POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Operazioni condotte dal Politecnico di Torino nell’ambito del progetto di Microzonazione Sismica nel territorio dell’Italia centrale

Original
Operazioni condotte dal Politecnico di Torino nell’ambito del progetto di Microzonazione Sismica nel territorio dell’Italia centrale / Ciancimino, A., Foti, S., Passeri, F., Sambuelli, L., Socco, L., Comina, C.. - In: ATTI E RASSEGNA TECNICA. - ISSN 0004-7287. - LXXIII:3(2019), pp. 19-31.

Availability:
This version is available at: 11583/2840998 since: 2020-07-22T09:47:07Z

Publisher:
A&RT ATTI E RASSEGNA TECNICA

Published
DOI:

Terms of use:

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)

27 November 2026

Operazioni condotte dal Politecnico di Torino nell'ambito del progetto di Microzonazione Sismica nel territorio dell'Italia centrale

Operations carried out by the Politecnico di Torino as part of the Seismic Microzonation project in the territory of Central Italy

ANDREA CIANCIMINO, SEBASTIANO FOTI, FEDERICO PASSERI, LUIGI SAMBUELLI, LAURA VALENTINA SOCCO, CESARE COMINA

Abstract

La pericolosità sismica, ossia lo scuotimento atteso, è fortemente influenzata dalle specifiche condizioni di sito che possono comportare fenomeni di amplificazione del moto dovuti ad effetti stratigrafici e topografici. Gli studi di microzonazione sismica rispondono all'esigenza di valutare, a scala territoriale, tali fenomeni amplificativi. Nella presente nota sono presentati i principali contributi del Politecnico di Torino agli studi di microzonazione sismica realizzati nelle aree dell'Italia centrale colpite dalla sequenza sismica del 2016. Le attività svolte spaziano dalla caratterizzazione dei materiali presenti in sito mediante prove geotecniche di laboratorio e prove geofisiche in sito, allo svolgimento di simulazioni numeriche avanzate al fine di determinare il moto sismico atteso in superficie. Nell'ambito di tale contesto, viene infine presentato un caso studio al fine di mostrare il processo metodologico seguito negli studi di microzonazione sismica. L'esempio evidenzia inoltre l'importanza che tali studi assumono in presenza di condizioni di sito particolarmente complesse.

Seismic hazard, namely the expected ground motion, is strongly influenced by the specific site response, which may lead to amplification phenomena resulting from stratigraphic and topographic effects. The seismic microzonation studies evaluate, at the urban scale, these amplification phenomena. This note presents the main contributions of the Politecnico di Torino to the seismic microzonation studies carried out in central Italy areas, which have been struck by the 2016 seismic sequence. The activities range from the characterization of the materials by means of geotechnical laboratory tests and geophysical in situ tests, to the implementation of advanced numerical simulations to define the expected ground motion at the surface. Within this context, a case study is finally reported with the aim of showing the methodological process. The example also highlights the importance of these studies in the presence of particularly complex site conditions.

Andrea Ciancimino, dottorando in Ingegneria civile e ambientale, Politecnico di Torino
andrea.ciancimino@polito.it

Sebastiano Foti, professore ordinario di Geotecnica, Politecnico di Torino, DISEG
sebastiano.foti@polito.it

Federico Passeri, dottore di ricerca in Ingegneria civile e ambientale, Vigile del Fuoco
federico.passeri@polito.it

Luigi Sambuelli, professore ordinario di Geofisica applicata, Politecnico di Torino, DIATI
luigi.sambuelli@polito.it

Laura Valentina Socco, professore associato di Geofisica applicata, Politecnico di Torino, DIATI
laura.socco@polito.it

Cesare Comina, professore associato di Geofisica applicata, Università di Torino, DST
cesare.comina@unito.it

1. Microzonazione Sismica

Un'adeguata definizione dell'azione sismica è di cruciale importanza durante la fase di pianificazione territoriale o di gestione dell'emergenza. Gli studi di Microzonazione Sismica (MS) rispondono principalmente a queste due necessità, permettendo la valutazione dell'input sismico su larga scala. Ad essi vengono generalmente affiancati gli studi di risposta sismica locale che riguardano, invece, la scala del singolo progetto. Gli studi di microzonazione sismica vengono quindi svolti al fine di valutare la pericolosità sismica alla scala territoriale, individuando zone a comportamento sismico omogeneo. Il processo

