

# Analisi della risposta sismica locale con il FEM

Roberto Spagnuolo  
Softing srl

Il problema della “risposta sismica locale”, ovvero dell'amplificazione del moto sismico dovuta alla natura del terreno sovrastante lo strato di roccia dove il moto viene definito, è un problema che si sta rivelando molto significativo. Ed è un problema che si può affrontare con gli attuali strumenti di calcolo. Vi sono dei metodi che schematizzano il terreno con degli smorzatori di Kelvin-Voigt con caratteristiche derivate dalla natura del suolo, si tratta sostanzialmente di una formulazione analitica differenziale risolta con il metodo degli elementi finiti. Questo approccio è molto limitativo perché non consente di descrivere le caratteristiche del terreno in modo preciso e sofisticato e non consente una analisi bidimensionale. Si tratta cioè di considerare delle colonne di terreno. Questo approccio della colonna è molto più versatile se condotto con elementi finiti sofisticati e non solo banalmente viscosi, con la capacità di considerare più strati e con condizioni sature, non sature e anche di liquefazione. Oltretutto può essere eseguito con qualsiasi programma FEM evoluto senza dover ricorrere a software specializzati.

Nell'ambiente Earthquake Engineering di Nòlian All-In-One recentemente (2018) è stato implementato un elemento finito per modellare il suolo con un materiale elasto-plastico a flusso plastico non associativo.

Questo elemento si presta ottimamente per ottenere la risposta locale sia in un modello bidimensionale che monodimensionale. Il modello bidimensionale si impone quando si hanno variazioni altimetriche importanti o presenza di differenziazioni laterali rispetto al punto indagato.

In questa nota descriveremo l'approccio monodimensionale tramite colonna di terreno modellata con gli elementi finiti suddetti e valideremo questo modello sia con i risultati ottenuti con il programma OpenSees, con il modello analitico e con il programam Proshake.

Abbiamo impiegato uno degli esempi della documentazione di OpenSees in quanto riteniamo questo caso-prova autorevole e affidabile. Volendo la massima chiarezza nei risultati, impiegheremo un terreno omogeneo ed un accelerogramma costituito da una funzione sinusoidale, questo per non dover valutare la soluzione solo raffrontando graficamente i risultati. Questo non toglie però, come detto, che il modello possa rappresentare situazioni comunque complesse.

Abbiamo voluto quindi ripetere l'esempio di C. McGann e P. Arduino dell'Università di Washington pubblicato tra gli esempi di OpenSees [OpenSees]. I dati dell'esempio sono disponibili sul sito di OpenSees [Opensees].

Come forzante abbiamo impiegato una accelerazione di ampiezza unitaria e frequenza 10 Hz. Questa scelta è dettata dal desiderio di poter confrontare i risultati con la massima chiarezza,

Il modello richiede alcune accortezze.

Le dimensioni degli elementi devono essere tali da poter cogliere la frequenza più alta  $f_{MAX}$  che si desidera considerare. Si definisce il numero di elementi per lunghezza d'onda. La lunghezza d'onda è data da  $\lambda = v / f_{MAX}$  con  $v$  la velocità dello strato di suolo.

Le condizioni di interfaccia tra roccia e suolo viene realizzata con un dashpot viscoso secondo il metodo di Joiner e Chen [Joiner] che prevede una coefficiente lineare viscoso pari al prodotto della densità del suolo e della sua velocità, che è una impedenza.

I nodi degli elementi devono avere orizzontalmente lo stesso spostamento perché si abbia una azione solo tagliante per cui si usa un constraint che impone spostamenti eguali.

La forzante si otterrà per integrazione dell'accelerogramma al fine di ottenere un velocigramma che, con fattore moltiplicativo pari alla suddetta impedenza, va considerato come una forza agente.

Poiché si assume che vi sia un certo smorzamento, si assegneranno gli opportuni coefficienti di smorzamento di Rayleigh.

Infine su uno dei due nodi superiori si applica un registratore di accelerazione che ci fornirà la risposta a livello del suolo.

Il procedimento è dunque quello di applicare al livello della roccia una eccitazione data dalla normativa e di ottenere un accelerogramma a livello del suolo. Da tale accelerogramma si ottiene uno spettro. Se necessario si può ripetere l'operazione per sette accelerogrammi spettro-compatibili, ottenendo da essi sette spettri che verranno involuppati. In fine è possibile "lisciare" lo spettro ottenuto secondo il metodo previsto da [GDL, 2008]. Tutte queste funzioni sono automatizzate in Nòlian.

