

Protezione civile: verso una governance più forte per la riduzione del rischio

Stabilità di cavità sotterranee in condizioni sismiche

Stefania Fabozzi

14.04.2021

Stabilità di cavità sotterranee in condizioni sismiche

GRUPPO DI LAVORO

Stefania Fabozzi ¹, Emilio Bilotta ², Filomena de Silva ², Massimiliano Moscatelli ¹, Giuseppe Naso ³, Marco Nocentini ¹, Edoardo Peronace ¹, Paolo Tommasi ¹

¹ *Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (CNR IGAG)*

[\(stefania.fabozzi; massimiliano.moscatelli; marco.nocentini; edoardo.peronace; paolo.tommasi\)@igag.cnr.it](mailto:(stefania.fabozzi; massimiliano.moscatelli; marco.nocentini; edoardo.peronace; paolo.tommasi)@igag.cnr.it)

² *Università di Napoli Federico II*

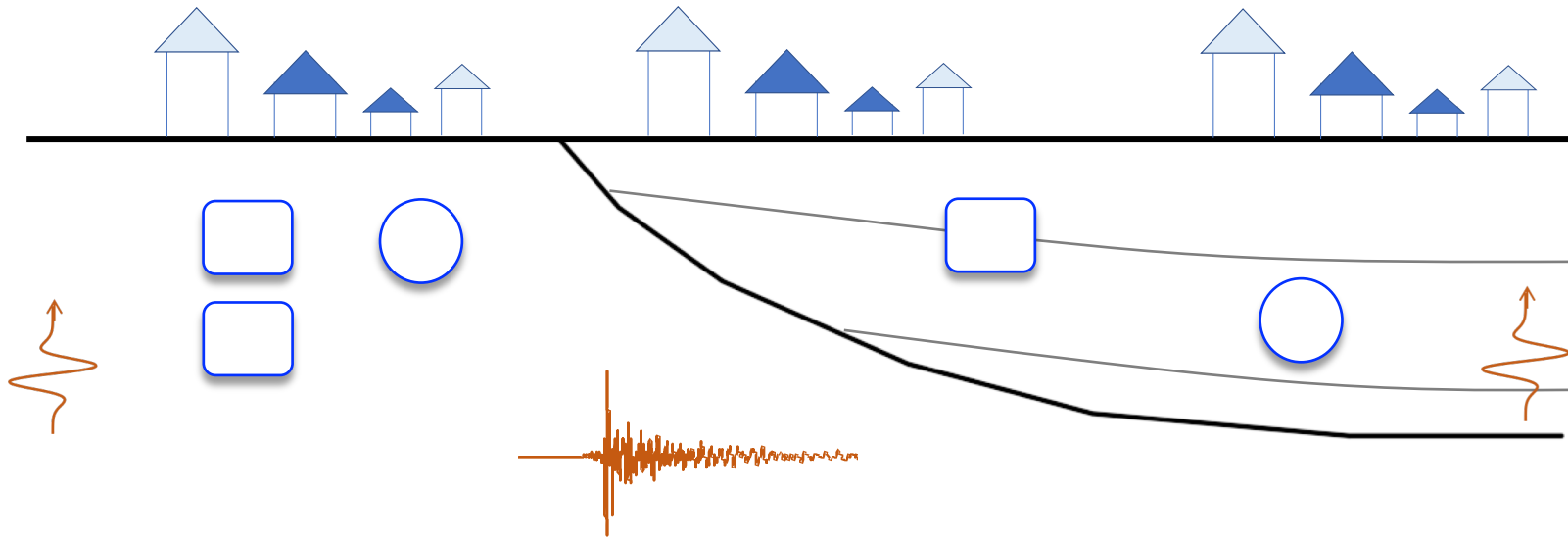
[\(emilio.bilotta; filomena.desilva\)@unina.it](mailto:(emilio.bilotta; filomena.desilva)@unina.it)

³ *Dipartimento di Protezione Civile (DPC)*

[\(giuseppe.naso\)@protezionecivile.it](mailto:(giuseppe.naso)@protezionecivile.it)



Inquadramento del problema

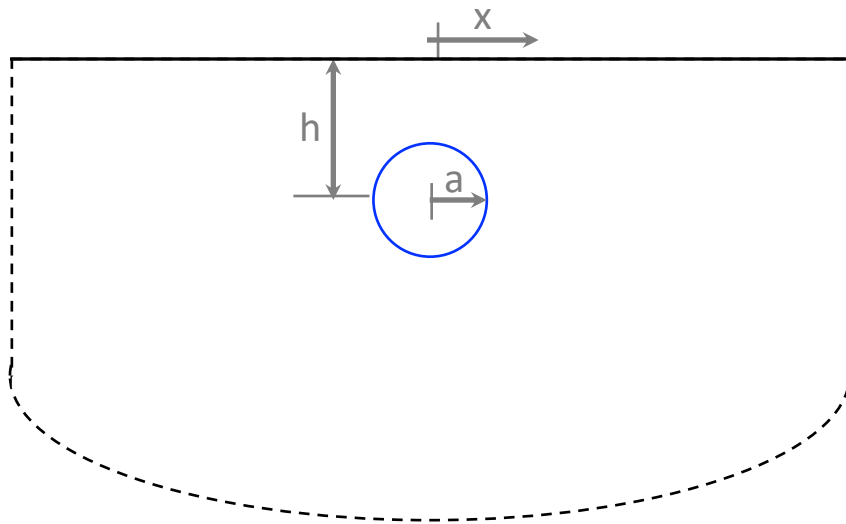


Durante un terremoto, una **cavità sotterranea** :

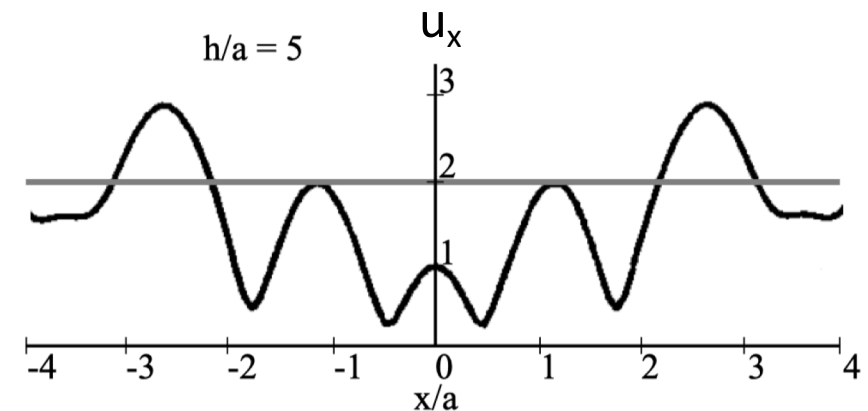
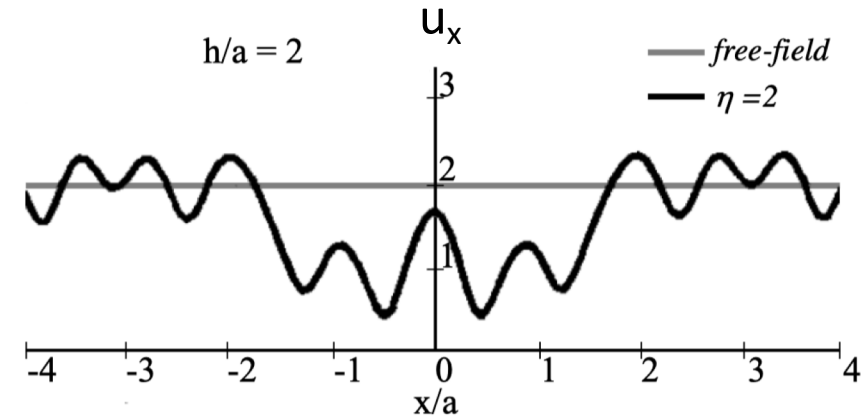
- 1) ha effetti sulla risposta sismica locale
- 2) è vulnerabile all'azione sismica

Effetto della presenza di una cavità sulla RSL

METODI ANALITICI (es. Lee et al., 1992)



- x/a , ascissa adimensionalizzata rispetto al raggio, a , della cavità,
- $\eta=2 \cdot (a/\lambda)$, diametro adimensionalizzato rispetto alla lunghezza d'onda, λ , della sollecitazione armonica,
- h/a , profondità del centro della cavità adimensionalizzata rispetto al raggio della stessa.

