

Analisi di risposta sismica locale (RSL), su una modellazione realistica di un sottosuolo tramite i codici di calcolo matematici “EERA” e “NERA”

Giuseppe Gugliuzza

Geologo - cbml@libero.it

RIASSUNTO In questo studio viene descritta l'applicazione di due metodologie di analisi probabilistica di risposta sismica locale, su un semispazio stratificato attraversato da onde di taglio viaggianti in direzione verticale. I metodi sono basati su differenti modelli di risposta ciclica dei terreni soggetti a sollecitazioni dinamiche. Inoltre vengono confrontati gli spettri di risposta sismica calcolati con quello adottato dalla O.P.C.M. 3274 del 20/03/2003.

ABSTRACT In this case study two methods to evaluate the probabilistic response of a horizontally layered halfspace subjected to vertically travelling shear waves are described. The methods are based on different modelling of the cyclic soil behaviour simulations. The response spectra evaluated are compared with that of the O.P.C.M. 3274 - 20/03/2003.

Introduzione

Col presente lavoro, viene illustrata una applicazione numerica di calcolo probabilistico di una analisi di risposta sismica locale, riconducibile alla stratigrafia di un sondaggio a c.c. denominato S2, eseguito a corredo di uno studio geologico per la realizzazione di un nuova opera nel quartiere Bonagia del Comune di Palermo.

L'analisi è stata sviluppata utilizzando due metodologie di calcolo numerico monodimensionali (1D), codificate in due programmi denominati **EERA**, e **NERA**, questi, formulati e testati dal dipartimento di Ingegneria Civile della “University of Southern California” si basano su un approccio numerico di un modello di sottosuolo reale caratterizzato geometricamente e meccanicamente tramite l'acquisizione di dati geologici, geotecnici e geofisici. Nel caso in esame i dati sono stati ottenuti dalla esecuzione nell'area in studio di n° 6 sondaggi a c.c., con relative prove SPT e di laboratorio, di n° 2 profili sismici a rifrazione (P e S) e di n° 1 prova in perforo di tipo “Down Hole”. Le risultanze dei calcoli, hanno permesso di definire quantitativamente sullo strato di fondazione, dato un opportuno *input sismico* le frequenze dominanti del segnale di ingresso, la frequenza fondamentale del sottosuolo, il fattore di amplificazione, i valori di accelerazione max (PGA), di velocità max (PGV), di spostamento max (PGD), e la massima accelerazione spettrale (PSV), inoltre in armonia con le norme impartite dalla O.P.C.M. n° 3274 del 20/03/2003, recepita dal Decreto del 14/9/2005, del Ministero delle Infrastrutture, relativo alle “Norme tecniche per le Costruzioni”, si sono verificati e confrontati i parametri indici della normativa, con quelli ottenuti dai calcoli numerici.

Inquadramento geologico

Dal rilevamento geologico, esteso ad una significativa zona circostante l'area interessata dalle opere

di progetto, è emerso che affiora una sola formazione e cioè: - l'Unità calcarenitica-sabbiosa del Pleistocene inferiore;

