



Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale

Convegno ReLUIS



Progetto DPC_ReLUIS 2022-2024
Esposizione delle attività svolte e prospettive

Roma, 7 novembre 2023

WP 16: Contributi normativi – Geotecnica

Stefano Aversa



ORGANIZZAZIONE DEL WP

- **Task 16.1 – Risposta Sismica Locale e Liquefazione**
coordinato da Sebastiano FOTI del Politecnico di Torino
- **Task 16.2 – Stabilità dei pendii**
coordinato da Sebastiano RAMPELLO di «Sapienza» Università di Roma
- **Task 16.3 - Interazione terreno-fondazione-struttura**
coordinato da Francesco SILVESTRI dell'Università di Napoli Federico II

Referente DPC: Giuseppe NASO

OBIETTIVI COMPLESSIVI DEL TASK 16.1

- **Ridefinizione dei coefficienti di amplificazione stratigrafica (in particolare, per effetti di non linearità di risposta dei terreni - sismi medio-elevati)**
- Formulazione di procedure per valutazione dell'aggravio atteso per effetti di bordo valle e per la combinazione di amplificazione stratigrafica e topografica
- **Costruzione di un database integrato di prove cicliche di laboratorio, integrando e omogeneizzando i dati raccolti nelle precedenti annualità**
- Miglioramento dei modelli empirici per la previsione della resistenza ciclica dei terreni per le verifiche di innesco della liquefazione
- **Valutazione del danno potenziale agli edifici indotto dagli spostamenti attraverso indicatori sintetici che tengano in conto la tipologia strutturale e le caratteristiche dell'edificio**

PRODOTTI ATTESI DEL TASK 16.1

Amplificazione stratigrafica	Rivalutazione dei coefficienti di amplificazione stratigrafica, con specifica attenzione agli effetti di non linearità di risposta dei terreni soprattutto in condizioni di sismicità medio elevata
Fattori di amplificazione	Indicazioni pre-normative relative alla valutazione semplificata della risposta sismica locale anche con riferimento alle condizioni bidimensionale di bordo valle
Procedure per le verifiche di innesco della liquefazione	Approcci empirici di valutazione della resistenza ciclica alla liquefazione
Procedure per la verifica delle conseguenze della liquefazione	Procedure di valutazione del danno atteso ed associati limiti di accettabilità per diverse tipologie strutturali
Database di prove cicliche di laboratorio	Database integrato ed omogeneizzato dei risultati di prove cicliche di laboratorio
Curve di variazione del modulo e dello smorzamento	Proposta di relazioni empiriche per la stima degli effetti di non linearità di risposta dei terreni

OBIETTIVI COMPLESSIVI DEL TASK 16.2

- **Relazioni semi-empiriche per valutazione spostamenti attesi in funzione di parametri sintetici del moto sismico (per eventi sismici italiani e caratteristiche di resistenza dei pendii/versanti)**
- Ridefinizione dei coefficienti sismici da utilizzare con metodi pseudostatici: per meccanismi di scorrimento, in funzione di valori limite di spostamento; per meccanismi di ribaltamento
- **Valutazione della prestazione sismica dei pendii mediante approcci probabilistici**
- Definizione, in relazione alla fase di propagazione, di strategie facilmente implementabili per stimare evoluzione della velocità del fronte e della massima distanza percorsa dalla massa in frana

PRODOTTI ATTESI DEL TASK 16.2

Analisi pseudostatica dei pendii	Diagrammi e tabelle per valutare coefficiente sismico per metodi pseudostatico (funzione di prestazione sismica attesa per pendio)
Analisi pseudostatica di versanti rocciosi – meccanismi di ribaltamento	Diagrammi per definizione coefficienti sismici per analisi pseudostatiche equivalenti
Valutazione speditiva del coefficiente sismico critico di un pendio	Diagrammi per la valutazione speditiva della resistenza sismica di un pendio/versante in funzione di geometria e caratteristiche di resistenza (con eventuale decadimento)
Curve di pericolosità in termini di spostamenti sismo-indotti	Curve di pericolosità di specifici siti che forniscano la frequenza media annuale di superamento in funzione degli spostamenti permanenti indotti dal sisma per fissati valori della resistenza sismica di un pendio
Pericolosità sismica in funzione di valori limite di spostamento	Mappe di pericolosità per studi estesi su base regionale
Valutazione del run-out e della velocità del fronte di colate rapide	Definizione di soluzioni semplificate

OBIETTIVI COMPLESSIVI DEL TASK 16.3

Definizione in maniera più stringente indicazioni pre-normative per:

- **fondazioni dirette di edifici in muratura (ruolo di profondità di interramento e di rigidità a volte confrontabile con quella del terreno circostante)**
- **pozzi di fondazione dei viadotti stradali e ferroviari, classificabili come fondazioni intermedie, soggette a meccanismi di interazione sia cinematica sia inerziale**
- **comportamento d'insieme di sistemi di fondazioni distribuite lungo edifici e viadotti (effetti di mutua interazione e di azione di collegamento sviluppata dalla struttura in elevazione; effetto combinato delle variazioni morfologico-stratigrafiche e del non-sincronismo dell'azione sismica)**

PRODOTTI ATTESI DEL TASK 16.3

Effetti dell'interazione tra fondazioni superficiali	Diagrammi, tabelle e espressioni analitiche dei fattori d'interazione fondazione-terreno-fondazione nell'ambito del sistema di fondazioni di uno stesso edificio
Effetti di gruppo in sistemi di fondazioni superficiali di edifici in muratura	Diagrammi, tabelle e espressioni analitiche per il calcolo di funzioni di impedenza del sistema di fondazioni di uno stesso edificio
Analisi di fondazioni a pozzo/cassone di pile da ponte	Diagrammi, tabelle e espressioni analitiche per il calcolo di funzioni di fragilità tipiche dei sistemi pozzo-pila-impalcato
Effetti di gruppo in sistemi di fondazioni di viadotti	Diagrammi, tabelle e espressioni analitiche per tener conto dell'asincronismo dell'azione sismica lungo un viadotto

PRODOTTO FINALE DEL WP 16

Nuova versione delle parti:

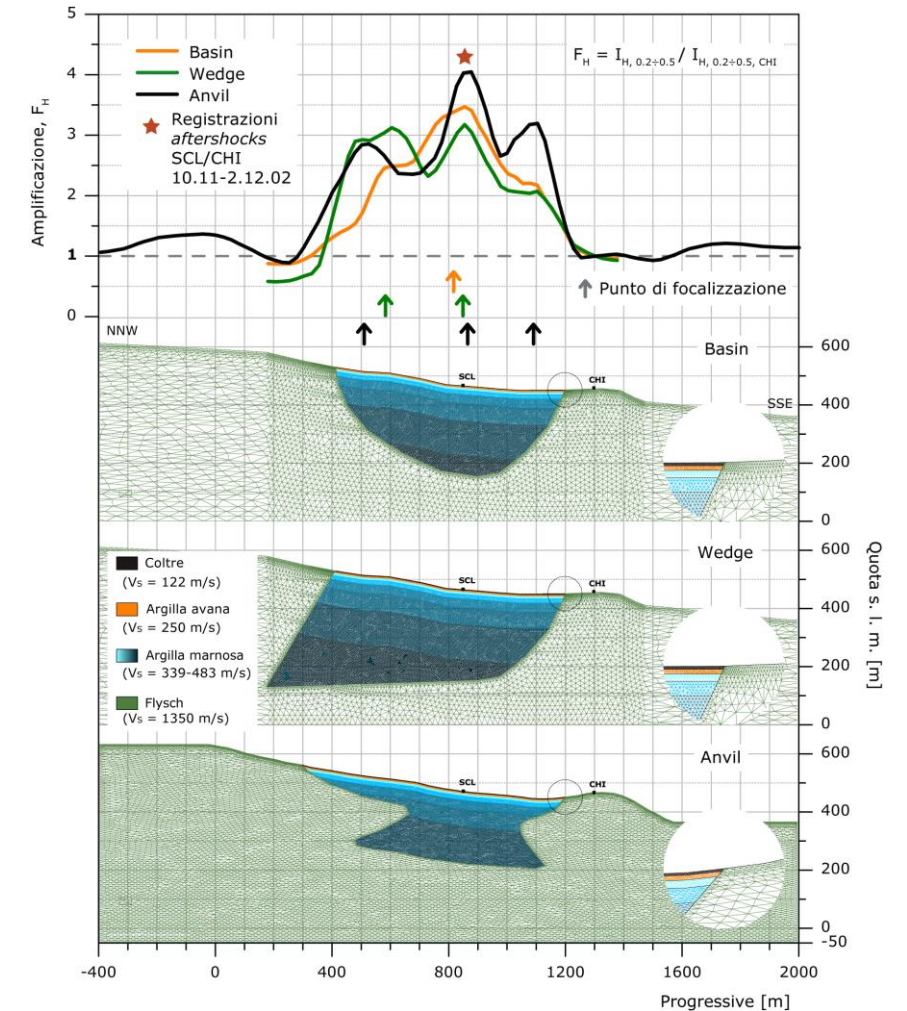
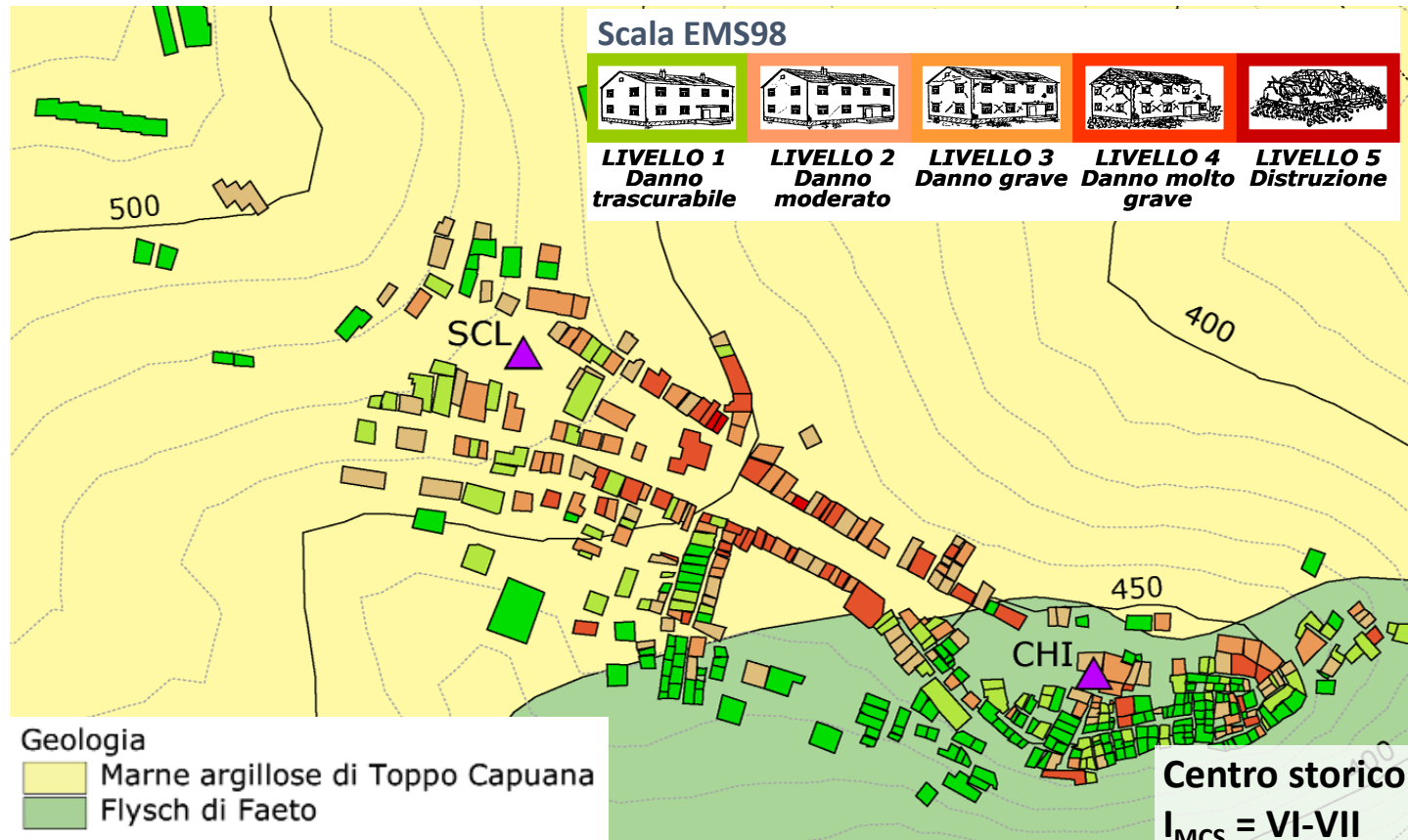
- **RSL**
- **Liquefazione**
- **Stabilità dei Pendii**
- **Fondazioni**

