



POLITECNICO DI TORINO  
Repository ISTITUZIONALE

INFLUENZA DELLE INCERTEZZE NELLA VALUTAZIONE DEI PROFILI DI  $V_s$  SULLE ANALISI DI RSL: IL CASO STUDIO DI FONTE DEL CAMPO (RI)

*Original*

INFLUENZA DELLE INCERTEZZE NELLA VALUTAZIONE DEI PROFILI DI  $V_s$  SULLE ANALISI DI RSL: IL CASO STUDIO DI FONTE DEL CAMPO (RI) / Passeri, Federico; Foti, Sebastiano. - CD-ROM. - (2017). ((Intervento presentato al convegno IARG 2017 tenutosi a Matera nel 5-7 luglio 2017.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2676311 since: 2019-02-18T12:06:21Z

*Publisher:*

GNIG

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# INFLUENZA DELLE INCERTEZZE NELLA VALUTAZIONE DEI PROFILI DI $V_s$ SULLE ANALISI DI RSL: IL CASO STUDIO DI FONTE DEL CAMPO (RI)

Federico Passeri  
*Politecnico di Torino*  
*federico.passeri@polito.it*

Sebastiano Foti  
*Politecnico di Torino*  
*sebastiano.foti@polito.it*

## Sommario

La valutazione delle incertezze nei parametri e la loro propagazione all'interno degli studi di risposta sismica locale rappresentano un carattere fondamentale nella valutazione del rischio sismico e nella microzonazione del territorio. Il profilo delle velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), in particolare, rappresenta il parametro chiave per descrivere il comportamento del deposito sia per bassi, che per alti livelli deformativi. La valutazione della pericolosità di un sito specifico, pertanto, deve tenere in conto di tali incertezze a livello probabilistico, in modo da fornire un risultato consistente con lo studio probabilistico di base, e che tenga conto di diversi livelli di non-linearità.

## 1. Introduzione

Uno degli aspetti principali dei moderni problemi di dinamica dei terreni e, più in particolare, di analisi della risposta sismica locale (RSL), riguarda la valutazione delle incertezze e la loro propagazione nel 'prodotto finale', ossia la pericolosità sismica locale (Rathje et al. 2010). Fin dai primi anni 2000, infatti, numerosi studi hanno dimostrato come la contaminazione di valutazioni deterministiche in un ambito prevalentemente probabilistico rappresenti una operazione concettualmente erranea (Bazzurro e Cornell 2004, Papaspiliou et al. 2012, Stewart et al. 2014, Pehlivan et al. 2016), soprattutto nel caso di marcate risposte nonlineari.

Negli ultimi anni, inoltre, la disponibilità di un maggior numero di misure strong-motion e down-hole arrays, parallelamente alle capacità sempre crescenti delle simulazioni numeriche e dei codici di calcolo, hanno permesso di analizzare il problema di risposta dinamica di un sito in un'ottica non più totalmente 'ergodica' (Stewart et al. 2014).

L'argomento principale della presente nota riguarda la propagazione delle incertezze nei profili di  $V_s$  all'interno di una analisi non-ergodica di RSL, a partire da uno studio probabilistico di rischio sismico di base. La loro influenza verrà valutata rispetto allo spettro di pericolosità specifico per il sito di Fonte del Campo (RI), andando a combinare in maniera consistente la pericolosità sismica di base con le analisi probabilistiche di RSL. Sebbene le diverse tipologie di incertezze (epistemiche ed aleatorie) debbano essere trattate in maniera differente, nella pratica risulta complicato investigare a fondo la loro natura, in particolare nel caso dei profili di  $V_s$ . Per questi motivi, i risultati di RSL ottenuti con profili da prove per onde superficiali si confronteranno con quelli ottenuti mediante un metodo di randomizzazione dei profili di  $V_s$  proposto da Toro (Toro 1995), per valutarne la consistenza con dati reali, in termini di valori e variabilità associate.