Vediamo ora la validazione dei risultati ottenuti con il FEM. Vediamo innanzitutto l'amplificazione prevista dal metodo analitico che è come segue:

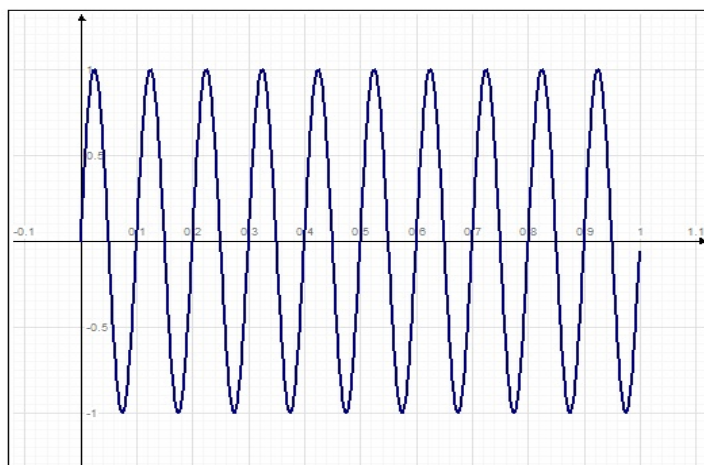
$$A = \frac{1}{\cos\left(\omega \frac{H}{v}\right) + i \frac{1}{C} \sin\left(\omega \frac{H}{v}\right)}$$

Con i dati del problema abbiamo  $A = 2.1$ .

Passiamo all'analisi con Nòlian. Verrà eseguita un'analisi con il materiale in fase elastica e poi una con il materiale in fase elasto-plastica entrambe con il solo peso proprio. L'analisi è un'analisi nel transitorio in quanto la base è libera di muoversi orizzontalmente, vincolata come è solo dal damper, e pertanto darebbe luogo ad una struttura labile, con un'analisi statica. Alle due analisi con il peso proprio seguirà un'analisi con la forzante assegnata. Il passo temporale di questa analisi è opportuno stabilirlo secondo le condizioni di LeVeque [LeVeque, 2007]. Abbiamo applicato un passo di 0.001 s per 1000 passi.

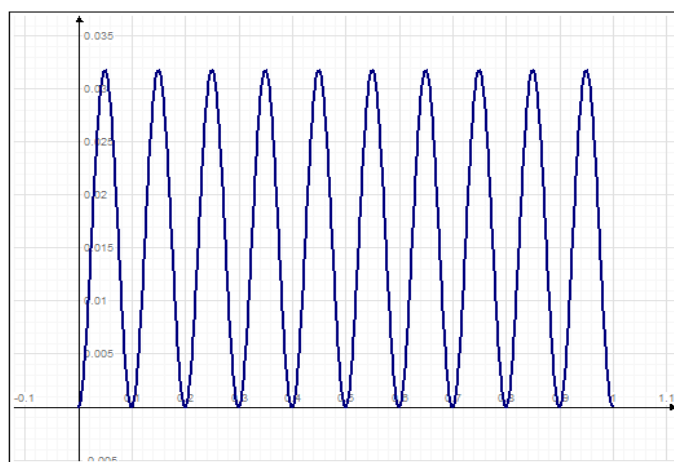
Va detto che nell'ambiente Earthquake Engineering di Nòlian All-In-One, una procedura specifica consente di costruire una colonna di terreno a strati in modo automatico in quanto altrimenti la costruzione di questo modello sarebbe molto laboriosa.

Assumiamo, come detto un accelerogramma sinusoidale di frequenza 10 Hz e di ampiezza unitaria, come nella figura 1.



