

INDAGINI QUANTITATIVE PRELIMINARI SU FENOMENI DI AGGRAVIO BIDIMENSIONALE IN BACINI OMOGENEI

Marco UZIELLI

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze
marco.uzielli@unifi.it

Johann FACCIORUSSO

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze
johann.facciorusso@unifi.it

Claudia MADIAI

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze
claudia.madiai@unifi.it

Sommario

Il presente contributo illustra sinteticamente le principali fasi di modellazione e una selezione di risultati di uno studio preliminare volto all'analisi statistica di fattori quantitativi di aggravio, da associare ai fattori di amplificazione litostratigrafica indicati dalle Norme antisismiche, per l'inclusione degli effetti 2D di valle nella definizione dell'azione sismica di progetto. Il lavoro si colloca nell'ambito di una ricerca finalizzata allo sviluppo di una proposta metodologica pre-normativa per la parametrizzazione quantitativa degli effetti bidimensionali di valle sulla risposta sismica locale.

1. Introduzione e definizioni fondamentali

La quantificazione speditiva degli effetti di risposta sismica locale viene generalmente svolta su modelli monodimensionali (1D), ottenendo risultati poco realistici in presenza di valli sepolte. In queste condizioni di morfologia profonda, l'approccio bidimensionale (2D) consente una migliore previsione della risposta sismica, ma presenta livelli di complessità molto maggiori in fase di modellazione e di interpretazione e gestione dei risultati.

Il presente contributo illustra sinteticamente alcune fasi di modellazione e una selezione di risultati di uno studio preliminare volto all'analisi statistica di fattori quantitativi di aggravio, da associare ai fattori di amplificazione litostratigrafica indicati dalle Norme antisismiche, per l'inclusione degli effetti 2D di valle nella definizione degli spettri di risposta di progetto. In particolare, si riportano: (1) le modalità di costruzione del dataset mediante analisi numeriche 1D e 2D; (2) la definizione di un insieme di parametri adimensionali di riferimento per l'analisi di correlazione con i fattori di aggravio derivanti dalle analisi numeriche; (3) la definizione di un insieme di statistiche descrittive della dispersione del fattore di aggravio e la selezione delle statistiche di riferimento per la proposta pre-normativa; e (4) alcuni esempi di elaborazione delle statistiche.

Con riferimento al moto sulla superficie del deposito, il fattore di aggravio spettrale AGF (funzione del periodo T e della posizione \mathbf{x} in direzione orizzontale) è assunto nel presente lavoro come il rapporto tra l'ordinata dello spettro elastico in pseudo-accelerazione (al 5% dello smorzamento critico) del modello 2D e la corrispondente ordinata spettrale del modello 1D (Chávez-García & Faccioli 2000):

$$AGF(\mathbf{x}, T) = \frac{S_{a,2D}(\mathbf{x}, T)}{S_{a,1D}(\mathbf{x}, T)} \quad (1)$$

Per un dato punto sulla superficie del deposito, il valore del fattore di aggravio esprime se, e in quale misura, la schematizzazione bidimensionale produce, per un dato periodo spettrale T , una pseudoaccelerazione $S_{a,2D}(T)$ minore ($AGF < 1$), uguale ($AGF = 1$) o maggiore ($AGF > 1$) rispetto a $S_{a,1D}(T)$, cioè a quella ottenuta nella schematizzazione monodimensionale in corrispondenza della verticale passante per il punto considerato. La funzione $AGF(T)$ che si ottiene al variare di T , può essere definita sinteticamente “spettro di aggravio”.

2. Costruzione del dataset

Il dataset di riferimento è stato compilato utilizzando i risultati di analisi numeriche (sia 1D sia 2D) eseguite impiegando il software *LSR2D* (STACEC 2017), che consente la modellazione bidimensionale mediante un approccio agli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando un modello di sottosuolo visco-elastico lineare equivalente.

