

SULLA VARIABILITÀ SPAZIALE DELL'ACCELERAZIONE NEL CALCOLO DELLE OPERE DI SOSTEGNO IN CONDIZIONI SISMICHE

Pierluigi Alesiani

*Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU),
Università Politecnica delle Marche*

p.alesiani@pm.univpm.it

Paolo Ruggeri, Vivienne M. E. Fruzzetti, Giuseppe Scarpelli

*Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU),
Università Politecnica delle Marche*

Sommario

Per il calcolo delle opere di sostegno in condizioni sismiche con il metodo pseudo-statico si assume che un fissato valore di accelerazione equivalente, costante nello spazio e nel tempo, agisca uniformemente nel cuneo di spinta. Al fine di definire tale accelerazione, la nuova proposta di Eurocodice 8 (EN 1998-5) introduce una metodologia che tiene conto dell'asincronia del moto sismico agente sulle opere di sostegno per mezzo di un'analisi di risposta sismica locale 1D. Si tratta di un affinamento delle usuali metodologie che prevedono la definizione di un coefficiente di deformabilità in funzione di due soli parametri: altezza dell'opera e categoria di sottosuolo (v. *NTC 2018*). In questa memoria, l'applicazione ad un caso reale mostra come la nuova metodologia consenta un utilizzo più consapevole del metodo pseudo-statico; d'altra parte, i risultati di analisi dinamiche 2D evidenziano significativi effetti di variabilità spaziale del moto invitando a riflessioni sull'opportunità di considerare anche gli effetti geometrici nella propagazione delle onde sismiche.

1. Introduzione

Il progetto sismico delle opere di sostegno è tuttora largamente basato sul metodo pseudo-statico, approccio che traduce il reale fenomeno di interazione dinamica opera-terreno in una azione aggiuntiva da considerare sull'opera in esame, funzione di un'accelerazione equivalente costante nello spazio e nel tempo. L'affidabilità del metodo ricade quindi nella definizione di tale valore di accelerazione affinché la stessa sia rappresentativa del moto sismico atteso nel volume significativo dell'opera. Negli anni, una serie di ricerche ha progressivamente sistematizzato la valutazione dell'accelerazione equivalente correlandola ad alcune parametri sintetici legati alla geometria del problema e al comportamento sismico dei terreni presenti; approcci semplificati in tal senso sono quindi confluiti nelle normative nazionali ed europee.

Il lavoro svolto, di cui si riferisce in questa nota, ha previsto l'analisi dinamica 2D di un caso reale costituito da una paratia in un deposito incoerente asciutto e l'applicazione del metodo pseudo-statico secondo quanto indicato da NTC2018 e dall' Eurocodice 8 per la stima di una accelerazione media equivalente che tenga conto della variabilità spaziale del moto sismico. Relativamente a quest'ultimo aspetto si è proceduto nel modo seguente:

- definizione del modello geotecnico per le analisi di risposta sismica locale (RSL) 1D;
- selezione di 7 accelerogrammi spettrocompatibili in media con lo spettro di normativa;
- esecuzione di analisi di risposta sismica locale 1D con modello del terreno lineare-equivalente, visco-elastico lineare e non lineare;
- determinazione dell'accelerazione equivalente al variare della profondità di scavo.

L'esecuzione di analisi di risposta sismica locale 1D ha permesso di valutare il fattore di amplificazione stratigrafica S_s e confrontarlo con i valori di Norma e i dati di letteratura.

Gli accelerogrammi selezionati per le analisi di RSL 1D sono i medesimi con cui sono state eseguite le analisi dinamiche 2D.

Non sono state invece tenute in conto la capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza (dissipazione dell'energia sismica per accumulo di deformazioni permanenti) e la conseguente ulteriore riduzione dell'accelerazione media equivalente sull'opera.

