

STUDIO DELL'EFFETTO DELL'ETEROGENEITÀ SULLA RISPOSTA SISMICA DI VALLI ALLUVIONALI TRAPEZIE

Giorgio Andrea Alleanza

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale – Università degli Studi di Napoli Federico II
giorgioandrea.alleanza@unina.it

Anna d'Onofrio

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale – Università degli Studi di Napoli Federico II
donofrio@unina.it

Francesco Silvestri

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale – Università degli Studi di Napoli Federico II
francesco.silvestri@unina.it

Sommario

I terreni che costituiscono le valli alluvionali sono in genere caratterizzati da una più o meno significativa eterogeneità delle proprietà meccaniche che può contribuire e modificare la variabilità della risposta sismica in superficie lungo la valle. Nella presente nota si riportano i risultati preliminari di uno studio numerico volto ad indagare l'influenza di tale eterogeneità sulla risposta della valle modellando la risposta viscoelastica di valli trapezie caratterizzate da tre diversi profili verticali di velocità delle onde di taglio. I risultati ottenuti, benché non conclusivi, mostrano che l'eterogeneità delle proprietà meccaniche non modifica significativamente il fattore di aggravio determinato assumendo un profilo omogeneo di velocità.

1. Introduzione

Gli effetti bidimensionali nelle valli trapezie superficiali (Figura 1) sono generati principalmente dal contatto inclinato fra la formazione rocciosa di base ed i depositi deformabili. Infatti, ai bordi della valle si genera una complessa interazione fra le onde provenienti dal substrato, quelle riflesse e quelle trasmesse all'interno del bacino. Quest'ultime non si propagano più in direzione verticale ma con una certa angolazione, funzione del contrasto d'impedenza e dell'angolo d'inclinazione dei bordi, che causa l'insorgere di onde superficiali che viaggiano all'interno della valle. L'influenza di tali fattori sulla risposta in superficie lungo la valle è stata ampiamente studiata da vari autori assumendo un modello visco-elastico omogeneo (Aki & Larner, 1970; Bard & Bouchon, 1980a,b, 1985; Alleanza et al., 2021; Alleanza, 2022).

Tuttavia, la complessa interazione tra le onde può essere ulteriormente influenzata dall'eterogeneità delle proprietà meccaniche dei depositi che riempiono la valle. Ad esempio, nel caso di terreni caratterizzati da una rigidità crescente con la profondità, dal piano campagna ai bordi della valle il contrasto d'impedenza fra la formazione rocciosa di base e i depositi deformabili non è più costante ma diminuisce con la profondità, ciò modifica l'angolo di trasmissione delle onde provenienti dal substrato, che non è più costante per tutto lo spessore della valle, come accade nel caso di valli omogenee. In tal caso le zone in cui i campi d'onda sono costruttivi si spostano verso i bordi della valle (Bard & Gariel, 1986).

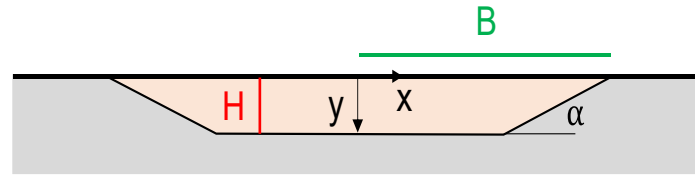


Fig. 1. Schema geometrico semplificato di valle alluvionale trapezia

2. Modello geotecnico

Al fine di valutare l'influenza dell'eterogeneità del profilo di velocità sulla risposta di valli trapezie, è stato condotto uno studio parametrico adottando un'unica geometria di valle trapezia, caratterizzata da uno spessore, H , pari a 30m ed una semilarghezza, B , di 120m (fattore di forma, $H/B = 0.25$), e un angolo d'inclinazione dei bordi, α , pari a 45° .

L'eterogeneità del profilo della velocità delle onde S , V_s , è stata modellata considerando tre diverse distribuzioni $V_s(z)$ tutte caratterizzate dalla stessa velocità equivalente pari a 270m/s definita come:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad (1)$$

in cui H è lo spessore del centro valle, h_i e $V_{s,i}$ lo spessore e la velocità delle onde di taglio dell' i -simo strato e n il numero totale degli strati.