## 2. Influenza del profilo di $V_s$ nelle analisi di risposta sismica locale

Vari approcci in Letteratura hanno, finora, proposto vari metodi per una valutazione dell'influenza delle incertezze nei profili di  $V_s$  sulla previsione del moto in superficie. Essi possono essere divisi in due categorie. La prima prevede l'utilizzo di modelli geostatistici di randomizzazione dei profili, i quali forniscono la base per l'implementazione di una analisi tipo Monte Carlo. Il modello largamente più utilizzato è quello di Toro (1995), con vari esempi proposti per vari siti in Letteratura (Li e Assimaki 2010, Rathje et al. 2010, Rodriguez-Marek et al. 2014, Pehlivan et al. 2016) e nella pratica (Linee Guida EPRI per siti di centrali nucleari). Tuttavia, molti di questi esempi mostrano forti limiti di questo metodo, di cui non si possiede una trasparente e pubblica trattazione, e che risulta ormai obsoleto in alcune assunzioni (Stewart et al. 2014).

Il secondo approccio, ancor meno robusto, prevede l'utilizzo di profili di  $V_s$  statisticamente rappresentativi o ottenuti tramite fattori di scala a priori (profilo medio,  $\pm 20\%$ , 5<sup>th</sup> e 95<sup>th</sup> percentile). Anche in questo caso, esempi in Letteratura ed in applicazioni hanno dimostrato come quest'approccio non riesca a valutare la reale dispersione del dato, visto che l'assunzione di una determinata variabilità, senza una base sperimentale, può condurre a risultati non rappresentativi.

### 2.1 Il caso di studio: Fonte del Campo (RI)

Fonte del Campo è una frazione del comune di Accumoli (RI), nella zona dell'alta valle del Tronto profondamente colpita dagli eventi sismici del 24 agosto e del 30 ottobre 2016. Il sito in esame ( $42^{\circ}41'30.8''N$   $13^{\circ}15'22.4''E$ ) è stato analizzato nell'ambito di una campagna di indagine condotta dal Politecnico di Torino per la successiva microzonazione della macroarea di Accumoli. La conformazione geologica segue quella a "valle stretta" del fiume Tronto, caratterizzata da successive sovrapposizioni di depositi di conoidi tra loro incassate, a partire dal versante che proviene dalla frazione di Illica (RI). Le formazioni più rigide ( $V_s > 1000$  m/s), invece, si prevedono come alluvioni grossolane di fondovalle, ad una profondità intorno ai 20-30 metri.

La campagna di indagine condotta dal Politecnico di Torino ha previsto, nel mese di settembre 2016, varie prove geofisiche tra cui: 1) ERT test, 2) prove di rifrazione per onde P, 3) MASW test, 4) ReMi test, 5) prove passive di acquisizione del rumore ambientale con configurazione a cerchio, e 6) una prova HVSr.

In particolare, nella presente nota, verranno presentati i risultati di diverse inversioni ottenute a partire dalla curva di dispersione sperimentale e l'incertezza associata (Figura 1a). Essa è stata estratta tenendo in conto di varie configurazioni della sorgente nella prova MASW e dei dati a bassa frequenza ottenuti con la configurazione a cerchio. Le inversioni sono state condotte con un approccio unimodale (Socco e Boiero 2008) e multimodale (Maraschini e Foti 2010) utilizzando i codici MATLAB del Politecnico di Torino. Lo spazio delle possibili soluzioni è stato investigato con un approccio Global Search Method di tipo Monte Carlo (Foti et al. 2014) ed utilizzando tutte le informazioni raccolte mediante le altre prove. Ad esempio, la posizione della falda è stata stimata a 10 m dal piano campagna, come evidenziato dalla tomografia 2D, risultato delle prove di rifrazione per onde P (Figura 1b).

