Webinar venerdì 12 aprile 2024
Tecniche tradizionali ed innovative di protezione sismica delle costruzioni

Università degli Studi di Napoli Federico II

Scuola Politecnica e delle Scienze di base

ISOLAMENTO SISMICO GEOTECNICO: PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO ED ESEMPI STORICI

12 APRILE 2024 ORE 10.00

ING. FILOMENA DE SILVA, PHD

PROF. ING. ALESSANDRO FLORA, PHD

ING. FAUSTO SOMMA, PHD

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE E AMBIENTALE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

MAPPA DI PERICOLOSITÀ SISMICA EUROPEA

- L'Italia è la nazione ad elevata pericolosità sismica con il più alto numero di siti culturali al mondo

DANNI SISMICI A EDIFICI STORICI

Norcia- *Ottobre 2016*

Emilia- *Maggio 2012*

L'Aquila- *Aprile 2009*

Emilia- *Maggio 2012*

I PRINCIPALI PROBLEMI DI INTERVENTO SU UN EDIFICIO STORICO

Generalmente progettati senza tenere conto delle azioni sismiche:

- Sono vulnerabili anche per terremoti più frequenti;
- Sono spesso caratterizzati da:
  - ✓ Irregolarità in pianta ed in elevazione;
  - ✓ Connessioni tra muri verticali e solai orizzontali inefficaci a garantire l'effetto scatolare;
  - ✓ Flessibilità dei solai di piano;
  - ✓ Fondazioni superficiali.

La verifica sismica di tali manufatti è piuttosto complessa poiché:

- Sono richiesti livelli di sicurezza più alti a causa della presenza di turisti;
- L'integrità e il valore storico di tali edifici deve essere preservato.

Le tecniche strutturali tradizionali non sono in genere applicabili poiché:

- Si basano sull'incremento di rigidezza e resistenza degli elementi strutturali;
- Sono solitamente non reversibili;
- Fanno uso di materiali solitamente incompatibili con quelli originari;
- Determinano un cambiamento della concezione strutturale dell'edificio;
- Sotto azioni sismiche violente non prevengono il danno ma solo il collasso della struttura.

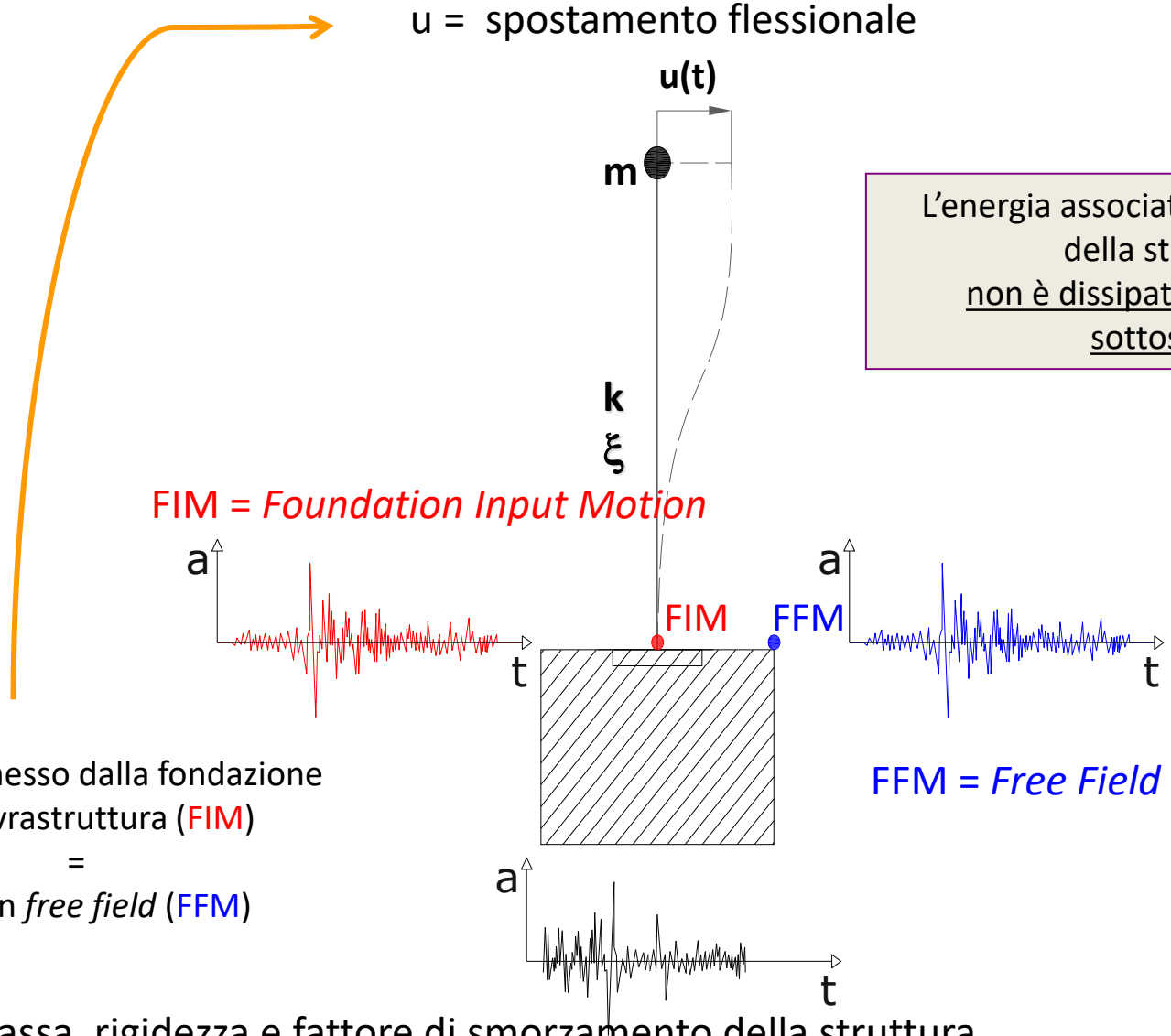
SOMMARIO DELLA PRESENTAZIONE

- Principi dell'Interazione Terreno-Fondazione-Struttura (SFSI)
- Uso dello smorzamento isteretico del terreno
- Principi dell'Isolamento Sismico Geotecnico (GSI)
- Esempi storici di GSI
- Nuove idee di GSI:
  - La tecnica della Disconnessione laterale
  - La tecnica delle Barriere soffici
  - La tecnica SMART-GAP
- Conclusioni

COMPORTAMENTO DINAMICO DELLA STRUTTURA A BASE FISSA

Hyp: base rigida

u = spostamento flessionale



L'energia associata all'oscillazione della struttura <u>non è dissipata attraverso il sottosuolo</u>

Moto trasmesso dalla fondazione alla sovrastruttura (FIM)
=
moto in *free field* (FFM)

FFM = *Free Field Motion*

m, k, ξ = massa, rigidezza e fattore di smorzamento della struttura

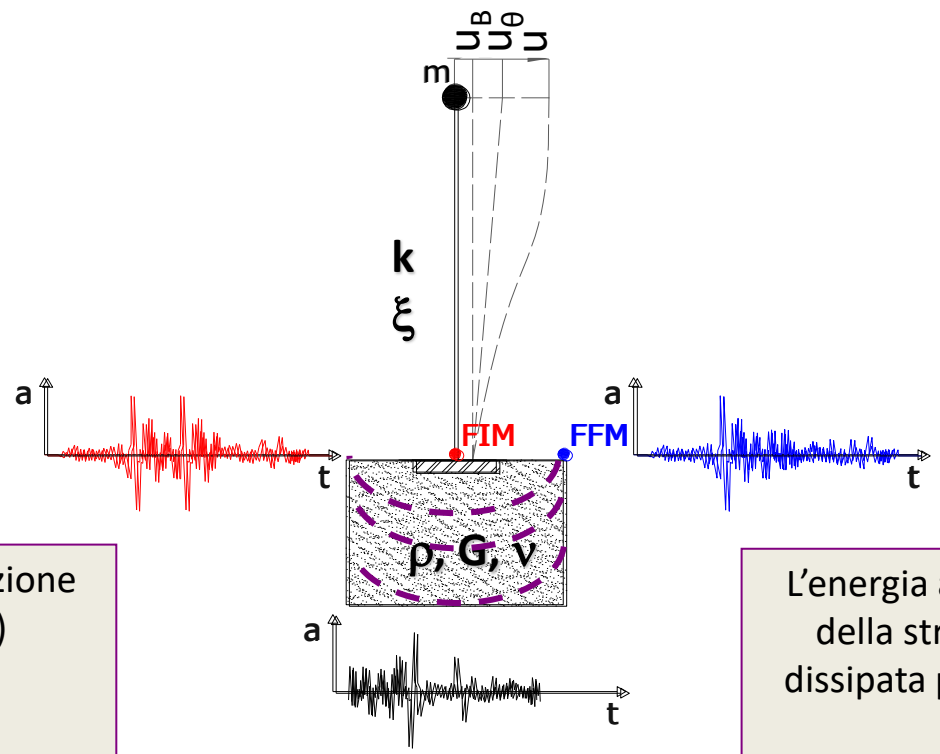
COMPORTAMENTO DINAMICO DEL SISTEMA TERRENO-STRUTTURA SFS

Hyp: fondazione rigida su terreno deformabile

u_B = traslazione rigida della base (**swaying**)

u_θ = rotazione rigida della base (**rocking**)

u = spostamento flessionale



Moto trasmesso dalla fondazione alla sovrastruttura (FIM)

