



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

Lanzo G. – Sapienza Università di Roma



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Paolucci R. – Politecnico di Milano



POLITECNICO
MILANO 1863

ITCOLD - GdL Traverse – Roma, 06/06/2024

ENEL GREEN POWER srl

" Studio Specialistico sulle Procedure di Verifica di Traverse Fluviali "

Fase 1

- Identificare le principali problematiche connesse alla valutazione delle procedure semplificate di verifica in condizioni sismiche, con particolare riferimento alla verifica allo scorrimento per le condizioni SLC

Casi studio

- **Traversa di Nazzano sul F. Tevere**
- **Traversa di Alanno sul F. Pescara**

Principali Tematiche affrontate e in corso di studio

- ➔ **Valutazione delle procedure semplificate di verifica in condizioni sismiche**
 - **Effetto dell'interramento della fondazione sull'azione sismica di progetto**
 - **Prove sperimentali per identificazione risposta dinamica della struttura**
 - **Approcci semplificati di modellazione dinamica**
 - **Calcolo degli spostamenti sismici fondazionali (→ approcci numerici 3D vs approcci semplificati)**

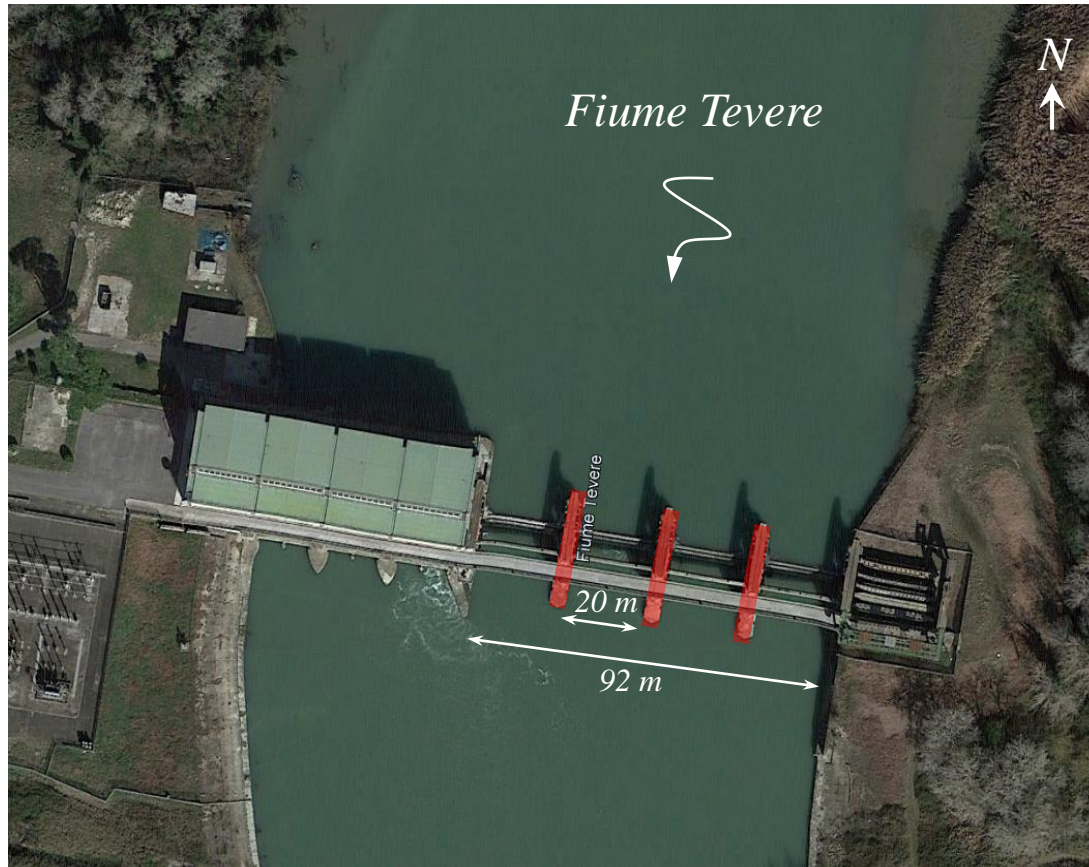
Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere: caratteristiche principali



La Traversa di Nazzano sul F. Tevere

Vista dall'alto



Vista da valle



- traversa mobile costruita nel periodo 1952-1956

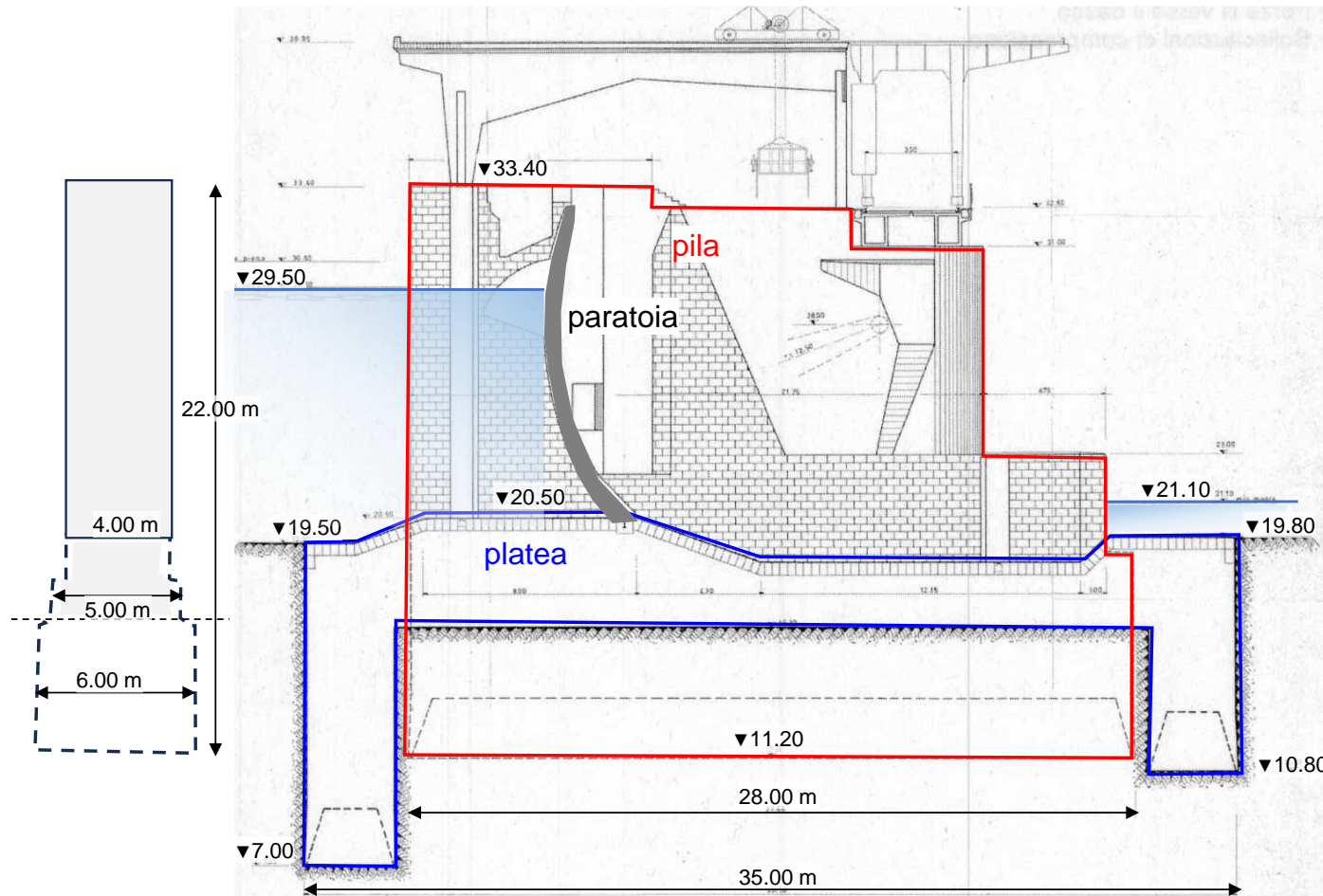


Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere: caratteristiche principali



Sezione trasversale dello sbarramento



- pile di forma circa parallelepipedica (6x28 m) e altezza massima 22 m;
- platea di spessore variabile da 2 a 5 m e sviluppo longitudinale di 35 m, estendendosi oltre le pile per circa 4 m a monte e a valle; alle estremità la platea è dotata di due taglioni

(Atti di Collaudo, 1957)