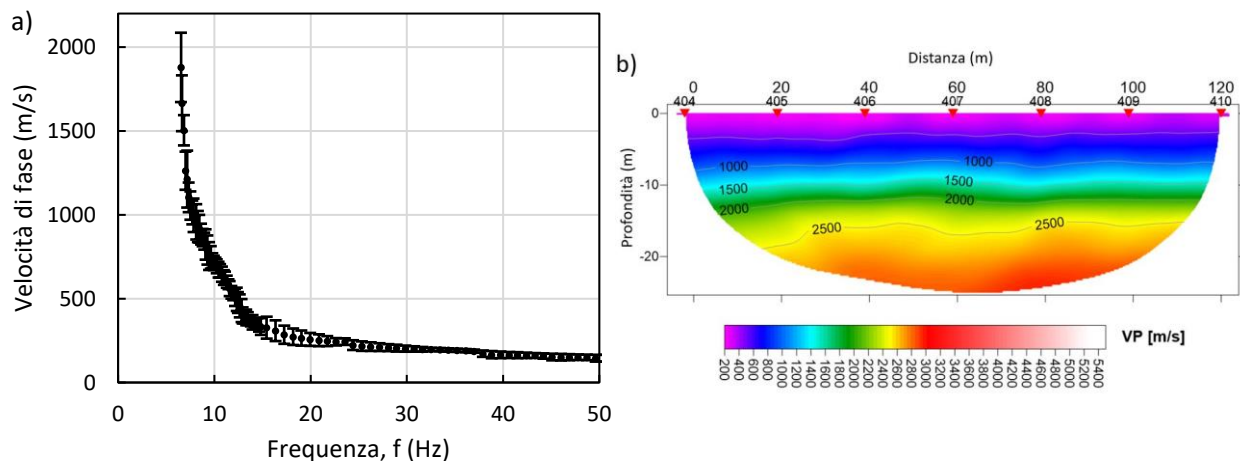


Fig. 1. a) Curva di dispersione sperimentale e relativa incertezza. b) Tomografia 2D velocità onde P.

In Figura 2a sono presentati i 25 profili selezionati dalle inversioni unimodali (in rosso) ed i 25 profili selezionati dalle inversioni multimodali (in verde). Il processo di selezione ha riguardato differenti approcci e giudizi ponderati rispetto allo spazio dei parametri iniziali (spessori strati, coefficienti di Poisson e limiti delle velocità), i misfit in output, ma anche differenti campionamenti della curva di dispersione sperimentale, in modo da ottenere maggiore risoluzione alle basse frequenze, dove si hanno informazioni dalle registrazioni di tipo passivo. Inoltre, per quanto riguarda le inversioni multimodali, si è dovuto tenere in conto dell'influenza dei modi superiori, andando a valutare di volta in volta il risultato più attendibile. Per tutti i profili, inoltre, sono state calcolate le funzioni di trasferimento viscoelastiche (non presentate per brevità di trattazione) e comparate con i risultati della prova HVSR, che ha fornito la frequenza di risonanza intorno ai 6 Hz (4 misure da 30 minuti).

Oltre ai profili ottenuti dalle inversioni, per le successive analisi di RSL sono stati generati 800 profili tramite randomizzazione di tipo Monte Carlo, seguendo il modello geostatistico proposto da Toro (1995) (Figura 2a, con linee tratteggiate). 400 di essi sono stati generati prendendo come baseline la media dei profili dalle inversioni unimodali, mentre i restanti 400 sono stati generati utilizzando come baseline la media dei profili dalle inversioni multimodali, comunque assunti lognormalmente distribuiti. I restanti parametri del modello (deviazione standard logaritmica con la profondità, parametri di correlazione tra gli strati e parametri di variazione dello spessore degli strati) sono stati assunti pari a quelli consigliati per una categoria di sottosuolo USGS B ( $V_{s,30}$  compresa tra 750÷360 m/s). In questo modo si è voluta simulare una condizione di single-profile, ossia una situazione in cui solamente un profilo deterministico fosse stato fornito per le analisi di RSL, come nella normale pratica.