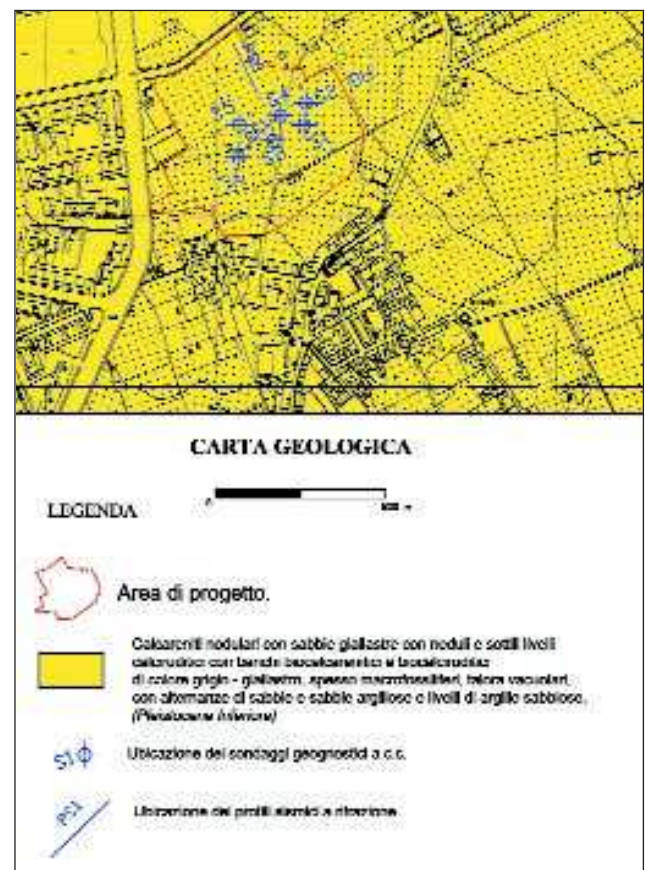


Fig. 1. Carta Geologica.

Questa unità, costituisce il sottosuolo dell'area in esame, e risulta mascherata in superficie da una coltre di limi sabbiosi rossastri, a tratti frammisti a terreni di riporto. Questa formazione, nota in letteratura geologica come le “calcareniti gialle” di Palermo, è formata da clasti detritici, di natura carbonatica, da tritume fossile e subordinamente da un modesto contenuto in quarzo detritico, variabile da

Classi Litotecniche	Spessore (m)	Vs misurate in sito (m/s)	Mod. di taglio (G) (MPa)	Peso di volume (kN/m ³)	SPT
Riporto	0.8	190	67	18.20	–
Alternanze calcareniti e sabbie	5.7	280	170	19.3	37
Alternanze calcareniti e calciruditi	3.1	680	942	20	Rifiuto
Alternanze calcareniti e sabbie	4.5	290	180	19.3	59
Argille Sabbiose	10.9	240	108	19.2	18
Alternanze calcareniti e calciruditi (Bedrock)	–	750	1204	21	Rifiuto

Tab. 1. *Classi litotecniche.*

luogo a luogo, ma sempre riconoscibile negli affioramenti.

In tale unità calcarenitica sono possibili diverse suddivisioni di litofacies, infatti possono presentarsi grossolane, cavernose, ben cementate, o in grosse bancate, talora alternate sia a sabbie sciolte a granulometria variabile, che va dalle sabbie grossolane a quelle delle siltiti argillose, sia a sabbie limose e/o a sabbie argillose.

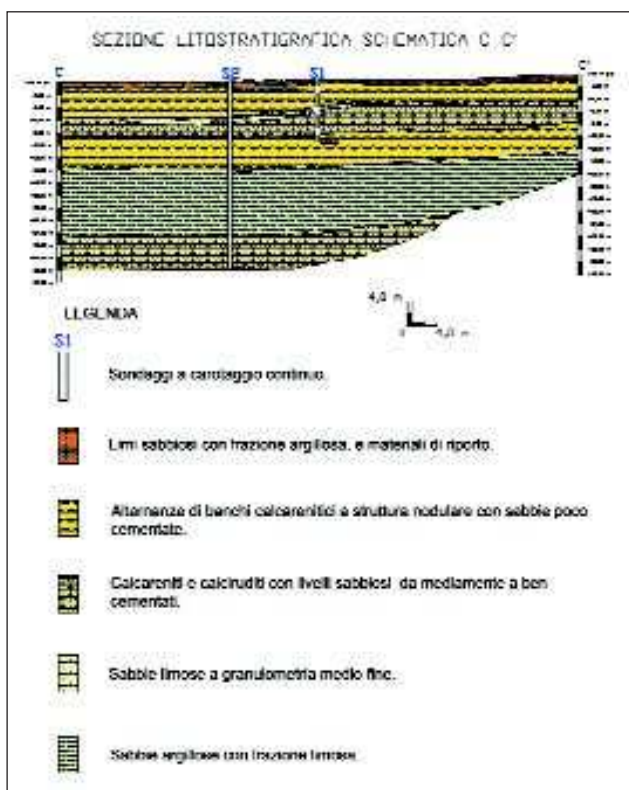


Fig. 2. *Sezione stratigrafica schematica.*

RSL di un sottosuolo reale e applicabilità dei moduli di calcolo

Per risposta sismica locale di un sito, si intende l'insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al.,1999).