Un primo profilo di velocità è stato ottenuto a partire dalla ben nota relazione potenza, con esponente minore di 1, che descrive la dipendenza della rigidezza a taglio iniziale, G_0 , dalla tensione di confinamento, e quindi dalla profondità, proposta da Rampello et al. (1994):

$$\frac{G_0(z)}{p_r} = S \cdot \left(\frac{p'(z)}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

Dove $p'(z)$ è la tensione sferica alla profondità z , p_r è la pressione di riferimento e p_a la pressione atmosferica. L'indice di rigidezza, S , e il coefficiente di rigidezza, n , sono stati definiti in accordo alle relazioni proposte da d'Onofrio & Silvestri (2001):

$$S = 217 + 805.84 \cdot \exp\left(\frac{PI(\%)}{18.94}\right) \quad (3)$$

$$n = 0.68 - 0.162 \cdot \exp\left(-\frac{PI(\%)}{23}\right) \quad (4)$$

come funzione dell'indice di plasticità, PI . Quest'ultimo è stato assunto pari al 15%, valore ritenuto rappresentativo dei tipici terreni alluvionali caratterizzati da una $V_{s,eq}$ pari a 270m/s. In accordo con le norme tecniche italiane (NTC18) essi appartengono, infatti, alla categoria di sottosuolo C tipicamente associata alle sabbie sciolte o poco addensate e alle argille a bassa o media consistenza. Per gli stessi terreni è stato inoltre assunto un valore del coefficiente di spinta a riposo, k_0 , di 0.5 ed un peso dell'unità di volume di 19 kN/m³.

La distribuzione del modulo descritta dall'Eq. 2 è stata quindi raccordata nei primi 10m con una distribuzione lineare tangente alla funzione potenza in corrispondenza dell'ordinata 10m, in modo da evitare di assumere una rigidezza irrealisticamente nulla al piano campagna. Il secondo profilo di velocità adottato nelle analisi è stato definito con l'obiettivo di massimizzare gli effetti dell'eterogeneità e, pertanto, non è immediatamente correlabile alle proprietà indice di terreni appartenenti alla categoria C delle norme tecniche. Esso è descritto dalla seguente relazione:

$$V_s(z) = 91 + 19.2 \cdot z^{0.813} \quad (5)$$

Con z la profondità considerata in metri e V_s in m/s. Si noti che anche in questo caso si è imposto che la velocità equivalente sia pari a 270m/s.

La velocità del *bedrock* è stata assunta costante con la profondità e pari a 800m/s mentre i pesi dell'unità di volume del terreno e del substrato sono stati posti rispettivamente pari a 19 e 22 kN/m³. Considerando per il deposito alluvionale un valore di velocità pari a quella equivalente un unico valore del contrasto di impedenza, I , definito come rapporto fra le impedenze sismiche del *bedrock* e del terreno pari a 3.43, è stato assunto in tutte le analisi. In Figura 2 si riportano i profili di velocità utilizzati nelle analisi, in blu è riportato quello rappresentativo di una valle omogenea, in arancione quello ottenuto con l'Eq. 2 ed $PI=15\%$ ed in rosso quello che massimizza l'eterogeneità.

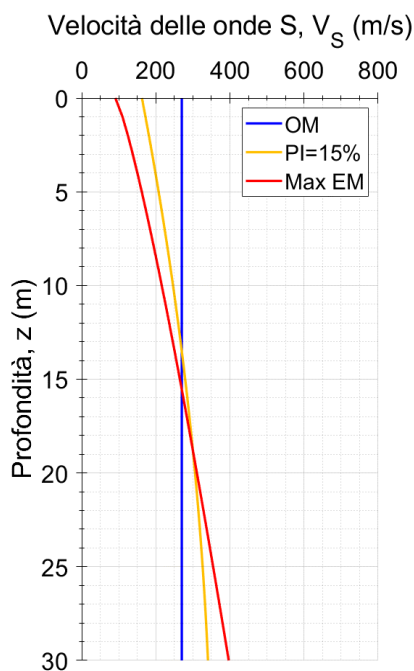


Fig. 2. Profili di variazione della velocità delle onde S con la profondità

Il moto sismico di riferimento utilizzato nelle analisi è un segnale con forma d'onda tipo *Ricker* con frequenze mediane, f_m , variabili. Esse sono state scelte in modo che il rapporto fra la lunghezza d'onda incidente ($\lambda_m = V_s / f_m$) e lo spessore di terreno variasse fra 20 e 0.5 o, equivalentemente, che il rapporto tra la frequenza media incidente e quella di risonanza monodimensionale della colonna rappresentativa del centro valle, $f_{0,1D}$, fosse compreso tra 0.2 e 8. In tal modo è stato possibile analizzare anche la dipendenza della risposta del sistema al variare del contenuto in frequenza del segnale sismico di riferimento. Si noti che la $f_{0,1D}$ è sempre pari a 2.25Hz ed è ottenuta come:

$$f_{0,1D} = \frac{V_{s,eq}}{4 \cdot H} \quad (6)$$

Essa è ottenuta considerando una colonna di terreno omogeneo, mentre nel caso di profilo normalmente disperdente la frequenza di risonanza è generalmente maggiore (Gazetas, 1982; Rovithis et al., 2011). Nel caso in esame si è tuttavia valutato che per i due profili di eterogeneità utilizzati la frequenza di risonanza risultava al più maggiore del 10% rispetto a quella determinata sul profilo omogeneo e pertanto tale variazione è ritenuta trascurabile.