2. Accelerazione equivalente per le analisi pseudo-statiche

La rigidità del terreno regola la velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) e influenza i periodi fondamentali di vibrazione di un deposito; ciò si traduce nel fatto che, per elevati valori di V_s , il moto delle particelle di terreno lungo la verticale tende ad essere sincrono, mentre, al diminuire di tale velocità, il moto diviene progressivamente più asincrono, con porzioni di terreno accelerate in maniera differenziata lungo la verticale. L'asincronia del moto determina quindi una riduzione della spinta sismica complessivamente agente su di un'opera di sostegno flessibile che attraversi il deposito in questione.

Le normative tecniche vigenti permettono una valutazione semplificata di tale variabilità spaziale dell'accelerazione orizzontale tramite un coefficiente di deformabilità, denominato α nelle NTC 2018 e β_H negli Eurocodici. Questo coefficiente assume valori inferiori o uguali all'unità e, nel contesto della determinazione dell'accelerazione equivalente \bar{a}_{eq} , agisce come un fattore riduttivo dell'accelerazione di picco a_{max} attesa in superficie ($\bar{a}_{eq} = \alpha \cdot a_{max}$; $\bar{a}_{eq} = \beta_H \cdot a_{max}$). Secondo la normativa tecnica nazionale α può essere valutato tramite un abaco in funzione dell'altezza complessiva della paratia H e della categoria di sottosuolo. Analogamente, gli Eurocodici mettono in relazione β_H con l'altezza dell'opera di sostegno a contatto con il terreno e con la lunghezza d'onda prevalente λ dell'input sismico considerato.

Nell'ultimo draft di Eurocodice 8 Annex A (*EC8 202X*, CEN/TC 250/prEN 1998-5, 2021) viene introdotta anche una metodologia analitica per la valutazione dell'accelerazione equivalente \bar{a}_{eq} che fa uso di una analisi preliminare di risposta sismica locale 1D, attraverso la quale si tiene conto dell'effettiva deformabilità dei terreni nel sito di interesse. L'accelerazione equivalente viene quindi definita, per mezzo dello *stress ratio*, dalla formula:

$$\beta_H \cdot a_{max} = \bar{a}_{eq} = \frac{g}{\sigma_{v,H}} \frac{\sum_{i=1}^n \max[\tau_{i,H}(t)]}{n} \quad (1)$$

dove:

- $\max[\tau_{i,H}(t)]$ è il massimo valore dello sforzo tangenziale, relativo all'i-esimo accelerogramma, alla profondità H ;
- $\sigma_{v,H}$ è la tensione totale verticale agente alla profondità H ;
- n è il numero di accelerogrammi utilizzati nell'analisi di risposta sismica locale.

In buona sostanza l'esecuzione di una analisi di risposta sismica locale 1D permette di considerare al meglio l'effettiva propagazione dell'onda sismica nel deposito di interesse e il massimo valore della tensione tangenziale ad ogni profondità esprime sinteticamente l'accelerazione equivalente che viene attinta nella porzione di terreno al di sopra della profondità considerata.

3. Analisi numeriche di risposta sismica locale

Le analisi di risposta sismica locale svolte si riferiscono a un sito reale dove deve essere costruita un'opera di sostegno a servizio di un'importante infrastruttura stradale dell'Italia meridionale.

L'azione sismica è stata definita a partire dalla pericolosità sismica di base per un tempo di ritorno di 475 anni, selezionando sette accelerogrammi spettrocompatibili (di periodo medio $T_m = 0,6$ s) i cui spettri di risposta elastici sono riportati in figura 1a. Il profilo geotecnico di sottosuolo consiste di uno

strato di terreno granulare asciutto di 26 m di spessore, costituente un terrazzo marino, caratterizzato da un profilo di velocità delle onde di taglio crescente con la profondità, a cui corrispondono una velocità equivalente $V_{s,eq} = 356 \text{ m/s}$. Il terreno granulare poggia su uno strato di base che è stato assunto come bedrock elastico ($V_s \geq 800 \text{ m/s}$) nelle analisi numeriche. La stratigrafia di riferimento è quindi classificabile nella categoria E di sottosuolo. I principali parametri per la caratterizzazione geotecnica sono riportati in fig. 1b, la curva di decadimento della rigidezza a taglio normalizzata e la curva del rapporto di smorzamento in fig. 1c.