L'applicazione dei codici di calcolo numerici nell'ottica di una modellazione realistica del sottosuolo necessita di un accorpamento degli strati in diverse classi litotecniche, ottenute mediante una caratterizzazione geofisica, geotecnica e fisico meccanica. In tal modo le unità litotecniche potranno essere computate nelle elaborazioni dei codici numerici per il calcolo dei parametri di strong motion (PGA,PGV etc.) allo superficie dello strato considerato.

Il concetto di base su cui si sviluppano i moduli numerici, riguardano la teoria del *comportamento non lineare e dissipativo dei terreni* in condizioni dinamiche e ciò è, la non esistenza di una funzione lineare che descriva in maniera reversibile (a causa della dissipazione di energia meccanica) il legame tensione-deformazione di un terreno, quando questo è sottoposto ad una sollecitazione dinamica.

La valutazione della risposta sismica nei due codici tiene conto non solo delle variazioni di ampiezza massima del moto sismico di riferimento, ma anche dell'effetto di filtraggio esercitato su di esso dagli strati.

Nello specifico la modifica del contenuto in frequenze del segnale di entrata, durante il tragitto che va dal bedrock verso gli strati superficiali, viene rappresentata dalla cosiddetta "funzione di amplificazione", definita come il rapporto tra lo spettro di Fourier del moto alla superficie dello strato considerato, e quello dell'analoga componente in corrispondenza del bedrock. La funzione di amplificazione, quindi, dipenderà dalla combinazione tra le "caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo, ampiezza e contenuto in frequenza del moto sismico del basamento e l'incidenza del comportamento non lineare dei terreni".

Moduli di calcolo EERA e NERA

I programmi di calcolo 1D richiedono che vengano soddisfatte alcune ipotesi nella modellazione del sottosuolo, quali:

- stratificazione delle unità litotecniche e del substrato orizzontali.
- volume di terreno considerato sufficientemente lontano dai fianchi dell'unità.
- dimensioni orizzontali delle unità elevate rispetto lo spessore.

Le procedure di calcolo, considerano nella soluzione dell'equilibrio dinamico del sistema, come già accennato, il legame non lineare attraverso due tipologie di analisi: l'EERA "Equivalent linear Earthquake site Response Analyses" (Bardet J.P., Ichii K., et al, 2000), che risulta una moderna implementazione di "Well-Known" sviluppata su gli stessi concetti basilari del famoso codice numerico SHAKE (Schnabel et al.,1972) e SHAKE 91(Idriss I.M. e Sun, J.I. 1992), e NERA "Non linear Earthquake site Response Analyses" (Bardet J.P., Tobita T. (2001); mentre per quanto riguarda i modelli rappresentativi del sottosuolo, il codice EERA si basa sul modello a "strati continui" dove il terreno è schematizzabile come un mezzo continuo multistrato, in cui ogni strato è assunto omogeneo ed a comportamento visco-elastico lineare mentre il codice NERA, utilizza il modello a "masse concentrate", in cui la stratigrafia viene ricondotta ad una serie di masse concentrate, in corrispondenza della superficie degli strati e collegati tra loro da molle e smorzatori viscosi, in modo da costituire un sistema a n gradi di libertà. In ambedue i modelli, l'analisi di risposta locale viene effettuata risolvendo le equazioni del moto, nota l'eccitazione sismica al basamento, che rappresenta in entrambi i casi, la storia temporale dell'accelerazione $a(t)$.

Moto di input e parametri geotecnici

Il moto di input rappresenta il segnale sismico al bedrock, la cui ampiezza e il contenuto in frequenza dipendono dalle caratteristiche del meccanismo della sorgente sismica, dalla magnitudo e dalla traiettoria sorgente-sito compiuta dalle onde sismiche.

Il moto di input, da inserire nei programmi di calcolo EERA e NERA, è stato espresso da un'accelerogramma che ne rappresenta la storia temporale $a(t)$, normalizzato a 0.1 g, riferito ad una probabile eccitazione sismica registrata su un bedrock affiorante (outcropping). Esistono diversi approcci per la determinazione del moto di input, in questo studio verrà preso in considerazione il metodo *probabilistico-statistico*, in quanto si presta meglio per scopi applicativi.