La prima osservazione riguardo l'approssimazione che si commette utilizzando i parametri di default del modello di Toro è chiara nelle Figure 2a-b. Una sostanziale sovrastima della variabilità è espressa in termini di deviazione standard logaritmica, a tutte le profondità analizzate, passando da un valore di circa 0.2 per i profili ottenuti dalle inversioni ad oltre 0.3 per i profili randomizzati con le due diverse baselines ed i parametri di default del modello.

## 2.2 Scelta degli accelerogrammi e simulazioni numeriche

Una volta ottenuti i profili di  $V_s$  per le analisi, si è proceduto alla selezione degli accelerogrammi reali, prendendo come riferimento i 4 spettri probabilistici a pericolosità uniforme (UHS) degli Stati Limite da Normativa vigente (SLO, SLD, SLV ed SLC, NTC08) disponibili sul sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Il periodo di riferimento per l'Azione Sismica è stato fissato a 50 anni, per cui si sono valutati gli spettri relativi ad una probabilità di eccedenza di 81, 63, 10 e 5% in 50 anni, come valori mediani (50° percentile). La scelta degli accelerogrammi si è basata su una selezione in base a ranges di PGA, caratteristiche tettoniche (sorgenti a meccanismo tettonico normale), distanze e magnitudo (dai risultati della disaggregazione) e per registrazioni su suolo di tipo A. In questo modo

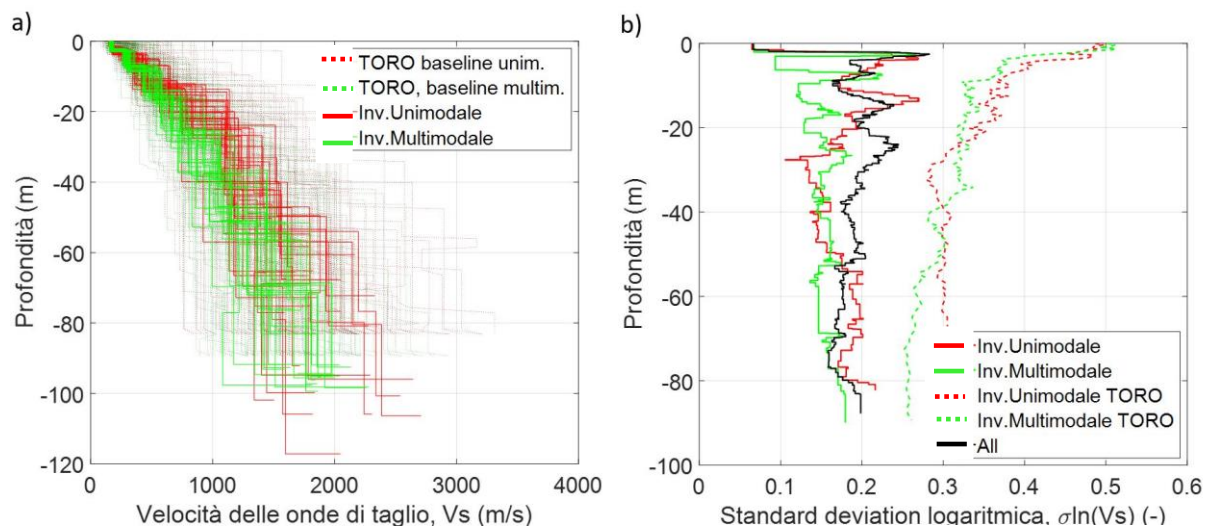


Fig. 2. a) Profili di  $V_s$  per le simulazioni di RSL. b) Deviazioni standard logaritmiche di  $V_s$ .

sono stati selezionati 7 eventi per gli Stati Limite di SLO ed SLD, scalati alle rispettive  $PGA=0.078$  g e  $PGA=0.1032$  g ed ulteriori 7 eventi per gli Stati Limite di SLV ed SLC, scalati alle rispettive  $PGA=0.2587$  g e  $PGA=0.3321$  g. In totale, dunque, si sono tenuti in conto di 28 input motions per ogni profilo di  $V_s$ , in accordo con le 4 frequenze di eccedenza annuali pari a 0.0333/anno (SLO), 0.02/anno (SLD), 0.0021/anno (SLV) e 0.001/anno (SLC).

