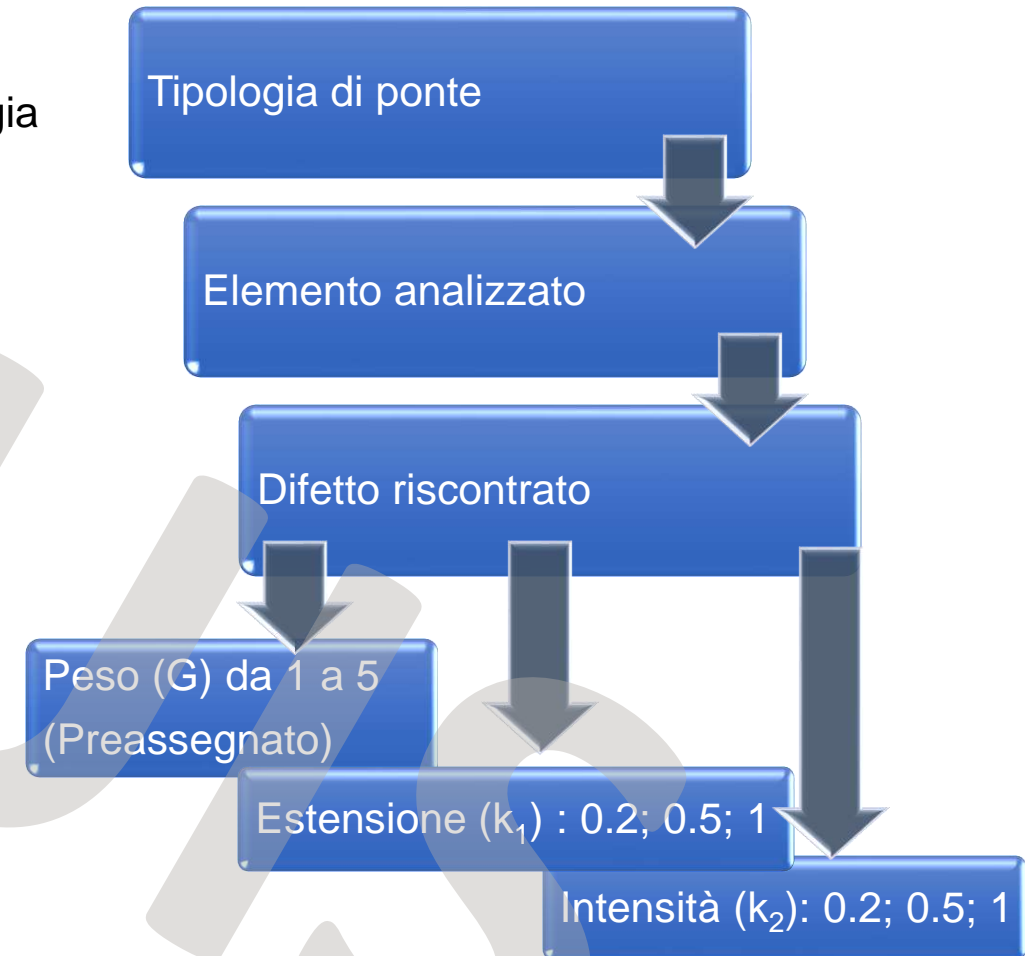
ALTO	Difetti di gravità alta o medio-alta ( $G=5$ o $G=4$ ) e di qualsiasi intensità su elementi critici (apparecchi di appoggio, sezioni di estremità delle pile) o presenza di condizioni critiche (cinematismi in atto, incipiente perdita di appoggio)
MEDIO-ALTO	Difetti di gravità alta o medio-alta ( $G=5$ 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

**Per la vulnerabilità sismica si sottolinea una maggiore importanza dei difetti delle pile e degli apparecchi di appoggio**

## Livello 1 – schede di valutazione dei difetti

Sono previste schede di valutazione dei difetti differenziate per ogni tipologia di elementi costituenti il ponte e materiale di realizzazione (spalle in c.a., spalle in muratura, travi e traversi in c.a., ecc.).

Per ciascun difetto va indicato il peso, l'intensità e l'estensione. Per difetti più gravi ( $G = 4$  e  $G = 5$ ) è possibile segnalare che la presenza di tale difetto possa pregiudicare la statica dell'opera (casella "PS").



Le Linee Guida prevedono la compilazione di una scheda di difettosità per ogni elemento costituente l'opera

1		Spalle N _____ Strada di appartenenza: _____ Progressiva km: _____		Calcestruzzo		Tecnico rilevatore: _____ Data ispezione: ____/____/____																	
Codice difetto	Descrizione difetto	VISTO	G	Estensione K1	Intensità K2	N°	PS	NA	NR	NP													
c.a./c.a.p._1	Macchie di umidità passiva	<input type="checkbox"/>	1																				
c.a./c.a.p._2	Macchie di umidità attiva	<input type="checkbox"/>	3																				
Dif. Gen_1	Tracce di scolo	<input type="checkbox"/>	3																				
c.a./c.a.p._3	Clis dilavato / ammalorato	<input type="checkbox"/>	3																				
Dif. Gen_2	Ristagni d'acqua	<input type="checkbox"/>	3																				
c.a./c.a.p._4	Vespai	<input type="checkbox"/>	3																				
c.a./c.a.p._5	Distacco del copriferro	<input type="checkbox"/>	2																				
c.a./c.a.p._6	Armatura ossidata / corrosa	<input type="checkbox"/>	5																				
c.a./c.a.p._7	Lesioni a ragnatela	<input type="checkbox"/>	1																				
c.a./c.a.p._8	Lesioni a ragnatela modeste	<input type="checkbox"/>	1																				
c.a./c.a.p._9	Fessure diagonali	<input type="checkbox"/>	5																				
c.a./c.a.p._10	Fessure longitudinali	<input type="checkbox"/>	2																				
c.a./c.a.p._11	Fessure trasversali	<input type="checkbox"/>	5																				
c.a./c.a.p._12	Lesioni attacco trave-soletta	<input type="checkbox"/>	2																				
c.a./c.a.p._13	Riprese successive deteriorate	<input type="checkbox"/>	1																				
Eventuali note																							
c.a.p._10	Umidità dell'interno	<input type="checkbox"/>	2																				
c.a.p._11	Arm. Scoperta / ossidata testate	<input type="checkbox"/>	2																				
c.a.p._12	Fuoriuscita barre ancoraggio	<input type="checkbox"/>	5																				
Dif. Gen_3	Danni da urto	<input type="checkbox"/>	4																				
c.a./c.a.p._17	Armatura longitudinale deformata	<input type="checkbox"/>	5																				
c.a./c.a.p._24	Difetti nelle selle Gerber	<input type="checkbox"/>	5																				
Eventuali note																							

- **Campata 1**  
 Spalla 1  
 Pila 1, 2, ..., N  
 Travi 1, 2, ..., N  
 Traversi 1, 2, ..., N  
 Appoggi 1, 2, ..., N  
 Soletta  
 Giunti
- **Campata 2**  
 Pila 1, 2, ..., N  
 Travi 1, 2, ..., N  
 Traversi 1, 2, ..., N  
 Appoggi 1, 2, ..., N  
 Soletta  
 Giunti
- **Campata N**  
 Pila 1, 2, ..., N  
 Travi 1, 2, ..., N  
 Traversi 1, 2, ..., N  
 Appoggi 1, 2, ..., N  
 Soletta  
 Giunti

## 20 schede di valutazione dei difetti

### 17 tipologie di schede dipendenti dal materiale e dall'elemento

#### Spalle

1. Calcestruzzo armato
2. Muratura

#### Pile

1. Calcestruzzo armato
2. Muratura
3. Acciaio o Metallo

#### Piedritti

1. Calcestruzzo armato
2. Acciaio o Metallo

#### Travi

1. Calcestruzzo armato
2. Calcestruzzo armato precompresso
3. Acciaio o Metallo
4. Legno

#### Archi

1. Calcestruzzo armato
2. Muratura
3. Acciaio
4. Legno

#### Soletta

1. Calcestruzzo armato
2. Legno

1	Spalle	Calcestruzzo armato
2	Spalle	Muratura
3	Pile	Calcestruzzo armato
4	Pile	Muratura
5	Pile	Acciaio o Metallo
6	Apparecchi di appoggio	
7	Giunti	
8	Piedritti	Calcestruzzo Armato
9	Piedritti	Acciaio o Metallo
10	Archi	Calcestruzzo Armato
11	Archi	Muratura
12	Archi	Acciaio
13	Archi	Legno
14	Travi	Calcestruzzo Armato
15	Travi	Calcestruzzo Armato Precompresso
16	Travi	Acciaio o Metallo
17	Travi	Legno
18	Soletta	Calcestruzzo Armato
19	Soletta	Legno
20	Elementi Accessori	

### 3 tipologie di schede dipendenti dall'elemento

#### ALTRI ELEMENTI

1. Apparecchi di appoggio
2. Giunti
3. Elementi accessori

#### 3.2 SCHEDE DI RILIEVO E VALUTAZIONE DEI DIFETTI

In sede di ispezione visiva, oltre ad un accurato rilievo fotografico e ad un rilievo geometrico delle dimensioni principali dell'opera (laddove possibile), è eseguito il rilievo dello stato di conservazione della struttura, finalizzato ad individuare, evidenziare e segnalare, in apposite schede, i fenomeni di degrado ed i difetti presenti. La compilazione di schede permette di indicare la presenza di specifici fenomeni di degrado e l'intensità e l'estensione con cui essi si manifestano. Le indicazioni riportate sulle schede sono poi utilizzate per la determinazione del livello di difettosità, uno dei principali parametri considerati nel metodo di classificazione di Livello 2.

## Schede descrittive di ispezione ponti di Livello 1

Elementi critici – Vulnerabilità sismica (vedi § 3.3 delle Linee Guida)

<input type="radio"/>	Assenti			
<input type="radio"/>	Presenti	<input type="radio"/>	Condizioni tali da non doverli segnalare immediatamente (assenza di uno stato di degrado avanzato)	Tipologia di elemento
		<input type="radio"/>	Condizioni tali da doverli segnalare immediatamente (presenza di uno stato di degrado avanzato)	Stato di degrado (descrizione sintetica)
		<input type="radio"/>	Non ispezionabili	

**Nota:** Si definiscono elementi critici gli elementi particolarmente soggetti ai fenomeni di degrado e i cui eventuali malfunzionamenti possono incidere significativamente sul comportamento strutturale o sismico globale del ponte, ovvero gli elementi o le condizioni per i quali la presenza di uno stato di degrado avanzato è da segnalare immediatamente. La presenza di elementi critici con stato di degrado avanzato comporta un livello di difettosità attuale alto.



Piastra superiore deformata



Invecchiamento neoprene (appoggio su sella Gerber)

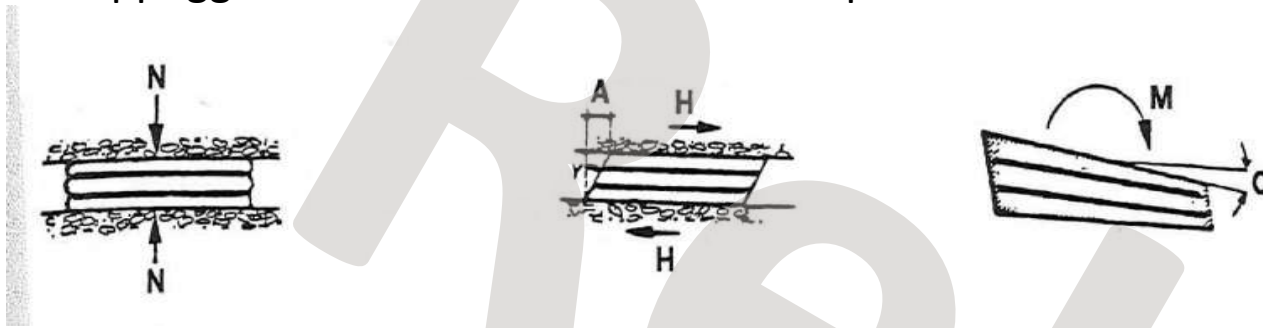


Fuori sede rulli

**Vulnerabilità sismica:** apparecchi di appoggio molto degradati o danneggiati, sottostrutture caratterizzate da difettosità estesa e rilevante ai fini del comportamento sismico e, ancora, meccanismi di incipiente perdita di appoggio o cinematismi in atto



Appoggi elastomerici: molto diffusi nei ponti esistenti



Consentono rotazioni e spostamenti orizzontali  
Tuttavia possono trasferire azioni orizzontali (sono vincoli elastici con rigidezza molto bassa) mediante l'attrito all'interfaccia  
La crisi è dovuta alla rottura del neoprene o al superamento dell'attrito

Gli appoggi in neoprene sono in grado di trasferire azione orizzontale mediante l'attrito all'interfaccia con la pila e con la trave

Il coefficiente di attrito tra neoprene e calcestruzzo è 0.4-0.6

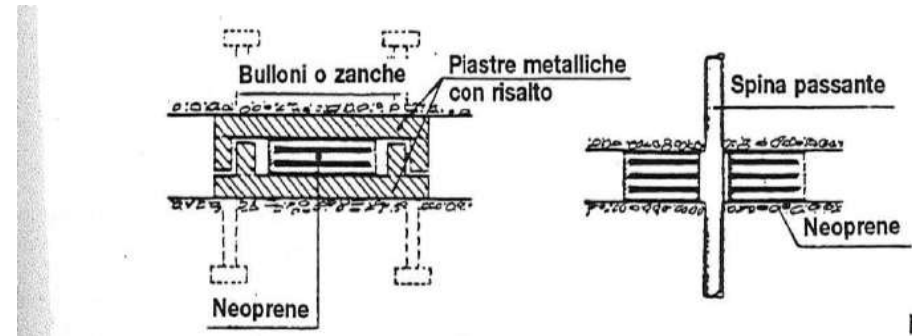


Fig. 10.9

In presenza di apposite piastre metalliche con risalto o di spinotto consentono rotazione ma impediscono gli spostamenti orizzontali e possono trasferire azioni orizzontali fino alla rottura dell'elemento in acciaio

## Livello 2 – CdA sismica - Vulnerabilità

	Parametri primari	Parametri secondari
Pericolosità	Accelerazione di picco al suolo e categoria topografica	Categoria di sottosuolo
<b>Vulnerabilità</b>	Schema strutturale, luce e materiale Livello di difettosità	Criteri di progettazione
Esposizione	Livello di TGM e luce media della campata	Alternative stradali Tipologia di ente scavalcato Trasporto di merci pericolose Strategicità dell'opera

## Livello 2 – CdA sismica - Vulnerabilità

### Criteri di progettazione – Parametri secondari

Storicamente, infatti, ad eccezione di decreti specifici emanati a seguito di forti terremoti avvenuti sul territorio italiano, sulla base dei quali erano individuate zone caratterizzate da alta sismicità (ad esempio il Regio Decreto n. 193 del 18 aprile 1909 a seguito del terremoto di Messina), occorre aspettare la legge n. 64 del 1974 per avere un approccio più attento al problema della sicurezza sismica e addirittura l'Ordinanza n. 3274 del 2003 per la classificazione sismica su base probabilistica dell'intero territorio italiano e per le prime norme tecniche di progettazione antisismica in un unico documento comprendente le diverse tipologie di costruzioni e materiali.