≠

Moto in *free field* (FFM)

INTERAZIONE CINEMATICA

L'energia associata all'oscillazione della struttura è parzialmente dissipata per radiazione & isteresi del terreno

INTERAZIONE INERZIALE

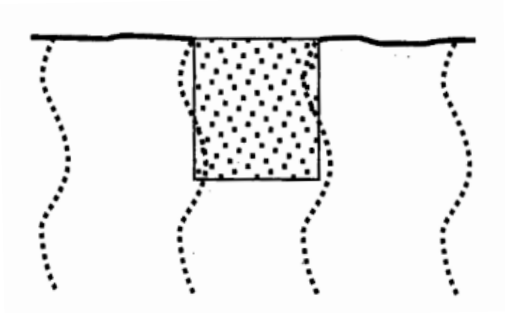
m, k, ξ = massa, rigidezza e fattore di smorzamento della struttura

ρ, G, ν = densità, rigidezza a taglio e coefficiente di Poisson del terreno

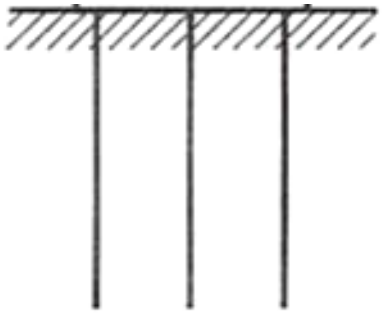
INTERAZIONE CINEMATICA

FONDAZIONE SUPERFICIALE

FONDAZIONE INTERRATA



PALI



Fondazione superficiale

-non segue la deformata del p.c. per effetto della variabilità spaziale delle onde P

-non modifica le onde S che si propagano in verticale → **interazione cinematica trascurabile**

Fondazione interrata

-modifica le onde S, soprattutto le alte frequenze

-lunghezze d'onda paragonabili alla profondità di interramento inducono momenti sulla fondazione

Pali

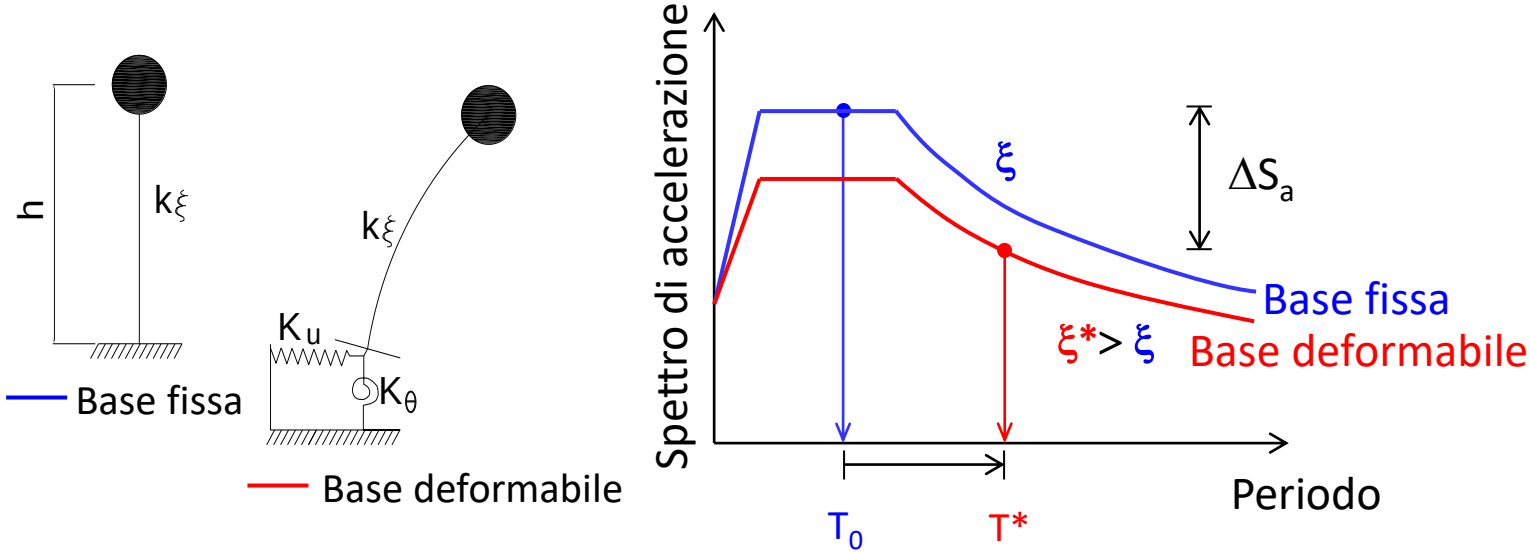
-modifica le onde S, soprattutto le alte frequenze

-le onde sismiche inducono momenti sulla fondazione

L'interazione cinematica è trascurabile se la fondazione ha rigidezza prossima a quella del terreno (opere esistenti in muratura)

INTERAZIONE INERZIALE

Hyp: Interazione cinematica trascurabile



Lo smorzamento strutturale si riduce da ξ a ξ_{str}^*
In fondazione si genera
smorzamento radiativo ξ_{rad}^*
smorzamento isteretico ξ_{hys}^*

→ Lo smorzamento complessivo cresce
ξ^* (= $\xi_{str}^* + \xi_{rad}^* + \xi_{hys}^*$)

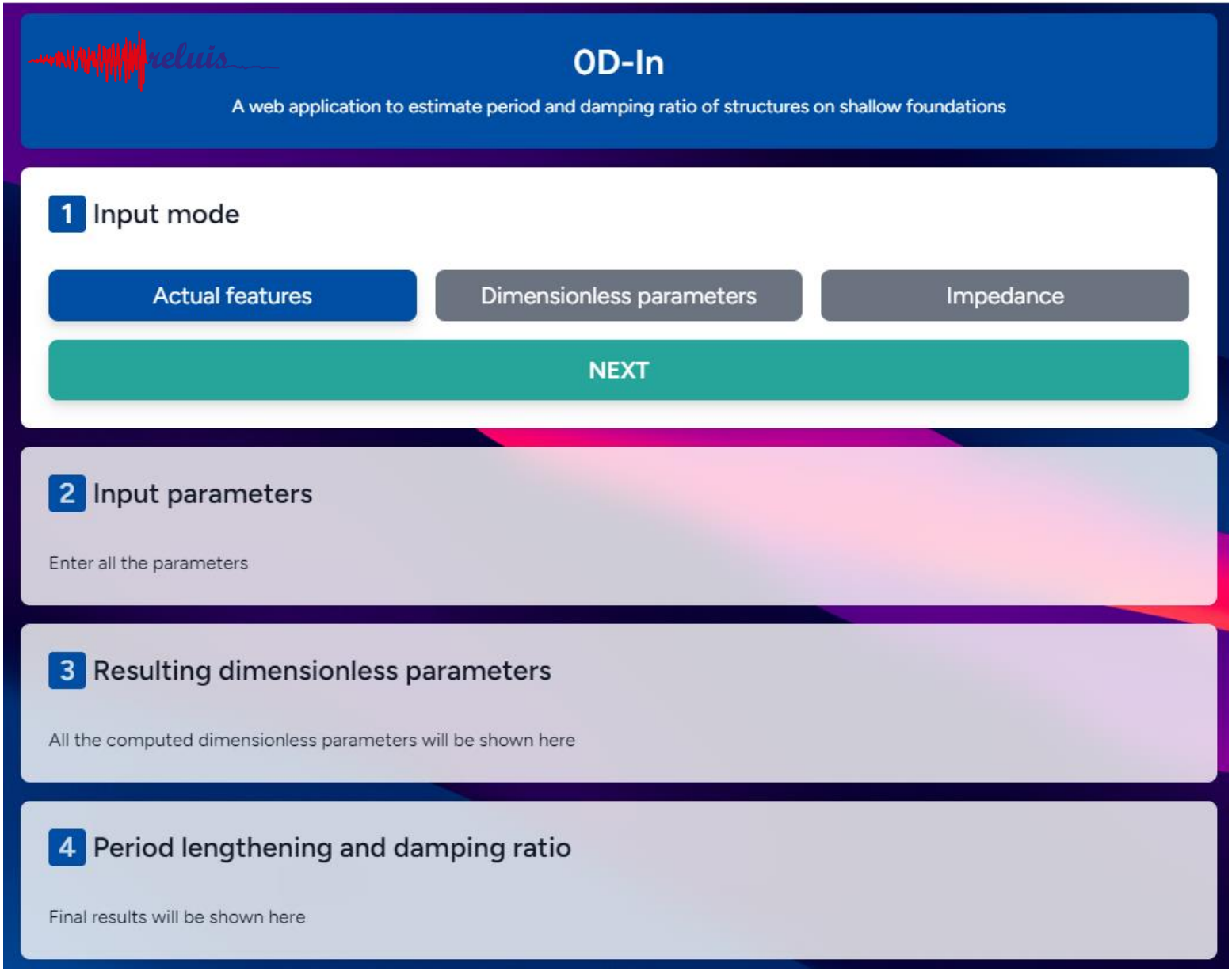
Il sistema è complessivamente più deformabile → Il periodo cresce da T_0 a T^*