La definizione delle caratteristiche geometriche dei bacini per la loro successiva modellazione numerica è stata effettuata cercando di rappresentare, in maniera semplificata e trascurando qualsiasi tipo di singolarità per la morfologia sepolta, le tipologie di bacini sedimentari più ricorrenti nella vasta rassegna di studi di microzonazione disponibili in letteratura e relativi a contesti geologici ubicati in varie parti del mondo. Al contempo, per la descrizione della superficie di interfaccia tra deposito e substrato, sono state ricercate delle specifiche curve che dipendessero da poche grandezze geometriche variabili, in modo da consentire una rapida modificazione dei fianchi della valle con la semplice variazione di queste ultime. E' stata inoltre posta attenzione sulla possibilità di selezionare, come funzioni rappresentative delle zone di bordo del bacino, quelle proposte da alcuni studi di letteratura, denominate rispettivamente U_N , U_L , V_N e V_L come illustrato in Figura 1.

Per ciascuna forma di sezione, sono state definite numerose configurazioni geometriche variando le dimensioni dei bacini e combinando valori di L_0 [250,450,500] m, L_i [150,300,600,900] m e H [50,100,200,300] m.

Come ampiamente dimostrato da numerosi studi teorici (es. Bard & Bouchon, 1980b), il contrasto di rigidezza di due differenti strati adiacenti all'interno di un deposito influisce sensibilmente sull'amplificazione del moto sismico in superficie. Nel caso in esame, avendo considerato il deposito

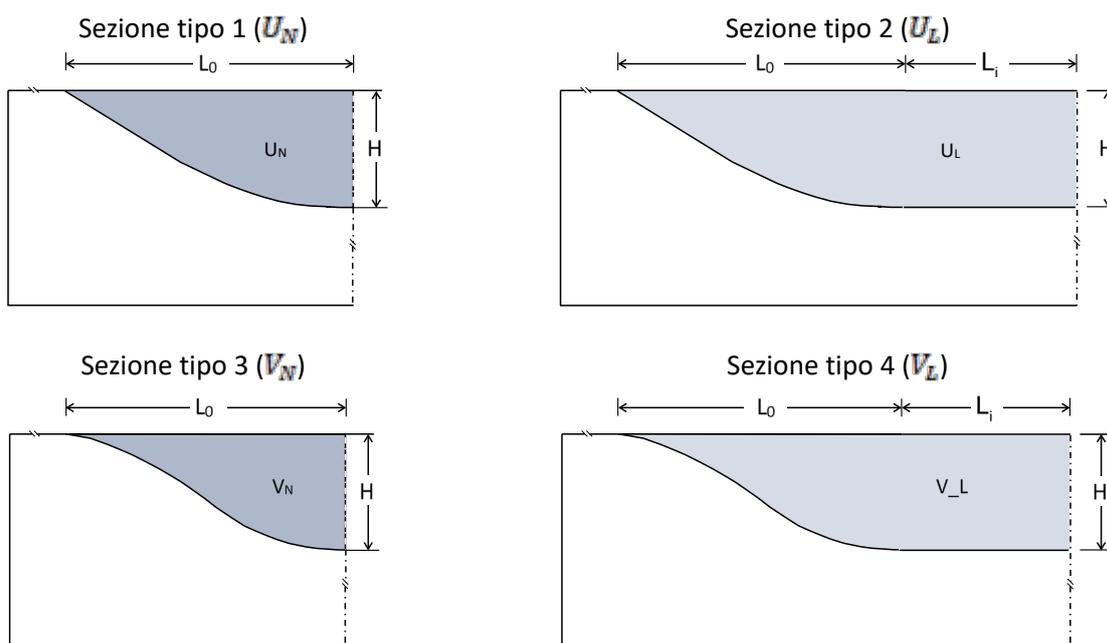


Figura 1. Forme di sezione analizzate

costituito da un unico strato di materiale omogeneo, tale contrasto è rappresentato dal rapporto di impedenza sismica, riferito alle onde S, tra il deposito ed il substrato. Per il materiale costituente il deposito sono stati selezionati i seguenti valori (costanti con la profondità) di velocità delle onde di taglio: $V_{ss}=[200,300,450,600]$ m/s; per il bedrock, $V_{sb}=[800,1100,1500]$ m/s. Come valori di densità, sono stati considerati i seguenti valori: $\rho_s=[1800,1900,2000]$ kg/m³ per il deposito; $\rho_b=[2300,2400,2500]$ kg/m³ per il bedrock.

