

## **SPOSTAMENTI DI MURI A MENSOLA INDOTTI DA AZIONI SISMICHE**

Anna Scotto di Santolo  
Dipartimento di Ingegneria Idraulica Geotecnica e Ambientale DIGA  
Università degli Studi di Napoli Federico II.  
e-mail [anscotto@unina.it](mailto:anscotto@unina.it)

### **Sommario**

Nella nota si riportano i risultati di un'analisi parametrica eseguita per la valutazione degli spostamenti di muri a mensola, caratterizzati da un'altezza costante della parete ideale AV passante per il tacco del muro rispetto alla quale gli approcci tradizionali valutano la spinta squilibrante esercitata dal terrapieno. La dimensione della mensola di base interna consente lo sviluppo delle superfici di rottura all'interno del terrapieno spingente. Le verifiche geotecniche sono state eseguite attraverso un'analisi pseudo statica valutando le spinte in accordo con il nuovo metodo *New Static Pseudostatic Plasticity Solution (NSPPS)* proposto da Evangelista e co-autori nel 2009. Gli spostamenti permanenti, consistenti in scorrimenti rispetto al piano di posa della fondazione del muro, sono stati valutati attraverso il metodo degli spostamenti alla Newmark classico e modificato per tener conto della variazione dell'accelerazione critica in accordo al metodo *NSPPS*. La procedura proposta conduce a un decremento degli spostamenti permanenti dei muri a mensola rispetto ai metodi tradizionali. Sebbene l'approccio sia in tal senso non cautelativo, l'assenza di danni sismo indotti su tali strutture in terreni incoerenti e in assenza di falda, confortati da studi numerici, fa ritenere la procedura interessante ai fini della progettazione.

### **Introduzione**

Numerosi contributi sono stati prodotti da ricercatori Italiani e stranieri sull'applicazione dei metodi degli spostamenti a strutture geotecniche, e in particolare ai muri di sostegno (e.g. Richards and Elms, 1979; Simonelli et al., 1997; Cecconi et al., 2007; Callisto e Aversa, 2008). I più diffusi si basano generalmente su un'estensione del modello del blocco rigido scorrevole su piano inclinato proposto da Newmark nel 1965 concepito per valutare gli effetti di sismi su dighe e rilevati.

La nuova normativa tecnica italiana (NTC, 2008) prevede l'applicabilità del metodo degli spostamenti nelle verifiche dei muri di sostegno, sia agli stati limite ultimi sia agli stati limite di esercizio. Per ogni stato limite considerato (SLU ovvero SLE) e in funzione della vita di riferimento dell'opera si verifica l'ammissibilità degli spostamenti indotti dalle azioni sismiche. E' evidente che il metodo ammette condizioni transitorie di stabilità critica, in corrispondenza delle quali si possono verificare spostamenti plastici. Per i muri di sostegno gli spostamenti anzidetti sono normalmente gli scorrimenti lungo il piano di posa della fondazione dell'opera.

La valutazione dello spostamento permanente del muro indotto da un accelerogramma agente alla base, effettuato con il metodo degli spostamenti, si basa sulla determinazione dell'accelerazione critica alla quale corrisponde una completa mobilitazione della resistenza allo scorrimento ( $FS=1$ ). E' possibile integrare l'equazione del moto relativo fra muro e base, che ha inizio al superamento dell'accelerazione critica e termina all'annullarsi della velocità

relativa. In tale analisi è generalmente adottato un modello rigido perfettamente plastico del terreno, in cui la spinta è sostanzialmente indipendente dalla storia degli spostamenti relativi terreno–muro. Nelle NTC (2008) analisi parametriche di questo tipo hanno consentito la calibrazione di coefficienti  $\beta_m$  per la riduzione delle azioni sismiche nell'applicazione, pur cautelativa, dei tradizionali metodi pseudo statici (Simonelli e Penna, 2007).

Nel classico approccio di Newmark il valore dell'accelerazione critica è assunta costante durante il moto. Miglioramenti al metodo per i muri di sostegno a gravità massicci sono stati apportati da Zarrabi (1979) e Wong (1982). Tale metodo è stato convalidato mediante sperimentazione su prototipi di muri a gravità con paramento interno liscio su tavola vibrante (Simonelli et al., 1997; Crewe et al., 1998; Carafa et al., 1998).

Nel presente lavoro l'approccio alla Newmark è stato modificato per i muri a mensola considerando variabile la spinta, in intensità ed inclinazione, durante il sisma sulla base del metodo di calcolo *NSPPS* (Evangelista et al., 2009; 2010).