La schematizzazione geometrica adottata è sia mono-dimensionale che bi-dimensionale (fig. 3a). In quest'ultimo caso si è considerato uno scavo a parete verticale di altezza $h = 16.5 \text{ m}$ per una altezza complessiva dell'opera di sostegno $H = 26 \text{ m}$, come desunto dagli elaborati progettuali dell'opera considerata.

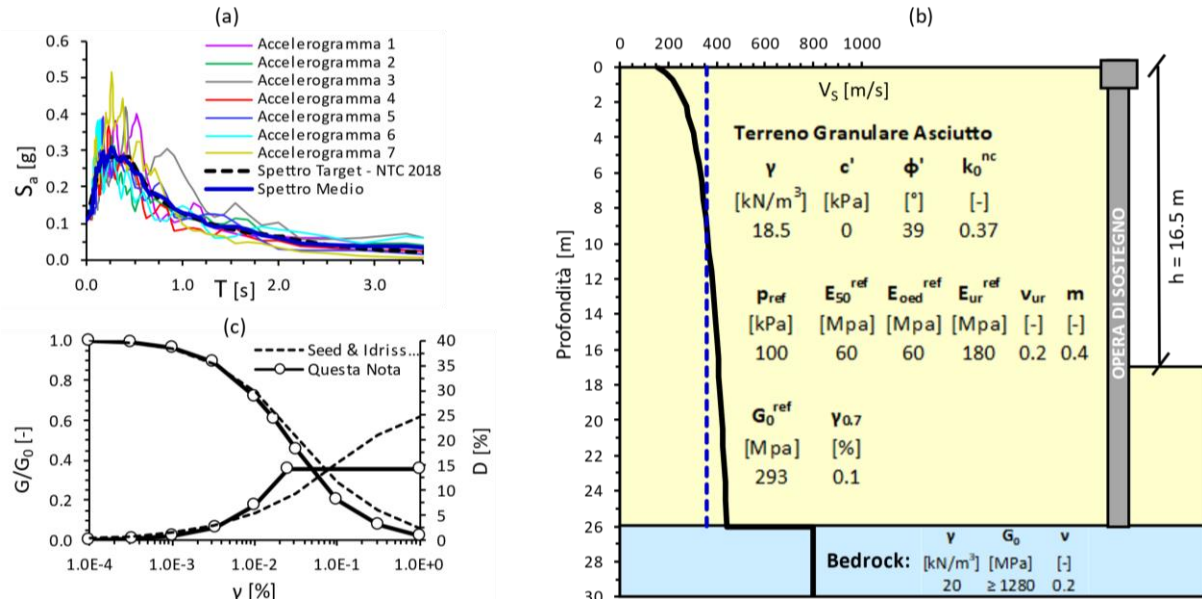


Fig 1. Caso studio: (a) Spettri di risposta elastici degli accelerogrammi selezionati. (b) Modello geotecnico. (c) Curva di decadimento del modulo di taglio e curva di smorzamento dello strato deformabile.

3.1 Analisi 1D

Sono state svolte analisi di risposta sismica della colonna mono-dimensionale adottando per il terreno tre diversi modelli: visco-elastico lineare, lineare equivalente e non lineare.

Le analisi con modello di terreno visco-elastico lineare e lineare equivalente sono state eseguite nel dominio delle frequenze per mezzo del codice di calcolo *DEEPSOIL* (Hashash et al, 2020). Nel modello visco-elastico lineare il valore dello smorzamento è costante. Nell'analisi lineare equivalente, il modello iperbolico di input permette di tenere conto della dipendenza del comportamento del terreno dal livello di deformazione di taglio γ indotto dall'input sismico. Per rendere le analisi confrontabili tra loro, allo strato deformabile del modello visco-elastico lineare si è assegnato uno smorzamento pari al 3,5%, compatibile con un valore medio di deformazione $\gamma \cong 1 \cdot 10^{-2}\%$.