Per i materiali si è ipotizzato un comportamento visco-elastico lineare, per il quale sia le caratteristiche dissipative (descritte dalla curva di smorzamento $D(\gamma)$) sia quelle di rigidezza (descritte dalla curva di decadimento $G(\gamma)/G_0$) assumono valori costanti al variare della deformazione di taglio γ . Per le prime sono stati ipotizzati, con riferimento al deposito, due possibili valori del rapporto di smorzamento viscoso D : (a) $D = D_0 = 1\%$, valore tipico per sedimenti prevalentemente ghiaiosi e sabbiosi; (b) $D = D_0 = 4\%$, valore prossimo al limite superiore per sedimenti prevalentemente limosi e argillosi. Per il bedrock è stato considerato un unico valore costante del rapporto di smorzamento $D = 0.05\%$. Per entrambi i materiali è stata ipotizzata l'assenza di decadimento della rigidezza, e sono stati quindi adottati valori unitari del modulo di taglio G normalizzato sul valore iniziale G_0 : $G(\gamma)/G_0 = 1$, essendo $G_0 = \rho \cdot V_s^2$. Il coefficiente di Poisson è stato assunto pari a: (a) $\nu = 0.30$ per sedimenti con $D = 1\%$; (b) $\nu = 0.35$ per sedimenti $D = 4\%$; (c) $\nu = 0.15$ per il bedrock.

Al fine di escludere dall'analisi eventuali combinazioni di caratteristiche fisiche e geometriche difficilmente riscontrabili nella realtà, sono stati individuati abbinamenti plausibili tra i valori assunti dalla velocità di propagazione delle onde di taglio nel deposito e la profondità massima dello stesso, escludendo dall'analisi tutti quei casi nei quali una data velocità delle onde di taglio (assunta costante per le considerazioni fatte in precedenza) non sia verosimilmente accettabile per determinate profondità del bacino.

L'input sismico scelto per rappresentare il moto su affioramento roccioso consiste in una singola onda di Ricker, impiegata in numerosi dei principali studi parametrici degli effetti di valle nei bacini sedimentari (es. Bard e Bouchon, 1980a,b; Zhu e Thambiratnam, 2016) e adatta per un confronto diretto dei risultati con i riferimenti teorici disponibili in letteratura. Come moti di input sono quindi state assunte forma d'onda di tipo "Ricker Wavelet", aventi cinque frequenze fondamentali distinte [0.6, 1.2, 2.0, 4.0, 10.0] Hz e accelerazione di picco di 0.79g.

Per quanto detto sopra, e a seguito della combinazione dei valori possibili e plausibili di geometria del bacino, caratteristiche fisiche e geotecniche del deposito e del bedrock, frequenza dell'input sismico di riferimento, si sono definiti 1060 casi di modellazione 2D e 8500 casi associati e facenti riferimento a condizioni stratigrafiche 1D, in corrispondenza delle verticali ritenute significative ai fini della valutazione degli effetti di valle. Il fattore di aggravio è stato calcolato nell'intervallo di periodo 0÷2s, con un passo pari a 0.01s. Gli spettri di aggravio sono stati preliminarmente regolarizzati utilizzando un filtro Savitzky–Golay. In definitiva è stato ottenuto un database iniziale di 2,365,900 valori di **AGF**.

