

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MESSINA  
DIPARTIMENTO di INGEGNERIA CIVILE



# Teoria e Progetto di Ponti

A. Recupero



# CONTENUTI e INDICE

- LA CLASSIFICAZIONE;
- LE AZIONI
- LA NORMATIVA ITALIANA;
- GLI EFFETTI REOLOGICI;
- L'IMPALCATO A GRATICCIO;
- L'IMPALCATO A CASSONE;
- LA PRECOMPRESSIONE ESTERNA;
- LA SISMICA

An aerial photograph of a large cable-stayed bridge spanning a wide body of water. The bridge features two tall, white, A-frame pylons with numerous stay cables. A large cargo ship is visible in the water beneath the bridge. In the background, a city skyline is visible across the water. A semi-transparent green rectangular box is overlaid on the center of the image, containing the text "LA SISMICA" in black, bold, sans-serif capital letters.

# LA SISMICA

## *LA SISMICA*

### *INSUFFICIENZA LUNGHEZZE DI APPOGGIO*



**SAN FRANCISCO BAY BRIDGE**  
**Loma Prieta Earthquake, 1989**  
**Magnitudo = 7**

## *LA SISMICA*

### *COLLASSO CAMPATE PER FENOMENI DI LIQUEFAZIONE*



**SHOWA BRIDGE**  
**Terremoto di Niigata, Giappone, 1964.**

*LA SISMICA*  
*COLLASSO CAMPATA*



**NISHINOMIYA - KO BRIDGE**  
**Kobe. 17 Gennaio 1995. Magnitudo 6.69.**



# *LA SISMICA*

## *COLLASSO CAMPATA*



**ECHEVERS**  
**CHILE 27 Febbraio 2010. Magnitudo 8.80**

# *LA SISMICA*

## *COLLASSO CAMPATA*



**ECHEVERS**  
**CHILE 27 Febbraio 2010. Magnitudo 8.80**



# *LA SISMICA*

## *COLLASSO CAMPATA*



**ECHEVERS**  
**CHILE 27 Febbraio 2010. Magnitudo 8.80**

## *LA SISMICA*

### *CONCENTRAZIONE AZIONI ORIZZONTALI SULLE SPALLE*



**STATE ROUTE 118, BALBOA BOULEVARD BRIDGE  
Northridge, 17 Gennaio 1994. Magnitudo 6.69**

# *LA SISMICA*

## *COLLASSO DELLE PILE*



Rottura per taglio



Formazione cerniere plastiche

**U-SHI Bridge**  
**Chi-Chi Taiwan 21 settembre 1999 - Magnitudo 7.6**

# *LA SISMICA*

## *COLLASSO DELLE PILE*



Rottura per taglio

**U-SHI Bridge**  
**Chi-Chi Taiwan 21 settembre 1999 - Magnitudo 7.6**



# *LA SISMICA*

## *COLLASSO DELLE PILE*



**INTERSTATE-10/LA CIENEGA-  
VENICE BLVD.  
Northridge, California Earthquake,  
Jan. 17, 1994 M=6.69**



# *LA SISMICA*

## *COLLASSO DELLE PILE*



**ROUTE 3 HANSHIN EXPRESSWAY**  
**Kobe. 17 Gennaio 1995. Magnitudo 6.69.**

# *LA SISMICA*

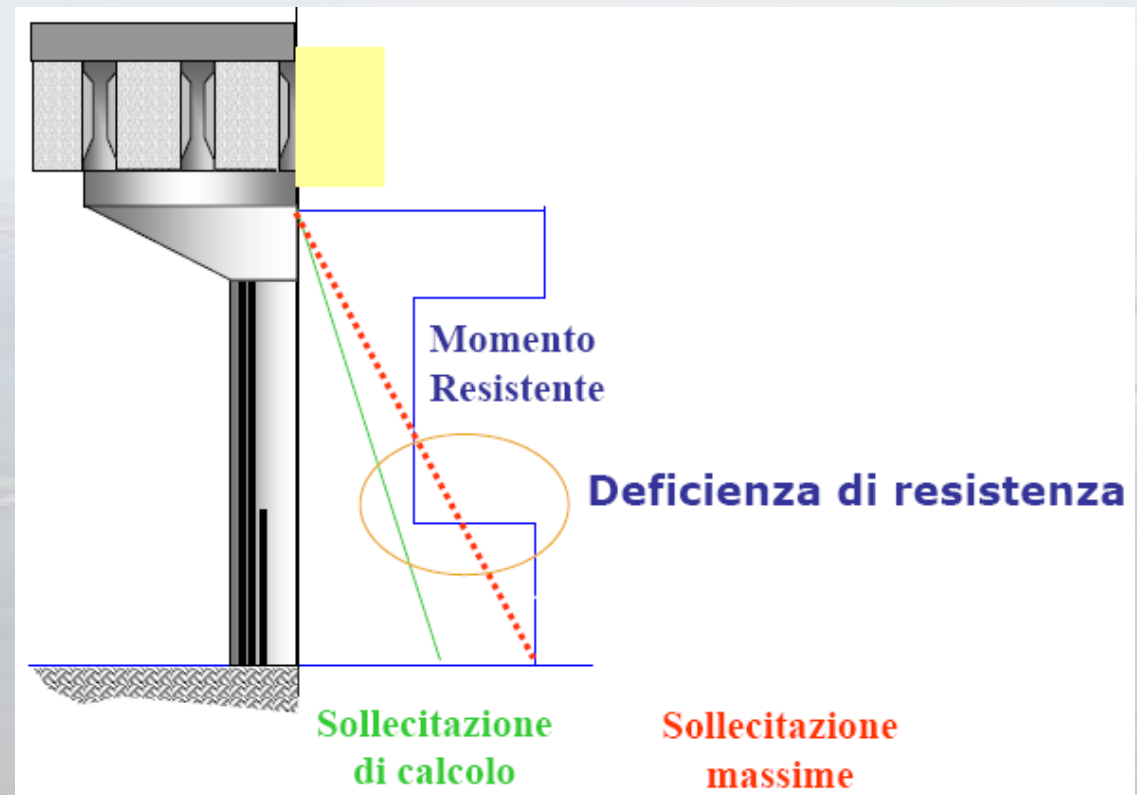
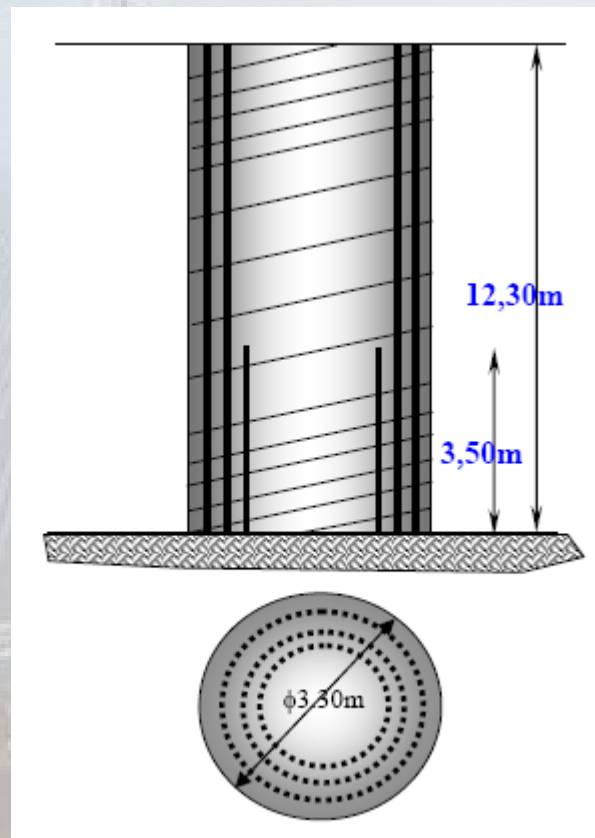
## *COLLASSO DELLE PILE*



**ROUTE 3 HANSHIN EXPRESSWAY**  
**Kobe. 17 Gennaio 1995. Magnitudo 6.69.**

# LA SISMICA

## COLLASSO DELLE PILE



**ROUTE 3 HANSHIN EXPRESSWAY  
Kobe. 17 Gennaio 1995. Magnitudo 6.69.**

## *LA SISMICA*

### *COLLASSO DELLE PILE*

Collasso della  
cerniera plastica  
per eccesso di  
deformazione  
flessionale ciclica