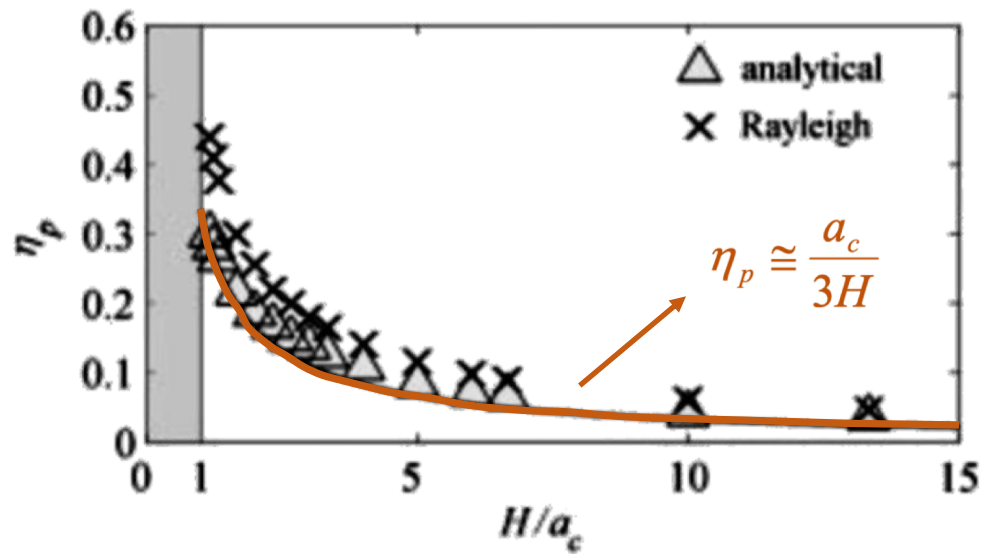


Effetto della presenza di una cavità sulla RSL

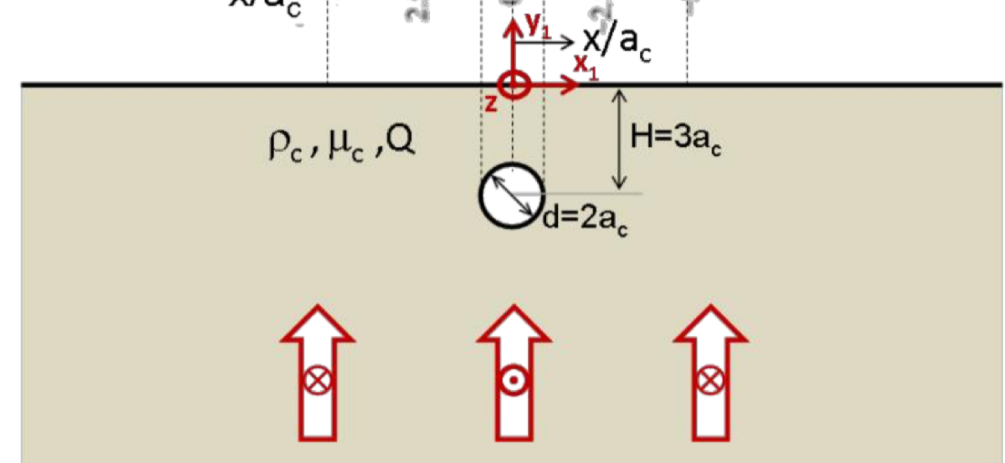
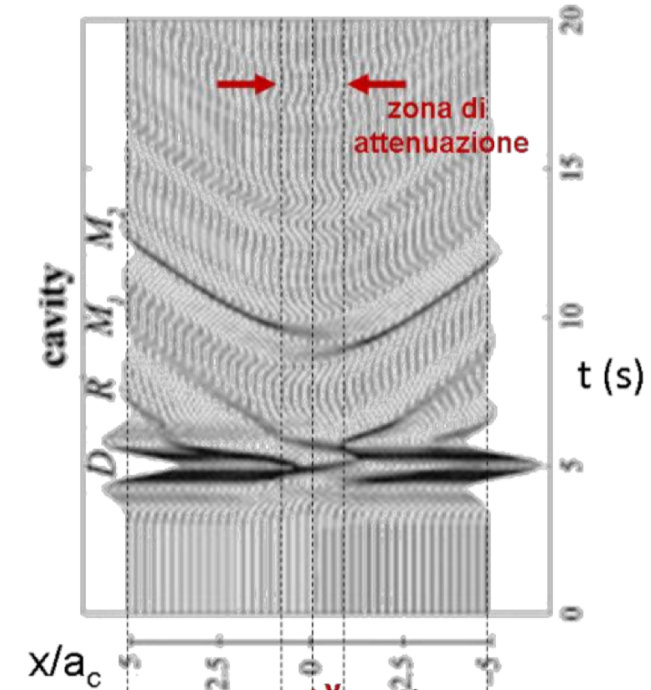
METODI ANALITICI (es. Smerzini et al., 2009)

Frequenza fondamentale del moto prodotto in superficie in funzione della profondità a cui si trova la cavità (H) adimensionalizzata rispetto al diametro a_c .

$$\eta_p = \frac{\omega \cdot a_c}{\pi \cdot V_s}$$



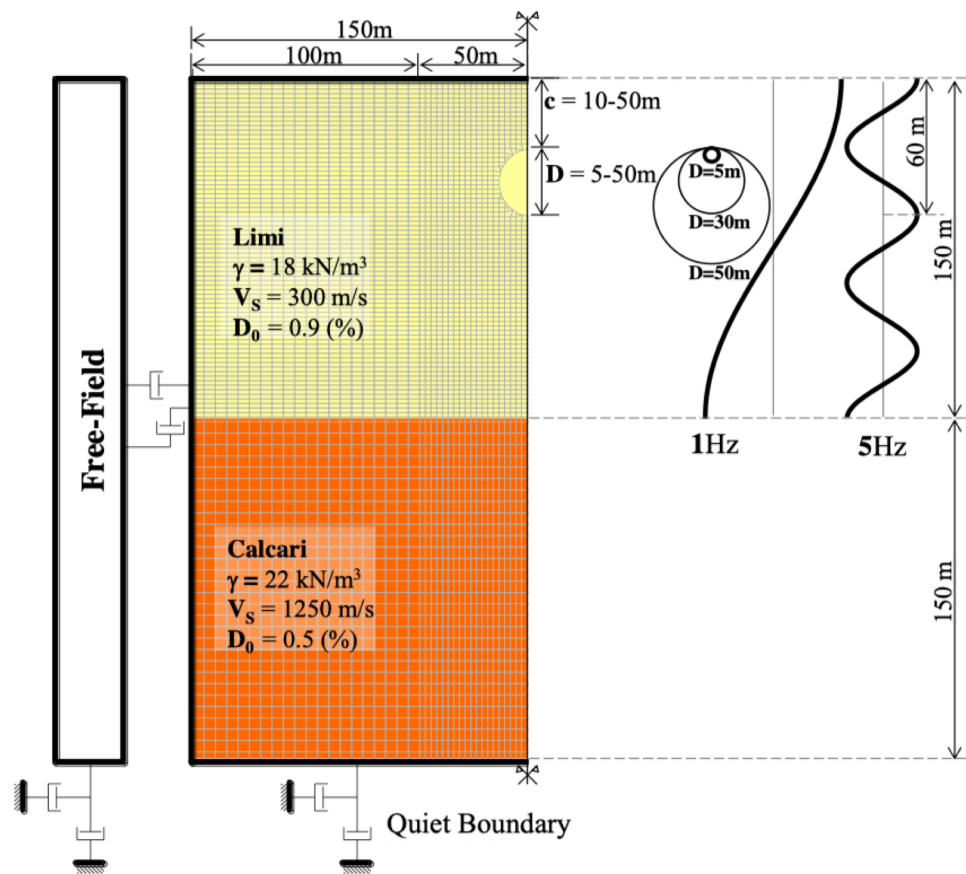
influenza della profondità della cavità sulla frequenza dominante del segnale in superficie



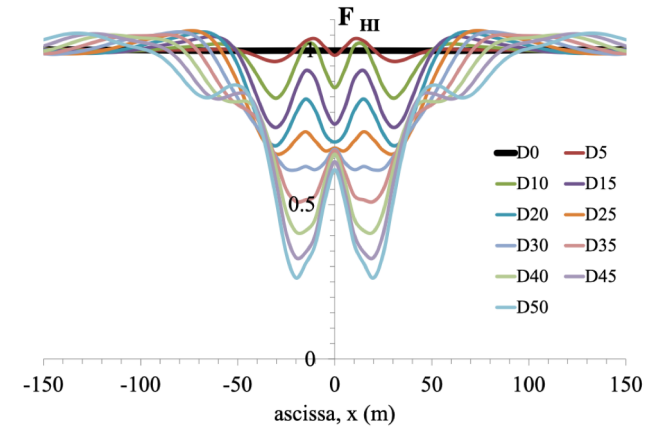
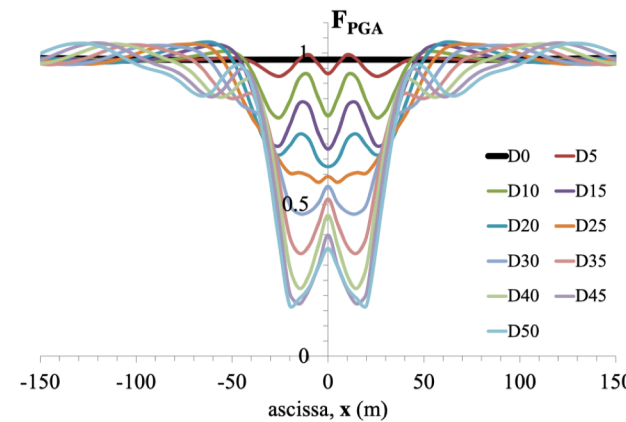
Effetto della presenza di una cavità sulla RSL

METODI NUMERICI (es. Landolfi et al., 2011)

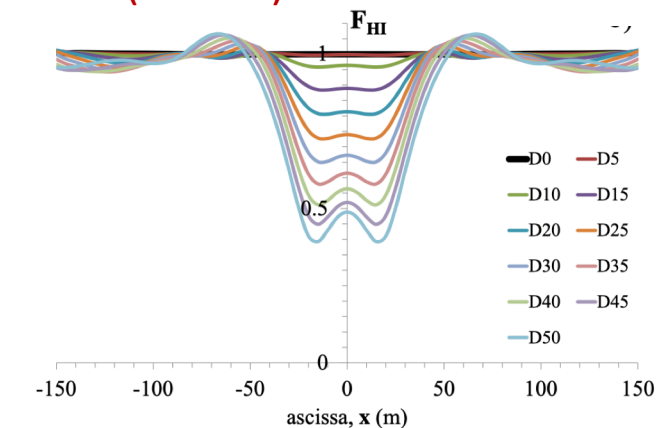
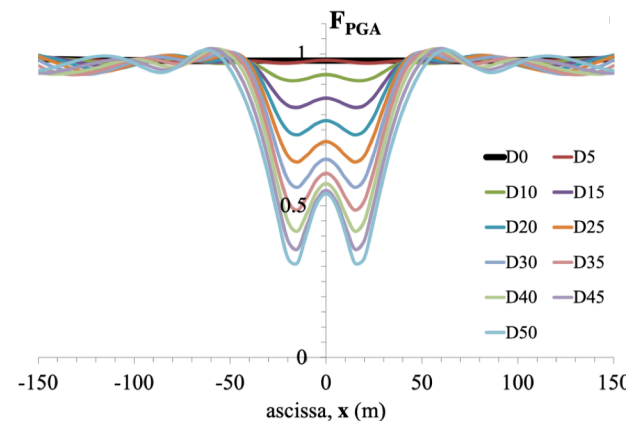
studio sull'influenza delle cavità sulla risposta dell'abitato di Castelnuovo (Comune di S.Pio delle Camere, AQ)
in occasione del terremoto dell'Aquila del 06.04.2009.