Le azioni sismiche sul sistema a base deformabile possono essere superiori o inferiori rispetto a quello a base fissa in funzione di T_0, T^* e ξ^*

$$T^* = T_0\sqrt{1+\frac{k}{K_x}\left(1+\frac{K_x}{K_\theta}h^2\right)}$$

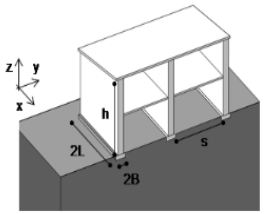
$$\xi^* = \left(\frac{T_0}{T^*}\right)^2\left\{\frac{T_0}{T^*}\xi + \frac{k_{str}a_0^*}{2K_x}\left[\left(c_x^* + \frac{2\xi_{hys}}{a_0^*}\right) + \frac{K_x h^2}{K_\theta}\left(c_\theta^* + \frac{2\xi_{hys}}{a_0^*}\right)\right]\right\}$$

L'APP WEB 0D-In PER IL CALCOLO DI T^* E ξ^* https://dynatools.it/odin



reluis

2 Input parameters



Foundation parameters

Type

Circular ◉ Rectangular

Half-width (B)

1 m

Half-length (L)

1 m

Embedment (D)

0 m

Number of foundations (n)

1

Soil parameters

Density (ρ)

1 kg/m³

Shear wave velocity (V_s)

1 m/s

Poisson's ratio (ν)

0.33

Hysteretic damping ratio (β_s)

0

Structural parameters

Mass (m)

0 kg

Height (h)

1 m

Predominant period of the fixed base structure (T_0)

1 s

Viscous damping ratio (β_{str})

0

NEXT

L'APP WEB 0D-In PER IL CALCOLO DI T^* E ξ^* https://dynatools.it/odin

4 Period lengthening and damping ratio

T^* / T_0	T^*	β^*
1,285	0,257	0,195

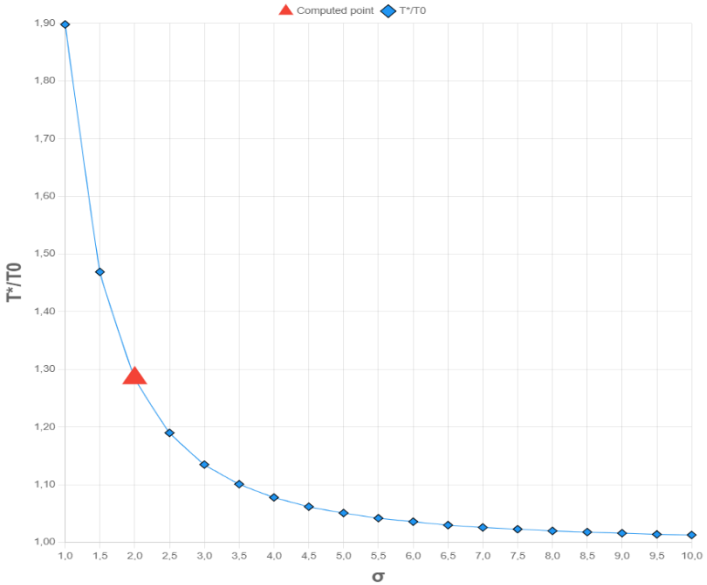
Plots parameters

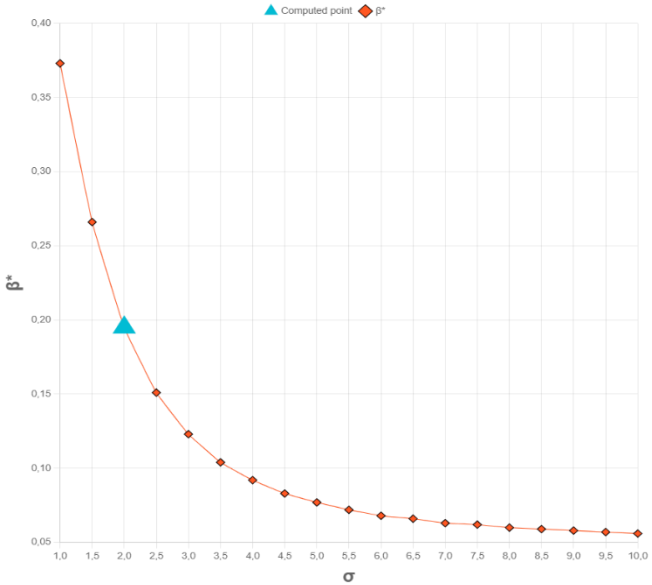
Min. Soil-to-structure relative stiffness (σ)	Max. Soil-to-structure relative stiffness (σ)	Soil-to-structure relative stiffness (σ) step
1	10	0.5

Variations

- (●) None
- ( ) Structure-to-soil relative mass (δ)
- ( ) Hysteretic damping ratio (β_s)
- ( ) Structural slenderness ratio (h/B)
- ( ) Embedment ratio (D/B)
- ( ) Foundation aspect ratio (L/B)

UPDATE PLOTS



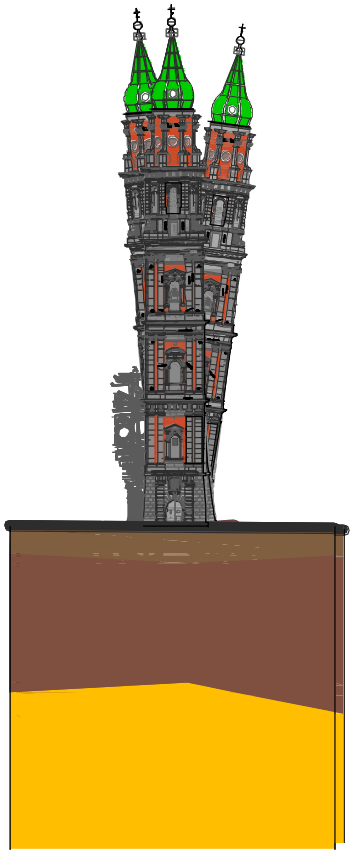


SOMMARIO DELLA PRESENTAZIONE

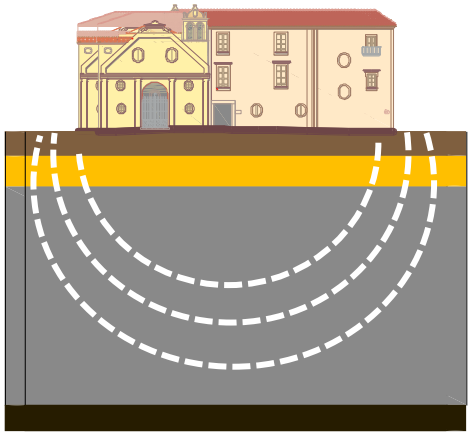
- Principi dell'Interazione Terreno-Fondazione-Struttura (SFSI)
- **Uso dello smorzamento isteretico del terreno**
- Principi dell'Isolamento Sismico Geotecnico (GSI)
- Esempi storici di GSI
- Nuove idee di GSI:
  - La tecnica della Disconnessione laterale
  - La tecnica delle Barriere soffici
  - La tecnica SMART-GAP
- Conclusioni