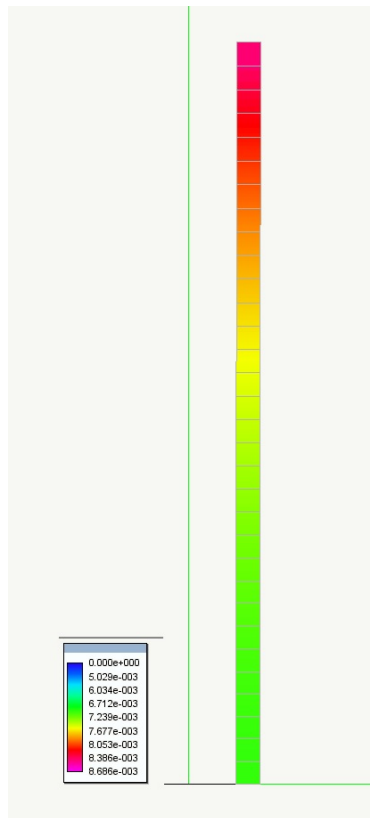
*Figura 1: Accelerogramma di ampiezza unitaria e frequenza 10 Hz*

Dall'accelerogramma otteniamo per integrazione il velocigramma di figura 2. Questa operazione è eseguita in automatico nel dialogo delle Forzanti di Nòlian.

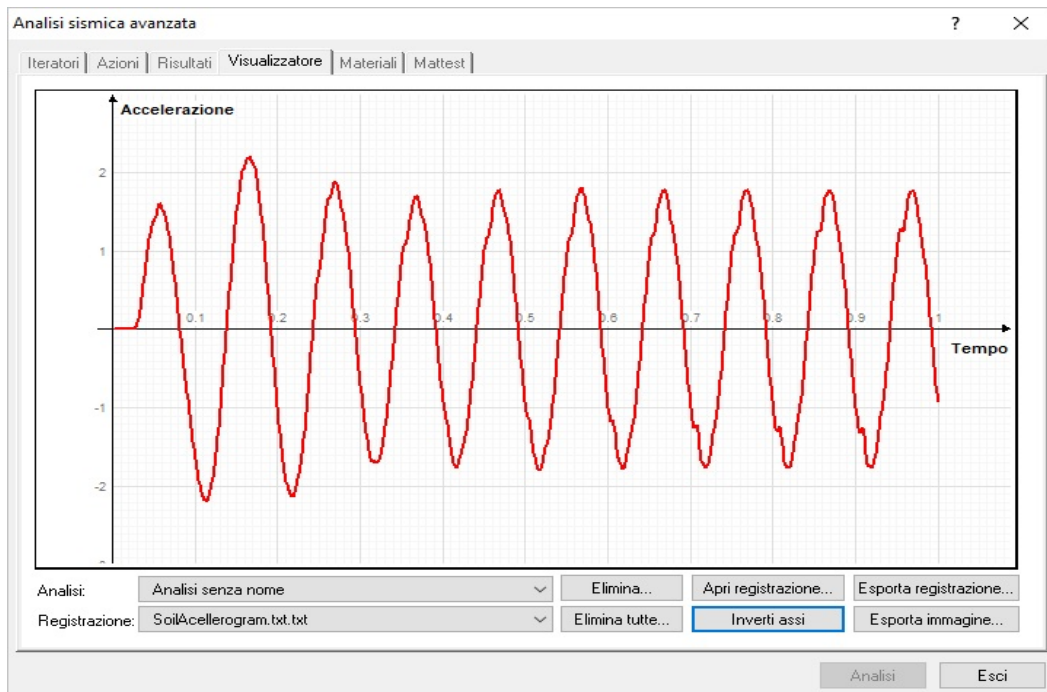


*Figura 2: Velocigramma ottenuto per integrazione dell'accelerogramma di Fig. 1*

Questo velocigramma, con fattore di amplificazione pari all'impedenza della roccia, viene assegnato ai nodi di base della colonna come azione di forza variabile nel tempo. E si esegue una analisi in transitorio.



*Figura 3: Colonna in fase di analisi in transitorio. I colori rappresentano i valori di spostamento.*



*Figura 4: Accelerogramma registrato in sommità (suolo)*

Dall'accelerogramma registrato durante l'analisi in transitorio, otteniamo lo spettro di risposta che è rappresentato in figura 5.