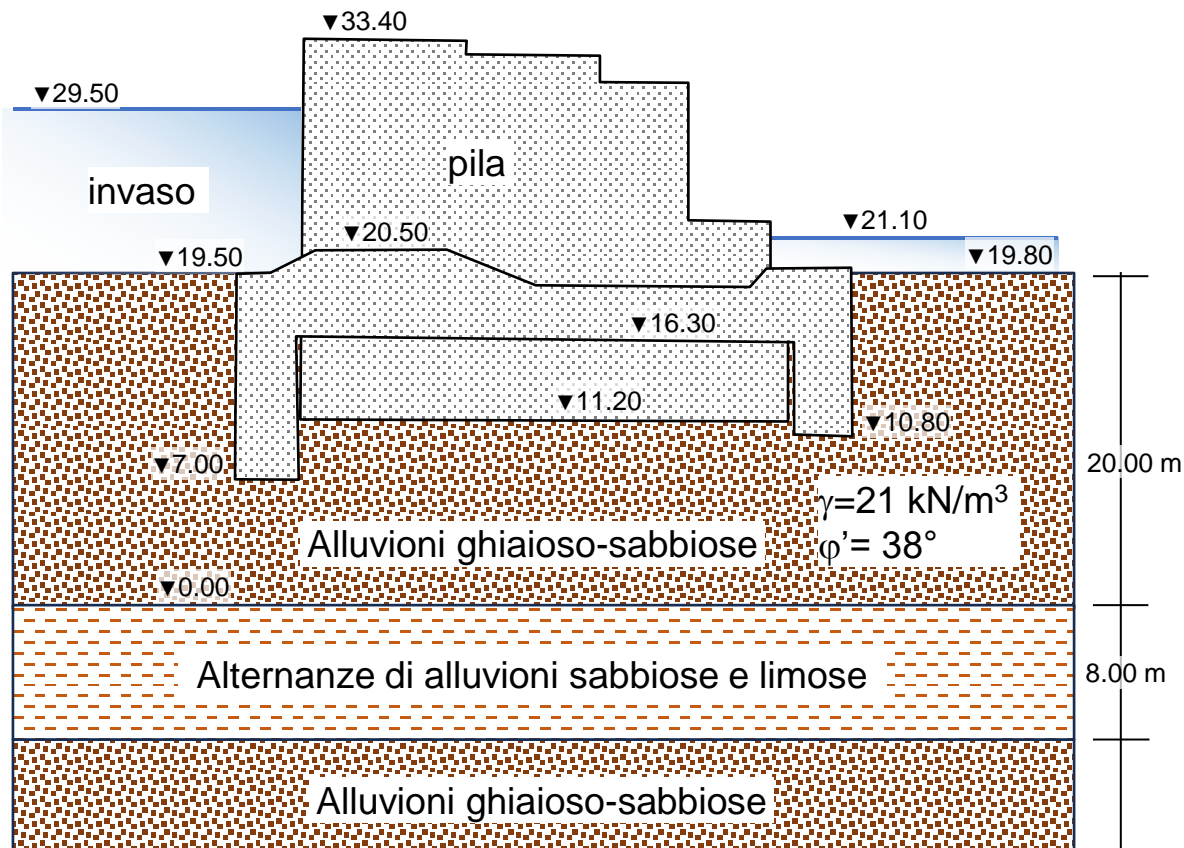


Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

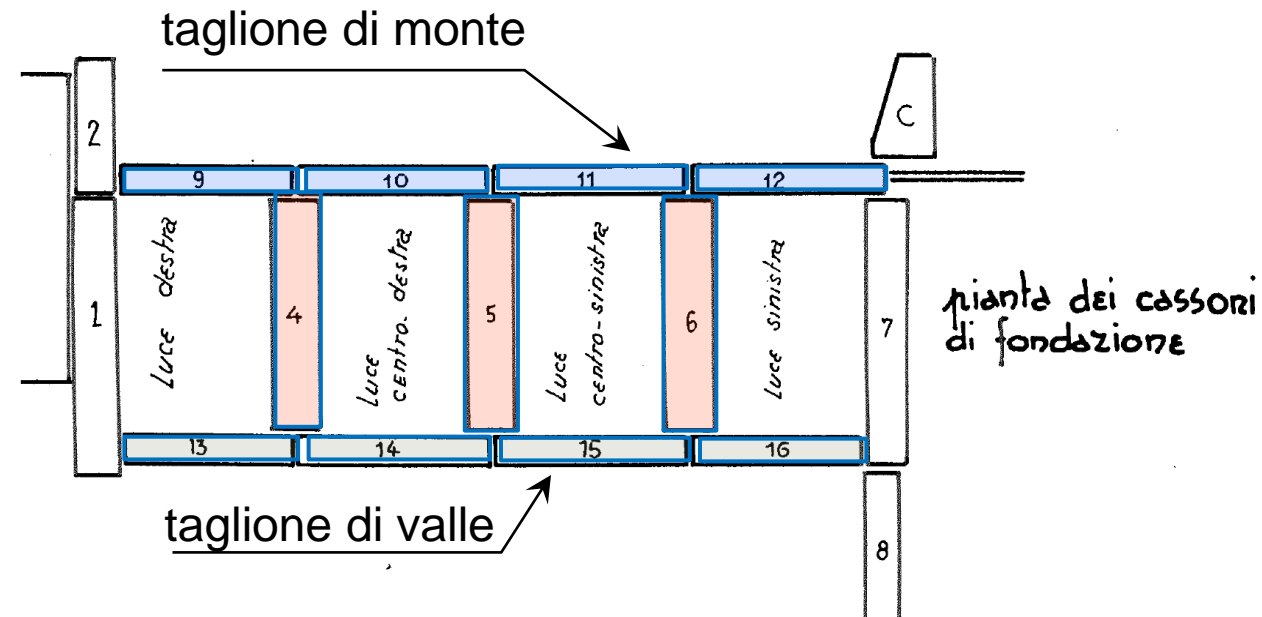
La Traversa di Nazzano sul F. Tevere: caratteristiche principali



Il sottosuolo e le fondazioni



Strutture di fondazione costituite da cassoni autoaffondanti in aria compressa



(Atti di Collaudo, 1957)



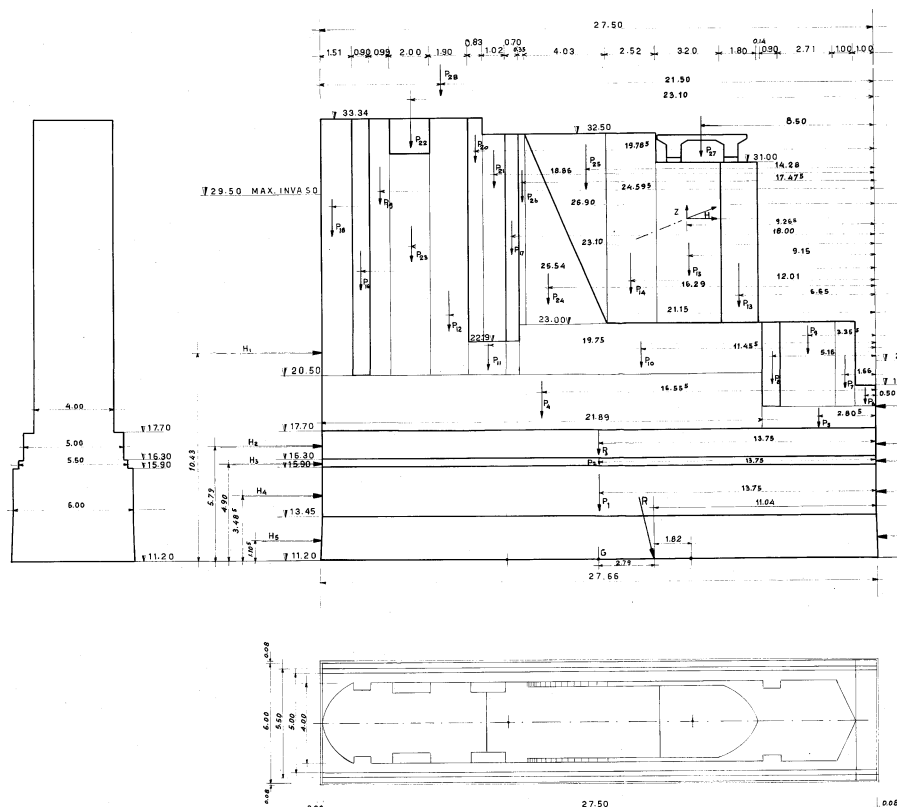
Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano: verifiche a scorrimento pregresse

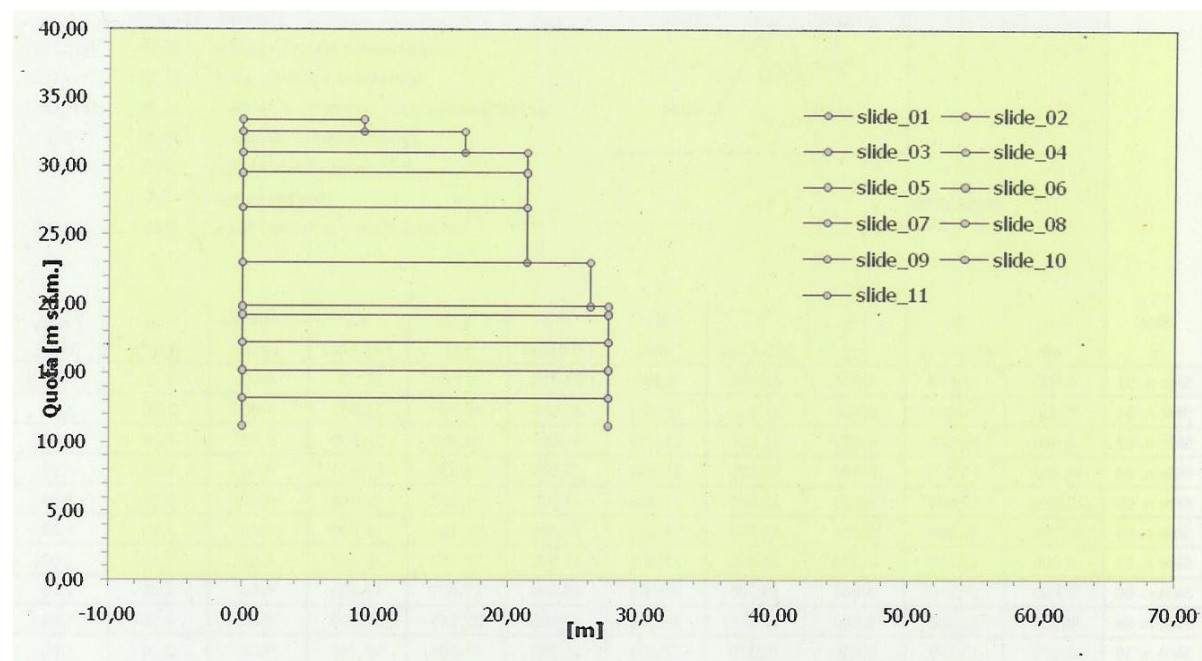


Stabilità a scorrimento della pila: verifiche statiche e sismiche pregresse

Assunzione di **pile completamente svincolate dalla platea e dai taglioni**



Schema verifica statica delle pile
(Atti di Collaudo, 1957)



Schema verifica sismica delle pile
(Relazione ENEL Green Power, 2010)



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

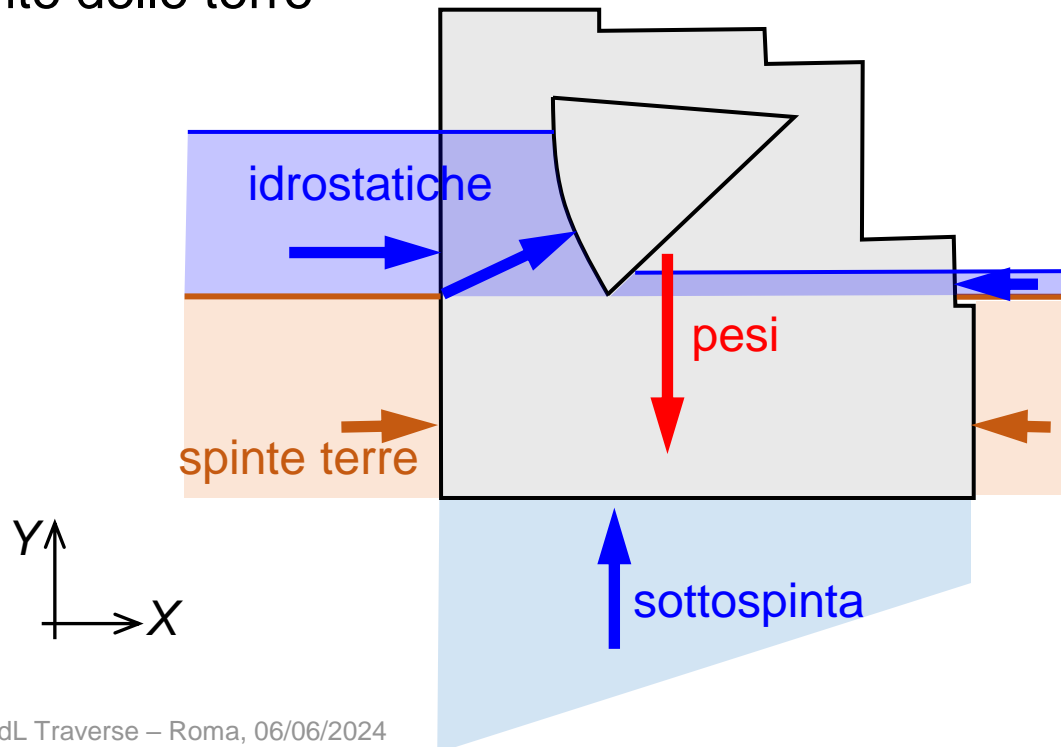
La traversa di Nazzano



Stabilità a scorrimento della pila sul piano di fondazione: verifiche statiche e sismiche per SLC