A questo punto si sono svolte analisi lineari elastiche equivalenti (EQL) tramite il codice python SHAKEVT per i profili ottenuti dalle inversioni, e tramite il software STRATA (Kottke e Rathje 2009) per i profili randomizzati con il Toro model. Particolare attenzione è stata rivolta alla totale equivalenza dei modelli inseriti nei due codici, andando preliminarmente ad operare una validazione dei risultati per bassi ed alti livelli deformativi. Per tutte le analisi si sono adottate le stesse curve di decadimento del modulo  $G$  e di damping  $D$  proposte da Darendeli (2001),  $SSR=0.65$ , iterazioni  $max=30$ , errore  $max=0.01$ , calcolo del modulo  $G^*$  con formulazione 'frequency independent' e moto in input di tipo 'outcrop', con damping al bedrock viscoelastico lineare pari allo 0.2%.

Come detto in precedenza, ogni profilo è stato sottoposto ai 7 accelerogrammi selezionati per il determinato livello di pericolosità. In questo modo sono state effettuate 700 analisi per i profili dalle inversioni unimodali, 700 per i profili dalle inversioni multimodali, 2800 per i profili dal Toro model ottenuti con la baseline unimodale e 2800 per i profili dal Toro model ottenuti con la baseline multimodale. Per ognuno dei 25+25 (SHAKEVT) o 100+100 (STRATA) profili è stata dapprima calcolata la risposta media (assumendo una distribuzione lognormale) inter-event, ossia mediando la risposta tra i 7 input motions, come spettri in superficie e funzioni di amplificazione. Successivamente si è calcolata la risposta media intra-classe (assumendo ancora una distribuzione lognormale), per le 4 classi di profili (unimodale, multimodale, Toro con baseline unimodale e Toro con baseline multimodale), come spettri in superficie e funzioni di amplificazione, mediando tra il numero di profili. In questo caso si sono valutate anche le dispersioni intra-classe, come deviazioni standard logaritmiche per le accelerazioni spettrali ed i fattori di amplificazione.

### 2.3 Risultati e discussione

In Figura 3a vengono mostrati tutti i risultati come medie finali intra-classe degli spettri di risposta in superficie. È chiaro, dai valori di accelerazione spettrale, come i risultati ottenuti con i profili randomizzati dal Toro model siano assolutamente non-conservativi, per tutti i 4 livelli di pericolosità analizzati e per tutti i periodi di interesse ingegneristico. L'assunzione iniziale dei parametri prescritti in Letteratura non rappresenta adeguatamente la condizione reale per questo sito specifico. Inoltre, la maggiore variabilità dei profili ottenuta dalla randomizzazione del Toro model, la quale poteva sembrare una assunzione conservativa, conduce invece a risultati ampiamente sottostimati, rispetto alla classe di