**GOTHIC AVENUE BRIDGE**

**Northridge, California Earthquake, 17 Gennaio 1994  $M=6.69$**



# *LA SISMICA*

## *DETTAGLI COSTRUTTIVI*



**CYPRESS VIADUCT, INTERSTATE 880**  
**Loma Prieta, California earthquake, 17 Ottobre 1989**  
**Mag. 7.04**

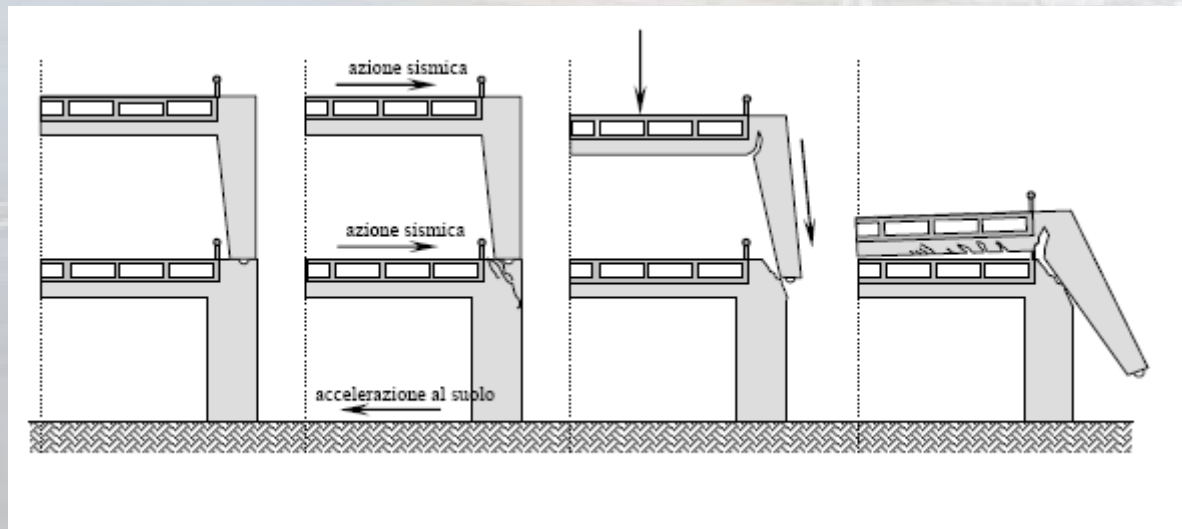


# LA SISMICA

## DETTAGLI COSTRUTTIVI



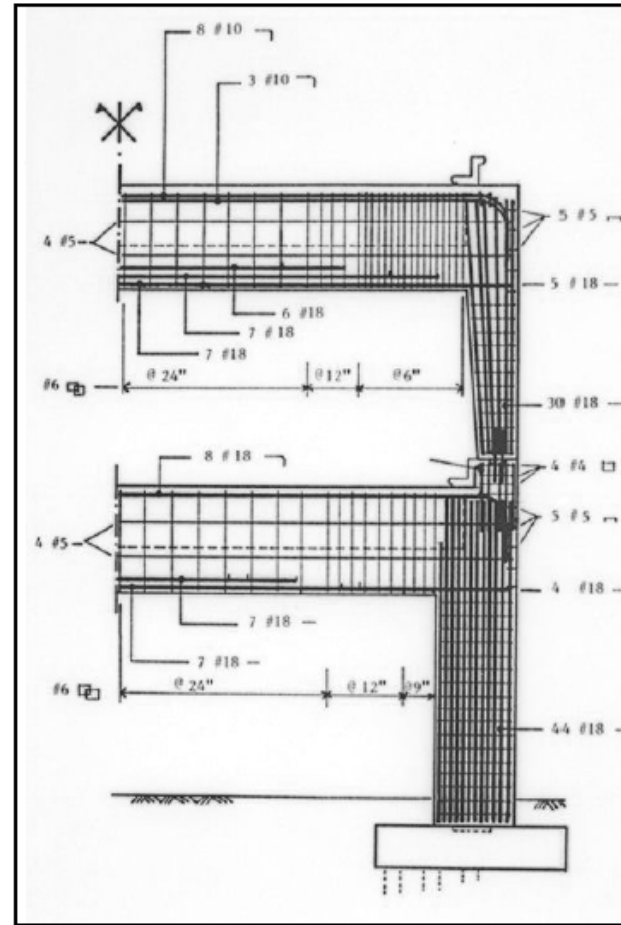
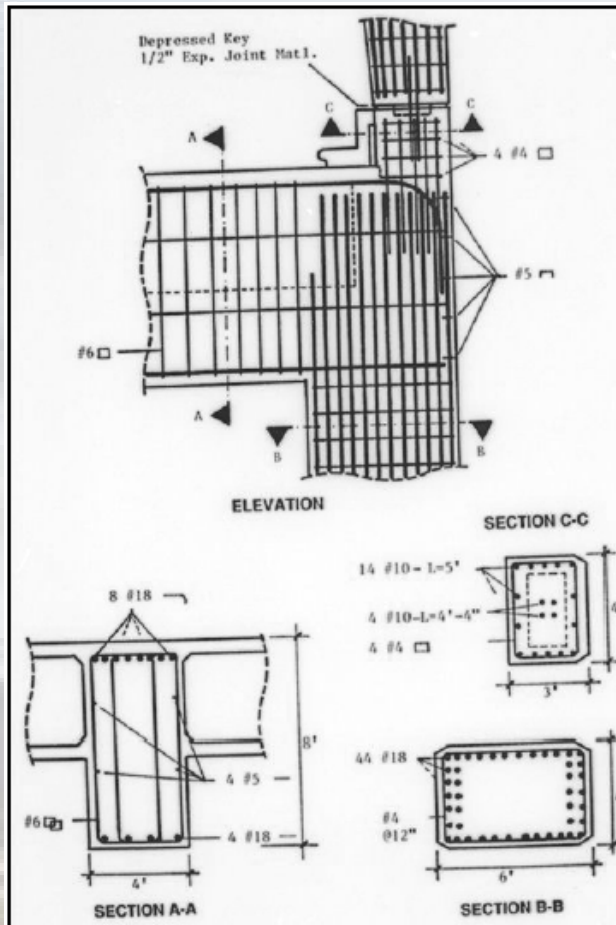
Dettagli costruttivi: Rottura a taglio del nodo



**CYPRESS VIADUCT, INTERSTATE 880**  
**Loma Prieta, California earthquake, 17 Ottobre 1989**  
**Mag. 7.04**

# LA SISMICA

## DETTAGLI COSTRUTTIVI



CYPRESS VIADUCT, INTERSTATE 880  
Loma Prieta, California earthquake, 17 Ottobre 1989  
Mag. 7.04

# *LA SISMICA*

## *DETTAGLI COSTRUTTIVI*



**SHINKANSEN BRIDGE**  
**Kobe. 17 Gennaio 1995. Magnitudo 6.69.**

## *LA SISMICA*

### Note

Per quanto riguarda gli impalcati, i quali non hanno generalmente una funzione preminente di resistenza anti-sismica, i danni sono essenzialmente legati a errori di concezione cinematica e comprendono il martellamento tra campate adiacenti e la perdita di appoggio. Quest'ultima è dovuta a una lunghezza d'appoggio inadeguata agli spostamenti sotto sisma, e all'assenza o a un difetto di resistenza di eventuali ritegni sismici. Questo danno, molto frequente, risulta in collassi spettacolari.

## *LA SISMICA*

### Note

I danni di varia entità osservati sulle pile sono generalmente dovuti a difetti di duttilità flessionale e di resistenza a taglio. Il collasso avviene molto spesso seguendo una sequenza di snervamento flessionale della pila, degrado ciclico della sezione per insufficiente confinamento e conseguente decremento della resistenza a taglio. La rottura osservata denuncia un esaurimento della duttilità flessionale, spesso combinato con il superamento della resistenza a taglio. Molto più raramente, su pile tozze, sono stati osservati collassi a taglio dominante.



## *LA SISMICA*

### Note

Le rotture descritte portano a deformazioni residue anche elevate, con fuori-piombo significativi. Nel caso di impalcati di grande larghezza con pile a fusto unico, anche a causa del momento d'inerzia prodotto dalla rotazione dell'impalcato, la probabilità di un collasso completo per perdita di equilibrio è molto alta.

Nel caso particolare delle pile a telaio, relativamente diffuso tra i viadotti più vecchi anche nel nostro Paese, un ulteriore elemento di vulnerabilità rispetto a quelli descritti è dato dall'inadeguato dimensionamento dei nodi trave-pilastro.