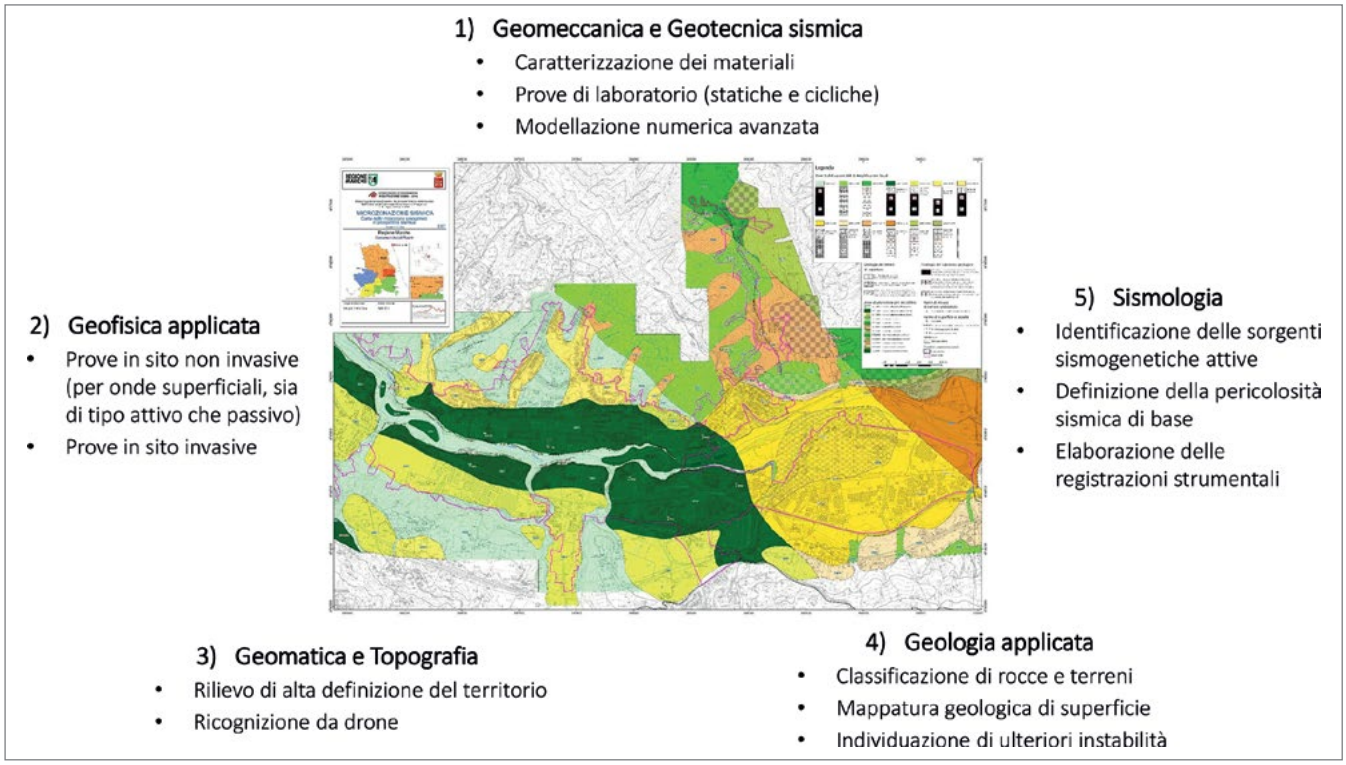


Figura 1. Schema esplicativo della multidisciplinarietà del complesso processo di Microzonazione Sismica (MS) seguito dal Politecnico di Torino e dall'intero Centro per la Microzonazione Sismica (CentroMS). Nell'esempio centrale è riportata la carta delle MOPS di Ascoli Piceno.

di microzonazione sismica di un territorio è chiaramente multidisciplinare, andando ad abbracciare diverse discipline tecnico/scientifiche che si rivelano complementari nel raggiungimento di un risultato valido, come schematicamente mostrato in Figura 1.