delle Lineeguida AGI di Ingegneria Geotecnica Sismica

VENTENNALE ReLUIs

- **31/10/2002:** Tragico terremoto di San Giuliano di Puglia
- **OPCM n. 3274 del 20 marzo 2003** - Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica
- **17/04/2003:** nasce ReLUIs
- **E la Geotecnica?**

DANNI E CONDIZIONI DI SOTTOSUOLO A SAN GIULIANO DI PUGLIA



Puglia R., Vona M., Klin P., Ladina C., Masi A., Priolo E., Silvestri F. (2013).

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA E QUESTIONI SISMICHE

- **Iniziativa DPC con OPCM spiazzò Geotecnica**
- **Combinato di Allegato 1 e Allegato 4 di OPCM molto critico**
- **Linee Guida AGI di Ingegneria Geotecnica Sismica**
- **Ritiro dell'Allegato 4 dell'OPCM**
- **Incarico all'AGI di nuovo Allegato 4 di OPCM da parte di DPC**
- **Coinvolgimento di AGI in progetto ReLUIS**

LINEE GUIDA INGEGNERIA GEOTECNICA SISMICA



- **Iniziativa lungimirante del Presidente AGI (Alberto Burghignoli)**
- **Coordinamento Stefano Aversa**
- **Raccolta sistematica e ben organizzata (Silvestri e Simonelli) di esperienza internazionale**
- **Esperienza italiana soprattutto in:**
 - **Sperimentazione laboratorio e sito**
 - **Risposta sismica locale**
 - **Applicazione metodo di Newmark**
- **Poca esperienza italiana in Interazione terreno-struttura**

LINEE GUIDA INGEGNERIA GEOTECNICA SISMICA

Associazione Geotecnica Italiana

ASPETTI GEOTECNICI
DELLA PROGETTAZIONE
IN ZONA SISMICA
Linee Guida

VERSIONE DEFINITIVA

2024

Dopo tanti anni

Grazie anche all'intensa attività di ricerca in ambito ReLUIS:

- **Incrementata esperienza italiana nei settori già praticati**
- **Incrementata notevolmente esperienza italiana su Interazione terreno-struttura**
- **Incrementato notevolmente dialogo Strutturisti-Geotecnici**

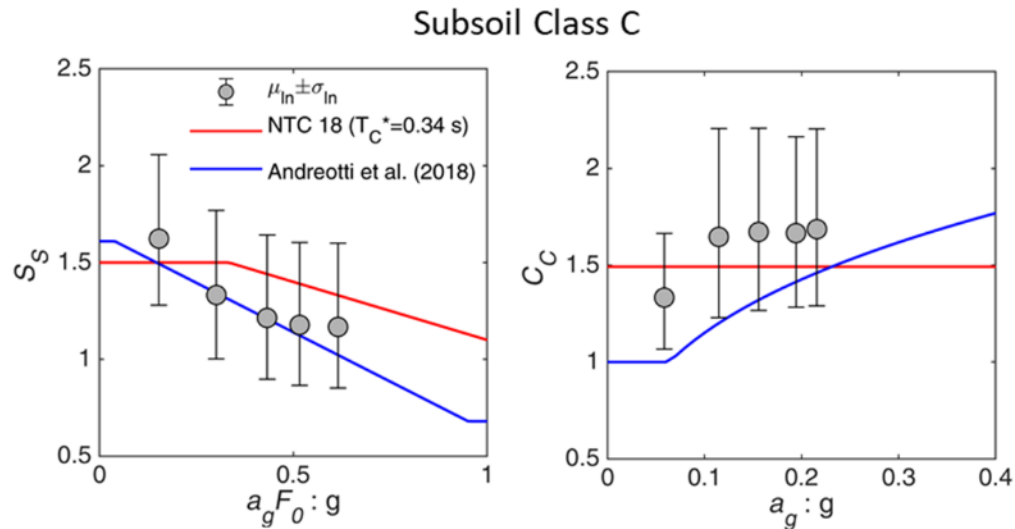
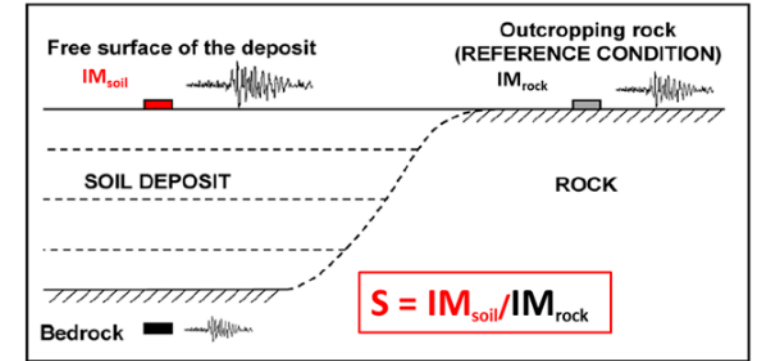
SELEZIONE DI PRODOTTI PRENORMATIVI E PER LINEEGUIDA

- **Task 16.1 – Risposta Sismica Locale e Liquefazione**
coordinato da Sebastiano FOTI del Politecnico di Torino
- **Task 16.2 – Stabilità dei pendii**
coordinato da Sebastiano RAMPELLO di «Sapienza» Università di Roma
- **Task 16.3 - Interazione terreno-fondazione-struttura**
coordinato da Francesco SILVESTRI dell'Università di Napoli Federico II

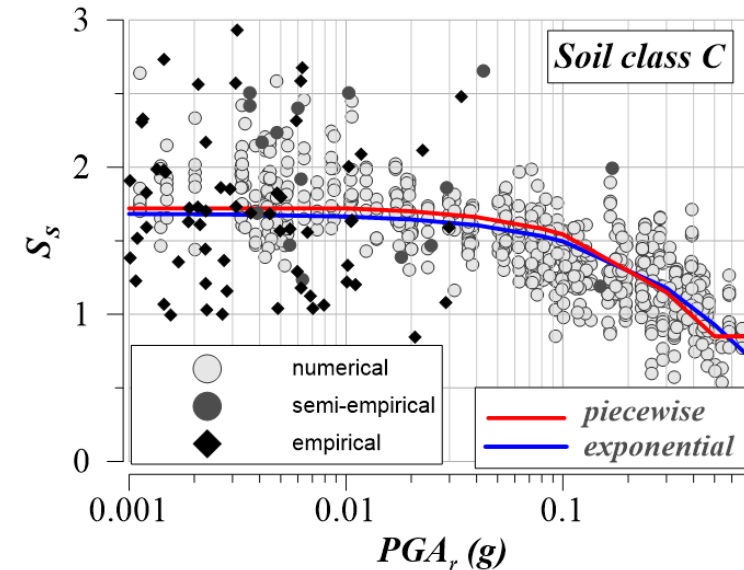
Risposta Sismica Locale

Revisione dei metodi semplificati di normativa basati sulle categorie di sottosuolo:

- Analisi di registrazioni Strong Motion da Database internazionali (ESM & Kicknet)
- Metodi stocastici con popolazione di analisi numeriche 1D



Nuove proposte per NTC e confronto con i risultati delle analisi numeriche su una popolazione generata con il metodo Montecarlo