### **Valutazione degli spostamenti permanenti con il metodo NSPPS**

Le ipotesi alla base del metodo sono:

- Lo stato tensionale all'interno del terrapieno alle spalle del muro è assimilato a quello agente in un pendio indefinito;
- Il cinematiso che provoca la rottura è lo scorrimento lungo il piano di posa della fondazione;
- Gli scorrimenti avvengono esclusivamente verso valle.

Le azioni sismiche che producono lo scorrimento in fondazione ( $F_i=Ed-R_d$ ) sono valutate iterativamente per ogni intervallo temporale con il metodo pseudo-statico NSPPS. Quando le azioni superano la resistenza ( $F_i>0$ ) si ricava, dalla legge di Newton, l'accelerazione critica ( $k_c=F_i/m$ ). A tal punto si procede, analogamente al metodo di Newmark, alla doppia integrazione della storia accelerometrica fino a quando non si annulla la velocità relativa tra la base ed il complesso muro-terreno.

L'applicazione del metodo NSPPS consente di valutare l'inclinazione della spinta  $\delta$  durante il sisma; ciò produce un incremento della accelerazione critica e quindi una riduzione degli spostamenti permanenti accumulati. A titolo esemplificativo in Figura 1 si riporta l'andamento dell'accelerazione critica orizzontale,  $k_c$  in funzione dell'inclinazione della spinta,  $\delta$  nel caso di terrapieno orizzontale ( $\epsilon = 0$ ), costituito da un terreno incoerente con  $\phi$  pari a 30 e 40° e sottoposto a coefficienti sismici  $k_h$ , variabile fra 0.05 e 0.35, e  $k_v$  pari a 0. Si osserva chiaramente che l'accelerazione critica  $k_c$  aumenta al crescere dell'inclinazione della spinta attiva  $\delta$  e al crescere delle proprietà meccaniche del terrapieno.

Nella nota si analizzano dapprima i risultati ottenuti da un'analisi parametrica degli spostamenti indotti da funzioni armoniche sine-dwell (Fig. 2), al variare della ampiezza e della frequenza. Successivamente si analizzano gli spostamenti valutati con quattro storie accelerometriche reali (terremoti italiani) scalate alla stessa accelerazione massima. L'accelerazione  $a_{max}$  in superficie, com'è noto, dipende da quella attesa al *bedrock*  $a_g$ , stabilita dalla normativa tecnica (NTC, 2008). In tale analisi si assumerà una  $a_{max}$  pari a 0.35g. Infine si riportano i confronti con gli spostamenti valutati con il metodo tradizionale di calcolo delle spinte quale quello di Mononobe e Okabe (Mononobe & Matsuo; 1929; Okabe, 1924; MO nel seguito).

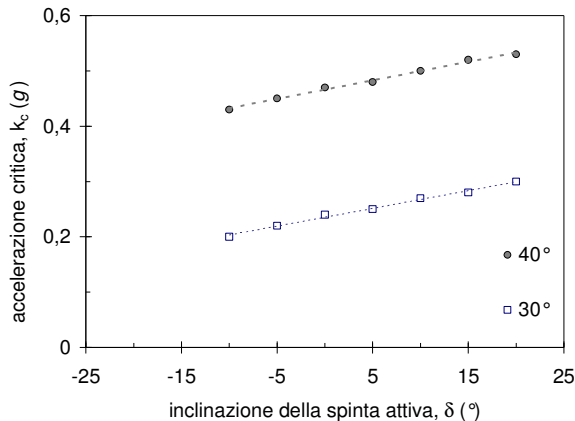


Figura 1. Andamento dell'accelerazione critica in funzione dell'inclinazione della spinta attiva valutata con il metodo NSPPS per  $\phi$  pari a  $30^\circ$  e  $40^\circ$  e  $kh$  variabile tra 0.05 e 0.35.

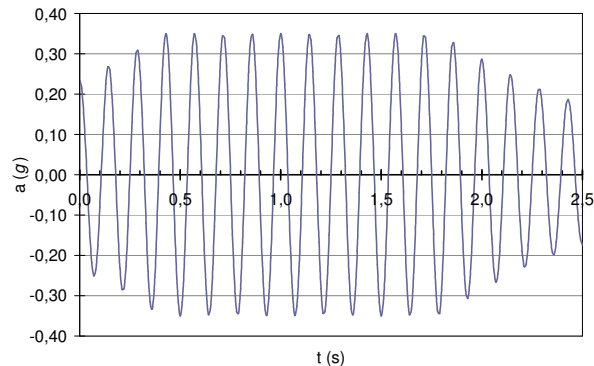


Figura 2. Funzione sine dwell: ampiezza 0.35g, frequenza 7Hz, durata 2.5s.