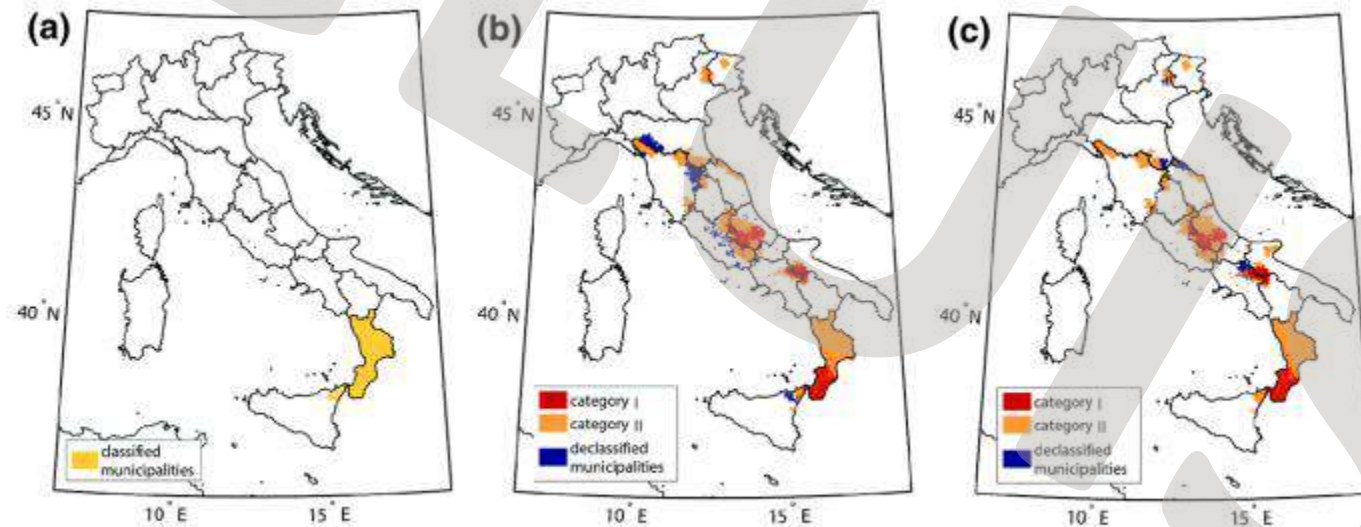


Fig. 3 Italian seismicity map after year 1909 (a), 1937 (b), 1962 (c)

Petruzzelli, Iervolino (2021)

Questa informazione può essere importante per sapere se il ponte è stato progettato con una normativa sismica

## Dati di progetto

Progettista	Anno di progettazione	Data inizio	Data fine	Data approvazione
Norma di progetto		<input type="radio"/> Effettivo	<input type="radio"/> Effettivo	<input type="radio"/> Effettivo
Ente approvatore		<input type="radio"/> Presunto	<input type="radio"/> Presunto	<input type="radio"/> Presunto

## Tutela ai sensi del Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42

Provvedimenti di tutela \_\_\_\_\_

Autore della progettazione \_\_\_\_\_

Inserimento del ponte nell'ambito dei Piani Paesaggistici vigenti/adottati \_\_\_\_\_

## Stato dell'opera

<input type="radio"/> A Pienamente agibile	<input type="radio"/> B Agibile ma con scadenze di lavori di manutenzione ordinaria	<input type="radio"/> C Agibile ma con scadenze di lavori di manutenzione straordinaria	<input type="radio"/> D Condizioni critiche e agibile parzialmente/ lavori di manutenzione urgenti	<input type="radio"/> E Inagibile
---	--	--	--	--------------------------------------

## Classificazione del collegamento e Classificazione d'uso stradale

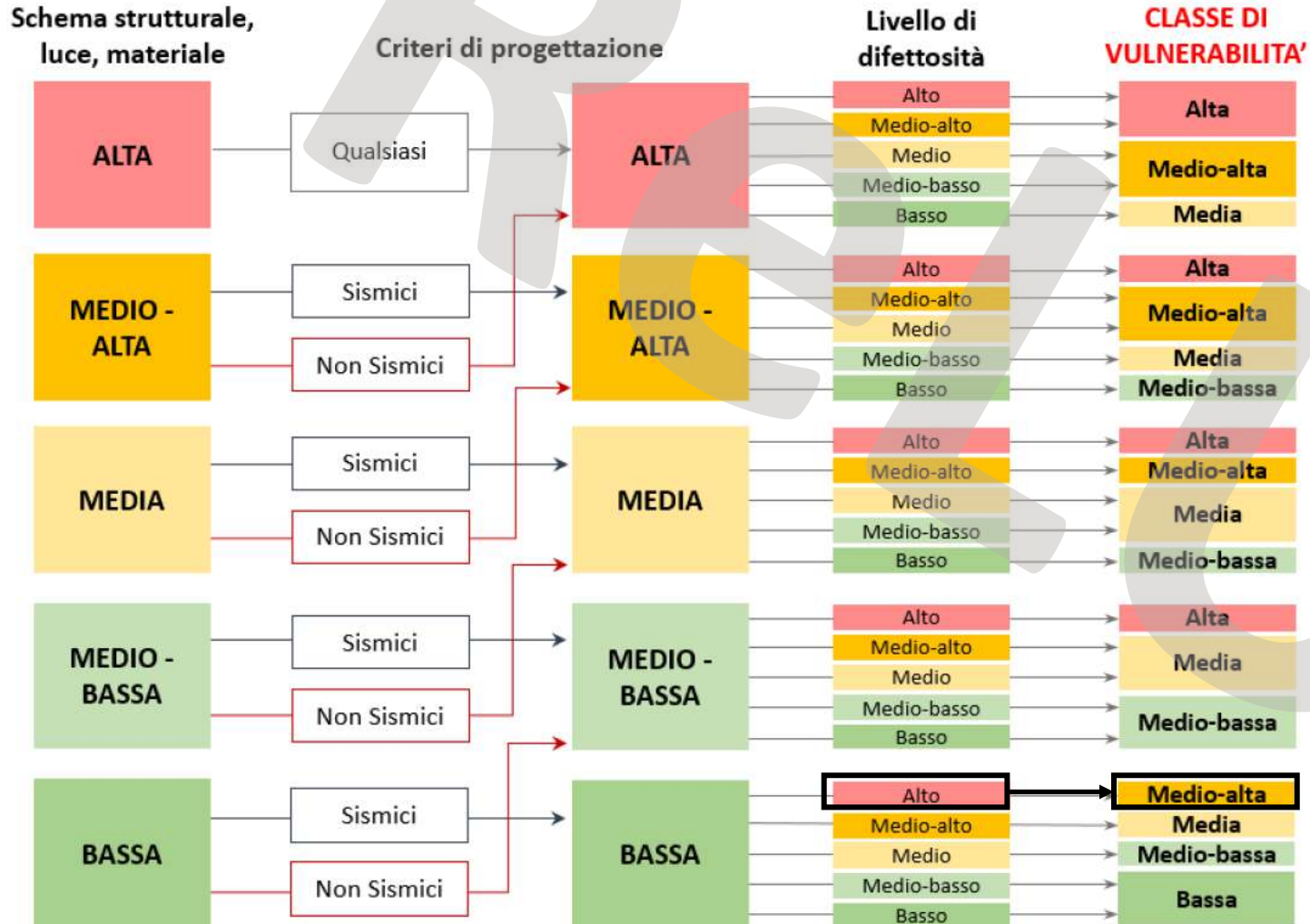
### Tipo di collegamento

<input type="radio"/> Ponte su corso d'acqua	<input type="radio"/> reticolo principale	<input type="radio"/> Ponte su specchi d'acqua marini
<input type="radio"/> Viadotto su zona edificata	<input type="radio"/> reticolo secondario	<input type="radio"/> Viadotto su zona urbanizzata
<input type="radio"/> Viadotto su altra via di comunicazione		<input type="radio"/> Ponte/Viadotto su discontinuità orografica (vallata, piccoli canali, ecc.)
<input type="radio"/> Ponte su ferrovia		

### Classificazione d'uso stradale

<input type="radio"/> Autostrada o Ferrovia	<input type="radio"/> Strada extraurbana secondaria	<input type="radio"/> Strada urbana di quartiere
<input type="radio"/> Strada extraurbana principale	<input type="radio"/> Strada urbana di scorrimento	<input type="radio"/> Strada locale

## Livello 2 – CdA sismica - Vulnerabilità



Un livello di difettosità alto conduce ad una classe di vulnerabilità alta in tutti i casi tranne quando lo schema strutturale è associato a bassa vulnerabilità e il ponte è progettato con criteri sismici.

## Livello 2 – CdA sismica - Esposizione

	Parametri primari	Parametri secondari
Pericolosità	Accelerazione di picco al suolo e categoria topografica	Categoria di sottosuolo
Vulnerabilità	Schema strutturale, luce e materiale Livello di difettosità	Criteri di progettazione
<b>Esposizione</b>	Livello di TGM e luce media della campata	Alternative stradali Tipologia di ente scavalcato Trasporto di merci pericolose <b>Strategicità dell'opera</b>

Unica differenza rispetto all'esposizione valutata per classe di attenzione strutturale-fondazionale

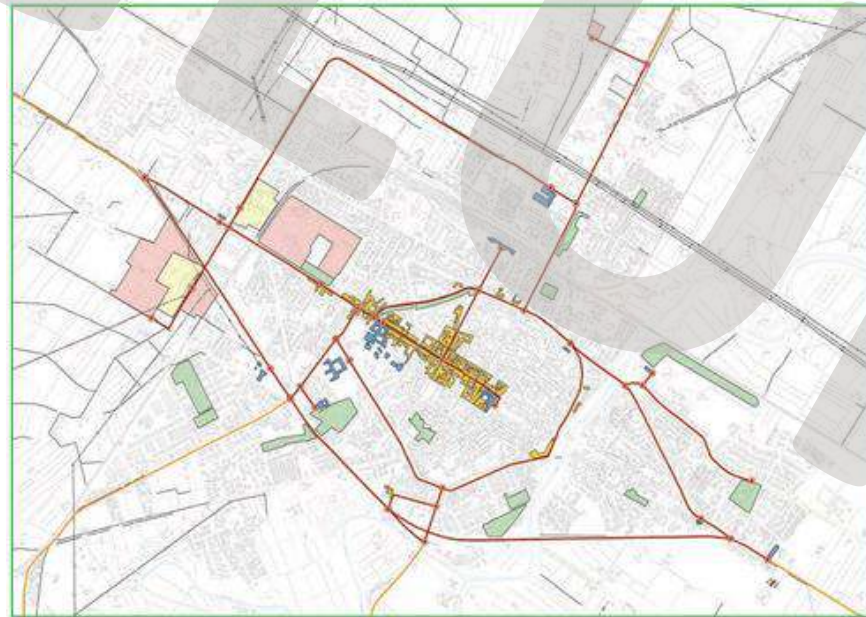


## Livello 2 – CdA sismica - Esposizione

### Strategicità dell'opera – Parametri secondari

Le opere considerate di interesse strategico, la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile, devono avere una più elevata priorità, in quanto è necessario garantirne l'efficienza in caso di emergenza.

A tal fine, la classe identificata secondo gli altri parametri aumenta nel caso in cui il ponte rientri tra le opere ritenute di interesse strategico per le emergenze a seguito di un evento sismico (con riferimento alle Condizioni Limite di Emergenza) o, in altre parole, se rientra nelle classi d'uso III o IV. Tali opere sono espressamente indicate dalla protezione civile o dall'ente amministrativo competente.