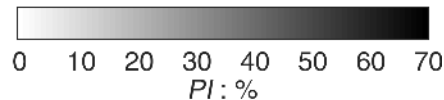
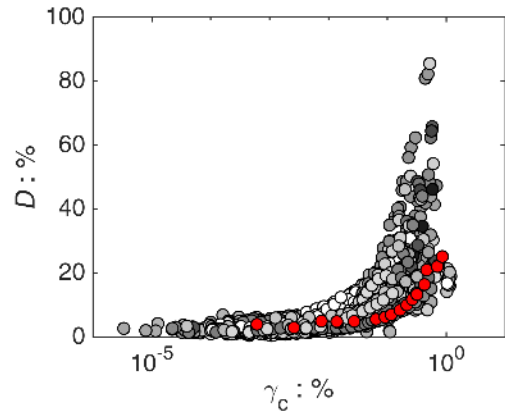
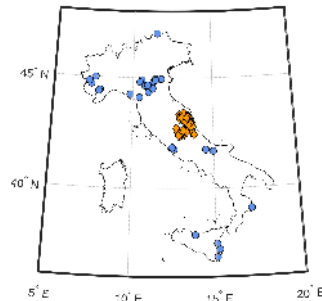
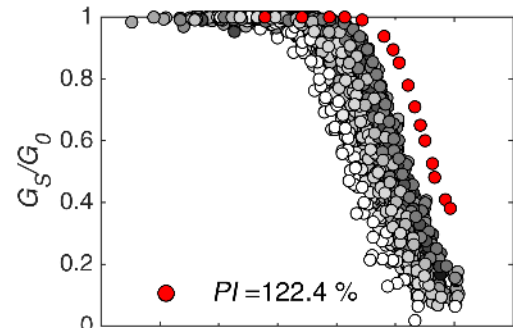


Integrazione di dati sperimentali (flatfile rete kicknet) e simulazioni numeriche

Risposta Sismica Locale

Database di curve di riduzione del modulo di taglio e variazione del rapporto di smorzamento

Formulazione di nuovi approcci empirici relativi a terreni italiani



$$G/G_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma_c}{\gamma_r}\right)^a}$$

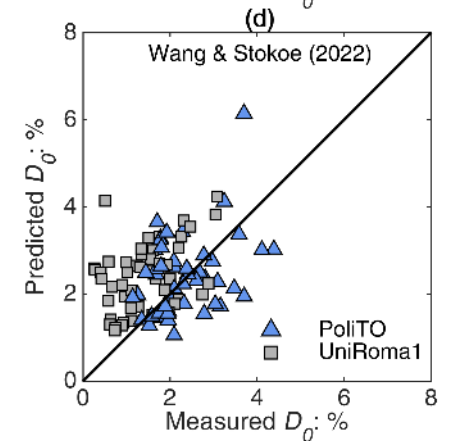
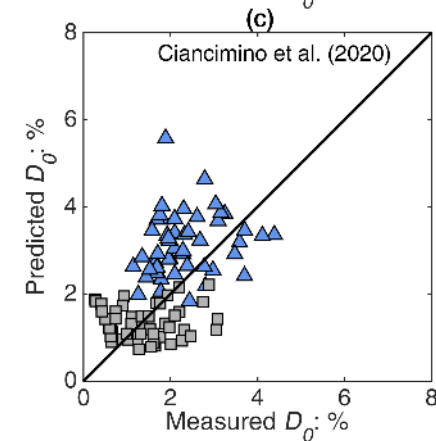
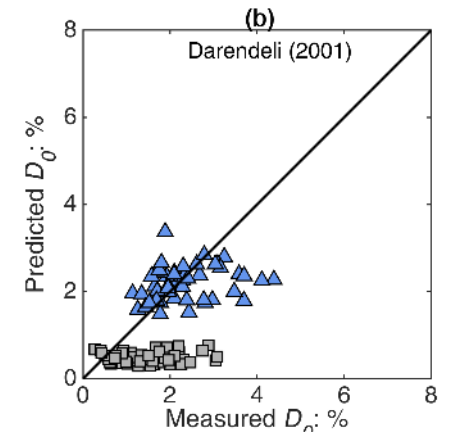
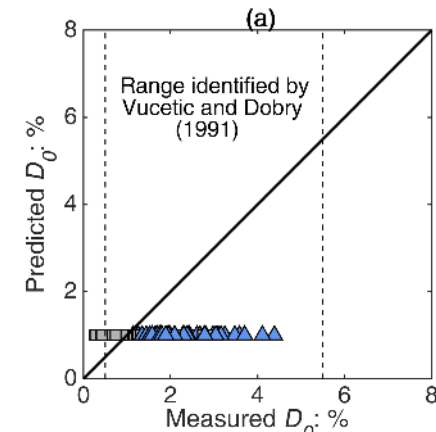
$$\gamma_r = (\varphi_6 + \varphi_7 \cdot PI) \cdot \sigma'_m{}^{\varphi_8}$$

$$D_0 = (\varphi_1 + \varphi_2 \cdot PI) \cdot \sigma'_m{}^{\varphi_3} \cdot [1 + \varphi_4 \cdot \ln(f)]$$

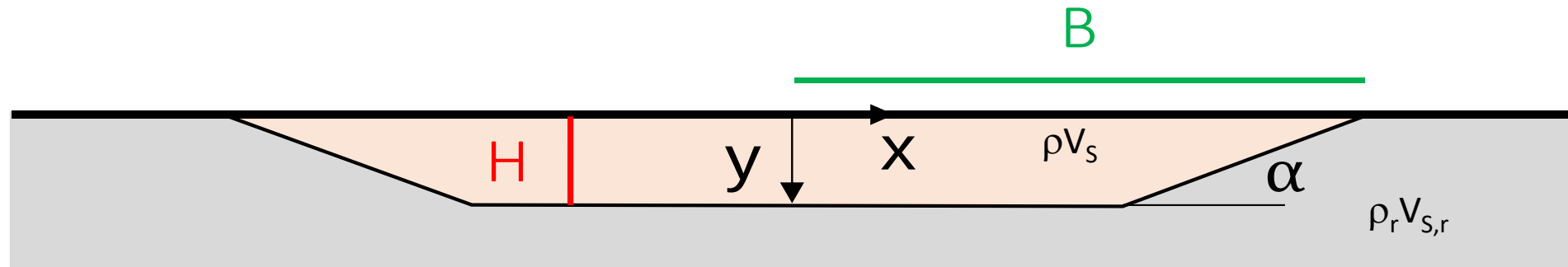
$$D = \varphi_9 \cdot (G/G_0)^{0.1} \cdot D_{masing} + D_0$$

Ciancimino et al. (2020)

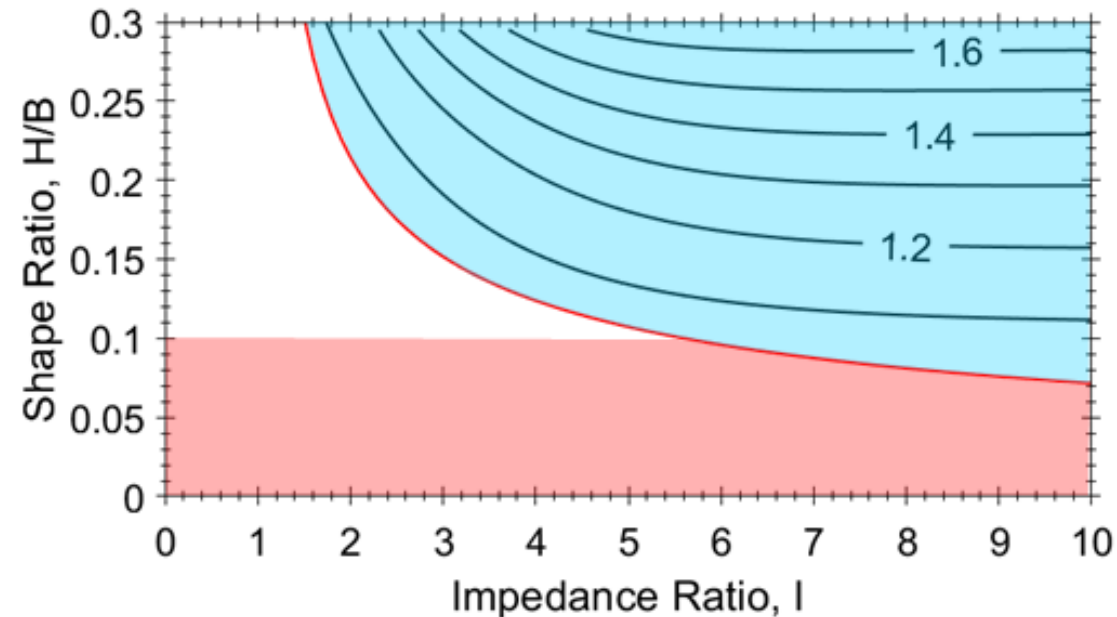
Verifica degli approcci empirici di letteratura



CONFRONTO TRA D_0 MISURATI E PREVISTI



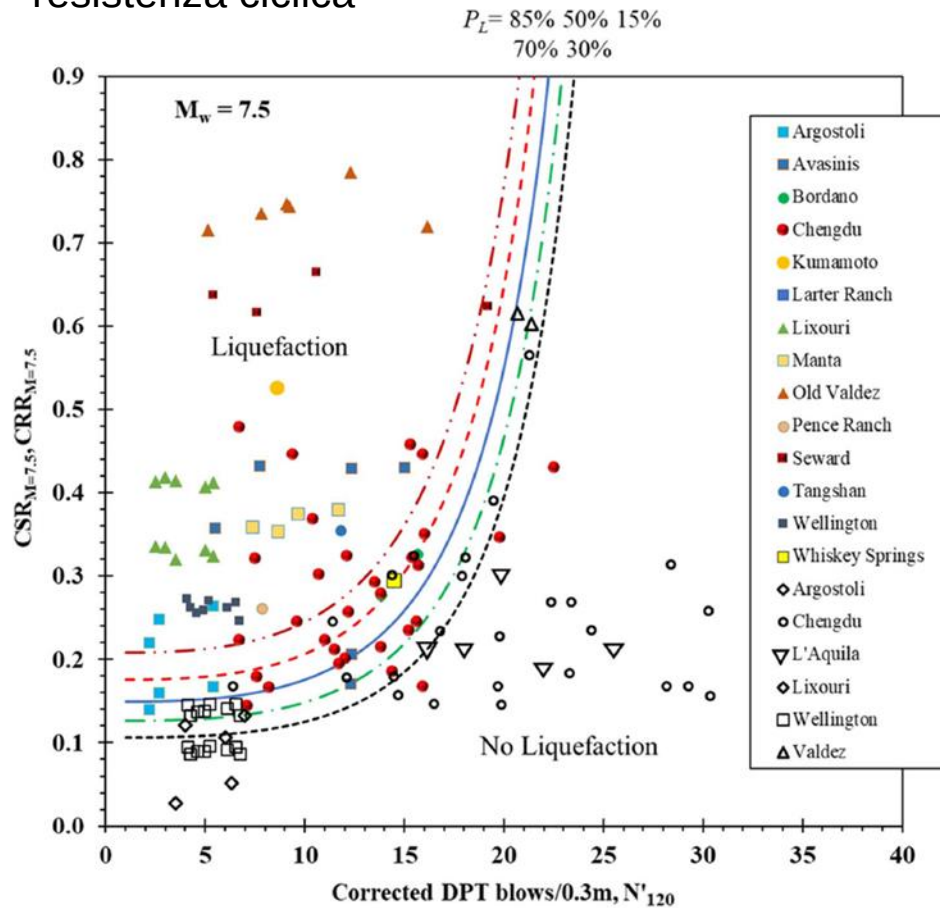
Definizione di un fattore di amplificazione per effetti di di valle in base a studi parametrici