3. Analisi statistica

A partire dal dataset di ingresso e dai risultati della modellazione numerica sono stati definiti una serie di parametri in modo da rendere il problema adimensionale e facilitare la generalizzazione dei risultati ottenuti come suggerito da numerosi contributi, tra i quali Bard & Bouchon (1980a,b), Pitilakis & Riga (2015) e Zhu et al. (2020). I parametri adimensionali introdotti sono riportati in Tabella 1 insieme all'indice di forma e ai parametri degli spettri di aggravio (periodo e fattore di aggravio).

La Figura 2 riporta, per il dataset completo, i grafici con i valori del fattore di aggravio **AGF** in funzione dei parametri adimensionali (k_{xL} , v_s , D_s , k_{HL} , k_{Lb} , k_{HL} , k_{Ll}). La figura indica, in senso qualitativo: (1) l'esistenza di una correlazione inversa tra k_{xL} e **AGF**; (2) la diminuzione della dispersione nei valori di **AGF** con l'aumento di v_s e D_s ; (3) l'assenza di una correlazione chiaramente identificabile tra k_{HL} e **AGF**; (4) l'esistenza di una correlazione diretta tra k_{Lb} e **AGF**; (5) la generale tendenza a una correlazione inversa tra k_{HL} e **AGF**; e (6) la generale tendenza a una correlazione

Tabella 1. Parametri adimensionali e spettrali utilizzati nell'analisi

Variabile	Simbolo	Unità
Forma ($U_N=1, U_L=2; V_N=3; V_L=4$)	1,2,3,4	-
Progressiva normalizzata (0: centro valle; 1: estremo)	$k_{xL} = x/(L_o + L_i)$	-
Deposito - coefficiente di Poisson	ν_s	-
Deposito - rapporto di smorzamento	D_s	%
Rapporto di impedenza sismica substrato/deposito	$k_{ibs} = \frac{\nu_{sb} \cdot \nu_b}{\nu_{ii}}$	-
Rapporto di forma	$k_{HL} = \frac{I_i \cdot I_i}{I_p}$	-
Massimo spessore del deposito normalizzato rispetto alla lunghezza delle onde di taglio nel deposito λ_s (data dal rapporto tra la velocità delle onde S nel deposito e la frequenza fondamentale dell'input sismico)	$k_{H\lambda} = \frac{L_o \cdot L_i}{\lambda_s} = \frac{L_o \cdot L_i \cdot J_p}{\nu_s}$	-
Semi-larghezza del bacino normalizzata rispetto alla lunghezza delle onde di taglio nel deposito λ_s (data dal rapporto tra la velocità delle onde S nel deposito e la frequenza fondamentale dell'input sismico)	$k_{L\lambda} = \frac{L_o \cdot L_i}{\lambda_s} = \frac{L_o \cdot L_i \cdot J_p}{\nu_s}$	-
Periodo spettrale	T	s
Fattore di aggravio spettrale	AGF	-

inversa tra $k_{L\lambda}$ e AGF .

L'analisi statistica del fattore di aggravio è stata svolta con approccio descrittivo, ovvero calcolando una serie di statistiche per campioni di AGF ottenuti suddividendo il dataset completo secondo: (1) classe di bacino; (2) intervallo di periodo spettrale; e (3) posizione spaziale all'interno del bacino. La suddivisione del dataset è finalizzata ad aumentare la significatività delle statistiche in sede di applicazione della metodologia. Le statistiche calcolate per ciascun sottoinsieme comprendono: (1) valore medio, (2) deviazione standard, (3) coefficiente di variazione (dato dal rapporto tra la deviazione standard e il valore medio), (4) valore minimo, (5) valore massimo, (6) 95° percentile, e (7) intervallo interquartile, dato dalla differenza tra il 75° percentile e il 25° percentile.