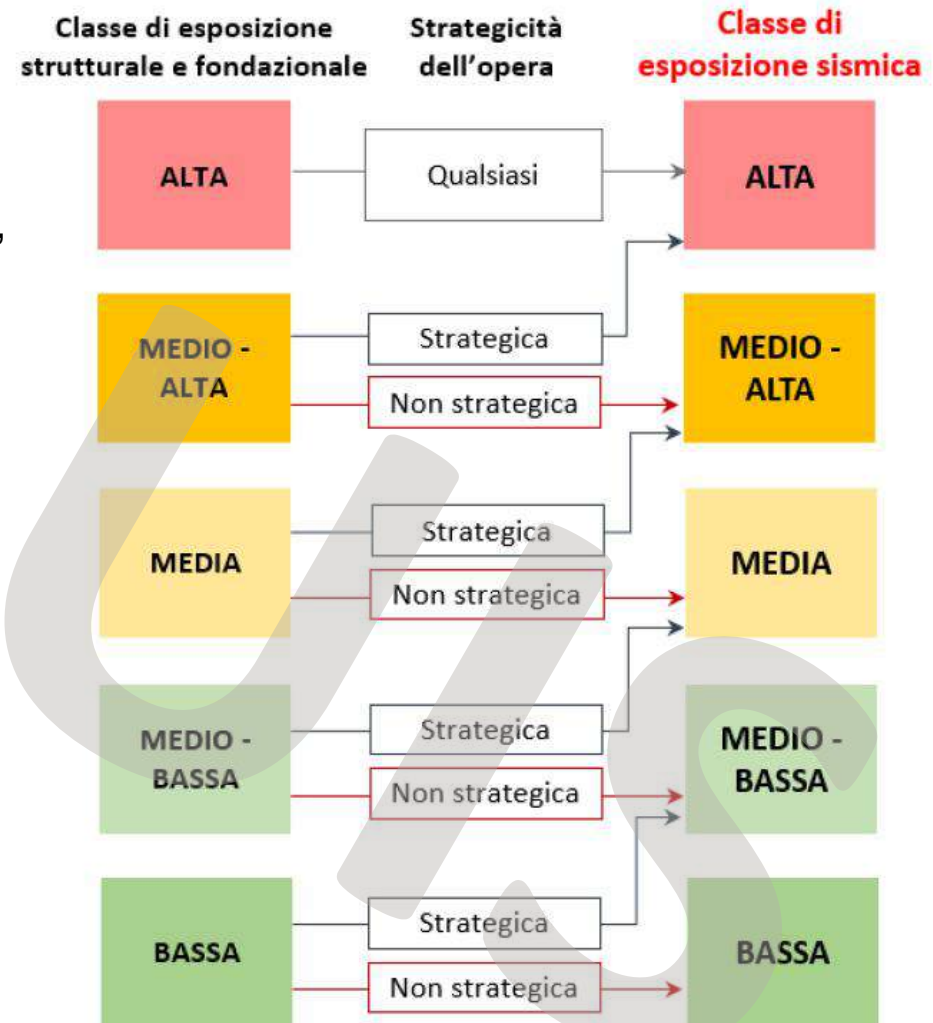


Esempio di infrastrutture di accessibilità/connessione per Condizione Limite per l'Emergenza



## Livello 2 – CdA sismica - Esposizione

Le opere considerate di interesse strategico, la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile, devono avere una più elevata priorità, in quanto è necessario garantirne l'efficienza in caso di emergenza (classe d'uso III e IV).



## Livello 2 – CdA sismica (come CdA strutturale-fondazionale)

*Classe di pericolosità ALTA*

		Classe di esposizione				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di vulnerabilità	Alta	Alta				
	Medio-Alta	Alta		Medio-Alta		
	Media	Alta	Medio-Alta		Media	
	Medio-Bassa	Medio-Alta	Media			
	Bassa	Medio-Alta	Media		Medio-Bassa	

## Livello 2 – CdA sismica (come CdA strutturale-fondazionale)

Classe di pericolosità ALTA

Classe di esposizione

Classe di pericolosità MEDIO-ALTA

Classe di esposizione

		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
--	--	------	------------	-------	-------------	-------

Classe di

Classe di  
vulnerabilità

Alta	Alta				
Medio-Alta	Alta	Medio-Alta			Media
Media	Medio-Alta		Media		
Medio-Bassa	Media			Medio-Bassa	
Bassa	Media		Medio-Bassa		Bassa

## Livello 2 – CdA sismica (come CdA strutturale-fondazionale)

Classe di pericolosità ALTA

Classe di esposizione

Classe di pericolosità MEDIO-ALTA

Classe di pericolosità MEDIA

Classe di esposizione

Alta

Medio-Alta

Media

Medio-Bassa

Bassa

Classe di vulnerabilità

Alta

Medio-Alta

Media

Medio-Bassa

Bassa

Alta

Medio-Alta

Media

Medio-Bassa

Bassa

## Livello 2 – CdA sismica (come CdA strutturale-fondazionale)

Classe di pericolosità ALTA

Classe di esposizione

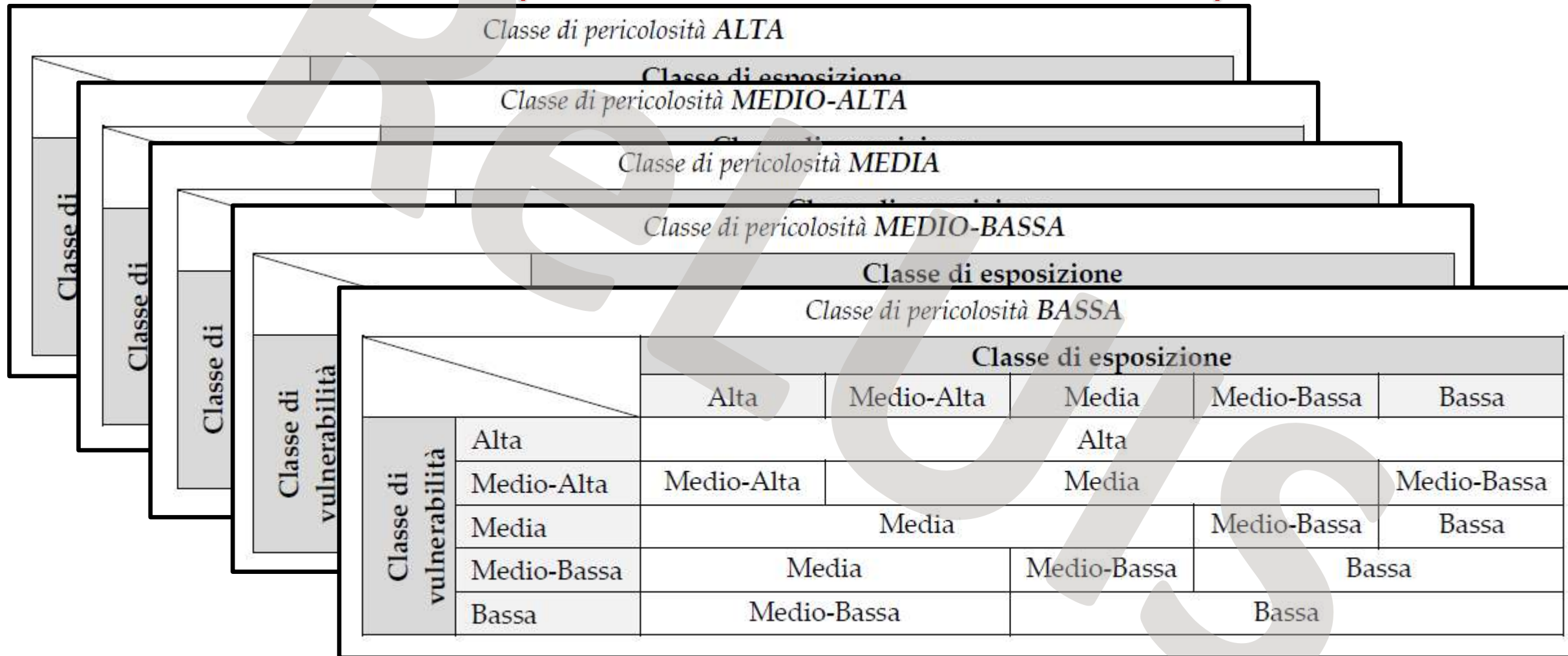
Classe di pericolosità MEDIO-ALTA

Classe di pericolosità MEDIA

Classe di pericolosità MEDIO-BASSA

		Classe di esposizione				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di vulnerabilità	Alta	Alta				
	Medio-Alta	Medio-Alta		Media		
	Media	Medio-Alta	Media		Medio-Bassa	
	Medio-Bassa	Media		Medio-Bassa		Bassa
	Bassa	Media	Medio-Bassa		Bassa	

## Livello 2 – CdA sismica (come CdA strutturale-fondazionale)

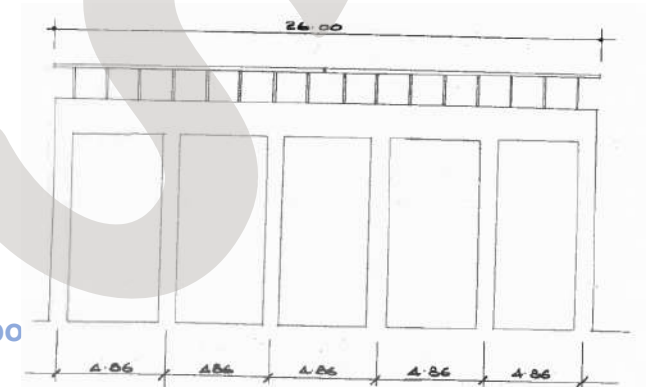
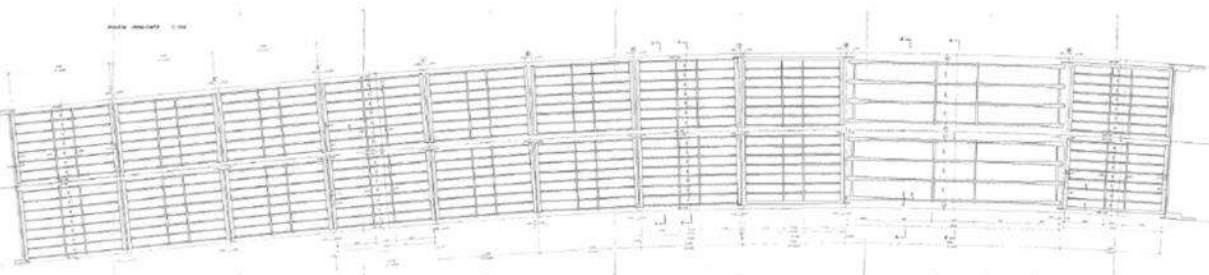
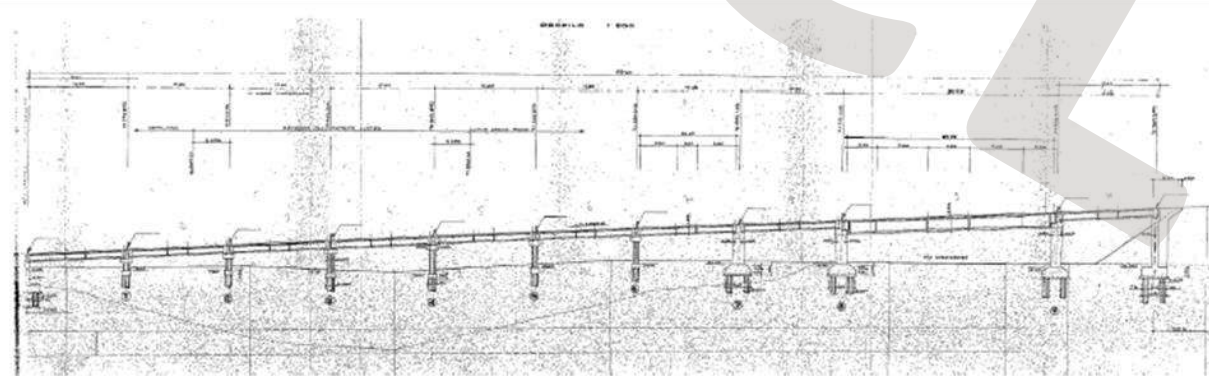


# Linee guida per ponti esistenti

## Esempio CdA sismica



Ponte a travata con 9 impalcati realizzati con travi in c.a.p. a cavi aderenti (17m di lunghezza) e 1 campata a cavi scorrevoli (37m di lunghezza)  
Pile in c.a. a telaio in direzione trasversale formate da colonne con sezione circolare o rettangolare e neoprene  
Appoggi in neoprene



# Linee guida per ponti esistenti

## Esempio CdA sismica- pericolosità

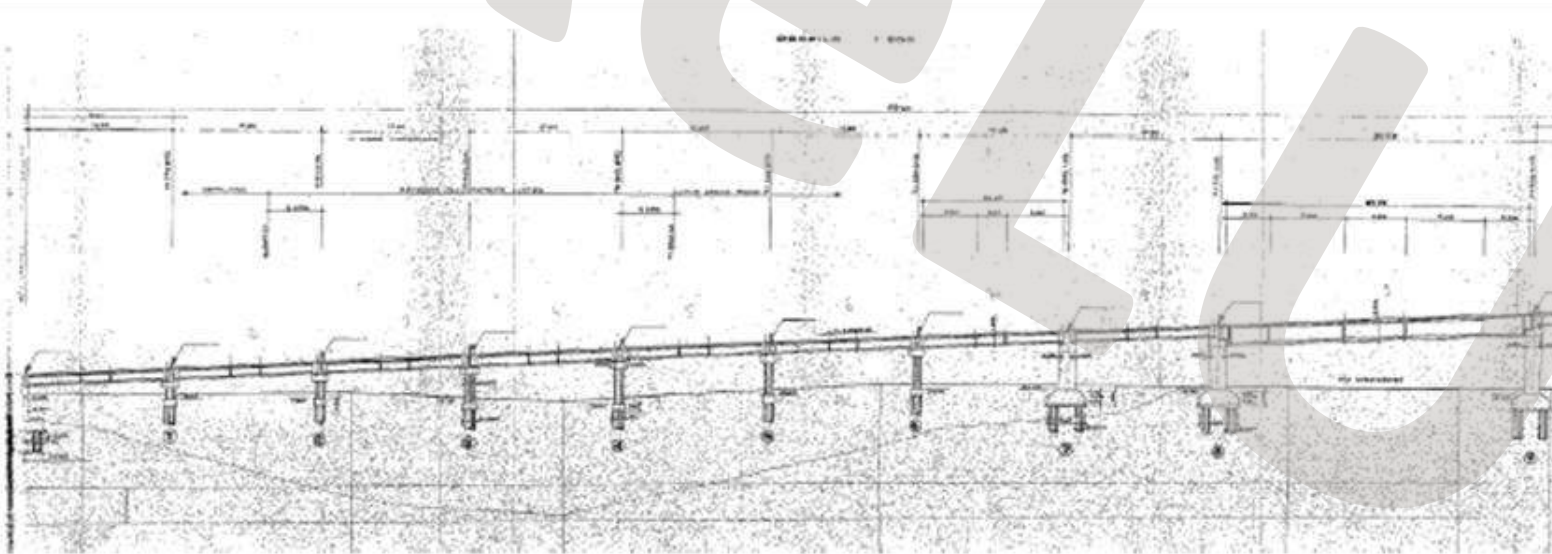
Tabella 4.12. – Classificazione sulla base dell'accelerazione di picco al suolo ( $a_g$ ) e categoria topografica ( $T_i$ )

	T1, T2, T3	T4
$a_g \geq 0,25 g$	ALTA	ALTA
$0,15 g \leq a_g < 0,25 g$	MEDIO-ALTA	ALTA
$0,10 g \leq a_g < 0,15 g$	MEDIA	MEDIO-ALTA
$0,05 g \leq a_g < 0,10 g$	MEDIO-BASSA	MEDIA
$a_g < 0,05 g$	BASSA	MEDIO-BASSA