### Risultati dello studio parametrico

Per valutare l'effetto della frequenza dell'input sullo spostamento plastico del muro a mensola esaminato si è scelto di esaminare il caso del terrapieno incoerente caratterizzato da  $\phi$   $30^\circ$  e resistenza alla base  $\phi_b$  pari a  $30^\circ$ . Le analisi sono state eseguite con valori di ampiezza variabili tra 0.1 e 0.4g e frequenza pari a 3Hz, 7Hz e 14Hz.

In Figura 3 sono riportati i risultati ottenuti sia valutando la spinta con il metodo di MO sia con il metodo NSPPS. Nello stesso diagramma è riportato l'andamento del coefficiente di sicurezza allo scorrimento in funzione dell'accelerazione pseudo-statica.

Si osserva innanzitutto che, a parità di proprietà meccaniche e input, il metodo NSPPS sottostima gli spostamenti come detto in precedenza. Inoltre si osserva che, a parità di durata e ampiezza, al diminuire della frequenza si verificano spostamenti maggiori con una variazione pressoché lineare.

In Figura 4 si riportano i risultati ottenuti in termini di spostamenti irreversibili in funzione della resistenza attritiva del terrapieno  $\phi$ , per ogni storia accelerometrica analizzata a parità di frequenza, 7Hz, e di resistenza allo scorrimento di base ( $\phi_b$  pari a  $30^\circ$ ). Nello stesso diagramma è riportato il coefficiente di sicurezza allo scorrimento valutato in condizioni statiche.

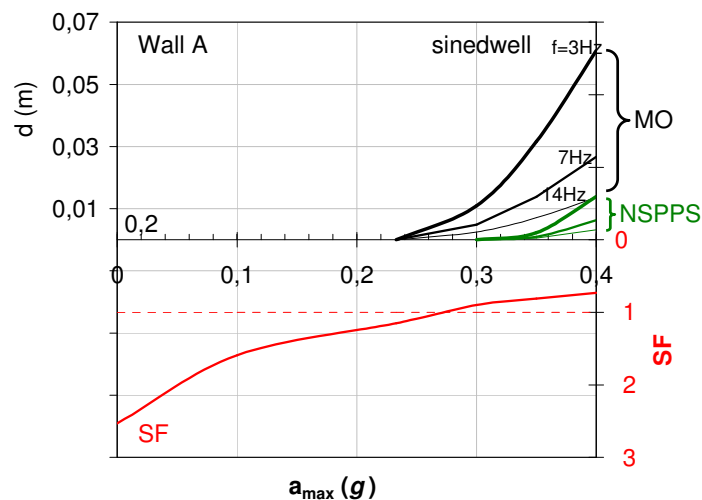


Figure 3. Confronto fra gli spostamenti valutati con il metodo tradizionale (MO) e quello NSPPS al variare dell'ampiezza e della frequenza della sine dwell

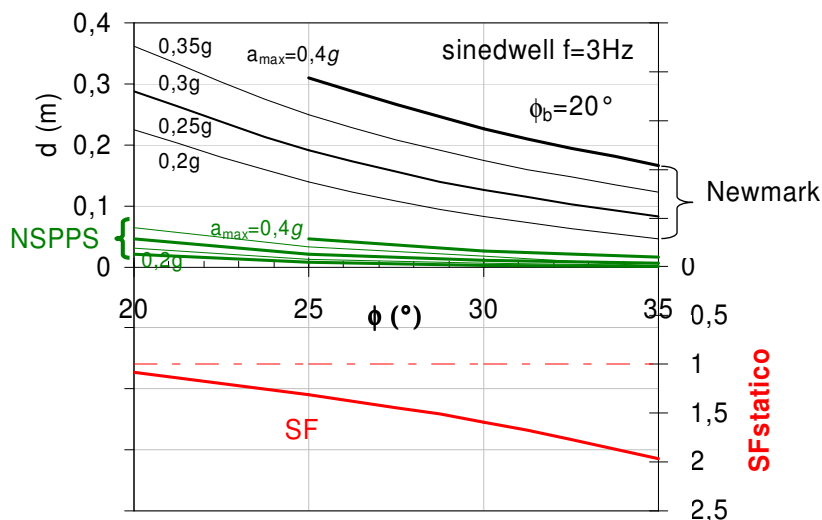


Figure 4. Risultati analisi parametrica: Confronto fra gli spostamenti valutati con il metodo tradizionale (MO) e quello NSPPS al variare delle proprietà del terrapieno e dell'ampiezza della sine dwell.