Il Politecnico di Torino ha contribuito ai lavori di microzonazione sismica delle aree colpite dalla sequenza sismica del 2016 nell'Italia centrale, principalmente negli ambiti disciplinari della geotecnica e della geofisica applicata. In particolar modo, per quanto riguarda la geotecnica sismica, il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG) è intervenuto su caratterizzazione dei materiali prelevati in sito, prove di laboratorio in condizioni cicliche e simulazioni numeriche avanzate. Le prove geofisiche in sito (invasive e non invasive) sono state condotte congiuntamente dal Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) e dal DISEG, con la preziosa collaborazione esterna dell'Università di Torino (Dipartimento di Scienze della Terra). Ulteriori discipline che rientrano nel complesso processo di microzonazione sismica sono la geologia e la sismologia applicata, le quali sono state tuttavia curate da altri enti e/o università italiane che rientrano all'interno del Centro per la Microzonazione Sismica[1].

In aggiunta alle convenzionali attività di microzonazione sismica, nel dicembre 2016, il Politecnico di Torino ha partecipato attivamente in una importante operazione di ricognizione post-sisma che coinvolse principalmente le città di Tolentino e San Severino Marche (MC), oltre a molti altri comuni del cratere sismico degli eventi di agosto e ottobre 2016. Tali operazioni di ricognizione sono state condotte nell'ambito dell'associazione GEER (Geotechnical Extreme Events Reconnaissance)[2] di cui fanno parte enti e università da tutto il mondo come l'USGS (United States Geological Service), UCLA (University of California at Los Angeles) e la Brigham Young University. In questo ambito, il Politecnico ha anche collaborato nelle operazioni di rilievo territoriale sia standard, sia tramite l'utilizzo di tecniche avanzate e voli da drone, come documentato in altri contributi del presente volume.

L'attuazione di una qualunque strategia di mitigazione del rischio sismico (in termini di vulnerabilità e esposizione) non può prescindere da una valutazione della pericolosità sismica che tenga conto dei fenomeni di amplificazione stratigrafica e topografica, come anche richiesto dalle recenti Norme Tecniche per le Costruzioni in vigore dal 2018[3]. In questo contesto, gli studi di microzonazione sismica mirano all'individuazione e alla caratterizzazione di Microzone a comportamento Omogeneo in Prospettiva Sismica (MOPS). Queste sono suddivise in zone stabili, zone stabili suscettibili di amplificazione locale del moto sismico e zone suscettibili di instabilità. Verranno in seguito trattate le peculiarità relative ai fenomeni di amplificazione del moto sismico, mentre esula dallo scopo della presente relazione la trattazione specifica degli aspetti relativi alle zone in cui sono presenti o suscettibili di attivazione fenomeni di deformazione permanente del territorio indotti o innescati dal sisma (instabilità di versante, liquefazioni, fagliazione superficiale, cedimenti differenziali ecc.). Per ulteriori

riferimenti il lettore può riferirsi ai contributi disponibili[4], mentre i paragrafi che seguono hanno il solo scopo di introdurre brevemente l'argomento.

Per poter effettuare le valutazioni a scala territoriale previste per la microzonazione sismica, occorre innanzitutto definire un modello geologico caratterizzato da un grado di dettaglio sufficiente a cogliere i principali fenomeni di amplificazione e al contempo basato su una visione d'insieme del territorio. La prima fase dello studio consiste quindi nel raccogliere tutte le informazioni pregresse ottenute da indagini effettuate nella zona. Viene quindi realizzato un modello geologico utile alla suddivisione preliminare del territorio in MOPS, corrispondente alla cosiddetta microzonazione sismica di *Livello 1*. In seguito, si programma una campagna di indagini integrativa al fine di aumentare il livello di conoscenza relativo alle zone dove sono presenti maggiori incertezze. Gli studi generalmente coinvolgono soggetti differenti dotati di differenti competenze (si veda Figura 1), permettendo di raggiungere un adeguato livello di affidabilità del modello geologico in relazione alle finalità dello studio di microzonazione sismica (*Livello 2*). È quindi possibile procedere alla fase successiva, che riguarda la quantificazione degli effetti di sito. Questa viene effettuata mediante lo svolgimento di analisi numeriche 1D e/o 2D, in relazione alle caratteristiche geometriche e/o topografiche del sito (detta microzonazione sismica di *Livello 3*).