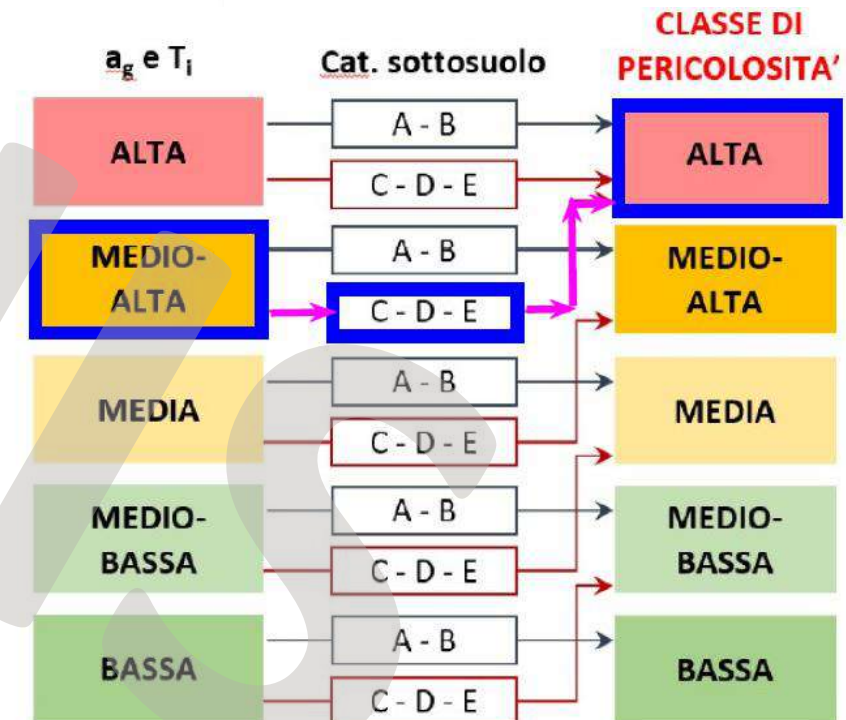
$a_g : 0.167 g$

Accelerazione di picco al suolo su suolo rigido orizzontale ( $T_R=475$  anni).

Categoria topografica : T1 - T2 - T3



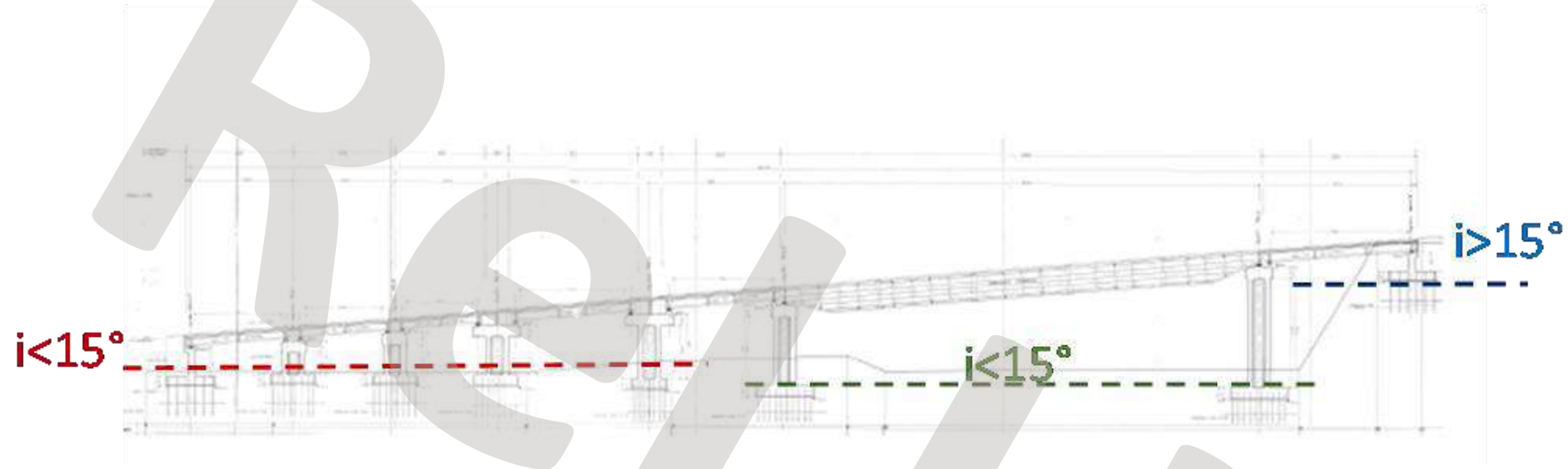
Osserviamo che la categoria è T1 perché le fondazioni sono tutte pressoché alla stessa quota





# Linee guida per ponti esistenti

## Attenzione alla categoria topografica



In un caso come questo può sembrare T4 ma **la categoria topografica deve essere riferita alle singole opere del ponte** e alla posizione della loro fondazione (testa pali in questo caso)

Tutte le pile sono in T1 e la spalla destra in T2

# Linee guida per ponti esistenti

## Esempio CdA sismica: vulnerabilità

### Dati vulnerabilità

#### Caratteristiche geometriche

Luce complessiva (Estesa) [m]	192.90	N° campate	10
Larghezza totale impalcato [m]	26.00	Luce campate	Variabile: Lmin=16.90; Lmax=36.90
Tracciato	<input type="radio"/> Rettilineo	<input checked="" type="radio"/> In curva	

#### Tipologia strutturale

<input type="radio"/> Arco in Muratura	<input checked="" type="radio"/> Travate appoggiate	<input type="radio"/> Travate continue	<input type="radio"/> Soletta in C.A.	<input type="radio"/> Sezione tubolare in c.a.
<input type="radio"/> Arco in C.A.	<input type="radio"/> Travate Gerber	<input type="radio"/> Cassone in Precompresso	<input type="radio"/> Sezione tubolare in acciaio	<input type="radio"/> Arco in acciaio
<input type="radio"/> Strallato o sospeso	<input checked="" type="radio"/> Altro <u>Travate in c.a.p. a fili aderenti</u>	<input checked="" type="radio"/> Travate in c.a.p. a cavi post-tesi		

#### Spalle

Tipologia spalla iniziale	Setto in c.a.	Tipologia spalla finale	Setto in c.a.
Fondazioni spalla iniziale	Profonde su pali	Fondazioni spalla finale	Profonde su pali

#### Pile - Materiale costruttivo

<input type="radio"/> Muratura	<input checked="" type="radio"/> C.a.	<input type="radio"/> C.A.P.	<input type="radio"/> Acciaio	<input type="radio"/> Misto (C.a./acciaio)
<input type="radio"/> Legno	<input type="radio"/> Altro: _____			

#### Pile

Tipologia sezione	Più colonne	Geometria sezione (circolare, rettangolare, etc.):	Circolare e Rettangolare
Tipologia fondazioni	Profonde su pali	Numero fondazioni	9
Altezza pile [m]	Variabile: hmin=2.10; hmax=7.50	Evoluzione eventuale rispetto al fondo alveo	

#### Impalcato - Materiale costruttivo

<input type="radio"/> Muratura	<input type="radio"/> C.a.	<input checked="" type="radio"/> C.A.P.	<input type="radio"/> Acciaio	<input type="radio"/> Misto (C.a./acciaio)
<input type="radio"/> Legno	<input type="radio"/> Altro: _____			

#### Impalcato - Tipologia soletta

<input checked="" type="radio"/> C.a.	<input type="radio"/> C.A.P.	<input type="radio"/> Misto (c.a./acciaio)	<input type="radio"/> Acciaio	<input type="radio"/> Legno
<input type="radio"/> Altro: _____				

### Dati pericolosità

Sismicità dell'area [ $a_g/g$ ] (Suolo A, TR = 475 anni) 0.167

#### Dati Geomorfologici

Morfologia del sito	
<input type="radio"/> Cresta	<input checked="" type="radio"/> Pendio dolce (0 - 10°)
<input type="radio"/> Pendio moderato (10° - 25°)	<input type="radio"/> Pendio ripido (> 25°)
<input type="radio"/> Pianura	<input type="radio"/> Pianura alla base dei versanti

### Dati esposizione

#### Classi di conseguenza (secondo definizione EN 1990:2002)

<input checked="" type="radio"/> <b>CC3</b> (Elevate conseguenze per perdita di vite umane, o con ca	<input type="radio"/> <b>CC2</b> (Conseguenze medie
<input type="radio"/> <b>Minore di CC3</b>	<input type="radio"/> <b>CC1</b> (Conseguenze basse

In caso di classe di conseguenza **minore di CC3**, fornire adeguata gi

#### Rete stradale

Itinerario Internazionale	<input type="radio"/> SI	<input checked="" type="radio"/> NO	Rete TEN	<input checked="" type="radio"/> SI	<input type="radio"/> NO
Rete emergenza	<input type="radio"/> SI	<input type="radio"/> NO			
N° di carreggiate	2		N° corsie/carreggiata	3	
Presenza di curve	<input checked="" type="radio"/> SI	<input type="radio"/> NO			
Traffico Medio Giornaliero	57554	veicoli/giorno	(sull'intera carreggiata)		
Traffico Medio Giornaliero - Veicoli commerciali*	995	veicoli/giorno	(sull'intera carreggiata)		
		veicoli/giorno	(per singola corsia di marcia)		

### Altri dati vulnerabilità

#### Tipologia apparecchi di appoggio

Piastre in neoprene

#### Presenza di curve

SI

# Linee guida per ponti esistenti

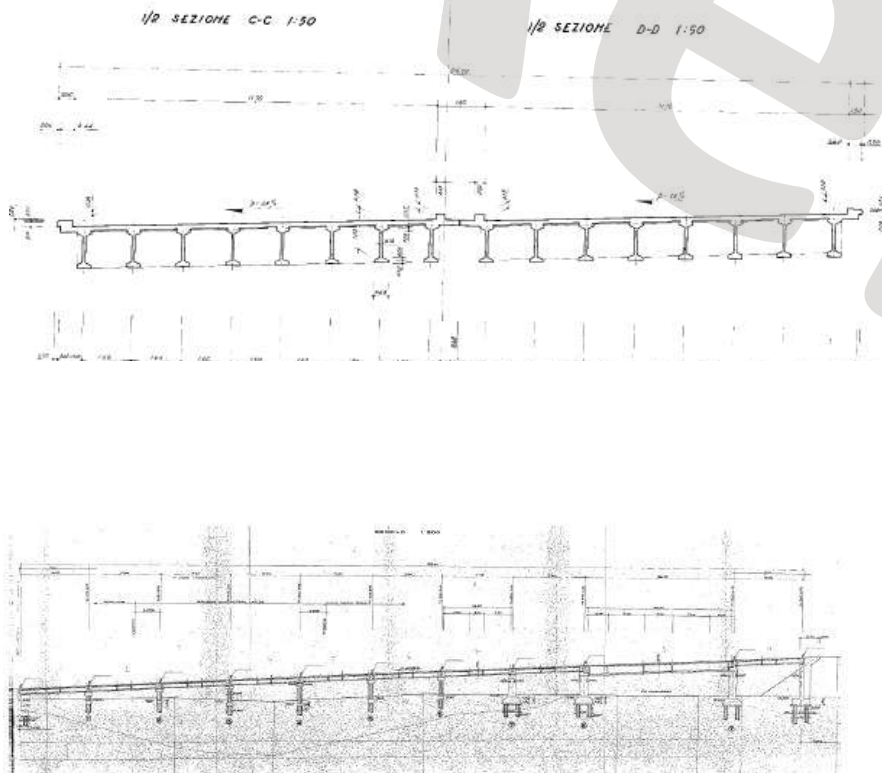
## Esempio CdA sismica

**Norma di progetto**

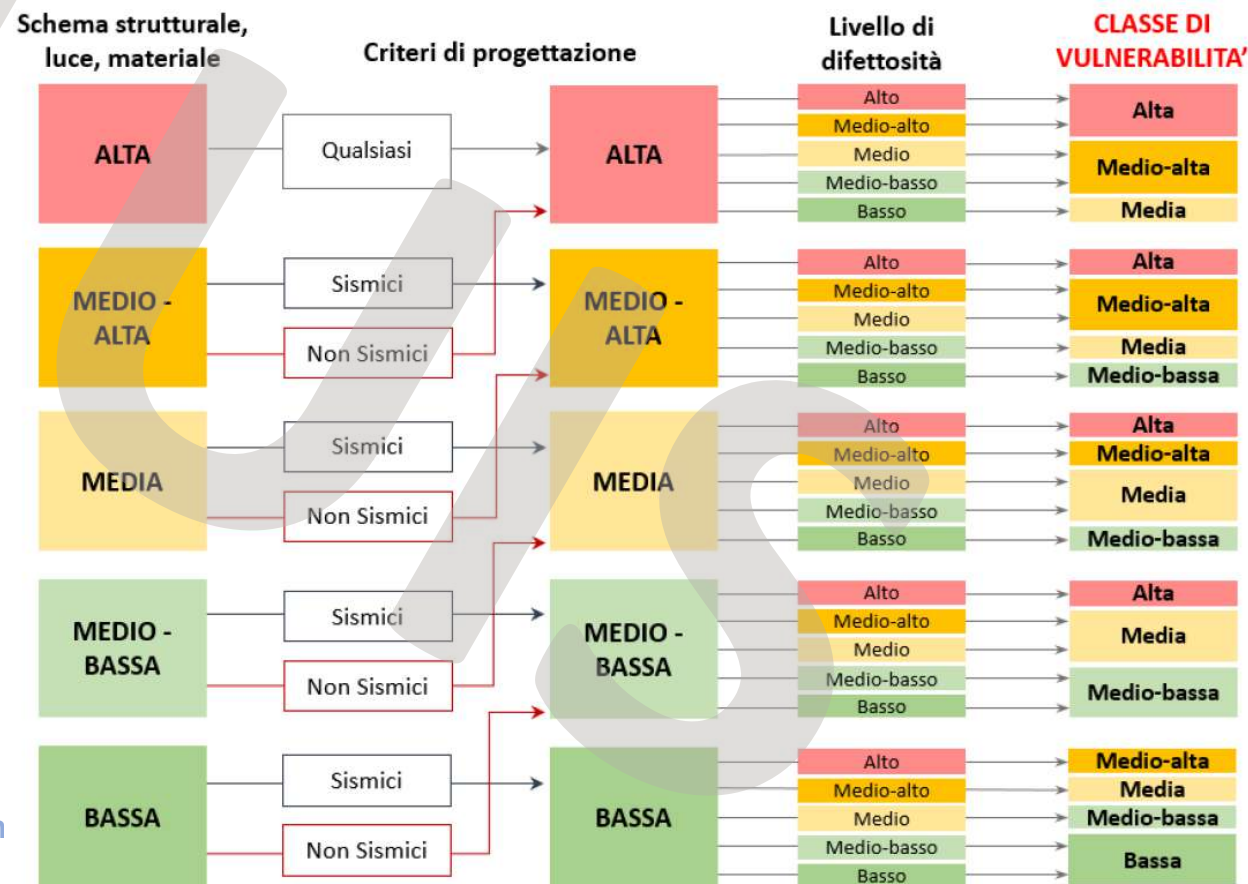
R. Decreti nn.2228 e 2229 del 16/11/1939  
Circolare n.384 del 14/02/1962 (Sovraccarichi)