Inoltre, per ogni profilo di velocità sono state inoltre eseguite analisi 1D in corrispondenza della verticale del centro valle.

Le analisi numeriche sia mono sia bi-dimensionali sono state eseguite utilizzando il codice di calcolo alle differenze finite FLAC 8.0 (Itasca Consulting Group, 2016).

3. Risultati

I risultati ottenuti sono stati elaborati definendo inizialmente un fattore di amplificazione, AG , come:

$$AG\left(T, \frac{x}{B}\right) = \frac{S_{a,s}\left(T, \frac{x}{B}\right)}{S_{a,r}(T)} \quad (7)$$

in cui $S_{a,s}$ e $S_{a,r}$ sono le ordinate spettrali degli accelerogrammi ottenuti rispettivamente in superficie e al *bedrock*. x/B è l'ascissa adimensionalizzata ed è pari al rapporto fra la distanza del punto considerato ed il centro valle. Al fine di isolare i soli effetti geometrici bi-dimensionali, è stato definito quindi un ulteriore coefficiente di amplificazione, $AG_{2D/1D}$, come rapporto tra i fattori AG calcolati nelle analisi bi- e mono-dimensionali ($x=0$):

$$AG_{2D/1D}\left(T, \frac{x}{B}\right) = \frac{AG_{2D}\left(T, \frac{x}{B}\right)}{AG_{1D}(T, 0)} \quad (8)$$

Il rapporto $AG_{2D/1D}$, così come definito, dipende dal contenuto in frequenza del moto di riferimento e assume valori diversi in funzione del periodo T considerato. Al fine di ottenere un parametro che sinteticamente esprima l'entità dell'amplificazione bidimensionale, correlandola alle sole proprietà geometriche e meccaniche della valle, in corrispondenza di ciascuna ascissa e per ogni periodo si è effettuata la media dei valori del rapporto $AG_{2D/1D}$ ottenuto per i 12 segnali di input utilizzati, ottenendo così un fattore di amplificazione indipendente dalla frequenza dell'input.

$$\overline{AG_{2D/1D}}\left(T, \frac{x}{B}\right) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m AG_{2D/1D}\left(T, \frac{x}{B}\right) \quad (9)$$

Il fattore medio così ottenuto, a parità di ascissa adimensionalizzata, x/B , varia con il periodo, T . Per ottenere quindi un fattore di amplificazione indipendente anche dal periodo, i valori di $AG_{2D/1D}$ medio espressi dalla Eq. 9 sono stati ulteriormente mediati nell'intervallo di valori di periodo ricompresi tra 0s ed il periodo di risonanza monodimensionale, $T_{0,1D}$. Quest'ultimo posto pari all'inverso della $f_{0,1D}$ calcolata con l'Eq. 6. Si è così definito un fattore sintetico dell'amplificazione dovuta agli effetti di valle (*Valley Amplification Factor*, VAF), ovvero:

$$VAF\left(\frac{x}{B}\right) = \frac{1}{T_{0,1D}} \int_0^{T_{0,1D}} \overline{AG_{2D/1D}}\left(T, \frac{x}{B}\right) \cdot dT \quad (4)$$

Il VAF è, quindi, un parametro indicativo dell'amplificazione media dello spettro di risposta fino al periodo di risonanza mono-dimensionale, indipendente dalla frequenza di sollecitazione. Esso dipende unicamente da H/B , α e I , ed è variabile da punto a punto lungo la valle. Maggiori informazioni dettagli sulla variabilità ed affidabilità dei fattori di amplificazione sono presenti in Alleanza (2022) e Alleanza et al. (2021). In particolare, Alleanza (2022) propone un'equazione analitica per calcolare il VAF per valli omogenee, utilizzata nel seguito.