Liquefazione

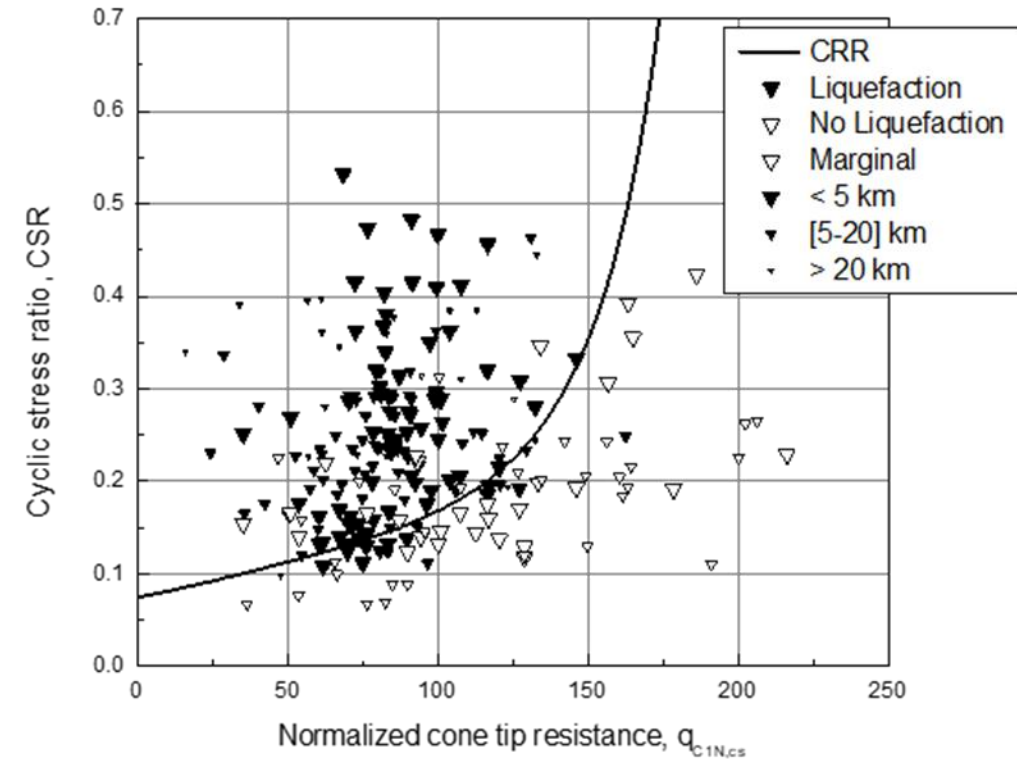
Nuovi approcci per la verifica semplificata con metodi empirici

- Terreni ghiaiosi (correlazioni empiriche con DPT e Vs):
proposta di un nuovo abaco per la valutazione del rapporto di resistenza ciclica



$$FSL = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

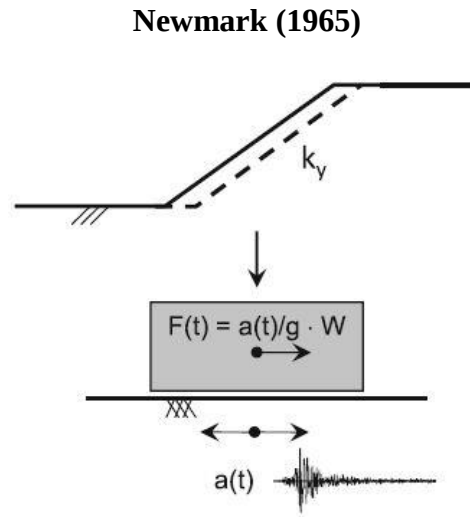
- Nuove procedure per la correzione in funzione della Magnitudo: consentono di tenere in conto in modo esplicito il numero di cicli attesi



$$MSF = \left(\frac{10.2}{N} \right)^{0.005365 \left(50 \left((N_1)_{60cs} \right)^2 + 3969 \right)^{0.394}}$$

SELEZIONE DI PRODOTTI PRENORMATIVI E PER LINEEGUIDA

- **Task 16.1 – Risposta Sismica Locale e Liquefazione**
coordinato da Sebastiano FOTI del Politecnico di Torino
- **Task 16.2 – Stabilità dei pendii**
coordinato da Sebastiano RAMPELLO di «Sapienza» Università di Roma
- **Task 16.3 - Interazione terreno-fondazione-struttura**
coordinato da Francesco SILVESTRI dell'Università di Napoli Federico II



$$\ln(d) = a_0 + a_1 \ln\left(1 - \frac{k_y}{PGA}\right) + a_2 \ln\left(\frac{k_y}{PGA}\right) + a_3 \left[\ln\left(\frac{k_y}{PGA}\right)\right]^2 + a_4 \ln(PGA)$$

Approccio scalare

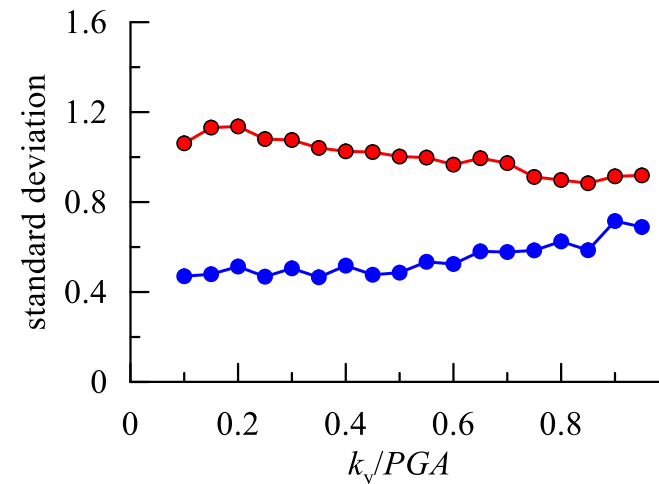
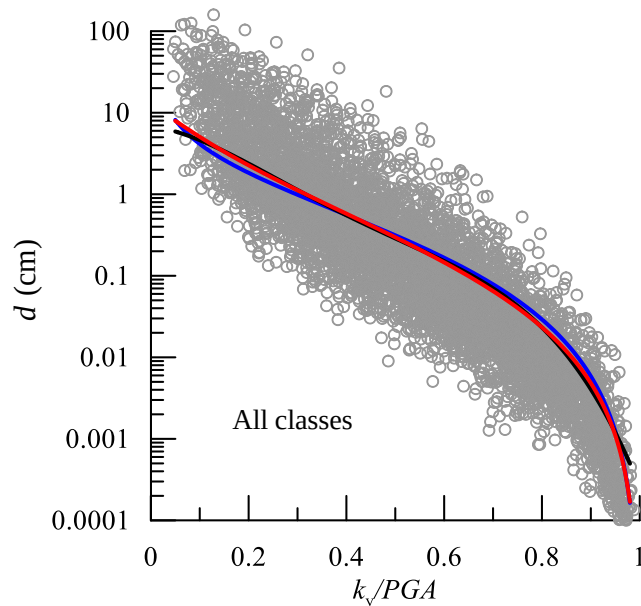
$$\ln(d) = a_0 + a_1 \ln\left(1 - \frac{k_y}{PGA}\right) + a_2 \ln\left(\frac{k_y}{PGA}\right) + a_3 \left[\ln\left(\frac{k_y}{PGA}\right)\right]^2 + a_4 \ln(PGA) + a_5 \ln(PGV)$$

Approccio vettoriale

$$d \rightarrow \infty \text{ for } k_y/PGA = 0 \quad ; \quad d = 0 \text{ for } k_y/PGA = 1$$

Rollo & Rampello (2023)