Sapendo che nel 1969 la zona di costruzione non era classificata sismica e non sono stati fatti interventi di miglioramento/adeguamento

Sezione trasversale impalcato cap a cavi aderenti



Anno di progettazione	Data inizio	Data fine	Data approvazione
	27/02/1969		
	<input type="radio"/> Effettivo <input checked="" type="radio"/> Presunto	<input type="radio"/> Effettivo <input type="radio"/> Presunto	<input type="radio"/> Effettivo <input type="radio"/> Presunto



Le linee guida e interventi

# Linee guida per ponti esistenti

## Esempio CdA sismica- vulnerabilità

Ponte con impalcato in c.a.p.  
 Luce della campata più lunga 35.5m  
 Luce media delle campate =19.3m  
 Numero di campate =10

		Schema isostatico		Schema iperstatico	
		L medio-piccola L ≤ 20m	L elevata L > 20m	L medio-piccola L ≤ 20m	L elevata L > 20m
C.A.	Singola campata	Media	Medio-alta	Bassa	Medio-bassa
	Multi-campata	Medio-alta	Alta	Medio-bassa	Media
C.A.P.	Singola campata	Media	Medio-alta	-	-
	Multi-campata	Medio-alta	Alta	Medio-bassa	Media
Muratura	Singola campata	-	-	Bassa	Medio-bassa
	Multi-campata	-	-	Medio-bassa	Media
Acciaio	Singola campata	Medio-bassa	Medio-bassa	Bassa	Bassa
	Multi-campata	Media	Media	Medio-bassa	Medio-bassa

Normativa di progetto non sismica

# Linee guida per ponti esistenti

## Attenzione al riconoscimento appoggi

### Appoggi in neoprene



### Isolatori sismici



# Linee guida per ponti esistenti

## Esempio CdA sismica- livello di difettosità

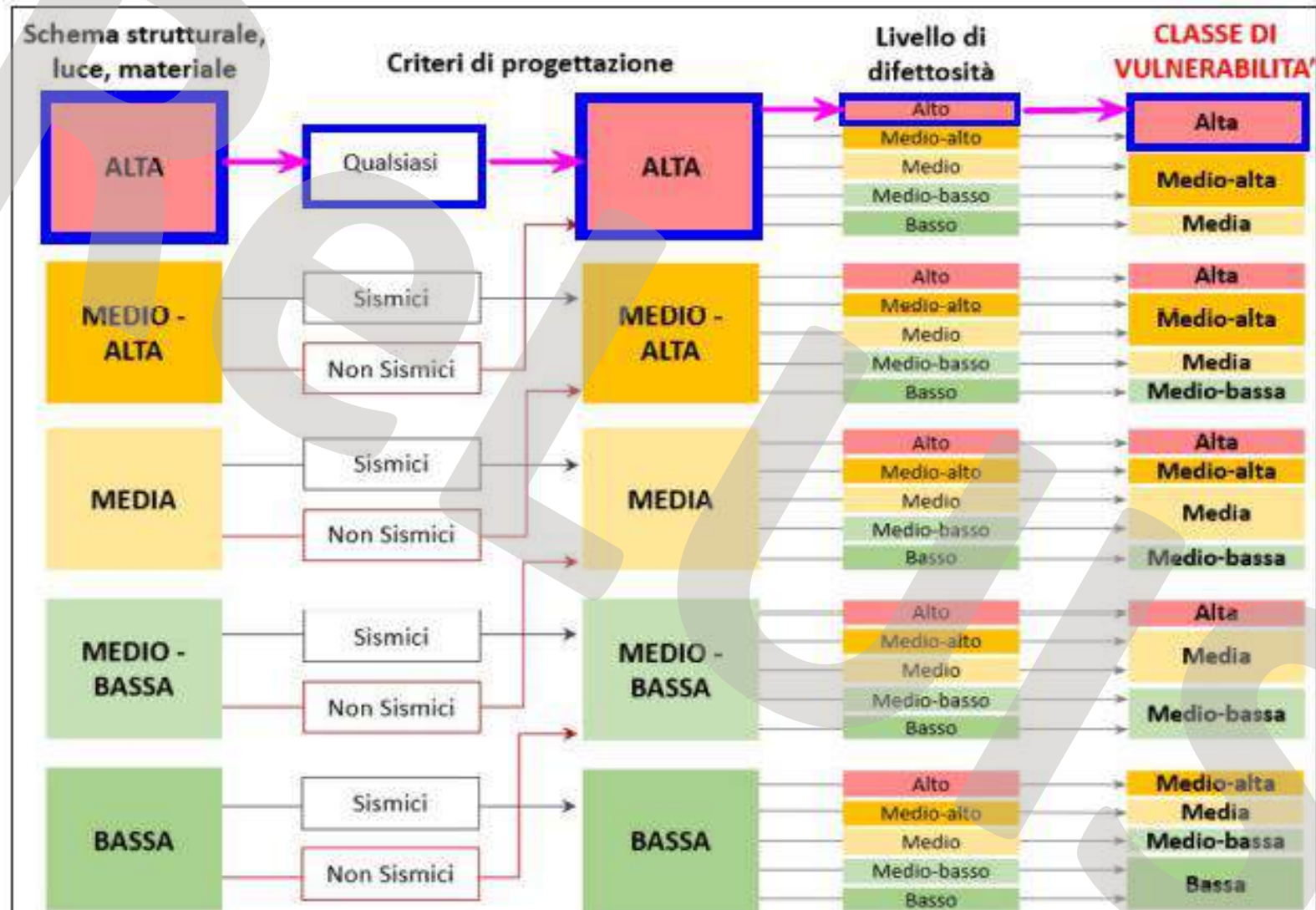
Tabella 4.14. – Livelli di difettosità ai fini della classificazione della vulnerabilità sismica

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

**Corrosione di alcune armature e invecchiamento appoggi in neoprene**

# Linee guida per ponti esistenti

## Esempio CdA sismica- Classe di vulnerabilità



# Linee guida per ponti esistenti

## Esempio CdA sismica- esposizione

Livello di Traffico Medio Giornaliero sull'intera carreggiata: 57554 veicoli/giorno.

Presenza di alternative stradali: SI

Tipologia di ente scavalcato: MEDIA

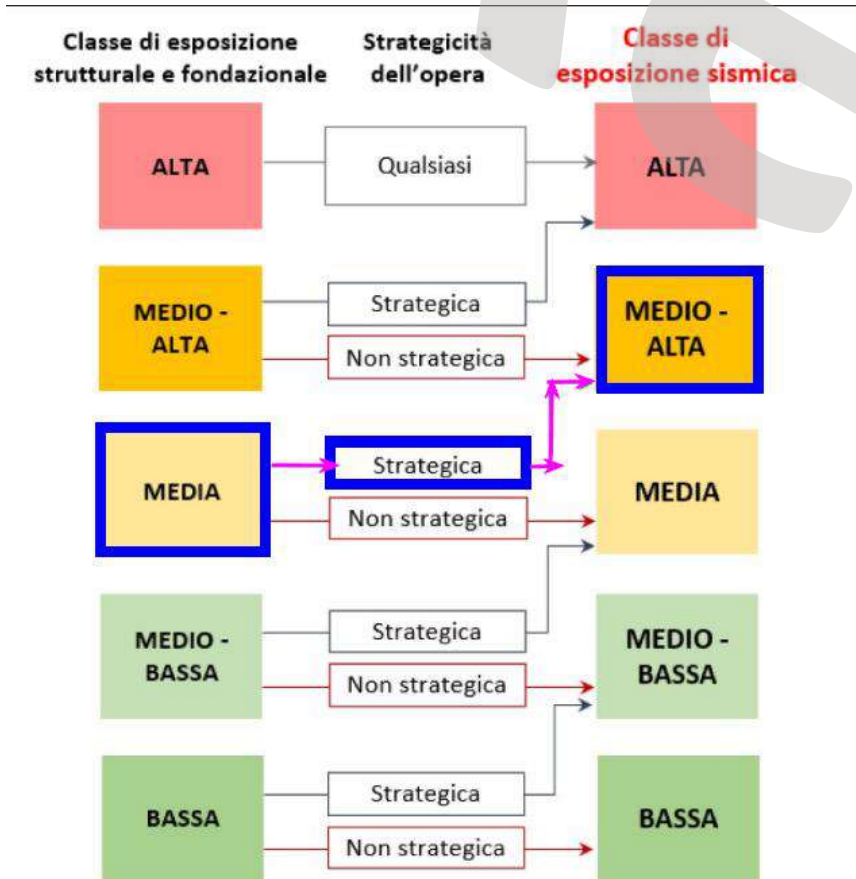


Tabella 4.9. – Tipologia di ente scavalcato

ALTA	Ente scavalcato il cui uso preveda affollamenti significativi e/o con funzioni pubbliche e sociali essenziali e/o la cui interruzione provochi situazioni di emergenza e/o enti di elevato valore naturalistico, economico e sociale (Ferrovia, zona edificata/antropizzata, strade a viabilità primaria, etc.)
MEDIA	Ente scavalcato il cui uso preveda normali affollamenti, senza funzioni pubbliche e sociali essenziali, la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza e/o enti con limitato valore naturalistico, economico e sociale (strade a viabilità secondaria, corsi d'acqua, laghi, specchi d'acqua marini, etc.)
BASSA	Ente scavalcato con presenza occasionale di persone e privi di valore naturalistico, economico e sociale (discontinuità naturali, depressioni del terreno, etc.)

naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Le linee guida per i ponti esistenti



# Linee guida per ponti esistenti

## Esempio CdA sismica

		Classe di pericolosità ALTA				
		Classe di esposizione				
		Alta	Medio-Alta	Media	Medio-Bassa	Bassa
Classe di vulnerabilità	Alta	Alta				
	Medio-Alta	Alta		Medio-Alta		
	Media	Alta	Medio-Alta		Media	
	Medio-Bassa	Medio-Alta	Media			
	Bassa	Medio-Alta	Media		Medio-Bassa	

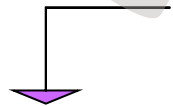
# Livello 3 – Valutazione preliminare dell’opera

## Valutazione semplificata del rischio sismico

- Forze statiche equivalenti alle forze di inerzia
- Valutazione delle forze dallo spettro di progetto con  $T_1$  (periodo fondamentale nella direzione considerata) e distribuzione in accordo con il modo fondamentale.



Applicabile se la deformazione dinamica è governata dal 1° modo



- Ponte rettilineo con impalcato continuo e massa effettiva delle pile  $< 1/5$  della massa dell’impalcato
- Direzione trasversale del ponte che rispetta la condizione a) ed è simmetrico in direzione longitudinale ( $e_{\max} < 0.05 l_{\text{bridge}}$ ) con  $e$  la distanza tra il centro di massa e di rigidezze della pila in direzione trasversale
- Impalcato dei ponti semplicemente appoggiati in direzione longitudinale e trasversale con massa effettiva delle pile  $< 1/5$  della massa dell’impalcato

Attenzione la massa delle pile deve essere piccola rispetto a quella dell’impalcato

$$F = M \cdot S_d(T_1) \quad T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$$

$$M = \left\{ \begin{array}{l} \text{Massa dell’impalcato e massa della metà superiore delle pile} \\ \text{Massa dell’impalcato che grava sulla pila } i \text{ e metà della massa della pila } i \end{array} \right.$$

$$S_d = \left\{ \begin{array}{l} \text{Spettro di risposta in corrispondenza di } T_1 \end{array} \right.$$

Le sollecitazioni sismiche calcolate con l’approccio semplificato si possono confrontare con le sollecitazioni di flessione e taglio della pila secondo il progetto originario. Per i progetti non sismici si considerano gli effetti della frenatura o delle distorsioni se le strutture sono iperstatiche

## 7.9.3. MODELLO STRUTTURALE

Il modello strutturale deve poter descrivere tutti i gradi di libertà significativi caratterizzanti la risposta dinamica e riprodurre fedelmente le caratteristiche di inerzia e di rigidità della struttura, e di vincolo degli impalcati.

Quando l'impalcato abbia angolo di obliquità  $\varphi > 20^\circ$  (vedi Fig. 7.9.1) o sia particolarmente largo rispetto alla lunghezza (rapporto tra larghezza  $B$  e lunghezza  $L$ ,  $B/L > 2,0$ ) particolare attenzione deve essere dedicata ai moti rigidi del ponte intorno all'asse verticale, in particolare per le travi continue avendo cura che il meccanismo resistente non sia affidato alla torsione di una pila unica e per le travi appoggiate prevedendo una opportuna disposizione degli apparecchi di appoggio.