In molti casi si vede una scarsa cura dei particolari costruttivi.

## CRITERI DI PROGETTO ANTISISMICO

- formazione di un meccanismo dissipativo stabile flessionale nel quale la dissipazione sia limitata alle pile favorendo la plasticizzazione del maggior numero di esse ed escludendo meccanismi di rottura per taglio.

### CRITERI DI PROGETTO ANTISISMICO

- e' richiesto che l'impalcato, gli apparecchi di appoggio, le strutture di fondazione e le spalle restino in campo elastico adottando il criterio di "gerarchia delle resistenze".
- esclusione dei meccanismi di rottura per taglio adottando il criterio di "gerarchia delle resistenze".



## *LA SISMICA*

### CRITERI DI PROGETTO ANTISISMICO

- la cinematica tra le parti deve essere tale da limitare gli spostamenti relativi. In ogni caso si devono escludere martellamenti e/o perdite di appoggio.

### ADEGUAMENTO STRUTTURE ESISTENTI

- Nonostante la loro apparente semplicità, in molti casi le strutture da ponte sono caratterizzate da una risposta dinamica irregolare. Fa eccezione la categoria dei ponti con impalcato a travi semplicemente appoggiate, che costituisce peraltro un'importante porzione del patrimonio di opere d'arte della rete stradale e autostradale nazionale.



The background of the slide is a faded, grayscale image of a large suspension bridge, likely the Golden Gate Bridge, spanning a body of water. The bridge's towers and cables are visible, creating a sense of scale and engineering.

## *LA SISMICA*

# SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE

In accordo con la filosofia della sicurezza alla base delle norme nazionali e internazionali vigenti (DM2008, Eurocodici) le opere devono essere dotate di un livello di protezione antisismica differenziato in funzione della loro importanza, e, quindi, delle conseguenze più o meno gravi di un loro danneggiamento per effetto di un evento sismico.



## *LA SISMICA*

### SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE

La sicurezza (livello di protezione) è determinata dall'associazione di una prestazione attesa (stato limite) con un livello di intensità sismica caratterizzato da una assegnata probabilità di superamento  $P_{VR}$  in un assegnato periodo di tempo (vita di riferimento,  $V_R$  ).

### SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE

In accordo al DM2008, la vita di riferimento si ottiene moltiplicando la vita nominale  $V_N$  dell'opera, funzione del "tipo di costruzione", per un coefficiente  $C_U$  che è funzione della "classe d'uso":  $V_R = C_U V_N$ .

I valori di  $V_N$  e  $C_U$  sono riportati nelle seguenti tabelle.

## LA SISMICA

# SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE

Tabella 2.1 Vita nominale (DM2008, T2.4.I).

Tipo di costruzione	Vita nominale (anni)
Opere provvisorie, fasi di costruzione	$\leq 10$
Opere ordinarie	$\geq 50$
Opere strategiche	$\geq 100$

Tabella 2.2 Coefficiente d'uso (DM2008, T2.4.II).

Classe d'uso	I	II	III	IV
$C_U$	0.7	1.0	1.5	2.0

Tabella 2.3 Valori di  $P_{VR}$  (DM2008, T3.2.I).

	Stati limite	$P_{VR}$
Stati limite di Esercizio SLE	SLO (operatività)	81%
	SLD (danno)	63%
Stati limite Ultimi SLU	SLV (salvaguardia della vita)	10%
	SLC (collasso)	5%





## *LA SISMICA*

### SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE

Per le strutture esistenti è ammesso verificare i soli stati limite ultimi, in alternativa lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) o quello di collasso (SLC) (DM2008, para 8.3), definiti nel seguito.

## *LA SISMICA*

### SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE

SLV: "A seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali e impiantistici, e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali" (DM2008, para 3.2.1).

## *LA SISMICA*

### SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE

SLC: "A seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali e impiantistici, e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali e un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali" (DM2008, para 3.2.1)

## *LA SISMICA*

### SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE

Fanno eccezione le opere a carattere strategico, cioè ponti in classe d'uso III e IV, per i quali è necessario verificare che a seguito di un evento sismico intenso sia assicurata la completa transitabilità. Tale circostanza è prevista dalla norma che prescrive la verifica degli stati limite di esercizio per un valore dell'azione sismica caratterizzato da una  $P_{VR}$  inferiore a quella indicata (massima) "in funzione del grado di protezione che si vuole raggiungere".





## *LA SISMICA*

### AZIONE SISMICA

Nulla da aggiungere rispetto a quanto già noto per quanto riguarda la definizione dell'azione sismica.

Una considerazione particolare deve essere riservata alla variabilità spaziale del moto.

## LA SISMICA

### AZIONE SISMICA

#### Variabilità spaziale del moto

Nei punti di contatto dell'opera con il terreno (fondazioni delle pile, spalle), il moto sismico è generalmente diverso, a causa del suo carattere intrinsecamente propagatorio, delle disomogeneità e delle discontinuità eventualmente presenti, e della diversa risposta locale del terreno dovuta a particolari caratteristiche meccaniche e morfologiche.

## LA SISMICA

### AZIONE SISMICA

#### Variabilità spaziale del moto

Gli effetti della variabilità spaziale del moto devono essere considerati nell'analisi quando le proprietà del suolo lungo il ponte variano in misura tale che non sia possibile associare un'unica categoria di suolo di fondazione ai punti di contatto con il terreno.

A background image of a suspension bridge, likely the Golden Gate Bridge, spanning a body of water. The bridge's cables and towers are visible, and the water is a calm blue-grey. The image is slightly faded to allow the text to be the primary focus.

## *LA SISMICA*

### AZIONE SISMICA

#### Variabilità spaziale del moto

Gli effetti sulla struttura della variabilità spaziale del moto possono essere valutati mediante analisi accurate utilizzando modelli rappresentativi della variabilità spaziale del moto per la generazione di storie sismiche distinte in tutti i punti di contatto dell'opera con il terreno.

## LA SISMICA

### AZIONE SISMICA

#### Variabilità spaziale del moto

Un criterio approssimato e prudentziale per tener conto della variabilità spaziale del moto consiste nell'eseguire l'analisi dinamica della struttura con accelerogrammi distinti sotto ogni pila, ciascuno compatibile con il relativo spettro di risposta (trascurando cioè la correlazione spaziale tra i moti ai supporti).





## LA SISMICA

### AZIONE SISMICA

#### Componente verticale dell'azione sismica

Gli effetti della componente verticale del moto sismico sulle pile possono in generale essere trascurati. Devono essere considerati ai fini della verifica degli apparecchi di appoggio e degli impalcati precompressi.

## LA SISMICA

### AZIONE SISMICA

#### Combinazione delle componenti ortogonali del sisma

Se l'analisi della risposta viene eseguita in campo lineare, la risposta può essere calcolata separatamente per ciascuna delle tre componenti e gli effetti combinati successivamente applicando una delle seguenti regole:

$$E_d = \sqrt{E_{dX}^2 + E_{dY}^2 + E_{dZ}^2}$$

oppure

$$E_d = 1.0E_{dX} + 0.3E_{dY} + 0.3E_{dZ}$$



## LA SISMICA

### AZIONE SISMICA

Combinazione delle componenti ortogonali del sisma

Se l'analisi viene eseguita in campo non lineare mediante integrazione al passo, le due componenti di eccitazione orizzontale (e quella verticale, ove appropriato) devono venire applicate simultaneamente alla struttura.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Dati necessari

Le verifiche di sicurezza comportano una analisi strutturale, di tipo lineare oppure non lineare, e successive verifiche puntuali di deformabilità e resistenza in tutte le parti critiche dell'opera.

Pertanto si richiede quindi la disponibilità dei valori di tutte le grandezze geometriche e meccaniche che consentono una verifica del tipo indicato.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Dati necessari

Nella generalità dei casi l'impalcato non è significativamente impegnato nella risposta sismica della struttura. Ne discende che le indagini conoscitive sono da indirizzare in modo prevalente alle sottostrutture (pile e spalle) e alle fondazioni, oltre che ovviamente ai sistemi di vincolo e interconnessione tra gli elementi strutturali (appoggi, giunti, etc).





## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Dati necessari

In particolare è necessario disporre di:

- *Geometria* dell'opera nel suo stato attuale.
- *Dettagli costruttivi*, ovvero disposizione e quantità delle armature.
- *Proprietà meccaniche dei materiali*: conglomerato e acciai.
- *Caratterizzazione geotecnica* (stratigrafia e parametri meccanici)

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Livello di conoscenza e fattore di confidenza

Si definiscono i seguenti due livelli di conoscenza:

- LC2: conoscenza adeguata
- LC3: conoscenza accurata

Il livello di conoscenza acquisito sulla base delle indagini e degli approfondimenti di cui in precedenza determina il metodo di analisi e il valore del fattore di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali (vedi Tabella allegata).