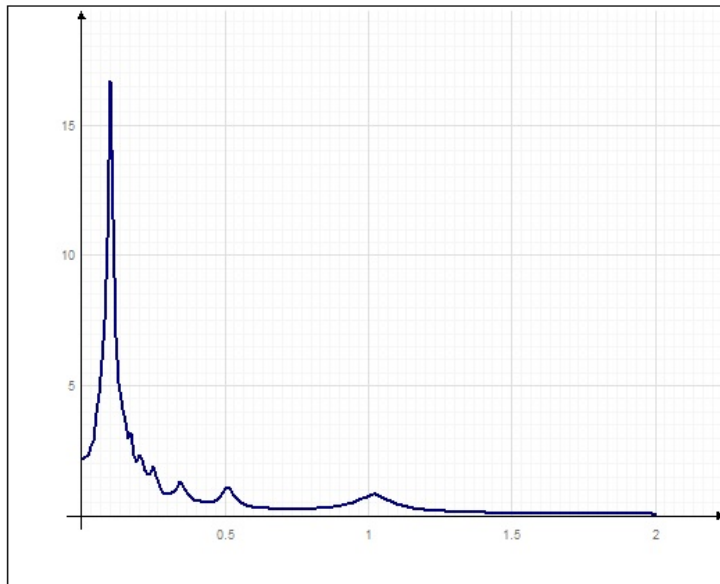


Figura 5: Spettro dell'accelerogramma di figura 4.

Qui possiamo fare già alcune considerazioni. Il valore massimo dell'accelerogramma in risposta è 2.34. Se ricordiamo il valore ottenuto analiticamente, il nostro valore si discosta da 2,1 (analitico) a 2.34 (calcolo). Discostamento di circa il 10%. Ma il valore analitico presuppone un comportamento lineare del terreno mentre noi abbiamo la possibilità più realistica di rappresentarne il comportamento non lineare. Se forziamo l'elemento finito ad avere un comportamento lineare, otteniamo valori pressoché coincidenti con quelli analitici. Ora vediamo gli spettri di risposta. Lo spettro di risposta dell'accelerogramma forzante è in figura 6.

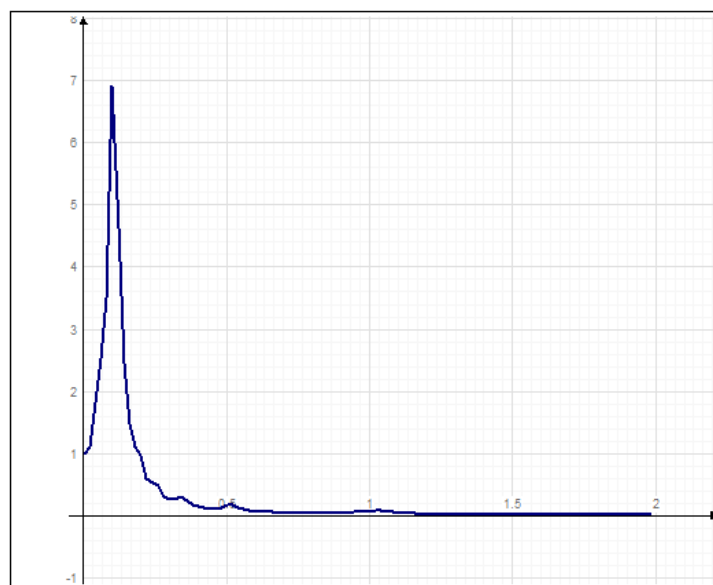
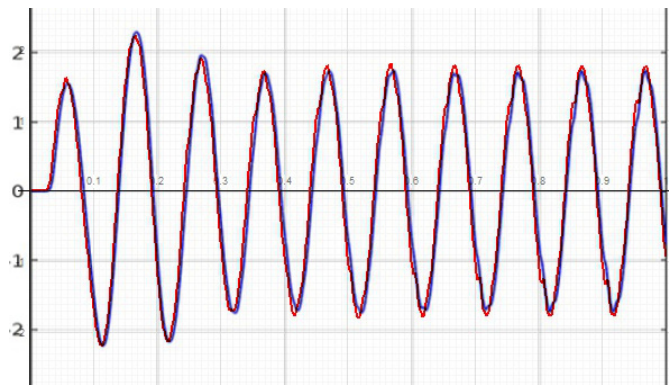