— Scalar (PGA) — Vector (PGA, PGV) $\circ$ Calculated displacements

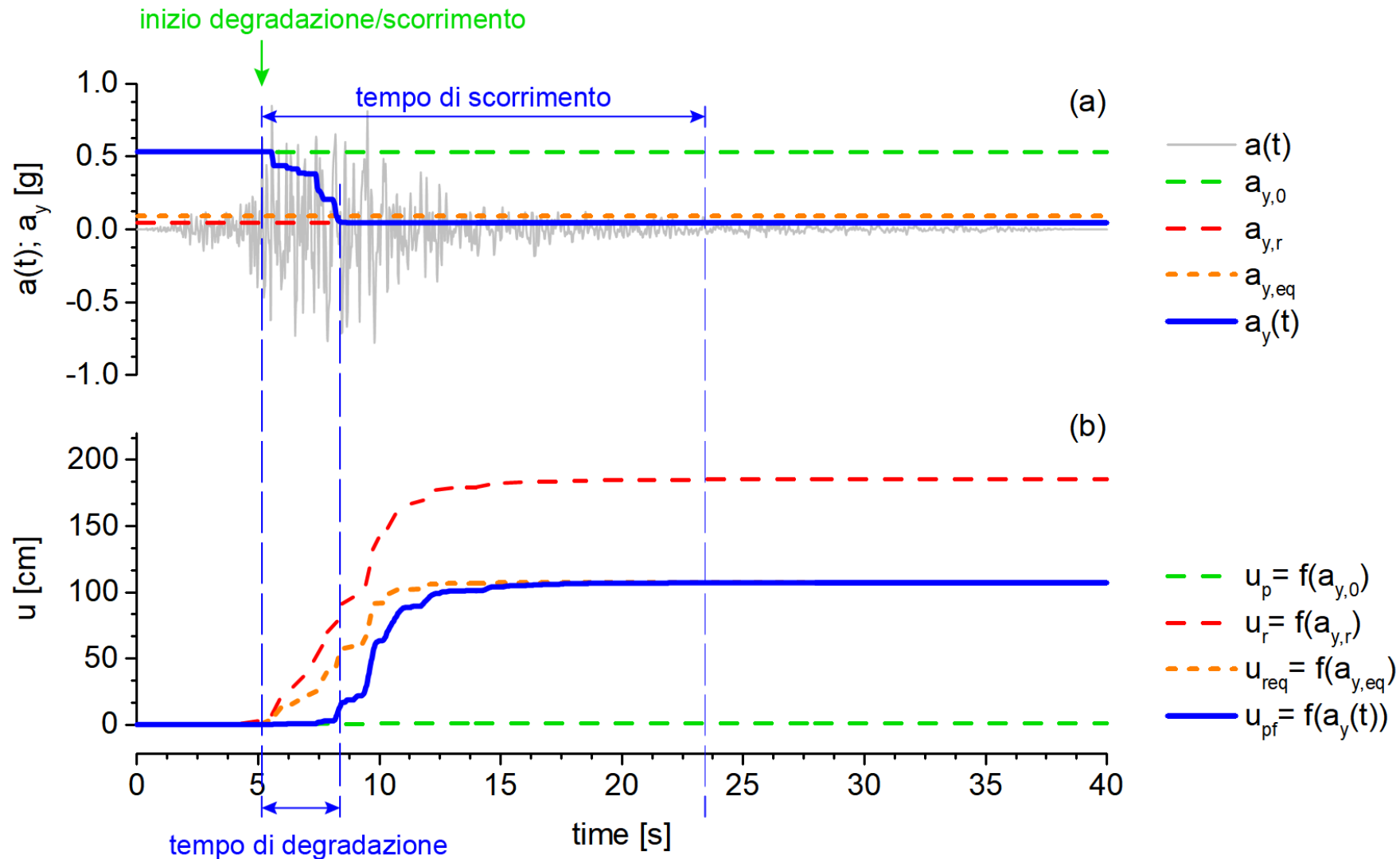


Deviazione standard media

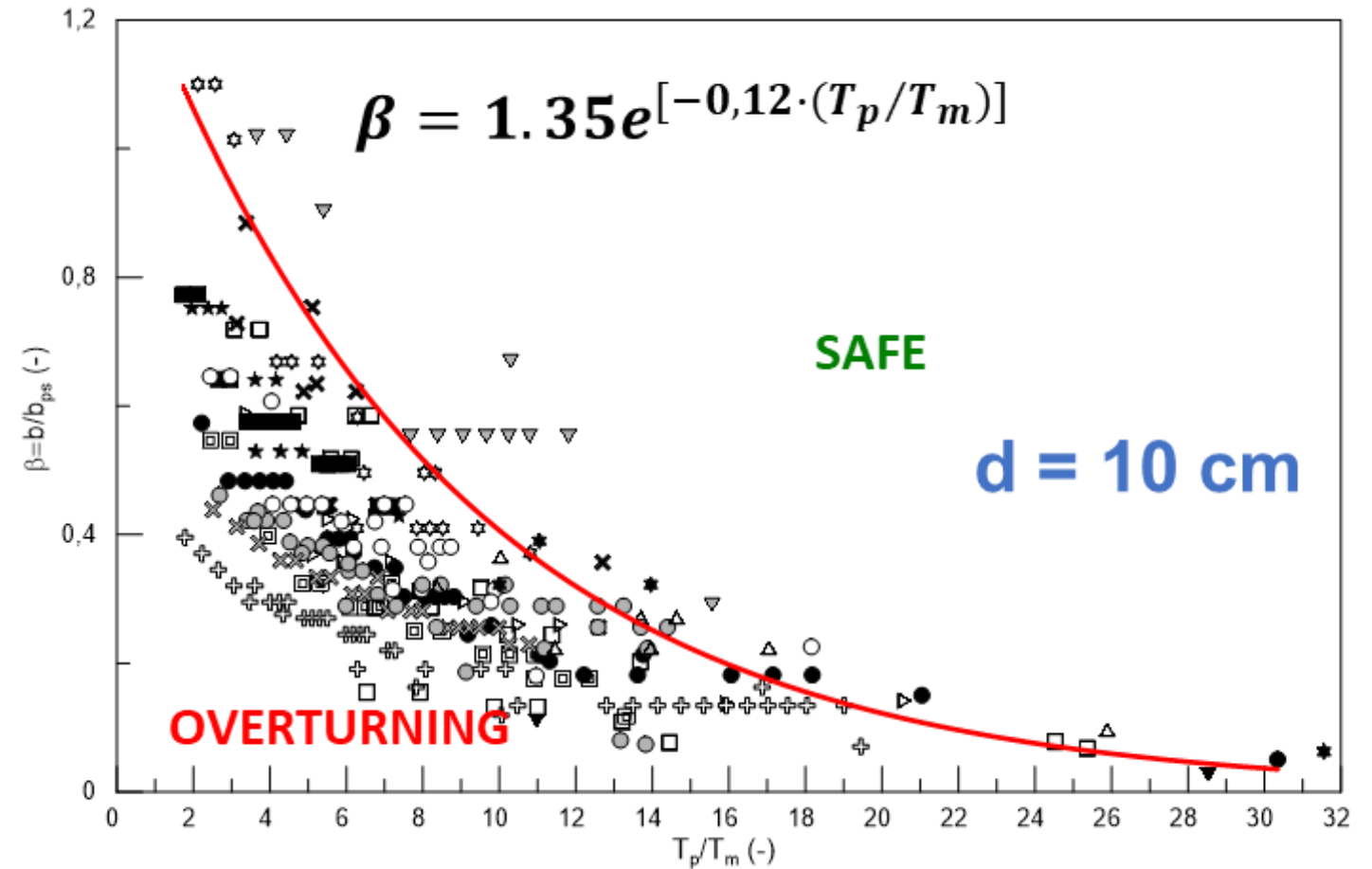
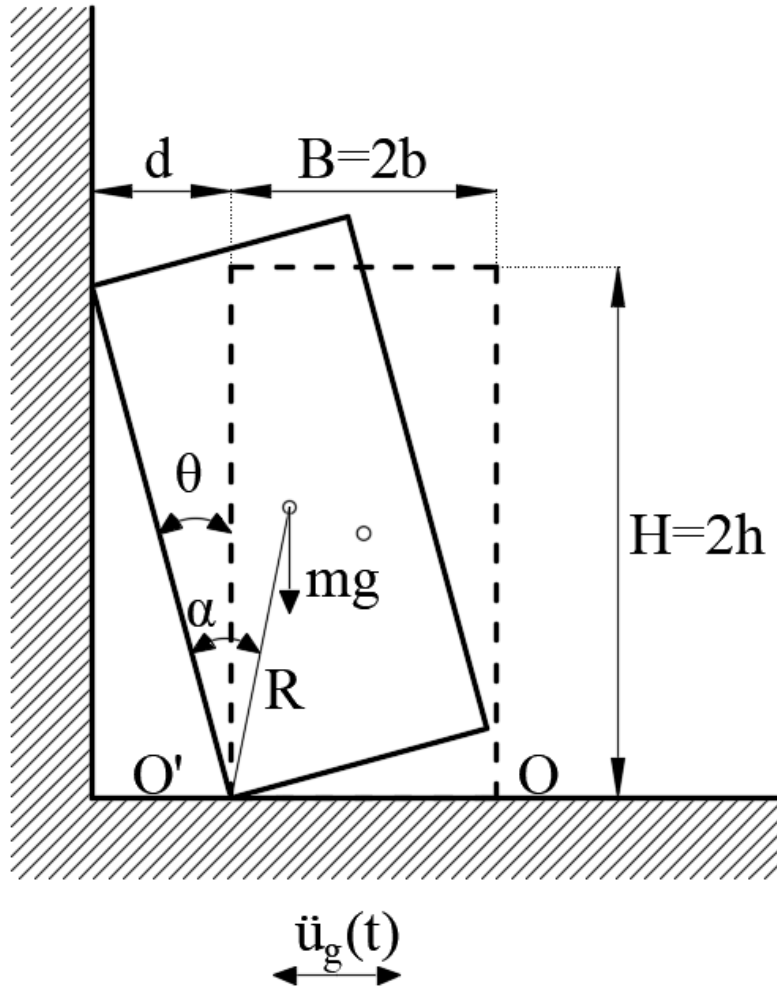
$$\sigma_{ln} = 1.001$$

$$\sigma_{ln} = 0.547$$

Effetto della degradazione della resistenza sull'entità degli spostamenti permanenti sismo-indotti su pendii in roccia



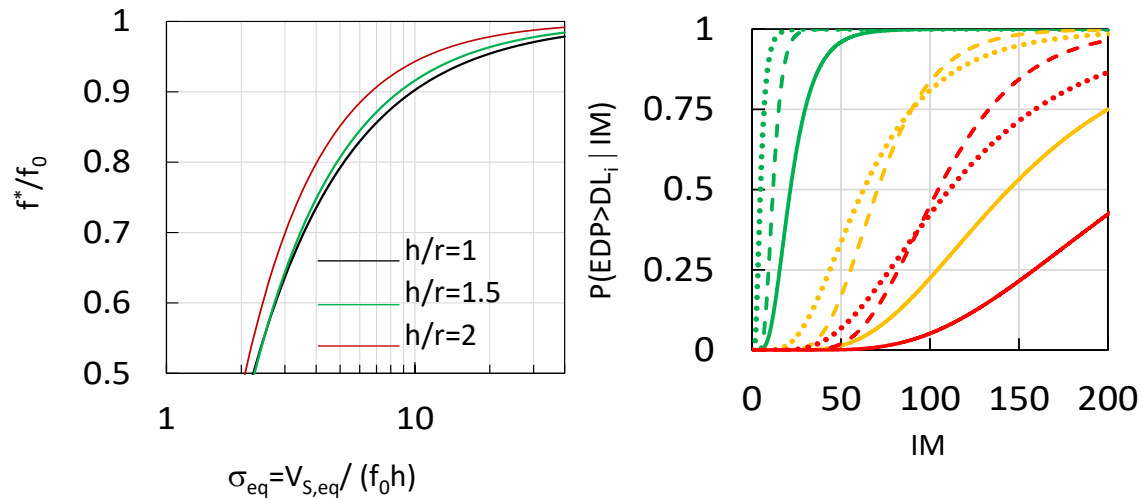
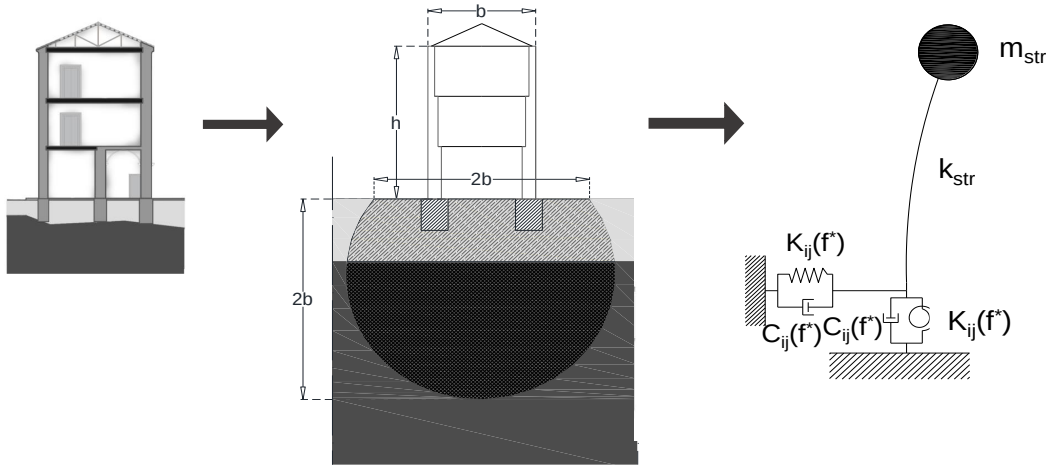
Coefficienti sismici per ribaltamento di blocchi di roccia