In Figura 3 si riportano i risultati ottenuti in termini di AG_{2D} e AG_{1D} per i 3 modelli di velocità e per valori di $f_m/f_{0,1D}$ pari a 1 e 2. Entrambi i valori di amplificazione 1D e 2D aumentano con il grado di eterogeneità del deposito, qualunque sia la frequenza considerata. Al centro valle si osserva un incremento rilevante dei fattori di amplificazione per periodi vicini a quello di risonanza, anche se le zone di massima amplificazione non dipendono significativamente dal grado di eterogeneità. Al bordo valle, invece, si ha una modifica sostanziale dei meccanismi di propagazione delle onde sismiche ed infatti, oltre al generalizzato aumento dell'amplificazione, si può notare che la posizione ed estensione delle zone della valle interessate dalla massima amplificazione cambiano con l'eterogeneità considerata, avvicinandosi verso il bordo valle.

L'effetto dell'eterogeneità sulla risposta bidimensionale è mostrato dalla distribuzione di $AG_{2D/1D}$ riportato in Figura 4 per i diversi modelli e frequenze considerate. Esso risulta del tutto trascurabile, dal momento che influenza allo stesso modo sia la risposta monodimensionale che quella bidimensionale. Infatti, sia AG_{1D} sia AG_{2D} aumentano con l'eterogeneità (si veda la Figura 3) e quindi

il loro rapporto, $AG_{2D/1D}$, è praticamente costante.

In Figura 5a si riportano i VAF calcolati con i 3 diversi modelli, confrontati con quello determinato adottando la relazione proposta da Alleanza (2022) per valli trapezie omogenee. Si può osservare come il profilo omogeneo OM sia molto simile a quello descritto dalla relazione analitica di Alleanza (2022), tranne che al centro valle, ciò è dovuto al fatto che quest'ultimo al centro valle non considera la dipendenza del VAF dall'angolo di inclinazione dei bordi. In ogni caso l'eterogeneità determina una riduzione dei fattori di aggravio rispetto a quelli valutati considerando un profilo omogeneo di velocità, come si evince dalla Figura 5b, in cui si riporta il rapporto fra i VAF ottenuti considerando l'eterogeneità e quello determinato con la relazione proposta da Alleanza (2022) per valli omogenee. In definitiva, i diversi profili di eterogeneità presi in considerazione non influenzano significativamente il VAF , che pertanto può essere calcolato in modo speditivo con le relazioni proposte da Alleanza (2022) per terreni omogenei.

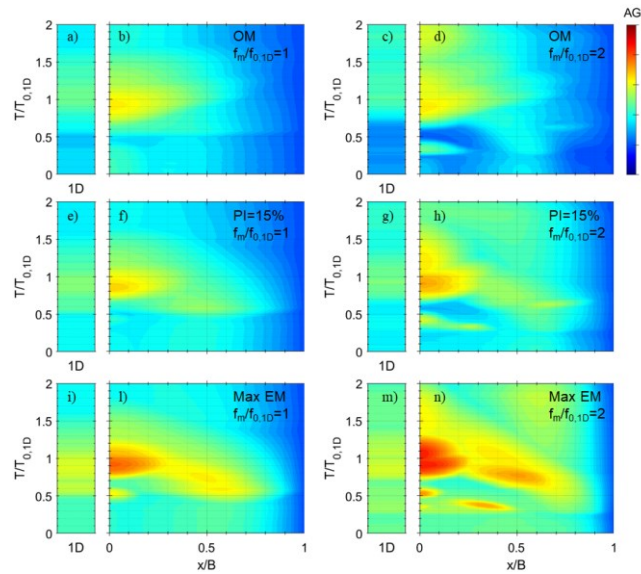


Fig. 3. AG_{2D} e AG_{1D} calcolati per i profili di V_S OM, $PI=15\%$ e Max EM per valori di $f_m/f_{0,1D}$ pari a 1 e 2.

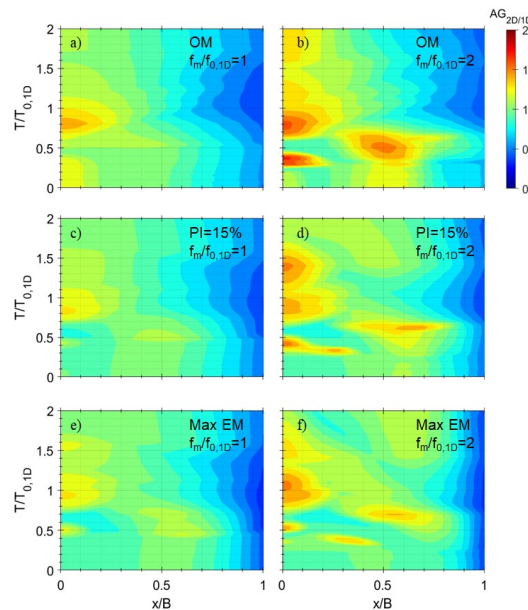


Fig. 4. $AG_{2D/1D}$ calcolati per i profili di V_S OM, $PI=15\%$ e Max EM per valori di $f_m/f_{0,1D}$ pari a 1 e 2.