CAVITA' SUPERFICIALE (c=10m)



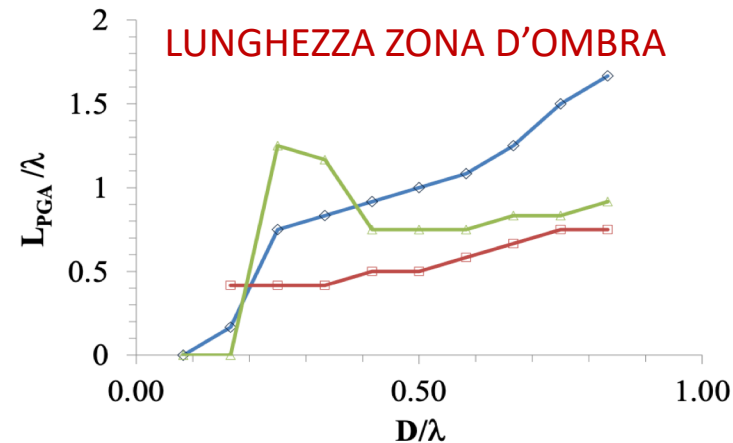
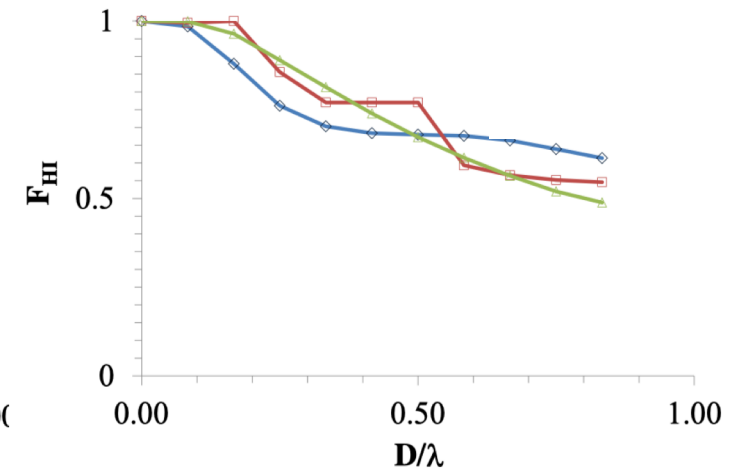
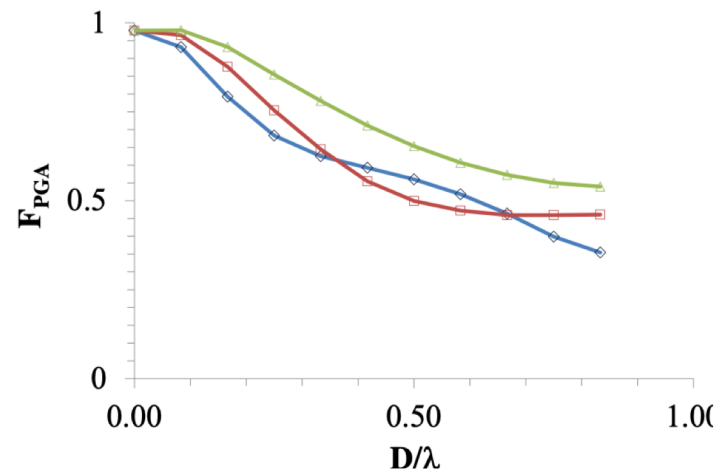
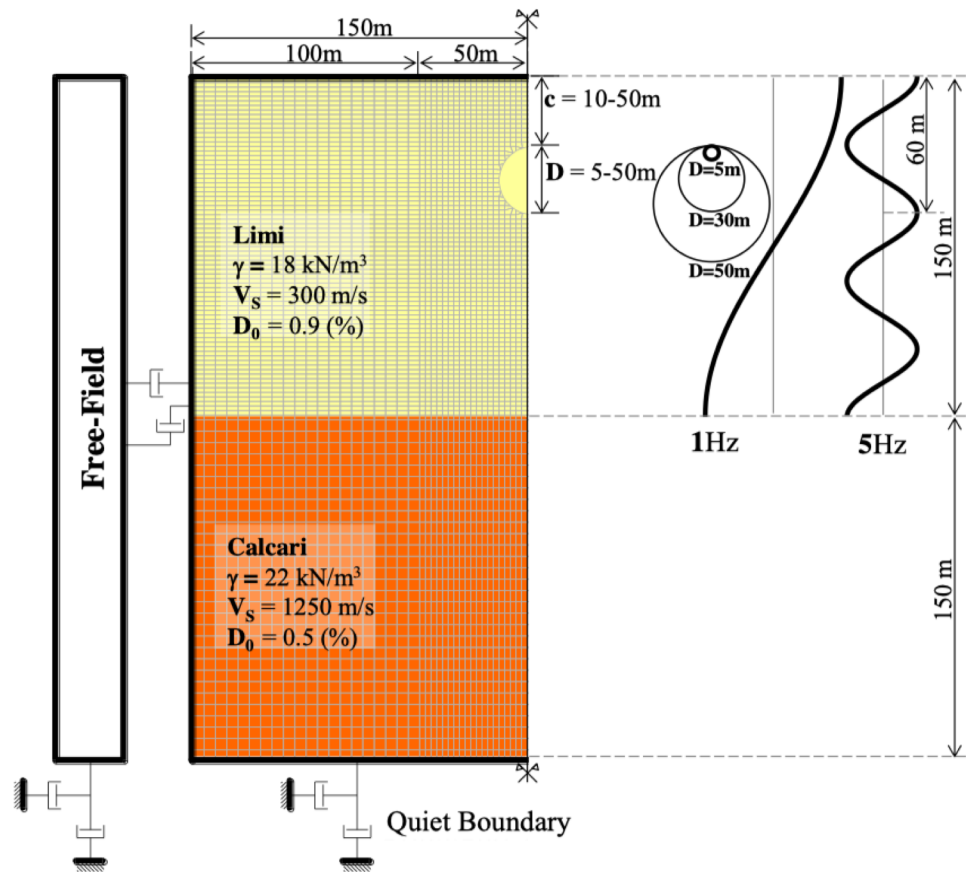
CAVITA' PROFONDA (c=50m)



Effetto della presenza di una cavità sulla RSL

METODI NUMERICI (es. Landolfi et al., 2011)

studio sull'influenza delle cavità sulla risposta dell'abitato di Castelnuovo (Comune di S. Pio delle Camere, AQ) in occasione del terremoto dell'Aquila del 06.04.2009.



LEGENDA

RAPPORTI DI COPERTURA

- $c/\lambda = 0.17$
- $c/\lambda = 0.50$
- $c/\lambda = 0.83$

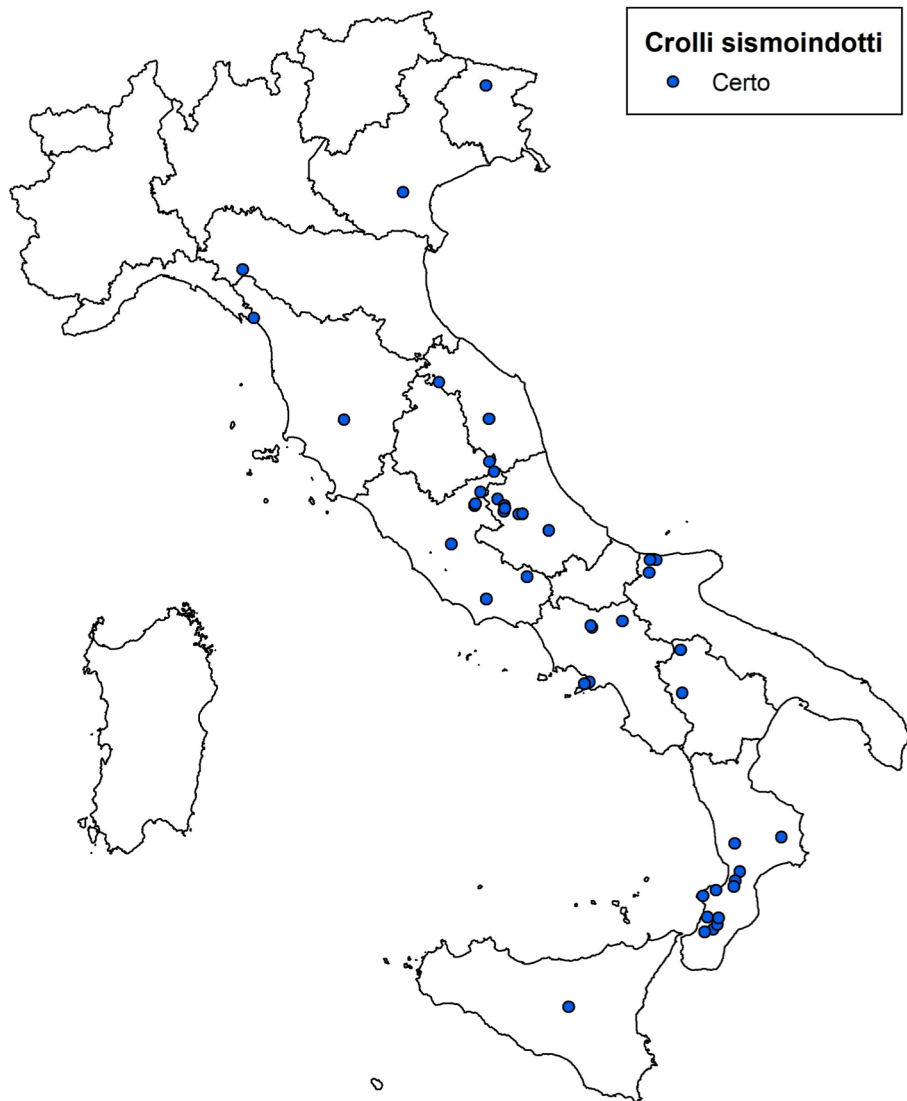
Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche

Può crollare una cavità durante un evento sismico?



Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche

Mappa dei crolli sismoindotti di cavità



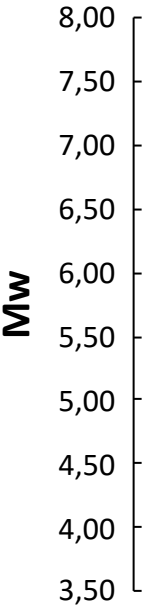
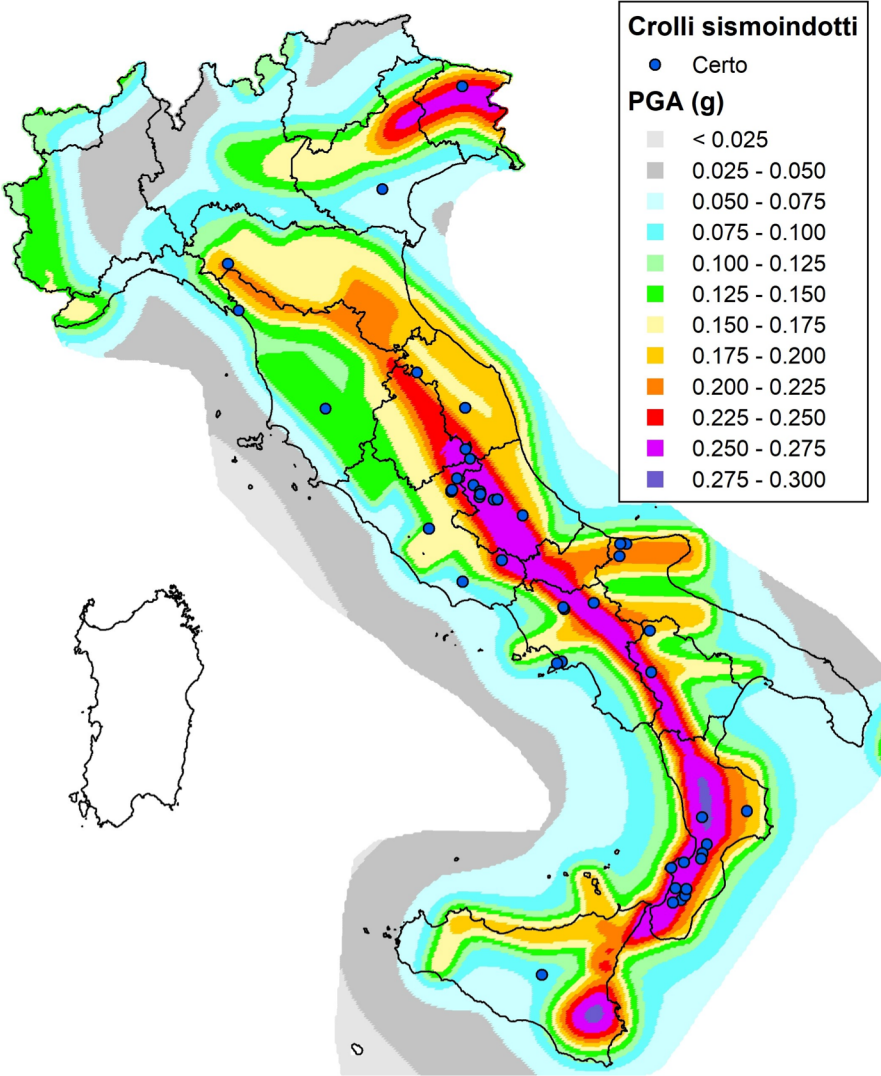
Numero totale di casi pari a 56 di cui:

- 16 post- 1900
- 40 pre- 1900

Fonti: CFTI5Med (sprofondamenti/voragini + crollo cavità); CEDIT (ground changes); pubblicazioni scientifiche (Faccenna et al., 1993; Esposito et al., 2000; Buchignani et al., 2008; Del Prete et al., 2010; Santo et al., 2011, Santo et al., 2019); fonti storiche (De Poardi 1627; Tiberi 1639; Uria De Llanos 1703; Sarconi 1784; Vivenzio 1788; Crema 1924).

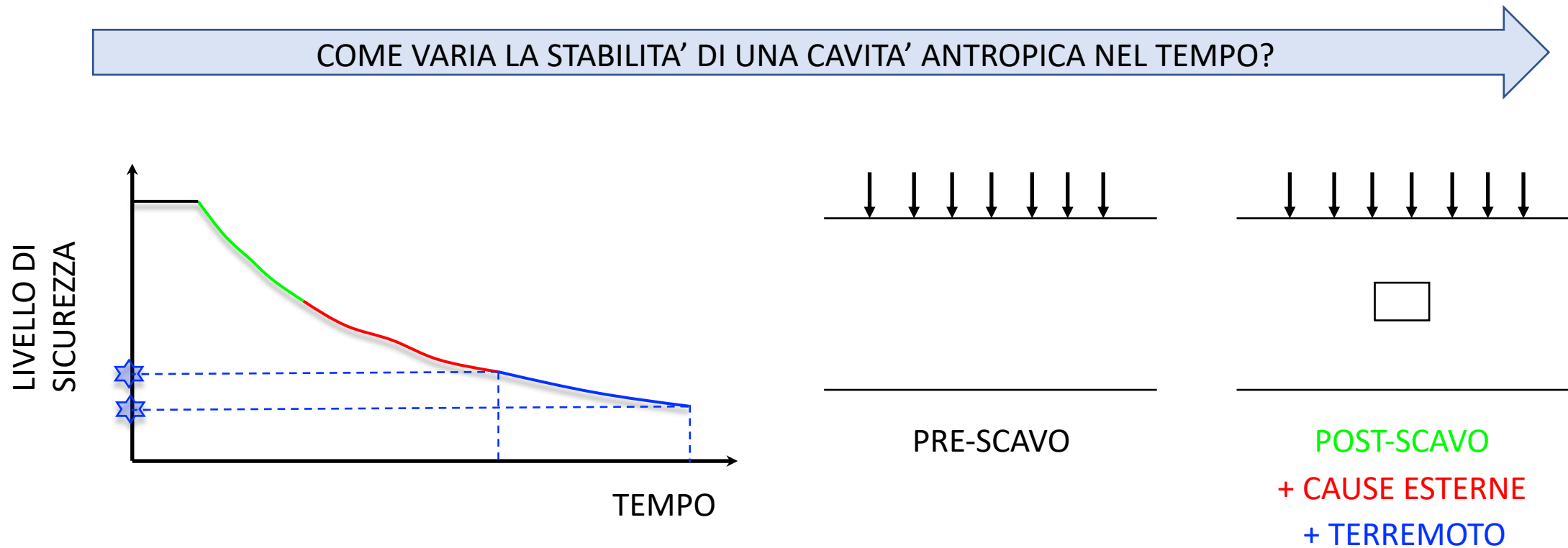
Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche

Mappa dei crolli sismoindotti di cavità



Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche

ESEMPIO: caso cavità antropica

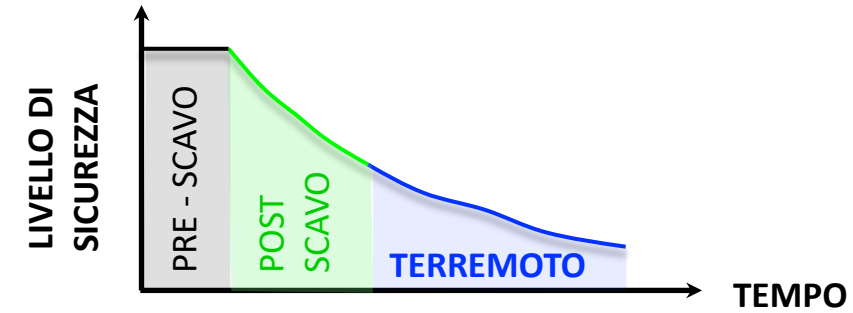
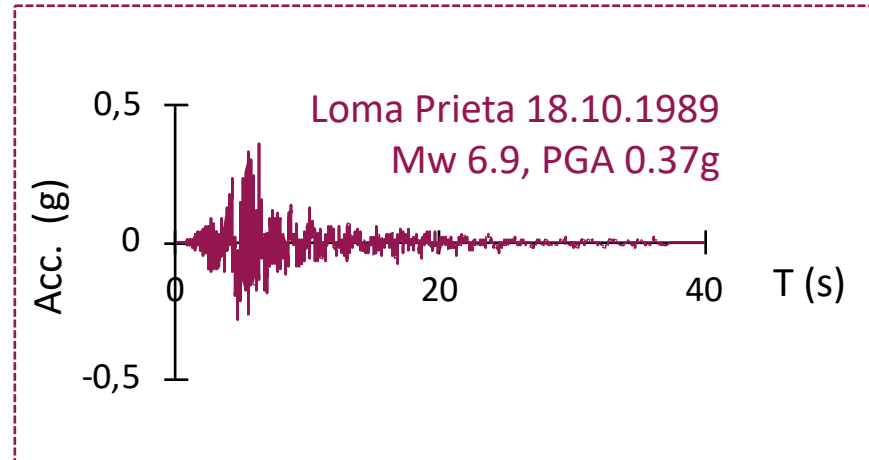
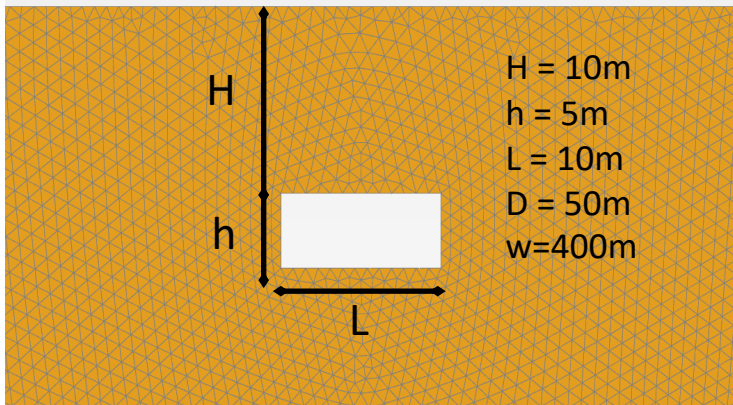
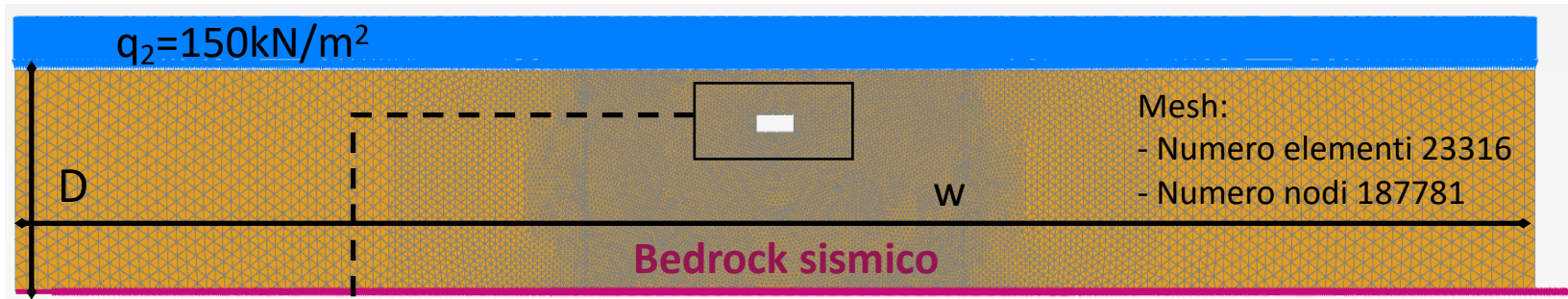


- ★ La stabilità di una cavità durante e dopo un evento sismico dipende, oltre che dalle caratteristiche dell'evento, dalla condizione di stabilità 'statica' immediatamente precedente l'arrivo del sisma !

Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche

ESEMPIO: caso cavità antropica

Modello numerico FEM PLAXIS 2D



Tufo giallo napoletano
(da Evangelista et al., 2000):

$\gamma_t = 16 \text{ kN/m}^3$; $c' = 866 \text{ kPa}$;
 $\phi' = 30^\circ$ $\psi = 0^\circ$; $\sigma_c = 3 \text{ MPa}$; $\nu = 0.3$
 $E = 2000 \text{ MPa}$; $\sigma_t = 0.1 \sigma_c$;

Contorni assorbenti

$$\sigma_n = -C_1 \rho V_P \dot{u}_x; \quad \tau = -C_2 \rho V_S \dot{u}_y$$

Criterio di Lysmer & Kuhlemeyer

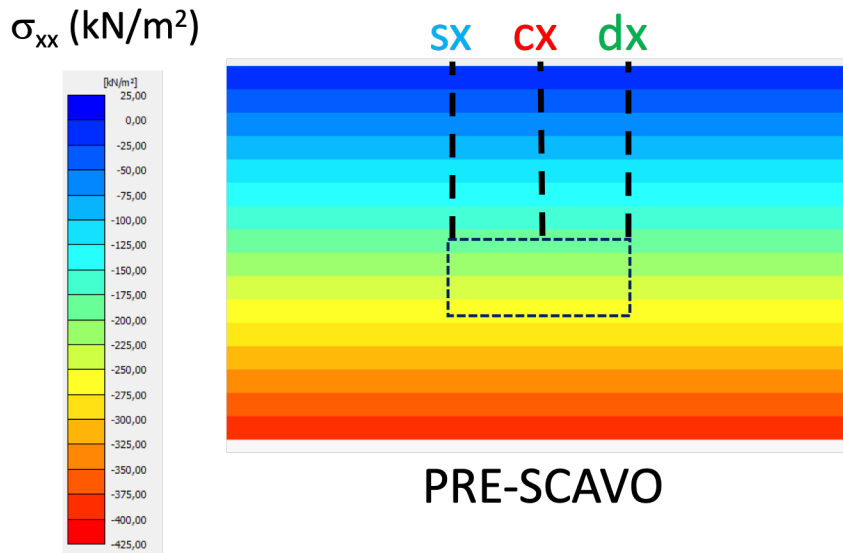
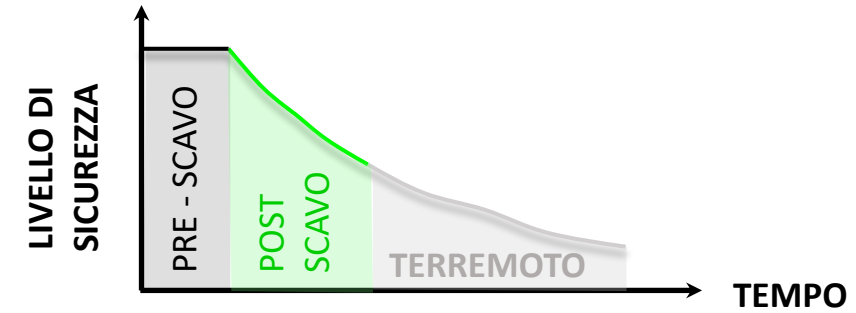
$$h_{max} = \frac{\lambda}{6 \div 8} = \frac{V_S}{(6 \div 8) f_{max}}$$

Smorzamento alla Rayleigh

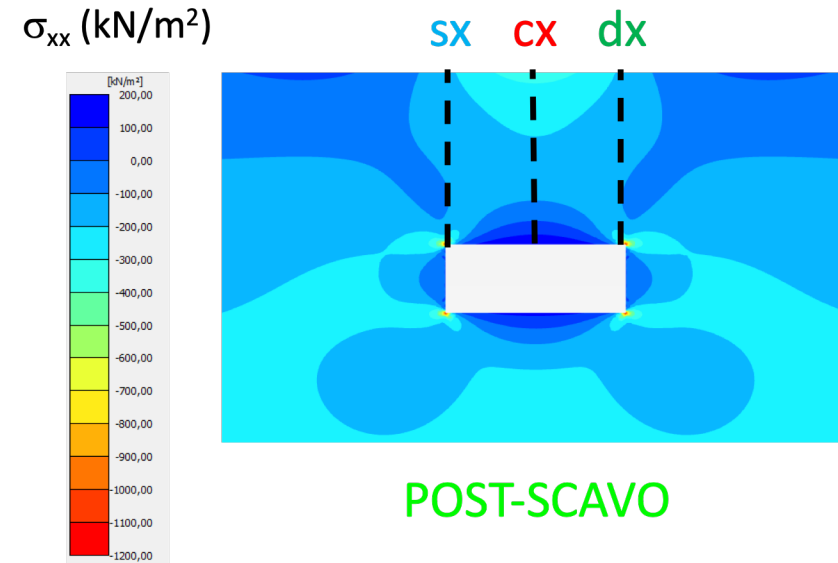
$$[C] = \alpha_R [M] + \beta_R [K]$$

Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche

ESEMPIO: caso cavità antropica
Modello numerico FEM PLAXIS 2D



PRE-SCAVO

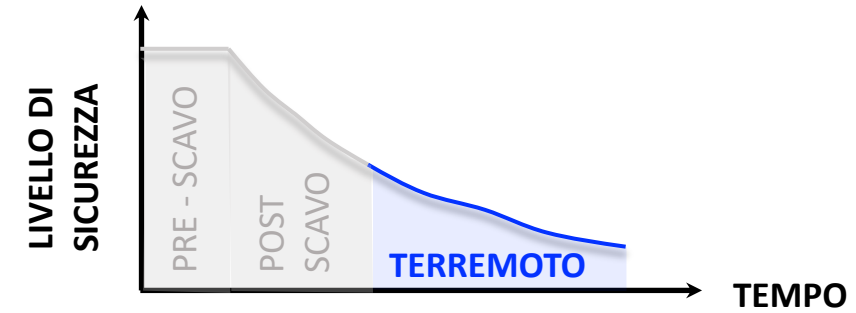


POST-SCAVO

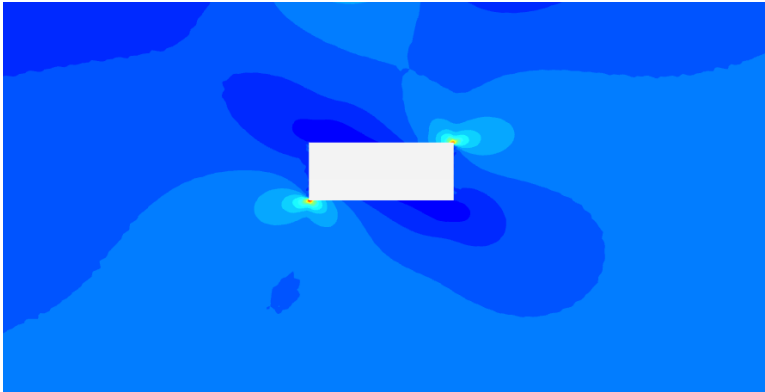
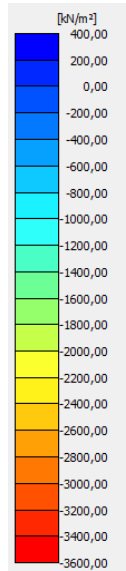
- compressione
+ trazione

Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche

ESEMPIO: caso cavità antropica
Modello numerico FEM PLAXIS 2D

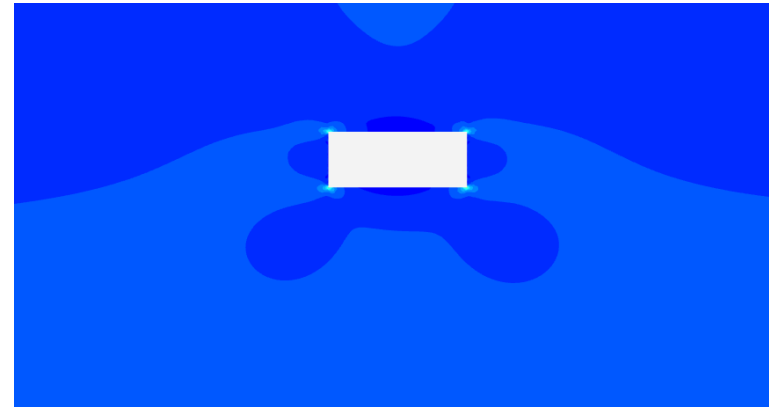
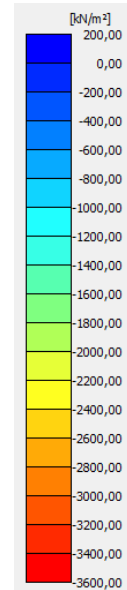


σ_{xx} (kN/m²)



PICCO TERREMOTO (6.15s)

σ_{xx} (kN/m²)

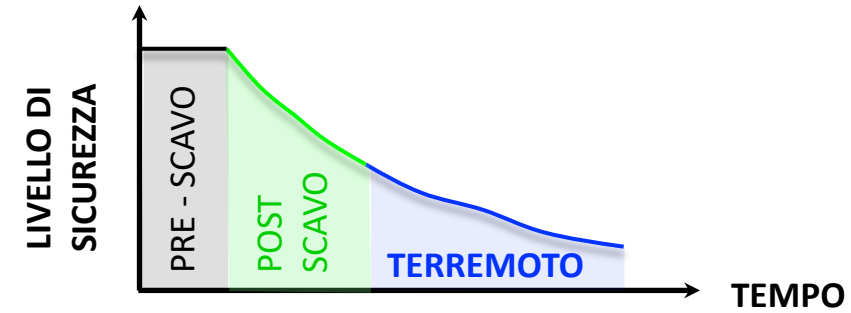


FINE TERREMOTO (30s)