Le analisi non lineari sono state eseguite nel dominio del tempo per mezzo del software agli elementi finiti *PLAXIS*, optando per il modello di materiale *hardening soil model with small strain stiffness* che consente di simulare il comportamento dell'elemento di terreno soggetto a sollecitazioni cicliche.

I risultati della RSL 1D hanno consentito di valutare gli effetti stratigrafici di modificazione dell'onda sismica che attraversa il deposito deformabile. Tali effetti sono sintetizzati da un fattore di amplificazione S_s definito come rapporto tra l'accelerazione massima alla superficie del deposito in condizioni di campo libero, $a_{max,1D}$ e quella attesa su bedrock affiorante, a_g :

$$S_S = \frac{a_{max1D}}{a_g} \quad (2)$$

Il coefficiente S_S risulta dipendere dal rapporto tra il contenuto in frequenza dell'input sismico e le frequenze proprie di vibrazione della colonna di terreno.

In figura 2a i profili di accelerazione massima medi per il set di accelerogrammi spettrocompatibili selezionati sono affiancati dai rispettivi valori di S_S di fig. 2b.

I risultati delle tre tipologie di analisi svolte risultano coerenti tra loro, con valori di picco attesi al sito compresi nel range $0,16 \div 0,18g$ e fattori di amplificazione stratigrafica quindi compresi tra circa 1,5 e 1,6. Si evidenzia quindi un buon accordo con S_S delle attuali *NTC 2018* ($S_S = 1,6$) e con il futuro *EC8 202X* ($S_S \cong 1,5$).

È inoltre possibile osservare come gli effetti di non-linearità concentrati nei primi 10 m di profondità dalla superficie conducano a un maggiore smorzamento che si traduce in un'amplificazione sensibilmente inferiore.

Si osserva nell'insieme un'apprezzabile corrispondenza con quanto riportato dalla letteratura scientifica di revisione critica dei fattori di amplificazione stratigrafica della normativa (Tropeano et al., 2018; Pagliaroli et al., 2019), pur confermando la spiccata variabilità di tali effetti, per la categoria E di sottosuolo imputabile alla complessa interazione tra velocità delle onde, spessore del deposito e contenuto in frequenza dell'input sismico (Paolucci et al., 2021).