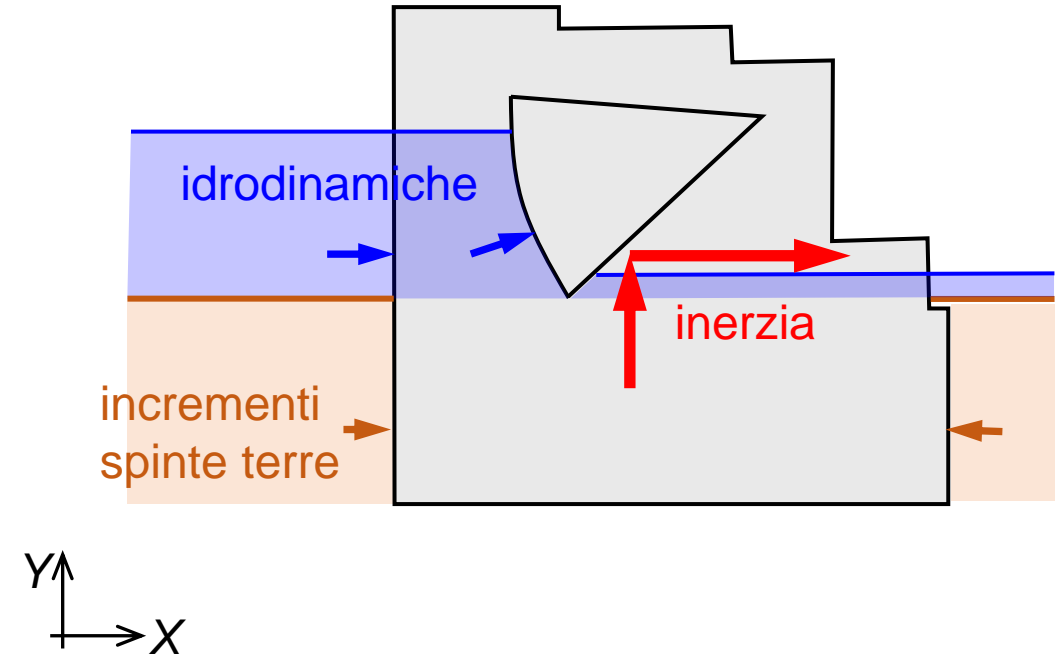
Carichi agenti in condizioni statiche

- peso pila
- pesi paratoie e sovrastrutture gravanti sulla pila
- spinte idrostatiche
- sottospinta
- spinte delle terre



Carichi agenti in condizioni sismiche

- azioni inerziali della struttura
- azioni inerziali dell'acqua di invaso (sovrappressione idrodinamica)
- incrementi di spinta delle terre



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano: analisi pseudostatica



Stabilità a scorrimento della pila sul piano di fondazione: verifiche sismiche SLC

Azione sismica

H. DIGHE ESISTENTI (NTD14)

Tab.H1

Dighe:	V_N (anni)	C_U	V_R (anni)
strategiche	≥ 50	2,0	100
rilevanti		1,5	75

Tab.H3

Dighe:	SLO $P_{VR} (\%)=81$	SLD $P_{VR} (\%)=63$	SLV $P_{VR} (\%)=10$	SLC $P_{VR} (\%)=5$
strategiche	60	100	950	1946
rilevanti	45	75	710	1460
imp. normale	30	50	475	975

$V_N = 50$ anni $C_U = 2$

SLC $T_R = 1950$ anni

$a_g = 0.226g$

$S_s = 1.18$ (cat. B) $S_T = 1.0$

$PGA_h = 0.267g$

$PGA_v = 0.145g$

Verifiche secondo l'approccio **DA2 - A1+M1+R3 (NTC18)**

Coefficiente parziale $\gamma_R = 1.15$ per la verifica a scorrimento per serbatoio pieno (NTD14)



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

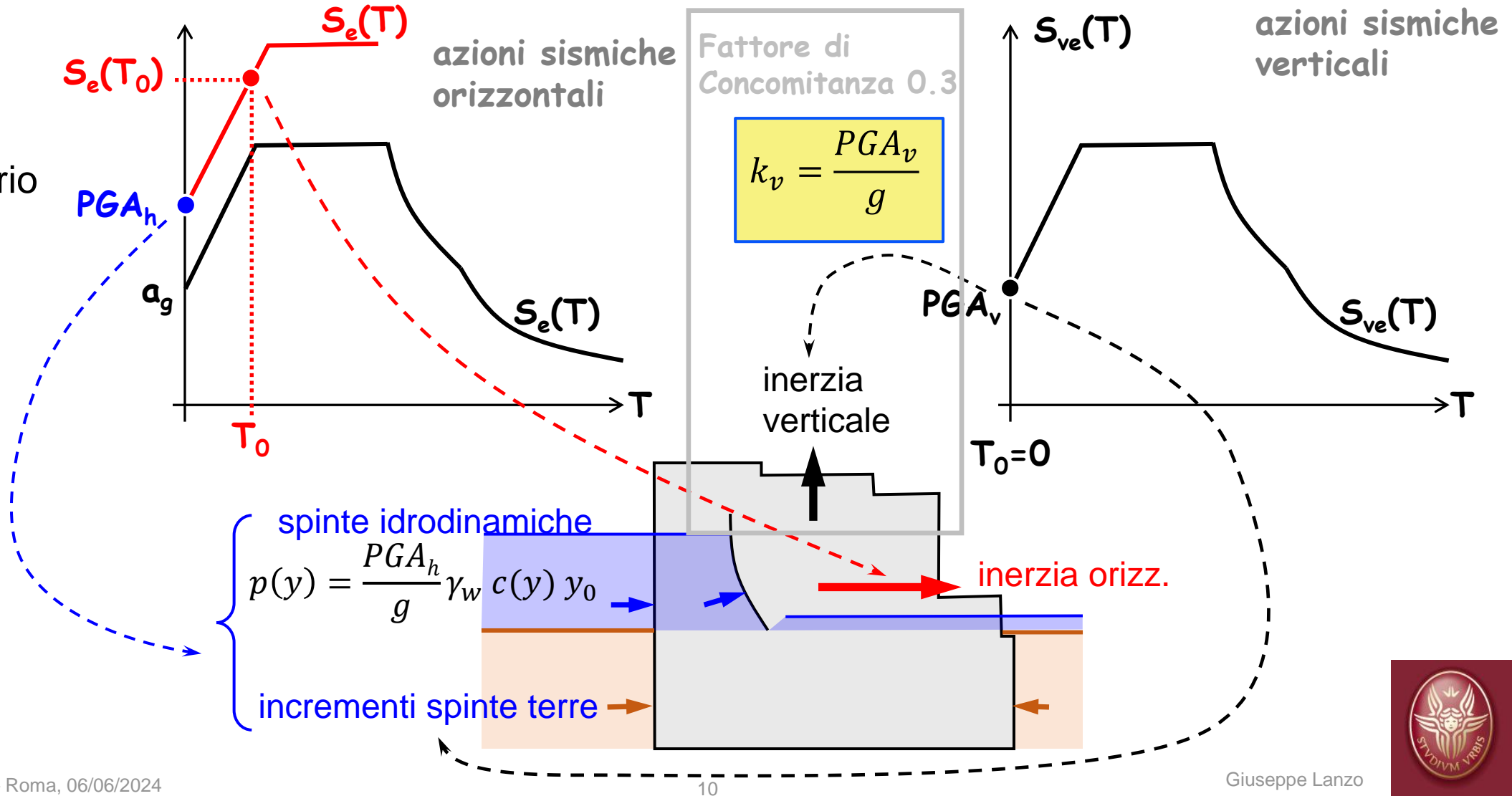
La Traversa di Nazzano: analisi pseudostatica



Verifica a scorrimento della pila per SLC: analisi pseudostatiche

$$k_h = \frac{S_e(T_0)}{g}$$

T_0 = periodo proprio



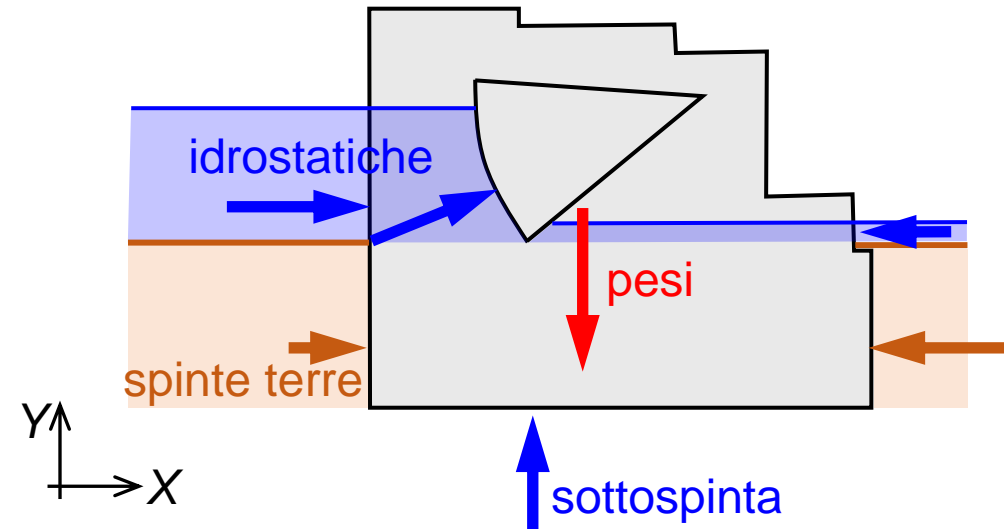
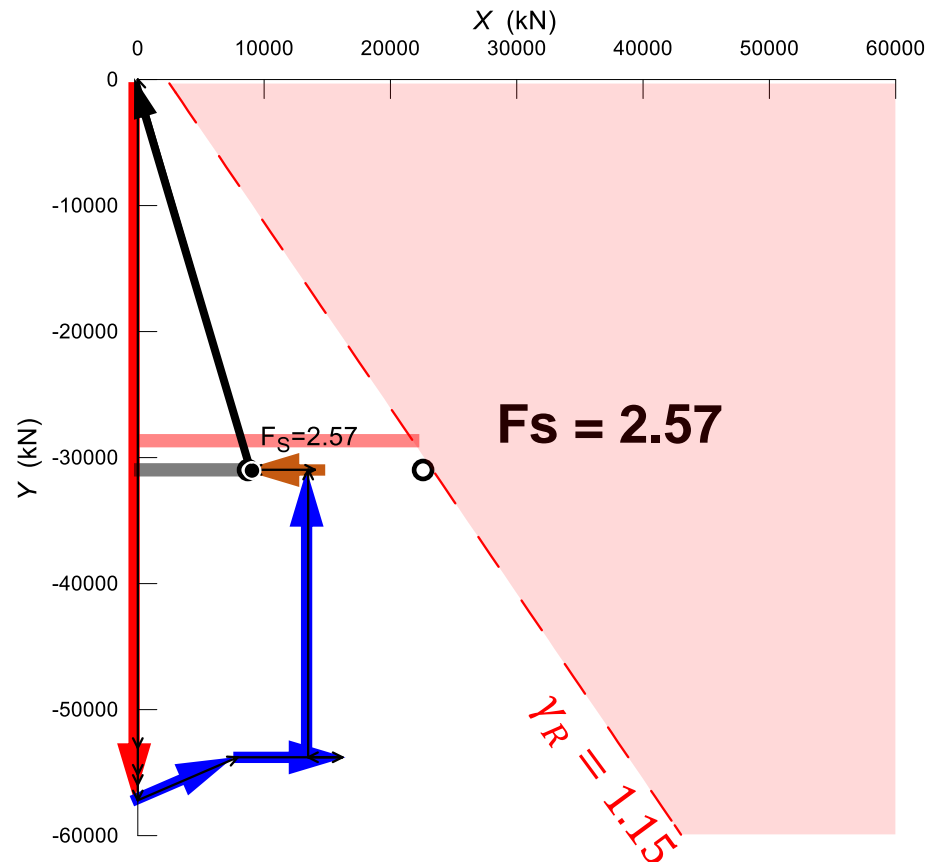
Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano: verifica in condizioni statiche