Le analisi numeriche conclusive di un livello 3 consentono di determinare il moto sismico in superficie in diversi punti del modello, in termini di storie temporali e spettri di risposta elastici in accelerazione (SA). Per questo scopo vengono effettuate differenti analisi, in funzione del numero di accelerogrammi ritenuti rappresentativi dell'azione sismica di input e dello scenario sismico preso in considerazione. Mediante successiva integrazione si determinano degli indicatori sintetici e semplificati rappresentativi dell'amplificazione sismica, definiti Fattori di Amplificazione (FA), secondo le seguenti relazioni:

$$FA_{T_a-T_b} = \frac{O_{T_a-T_b}}{I_{T_a-T_b}}$$

$$I_{T_a-T_b} = \frac{1}{\mathrm{T_a} - \mathrm{T_b}} \cdot \int_{T_b}^{T_a} SA_i(T)dT$$

$$O_{T_a-T_b} = \frac{1}{\mathrm{T_a} - \mathrm{T_b}} \cdot \int_{T_b}^{T_a} SA_o(T)dT$$

dove $I_{T_a-T_b}$ e $O_{T_a-T_b}$ rappresentano i valori medi degli in input e output nel campo di periodi spettrali T_a–T_b. I fattori di amplificazione medi relativi ad ogni punto sono infine ottenuti mediante media logaritmica dei fattori di amplificazione risultanti dalle differenti analisi.

I fattori di amplificazione sono utilizzati per redigere le MOPS (una per ogni campo di periodi, si veda ad esempio la carta al centro di Figura 1 come esempio per una località nell'aquilano), che rappresentano il fine ultimo del livello 3 degli studi di microzonazione sismica. Naturalmente, le zone definite nel livello 1 dello studio possono essere aggiornate e modificate in funzione dei risultati ottenuti. A ogni MOPS viene assegnato un unico valore di fattore di amplificazione che è quindi rappresentativo dell'amplificazione sismica dell'intera zona. Le procedure adottate per definire i fattori di amplificazione medi variano a seconda che siano state eseguite simulazioni numeriche mono o bidimensionali. Nel caso delle simulazioni 2D si effettua generalmente una media dei valori ottenuti per i diversi punti ricadenti nella MOPS, oppure si seleziona, a favore di sicurezza, il punto che restituisce i fattori di amplificazione massimi. Ricorrendo invece a simulazioni 1D, bisogna comunque tenere presente che, in una data MOPS, possono esser presenti successioni stratigrafiche caratterizzate da spessori differenti che potrebbero comportare variazioni abbastanza elevate dei fattori di amplificazione.

Se da un lato l'ampia scala studiata dalla microzonazione sismica non permette di distinguere le variazioni nei fenomeni di amplificazione relative alle condizioni di sito alla scala della specifica opera (o dello specifico progetto, come per gli studi di risposta sismica locale), d'altra parte questa consente di costruire un modello bidimensionale sufficientemente esteso per realizzare, se necessario, simulazioni numeriche 2D. Gli effetti di amplificazione bidimensionali relativi alla geometria sepolta e/o alla topografia del sito sono infatti difficilmente identificabili attraverso studi specifici di risposta sismica locale a ridotta scala, i quali consentono di avere un maggior dettaglio del singolo sito a discapito di una visione d'insieme a scala territoriale. Infatti, questi sono spesso riferiti a condizioni 1D per limitazioni dovute alla difficoltà e agli oneri di costruzione del modello, generalmente complementari e successivi agli studi di microzonazione sismica nel caso di progetti specifici riferiti ad aree ridotte.

Le seguenti sezioni presentano una breve descrizione delle prove e dei metodi usati per la microzonazione sismica dal Politecnico di Torino per le zone dell'Italia centrale, partendo dalle prove di laboratorio e in sito (DISEG e DIATI, in collaborazione con l'Università di Torino), per poi presentare le modellazioni numeriche condotte dal gruppo di dinamica dei terreni del DISEG.