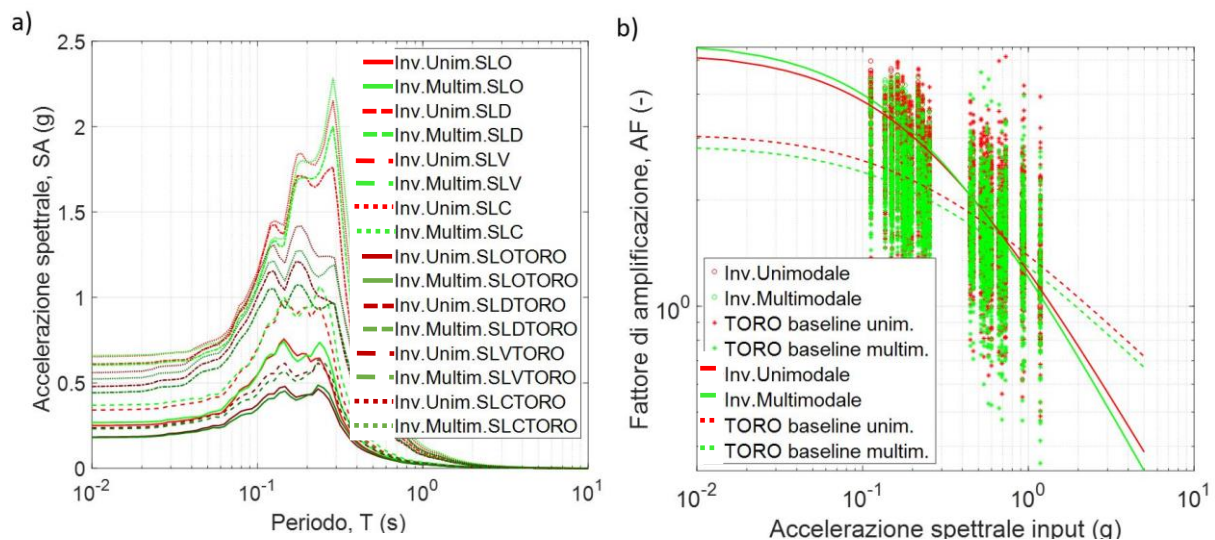


Fig. 3. a) Spettri di risposta in superficie per le diverse classi di profili e Stati Limite analizzati. b) Fattori di amplificazione per periodo  $T=0.1$  s e regressione nonlineare.