Verifica a scorrimento della pila sul piano di fondazione

Poligono delle forze in condizioni statiche



verifica allo scorrimento

$$F_s = \frac{R_d}{E_d} = \frac{C' + N' \cdot \tan \varphi'}{\gamma_R} \frac{1}{T_d} \geq 1$$

termine coesivo, C' (resistenza sulle superficie laterali)



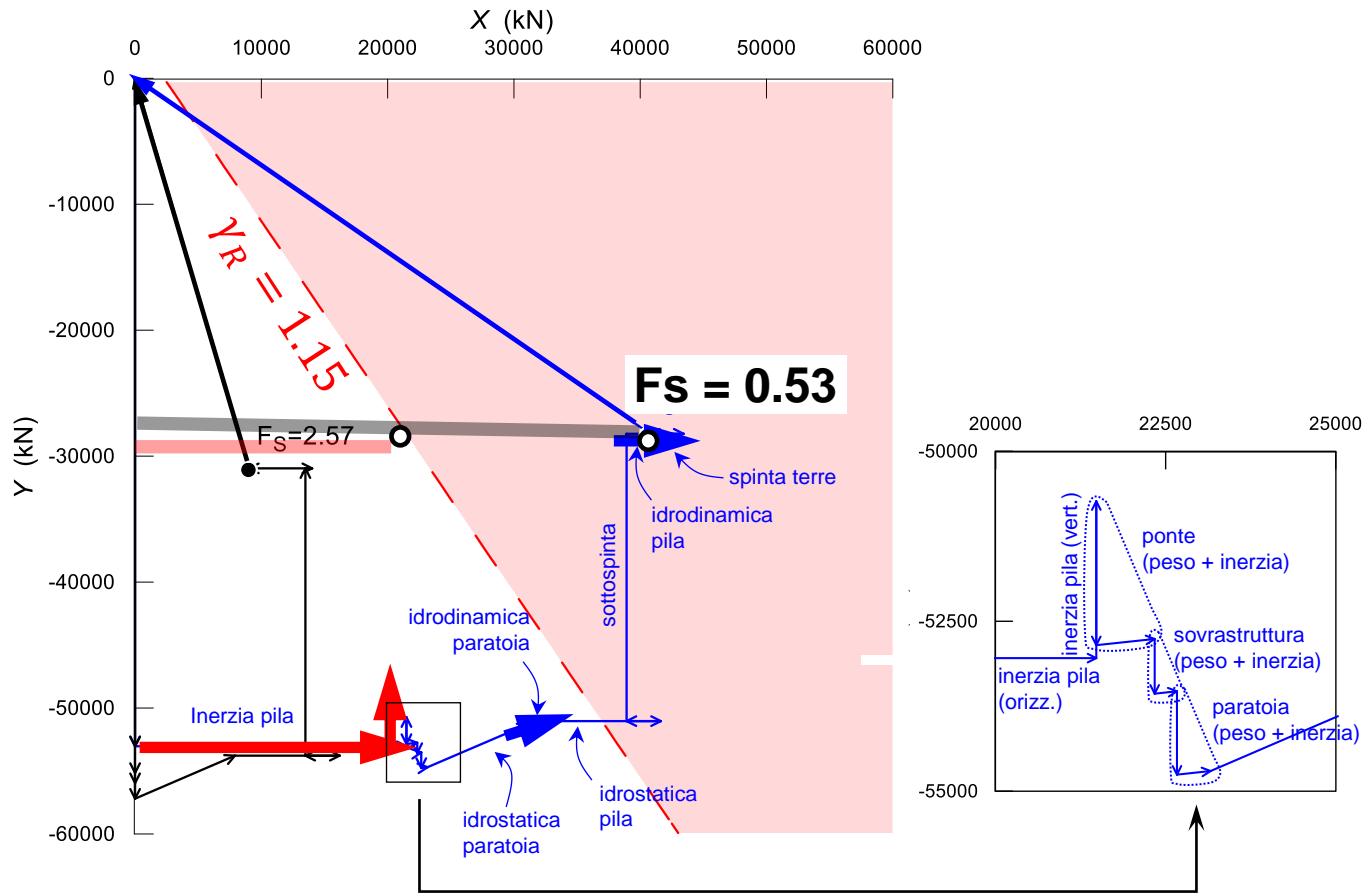
Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano: analisi pseudostatica



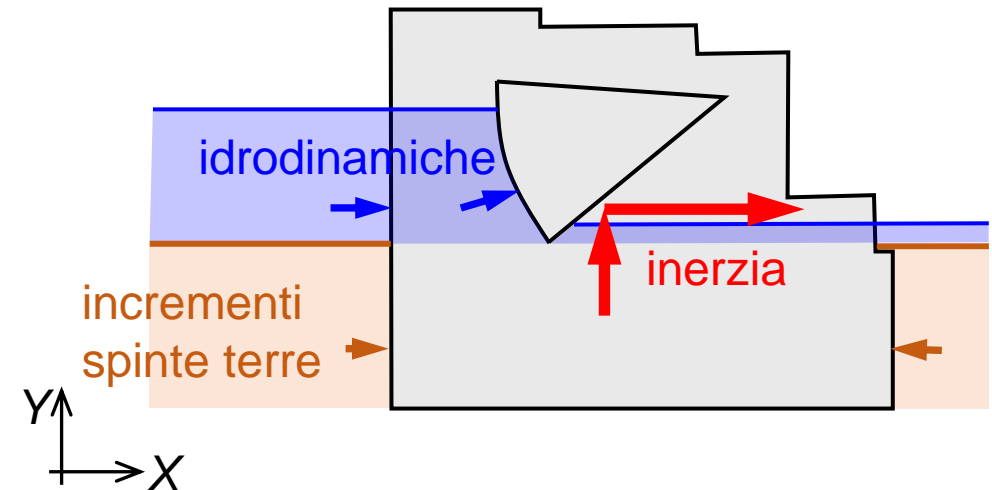
Verifica a scorrimento della pila sul piano di fondazione

Poligono delle forze in condizioni sismiche (SLC)



Combinazione più gravosa

- inerzia orizzontale verso valle
- inerzia verticale verso l'alto
- livello di invaso alla quota di massima regolazione



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano: analisi parametriche



Valutazione degli effetti sul Coefficiente di Sicurezza (F_s) di:

- classe d'uso, $C_u=1.0-2.0$
- periodo proprio della pila, $T_0=0.0-0.2$ s
- coefficiente parziale da applicare alla resistenza, $\gamma_R=1.15$ e $\gamma_R=1.00$
- riduzione dell'azione sismica per interazione cinematica

È emersa la necessità di effettuare misure sperimentali per la determinazione dei periodi propri e delle forme modali delle pile (HVSr, OMA, vibrodina).



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano: analisi parametriche

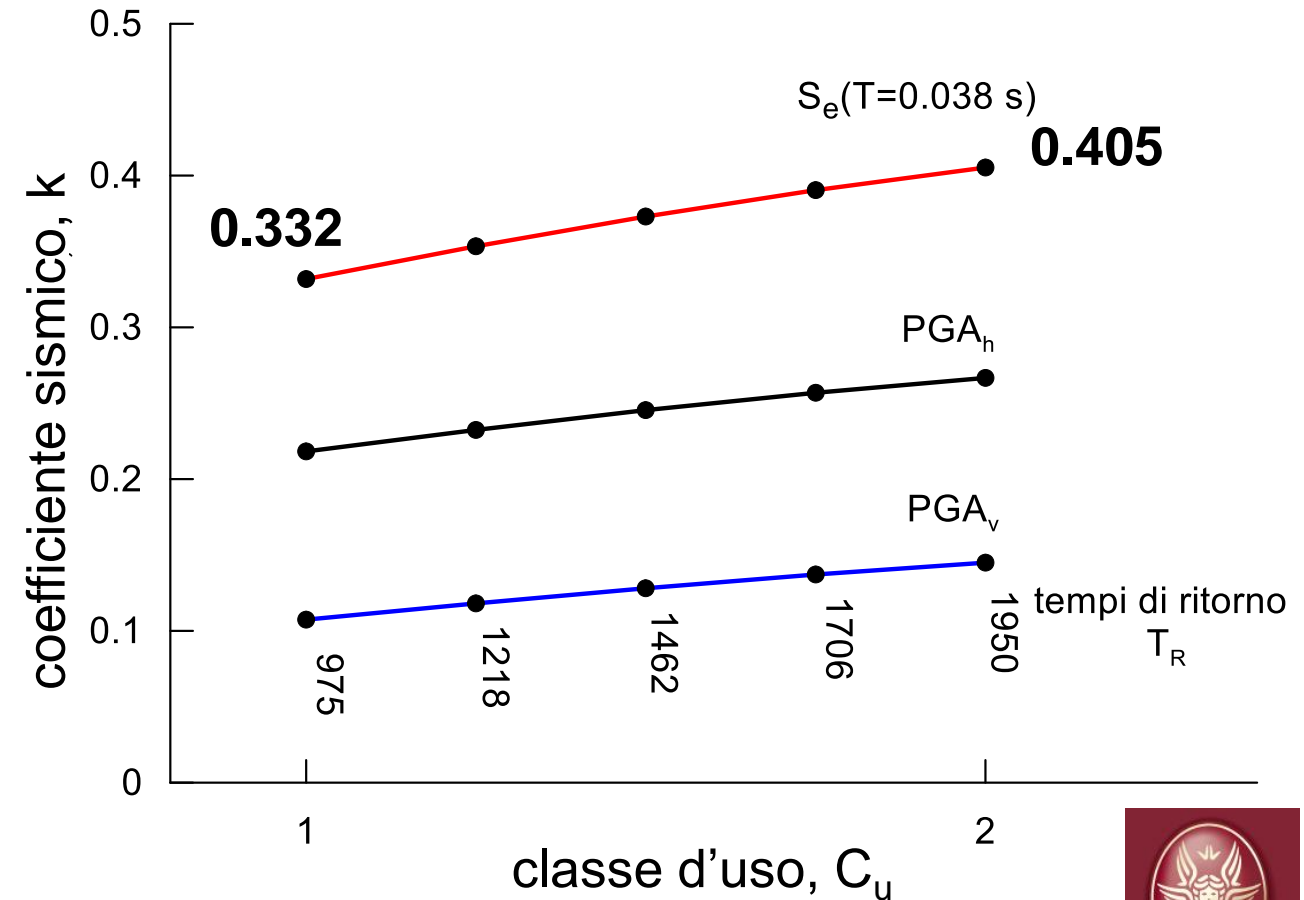


Verifica allo scorrimento sul piano di fondazione per SLC

Variazione dei coefficienti sismici con la classe d'uso C_u

Tab.H3

Dighe:	SLO $P_{VR}(\%)=81$	SLD $P_{VR}(\%)=63$	SLV $P_{VR}(\%)=10$	SLC $P_{VR}(\%)=5$
<i>strategiche</i>	60	100	950	1946
<i>rilevanti</i>	45	75	710	1460
<i>imp. normale</i>	30	50	475	975