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Livello di conoscenza e fattore di confidenza

LC	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC2		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>estese</i> verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in-situ oppure <i>estese</i> prove in-situ	Tutti	1.20
LC3	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>esaustive</i> verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con <i>estese</i> prove in situ oppure <i>esaustive</i> prove in-situ	Tutti	1.00

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Livello di conoscenza e fattore di confidenza

Per le opere da ponte si deve in generale acquisire un livello di conoscenza accurata (LC3), salvo casi eccezionali per i quali, su indicazione della Committenza, è ammesso acquisire un livello di conoscenza adeguato (LC2).

*La richiesta del livello di conoscenza accurato è giustificata in primo luogo dall'importanza strategica delle opere da ponte, e in secondo luogo in considerazione dell'assenza di elementi non strutturali che limitino l'accessibilità delle strutture.*



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Livello di conoscenza e fattore di confidenza

La definizione dei requisiti quantitativi per il raggiungimento di ogni livello di rilievo e prove è riportata nella tabella che segue.

Nel controllo del raggiungimento della percentuale di elementi indagati si può tener conto delle eventuali condizioni di ripetitività.



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Livello di conoscenza e fattore di confidenza

Tabella 2.7 Requisiti quantitativi relativi ai rilievi e alle prove sui materiali.

	Rilievo (dei dettagli costruttivi)	Prove (sui materiali)
Verifiche limitate	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 20% delle pile (ma non meno di 2 pile)	1 provino di cls. e 1 campione di armatura per almeno il 20% delle pile (ma non meno di 2 pile)
Verifiche estese	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 40% delle pile (ma non meno di 3 pile)	1 provino di cls. e 1 campione di armatura per almeno il 40% delle pile (ma non meno di 3 pile)
Verifiche esaustive	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 60% delle pile (ma non meno di 4 pile)	1 provino di cls. e 1 campione di armatura per almeno il 60% delle pile (ma non meno di 4 pile)

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Modello strutturale

Il modello strutturale deve riflettere lo stato attuale della struttura o quello in cui essa si troverà a seguito di interventi migliorativi che saranno messi comunque in atto, quali la solidarizzazione delle solette, o di allargamento per l'adeguamento funzionale, etc. 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 rigidezza della struttura, e di vincolo degli impalcati.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Modello strutturale

Nel caso in cui l'analisi sia di tipo non lineare, il modello strutturale deve poter seguire l'evolversi dello stato tensionale e deformativo della struttura oltre la fase elastica, prodotto dalla formazione di un numero crescente di zone plasticizzate. La plasticizzazione può essere considerata concentrata alle estremità degli elementi in "cerniere plastiche", il cui comportamento può essere definito da un legame momento curvatura bilineare o multi-lineare, purché in grado di tener conto dell'influenza dello sforzo normale, quando necessario.

The background of the slide is a faded, grayscale image of a bridge structure, likely a suspension bridge, with visible cables and a large support tower. The image is slightly out of focus, serving as a backdrop for the text.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Modello strutturale

Ove disponibili sono da preferire modelli più accurati in grado di descrivere la plasticizzazione diffusa (non concentrata alle sole estremità) degli elementi, sulla base del comportamento di numerose sezioni interne, ottenuto dall'integrazione sulla sezione stessa dei legami costitutivi non lineari dei materiali componenti.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Legami costitutivi per analisi non lineari

Per ottenere una buona rispondenza tra il modello e la realtà occorre utilizzare legami costitutivi adeguati.

I legami costitutivi riportati nel seguito costituiscono un riferimento consolidato ai fini dell'analisi non lineare e delle verifiche degli elementi strutturali.

E' possibile utilizzare legami alternativi riportati in letteratura se adottati in codici di calcolo di comprovata affidabilità.



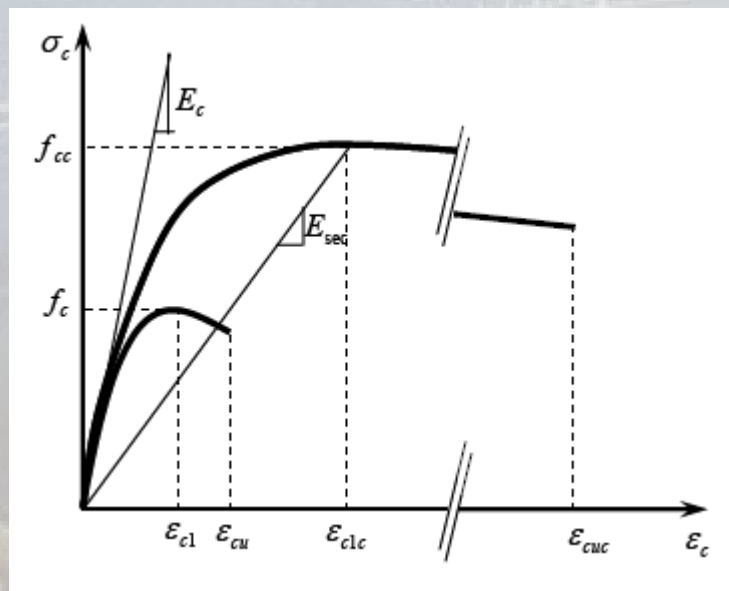
## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Legami costitutivi per analisi non lineari

Per il calcestruzzo sempre più codici di calcolo utilizzano il legame costitutivo di Mander.

Legame di  
Mander



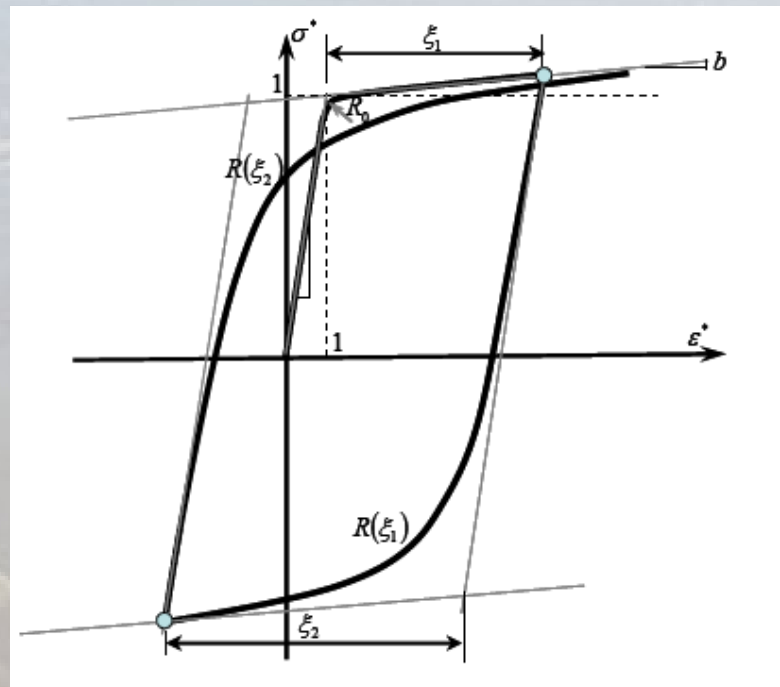
## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Legami costitutivi per analisi non lineari

Per quanto riguarda l'acciaio, vengono dati come riferimento due legami costitutivi, quello bilineare e quello non lineare isteretico di Menegotto-Pinto.

Legame di  
Menegotto-Pinto.



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Rigidezza degli elementi

Nei casi di analisi lineare o non-lineare a plasticità concentrata, la rigidezza degli elementi del modello deve tenere conto del livello di fessurazione degli stessi per effetto dell'azione sismica.

Agli elementi costituenti l'impalcato (travi, traversi, solette), che rimangono generalmente in campo elastico lineare con limitata fessurazione, possono essere attribuite le caratteristiche delle sezioni interamente reagenti.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Rigidezza degli elementi

Per le pile, che nella maggior parte dei casi superano in diversa misura lo stato limite di snervamento, la rigidezza secante efficace può essere ricavata dall'espressione:

$$E_c I_{eff} = \nu \cdot \frac{M_R(N)}{\phi_y}$$

$\nu = 1.2$  è un fattore di correzione che tiene conto della maggiore rigidezza della parte di pila non fessurata

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Rigidezza degli elementi

$$E_c I_{eff} = \nu \cdot \frac{M_R(N)}{\phi_y}$$

$M_R(N)$

è il momento ultimo della sezione di base  
calcolato per il valore permanente dello  
sforzo normale

$\phi_y$

è la curvatura di snervamento.