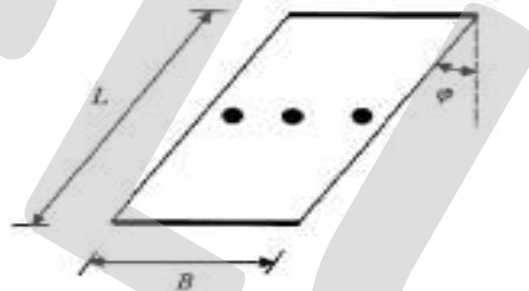


Fig. 7.9.1 – Ponte obliquo

La rigidità degli elementi in calcestruzzo armato deve essere valutata tenendo conto del loro effettivo stato di fessurazione, che è in generale diverso per l'impalcato (spesso interamente reagente) e per le pile.

In assenza di più accurate determinazioni, l'eccentricità accidentale di cui al § 7.2.6 è riferita all'impalcato e può essere assunta pari a 0,03 volte la dimensione dell'impalcato stesso, misurata perpendicolarmente alla direzione dell'azione sismica.

## 7.9.3.1 INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA E ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Fermo restando quanto riportato al §7.2.6 in merito alla modellazione dell'azione sismica, nel caso in cui la deformabilità e la capacità dissipativa del complesso fondazione-terreno siano schematizzate con vincoli viscoelastici, le matrici d'impedenza dinamica utilizzate per la modellazione degli effetti di interazione terreno-struttura devono essere valutate per ogni pila e per ogni spalla in corrispondenza di appropriati intervalli di frequenza.

Nelle analisi modali con spettro elastico di risposta, le matrici d'impedenza dinamica devono contenere solo la parte reale, ossia i termini di rigidità. La capacità dissipativa del complesso fondazione-terreno può essere portata in conto riducendo le ordinate degli spettri di progetto, sia per le componenti orizzontali, sia per la componente verticale, mediante fattori ottenuti con metodi di comprovata validità.

Nelle analisi nel dominio del tempo, il complesso fondazione-terreno sarà descritto dalle matrici di impedenza dinamica considerando sia i termini di rigidità sia i termini di smorzamento.

La modellazione del ponte dovrà includere le caratteristiche inerziali dei plinti e del terreno gravante sopra di essi e tener conto della rigidità degli elementi in calcestruzzo armato nel loro effettivo stato di fessurazione.

# Livello 4 – Verifica accurata della sicurezza sismica

Si possono usare tutti i metodi di analisi previsti al cap. 7 della NTC2018

## Modelli lineari

- Analisi statica
- Analisi dinamica:
  - al passo
  - nel dominio delle frequenze (*analisi modale*)

## Forzanti considerate

- Forze statiche
- Forze variabili nel tempo
- Spettro di risposta di progetto

## Modelli non lineari

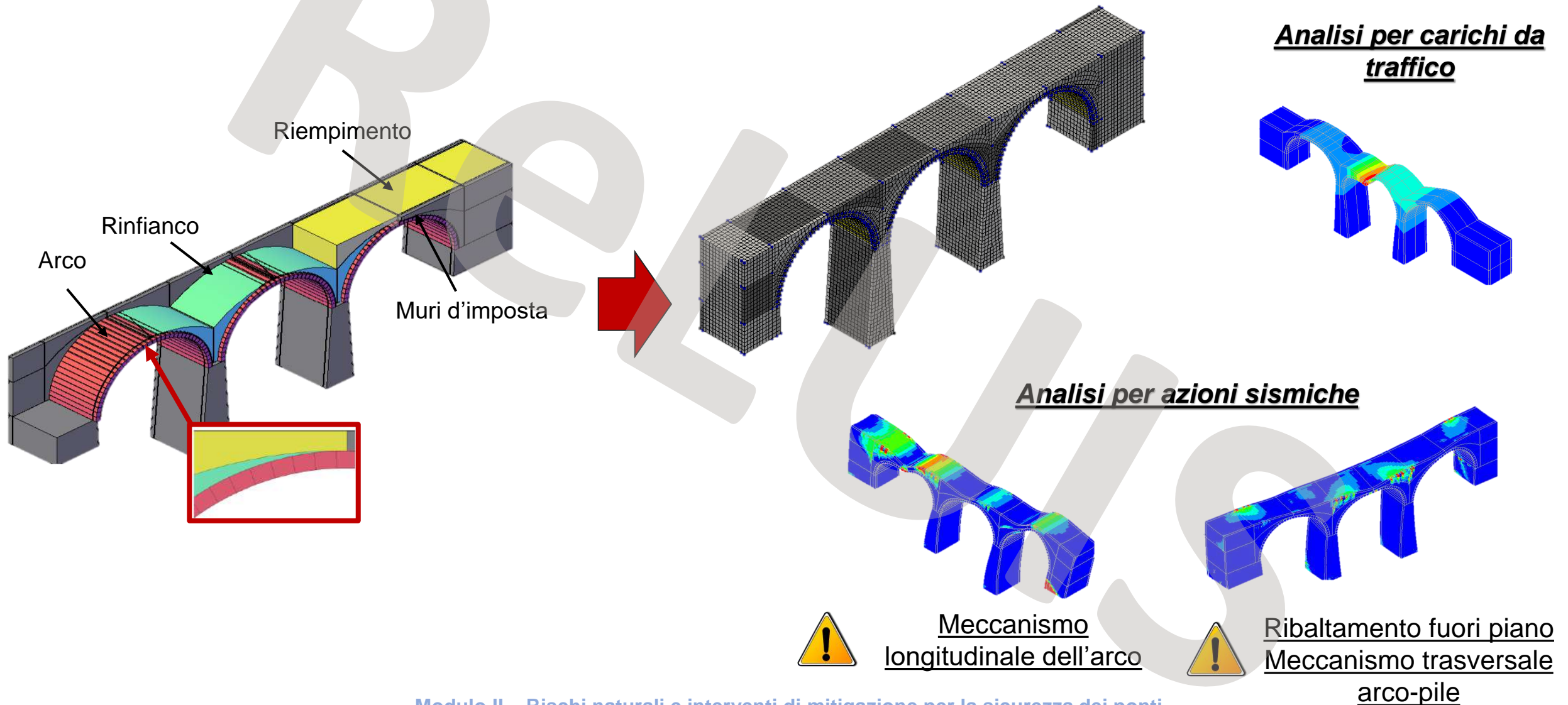
- Analisi statica (pushover)
- Analisi dinamica nel dominio del tempo (al passo)

Complessità e precisione

- Spostamenti imposti
- Accelerogrammi

# Ponti ad arco in muratura

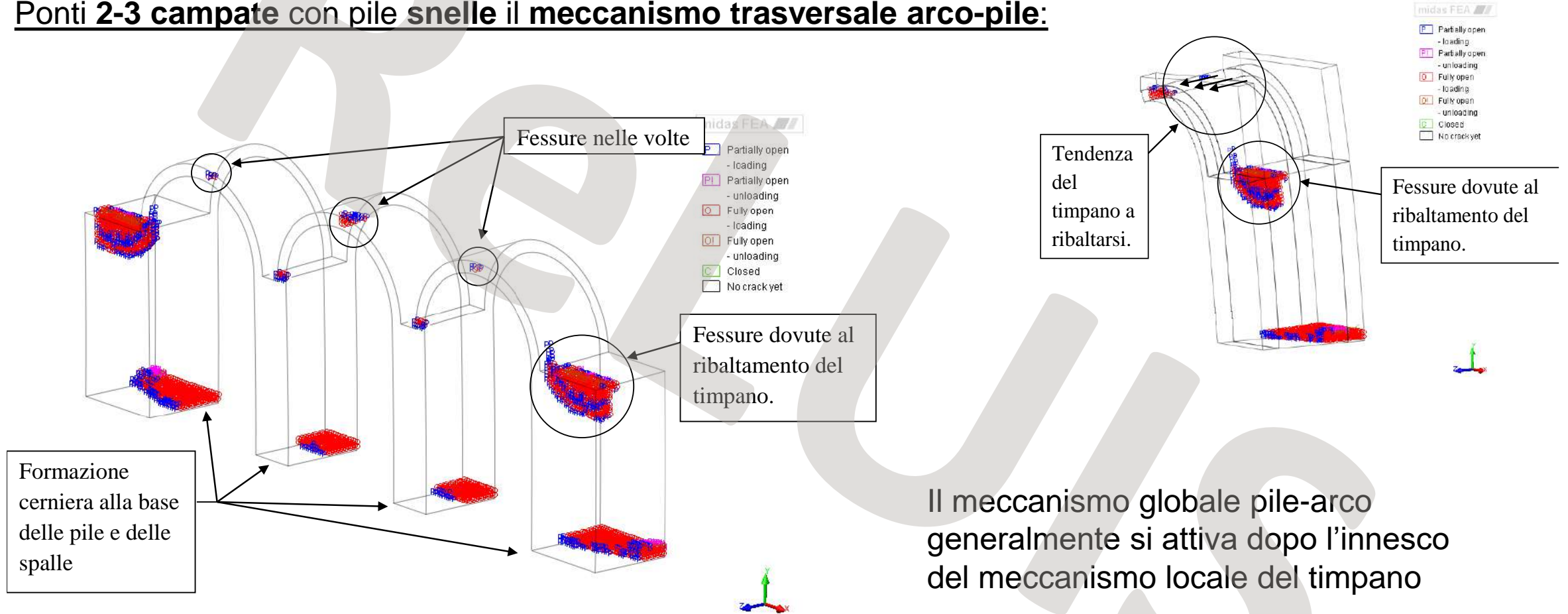
## Analisi agli elementi finiti: MODELLI 3D



# Ponti ad arco in muratura

## Analisi agli elementi finiti: MODELLI 3D

**Ponti 2-3 campate con pile snelle il meccanismo trasversale arco-pile:**



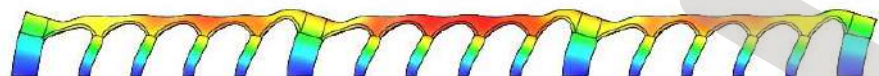
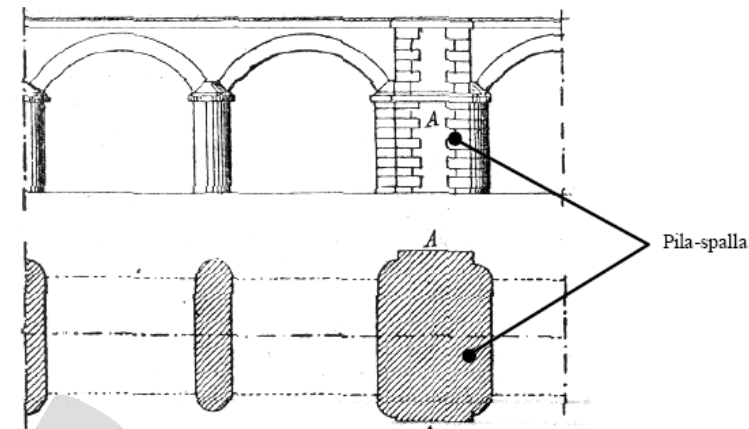
Il meccanismo globale pile-arco generalmente si attiva dopo l'innescò del meccanismo locale del timpano

# Ponti ad arco in muratura

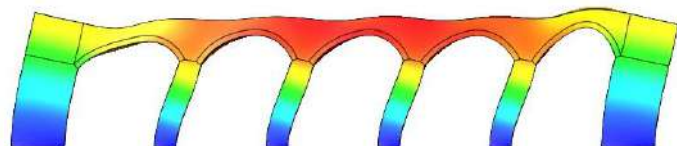
## Analisi agli elementi finiti: MODELLI 3D

### Ponti multi-campata con pile snelle il meccanismo longitudinale e trasversale arco-pile:

I ponti ad n campate generalmente si sviluppano in moduli di 5 campate tra le quali sono interposte le pile-spalle. Le pile-spalle sono di dimensioni maggiori rispetto alle spalle e sono in grado di contrastare la spinta orizzontale in caso di crollo di una o più arcate.



**Modo 1 (6,91 Hz) "longitudinale"**



**Modo 1 (7,33 Hz) "longitudinale"**



**Modo 5 (8,54 Hz) "trasversale"**



**Modo 2 (8,51 Hz) "trasversale"**

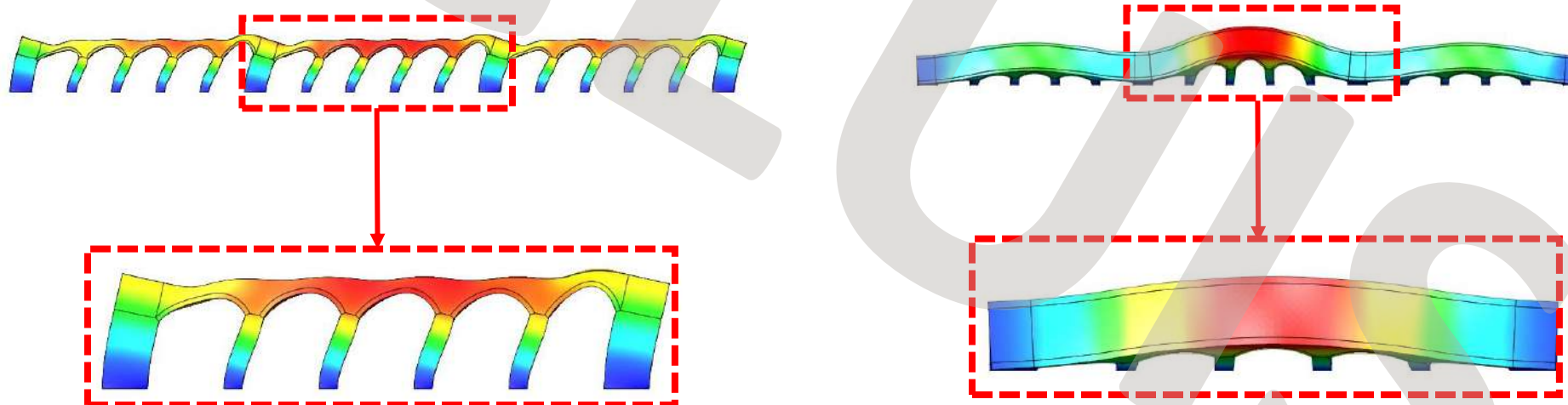


# Ponti ad arco in muratura

## Analisi agli elementi finiti: MODELLI 3D

### Ponti multi-campata con pile snelle il meccanismo longitudinale e trasversale arco-pila:

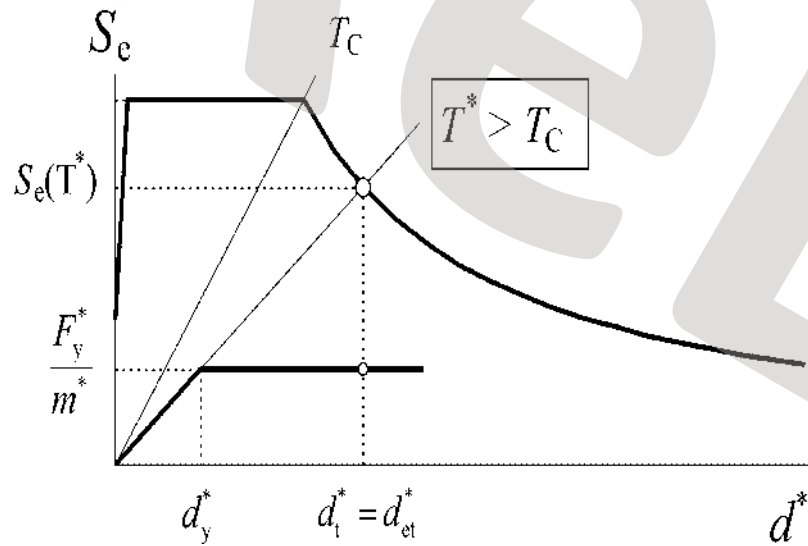
Lo studio dinamico dei ponti multicampata associato ad analisi pushover ha evidenziato che i ponti multicampata, possono essere rappresentati da dei modelli ridotti. In particolare si ritiene sufficientemente rappresentativo della realtà lo sviluppo di modelli dove viene rappresentato un solo modulo pila-spalla.