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

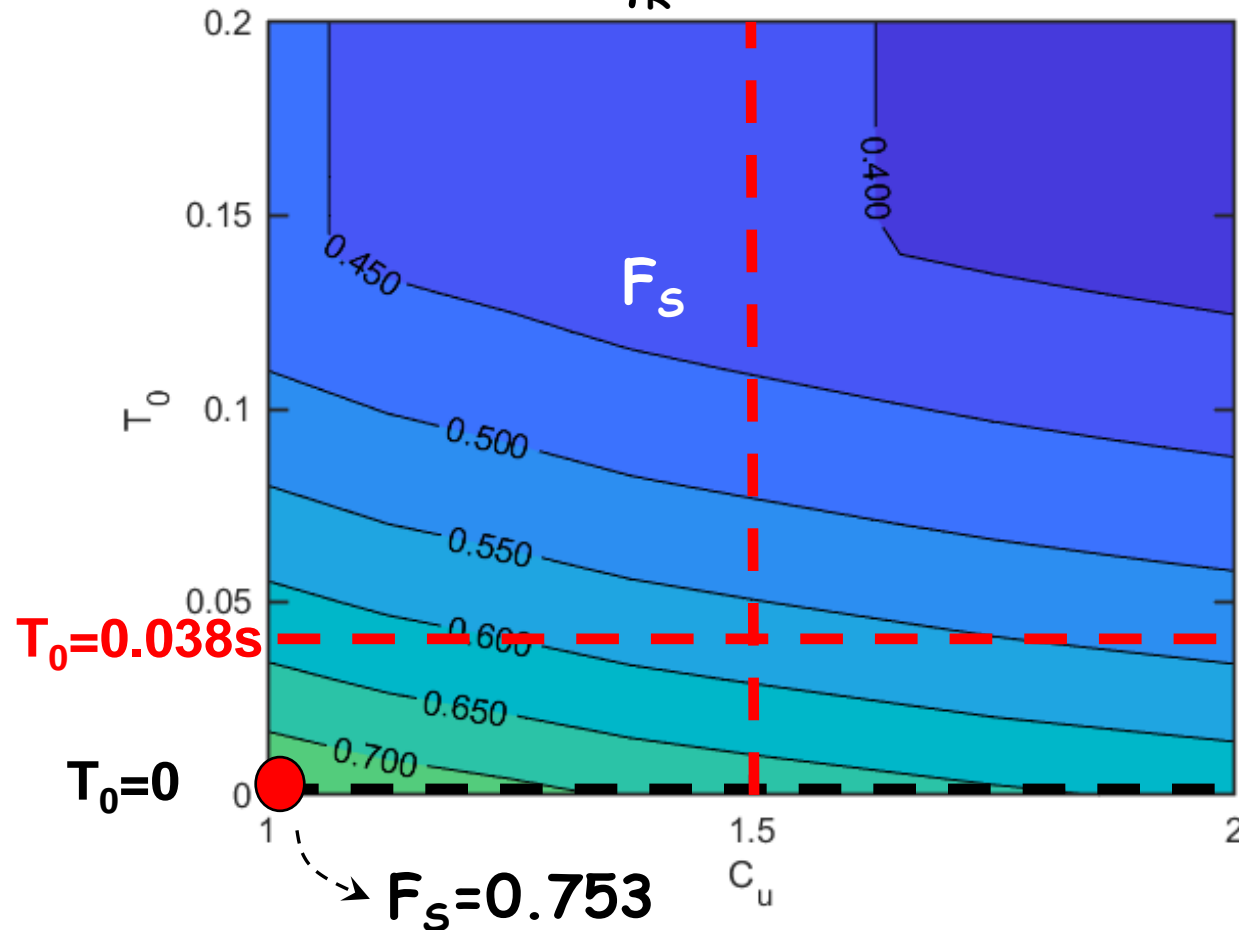
La Traversa di Nazzano: analisi parametriche



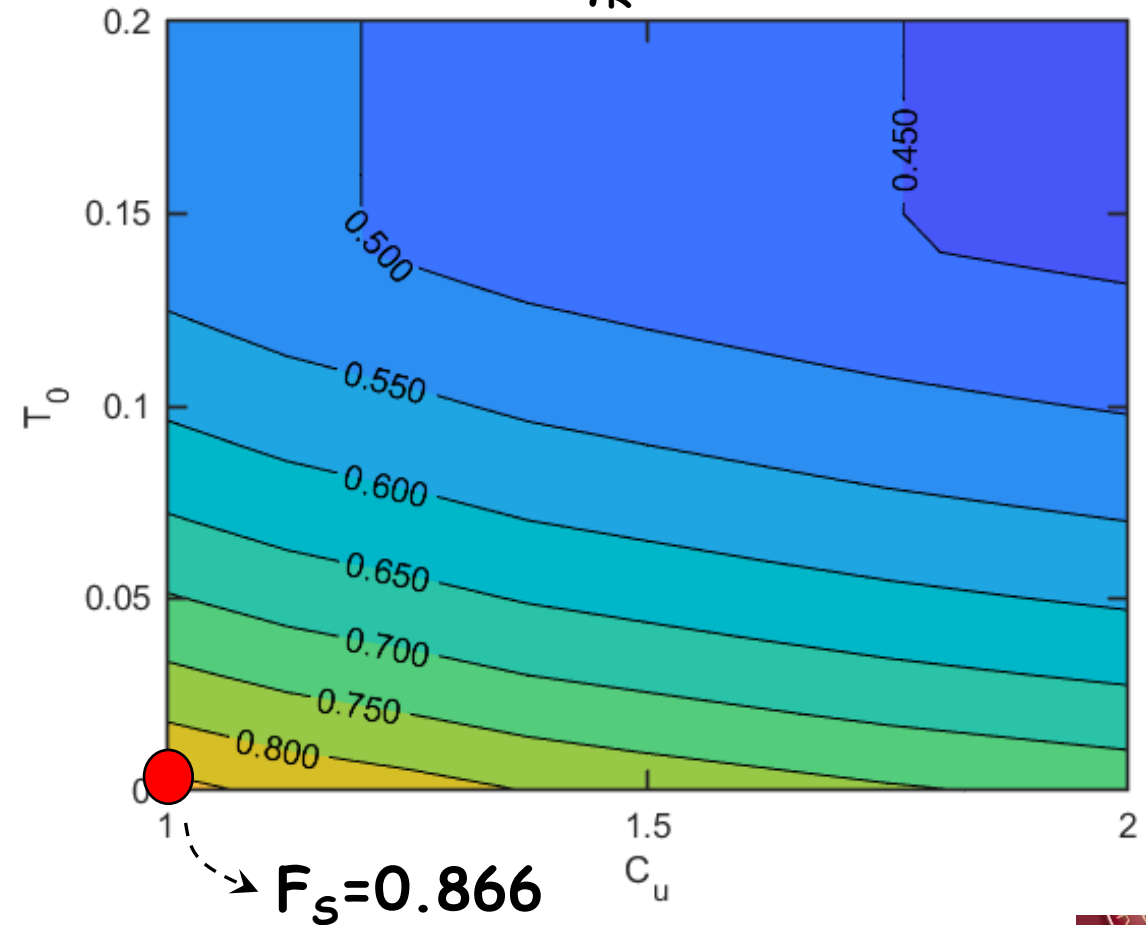
Verifica allo scorrimento sul piano di fondazione per SLC

Variazione di F_s con C_u , T_0 e γ_R

$\gamma_R = 1.15$



$\gamma_R = 1.00$



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



Sintesi delle analisi effettuate

Con riferimento al caso studio della traversa di Nazzano, l'applicazione dei metodi di verifica semplificati ha messo in evidenza i seguenti aspetti:

- le forze inerziali delle pile danno il maggior contributo alla riduzione del fattore di sicurezza, passando dalla condizione statica a quella sismica;
- la riduzione del coefficiente di classe d'uso C_u , da 2.0 a 1.0 (ovvero da dighe di importanza strategica a dighe di importanza normale) comporta un aumento del F_s di circa il 20%;
- l'adozione di un γ_r unitario (anziché $\gamma_r = 1.15$) porta ad un incremento del F_s di circa 15%



Principali Tematiche affrontate e in corso di studio

- **Valutazione delle procedure semplificate di verifica in condizioni sismiche**
- ➔ • **Effetto dell'interramento della fondazione sull'azione sismica di progetto**
- **Prove sperimentali per identificazione risposta dinamica della struttura**
- **Approcci semplificati di modellazione dinamica**
- **Calcolo degli spostamenti sismici fondazionali (→ approcci numerici 3D vs approcci semplificati)**

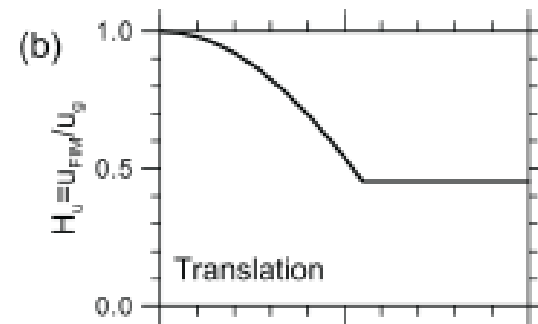
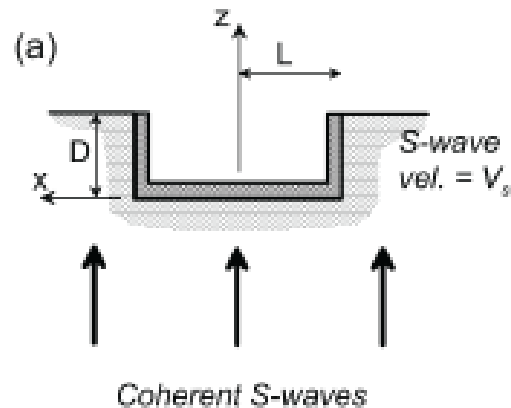
Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



Effetto dell'approfondimento della fondazione sull'azione sismica di progetto:

interazione cinematica



$$H_u(f) = \cos\left(\frac{\omega D}{V_s}\right), \quad \text{per } \frac{\omega D}{V_s} < 1.1$$

$$H_u(f) = 0.45, \quad \text{per } \frac{\omega D}{V_s} \geq 1.1$$

Tanto maggiore è l'interramento della fondazione tanto maggiore sarà il suo effetto di filtro sulle componenti del moto sismico ad alta frequenza (piccole lunghezze d'onda)

→ Soil-Structure Interaction for Building Structures (NIST GCR 12-917-21)



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



Le linee guida americane NIST

La funzione $H_u(f)$ è da intendersi come una funzione di trasferimento che modifica il segnale linearmente nel dominio della frequenza. Quindi, non può essere adottata tout court per modificare lo spettro di risposta dell'input.