Gli strumenti necessari sono:

- un database di pericolosità di base, dove sono presenti i valori di pericolosità sismica per tutti i comuni italiani.
- un foglio di calcolo sviluppato secondo la tecnica di Bommer J.J., Scott S.G., et al.,(2000), qualora non si conoscessero le caratteristiche delle sorgenti sismogenetiche intorno al sito.
- un programma di esecuzione "SimnostMod" che permette di ricavare, dati una Magnitudo ed una

distanza d (riferite ad una sorgente), un accelerogramma, secondo la procedura descritta da: Sabetta F. & Pugliese A. (1996).

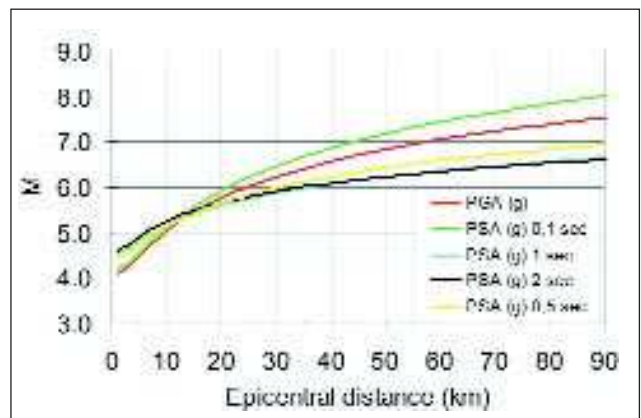


Fig. 3. Stima della magnitudo M e distanza epicentrale d nell'area della città di Palermo, ricavate dall'incrocio delle curve PGA e PSA, secondo Bommer J.J., Scot S.Gt, et al., (2000).

Il metodo probabilistico permette quindi di determinare il moto atteso (espresso con uno dei parametri di *strong motion*, PGA, PGV) partendo da un'analisi di pericolosità di base, che è stata effettuata stimando i parametri di scuotimento del terreno, attesi su sito rigido e aventi probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (periodo di ritorno equivalente =475 anni). Per l'area in studio è stato individuato un accelerogramma (fig. 4) considerando come massimo terremoto potenziale un evento di Magnitudo $M = 5,43$ con distanza epicentrale $d = 12$ Km.

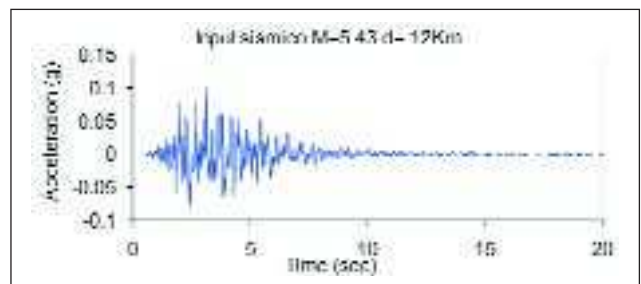


Fig. 4. Accelerogramma sintetico.

Le proprietà fisico-meccaniche dei materiali presenti nell'area in studio, necessari all'avviamento dei due softwares, sono state ottenute dalle relative indagini geognostiche, prove di laboratorio e indagini geofisiche mentre le curve di degrado $G/G_{max}-\gamma$ e D/γ (modulo di taglio e smorzamento), che definiscono le variazioni dinamiche del modulo di taglio G e dello smorzamento D con le deformazioni, sono state ricavate dai dati di letteratura, provenienti da specifiche prove di laboratorio, denominate "prove di colonna risonante" eseguite su materiali aventi caratteristiche simili in termini reologici, ai litotipi riscontrati nella zona in esame.

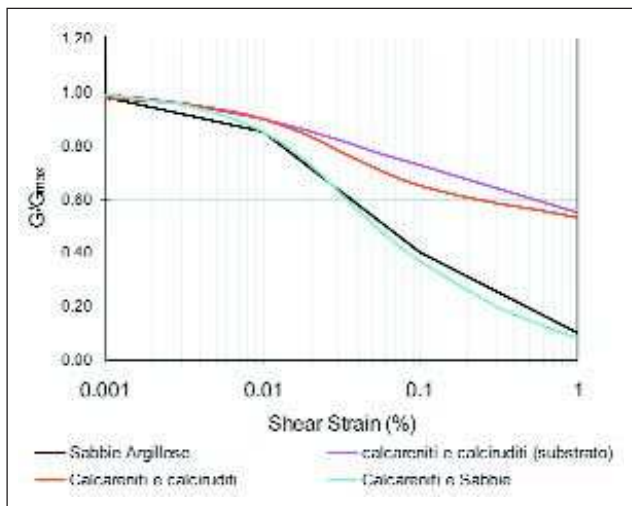


Fig. 5. Curve di degrado del modulo di taglio(G).