- compressione
+ trazione

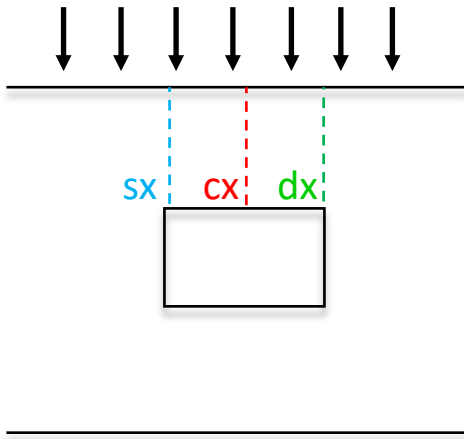
Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche

ESEMPIO: caso cavità antropica



COME VARIA LA STABILITA' DI UNA CAVITA' ANTROPICA NEL TEMPO?

$$FATTORE DI SICUREZZA = FS = \frac{M_{res}}{M_{load}}$$

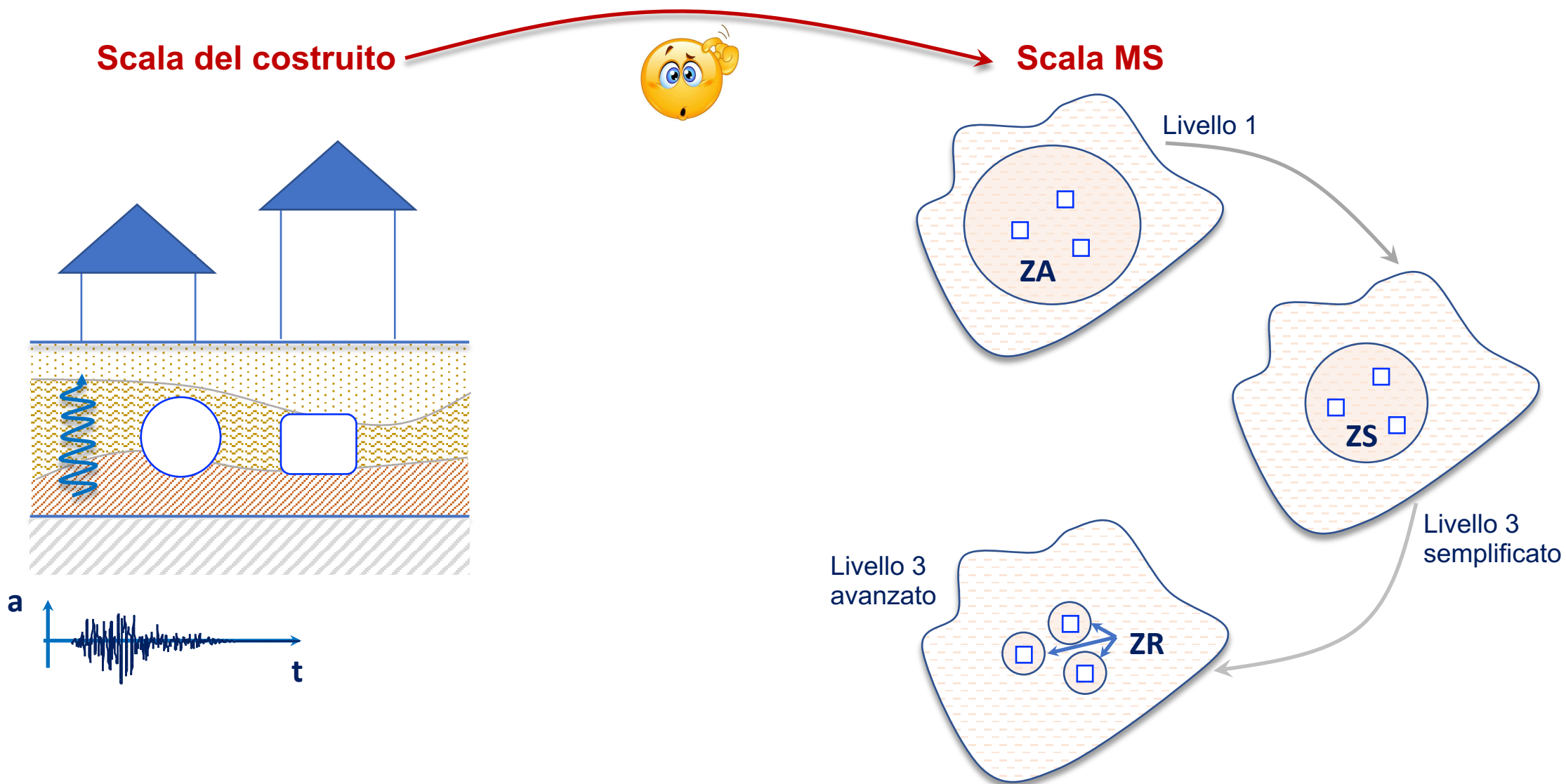


$$FS_{post-scavo} \rightarrow FS_{sx} = FS_{dx} = 12; FS_{cx} = 4$$

$$FS_{terremoto-picco} \rightarrow FS_{sx} = FS_{dx} = 1.6; FS_{cx} = 3.6$$

$$FS_{terremoto-finale} \rightarrow FS_{sx} = FS_{dx} = 8; FS_{cx} = 4.3$$

Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche nell'ambito della MICROZONAZIONE SISMICA

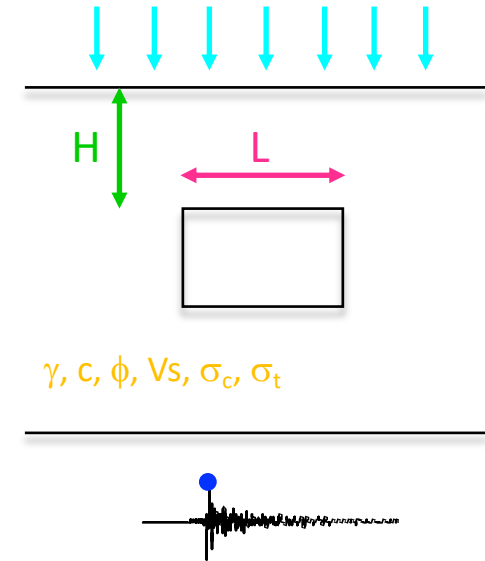


Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche nell'ambito della MICROZONAZIONE SISMICA : studio parametrico

STUDIO PARAMETRICO

Per una fissata geometria della cavità (geometria rettangolare):

- 1. variabilità larghezza della cavità' (L)
- 2. variabilità profondità calotta (H)
- 3. variabilità eventuale carico a piano campagna (q)
- 4. variabilità resistenza della roccia incassante
(classe 1-2-3: $\gamma, c, \phi, V_s, \sigma_c, \sigma_t$)
- 5. variabilità dell'intensità dell'azione sismica (PGA)

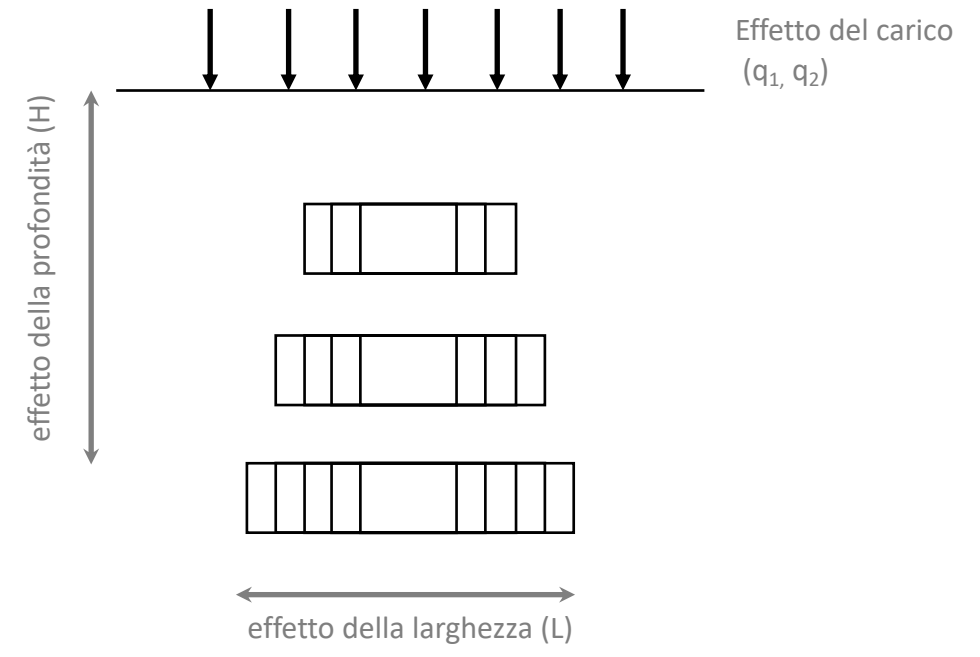


$\gamma, c, \phi, V_s, \sigma_c, \sigma_t$

Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche nell'ambito della MICROZONAZIONE SISMICA : studio parametrico