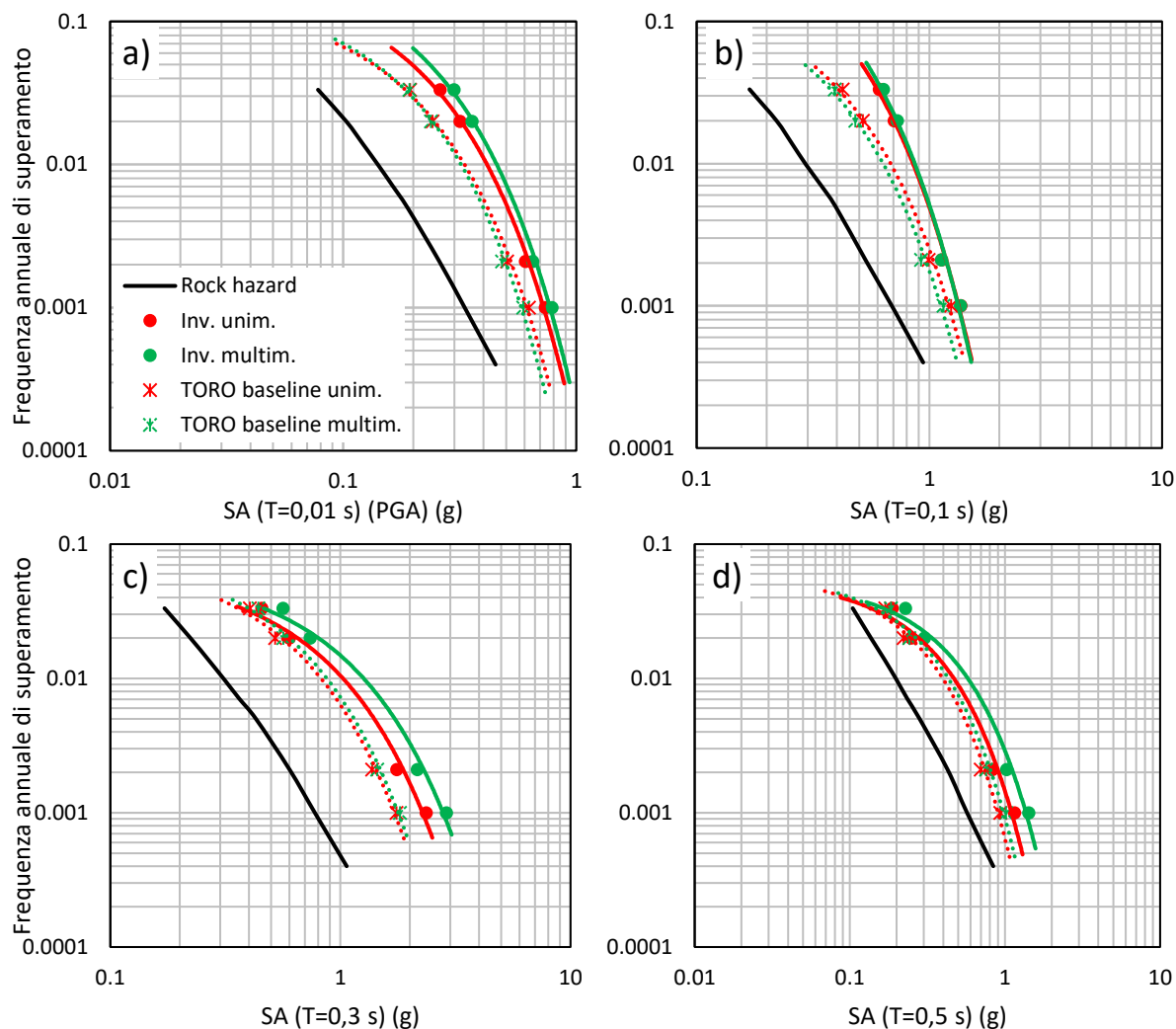


Fig. 4. Curve di Hazard in superficie per il sito di Fonte del Campo: a)  $T=0.01$  s, b)  $T=0.1$  s, c)  $T=0.3$  s, d)  $T=0.5$  s.

profili ottenuti dalle inversioni. Questa maggiore variabilità iniziale si traduce, come ci si aspettava, solamente in una maggiore dispersione del dato, calcolata tramite deviazioni standard logaritmiche per gli spettri di risposta o per le funzioni di amplificazione di ciascuna classe di profili (non mostrate nella presente nota). Tuttavia tali dispersioni (in particolare per le funzioni di amplificazione) non sono affidabili se calcolate mediante analisi numeriche di RSL (Stewart et al. 2014), per cui un valore standard pari a 0.3 è solitamente scelto, stimato da registrazioni di eventi reali. Una volta valutate le risposte delle 4 classi di profili, per i 4 livelli di pericolosità corrispondenti agli Stati Limite previsti dalla Normativa italiana, si è proceduto al calcolo delle nuove curve di hazard per il sito specifico di Fonte del Campo. Come detto in precedenza, esse rappresentano il ‘prodotto finale’ di una analisi di RSL non-ergodica, e forniscono il risultato come pericolosità locale, andando ad inglobare i risultati probabilistici delle simulazioni all’interno della valutazione probabilistica di pericolosità di base. Vari approcci sono presentati in Letteratura, in modo da tenere correttamente in conto dell’influenza del fattore specifico di sito, come media e variabilità, sulla pericolosità sismica di base. Nella presente nota si è utilizzato l’approccio consigliato da Stewart et al. (2014), che prevede l’iniziale interpolazione dei fattori di amplificazione per diverse intensità del moto in input, tramite una formulazione nonlineare a tre parametri presentata da Seyhan e Stewart (2014). Un esempio a periodo  $T=0.1$  s è fornito in Figura 3b (e ripetuto per tutti gli altri periodi prescritti dallo spettro di pericolosità di base  $T=0.01, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1$  e  $2$  s, ma non mostrati). Figura 3b conferma, ancora una volta, la sostanziale sottostima