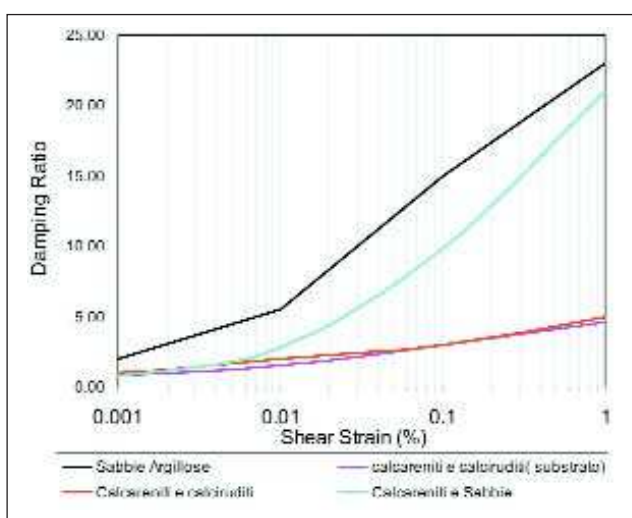


Fig. 6. Curve di degrado del rapporto di smorzamento(D).

Risultanze grafiche e numeriche dei codici di calcolo

I moduli di calcolo, una volta applicato il moto di input sismico, permettono di ottenere i parametri sismici di risposta di sito, relativamente a qualsivoglia strato nel sottosuolo preso in esame; nel caso specifico, alla luce della applicazione ingegneristica, di cui si propone il seguente lavoro, si è considerato per il calcolo dei parametri di strong motion il secondo strato, giacente ad una profondità di -0,8 m dal piano di campagna, in quanto andrà a costituire la probabile base di appoggio delle strutture fondali della nuova opera in progetto, mentre il tetto del bedrock, alla quale è stato applicato l'input sismico si trova ad una profondità di -25,0 m dal piano di campagna.

I codici di calcolo numerici, attraverso l'inserimento dell'opportuno moto di input sismico al bedrock, delle velocità delle onde V_s , dei valori del modulo di taglio G , e del peso di volume dei vari livelli litotecnici, applicano delle interazioni ed iterazioni,

tra la funzione del moto di input sismico, e le curve di degrado $G/G_{max}-\gamma$ e D/γ , ottenendo in tal modo, sia la funzione del segnale sismico sullo strato considerato (segnale di ingresso), sia la *funzione di amplificazione*; questa ultima di rilevante importanza, ai fini dello studio di RSL, in quanto determina le proprietà "filtro" degli strati, e cioè, le componenti del moto sismico, che sono state amplificate durante il passaggio dal bedrock alla superficie dello strato considerato. In accordo con i risultati di altri confronti effettuati tra codici lineari l'analisi eseguita con EERA ha condotto ad una minore amplificazione del moto sismico di ingresso, rispetto al modulo NERA, (Caputo R, et al., 2004). Dalla comparazione delle due funzioni di amplificazioni, si nota un andamento simile, dove per entrambe le curve si conferma un massimo picco di amplificazione per frequenze di 2,454 Hz, per il modulo EERA, e 2,355 Hz per il modulo NERA (fig. 7).

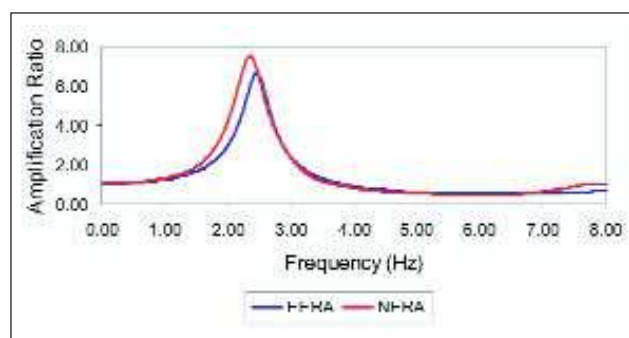


Fig. 7. Funzioni di amplificazione.