Se si ammette come ammissibile uno spostamento di 0.1m (e.g. Callisto e Aversa, 2008) si osserva che spostamenti maggiori di tale soglia si verificano per  $a_{max}$  maggiori di 0.35g in terrapieni con resistenze attrittive minori di  $25^\circ$ .

Nel caso in cui la resistenza allo scorrimento del contatto terreno-fondazione si riduce a  $20^\circ$  si osserva che lo spostamento supera la condizione ammissibile già per terrapieni con  $\phi$  minori di  $27^\circ$  e  $a_{max}$  maggiori di 0.2g, Fig. 5.

Al contempo l'interpretazione fatta con NSPPS, riportata anch'essa nelle suddette figure, non porta mai alla condizione critica ipotizzata ( $d > 0.1m$ ). Al crescere della frequenza per entrambi i metodi non viene raggiunta la condizione di crisi, Fig. 3.

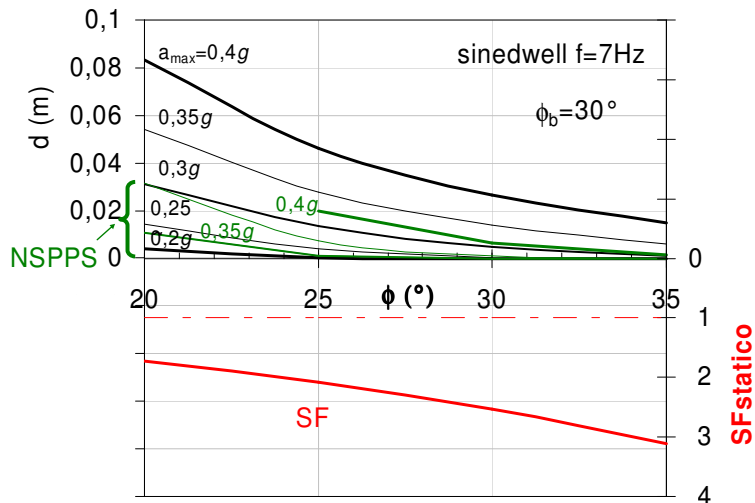


Figure 5. Risultati analisi parametrica: Confronto fra gli spostamenti valutati con il metodo tradizionale (MO) e quello NSPPS al variare delle proprietà del terrapieno e dell'ampiezza della sined well.

### Spostamenti indotti da reali storie accelerometriche

In Figura 6 si riportano le storie degli spostamenti cumulati valutate con il metodo NSPPS per i quattro accelerogrammi analizzati scalati alla stessa  $a_{max}$ . Si osserva che, come è noto, lo spostamento finale è funzione non solo dell'ampiezza della accelerazione (uguale nei tre casi) ma anche del contenuto in frequenza dell'input. La soglia critica di 0,1m allo scorrimento non è superata per il sistema muro-terrapieno analizzato (muro A in Evangelista e Scotto di Santolo, 2011).

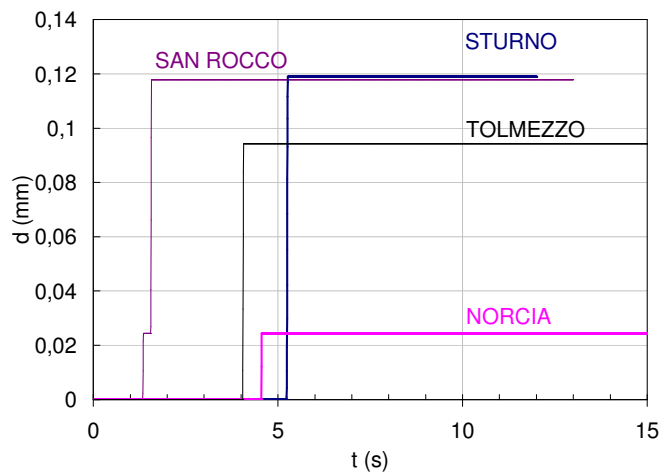


Figure 6. Spostamenti permanenti del muro A al variare dell'input sismico.