Formula proposta dalle linee guida NIST:

$$R_{FIM}(T) = \begin{cases} \cos\left(\frac{2\pi D}{T V_s}\right), & T > T_c \\ \cos\left(\frac{2\pi D}{0.2 V_s}\right), & T \leq T_c \end{cases}$$

dove si considera $T_c = 0.2$ s per suoli ben addensati.

Limiti della formula NIST:

- ✓ è in generale conservativa;
- ✓ andrebbe calibrata su insiemi di accelerogrammi specifici per la sismicità dell'area



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



Passi seguiti per migliorare la formula NIST per applicazioni in ambito italiano

- 1) selezione di accelerogrammi con Magnitudo compresa tra 5.5 e 6.5 e distanza fino a 30 km (suolo B e C);
- 2) convoluzione di ciascun accelerogramma con la funzione $H_u(f)$;
- 3) calcolo dello spettro di risposta di ciascun accelerogramma;
- 4) calcolo del rapporto tra spettro di risposta in uscita e in ingresso per ogni accelerogramma;
- 5) calcolo del rapporto medio $R_{FIM}(T)$ su tutti gli accelerogrammi considerati.

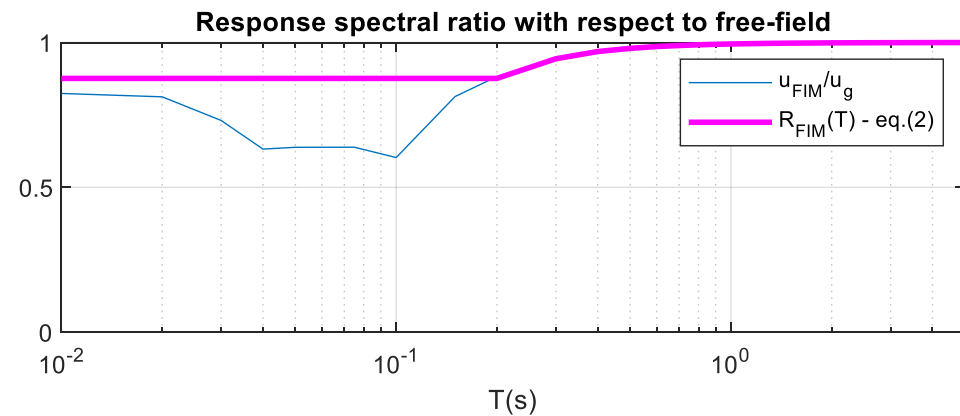
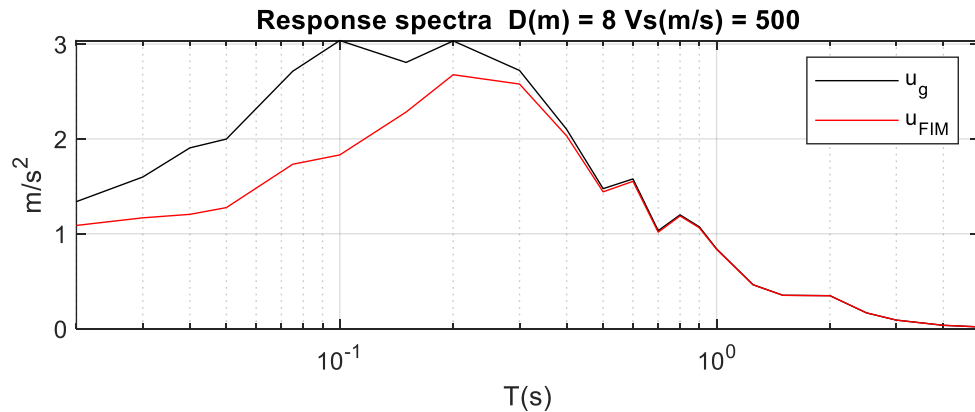
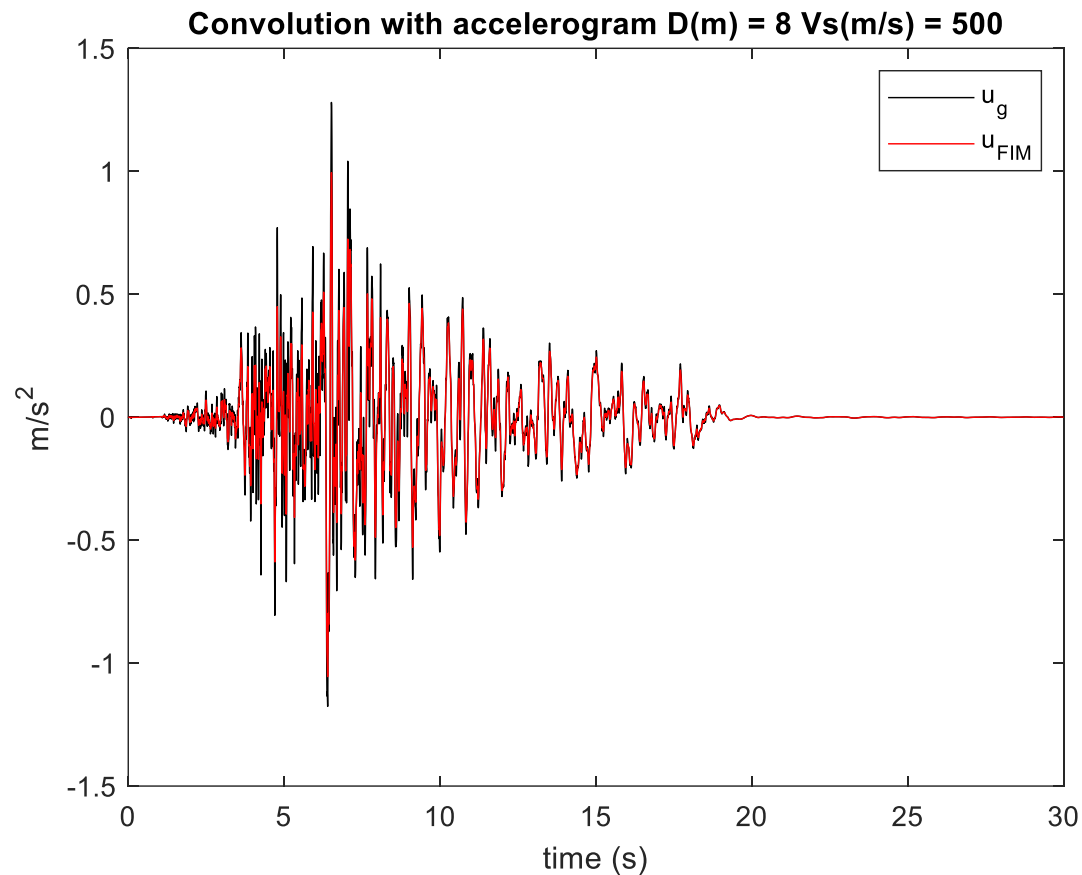


Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



esempio di accelerogramma filtrato dalla interazione cinematica



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



proposta di una formula alternativa alla NIST

$$R_{FIM}(T) = \begin{cases} R_{PGA} - (R_{PGA} - R_{Tmin}) \frac{T}{T_{min}}, & \text{per } T \leq T_{min} \\ R_{Tmin} + (R_{FIM}(T_C) - R_{Tmin}) \frac{T - T_{min}}{T_C - T_{min}}, & \text{per } T_{min} < T < T_C \\ \cos\left(\frac{2\pi D}{T V_s}\right), & \text{per } T \geq T_C \end{cases}$$

dove:

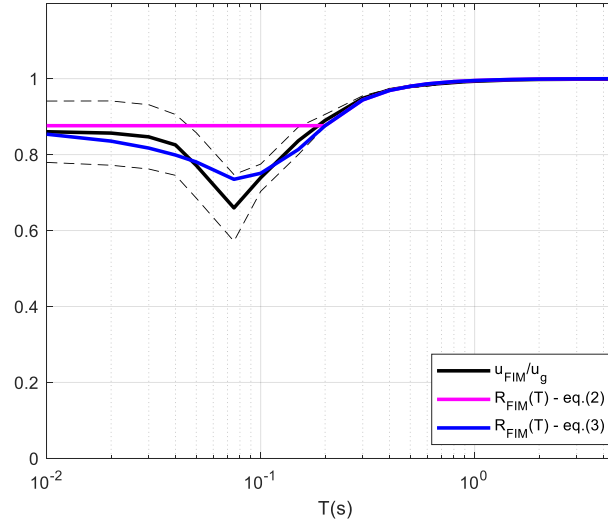
$$T_{min} = \frac{5D}{V_s} \quad (T_{min} < T_C = 0.2s)$$

$$R_{PGA} = \max\left(1 - \frac{8D}{V_s}, 0.45\right)$$

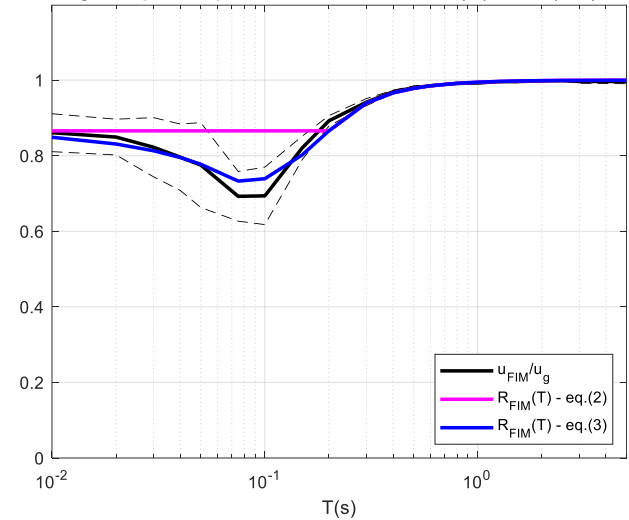
$$R_{Tmin} = \max\left(\left(-0.19 \left(\ln \frac{D}{V_s}\right) - 0.06\right), 0.45\right);$$

$$(R_{Tmin} \leq 1)$$

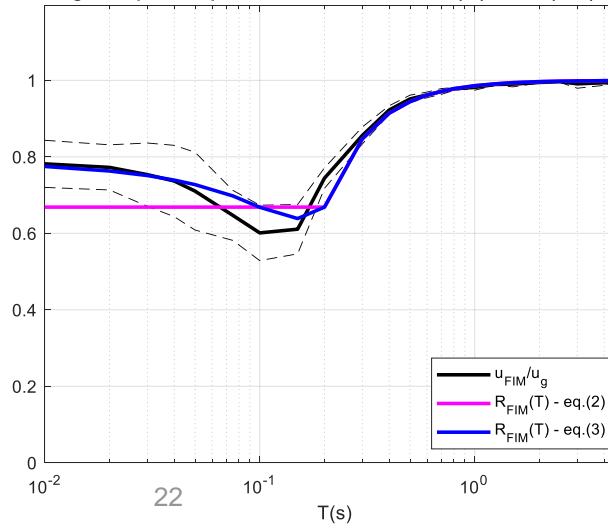
Average Response spectral ratio - STIFF soil D(m) = 8 Vs(m/s) = 500