INFLUENZA DELLA SNELLEZZA STRUTTURALE

Struttura snella



Struttura tozza



$\xi^* < \xi$ — $\xi_{rad}^* \approx 0$ — per strutture snelle, caratterizzate da cinematismi rotazionali e ridotta superficie di base

$\xi_{str}^* < \xi$

$\xi^* > \xi$ — $\xi_{rad}^* > 0$ — per strutture tozze, caratterizzate da cinematismi traslazionali ed estesa superficie di base

INVERSIONE DELLA GERARCHIA DELLE RESISTENZE

Hyp: fondazione rigida superficiale su terreno elasto-plastico

$$\xi^* = \left(\frac{T_0}{T^*}\right)^2 \left\{ \frac{T_0}{T^*}\xi_{str} + \frac{k_{str}a_0^*}{2K_x}\left[\left(\xi_x^* + \frac{2\xi_{hys}}{a_0^*}\right) + \frac{K_x h^2}{K_\theta}\left(\xi_\theta^* + \frac{2\xi_{hys}}{a_0^*}\right)\right]\right\}$$

Approccio tradizionale – gerarchia delle resistenze

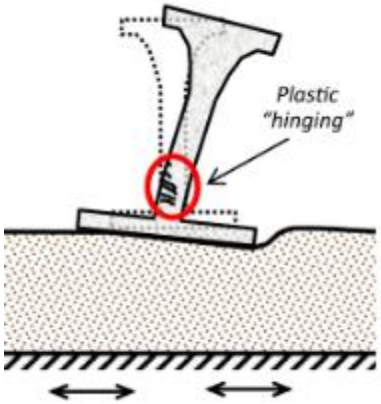
Collasso per la struttura

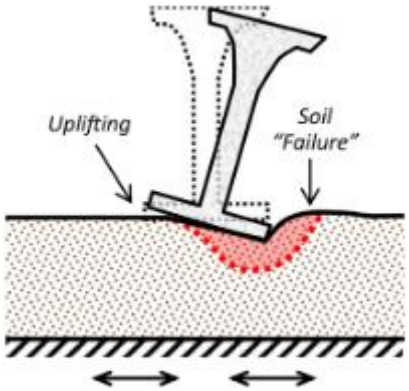
Nessun danno a terreno e fondazione

Approccio alternativo

Nessun danno alla struttura

Collasso per terreno e fondazione



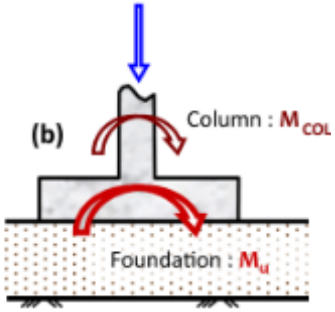


May, 10th 2018

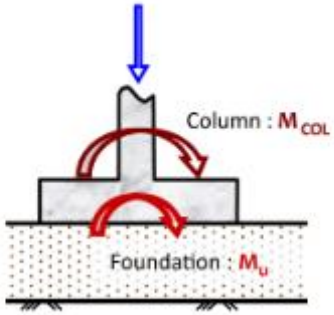
R.it | Scienze

La Torre di Pisa è sopravvissuta ai terremoti grazie alla sua pendenza

$M_{COL} < M_u$



$M_{COL} > M_u$



March, 10th 2018

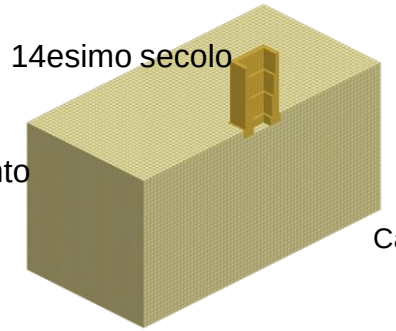
INDEPENDENT News

UN APPROFONDIMENTO SULLE TORRI

TOZZE H/B < 3

Altezza H e larghezza della base B

Masti successivi al 14esimo secolo
Fari
Tori colombaie
Torri di avvistamento



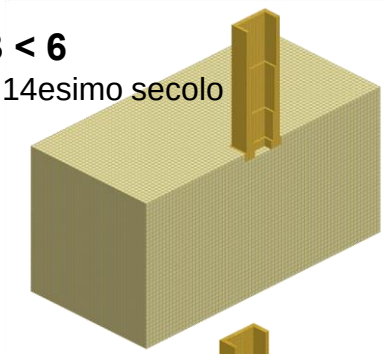
Casamatta Tower, 1550 (LE)
H/B=0.75

Capo Falcone Tower, 1577 (SS)
H/B=0.8

Poseidonia Tower, 600 a.C.(SA)
H/B= 1.5

TOZZE 3 ≤ H/B < 6

Masti precedenti al 14esimo secolo
Torri dell'orologio
Torri colombaie
Torri campanarie
Torri civiche