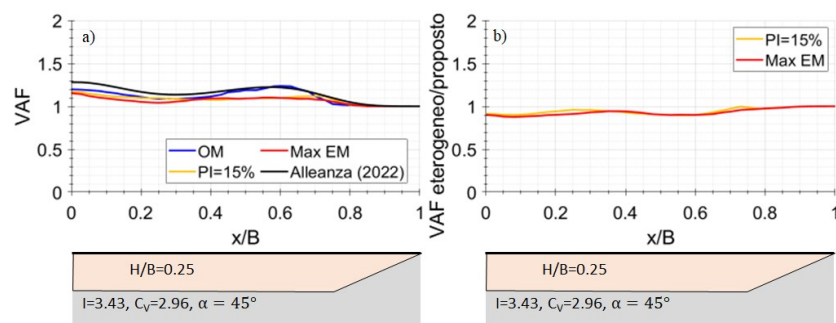


Fig. 5. *VAF* ottenuti per i 3 modelli di velocità e quello proposto da Alleanza (2022)

4. Conclusioni

Il presente studio è volto a valutare l'influenza dell'eterogeneità sulla risposta sismica locale di valli superficiali trapezie attraverso una serie di analisi numeriche, i cui risultati ottenuti sono stati sintetizzati utilizzando un apposito *Valley Amplification Factor*. Si è così ottenuto che, almeno per i casi analizzati, l'eterogeneità delle proprietà meccaniche con la profondità non influenza in modo significativo il *VAF*. In prima approssimazione essa può quindi essere trascurata ed il *VAF* calcolato utilizzando le formulazioni semplificate presenti in letteratura per valli omogenee.

Ringraziamenti

Questo studio è stato realizzato nell'ambito del Task 16.1 'Site response analysis and liquefaction' del progetto ReLUIIS-DPC 2019-2021, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile.

Bibliografia

- Aki K., Larner K. L. (1970) "Surface Motion of a Layered Medium Having an Irregular Interface Due to Incident Plane SH Waves", *Journal of Geophysical Research*, 75(5), 933–954.
- Alleanza, G.A. 2022. Two-Dimensional Amplification of Seismic Motion in Alluvial Valleys. Ph.D. dissertation. Università di Napoli "Federico II", Napoli, Italia
- Alleanza, G.A., d'Onofrio, A., Silvestri, F. (2021). Un metodo semplificato per la valutazione degli effetti bidimensionali sulla risposta sismica locale di valli alluvionali. *Atti dell'Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2021*, ISBN 9788897517153
- Bard P.Y., Bouchon M. (1980a) "The seismic response of sediment-filled valleys. Part 1. The case of incident SH waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4), 1263–1286.
- Bard P.Y., Bouchon M. (1980b) "The seismic response of sediment-filled valleys. Part 2. The case of incident P and SV waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(5), 1921–1941.
- Bard P.Y., Bouchon M. (1985) "The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(2), 519–541.
- Bard, P. Y., & Gariel, J. C. (1986). "Seismic response of two-dimensional sedimentary deposits with large vertical velocity gradients". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76(2), 343–366.
- d'Onofrio, A., & Silvestri, F. (2001). Influence of Micro-Structure on Small-Strain Stiffness and Damping of Fine-Grained Soil and Effects on Local Site Response. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. 15.
- Gazetas, G. (1982). "Vibrational characteristics of soil deposits with variable wave velocity". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 6(1), 1–20.
- Itasca Consulting Group. (2016). "FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua". Ver. 8.0. Minneapolis. Itasca
- NTC 2018. Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. D.M. 17/01/2018. Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" S.O. n. 8 Alla Gazzetta Ufficiale Della Repubblica Italiana, n. 42 Del 20 Febbraio 2018.
- Rampello S., Silvestri F. and Viggiani G. "The dependence of small strain stiffness on stress state and history for fine-grained soils: the example of Vallericca clay," *Proc. I Symp. on Pre-failure Deformations of Geomaterials*, Sapporo, 1:273-279. Rotterdam: Balkema, 1994
- Rovithis, E. N., Parashakis, H., & Mylonakis, G. E. (2011). "1D harmonic response of layered inhomogeneous soil: Analytical investigation". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 879–890.