1.1 Prove in laboratorio

La costruzione del modello geotecnico di riferimento richiede innanzitutto un'adeguata definizione delle proprietà dinamiche dei terreni interessati dai fenomeni di propagazione delle onde sismiche. La risposta meccanica dei terreni ai carichi ciclici è caratterizzata da una marcata non-linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e decadimento progressivo dei parametri meccanici per effetto del numero dei cicli di carico applicati.

Tale risposta, alquanto complessa, viene generalmente convenientemente descritta mediante l'introduzione di

parametri meccanici equivalenti, quali il modulo di rigidezza a taglio secante (G_S) e il rapporto di smorzamento (D), variabili in funzione del livello deformativo raggiunto (γ_c) (si veda Figura 2). La curva di variazione del modulo di rigidezza è generalmente normalizzata rispetto al valore del modulo a piccole deformazioni (G_0) che viene stimato mediante prove geofisiche in sito (si veda la sezione seguente). Il rapporto di smorzamento permette invece di quantificare la dissipazione intrinseca di energia del terreno, ed è definito come rapporto tra la dissipazione di energia del singolo ciclo di carico (W_D) e l'energia massima accumulata (W_S).
La determinazione sperimentale delle curve di variazione del modulo di rigidezza e del rapporto di smorzamento viene effettuata mediante specifiche prove dinamiche di laboratorio, che permettono una valutazione accurata del comportamento tenso-deformativo dei terreni. Le prove più diffuse sono la prova di colonna risonante e la prova di taglio torsionale ciclico. Tali prove condividono la modalità di applicazione delle sollecitazioni esterne e possono, quindi, essere condotte mediante la stessa apparecchiatura. In Figura 3 è riportato l'apparato per l'esecuzione di prove combinate di colonna risonante e taglio torsionale ciclico in dotazione al laboratorio geotecnico del DISEG.
La prova di colonna risonante si basa sul concetto di risonanza di un campione cilindrico soggetto a un'eccitazione torsionale. Nella modalità di prova più diffusa, delle sollecitazioni cicliche di ampiezza costante e frequenza variabile vengono applicate in corrispondenza della base superiore di un campione incastrato alla base inferiore. Monitorando le rotazioni indotte si individua la frequenza di risonanza, dalla quale è possibile risalire, attraverso un procedimento matematico di inversione, al modulo di taglio del campione corrispondente alla deformazione imposta (G_S). Inoltre, dalla forma della risposta in frequenza (*half-power bandwidth method*) o dal decadimento temporale delle vibrazioni libere (*free-decay method*) è possibile risalire al rapporto di smorzamento (D).
Nella prova di taglio torsionale ciclico, utilizzando un sistema di sollecitazione analogo a quello della prova di colonna risonante, il modulo di taglio secante e il rapporto di smorzamento vengono determinati direttamente sulla base della curva sforzi-deformazioni ciclica. Anche in questo caso variando la massima sollecitazione applicata nei cicli è possibile valutare il modulo di taglio e il rapporto di smorzamento per diversi livelli deformativi (γ_c).
In Figura 4 sono riportate, a titolo di esempio, le curve di variazione ottenute mediante la prova di colonna risonante condotta sul campione indisturbato prelevato nell'ambito degli studi di microzonazione sismica[5] effettuati nel Comune di Acquasanta Terme (AP).