VARIABILITA' FATTORI PREDISPONENTI

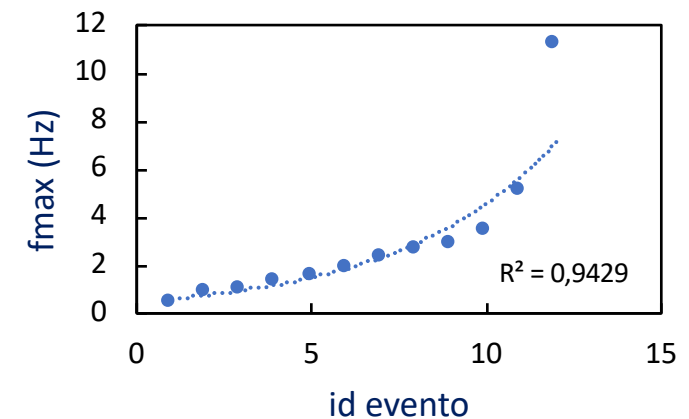
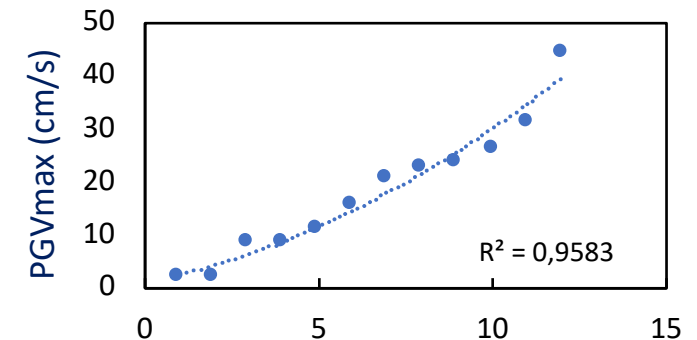
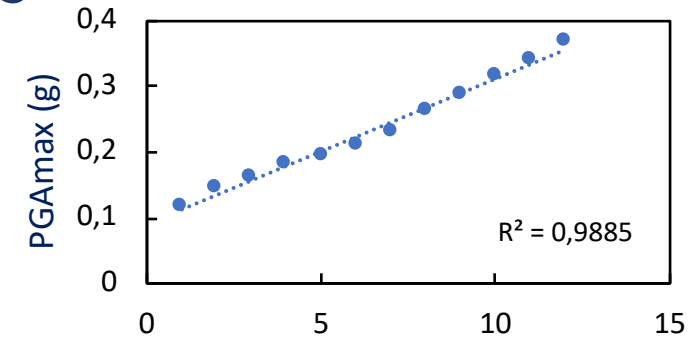
layout #	H (m)	L (m)	L/H (-)	q_1, q_2 (kN/m)
1.1	2	2	1	50, 150
1.2		5	2.5	
1.3		10	5	
2.1	5	5	1	
2.2		10	2	
2.3		15	3	
2.4		20	4	
3.1	10	10	1	
3.2		15	1.5	
3.3		20	2	



Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche nell'ambito della MICROZONAZIONE SISMICA : studio parametrico

VARIABILITA' FATTORI INnescANTI

id	Evento	Data	Mw	PGA _{max} (g)	f _{max} (Hz)
-	-	-	-	(g)	(Hz)
1	Greece	07/09/99	5.8	0.118	2.33
2	L'Aquila (Italy)	09/04/09	5.4	0.146	11.26
3	Southern Italy	09/09/98	5.6	0.161	1.56
4	Cosenza (Italy)	25/10/12	5.0	0.182	3.48
5	Central Italy	26/10/16	5.4	0.192	2.91
6	Central Italy - Visso	26/10/16	5.9	0.210	1.06
7	Southern Greece	15/09/86	4.8	0.232	1.34
8	Central Italy - Norcia	30/10/16	6.5	0.264	0.88
9	Greece	15/10/16	5.5	0.287	2.68
10	Imperial Valley	15/10/79	6.4	0.315	1.90
11	Friuli 3 th shock (Italy)	15/09/76	6.0	0.341	5.10
12	Loma Prieta	18/10/89	6.9	0.367	0.51

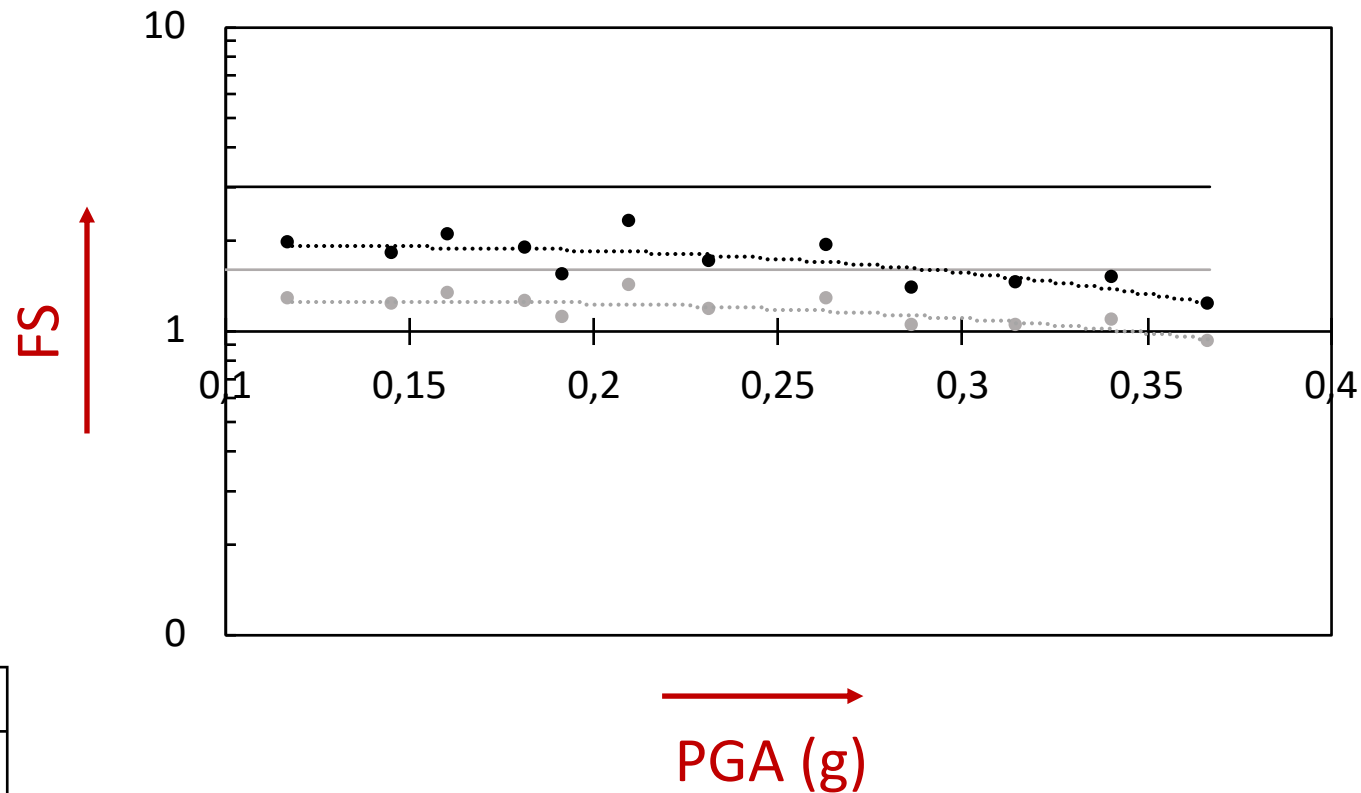


Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche nell'ambito della MICROZONAZIONE SISMICA : studio parametrico

ESEMPIO RISULTATI

CASO $L=5m$; $H=2m$; $L/H=2.5$

CLASSE ROCCIA 2



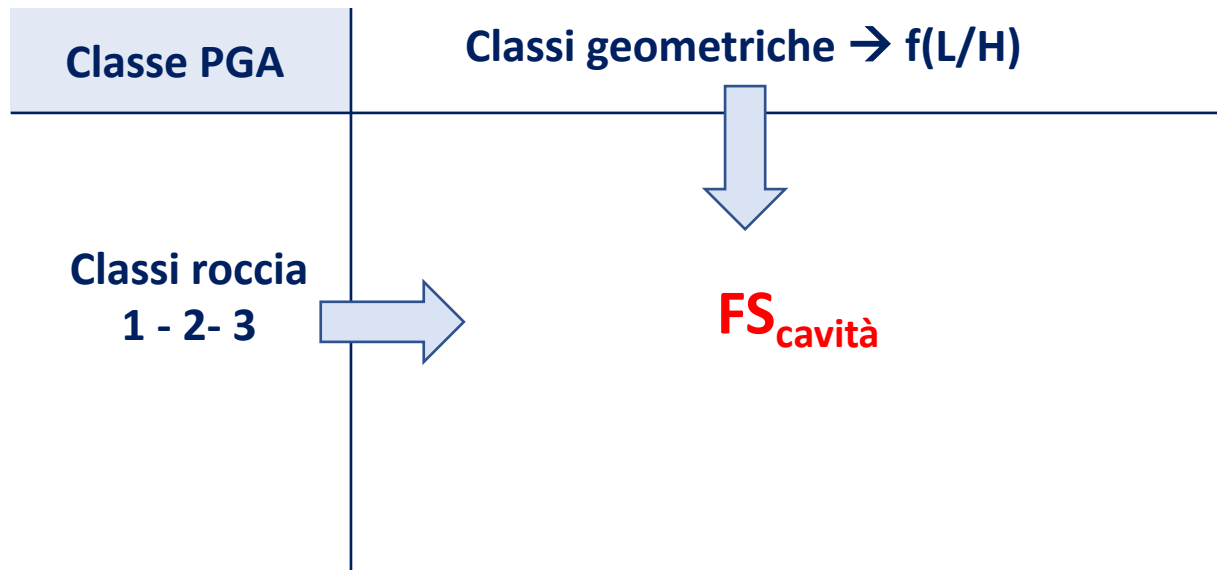
- FS decresce con l'aumentare di PGA;
- FS più alti per carichi (q) minori;

LEGENDA

	q_1	q_2
$FS_{statico}$	—	—
$FS_{dinamico}$	●	●

Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche nell'ambito della MICROZONAZIONE SISMICA : studio parametrico

ABACO tipo per MS



Vulnerabilità di cavità sotto azioni sismiche

Materiale di lavoro per una LINEE GUIDA per la valutazione della Vulnerabilità Sismica di Cavità Sotterranee (LG VSCS)

AGGIORNAMENTO degli ICMS

ICMS, 2008



- Instabilità di versante
- Liquefazione
- Faglie attive e capaci
- Densificazioni
- Cavità sotterranee