Sulla superficie dello strato di fondazione e cioè a -0,80 m dal p.c., la frequenza fondamentale calcolata dai codici risulta essere di 2,30 Hz (fig. 8), mentre i valori di accelerazioni massime di 0.186 g per EERA e di 0.129 per NERA (fig. 9). Di seguito vengono esposti i grafici relativi allo stress ed allo strain (%) riferiti a metà dello spessore del secondo strato, è cioè ad una profondità di -3,25 m dal p.c., dove il max stress ed il max strain è risultato essere di 12,82 (kPa) 0,0052 (%) e 9,08 (kPa) 0,0068 (%), rispettivamente per i codici di calcolo EERA e NERA.

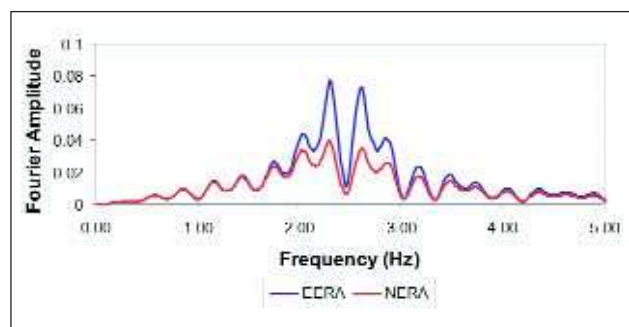


Fig. 8. Frequenza dominante del segnale di ingresso.

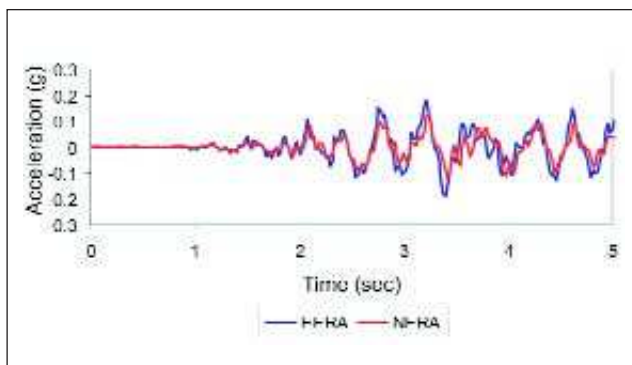


Fig. 9. Accelerazione temporale sullo strato di fondazione.

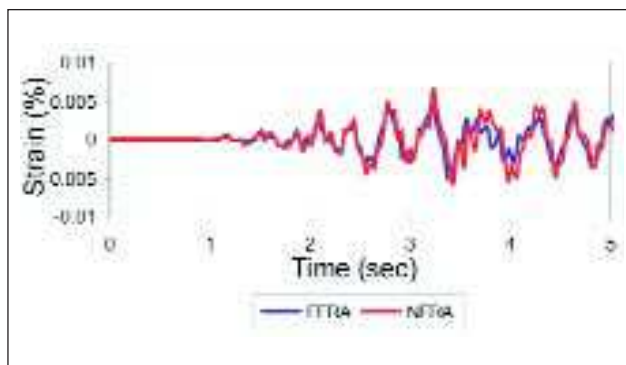
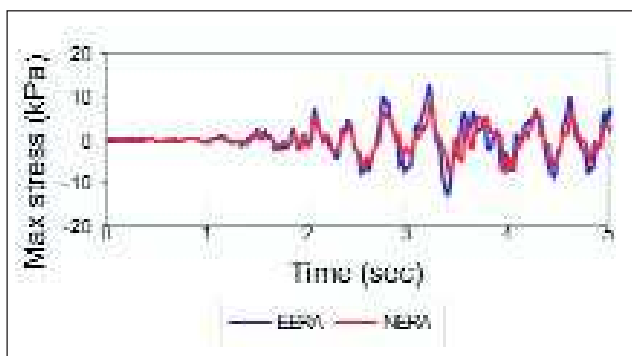


Fig. 11. Andamento delle deformazioni durante la sollecitazione sismica dello strato di fondazione.



14

A seguire si riporta una tabella riepilogativa dei valori calcolati sullo strato di fondazione.