In generale i valori del momento e della curvatura si  
ottengono da un'analisi momento-curvatura della sezione.



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Modellazione dell'interazione suolo-fondazione-struttura

Ai fini dell'analisi globale della struttura le pile e le spalle si considerano in generale incastrate alla base.

Gli effetti dell'interazione suolo-fondazione-struttura devono essere considerati quando si verificano contemporaneamente le seguenti tre condizioni:

- Ponte in classe d'uso III o IV
- Categoria del suolo D o peggiore
- Sismicità medio-alta,  $a_g > 0.15g$

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Modellazione dell'interazione suolo-fondazione-struttura

Ai fini della valutazione degli effetti dell'interazione suolo-fondazione-struttura il sistema fondazione-terreno può essere schematizzato ponendo alla base della struttura dei vincoli visco-elastici, caratterizzati da opportuna impedenza dinamica.

Nel calcolo di quest'ultima è necessario tener conto della dipendenza delle caratteristiche di rigidità e smorzamento del terreno dal livello deformativo. Inoltre è necessario tenere conto che il moto sismico alla superficie del suolo può risultare diverso da quello in campo libero, per effetto delle caratteristiche dimensionali e/o di rigidità del sistema di fondazione.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

Il modello di riferimento è costituito da una mensola verticale a massa distribuita lungo l'altezza sulla quale grava la massa del pulvino e dell'impalcato.

In direzione trasversale all'asse del ponte ogni pila costituisce in tutti i casi un oscillatore indipendente, mentre in direzione longitudinale, nell'ipotesi che siano previsti dei ritegni sismici, il sistema è ancora a un grado di libertà, caratterizzato dalla somma delle masse afferenti alle singole pile e dalla forza di richiamo somma delle forze delle singole pile.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

Il procedimento proposto consiste in un'analisi statica non lineare semplificata, nella quale il legame forza-spostamento in sommità dell'oscillatore considerato si ottiene con semplici passaggi a partire dai legami momento-curvatura alla base delle pile.

La *massa efficace* della pila da considerare concentrata in sommità è data, per pile a sezione costante, dalla somma del 30% della massa della pila e della massa del pulvino. La massa totale per la generica pila vale quindi:

$$m = 0.3m_{pila} + m_{pulv} + m_{imp}$$

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

L'altezza di tale massa dalla base per l'analisi in direzione trasversale è data dall'espressione:

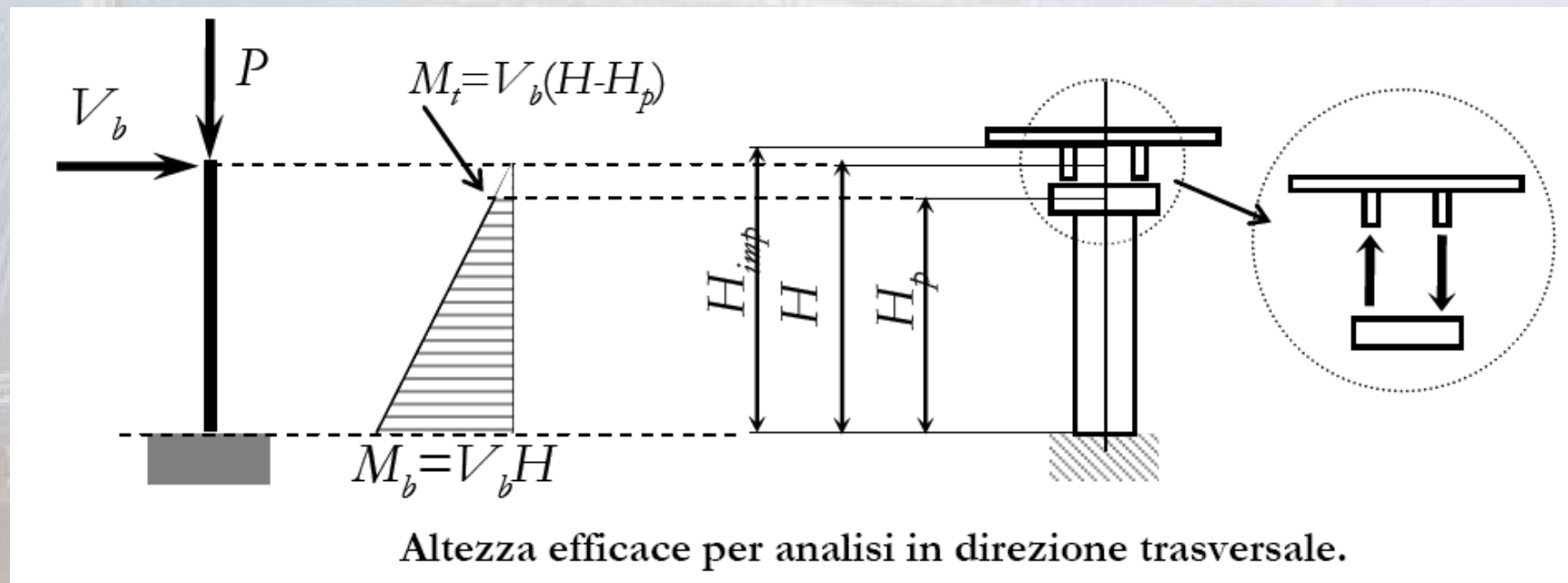
$$H \cong \frac{(m_{pulv} + 0.3m_{pila})H_p + m_{imp}H_{imp}}{m}$$

Per l'analisi in direzione longitudinale, l'altezza efficace è pari alla distanza del piano degli apparecchi di appoggio dall'estradosso della fondazione.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi



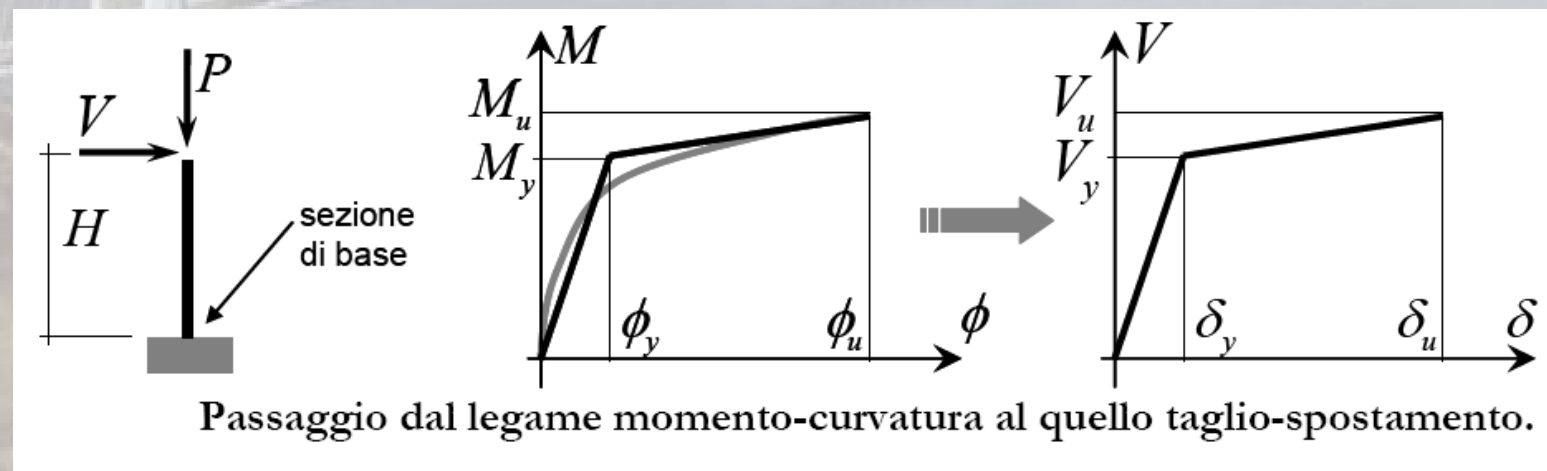


## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

Il primo passo consiste nella determinazione del legame momento-curvatura della sezione di base nel piano di flessione considerato e per il valore del carico assiale agente. La curva così ottenuta viene successivamente bilinearizzata come indicato schematicamente in seguito.