SELEZIONE DI PRODOTTI PRENORMATIVI E PER LINEEGUIDA

- **Task 16.1 – Risposta Sismica Locale e Liquefazione**
coordinato da Sebastiano FOTI del Politecnico di Torino
- **Task 16.2 – Stabilità dei pendii**
coordinato da Sebastiano RAMPELLO di «Sapienza» Università di Roma
- **Task 16.3 - Interazione terreno-fondazione-struttura**
coordinato da Francesco SILVESTRI dell'Università di Napoli Federico II

FONDAZIONI SUPERFICIALI – ANALISI DELL'INTERAZIONE SFS CON L'OSCILLATORE EQUIVALENTE

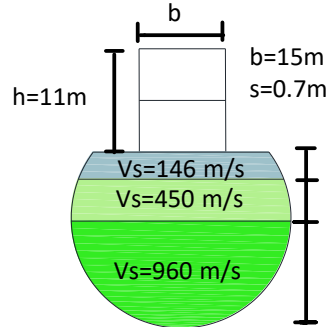


- **Metodi semplificati per la stima della frequenza fondamentale f^* e della fragilità di edifici in muratura, considerando interazione terreno-struttura**
- **Utili per stabilire l'importanza degli effetti di interazione terreno-struttura alla scala della singola opera o dell'aggregato urbano**
- **Validazione metodi su due casi studio (Matera, Onna)**

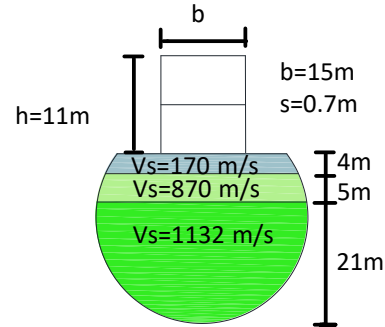
FONDAZIONI SUPERFICIALI – MISURE SPERIMENTALI VS. PREVISIONI FREQUENZE SFS



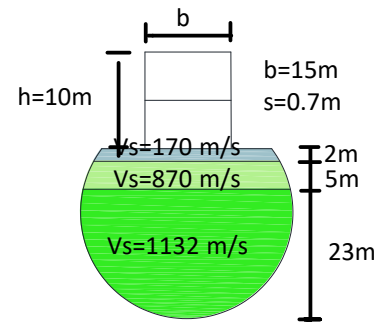
Edificio 7



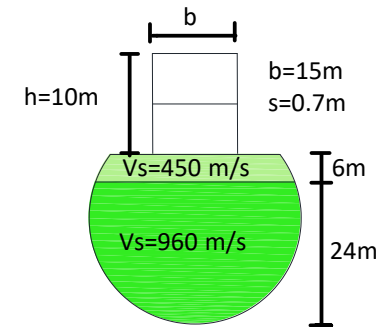
Edificio 9



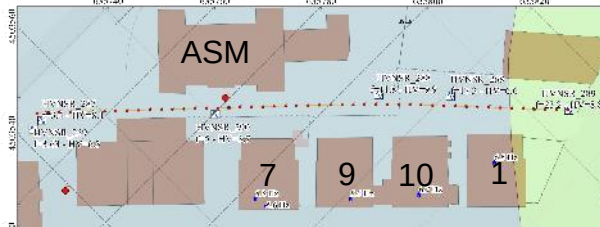
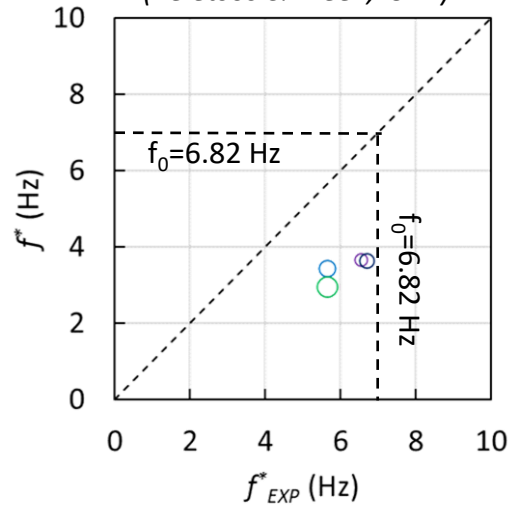
Edificio 10



Edificio 1



Approccio tradizionale, σ
(Veletsos & Meek, 1974)



ID edifici

- 1 (purple line)
- 10 (blue line)
- 9 (light blue line)
- 7 (green line)

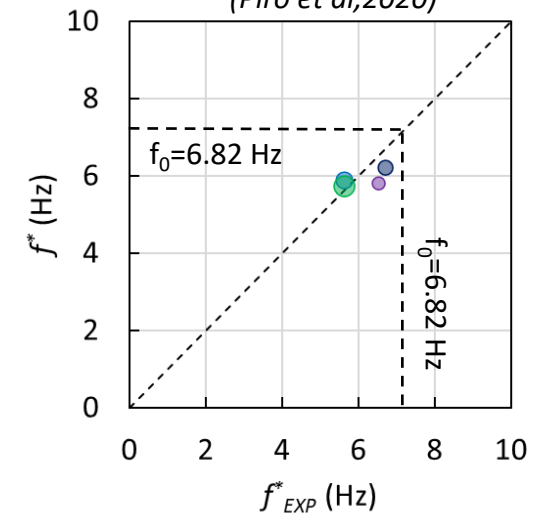
Spessore argille, H_C

○ $0 < H_C < 3\text{m}$
○ $3 < H_C < 5\text{m}$

Case popolari a Matera

Argilla Sub-Appenninica(SC)
Calcare di Gravina(GC)
Calcare di Altamura (AL)

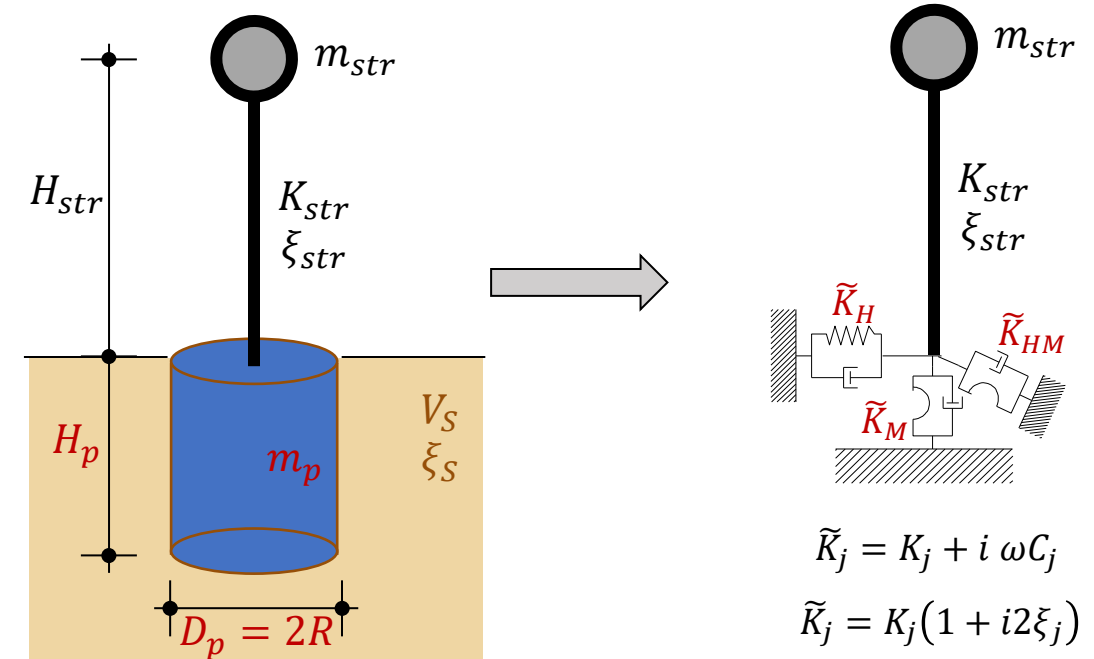
Approccio proposto, σ_{eq}
(Piro et al, 2020)



Metodo: Applicazione dell'oscillatore equivalente ($\tilde{T}$, $\tilde{\xi}$) al sistema pila da ponte (T_{str} , ξ_{str}) – fondazione a pozzo - terreno

Risultati:

- Formule semplificate per $\tilde{T}$ e $\tilde{\xi}$
- Formule semplificate per:
 - impedenze (K_j , C_j)
 - fattori interazione cinematica (I_u , I_θ)
- Modello 3DoF per analisi dinamica oscillatore equivalente



$$\frac{\tilde{T}}{T_{str}} = 1 + 0.48 \cdot (\bar{h})^{-0.45} \cdot (\Delta)^{0.69} \cdot (\bar{s})^{1.54}$$

$$\tilde{\xi} = \xi_{str} \left(\frac{\tilde{\omega}}{\omega_{str}} \right)^2 + \xi_s \left[1 - \left(\frac{\tilde{\omega}}{\omega_{str}} \right)^2 \right] + \left(\frac{\tilde{\omega}}{\omega_{str}} \right)^3 \cdot 0.05 \cdot (\bar{h})^{-1.01} \cdot (\Delta)^{0.43} \cdot (\bar{s})^{3.0} \cdot (\bar{d})^{0.21}$$

$$\bar{s} = \frac{\omega H_{str}}{V_s} \quad \bar{d} = \frac{H_p}{R}$$

$$\bar{h} = \frac{H_{str}}{R} \quad \Delta = \frac{m_{str}}{m_p}$$

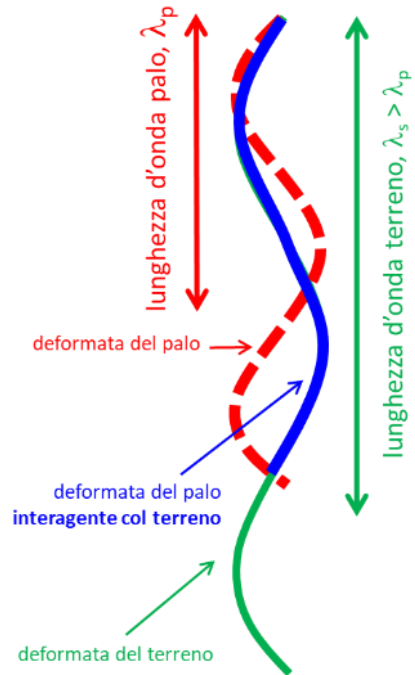
Lunghezza d'onda nel palo

$$\lambda_p = d \left(\frac{E_p}{E_s} \right)^{1/4}$$

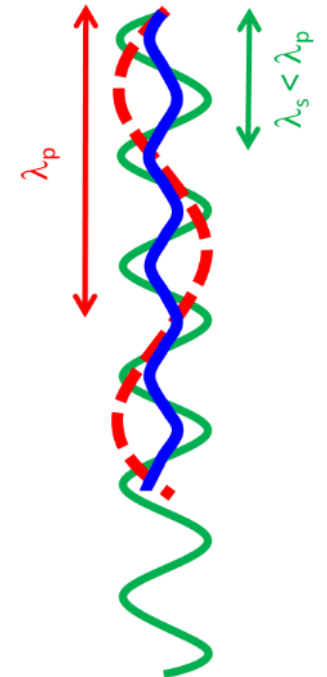
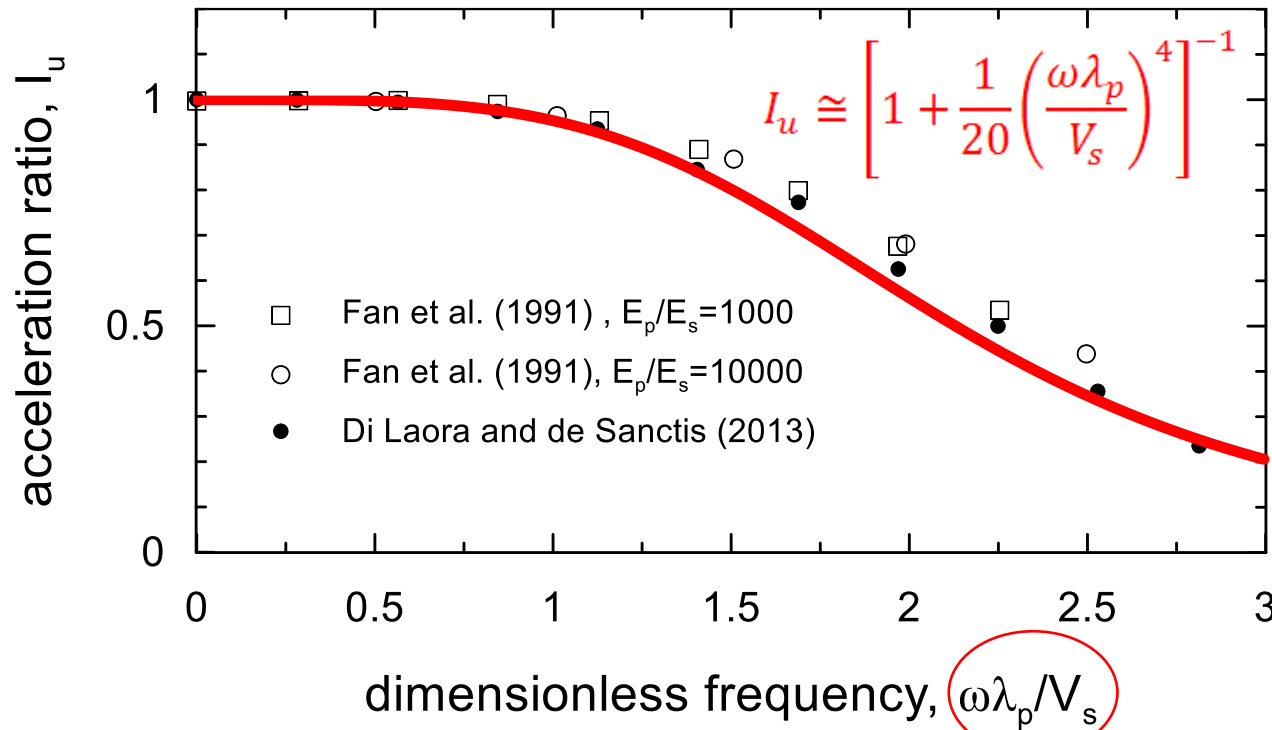
$$\frac{\lambda_p}{\lambda_s} \propto \frac{\omega \cdot \lambda_p}{V_s}$$

Lunghezza d'onda in *free field*

$$\frac{V_s}{\omega} = \frac{\lambda_s}{2\pi}$$



Palo con rigidezza simile al terreno

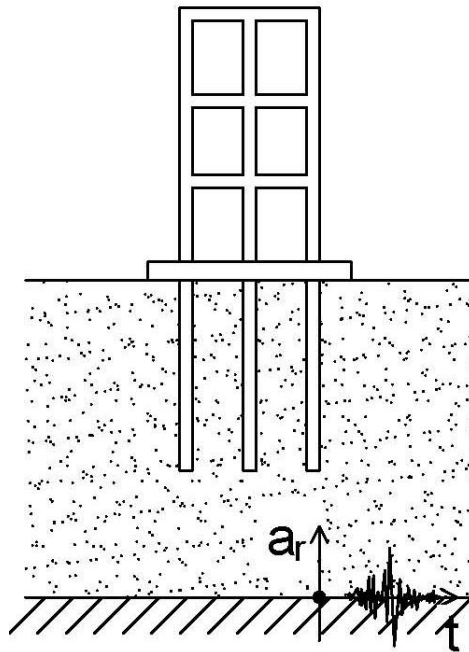


Palo molto più rigido del terreno

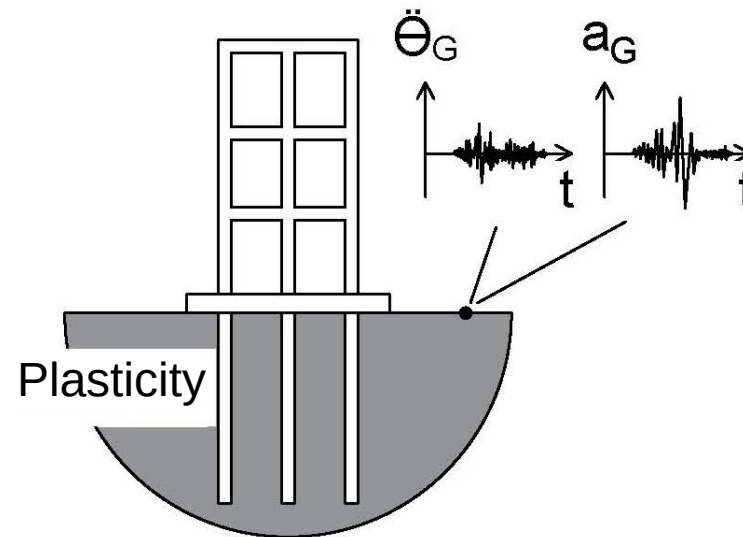
L'effetto filtro, cioè la riduzione del rapporto I_u tra il *Foundation Input Motion* (FIM) e il moto *free-field* del terreno (FFM) è proporzionale al rapporto λ_p/λ_s tra la lunghezza d'onda che si propaga nel palo e in *free field*

Modelli di interazione Fondazione-terreno-struttura

Metodo diretto

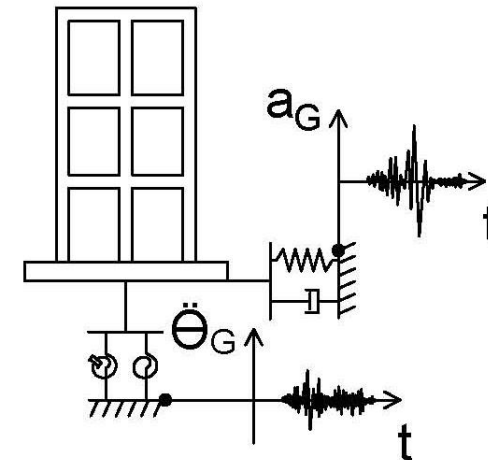


Teoria del Macro-elemento



$$\begin{Bmatrix} du \\ d\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{uu} & C_{u\theta} \\ C_{\theta u} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dH \\ dM \end{Bmatrix}$$

Modelli LPM



Sviluppo macro-elemento

Teoria dell'elasto-plasticità incrudente

Variabili tensionali generalizzate

$$\mathbf{Q} = \begin{Bmatrix} \xi \\ h \\ m \end{Bmatrix} = \frac{1}{V_M} \begin{Bmatrix} V \\ H/\mu \\ M/(\psi B) \end{Bmatrix}$$