Valori calcolati al top dello strato di fondazione, a-0,8 m dal p.c.	EERA	NERA
PGA(g)	0.186	0.129
PGV (m/s)	0.0993	0.0634
PGD (m)	0.00642	0.0042
PSV (g)	0.7536	0.4055
Periodo max acc. spettrale	0.39	0.48
Frequenza max acc. spettrale	2.56	2.08
Frequenza dominante	2.3071	2.3071
Frequenza naturale strato	12.28	12.28
Fa max	6.856	7.508
Frequenza max amplificazione	2.454	2.355
Valori calcolati sullo strato di fondazione a-3,25 m dal p.c.	EERA	NERA
Max strain (%)	0.0052	0.0068
Max stress (kPa)	12.82	9.08

Tab. 2. Valori calcolati dai codici di calcolo

Dove: PGA massima accelerazione, PGV massima velocità, PGD massimo spostamento, PSV massima accelerazione spettrale, Fa fattore di amplificazione.

Confronti e risultati

Dal confronto tra le analisi effettuate con i due codici di calcolo EERA e NERA e da quelli forniti dalla Ordinanza P.C.M. n° 3274, si può dedurre che nel seguente caso, i risultati ottenuti dall'elaborazione numerica, risultano essere all'interno del range di valori richiesta dalla normativa, così come si evince dalla tab. 3.

Parametri	O.P.C.M. n° 3274	EERA	NERA
PGA	0.25	0.186	0.129
PSV	0.78	0.7536	0.4055

Tab. 3. Parametri calcolati

Ai fini progettuali ed ingegneristici, dal confronto tra lo spettro di risposta elastica ricavato dalla simulazione numerica, e da quello ottenuto dalla normativa vigente è emerso che le strutture soggette ad una amplificazione dell'accelerazione, sono quelle aventi un periodo (T) proprio di oscillazione tra 0.39 e 0.48 e cioè da 2.08 Hz a 2.56 Hz.

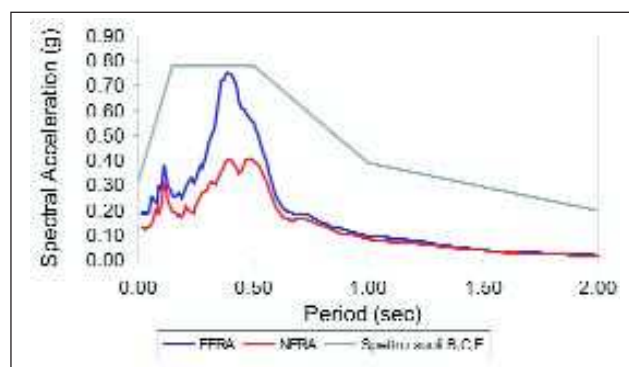


Fig. 12. Spettro di risposta elastico di accelerazione (smorzamento 5%)

Inoltre per una valutazione corretta dei possibili fenomeni di amplificazione e quindi degli effetti di scuotimento degli edifici sottoposti al rischio sismico, è necessario tener conto della frequenza naturale del terreno, pertanto bisogna prendere in considerazione eventuali fenomeni di "risonanza" che possono verificarsi qualora vi sia corrispondenza tra la frequenza dominante del segnale in ingresso, con quella naturale dello strato di fondazione, e con quella propria del manufatto. Nel seguente caso non avendo a disposizione la frequenza propria del manufatto, in quanto in fase di progettazione, ci si può limitare ad affermare che non risultano esserci effetti di risonanza, tra il segnale in ingresso (2,30 Hz) e quello fondamentale dello strato di fondazione (12.28 Hz). In conclusione, con questo studio si è voluto mostrare come i procedimenti di calcolo numerici monodimensionali (1D), eseguiti con le opportune ipotesi e considerazioni, possono fornire delle soluzioni applicabili a svariati modelli e scenari stratigrafici presenti in natura, ottenendo così, dei risultati verosimili derivanti da una attenta ed accurata acquisizione di dati di tipo geofisico, geologico, e geotecnico. Infine l'applicabilità di tale studio in ottemperanza alla O.P.C.M. (ormai recepita dalle nuove "Norme tecniche per le costruzioni" con Decreto del 14/9/2005) potrebbe come si è già visto, essere un efficace strumento a supporto delle relative norme tecniche di progetto, ma anche essere un utile impiego per lo studio all'adeguamento sismico di edifici ed opere infrastrutturali di notevole rilevanza, in termini di protezione civile nel caso di potenziali eventi catastrofici. ■

Ringraziamenti: Si ringrazia il Dott. Angelo Cascio per aver concesso l'utilizzo e la pubblicazione dei dati relativi alla campagna geognostica e geofisica dell'area in studio, e di aver contribuito con i suoi preziosi suggerimenti alla stesura del seguente lavoro.