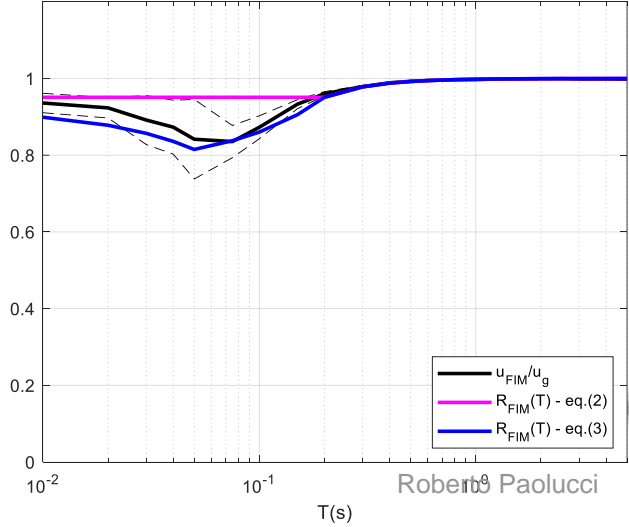
Average Response spectral ratio - SOFT soil D(m) = 5 Vs(m/s) = 300



Average Response spectral ratio - SOFT soil D(m) = 8 Vs(m/s) = 300



Average Response spectral ratio - SOFT soil D(m) = 2.5 Vs(m/s) = 250

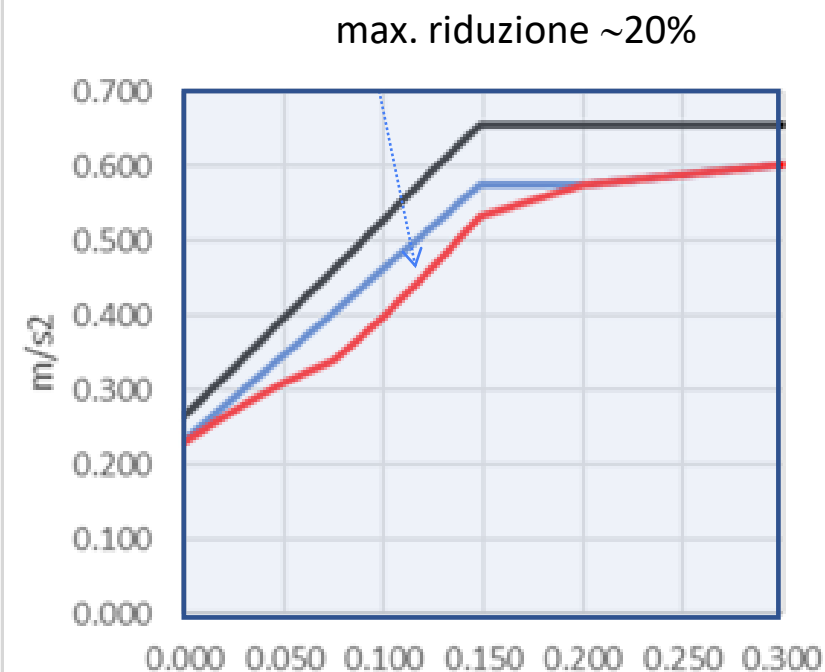
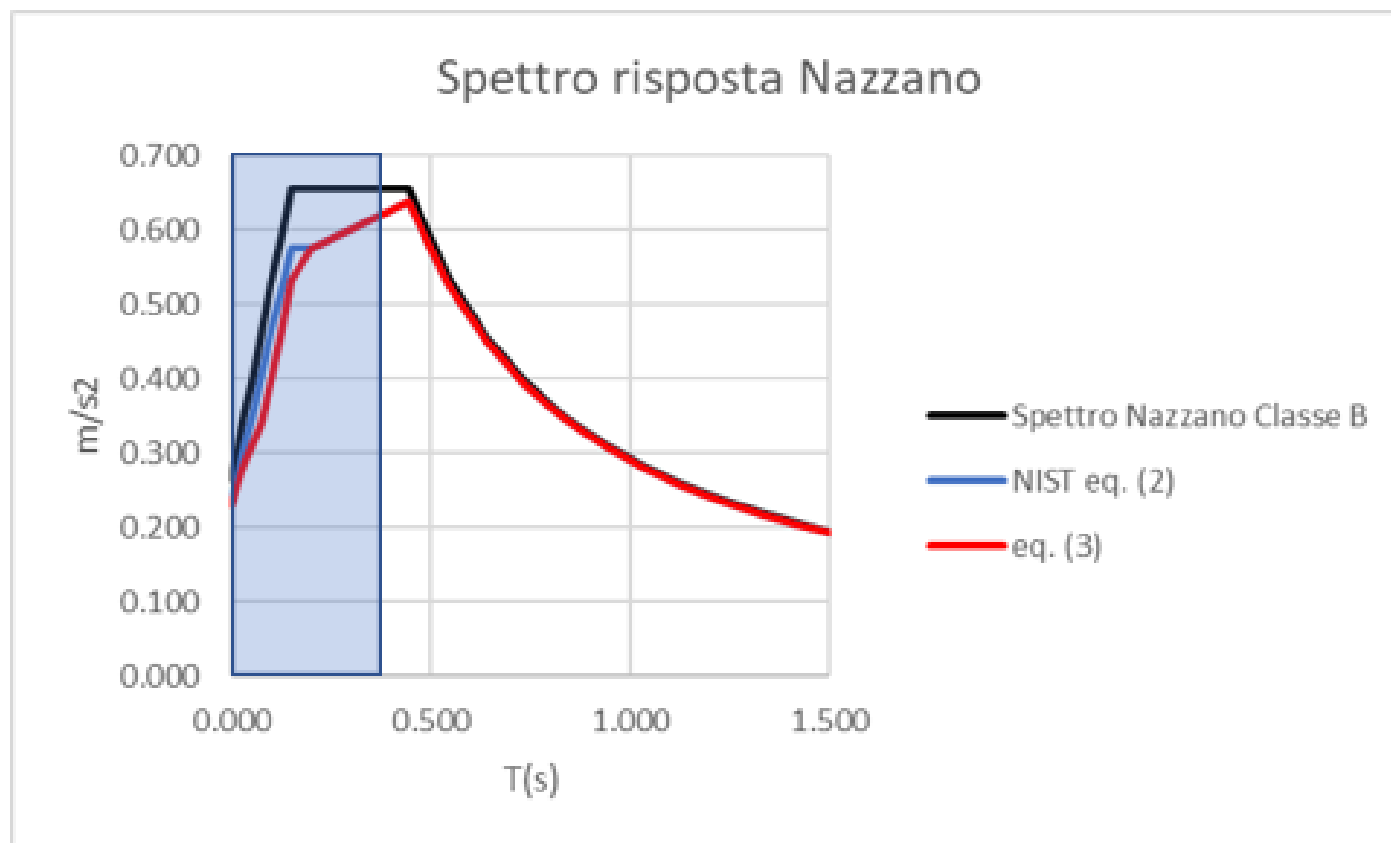


Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



effetto dell'interazione cinematica sullo spettro elastico di progetto a Nazzano



Principali Tematiche affrontate e in corso di studio

- **Valutazione delle procedure semplificate di verifica in condizioni sismiche**
- **Effetto dell'interramento della fondazione sull'azione sismica di progetto**
- ⇒ • **Prove sperimentali per identificazione risposta dinamica della struttura**
- **Approcci semplificati di modellazione dinamica**
- **Calcolo degli spostamenti sismici fondazionali (→ approcci numerici 3D vs approcci semplificati)**

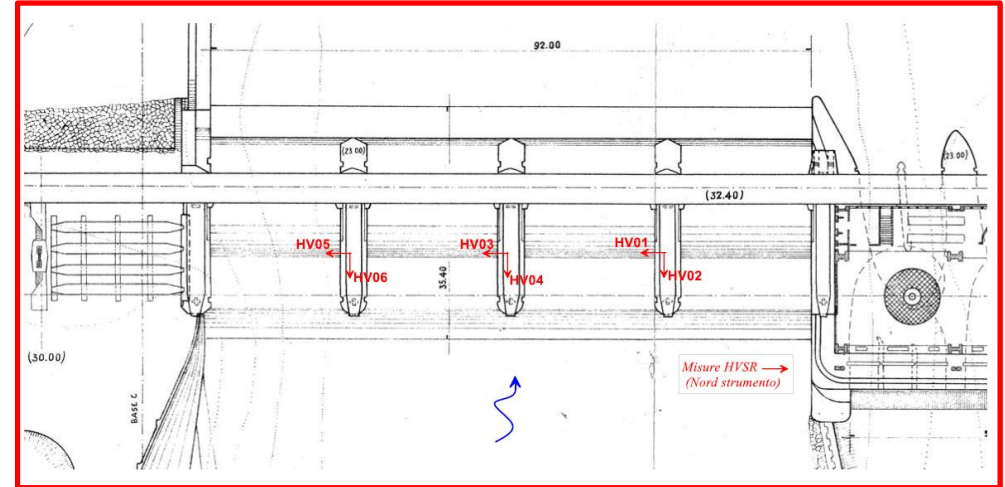
Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



Campagna di misure sperimentali

1) HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio)



2) OMA (Operative Modal Analysis)



3) VF (Vibrazione forzata con Vibrodina)



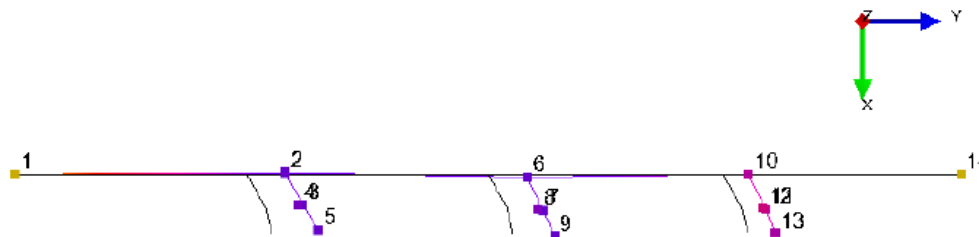
Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere

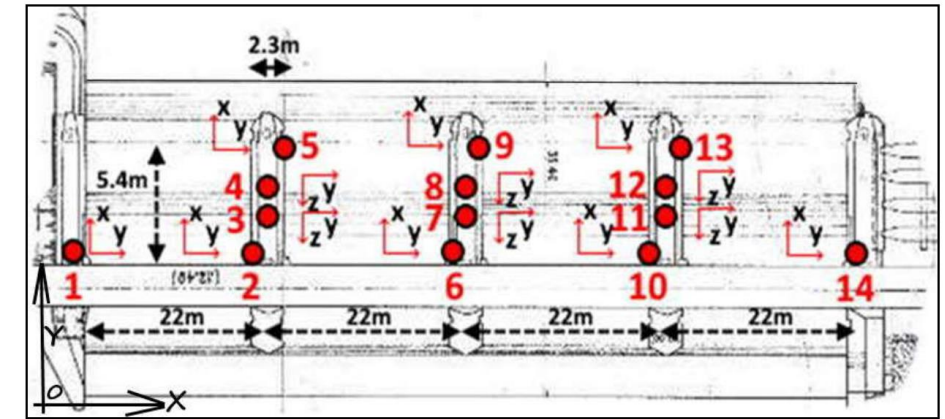


Forme modali da OMA

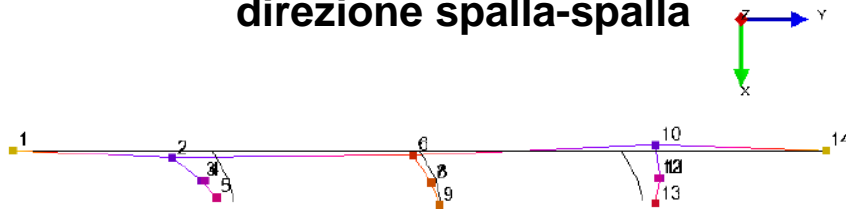
prima forma modale f_0 9.25 Hz
modo traslazionale in direzione spalla-spalla



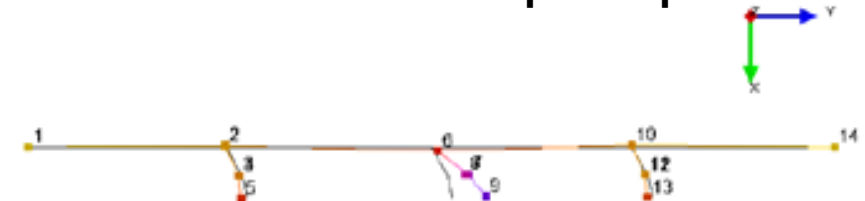
collocazione degli strumenti



seconda forma modale f_0 17.3 Hz
modo accoppiato torsionale traslazionale in
direzione spalla-spalla



terza forma modale f_0 33.7 Hz
modo accoppiato torsionale traslazionale
in direzione spalla-spalla

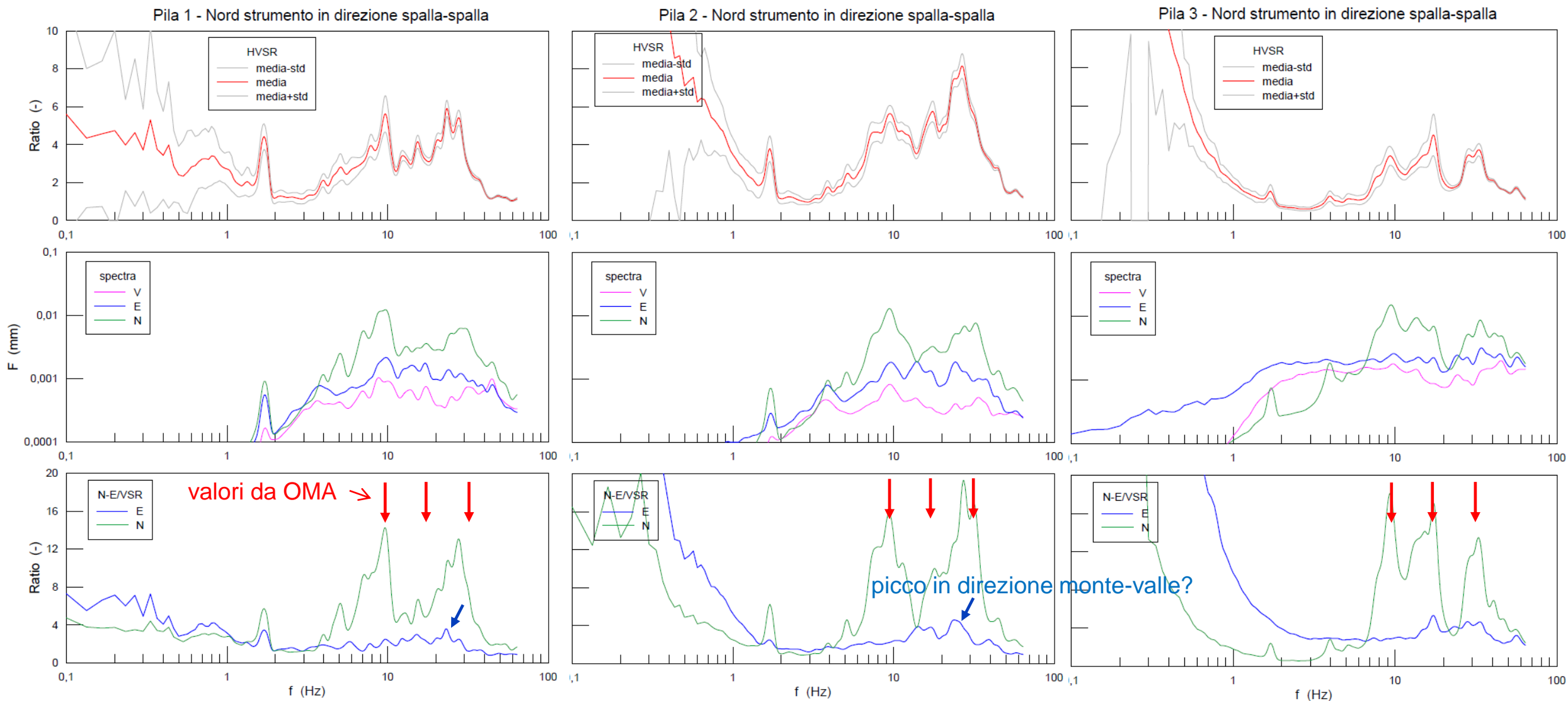


Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



Rapporti spettrali da HVSR

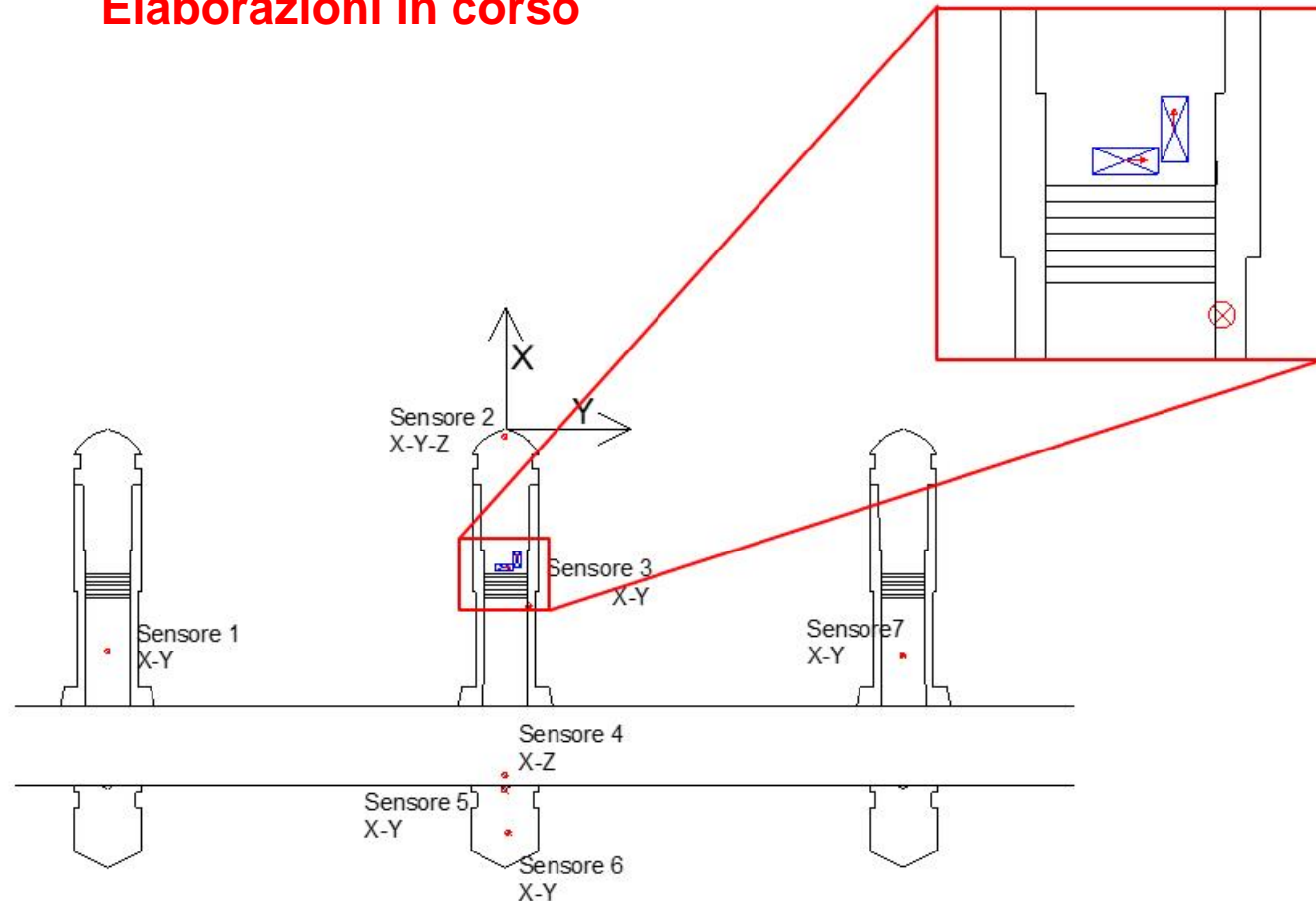


Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



Prove da vibrazioni forzate con vibrodina
Elaborazioni in corso



Vibordina in direzione Monte - Valle



Vibordina in direzione Spalla-Spalla



Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



Sintesi preliminare prove sperimentali

- ✓ C'è un buon accordo tra prove OMA, HVSR, e VF, per le vibrazioni in direzione spalla-spalla
- ✓ la prova VF (ancora in fase preliminare di elaborazione) sembra mettere in luce un modo di vibrazione flessionale in direzione monte-valle intorno a 25 Hz, in buon accordo con l'analisi modale numerica, ma che risulta poco visibile da OMA e da HVSR
- ✓ nessuna prova mette in evidenza moti di rocking della pila intorno ad assi orizzontali → si può dedurre che gli effetti di interazione dinamica terreno-struttura siano trascurabili.
- ✓ Quest'ultima indicazione è anche suggerita dai bassi valori di smorzamento modale

Traverse esistenti e verifiche sismiche: analisi di alcuni aspetti critici

La Traversa di Nazzano sul F. Tevere



Ulteriori tematiche oggetto di studio

- 1) **formule semplificate per periodo naturale traverse in direzione monte-valle:**
 - ✓ correzione per deformabilità a taglio
 - ✓ altezza efficace
 - ✓ interazione dinamica terreno-struttura e acqua-struttura (→ Chopra)
 - ✓ smorzamento modale
- 2) **modellazione 3D e confronto con prove sperimentali**
- 3) **fattore di partecipazione modale e calcolo forze efficaci**
- 4) **calcolo spostamenti sismici della fondazione**