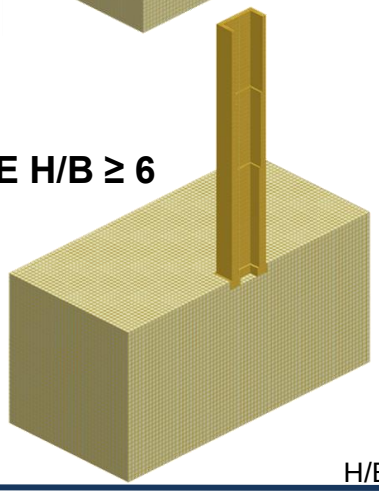
Elefante Tower, 1328 (CA)
H/B= 3

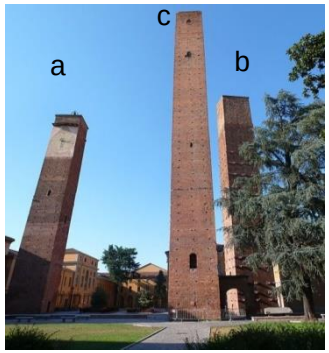
Clock Tower, 1600 (MO)
H/B= 4

Grossa Tower, 1300 S.Gim. (SI)
H/B= 5.4

MOLTO SNELLE H/B ≥ 6

Torri campanarie
Torri civiche



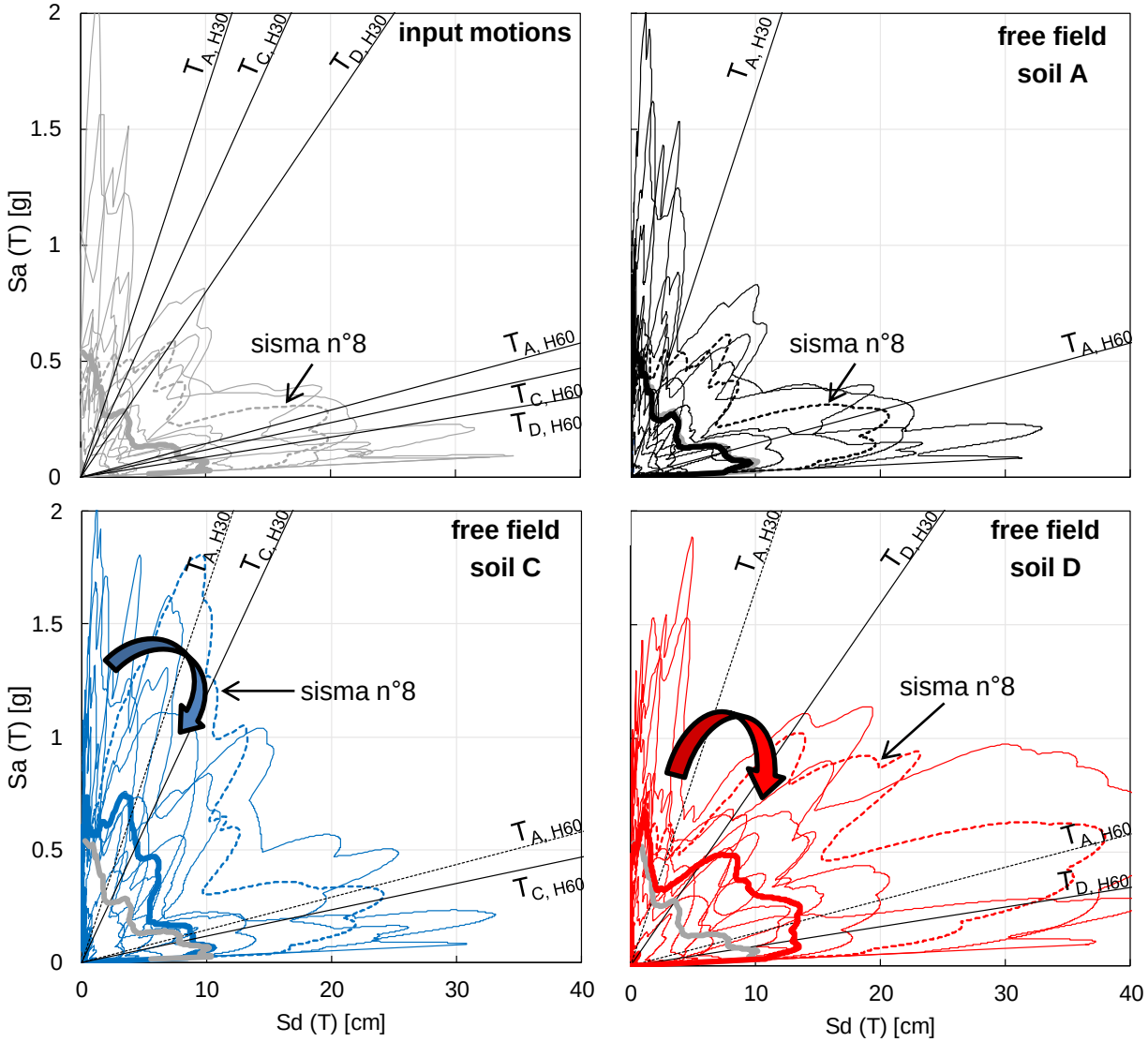


Three Towers, 1100 (PA)
H/B_a= 6.7, H/B_b= 6.7, H/B_c= 9.2

Garisenda & Asinelli, 1100 (BO)
H/B_a= 6.5, H/B_b= 11.9

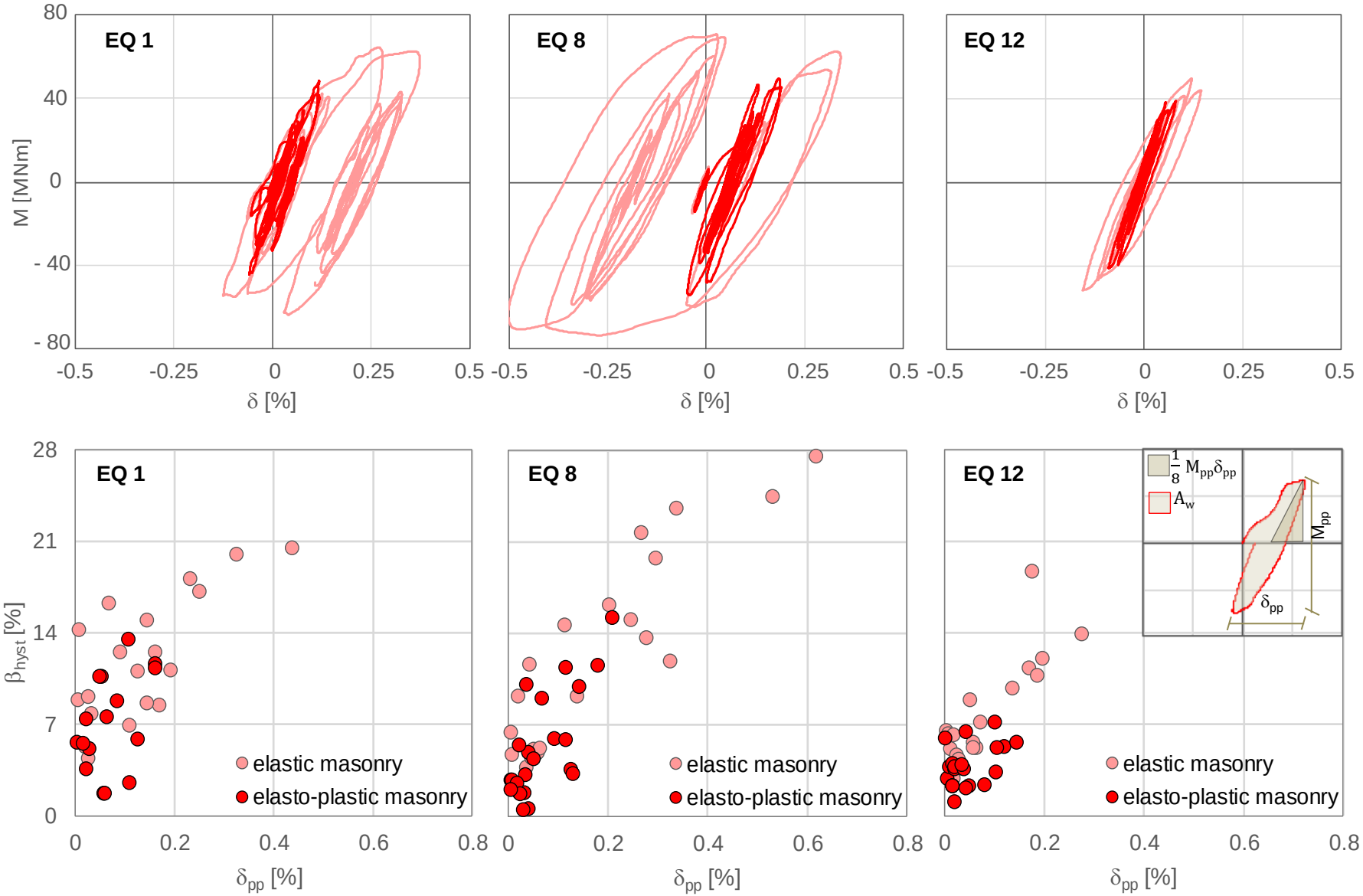
Carmine bell tower, 1456 (NA)
H/B= 6.8

COMBINAZIONE DI EFFETTI DI SITO E DI INTERAZIONE



- L'interazione riduce o accresce le accelerazioni spettrali in funzione del contenuto in frequenza dell'input e delle modifiche legate agli effetti di sito

SMORZAMENTO ISTERETICO DELLA FONDAZIONE



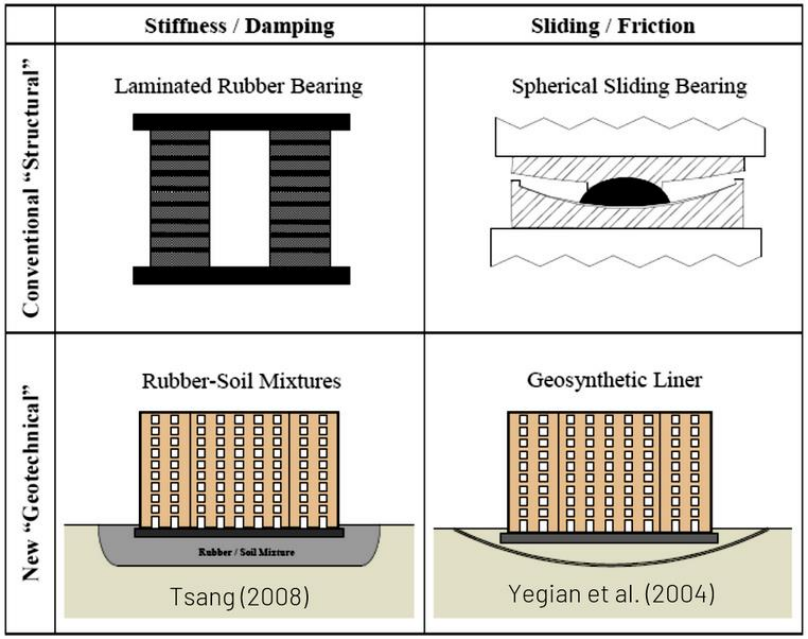
- Lo smorzamento isteretico in fondazione non è trascurabile

SOMMARIO DELLA PRESENTAZIONE

- Principi dell'Interazione Terreno-Fondazione-Struttura (SFSI)
- Uso dello smorzamento isteretico del terreno
- **Principi dell'Isolamento Sismico Geotecnico (GSI)**
- Esempi storici di GSI
- Nuove idee di GSI:
  - La tecnica della Disconnessione laterale
  - La tecnica delle Barriere soffici
  - La tecnica SMART-GAP
- Conclusioni

DEFINIZIONE STORICA DI TSANG (2009):

"A geotechnical seismic isolation system can be defined as a system that develops direct interaction with the natural terrain and / or artificially reinforced soils between the structure and its foundation (Tsang, 2009)"