Bibliografia di riferimento

- BARDET J.P., ICHII K., LIN C.H. (2000). *Equivalent linear earthquake site response analysis of layered soil deposits*. Department of Civil & Environmental Engineering. University of Southern California.
- BARDET J.P., TOBITA T. (2001). *Non linear earthquake site response analysis of layered soil deposits*. Department of Civil & Environmental Engineering. University of Southern California.
- BOMMER J.J., SCOTT S.G., SARMA S.K. (2000) *Hazard-consistent earthquake scenarios*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19, 219-231.
- CAPUTO R., FIORE A., PIEDILATO S., SESSA R. (2004) *Analisi dell'amplificazione sismica locale ai fini della pianificazione urbanistica. Caso di studio di Ginestra (PZ) nell'Appennino Meridionale*. Geologia tecnica & ambientale, trimestrale dell'Ordine Nazionale dei Geologi, n° 1 Gennaio-Marzo.
- IDRISS I.M., SUN J.I. (1992). *A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of hori-*

zontally layered soil deposits. Department of Civil & Environmental Engineering, University of California.

- LANZO G., SILVESTRI F. (1999). *Risposta sismica locale - Teoria ed esperienze*. Hevelius Edizioni.
- SABETTA F. & PUGLIESE A. (1996). *Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions*. BSSA 86, pp.337-352.
- SCHNABEL J.L., BOLTON SEED H. (1972). *A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*. Earthquake Engineering Research Center, report No 72-12.

Opere di approfondimento consultate, ma non menzionate nella presente nota

- CANZONERI V., GIAMMARINARO M.S., GUGLIUZZA G., VALLONE P. (2002) *Area urbana Palermitana: analisi delle proprietà geotecniche dei terreni supportata da tecnologia GIS*. In opere geotecniche, Patron Bologna, 37-44.
- CHOUINARD L., ROSSET P., DE LA PUENTE A., MADRIZ R., MITCHELL, D. ADAMS J. (2004). *Seismic hazard analysis for Montreal*. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 7010.
- GIAMMARINARO M.S., CANZONERI, V., SPOTORNO R., & CATALANO R. (2000) *Historical Centre of Palermo - Effects of the lithotechnical successions on the bulk contribution to seismic response*. Mem. Soc. Geol. It., 55, 439-447, 9 ff.
- GIAMMARINARO M.S., SPOTORNO R., SULLI A. & CATALANO R. *Analisi litostratigrafica del sottosuolo del centro storico della Città di Palermo finalizzata alla stima della pericolosità sismica dell'area*. Naturalista sicil., IV, XXIII (3-4), 1999, pp. 335-357.
- MANCUSO CLAUDIO (1996). *Misure dinamiche in sito - applicazioni geotecniche*. Hevelius edizioni.
- SANO' T., PUGLIESE A., DI PASQUALE. G. (1993). *Aleatorietà del moto sismico nell'amplificazione locale*. 6° Convegno Nazionale, l'ingegneria sismica in Italia, Perugia, 13-14-15, 65-73.
- TODARO P. (2003). *Il rischio sismico nel centro storico di Palermo: un approccio deterministico dell'effetto di sito*. Geologi di Sicilia, Boll. Ord. Regionale dei Geologi di Sicilia, Anno XI, n° 1 Gennaio-Marzo.
- YOUSSEF M.A. HASHAS.H, DUHEE P. (2001). *Nonlinear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment*. Engineering Geology 62, 2001, 185-206.

Holiday Inn Palermo

Viale Regione Siciliana, 2620 - Palermo

Tel. 091.6983111 - Fax 091.408198

holidayinn.palermo@alliancealberghi.com

È stata rinnovata per il 2006 la convenzione con l'Holiday Inn Palermo. Le prenotazioni possono essere effettuate chiamando lo 091.6983111, inviando un fax allo 091.408198, oppure attraverso l'indirizzo E-mail:

halidayinn.palermo@alliancealberghi.com