A seguito della disamina qualitativa della Figura 2, si sono identificati $k_{H\lambda}$ e $k_{L\lambda}$ come parametri di riferimento rispetto ai quali classificare i modelli di bacino in sede di elaborazione statistica dei valori calcolati di AGF , in quanto: (a) essi sono inclusivi di parametri geometrici, geotecnici e sismici dei modelli; (b) risulta possibile identificare per entrambi alcuni intervalli entro i quali i valori di AGF risultano sufficientemente omogenei; e (c) considerati congiuntamente, essi consentono una classificazione efficiente dei modelli di calcolo in termini di rapporto tra dimensioni massime orizzontale e verticale del bacino, in senso normalizzato rispetto alle proprietà dinamiche del deposito e del moto di input.

Sulla base della ispezione visiva dei dati di categorie per entrambi i parametri su base soggettiva e dell'analisi dei valori presenti nel dataset, si è poi proceduto alla definizione soggettiva di 4 categorie per $k_{H\lambda}$ (H1: $0 < k_{H\lambda} \leq 0.375$, H2: $0.375 < k_{H\lambda} \leq 1.5$, H3: $1.5 < k_{H\lambda} \leq 2.4$, H4: $k_{H\lambda} > 2.4$) e 3 categorie per $k_{L\lambda}$ (L1: $0 < k_{L\lambda} \leq 3.6$, L2: $3.6 < k_{L\lambda} \leq 12$, L3: $k_{L\lambda} > 12$). Si è quindi proceduto alla suddivisione del dataset completo in sottoinsiemi omogenei dal punto di vista di $k_{H\lambda}$ e $k_{L\lambda}$ sulla base della categorizzazione sopra esposta, ottenendo la classificazione dei bacini secondo la sigla "H#L#". Ad esempio, la classe di bacino "H2L1" identifica schemi di calcolo (e relativi dati di output) ricadenti nella categoria H2 per $k_{H\lambda}$ e nella categoria L1 per $k_{L\lambda}$.

La suddivisione in zone è stata adottata in numerosi contributi di letteratura (es. Pitilakis et al. 2015; Madias et al. 2017). La suddivisione del bacino in "zone", definite da intervalli della distanza normalizzata k_{xL} , rende più agevole valutare criticamente i risultati quantitativi della modellazione numerica e delle statistiche di AGF con approccio uniforme per tutte le forme di sezione. Si sono definite 6 zone, con le zone 1-3 a suddividere in parti uguali la lunghezza interna L_i e le zone 4-6 a suddividere in parti uguali la lunghezza esterna L_o . È opportuno notare che gli schemi di calcolo relativi alle forme di sezione U_N e V_N non presentano dati nelle zone 1, 2 e 3.