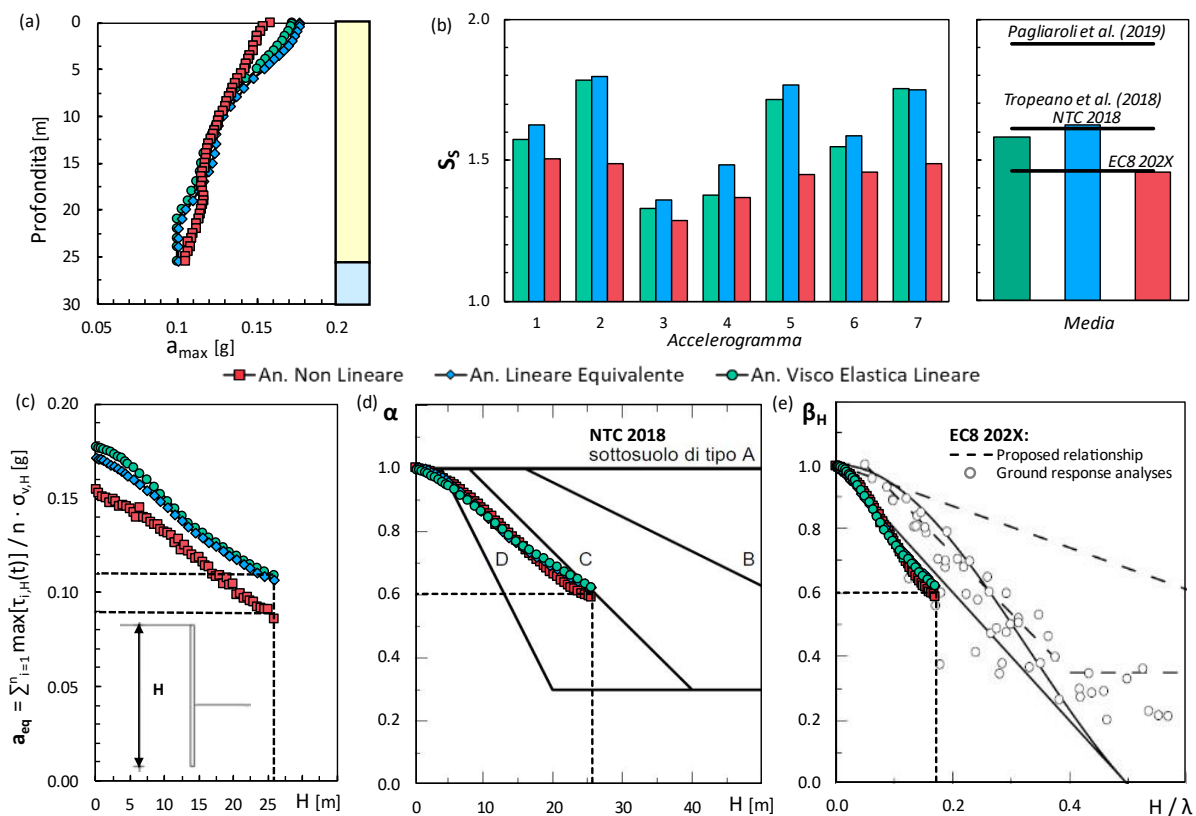


Fig 2. Risultati delle analisi numeriche 1D: (a) Accelerazione massima. (b) Fattore di amplificazione stratigrafica S_S . (c) Accelerazione media equivalente. (d) ed (e) Coefficiente di deformabilità dei terreni.

Dalle analisi di RSL 1D è stata quindi valutata l'accelerazione equivalente al variare dell'altezza H dell'opera applicando l'equazione (1) ai risultati delle analisi numeriche (figura 2c). Tale risultato può essere tradotto nel coefficiente di deformabilità, al variare dell'altezza H normalizzando \bar{a}_{eq} su a_{max} ; le figure 2d e 2e mostrano il risultato della normalizzazione per il caso studio in sovrapposizione ai rispettivi abachi di *NTC 2018* ed *EC8 202X*. Le tre tipologie di analisi forniscono risultati sostanzialmente coincidenti per i profili normalizzati e le lievi differenze in termini di \bar{a}_{eq} tra analisi

lineari e non-lineari dipendono dalla diversa amplificazione valutata dai modelli negli strati più superficiali. Per la tipologia di opera di sostegno presa a riferimento, di altezza $H = 26\text{ m}$, l'effetto dell'asincronia del moto delle particelle di terreno nella colonna stratigrafica di monte determina un'accelerazione equivalente inferiore del 40% rispetto al valore di picco atteso in superficie.

3.2 Analisi 2D

Per il modello bi-dimensionale realizzato nell'ambiente di calcolo *PLAXIS* è stata scelta la sola procedura di analisi visco-elastica lineare, senza modellare la struttura. La dissipazione di energia è introdotta numericamente mediante uno smorzamento alla Rayleigh, fissando come frequenze target la prima frequenza naturale di vibrazione del deposito e quella fondamentale dell'input sismico. Al fine di limitare l'influenza della riflessione delle onde sulla soluzione del problema dinamico, nel modello si sono introdotti dei bordi assorbenti a sufficiente distanza dalla zona di interesse (scavo). Ai bordi verticali è stata assegnata la condizione al contorno *free-field* e, alla base, la condizione *compliant base*, per trasferire quindi l'input sismico al modello e al contempo assorbire le onde riflesse incidenti. La dimensione degli elementi finiti, pari a circa 1 m , è stata scelta in modo da evitare il filtraggio delle frequenze nel range di interesse e assicurare che l'onda sismica, durante il singolo step di calcolo, non percorra una distanza superiore a quella minima tra due nodi.