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

Nell'ipotesi che la pila si mantenga in campo elastico fino al raggiungimento del momento di snervamento  $M_y$  alla base il corrispondente spostamento in sommità è dato dall'espressione:

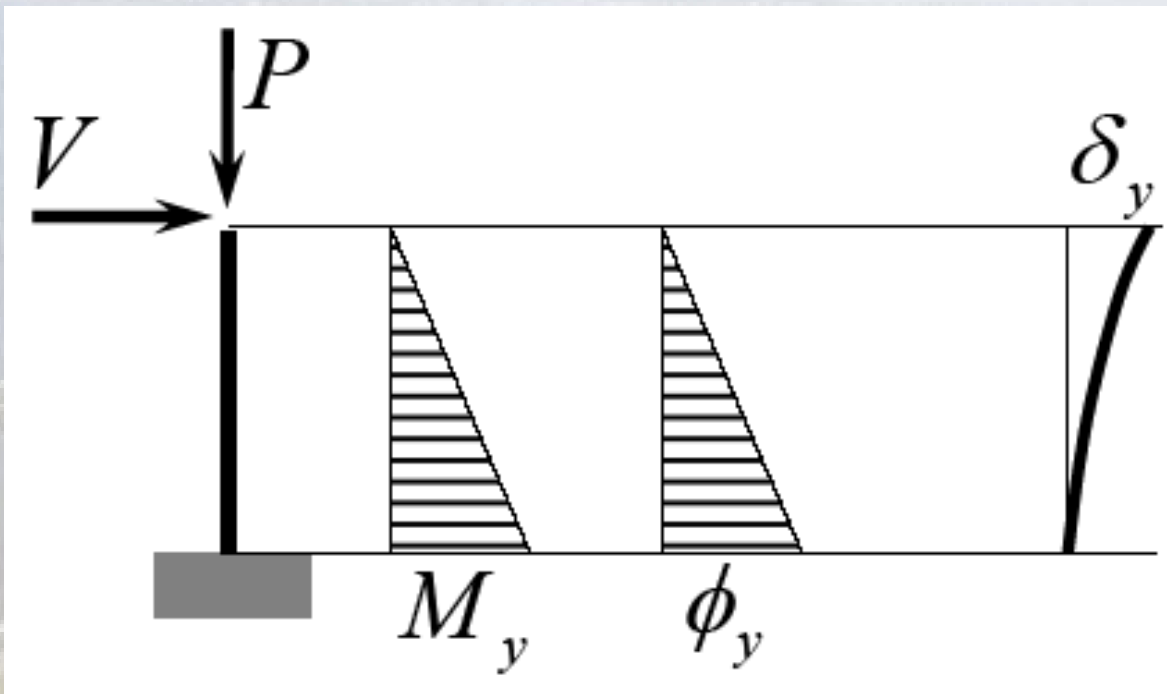
$$\delta_y = \frac{1}{v} \phi_y H^2 / 3$$

dove la curvatura di snervamento  $\phi_y$  risulta dalla bilinearizzazione del legame di sezione e  $v = 1.2$  è il fattore di correzione che tiene conto della maggiore rigidezza della porzione al di sopra della zona plasticizzata.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Metodi di analisi



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

Lo spostamento ultimo in sommità della pila si ottiene aggiungendo a quello di snervamento il contributo della rotazione plastica nella zona plasticizzata alla base:

$$\delta_u = \delta_y + (\phi_u - \phi_y) \cdot l_p (H - l_p / 2)$$

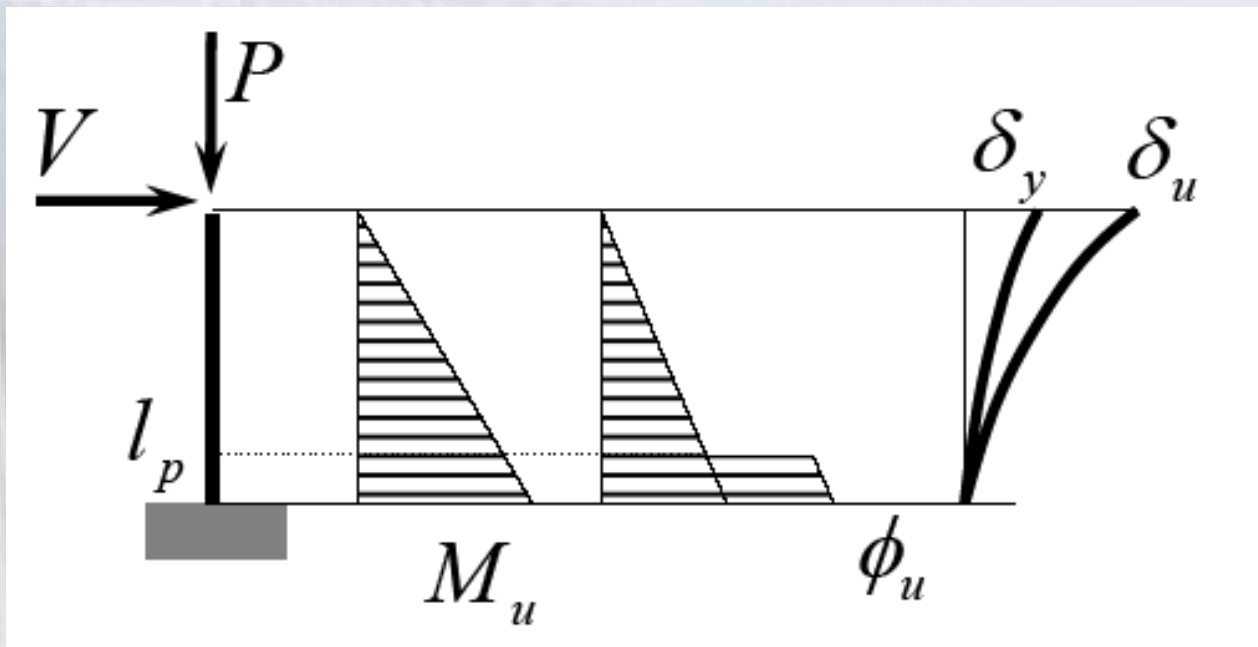
Per l'estensione della porzione di pila soggetta a plasticizzazione (cerniera plastica) si può fare riferimento all'espressione:

$$l_p = 0.10H_p + 0.015f_yd_b \cong 0.10H_p$$

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Metodi di analisi



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

In direzione trasversale il periodo elastico della i-esima pila si ottiene dall'espressione:

$$T = 2\pi\sqrt{m_i / k} = 2\pi\sqrt{m_i \delta_y / V_y}$$

Il corrispondente spostamento massimo, da utilizzare ai fini della verifica di deformabilità della pila, è fornito dallo spettro di risposta elastico in spostamento:

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= S_{De}(T) & T \geq T_c \text{ o } q^* \leq 1 \\ \delta_{\max} &= \frac{S_{De}(T)}{q^*} \left[ 1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{T} \right] & T < T_c \end{aligned}$$

$$\text{dove } q^* = m S_e(T) / V_y$$



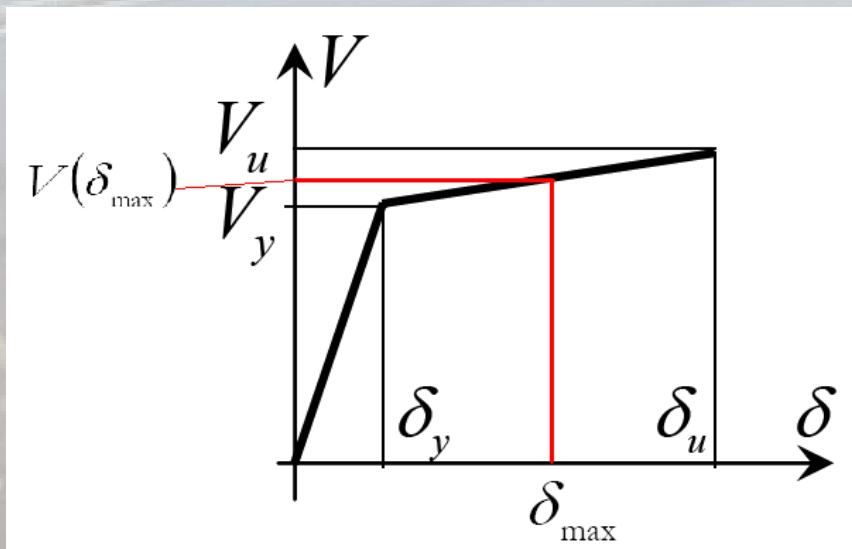
## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

La verifica non è soddisfatta se  $\delta_{\max} > \delta_u$

La forza di taglio per la verifica della pila si ottiene direttamente dal diagramma forza spostamento in corrispondenza dello spostamento massimo di risposta  $\delta_{\max}$ .