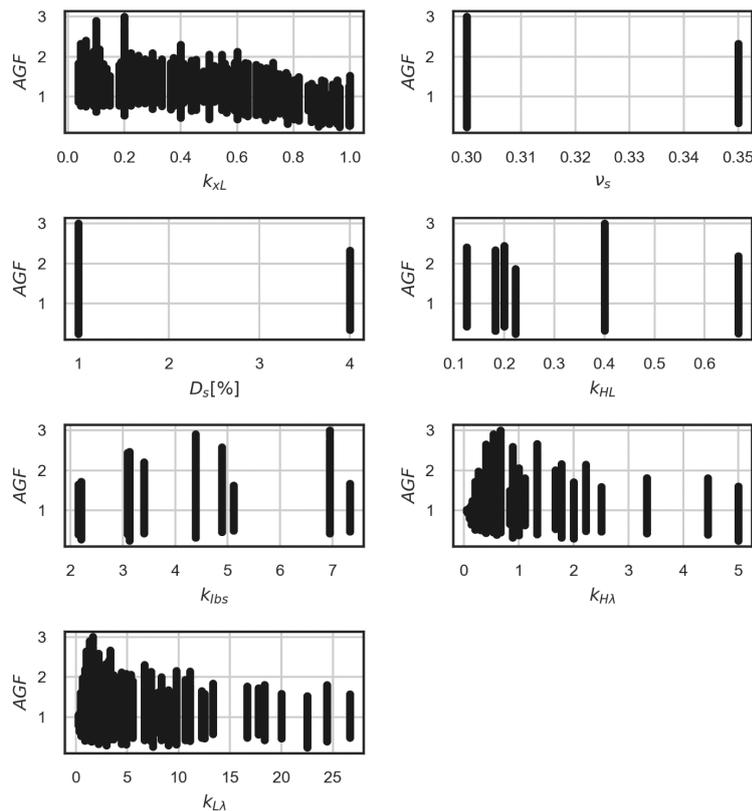


Figura 2. Rappresentazione dei valori calcolati di **AGF** in relazione ai parametri adimensionali per il dataset completo

riportati per zona e distinti per colore (per intervallo di periodo) e simbolo (categoria di bacino).

La suddivisione del dataset secondo intervalli di periodo consegue dall'osservazione della forma degli spettri di aggravio, che nella grande maggioranza dei casi presenta valori maggiori di **AGF** per periodi spettrali bassi. La possibilità da parte dell'utente finale di specificare l'intervallo di periodo desiderato assicura una maggiore significatività delle statistiche risultanti. Gli intervalli di periodo spettrale sono stati definiti come T1 ($0 < T \leq 0.5s$), T2 ($0.5 < T \leq 1.0s$), T3 ($1.0 < T \leq 1.5$) e T4 ($1.5 < T \leq 2.0$).

4. Risultati esemplificativi

In Figura 3 si riportano, a titolo esemplificativo, i grafici del 95° quantile di **AGF** (costituenti quindi statistiche "cautelative" sui campioni di valori calcolati). Ciascun grafico è riferito a una forma di sezione. I valori sono

5. Analisi critica e conclusioni riassuntive

I risultati ottenuti, sia in termini qualitativi sia in termini quantitativi (con valori di **AGF** compresi approssimativamente tra 0.7 e 3), sono generalmente compatibili con considerazioni teoriche, con le evidenze di misure sperimentali in bacini reali e coerenti con i risultati di studi affini rinvenuti nella letteratura scientifica, sebbene le analisi svolte si basino su un dataset notevolmente più ampio, su un approccio metodologico innovativo e su elaborazioni statistiche maggiormente dettagliate.

L'analisi della distribuzione spaziale dei valori di aggravio, condotta per zone, consente di apprezzare la variabilità degli effetti di aggravio a seconda della combinazione di classe di bacino, forma di sezione e intervallo di periodo.

A titolo esemplificativo dell'analisi dei risultati si osserva, in molti casi, la presenza di valori di aggravio maggiori in prossimità della sezione di simmetria del bacino, decrescenti nella zona 2, e successivamente nuovamente crescenti sino al confine tra la zona 3 e la zona 4 (ovverosia al confine tra il bedrock orizzontale e il fianco del bacino). A tali osservazioni si accompagna quella di una generale diminuzione dei valori di aggravio nella zona 5, e un aumento nella zona 6.

Tale comportamento, che risulta in pieno accordo con quanto presentato da Pitilakis et al. (2015), non si osserva tuttavia per tutte le combinazioni di classe di bacino, forma di sezione e intervallo di periodo. La variabilità osservata della progressione spaziale dei fenomeni di aggravio, nonché la dipendenza degli stessi dalla classe di bacino e dall'intervallo di periodo, giustifica l'ampiezza dell'analisi parametrica e suggerisce l'opportunità di generalizzare l'analisi al fine di estendere e affinare ulteriormente il database di riferimento.