Variabili di deformazione generalizzate

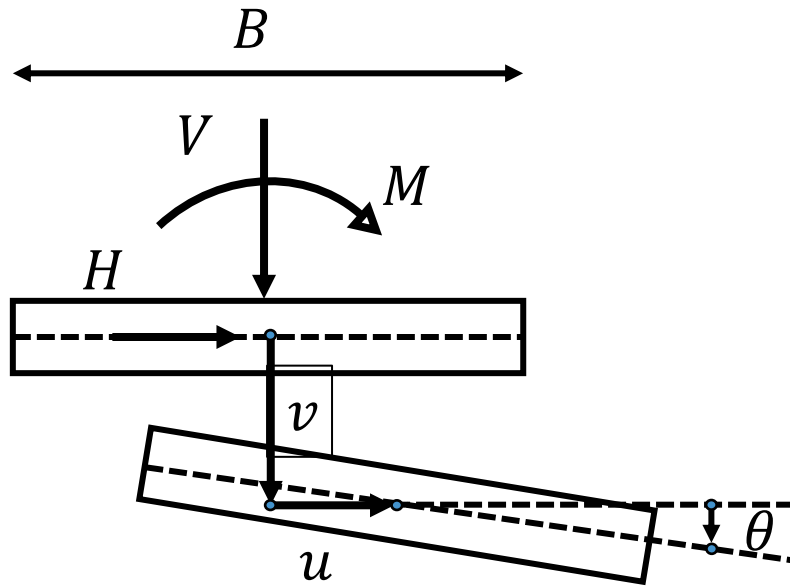
$$\mathbf{q} = \begin{Bmatrix} \eta \\ \varepsilon \\ \zeta \end{Bmatrix} = V_M \begin{Bmatrix} v \\ \mu u \\ \psi B \theta \end{Bmatrix}$$

Prager, 1955

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{q} = Vv + Hu + M\theta$$

Legame costitutivo

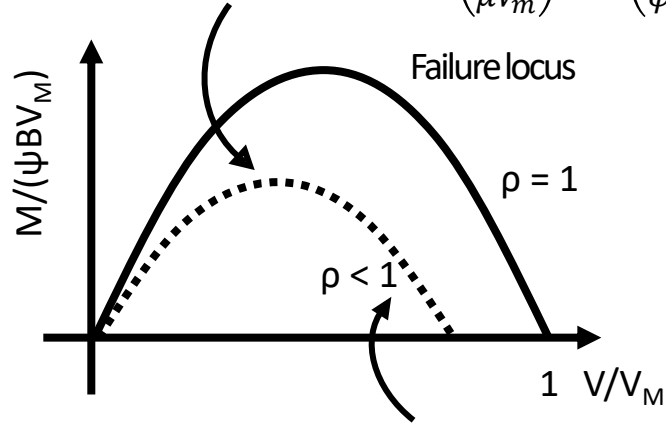
$$d\mathbf{q} = \mathbf{C} d\mathbf{Q}$$



Sviluppo macro-elemento

Teoria dell'elasto-plasticità incrudente

Loading function: $f(\mathbf{Q}, \rho) = \left(\frac{H}{\mu V_m}\right)^2 + \left(\frac{M}{\psi B V_m}\right)^2 - \left(\frac{V}{V_m}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{V}{\rho V_m}\right)\right]^{2\beta} = 0$ (Nova e Montrasio, 1991)



Flow rule:

$$f(\mathbf{Q}, \rho) < 0 \rightarrow d\mathbf{q}^{pl} = 0 \quad \forall d\mathbf{Q}$$

$$f(\mathbf{Q}, \rho) = 0 \text{ e } df(\mathbf{Q}, \rho) < 0 \rightarrow d\mathbf{q}^{pl} = 0$$

$$f(\mathbf{Q}, \rho) = 0 \text{ e } df(\mathbf{Q}, \rho) = 0 \rightarrow d\mathbf{q}^{pl} = \Lambda \partial g / \partial \mathbf{Q}$$

$$\Lambda = - \frac{\frac{\partial f}{\partial \mathbf{Q}^T} d\mathbf{Q}}{\frac{\partial f}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial |\mathbf{q}^T|} \left| \frac{\partial g}{\partial \mathbf{Q}} \right|}$$

Plastic potential

Plastic hardening law: $\rho = \rho(|\mathbf{q}|) = 1 - \exp \left\{ - \frac{R_0}{V_M^2} \left[\eta^2 + \left(\frac{\alpha |\epsilon|}{\mu} \right)^2 + \left(\frac{\gamma |\zeta|}{\psi} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$

$$f = f(\beta, \mu, \psi, \rho)$$

$$\rho = \rho(R_0, V_M, \alpha, \gamma) \quad \text{9 constitutive parameters}$$

$$g = g(\lambda \mu, \chi \psi)$$

μ, ψ : shape parameters for f β : shape factor for f and g

λ, χ : shape parameters for g R_0 : initial vertical stiffness

V_M : V failure ($M=H=0$) α, γ : hardening parameter

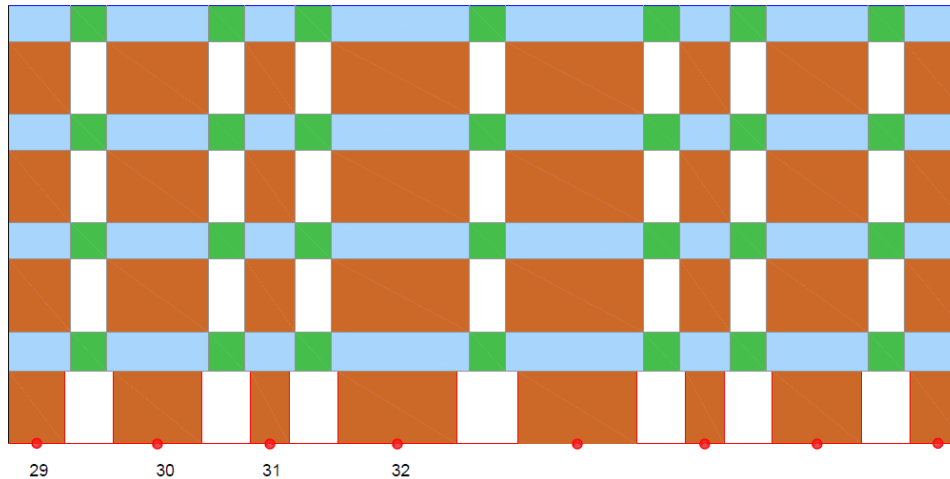
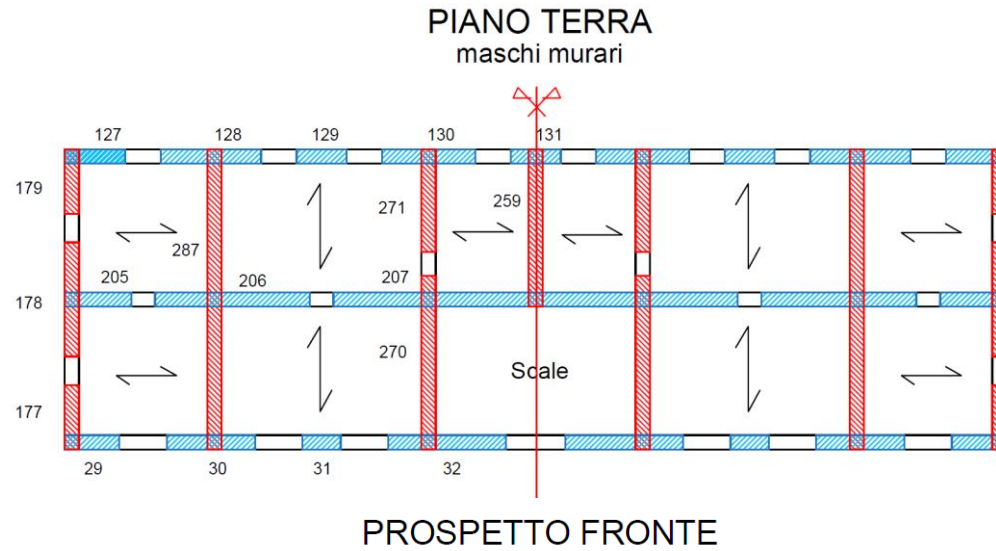
ADDITIONAL FEATURES

+ cyclic loading through radial mapping rules or bounding surface plasticity

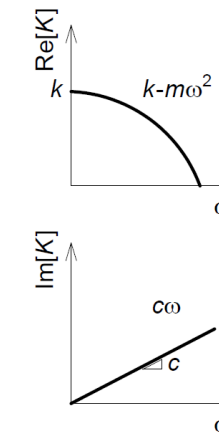
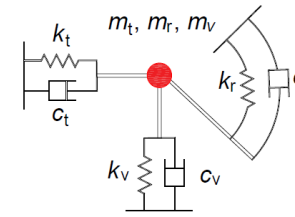
+ geometrical non linearity at soil-foundation interface

Edificio in muratura 4 piani - Napoli

Calibrazione ME - NL



	Maschio N.	b	s
maschi lungo x	29	2	0.9
	30	3.7	0.9
	31	1.6	0.9
	32	4.95	0.9
	127	2.25	0.9
	128	4.2	0.9
	129	2.1	0.9
	130	3.9	0.9
	205	2.5	0.9
	206	6.5	0.9
	207	17	0.9
	259		
maschi lungo y	177	2.4	0.9
	178	4.8	0.9
	287	12	0.9
	270	7	0.9
	271	4	0.9
	259	6	0.9



Matrice dei modelli d'interazione

	Fondazioni a platea		Fondazioni con N elementi isolati	
Analisi	Spettri elastici	Storie temporali	Spettri elastici	Storie temporali
Lineare	Dinamica modale^a 1 Macro – elemento elastico	Dinamica 1 Modello visco-elastico (LPM = lumped parameter model)	Dinamica modale N Macro – elementi elastici	Analisi dinamica N Modelli visco-elastici (LPM = lumped parameter model)
Non Lineare	Statica 1 ME-non lineare con gradi di libertà disaccoppiati	Dinamica 1 ME-non lineare ciclico con gradi di libertà disaccoppiati	Statica N ME-non lineari con gradi di libertà accoppiati	Dinamica N ME-non lineari ciclici con gradi di libertà accoppiati

CONCLUSIONI

- **Ingegneria Geotecnica Sismica Italiana ha fatto passi da gigante negli ultimi 20 anni**
- **Anche su tematiche diverse da quelle sviluppate in precedenza**
- **Incremento degli studi di interazione terreno-struttura**
- **Possibili ricadute in ambito normativo e prenormativo**
- **Incremento del dialogo Strutturisti-Geotecnici**

**Grazie a ReLUIs, ci sono Strutturisti che capiscono i Geotecnici e
Geotecnici che capiscono gli Strutturisti**