La valutazione degli effetti geometrici sulla risposta sismica locale viene generalmente eseguita disaccoppiandoli da quelli puramente stratigrafici. Per fare ciò, i risultati delle analisi di RSL in 2D, comprensive di entrambi gli effetti geometrici e stratigrafici, sono confrontati con i risultati delle analisi 1D rappresentative dei soli effetti stratigrafici (condizioni di campo libero). Tale confronto può essere condotto nel dominio del tempo tramite un fattore di amplificazione A_h definito come il rapporto tra i valori di accelerazione massima calcolati nelle analisi bi-dimensionali e quelle mono-dimensionali:

$$A_h = \frac{a_{max2D}}{a_{max1D}} \quad (3)$$

Tale fattore risulta funzione del contenuto in frequenza dell'input sismico e del dislivello monte-valle h attraverso il rapporto h/λ tra quest'ultima altezza e la lunghezza d'onda prevalente del moto incidente (Ashford et al., 1997). Secondo Rizzitano et al. (2014) l'interazione tra effetti geometrici e stratigrafici non è sempre disaccoppiabile ed è esaltata da bassi valori di rapporto di impedenza e dal comportamento non lineare del terreno.

Per il caso studio presentato ($h/\lambda = H/T_m \cdot V_s = 0,11$), la variabilità spaziale del moto sismico dovuta agli effetti geometrici è evidente se si osserva l'andamento del fattore di amplificazione a piano campagna a monte dello scavo; mediando i valori risultanti dei sette accelerogrammi selezionati si ottiene il grafico mostrato in figura 3a. Il valore massimo del fattore di amplificazione risulta pari al 60% in corrispondenza del ciglio dello scavo. Allontanandosi dallo spigolo, l'amplificazione diminuisce fino a ritrovare le condizioni di campo libero a una distanza pari al doppio del dislivello monte-valle. Il confronto con studi precedenti (Soccodato e Tropeano, 2015; Alesiani, 2021) conferma sia l'ordine di grandezza del fattore di amplificazione che la distanza a cui il fenomeno si esaurisce.

4. Conclusioni

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto le *NTC 2018* prevedono che l'effetto della risposta sismica locale sia valutata tramite specifiche analisi e solo in subordine consentono l'utilizzo di un approccio semplificato, funzione delle categorie di sottosuolo. La diffusione nella pratica professionale di tali analisi permette di estendere il campo di applicazione ingegneristico delle analisi di RSL alla valutazione delle spinte sismiche sulle opere di sostegno. In tal senso la metodologia prevista dal nuovo Eurocodice sismico *EC8 202X* per la valutazione dell'accelerazione media equivalente risulta uno strumento operativo ben integrabile nelle analisi pseudo-statiche tipicamente utilizzate per il progetto delle opere di sostegno in condizioni sismiche. Tale approccio rende l'analisi pseudo-statica più aderente alle effettive condizioni del sito in cui viene realizzata l'opera senza introdurre le

complicazioni delle analisi dinamiche complete, ancora non mature per un uso esteso a livello professionale.

Il caso studio preso in esame, analizzato anche in un dominio bi-dimensionale, ha però evidenziato che la variazione spaziale dell'azione sismica risente di effetti geometrici ancora non contemplati in alcuna analisi semplificata.