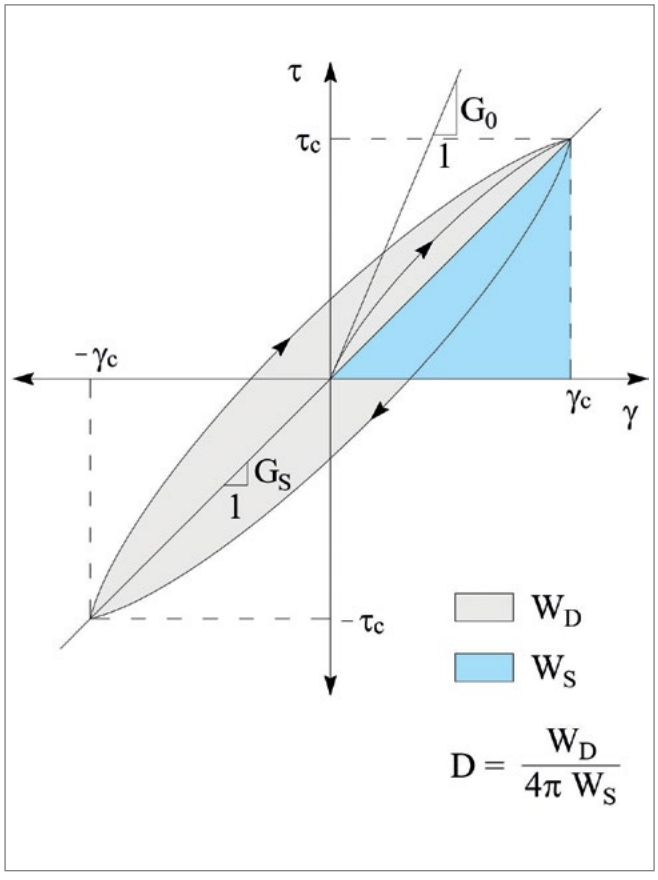


Figura 2. Definizione del modulo secante di rigidezza a taglio e del rapporto di smorzamento.



Figura 3. Apparecchiatura per l'esecuzione di prove combinate di colonna risonante e taglio torsionale ciclico.

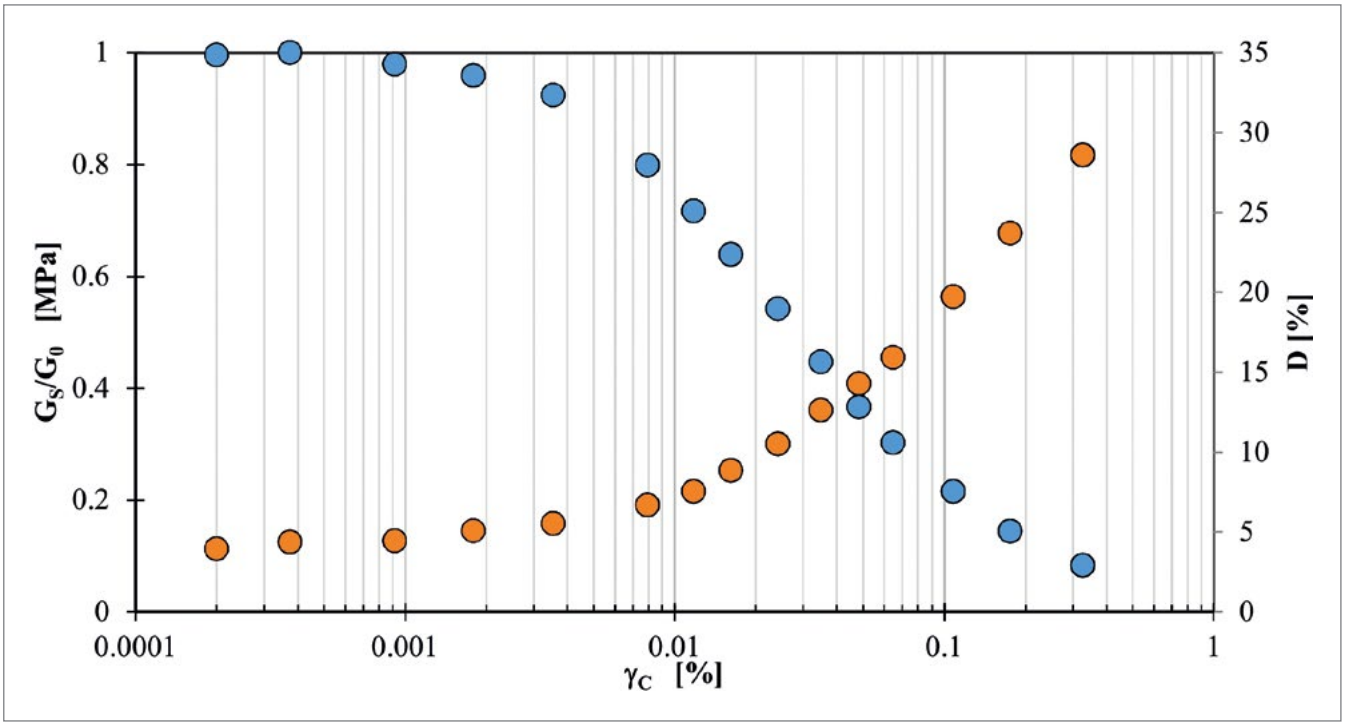


Figura 4. Curve di variazione del modulo secante di rigidezza a taglio e del rapporto di smorzamento relative al campione indisturbato prelevato ad Acquasanta Terme (AP).