# Ponti ad arco in muratura

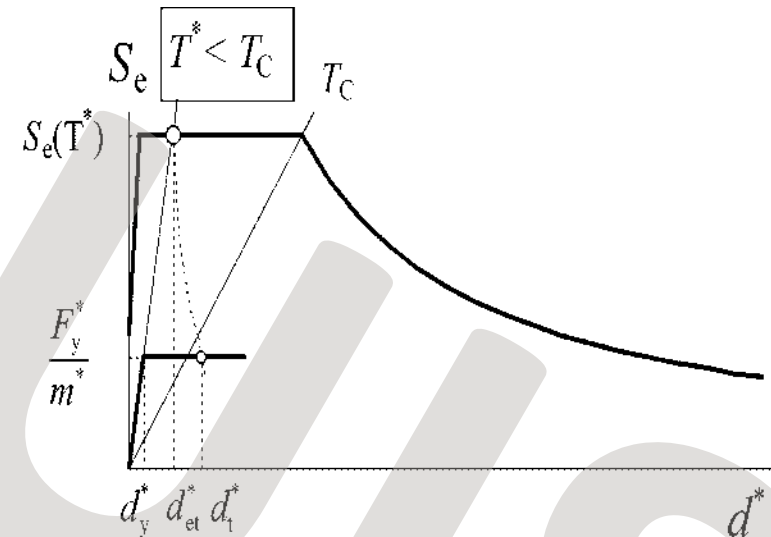
## Analisi agli elementi finiti: VERIFICHE SISMICHE

La verifica prevista da normativa deve essere condotta in termini di spostamento; consiste nel verificare che lo spostamento richiesto sia inferiore alla capacità in spostamento della struttura.



$$T^* \geq T_c$$

$$d_{\max}^* = d_{e,\max} = S_{De}(T^*)$$



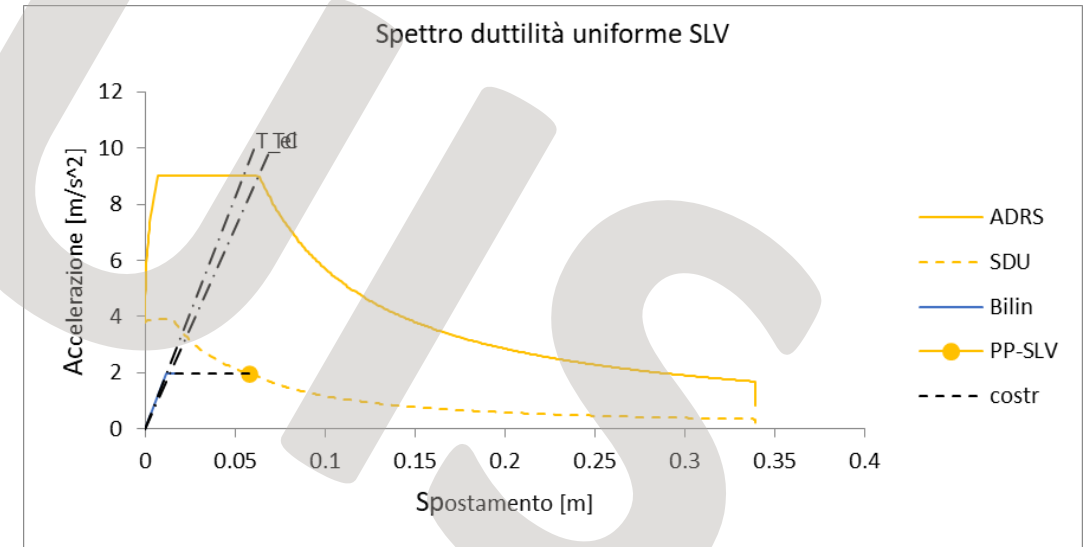
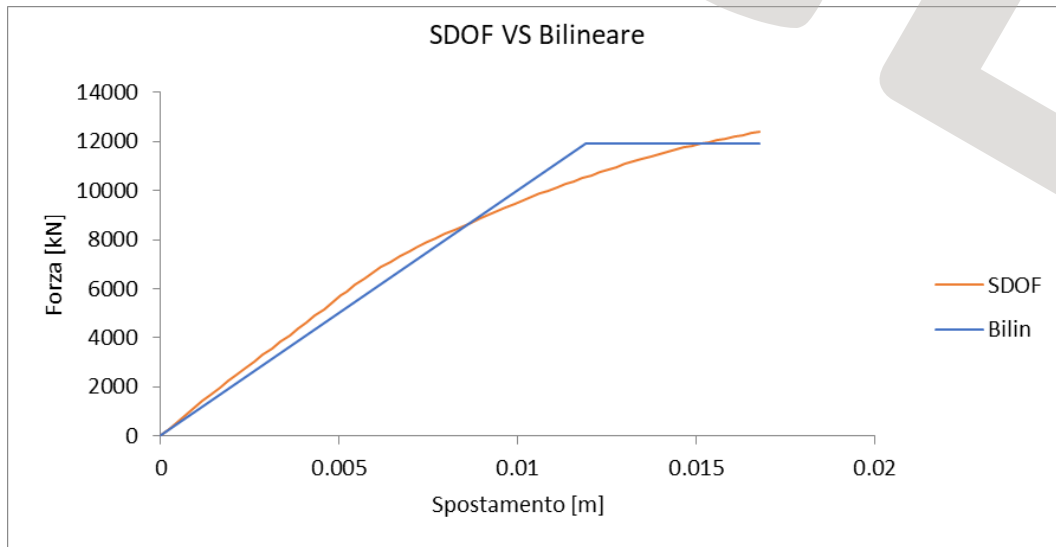
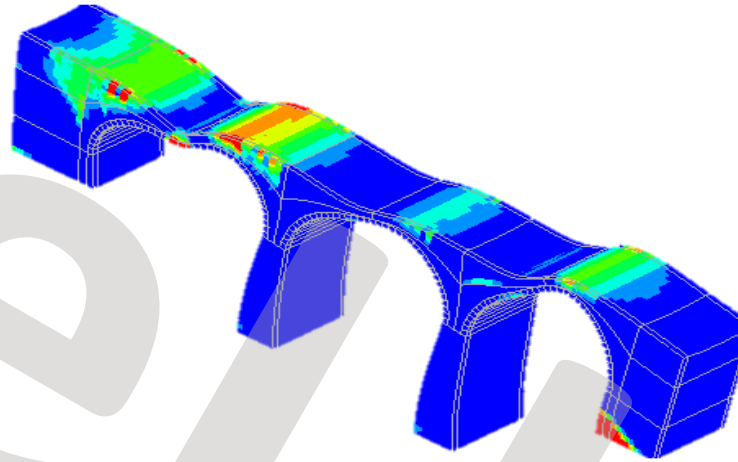
$$T^* \leq T_c$$

$$d_{\max}^* = \frac{d_{e,\max}}{q^*} \left[ 1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{T} \right] \geq d_{e,\max}$$

$$q^* = \frac{S_{Ae}(T^*)m^*}{F_y^*}$$

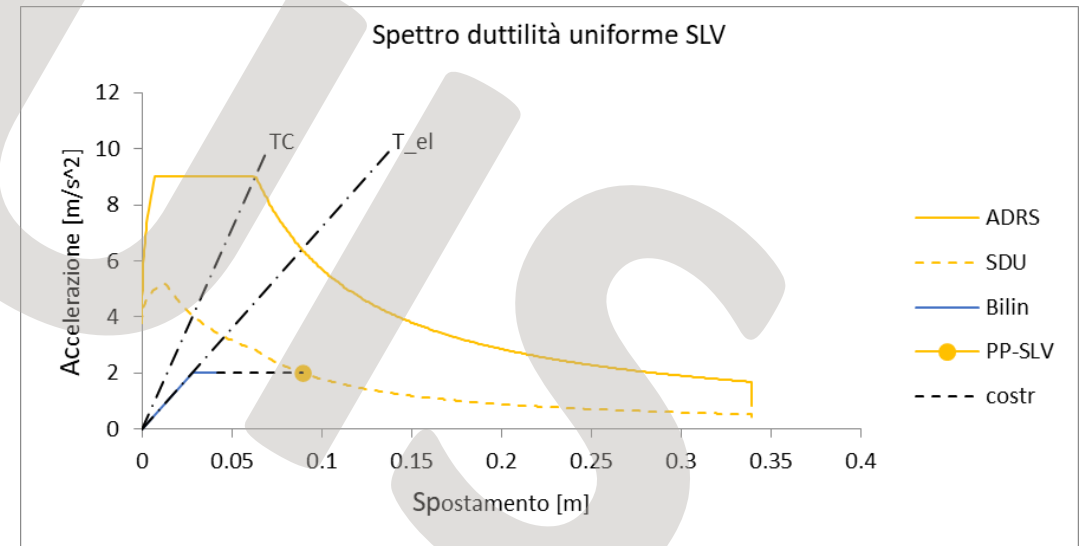
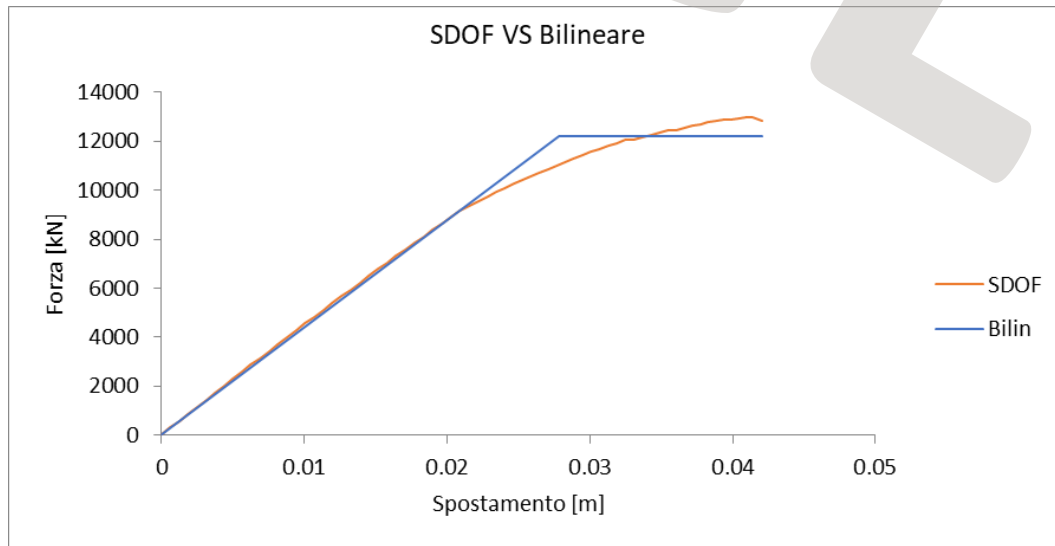
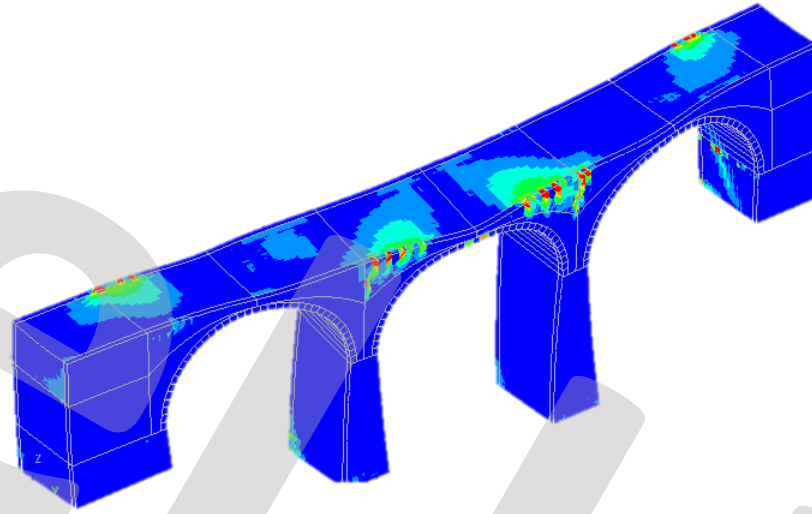
# Ponti ad arco in muratura

## Analisi agli elementi finiti: VERIFICHE SISMICHE



# Ponti ad arco in muratura

## Analisi agli elementi finiti: VERIFICHE SISMICHE



# Strategie di intervento

**Incremento di resistenza**

**Incremento di duttilità**

**Riduzione effetti delle azioni sismiche**



Isolamento sismico

Strategia

Incremento di T (period) per ridurre il valore dell'accelerazione spettrale

Limitazione della forza orizzontale massima trasmessa alla fondazione

Dissipazione di una parte rilevante dell'energia meccanica trasmessa dal terremoto