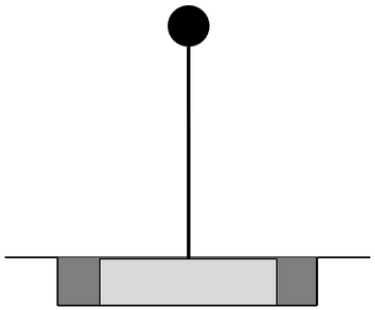
UNA POSSIBILE DEFINIZIONE NAPOLETANA

"A geotechnical seismic isolation technique can be defined as a system capable of generating a ***beneficial soil-structure interaction and/or a beneficial local seismic response*** *by artificially modifying the soil beneath or/and around the foundation"*

$$T^* = T_0\sqrt{1+\frac{k}{K_x}\left(1+\frac{K_x}{K_\theta}h^2\right)}$$

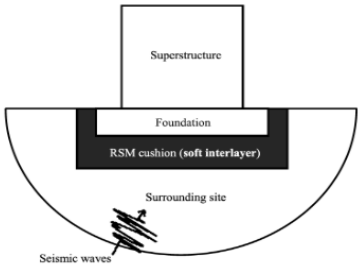
$$\xi^* = \left(\frac{T_0}{T^*}\right)^2\left\{\frac{T_0}{T^*}\xi_{str}+\frac{k_{str}a_0^*}{2K_x}\left[\left(c_x^*+\frac{2\xi_{hys}}{a_0^*}\right)+\frac{K_x h^2}{K_\theta}\left(c_\theta^*+\frac{2\xi_{hys}}{a_0^*}\right)\right]\right\}$$

I CATEGORIA

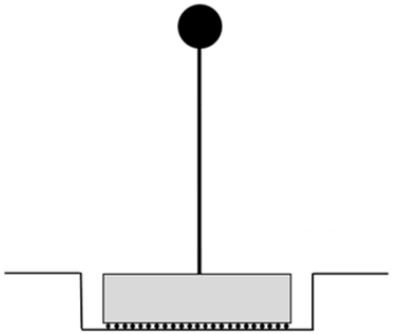


Facilitare SFSI

MISCELE TERRENO-GOMMA

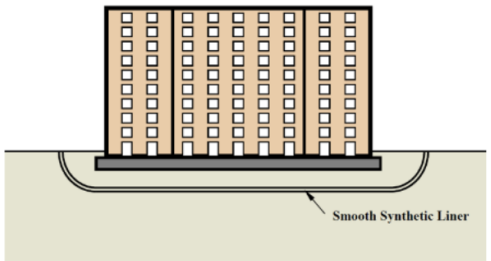


II CATEGORIA

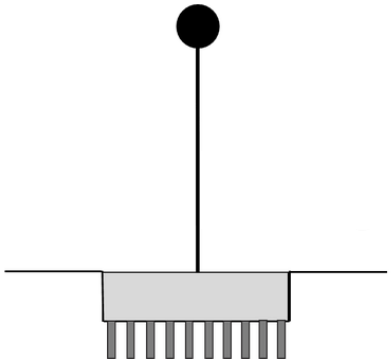


Facilitare lo scorrimento

SUPERFICI LISCE ARTIFICIALI

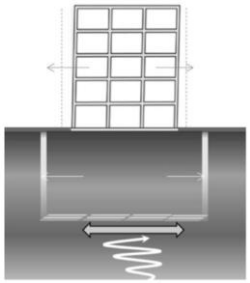


III CATEGORIA



Filtrare le azioni sismiche

CASSONE SOFFICE



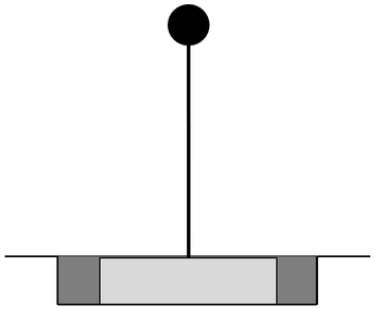
UNA POSSIBILE DEFINIZIONE NAPOLETANA

"A geotechnical seismic isolation technique can be defined as a system capable of generating a ***beneficial soil-structure interaction and/or a beneficial local seismic response*** *by artificially modifying the soil beneath or/and around the foundation"*

$$T^* = T_0 \sqrt{1 + \frac{k}{K_x}\left(1 + \frac{K_x}{K_\theta} h^2\right)}$$

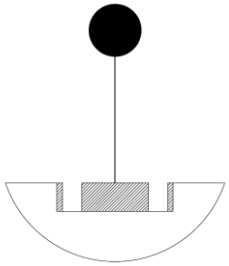
$$\xi^* = \left(\frac{T_0}{T^*}\right)^2 \left\{ \frac{T_0}{T^*}\xi_{str} + \frac{k_{str} a_0^*}{2K_x}\left[\left(c_x^* + \frac{2\xi_{hys}}{a_0^*}\right) + \frac{K_x h^2}{K_\theta}\left(c_\theta^* + \frac{2\xi_{hys}}{a_0^*}\right)\right]\right\}$$

I CATEGORIA

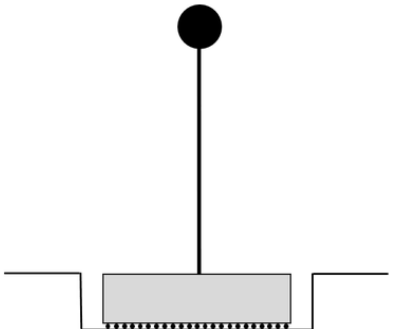


Facilitare il SFSI

DISCONNESSIONE LATERALE

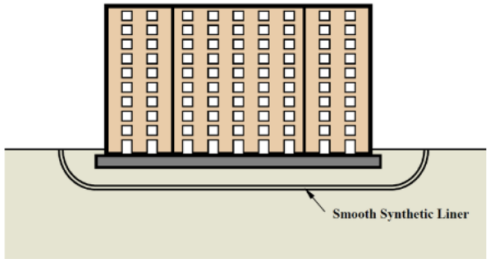


II CATEGORIA

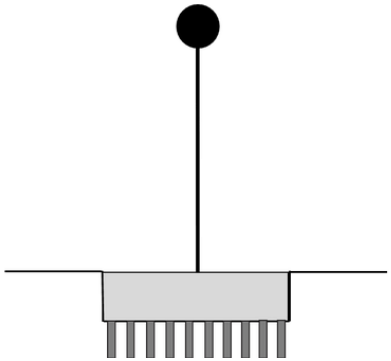


Facilitare lo scorrimento

SUPERFICI LISCE ARTIFICIALI

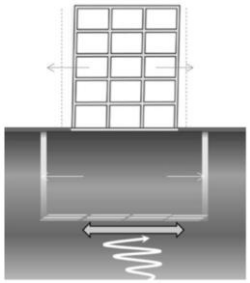


III CATEGORIA



Filtrare le azioni sismiche

CASSONE SOFFICE



SOMMARIO DELLA PRESENTAZIONE

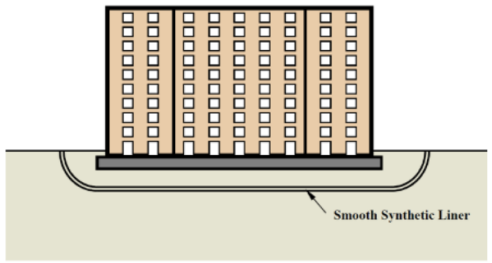
- Principi dell'Interazione Terreno-Fondazione-Struttura (SFSI)
- Uso dello smorzamento isteretico del terreno
- Principi dell'Isolamento Sismico Geotecnico (GSI)
- **Esempi storici di GSI**
- Nuove idee di GSI:
  - La tecnica della Disconnessione laterale
  - La tecnica delle Barriere soffici
  - La tecnica SMART-GAP
- Conclusioni

GLI ANTICHI CONOSCEVANO IL GSI?