### Conclusioni

Nella nota si riportano i risultati delle analisi eseguite per la valutazione degli spostamenti permanenti di muri a mensola indotti da eventi sismici. Le verifiche geotecniche del muro sono state eseguite attraverso un'analisi pseudo statica valutando le spinte in accordo al nuovo metodo NSPPS proposto da Evangelista e co-autori nel 2009. Gli spostamenti permanenti,

consistenti in scorrimenti rispetto al piano di posa della fondazione del muro, sono stati valutati attraverso il metodo degli spostamenti alla Newmark classico e modificato per tener conto della variazione dell'accelerazione critica in accordo con il metodo NSPPS.

La procedura proposta conduce a un decremento degli spostamenti permanenti dei muri a mensola rispetto ai metodi tradizionali, nati per il blocco rigido e più adatto per i muri a gravità. Sebbene tale a procedura sia, in tal senso non cautelativa, l'assenza di danni sismo indotti su tali strutture in terreni incoerenti e in assenza di falda, e risultati preliminari di studi numerici e sperimentali su modelli su tavola vibrante, fa ritenere la procedura interessante ai fini della progettazione. Per la comprensione del comportamento dinamico dei muri a mensola è in corso la sperimentazione su modelli di muri a mensola su tavola vibrante presso il laboratorio BLADE dell'Università di Bristol (Progetto SERIES, responsabile prof. Evangelista 2009).

## RINGRAZIAMENTI

Parte del lavoro presentato rientra nelle attività svolte nell'ambito del progetto ReLuis area MT3 in collaborazione con Aldo Evangelista.

## Bibliografia

- AGI Associazione Geotecnica Italiana (2005). Aspetti geotecnici nella progettazione in zona sismica (edizione provvisoria) Pàtron editore, Bologna, pp. 402.
- Callisto L., Aversa S. (2008). Dimensionamento di opere di sostegno soggette ad azioni sismiche. In: Opere geotecniche in condizioni sismiche, MIR 2008. Pàtron, Bologna, 273-308.
- Carafa P., Crewe A.J., Simonelli A.L. (2000). Shaking table tests of gravity retaining walls to verify a displacement based design approach. Proc. XI European Conf. on Earthquake Engineering, Paris, September 2000.
- Vecchietti S., Cecconi M., e Pane V. (2007). Displacement-methods for the design of earth retaining structures. Proc. Int. Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 25-28.
- Crewe A., Simonelli A.L., Scotto di Santolo A. (1998). *Shaking table tests of scale models of gravity retaining walls*. Proc. 6<sup>th</sup> SECED Conference on Seismic Design Practice into the Next Century, Oxford, 26-27 March 1998, Balkema, pp. 187-194.
- Evangelista A., Scotto di Santolo A., Simonelli A.L. (2009). Considerazioni sulla progettazione sismica di muri a mensola. Atti del XIII Convegno di Ingegneria Sismica, ANIDIS Bologna, giugno 2009.
- Evangelista A., Scotto di Santolo A., Simonelli A.L. (2010). Evaluation of pseudo-static earth pressure coefficient of cantilever retaining walls. *J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **30**, 1119-1128.
- Evangelista A. e Scotto di Santolo A. (2011). Dynamic active earth pressure on cantilever retaining walls. In fase di revisione su rivista internazionale.
- Mononobe N., Matsuo H. (1929). *On the determination of earth pressure during earthquakes*. Proc. World Engineering Congress, Tokyo, vol. IX, pp. 177-185.
- Newmark N.M. (1965). Effect earthquakes on dams and embankments. *Géotechnique*, 15 (2), 139-159.
- NTC, Norme Tecniche per le Costruzioni, 2008. DM 14 gennaio 2008. G.U. n. 29, 4 febbraio 2008 – n. 30.
- Okabe S. (1924). General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam. *J. Jpn Civ. Engng Soc.* 10. No.5, 1277-1323.
- Rankine W.J.M. (1857). On the stability of loose earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 147-928.
- Richards R., Elms D. (1979). Seismic behaviour of gravity retaining walls. *J. of Geotechnical Engineering Div.* 105 (4), 449-464.
- Simonelli, A.L., Taylor, C.A., Evangelista, A., Scotto di Santolo, A. (1997). Sperimentazione su muri di sostegno mediante tavola vibrante. IV Convegno dei Ricercatori Universitari del C.N.R. Perugia, 16-17 Ottobre 1997.
- Simonelli A.L., & Penna A. (2008). Comunicazione personale
- Wong C.P. (1982). Seismic analysis and improved seismic design procedure for gravity retaining walls. MSc Thesis, Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, MA
- Zarrabi-Kashani K. (1978). *Sliding of gravity retaining wall during earthquakes considering vertical acceleration and changing of failure surface*. MSc Thesis, Department of Civil Engineering, M.I.T., Boston USA.