Requisiti generali



Impalcato, pile e spalle rimangono in campo elastico alla SLU



Non si applica il capacity design e nemmeno i dettagli per ottenere la duttilità

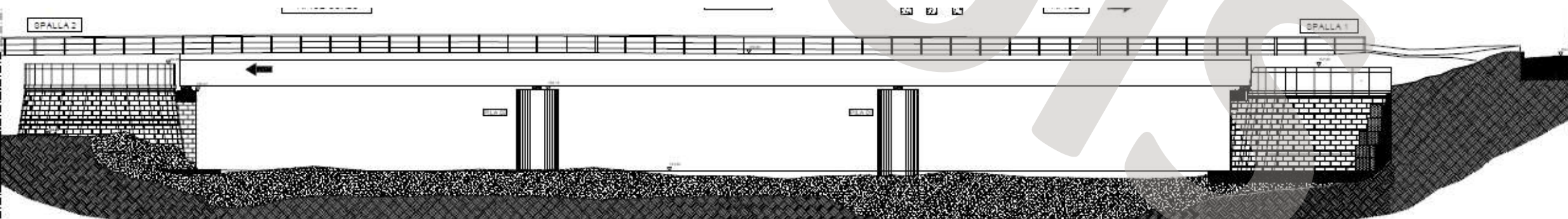
# Caso studio: Ponte isolato



Ponte con impalcato in acciaio  
Una pila scalzata

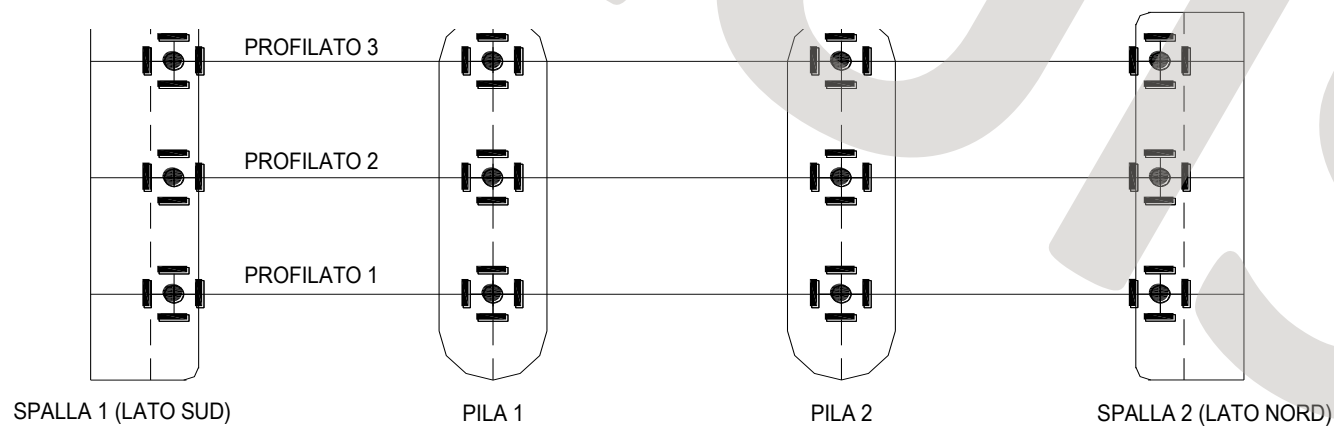
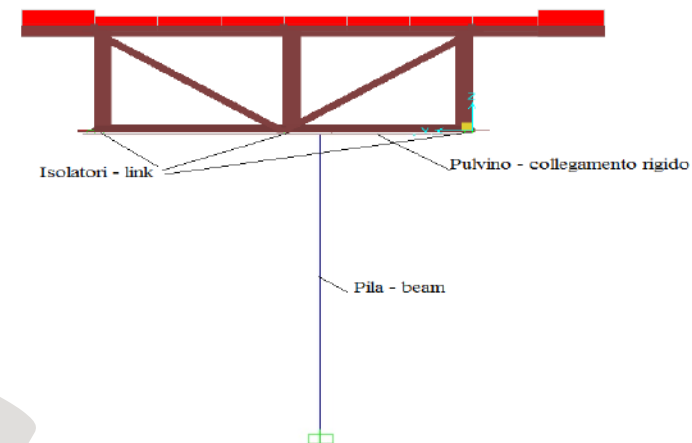
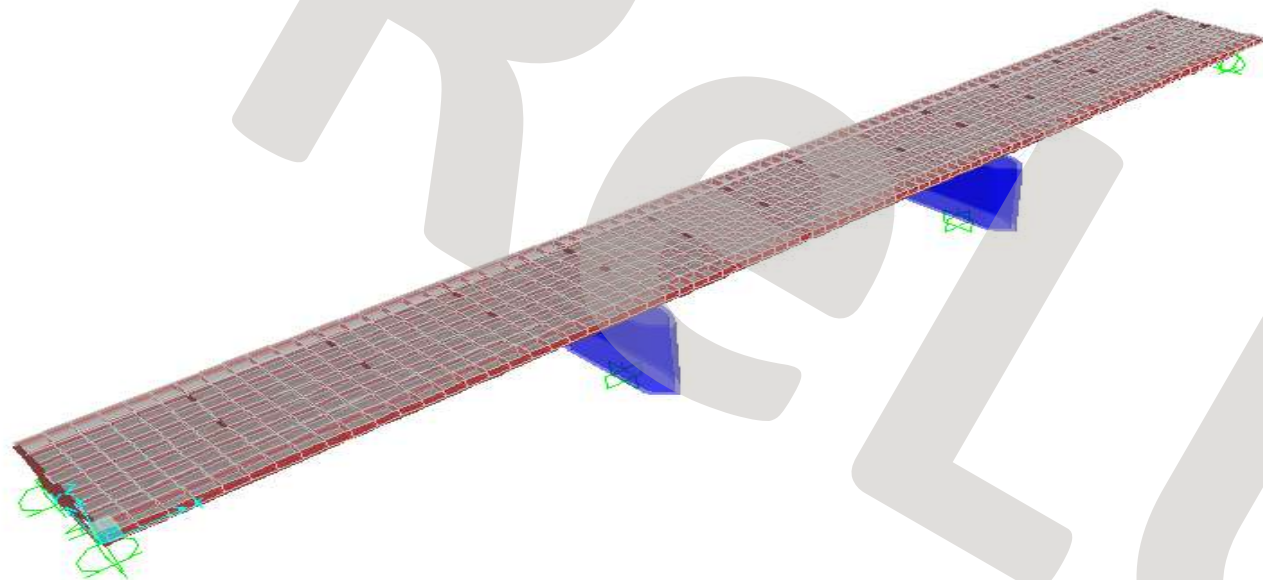
Intervento:

Ricostruzione pila  
Micropali fondazione  
Isolamento sismico dell'impalcato



# Caso studio: Ponte isolato

Il sistema di isolamento sismico è costituito da isolatori elastomerici ad elevato smorzamento (High Damping Rubber Bearings - HDRB) (tipo serie FIP-SI), disposti in corrispondenza di tutte le pile e spalle.



Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Le linee guida per i ponti esistenti

Indipendentemente dalla gomma impiegata, naturale o sintetica, gli isolatori elastomerici possono presentare vari livelli di smorzamento:

isolatori elastomerici a basso smorzamento (Low Damping Rubber Bearings - LDRB);

isolatori elastomerici con inserto in piombo (Lead Rubber Bearings - LRB);

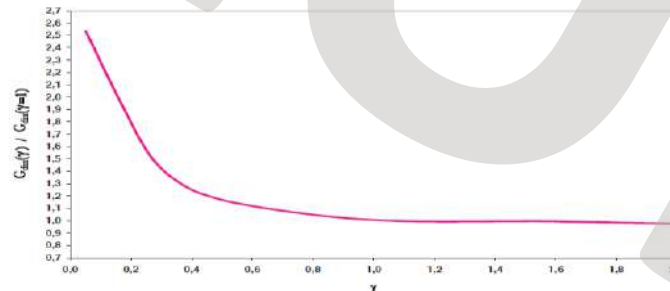
isolatori elastomerici ad elevato smorzamento (High Damping Rubber Bearings - HDRB).

I dispositivi attualmente più diffusi sono del tipo HDRB che consentono di avere smorzamento sufficiente ad eliminare la necessità di dispositivi ausiliari; gli HDRB costituiscono pertanto un sistema completo.

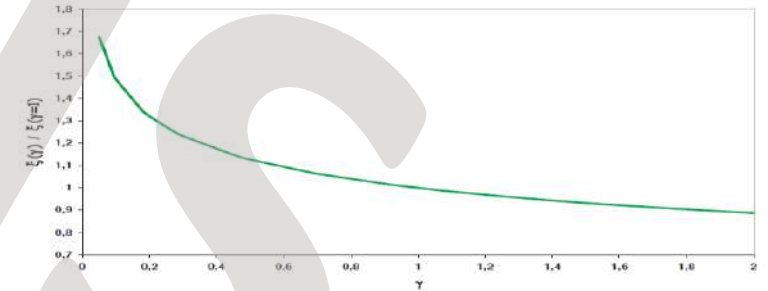
Gli isolatori elastomerici della serie SI sono caratterizzati da un modulo dinamico equivalente a taglio  $G_{din}$  compreso tra 0.4 e 1.4 MPa e da un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente pari al 10% o al 15%, a scelta del progettista. Sia il modulo  $G_{din}$  che  $\xi$  variano al variare della deformazione di taglio  $g$  per deformazioni  $g < 0.5$ . Per valori compresi tra 1 e 2, corrispondenti agli spostamenti sismici di progetto risultano invece pressoché costanti, come riportato dai grafici che mostrano l'andamento di  $G_{din}$  e  $\xi$  adimensionalizzati rispetto ai rispettivi valori per  $g = 1$ , in funzione della deformazione di taglio dell'elastomero  $g$ .



Isolatore in gomma



Variazione media del modulo dinamico equivalente a taglio in funzione della deformazione di taglio.



Variazione media del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente in funzione della deformazione di taglio.



# Caso studio: Ponte isolato

Il periodo della struttura non isolata è di 0.20 s



Figura 6.2 1° modo di vibrare traslazionale trasversale -  $T=1.95$  sec

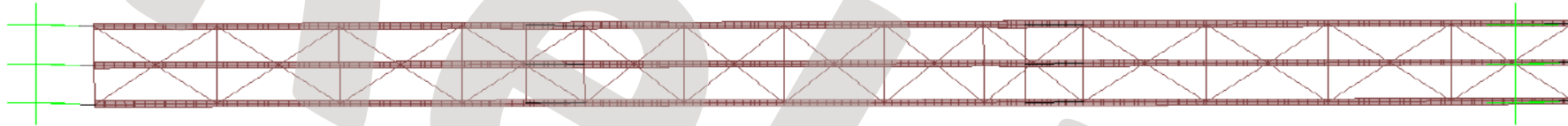


Figura 6.3 2° modo di vibrare traslazionale longitudinale -  $T=1.93$  sec

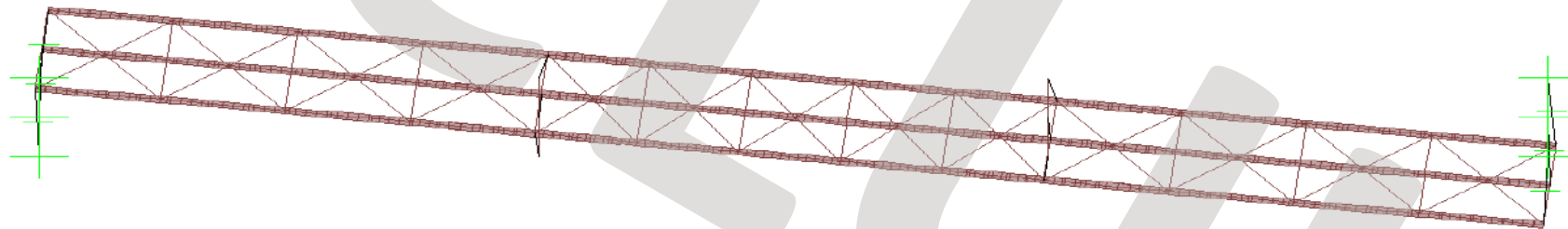
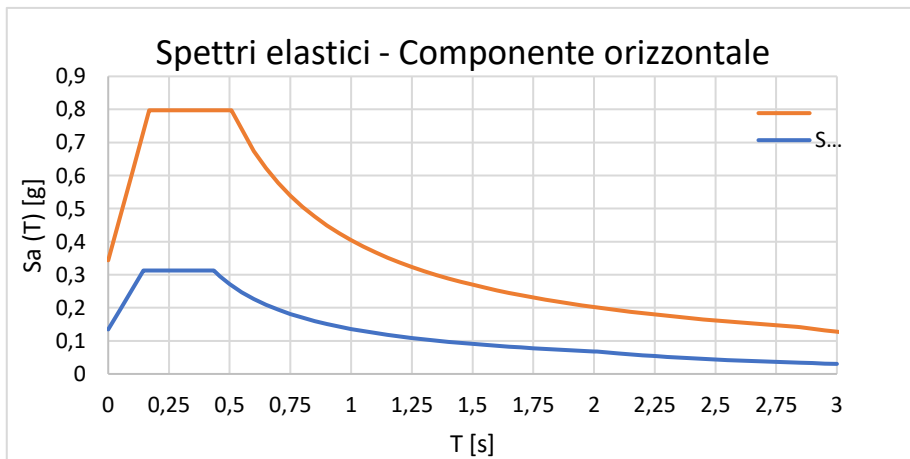


Figura 6.4 3° modo di vibrare torsionale -  $T= 1.41$  sec



dmax	x	y
	[m]	[m]
<b>S1</b>	0.230	0.226
<b>P1</b>	0.228	0.231
<b>P2</b>	0.228	0.231
<b>S2</b>	0.230	0.226

L'elongazione del periodo consente una riduzione di 4 volte dell'accelerazione spettrale

Spostamenti su pile e spalle di circa 230mm

E' necessario rivedere i giunti sulle spalle

Le linee guida per i ponti esistenti

**Le linee guida per i ponti esistenti**

Reluis

***Grazie per l'attenzione***

Reluis