- **Gli edifici n**ell'antica Creta (2000÷1200 a.C.) **sono fondati su uno strato di sabbia e ghiaia sciolta**, che oltre a servire per il livellamento delle irregolarità del terreno, **costituiscono un filtro per le azioni sismiche;**

- Secondo l'archeologo statunitense Carl Blegen, nella costruzione delle grandi Mura di Troia (1500 a.C.), sotto le fondazioni del grande muro fu deliberatamente lasciato uno **strato di terra compatta (hard-packed) tra il piano di fondazione e la roccia di base**. Evidenziando la somiglianza con la tecnica utilizzata, oltre mille anni più tardi (III sec. a.C.), nel tempio di Atena, a Ilion **le cui fondazioni poggiano su di uno spesso strato di sabbia, come pure I templi dorici di Paestum (273 a.C.).;**

- Nell'antica Grecia e nella Persia era diffusa **la tecnica di interporre tra il terreno e le fondazioni dei templi, alcuni strati** [illegible] **ruzione rispetto al terreno in caso di terremoto**. In alc[illegible] **ndazioni alla base delle quali mettevano strati di cera**[illegible] strato d'argilla dall'umidità e dalla disidratazione, ma[illegible] plastiche. L'elevata plasticità dell'argilla smorzava la vi[illegible]. Una ulteriore tecnica diffusa in Grecia e Persia preved[illegible] atura di un giunto orizzontale a base di malta magra di [illegible] a supera certi valori, la malta magra viene distrutta e [illegible]



SUPERFICI LISCE ARTIFICIALI

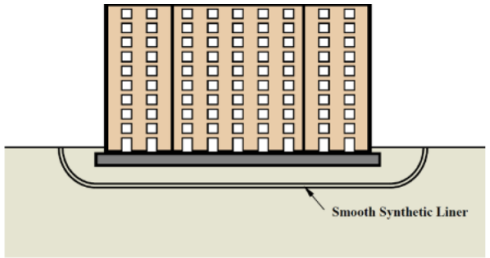
- Buoni risultati si riscontrano anche quando **la fondazione è composta da diversi strati di pietra levigata, senza alcuna malta o materiale legante**, come nella tomba di Ciro il Grande a Pasargadae, sud est dell'Iran, costruita nel 550 a.C.

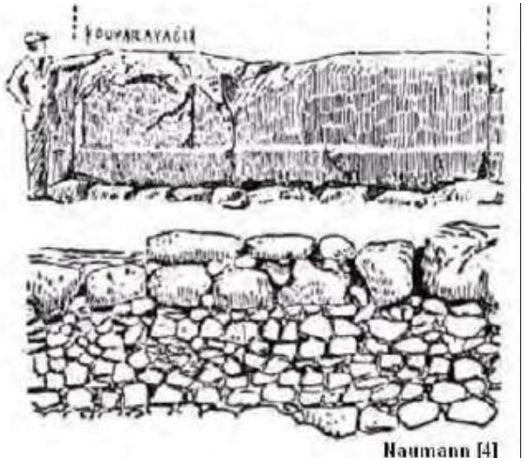
GLI ANTICHI CONOSCEVANO IL GSI?

IL TEMPIO DI ARTEMIDE AD EFESO (VI SEC. AC)

"Una realizzazione della grandiosità greca degna di autentica meraviglia è il tempio di Diana che ancora esiste a Efeso, la cui costruzione impegnò tutta l'Asia per 120 anni. ***Lo eressero in una zona palustre, perché non dovesse subire terremoti o temere spaccature del suolo****."*
(Plini

SUPERFICI LISCE ARTIFICIALI





Tecnica Persiana: **Orthostat stone layer**

Un primo strato di pietre piatte di piccole dimensioni, poi alcuni strati con pietre di più grandi dimensioni che diventano la fondazione. Le pietre sono accostate a secco, senza alcuna malta o materiale legante, il meccanismo è tale che in realtà non si verifica scorrimento; o più esattamente vi è un piccolo scorrimento ed il ritorno alla loro posizione originale, dopo il terremoto.

GLI ANTICHI CONOSCEVANO IL GSI?

IMPERIAL HOTEL(TOKYO)

A seguito della scossa di magnitudo 7.9 del 1 settembre 1923 (terremoto del Kanto, 140000 vittime), il barone Kihachiro Okura scriveva a Frank Loyd Wright :

L'hotel non è danneggiato come monumento al tuo genio. Migliaia di senzatetto sono perfettamente assistiti al suo interno. Congratulazioni. Okura.

Tutti gli edifici in acciaio sono stati fatali e questo basta per dimostrare quanto i nostri architetti sono stati sciocchi. Che gloria è vedere l'Imperiale dritto tra le ceneri di una città intera. Gloria a te. Cordialmente Arata Endo. Okura.

Il 26 settembre Frank Loyd Wright scrive al collega Luis Sullivan:

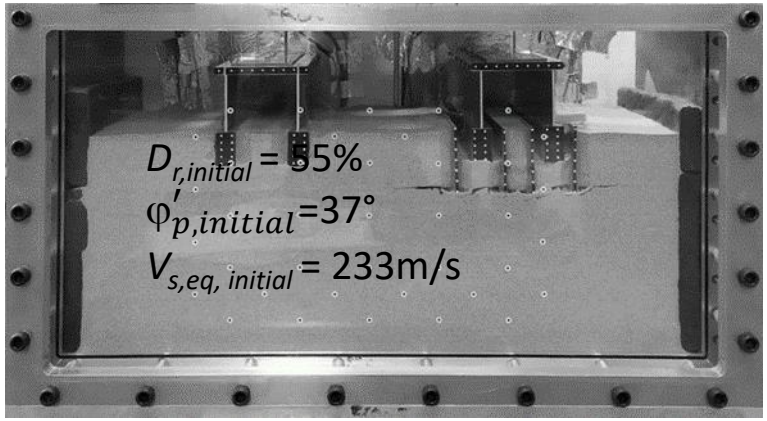
Quello che ha salvato l'Imperial è stato il principio di flessibilità, fondazioni flessibili…ed una esagerazione di tutti i membri verticali di supporto, tenendo il baricentro il più basso possibile

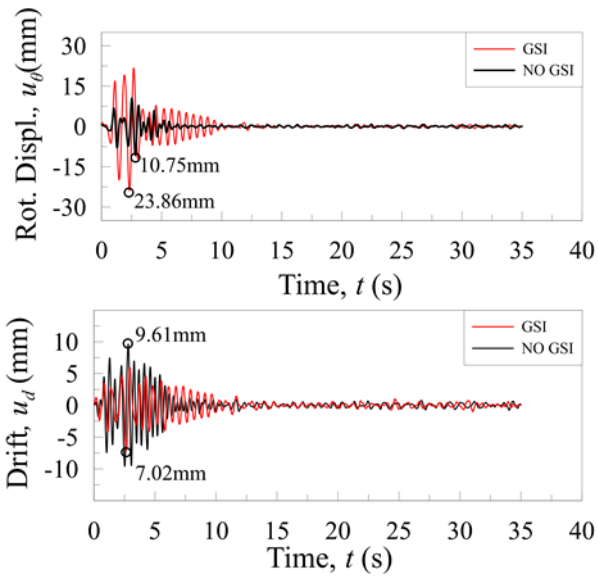
SOMMARIO DELLA PRESENTAZIONE

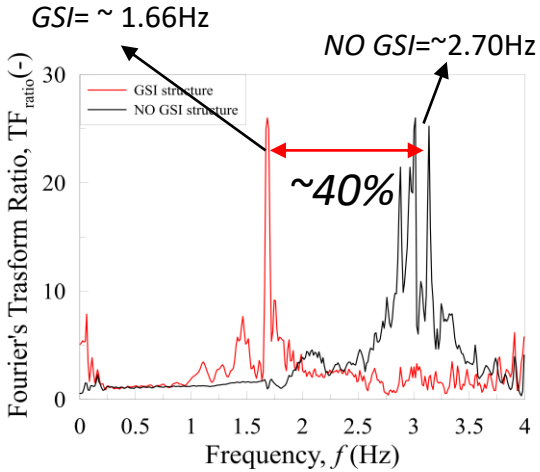
- Principi dell'Interazione Terreno-Fondazione-Struttura (SFSI)
- Uso dello smorzamento isteretico del terreno
- Principi dell'Isolamento Sismico Geotecnico (GSI)
- Esempi storici di GSI
- **Nuove idee di GSI:**
  - **La tecnica della Disconnessione laterale**
  - **La tecnica delle Barriere soffici**
  - **La tecnica SMART-GAP**
- Conclusioni