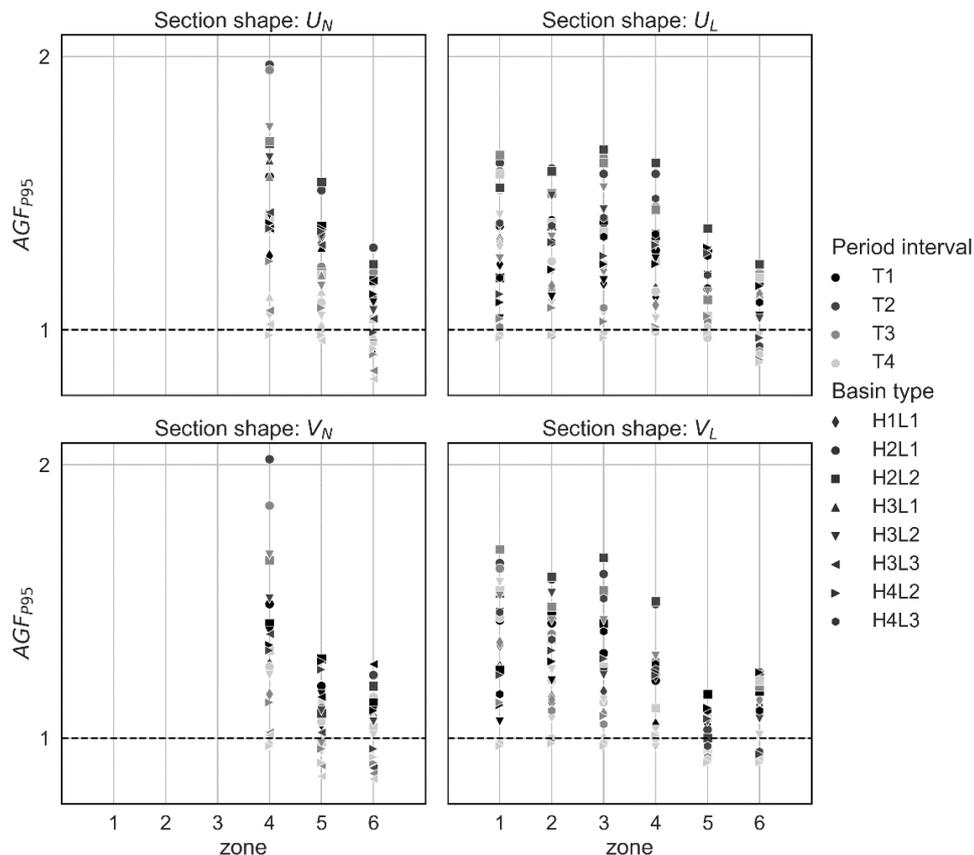


Figura 3. Rappresentazione dei valori calcolati di **AGF** in relazione ai parametri adimensionali per il dataset completo

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato parzialmente finanziato nell'ambito del Progetto di Ricerca DPC-ReLUIIS 2022-2024.

Bibliografia

- 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 SH waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4): 1921–1941.
- Chávez-García F.J., Faccioli E. (2000). Complex site effects and building codes: Making the leap. *Journal of Seismology*, 4(1): 23–40.
- Madiati C., Facciorusso J., Gargini E. (2017). Numerical Modeling of Seismic Site Effects in a Shallow Alluvial Basin of the Northern Apennines (Italy) - *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 107, No. 5, pp. 2094-2105, October 2017, DOI 10.1785/0120160293
- Pitilakis, K., Riga, E., Anastasiadis, A., Makra, K. (2015). New elastic spectra, site amplification factors and aggravation factors for complex subsurface geometry towards the improvement of EC8. 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November 2015, Christchurch, New Zealand.
- STACEC Srl (2017). LSR2D - Risposta sismica locale. www.stacec.it
- Zhu, C., Tambiratnam, D. (2016). Interaction of geometry and mechanical property of trapezoidal sedimentary basins with incident SH waves. *Bull Earthquake Eng.*, doi: 10.1007/s10518-016-9938-z
- Zhu, C., Riga, E., Pitilakis, K., Zhang, J., Thambiratnam, D. (2020). Seismic Aggravation in Shallow Basins in Addition to One-dimensional Site Amplification, *Journal of Earthquake Engineering* 24, 1477-1499.