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

La forza di taglio per la **verifica degli apparecchi di appoggio** vale:

$$V_{app} = 1.25 \frac{m_{imp}}{m_i} V(\delta_{max})$$

fattore per garantire un maggiore livello di protezione agli apparecchi di appoggio

## LA SISMICA

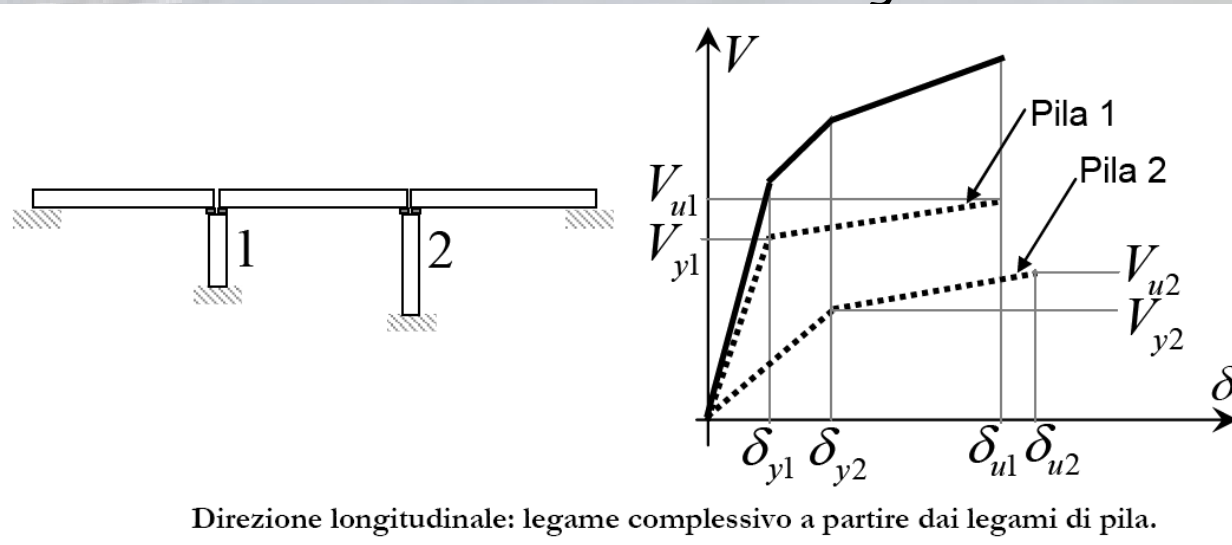
### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

In direzione longitudinale la massa totale è data dall'espressione:

$$m = \sum m_i$$

e il legame forza-spostamento si ottiene sommando i legami delle singole pile come schematicamente mostrato nella figura sottostante.



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

Effettuata la bilinearizzazione della curva risultante il procedimento segue in modo analogo al caso della direzione trasversale.

Ai fini delle verifiche a taglio delle pile la forza di taglio competente a ciascuna di esse si ricava in corrispondenza di  $\delta_{\max}$  dal relativo diagramma forza-spostamento.

Per la verifica degli appoggi la massa da prendere in conto è quella relativa alla singola pila.

Attenzione alla verifica in spostamento degli appoggi mobili.

## LA SISMICA

# VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

## Metodi di analisi

### Ponti iperstatici: analisi dinamica lineare

Il metodo lineare di riferimento in queste linee guida consiste nell'impiego dell'analisi modale (DM2008, punto 7.3.3.1) associata allo spettro elastico non ridotto (punto 2.3.1).

Le verifiche degli elementi sono eseguite in termini di capacità deformativa per i meccanismi/elementi duttili e di resistenza per quelli fragili.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

#### Ponti iperstatici: analisi dinamica lineare

Il metodo lineare di riferimento in queste linee guida consiste nell'impiego dell'analisi modale (DM2008, punto 7.3.3.1) associata allo spettro elastico non ridotto (punto 2.3.1).

Le verifiche degli elementi sono eseguite in termini di capacità deformativa per i meccanismi/elementi duttili e di resistenza per quelli fragili.

Questo tipo di analisi è applicabile quando è verificata la seguente condizione legata alla *uniformità della domanda inelastica*.



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

Come si valuta l'uniformità della domanda inelastica?

Definiti:

- ☐  $\rho_i = D_i/C_i$  il rapporto tra il momento flettente  $D_i$  fornito dall'analisi della struttura in combinazione sismica ed il momento resistente  $C_i$  nell' $i$ -esima sezione di verifica.
- ☐  $\rho_{\max}$  il valore massimo di  $\rho$
- ☐  $\rho_{\min}$  il valore minimo di  $\rho$

Il rapporto  $\rho_{\max}/\rho_{\min}$  non deve superare il valore 2.5

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Metodi di analisi

#### Alternative?

In alternativa è anche consentito di eseguire la verifica mediante analisi modale con spettro di risposta ridotto del fattore di struttura  $q$  (punto 3.2.3.5 del DM2008).

In questo caso le verifiche sono di resistenza per tutti i meccanismi/elementi. I valori delle resistenze si calcolano come nelle situazioni non sismiche. Il valore massimo utilizzabile per  $q$  è pari a 1.5.



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Verifiche

In particolare per la verifica degli elementi **duttili** la grandezza di verifica è generalmente rappresentata dalla rotazione rispetto alla corda  $\theta$ .

Per ogni piano di flessione, questa è pari al rapporto  $\delta/H$  per elementi verticali a mensola (pile a fusto unico) o doppiamente incastrati (ritti), come mostrato nella figura.

## LA SISMICA

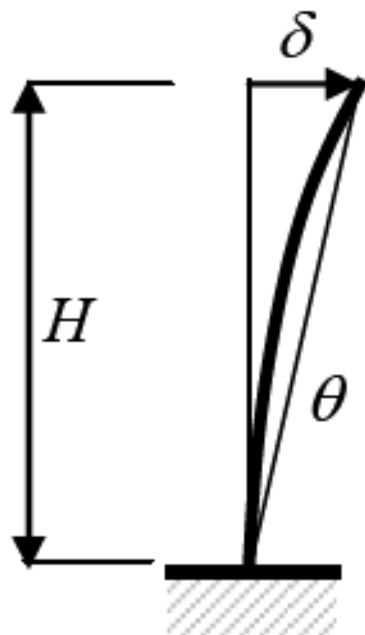
### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Verifiche

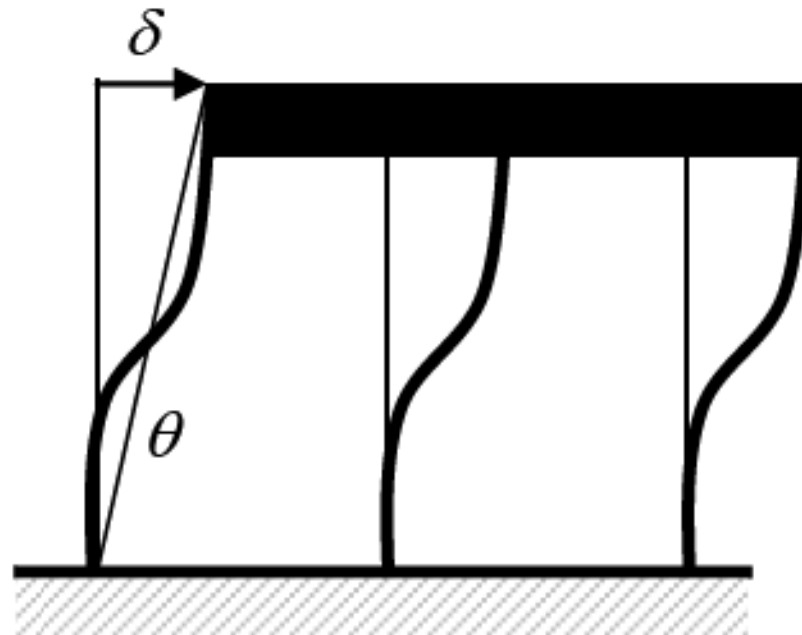
In particolare per la verifica degli elementi **duttili** la

gr  
rot

Per  
per  
dop



(a)



(b)

dalla

$\delta/H$

igura.



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Verifiche

In particolare per la verifica degli elementi **duttili** la grandezza di verifica è generalmente rappresentata dalla rotazione rispetto alla corda  $\theta$ .