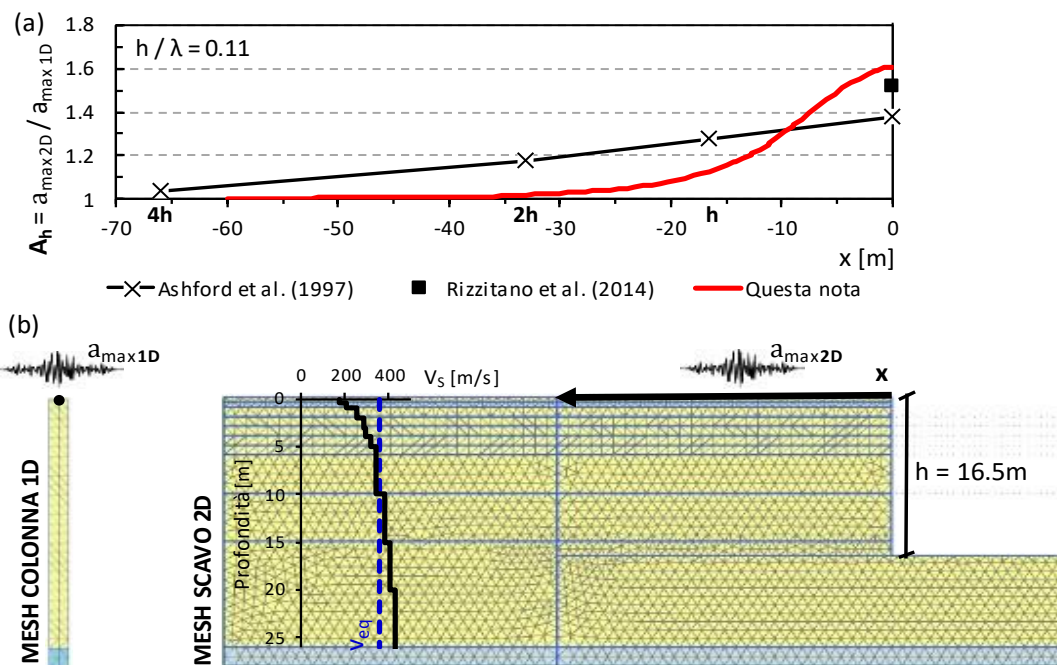


Fig 3. (a) Profilo in direzione orizzontale del fattore di amplificazione per effetti geometrici 2D. (b) Geometria dei modelli numerici 1D e 2D.

Bibliografia

- Alesiani P. (2021). “Comportamento sismico delle opere di sostegno in vista della nuova generazione degli Eurocodici”. Tesi di Laurea Magistrale, Università Politecnica delle Marche.
- Ashford, S.A., Sitar, N., Lysmer, J., Deng, N. (1997). “Topographic effects on the seismic response of steep slopes”. Bulletin of the Seismological Society of America, 87 (3), pp. 701-709.
- CEN/TC 250/prEN 1998-5:2021 (2021). “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 5”.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Okan, I., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2020) “DEEPSOIL 7.0, User Manual”. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Pagliaroli, A., Papa, V., & Pisotta, I. (2019). “Stratigraphic amplification factors based on parametric 1D site response analyses and KiK-net downhole recordings: Evaluation and comparison with code provisions”. In Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions (pp. 4283-4291). CRC Press.
- Paolucci, R., Aimar, M., Ciancimino, A., Dotti, M., Foti, S., Lanzano, G., ... & Vanini, M. (2021). “Checking the site categorization criteria and amplification factors of the 2021 draft of Eurocode 8 Part 1–1”. Bulletin of Earthquake Engineering, 19(11), 4199-4234.
- Rizzitano, S., Cascone, E., & Biondi, G. (2014). “Coupling of topographic and stratigraphic effects on seismic response of slopes through 2D linear and equivalent linear analyses”. Soil Dyn. and Earth. Eng., 67, 66-84.
- Soccodato, F. M., & Tropeano, G. (2015). “The role of ground motion characters on the dynamic performance of propped retaining structures”. In Proceedings of the 6ICEGE, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand (pp. 1-4).
- Tropeano, G., Soccodato, F. M., & Silvestri, F. (2018). “Re-evaluation of code-specified stratigraphic amplification factors based on Italian experimental records and numerical seismic response analyses”. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 110, 262-275.