Figura 6: Spettro dell'accelerogramma alla base di roccia

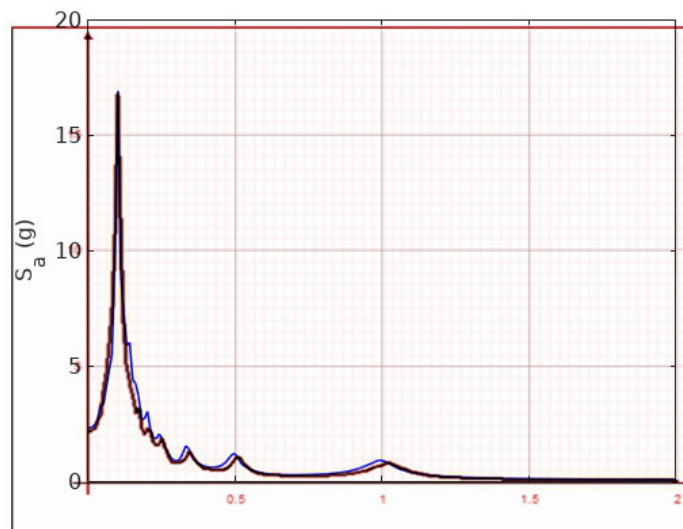
Si noti che, avendo impiegato volutamente un'onda sinusoidale con una unica frequenza, gli spettri presentano un picco esattamente per il periodo di 0.1 sec (10 Hz). Vediamo però l'amplificazione. I valori numerici sono 6.92 per lo spettro dell'accelerogramma su roccia e di 16,12 di quello al suolo, con una amplificazione di 2,32. Valore vicino a quello analitico, sempre considerando che il nostro è un modello non lineare e quindi più sofisticato.

Vediamo ora la differenza con i risultati ottenuti con lo stesso modello adoperando Opensees.



*Figura 7: La sovrapposizione degli accelerogramma al suolo ottenuti con EarthQuake Engineering di Nòlian All-In-One e con OpenSees.*

Con lo stesso metodo riportiamo i grafici sovrapposto degli spettri al suolo. Si nota che la post-elaborazione degli spettri è stata condotta, nel caso dei risultati di OpenSees, con MatLab e nel caso di Nòlian con gli strumenti propri di Nòlian stesso (fig. 8).



*Figura 8: La sovrapposizione degli spettri al suolo ottenuti con Earthquake Engineering di Nòlian All-In-One e con OpenSees.*

Ora la Protezione Civile ha emanato un interessante documento sul problema che stiamo trattando e ha specificato un metodo detto di “lisciamento” dello spettro che lo riporti alla forma ed ai parametri previsti dalla normativa. Occorrerebbe, come è noto, disporre di 7 accelerogrammi spettro compatibili, involupparli e o poi procedere per ottenere lo spettro di risposta al suolo che tiene conto della risposta locale. Fortunatamente molte di queste operazioni sono già automatizzate in Nòlian All-In-One.

Concludiamo con lo spettro “liscio” secondo quanto previsto dalle norme citate. Si tratta di uno spettro parametricamente definito come da NTC08 e poi NTC18 e quindi impiegabile in una analisi dinamica spettrale che tenga conto degli effetti del sito (naturalmente dopo aver involuppato i 7

accelerogrammi spettro-compatibili come prevede la normativa).

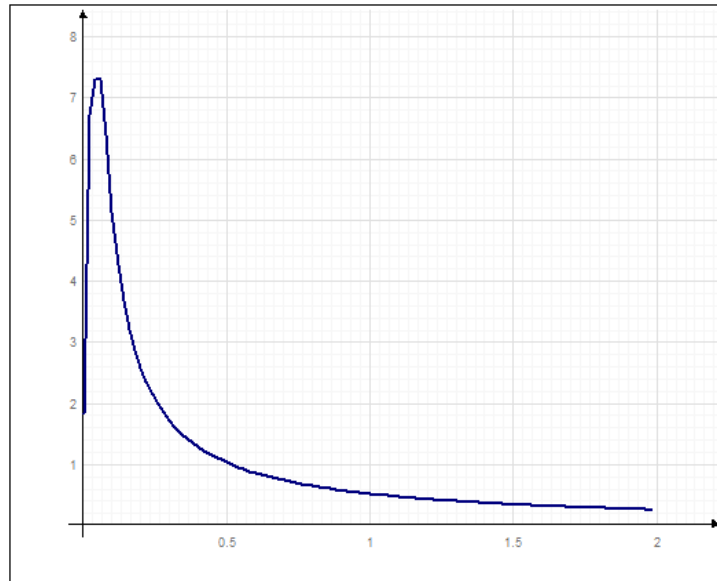


Figura 9: Lo spettro al suolo "lisciato" secondo le indicazioni normative.