LINEE GUIDA DISPONIBILI



Instabilità di versante, 2017



Liquefazione, 2017

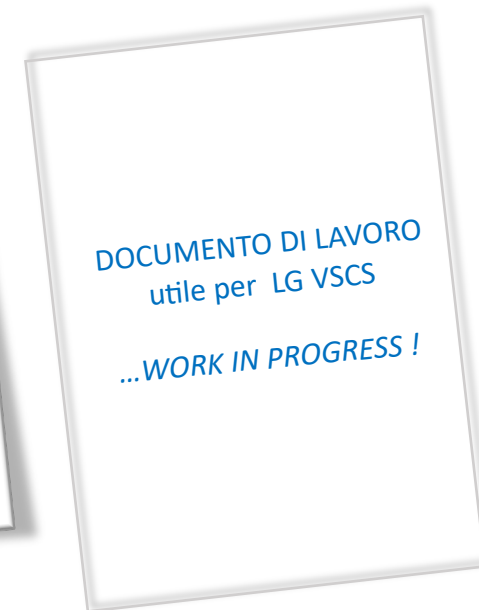


Faglie attive e Capaci, 2015

DOCUMENTI DI LAVORO PON

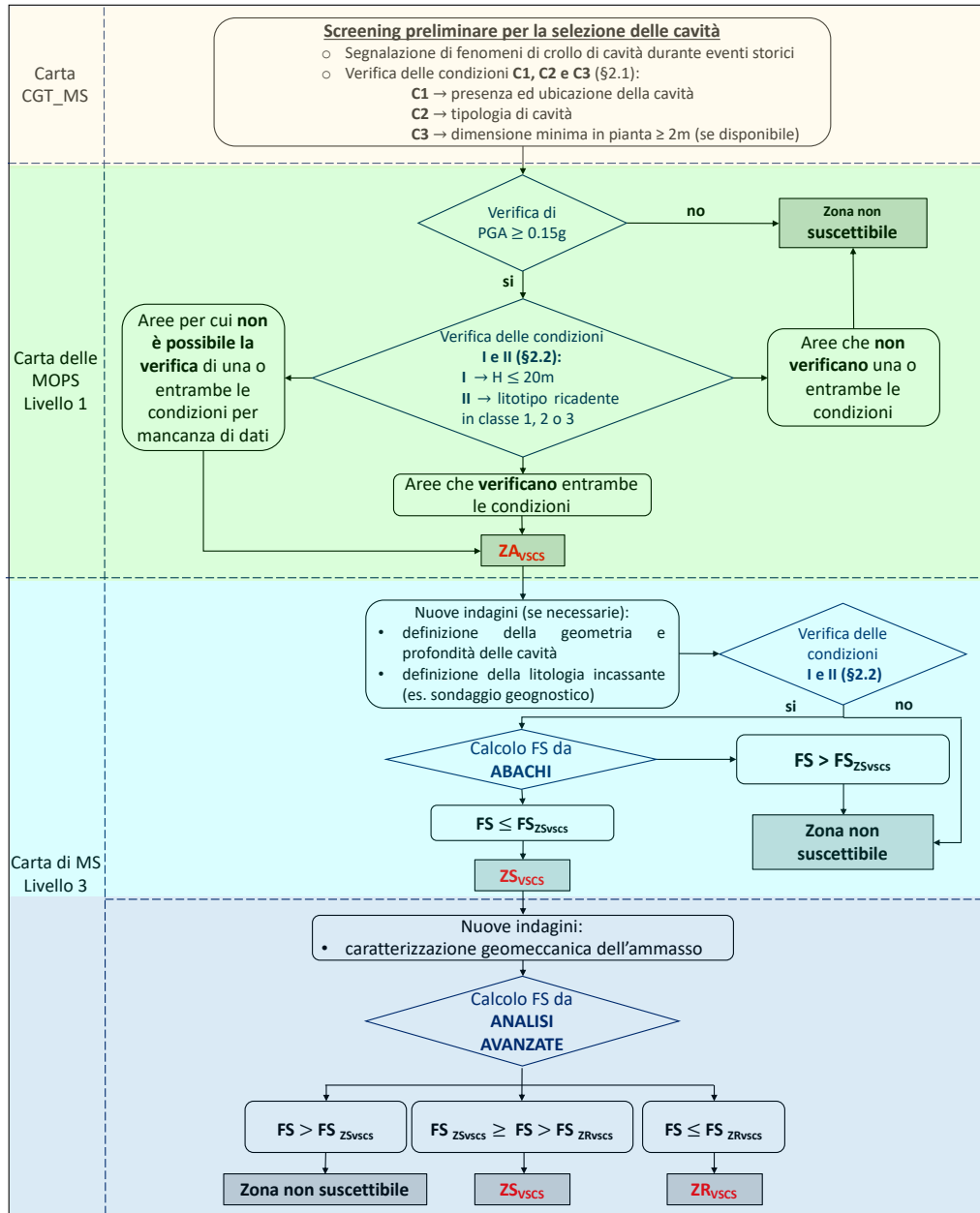


Densificazioni



*Vulnerabilità
Sismica di Cavità Sotterranee*

Proposta di procedura per una LINEA GUIDA per la valutazione della Vulnerabilità Sismica di Cavità Sotterranee (LG VSCS)



➤ SELEZIONE PRELIMINARE DELLE CAVITA' – CARTA GEOLOGICO-TECNICA

LIVELLO 1 MS

➤ INDIVIDUAZIONE ZONE DI ATTENZIONE MEDIANTE VERIFICA CONDIZIONI INNESCANTI E PREDISPONENTI

LIVELLO 3 MS

➤ INDIVIDUAZIONE ZONE DI SUSCETTIBILITA' MEDIANTE VALUTAZIONE DELLA STABILITA' DELLA CAVITA' (FS) CON APPROCCIO SEMPLIFICATO (da ABACO)

➤ INDIVIDUAZIONE ZONE DI RISPETTO MEDIANTE VALUTAZIONE DELLA STABILITA' DELLA CAVITA' (FS) CON APPROCCIO AVANZATO (da ANALISI NUMERICHE)

Conclusioni e considerazioni generali

RISULTATI

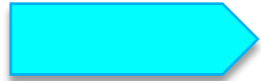


Proposta approccio per valutare la stabilità di cavità in condizioni sismiche



Proposta metodologia per valutare la stabilità di cavità in condizioni sismiche alla scala di MS

MIGLIORAMENTO DEL DATABASE DI RIFERIMENTO



Arricchimento database crolli sismoindotti



Miglioramento correlazioni con PGA evento

ATTUALI LIMITAZIONI e PROSECUZIONE DELL'ATTIVITA'



Estensione analisi ad altre forme di cavità



Effetti su cavità multiple



Cavità scavate in alternanze litostratigrafiche

Riferimenti bibliografici

1. de Silva F., Scotto di Santolo A. (2018) Probabilistic performance-based approaches to the static and seismic assessment of rock cavities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 112 (2018) 354–368.
2. de Silva F., Scotto di Santolo A. (2020) Post-earthquake resilience of a room and pillar rock cavity in Naples. In: Calvetti F., Cotecchia F., Galli A., Jommi C. (eds) *Geotechnical Research for Land Protection and Development*. CNRIG 2019. *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 40. 229-308. Springer, Cham.
3. Evangelista A., Feola A., Flora A., Lirer S., Maiorano R.M.S. (2000) Numerical analysis of roof failure mechanisms in a soft rock. *GEOEng* 2000. Melbourne.
4. Evangelista L., Landolfi L., D’Onofrio A., Silvestri F. (2016) The influence of the 3D morphology and cavity network on the seismic response of Castelnuovo hill to the 2009 Abruzzo earthquake. *Bull Earthquake Eng* (2016) 14:3363–3387 DOI 10.1007/s10518-016-0011-8.
5. Fabozzi S., Licata V., Autuori S., Bilotta E., Russo G., Silvestri F. (2017) Prediction of the seismic behavior of an underground railway station and a tunnel in Napoli (Italy). *Underground Space* 2 (2017) 88–105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.undsp.2017.03.05>.
6. Fabozzi S., de Silva F., Nocentini M., Peronace E., Bilotta E., Moscatelli M. (2021) Seismic vulnerability of shallow underground cavities in soft rock. *COMPdyn 2021 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Streamed from Athens, Greece, 27–30 June 2021
7. Fortunato C., Martino S., Prestininzi A., Romeo R.W., coauthors Fantini A., Sanandrea P. (2012) New release of the Italian catalogue of earthquake-induced ground failures (CEDIT). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, DOI: 10.4408/IJEGE.2012-02.O-05.
8. Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G. (2019) CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area. *Scientific Data* 6, 80. doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>.
9. Kuhlemeyer R.L and Lysmer J. (1973) Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 99(5), 421- 427.
10. Santo A., Ascione A., Del Prete S., Di Crescenzo G., Santangelo N. (2011) Collapse sinkholes distribution in the carbonate massifs of Central and Southern Apennines. *Acta Carsologica* 40 (1), 95–112. <https://doi.org/10.3986/ac.v40i1.31>.
11. Scotto di Santolo A, Evangelista L, Silvestri F, et al. (2015) Investigations on the stability conditions of a tuff cavity: the Cimitero delle Fontanelle in Napoli. *Riv Ital di Geotec.* 2015:28–46.
12. Scotto di Santolo A, Evangelista L, Evangelista A. Analysis of the stability of a rock cavern: the Fontanelle cemetery. In: Lollino G, Giordan D, Marunteanu C, Christaras B, Yoshinori I, Margottini C, eds. *Engineering Geology for Society and Territory*. Cham: Springer; 2015.; 8.
13. Vinale F. Caratterizzazione del sottosuolo di un’area campione di Napoli ai fini della microzonazione sismica. *Riv Ital Geotec.* 1988;22(3):77–100 [in Italian].

Stabilità di cavità sotterranee in condizioni sismiche

GRUPPO DI LAVORO

Stefania Fabozzi ¹, Emilio Bilotta ², Filomena de Silva ², Massimiliano Moscatelli ¹, Giuseppe Naso ³, Marco Nocentini ¹, Edoardo Peronace ¹, Paolo Tommasi ¹

¹ *Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (CNR IGAG)*

([stefania.fabozzi](mailto:stefania.fabozzi@igag.cnr.it); [massimiliano.moscatelli](mailto:massimiliano.moscatelli@igag.cnr.it); [marco.nocentini](mailto:marco.nocentini@igag.cnr.it); [edoardo.peronace](mailto:edoardo.peronace@igag.cnr.it); [paolo.tommasi](mailto:paolo.tommasi@igag.cnr.it))@igag.cnr.it

² *Università di Napoli Federico II*

([emilio.bilotta](mailto:emilio.bilotta@unina.it); [filomena.desilva](mailto:filomena.desilva@unina.it))@unina.it

³ *Dipartimento di Protezione Civile (DPC)*

([giuseppe.naso](mailto:giuseppe.naso@protezionecivile.it))@protezionecivile.it

Grazie per l'attenzione!