Nell'ambito degli studi di microzonazione sismica di terzo livello, il laboratorio geotecnico del Politecnico di Torino (DISEG) si è occupato di svolgere le prove di laboratorio atte a determinare le proprietà fisiche e meccaniche di diversi campioni di terreno indisturbati, prelevati principalmente dai Comuni compresi nella macroarea denominata "Marche 3". Al fine di fornire una completa caratterizzazione dei terreni oggetto di studio, contestualmente alle prove dinamiche, sono state effettuate anche le prove di laboratorio necessarie alla definizione delle proprietà fisiche, quali analisi granulometriche, definizione dei limiti di Atterberg, definizione del contenuto naturale d'acqua e determinazione del peso specifico dei grani.
I risultati delle prove di laboratorio eseguite hanno permesso quindi di ottenere una completa caratterizzazione dei terreni interessati dai fenomeni di propagazione delle onde sismiche, di cruciale importanza al fine di costruire un modello geotecnico di sottosuolo attendibile per le successive analisi numeriche volte alla quantificazione degli effetti di amplificazione sismica.

1.2 Prove in sito

Le prove geofisiche in sito rappresentano uno strumento indispensabile per la costruzione del modello geotecnico di riferimento per gli studi di microzonazione sismica. La scelta della metodologia d'indagine dipende in maniera sostanziale dagli obiettivi della caratterizzazione e dal contesto progettuale. Le prove geofisiche in sito (dette talvolta prove sismiche) che vengono generalmente condotte per scopi di microzonazione sismica e riportate nella presente relazione sono:

- prove non invasive per onde superficiali di tipo attivo (*Multichannel Analysis of Surface Waves*, MASW);
- prove invasive di tipo a singolo foro (*Down-Hole*, DH).

Le prove non invasive basate sulla propagazione di onde di superficie (principalmente onde di Rayleigh) di tipo attivo per la stima del profilo di V_S hanno trovato negli ultimi anni grande diffusione grazie ai ridotti tempi di acquisizione. Correntemente, le prove sono effettuate utilizzando prevalentemente approcci multistazione (dette anche multicanale, MASW), più robusti ed efficienti di altre tecniche[6]. Le onde di Rayleigh sono generate, per effetto della presenza di una superficie libera, dalla sovrapposizione delle componenti di moto legate alle onde di compressione e alle onde di taglio polarizzate verticalmente, come schematizzato in Figura 5. Nel caso di un semispazio elastico omogeneo e isotropo è possibile dimostrare teoricamente che la velocità di propagazione delle onde superficiali è indipendente dalla frequenza e che il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente con la profondità sino ad estinguersi a una profondità circa pari a una lunghezza d'onda. In un mezzo eterogeneo avente rigidezza variabile con la profondità si manifesta il fenomeno della dispersione geometrica, per cui la velocità di fase con cui le onde si propagano diviene funzione della frequenza.
Proprio la relazione che lega la velocità di fase delle onde di Rayleigh (V_R) alla frequenza f rappresenta la "firma del