Approssimativamente è uguale alla rotazione del nodo per elementi orizzontali (traversi), come mostrato in figura, caso (c).

Nel caso (c) la rotazione rispetto alla corda per i ritti è solo approssimativamente uguale al rapporto  $\delta/H$ .

## LA SISMICA

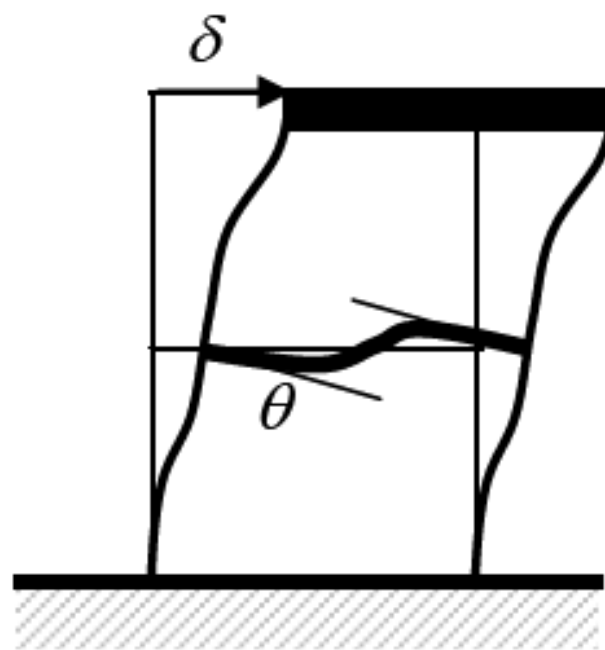
### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Verifiche

In particolare per  
grandezza di ve  
rotazione rispet

Approssimativa  
elementi orizzon  
caso (c).

Nel caso (c) la r  
approssimativa



(c)

di **duttili** la  
presentata dalla

ne del nodo per  
ato in figura,

a per i ritti è solo  
H.



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Verifiche

Per la verifica dei meccanismi **fragili**, per ogni piano di flessione dell'elemento, lo sforzo di taglio agente  $V$  esso è dato da:

- il valore ottenuto dall'analisi nel caso in cui i momenti alle estremità dell'elemento non raggiungono il rispettivo valore plastico ( $\rho < 1$ ).
- il valore:

$$V = \frac{M_{RA}(N_E) + M_{RB}(N_E)}{H_{elem}}$$

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Ponti iperstatici: analisi statica non lineare

Per la verifica è sempre possibile effettuare un'analisi a spinta (Push-over) caricando la struttura con un profilo di forze proporzionale a:

1. Primo modo di vibrare (mono modale)
2. Più modi di vibrare (multi modale)

Lo stato della struttura è quello corrispondente allo spostamento massimo nel punto di controllo. La verifica consiste nel controllare che in tale configurazione della struttura le domande di duttilità siano compatibili con le rispettive capacità e che le forze di taglio siano minori delle rispettive resistenze.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Ponti iperstatici: Analisi dinamica non lineare

Ai fini delle verifiche gli effetti sulla struttura (sollecitazioni, deformazioni, spostamenti, etc.) sono rappresentati dai valori medi ottenuti dalle analisi. Il numero minimo di accelerogrammi da utilizzare è pari a **cinque per quelli artificiali e dieci per quelli naturali o simulati a partire da modelli sismogenetici.**

La differenza nel numero richiesto è giustificata dalla inferiore dispersione intorno alla media degli accelerogrammi del primo tipo rispetto a quelli degli altri due. Il rispetto di tali minimi è sufficiente a garantire una adeguata stabilità della media degli effetti sulla struttura.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Verifiche di sicurezza

##### Pile

Per quanto riguarda la capacità deformativa, il valore ultimo della rotazione rispetto alla corda da utilizzare per la verifica allo SLC è dato dall'espressione:

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_V}{3}$$

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[ \theta_y + (\phi_u - \phi_y) \cdot l_p \left( 1 - \frac{l_p}{2L_V} \right) \right]$$

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Verifiche di sicurezza

dove:

- $\gamma_{el} = 1.5$
- $L_v = M/V$  è la luce di taglio, pari a  $H$  per una mensola e
- approssimabile ad  $H/2$  negli altri casi.
- Le curvature si calcolano dal diagramma momento-curvatura.
- Per l'estensione della cerniera plastica si può fare riferimento all'espressione:

$$l_p = 0.10H_p + 0.015f_yd_b \cong 0.10H_p$$

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Verifiche di sicurezza

Per la verifica allo SLV il valore limite della rotazione si assume pari a  $\frac{3}{4}$  di quello ultimo.

Per quanto riguarda la resistenza a taglio, in ogni piano di flessione, la resistenza a taglio sotto azione ciclica,  $V_R$ , di elementi prismatici con sezione compatta è data dalla formula seguente (unità di misura MN e m):

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left\{ \frac{b - x}{2L_V} \min(N; 0.55 A_c f_c) + \left( 1 - 0.05 \min(5; \mu_{\Delta, pl}) \right) \times \right. \\ \left. \times \left[ 0.16 \max(0.5; 100 \rho_{tot}) \left( 1 - 0.16 \min\left( 5; \frac{L_V}{b} \right) \right) \sqrt{f_c} A_c \right] + V_w \right\}$$



## LA SISMICA

# VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Dove:

$$\gamma_{el} = 1.15$$

$b$  = altezza totale della sezione

$d$  = altezza efficace della sezione

$x$  = profondità dell'asse neutro

$N$  = sforzo normale, positivo di compressione, posto uguale a zero se di trazione

$L_V = M/V$  luce di taglio

$A_c$  = area della sezione  $bd$  per sezione rettangolare,  $\pi D_c^2/4$  per sezione circolare

$D_c$  = diametro nucleo confinato

$\rho_{tot}$  = percentuale geometrica totale di armatura longitudinale

$V_w$  = contributo dell'armatura pari a  $\rho_w b s f_y$  per sez. rettangolari

$$\text{e } \frac{\pi}{2} \frac{A_{sw}}{s} f_y (D - 2c) \text{ per sez. circolari}$$

$A_{sw}$  = area delle staffe circolari

$s$  = passo delle staffe

$D$  = diametro della sezione

$c$  = copriferro

$$\mu_{\Delta,pl} = \mu_{\Delta} - 1 \cong \theta / \theta_y - 1$$

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Per quanto riguarda la resistenza a taglio, in ogni piano di flessione, la resistenza a taglio sotto azione ciclica,  $V_R$ , **di setti** (ad es: pareti di una pila a sezione cava rettangolare, mono- o pluri-cellulare) è non superiore alla forza di taglio corrispondente allo schiacciamento delle bielle diagonali  $V_{Rmax}$  data dalla formula seguente:

$$V_{R,max} = \frac{0.85(1 - 0.06 \min(5; \mu_{\Delta,pl}))}{\gamma_{el}} \left( 1 + 1.8 \min\left(0.15; \frac{N}{A_c f_c}\right) \right) \times \\ \times (1 + 0.25 \max(1.75; 100 \rho_{tot})) \left( 1 - 0.2 \min\left(2; \frac{L_V}{b}\right) \right) \sqrt{f_c} b_w z$$



## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Appoggi

Gli apparecchi di appoggio fissi devono essere in grado di trasmettere, mantenendo la piena funzionalità, le forze di taglio in testa alle pile indotte dall'azione sismica di verifica, incrementate del 20%.

Gli appoggi mobili devono essere in grado di consentire, mantenendo la piena funzionalità, lo scorrimento massimo indotto dall'azione sismica di verifica, incrementata di un cospicuo franco di sicurezza.

## LA SISMICA

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Formato di verifica

Indicando con  $D_x$  e  $D_y$  le quantità di domanda determinate dall'analisi (spostamenti, rotazioni, forze di taglio) nei due piani di principali flessione di un elemento, e con  $C_x$  e  $C_y$  le corrispondenti capacità, la forma generale di verifica è data dall'espressione:

$$\sqrt{\left(\frac{D_x}{C_x}\right)^2 + \left(\frac{D_y}{C_y}\right)^2} \leq 1$$



## *LA SISMICA*

### VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

#### Spalle e fondazioni

Per la verifica delle spalle e delle fondazioni sotto l'azione sismica trasmessa dalla sovrastruttura e dal terreno, valgono le indicazioni applicabili alle opere di nuova progettazione, di cui ai punti 7.11.5 e 7.11.6 del DM2008.