Abbiamo anche, sia per scrupolo che per mostrare la soluzione con un notissimo accelerogramma, quello del terremoto di El Centro, eseguito una comparazione con i risultati del programma dedicato Proshake, versione 2.0. Si nota dalla figura 10 un discostamento dell'accelerazione di picco di circa il 13%, cosa che ci aspettavamo e che abbiamo già incontrato nel precedente raffronto con la soluzione analitica, in quanto la soluzione con Proshake è lineare.

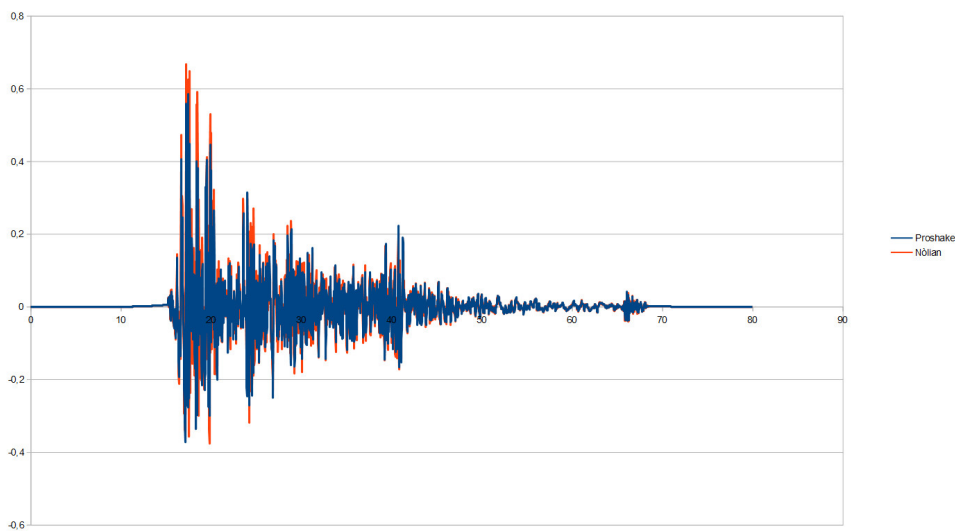


Figura 10: Confronto tra i risultati di Nòlian Earthquake Engineering e Proshake

Una riflessione che viene naturale nasce dalla osservazione della flessibilità di strumenti di calcolo generali, come il FEM non lineare dedicato a problemi avanzati e come si possa con questi strumenti flessibili e potenti, “esplorare” il mondo delle soluzioni invece che limitarsi ad un percorso ingresso-uscita predefinito. Cioè, la meccanica computazionale porta alla riunificazione di quella pletora di metodi che il calcolo “manuale” aveva costretto a seguire per motivi validissimi.

Un nuovo modo di vedere il progetto strutturale, generale e di indagine, che però tarda ad affermarsi.

Si tratta, come abbiamo visto, di un procedimento molto flessibile, quello illustrato, in quanto il suolo con il metodo FEM può essere modellato con molta accuratezza considerando tutti i fenomeni che possono presentarsi e non è particolarmente impegnativo, se si usano le automazioni presenti in Nòlian All-In-One. Concludiamo che qui abbiamo esposto il metodo della colonna, ma con Nòlian All-In-One è possibile descrivere un suolo sia bidimensionale che (tra breve) tridimensionale con elementi di contorno molto sofisticati e facili da usare. Ciò per strutture che richiedano grande accuratezza di modellazione, ci pare indispensabile.

Concludendo, il nuovo elemento finito per la geotecnica di Earthquake Engineering di Nòlian, consente la modellazione di una sezione bidimensionale di terreno e i nuovi elementi di confine consentono di modellare le condizioni al contorno, l'elemento è molto versatile e permette di modellare accuratamente pressoché ogni tipologia di terreno. Un uso però molto pratico è quello che qui abbiamo presentato, metodo che consente con molta semplicità di valutare la risposta locale. Per rendere il metodo più efficace, abbiamo automatizzato l'intera generazione del modello per cui all'utilizzatore è richiesta la definizione di pochi parametri.

### **Riferimenti bibliografici**

[LeVeque, 2007] LeVeque, R.J. (2007). *Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia].

[GDL, 2008]. "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica" (GdL MS, 2008).

[Joiner] Joyner, W.B. and Chen, A.T.F. "Calculation of nonlinear ground response in earthquakes"

[OpenSees]. "User documentation" <http://opensees.berkeley.edu>