del moto in superficie già vista in Figura 3a, come fattori di amplificazione a periodo fissato. Una volta calcolati i 3 parametri dall'operazione di regressione nonlineare per ogni classe di profili e per i 10 periodi scelti, si è calcolata la curva di rischio sismico modificata specifica del sito, tramite il Modified Hybrid Method proposto da Goulet e Stewart (2009). Esso rappresenta la scelta più affidabile, insieme al ricalcolo totale dell'integrale di hazard, per combinare i risultati di una valutazione probabilistica site-specific di RSL con la pericolosità di base. Nelle Figure 4a-b-c-d sono presentati i risultati come nuove curve di hazard calcolate in superficie tramite le 4 classi di profili analizzate (solamente per periodi di 0.01=PGA, 0.1, 0.3 e 0.5 s per ragioni di brevità). Di nuovo, anche per le curve di hazard e per tutti i periodi analizzati, la sottostima ottenuta mediante l'approccio di valutazione statistica dei profili di  $V_s$  proposto da Toro è evidente. Questi risultati rappresentano la non conservatività di tale modello, nel momento in cui vengono utilizzati i parametri consigliati dalla Letteratura. In particolare, i risultati non sono confrontabili con quelli di prove per onde superficiali, le quali presentano caratteristiche peculiari rispetto all'incertezza prodotta sul profilo di  $V_s$ , soprattutto a causa della forte non linearità insita nel processo di inversione ed a causa della perdita naturale di risoluzione con la profondità di tali prove.

## **Bibliografia**

- Bazzurro, P. and C. A. Cornell (2004). "Nonlinear soil-site effects in probabilistic seismic-hazard analysis." Bulletin of the Seismological Society of America **94**(6): 2110-2123.
- Darendeli, M. B. (2001). "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves."
- Foti, S., C. G. Lai, G. J. Rix and C. Strobbia (2014). Surface wave methods for near-surface site characterization, CRC Press.
- Goulet, C. A. and J. P. Stewart (2009). "Pitfalls of deterministic application of nonlinear site factors in probabilistic assessment of ground motions." Earthquake Spectra **25**(3): 541-555.
- Kottke, A. and E. Rathje (2009). "Technical manual for Strata. PEER Report 2008/10, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering." University of California, Berkeley.
- Li, W. and D. Assimaki (2010). "Site-and motion-dependent parametric uncertainty of site-response analyses in earthquake simulations." Bulletin of the Seismological Society of America **100**(3): 954-968.
- Maraschini, M. and S. Foti (2010). "A Monte Carlo multimodal inversion of surface waves." Geophysical Journal International **182**(3): 1557-1566.
- Papaspiliou, M., S. Kontoe and J. J. Bommer (2012). "An exploration of incorporating site response into PSHA—Part I: Issues related to site response analysis methods." Soil Dynamics and Earthquake Engineering **42**: 302-315.
- Pehlivan, M., E. M. Rathje and R. B. Gilbert (2016). "Factors influencing soil surface seismic hazard curves." Soil Dynamics and Earthquake Engineering **83**: 180-190.
- Rathje, E. M., A. R. Kottke and W. L. Trent (2010). "Influence of input motion and site property variabilities on seismic site response analysis." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering **136**(4): 607-619.
- Rodriguez-Marek, A., E. Rathje, J. Bommer, F. Scherbaum and P. Stafford (2014). "Application of single-station sigma and site-response characterization in a probabilistic seismic-hazard analysis for a new nuclear site." Bulletin of the Seismological Society of America **104**(4): 1601-1619.
- Seyhan, E. and J. P. Stewart (2014). "Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations." Earthquake Spectra **30**(3): 1241-1256.
- Socco, L. V. and D. Boiero (2008). "Improved Monte Carlo inversion of surface wave data." Geophysical Prospecting **56**(3): 357-371.
- Stewart, J. P., K. Afshari and Y. M. Hashash (2014). "Guidelines for performing hazard-consistent one-dimensional ground response analysis for ground motion prediction." PEER Rep **16**.
- Toro, G. (1995). "Probabilistic models of site velocity profiles for generic and site-specific ground-motion amplification studies." Department of Nuclear Energy Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.