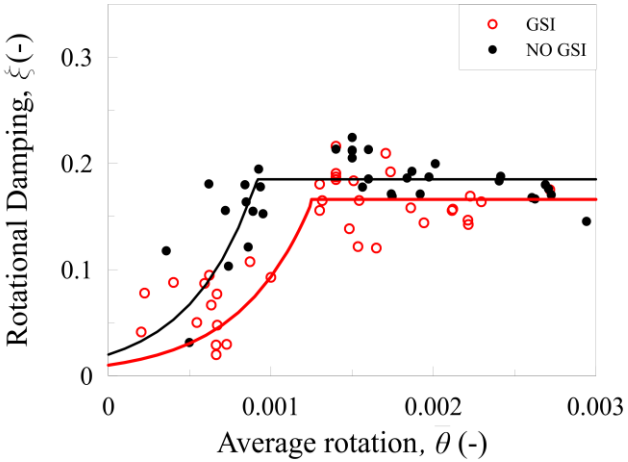
NUOVE IDEE DI GSI: LA TECNICA DELLA DISCONNESSIONE LATERALE

NO GSI ***GSI***



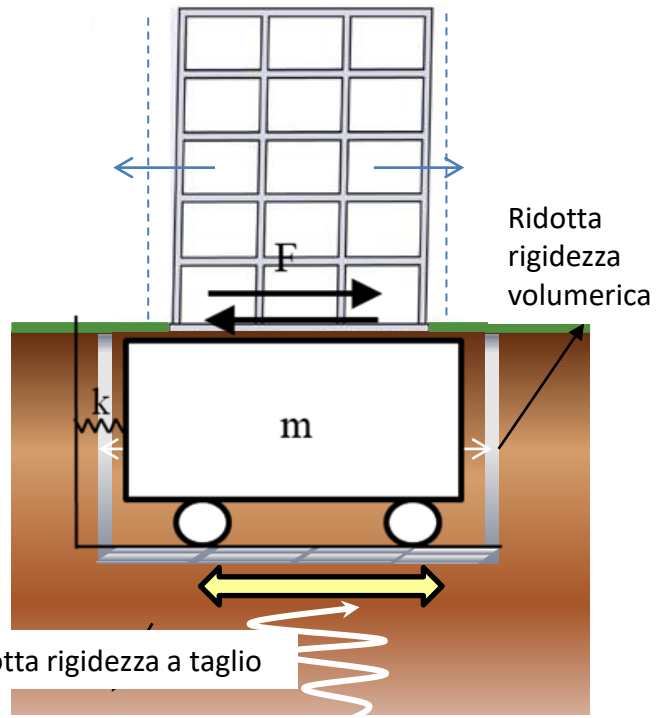






- La frequenza fondamentale si riduce
- La rotazione in fondazione aumenta, ma lo spostamento flessionale della struttura si riduce
- Lo smorzamento complessivo si riduce soprattutto alle rotazioni medio-basse

NUOVE IDEE DI GSI: LA TECNICA DELLE BARRIERE SOFFICI



- ❖ Riduzione della rigidezza laterale;
- ❖ Incremento di massa e smorzamento;
- ❖ Incremento del periodo naturale del sistema;

Materiale utilizzato caratterizzato da bassa rigidezza e resistenza a taglio

SUPER ABSORBING POLYMER (SAP):

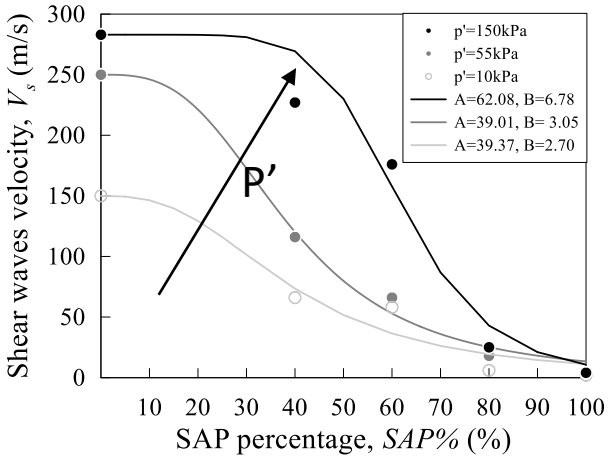
Rigonfiamento

Stato secco:

- In polvere
- Distribuzione granulometrica modificabile

Stato idratato:

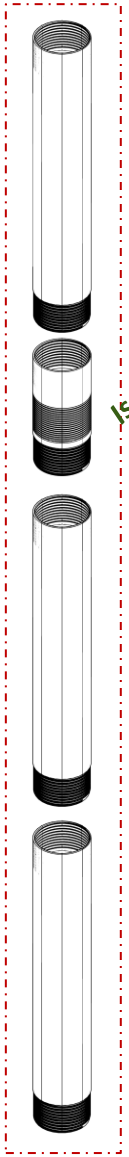
- In gel
- Densità ≅ a quella dell'acqua

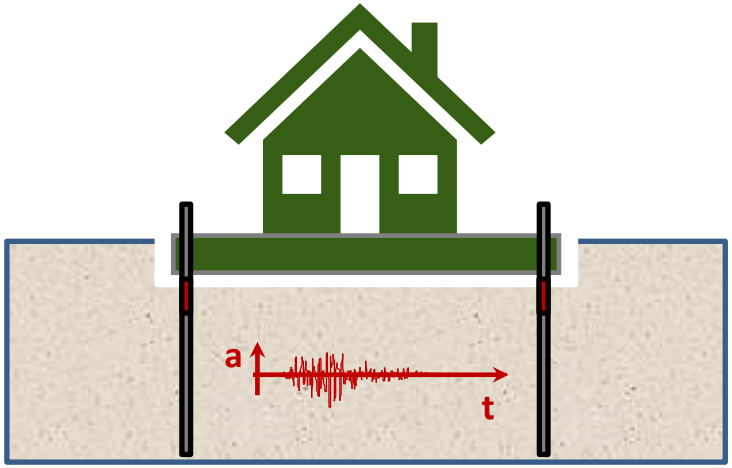


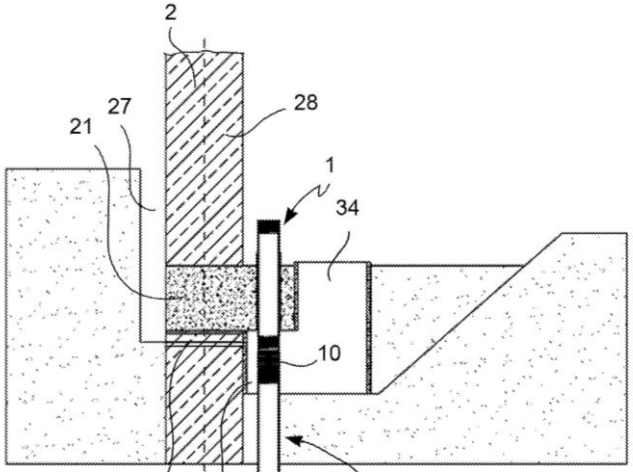
❖ $V_s = V_{s,0} * \frac{1}{1+\left(\frac{SAP\%}{A}\right)^B}$

❖ A, B funzione di p'

NUOVE IDEE DI GSI: LA TECNICA SMART-GAP







ATTESTATO DI BREVETTO PER INVENZIONE INDUSTRIALE N.102020000016588

*Il dispositivo è composto da segmenti di micropali filettati alle due estremità. Il dispositivo «**isolatore**» viene interposto tra gli ultimi due segmenti, garantendo una **sconnessione** tra sottostruttura e sovrastruttura.*

*La solidarizzazione tra la nuova fondazione (sottofondazione) e la sovrastruttura può avvenire mediante realizzazione di un cordolo rigido in c.a. gettato in opera. Quest'ultimo garantisce il **totale trasferimento dei carichi statici gravitazionali** alla sottofondazione.*

*La struttura viene così **sottofondata** con l'utilizzo di una **fondazione profonda su micropali**, sconnettendo la struttura dal terreno. Gli isolatori, generalmente elastomerici, inglobati tra i micropali garantiscono **l'isolamento sismico.***

Reference:

Fasano, G., Astuto, G., Bilotta, E., Flora, A., 2022. Innovative seismic isolation system for new and existing structures. 3rd European Conference on Earthquake Engineering & Seismology Bucharest, Romania.

www.smart-g.eu

CONCLUSIONI

1) L'interazione dinamica terreno-fondazione-struttura (SFSI) va portata in conto nella valutazione del rischio sismico dei monumenti perché conduce ad un modello di risposta più realistico

2) Il solo effetto dell'SFSI può contribuire a ridurre le azioni sismiche sul monumento e aumentarne la capacità dissipativa

3) L'isolamento sismico geotecnico (GSI) può aumentare gli effetti al punto 2) come era noto ai costruttori degli edifici del passato in cui il GSI era stato utilizzato efficacemente

4) Oggi esistono tecniche avanzate di GSI che possono essere applicate efficacemente ai monumenti preservandone l'integrità. La più adatta va scelta in funzione delle caratteristiche geometriche e meccaniche di edificio, fondazioni e sottosuolo.

Grazie per l'attenzione!