deposito" e viene usualmente definita curva di dispersione sperimentale, rappresentando l'elemento centrale nell'utilizzo delle onde di Rayleigh ai fini della caratterizzazione per gli studi di microzonazione sismica. Infatti, la curva di dispersione è funzione delle proprietà fisico-meccaniche e geometriche del mezzo e può essere utilizzata per la soluzione di un problema inverso avente come obiettivo la stima dei parametri di modello per il sito in analisi. Utilizzando un insieme di ricevitori posti sul piano campagna vengono acquisiti dei segnali sismici relativi ad una perturbazione che si propaga lungo la superficie libera (Figura 5). L'analisi dei segnali acquisiti consente una stima della curva di dispersione sperimentale del sito in oggetto, che viene successivamente utilizzata per un processo di inversione fornendo come risultato finale il profilo verticale della velocità delle onde di taglio nel terreno e quindi una stima del modulo di taglio a piccole deformazioni in funzione della profondità.
La curva di dispersione sperimentale può essere ottenuta utilizzando diversi approcci che si differenziano per modalità di acquisizione del dato sperimentale e per tecniche di analisi dello stesso. L'utilizzo di tecniche basate sull'analisi di più segnali relativi a una stesa di ricevitori allineati con la sorgente, consente una stima più rapida e più stabile della curva di dispersione. Questa rappresenta attualmente la modalità di prova più diffusa negli studi di microzonazione sismica, viene spesso indicata con l'acronimo MASW ed è illustrata in Figura 6. La perturbazione, generata a mezzo di una sorgente impulsiva, viene rilevata secondo uno schema di acquisizione a più ricevitori con spaziatura costante. L'analisi viene effettuata trasformando i segnali dal dominio spazio-tempo in cui sono stati acquisiti in un dominio alternativo, in cui sia possibile ottenere informazioni riguardanti la natura dispersiva del deposito in oggetto.
Le informazioni sperimentali riguardanti la curva di dispersione sono infine utilizzate per la caratterizzazione del terreno, risolvendo un problema matematico inverso. Il modello usualmente considerato è quello di mezzo elastico lineare a strati omogenei e isotropi. I parametri necessari a descrivere pienamente tale modello sono: due costanti elastiche, lo spessore e la densità di ciascuno strato. La natura monodimensionale del modello in oggetto rende implicita l'ipotesi che gli strati siano piani e tra loro paralleli, ipotesi che deve pertanto essere in linea di massima soddisfatta dal deposito di terreno per garantire la significatività del risultato finale. Nella soluzione del problema inverso usualmente vengono adottate alcune semplificazioni, al fine di ridurre il numero di incognite presenti e alleviare i problemi di non unicità della soluzione. Il problema inverso può essere risolto con l'utilizzo di metodi stocastici che consentono l'ottenimento di soluzioni affidabili, limitando il rischio di ricadere in minimi locali del processo di ottimizzazione e consentendo una stima delle incertezze associate alla non-unicità della soluzione.
Le prove geofisiche eseguite nell'ambito degli studi di microzonazione sismica sono state realizzate ed elaborate tenendo conto delle linee guida citate[7].
Le prove Down-Hole (DH) sono le prove invasive più usate, rappresentando un compromesso in termini di accuratezza e costi di esecuzione grazie all'utilizzo di un solo foro che rappresenta un notevole risparmio, se confrontato con altre prove in sito di tipo invasivo che potrebbero essere

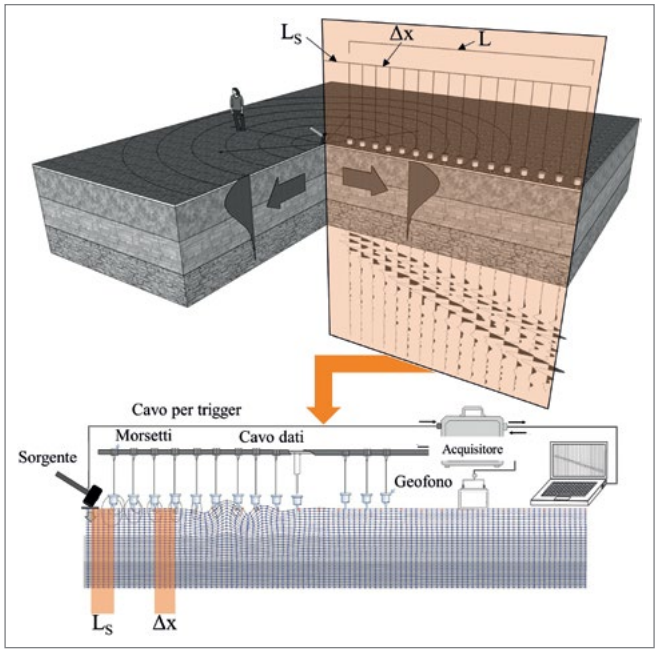


Figura 5. Schema semplificato di propagazione delle onde superficiali di Rayleigh e apparati di acquisizione del dato in sito (modificata da: S. Foti, C. Lai, G. J. Rix, C. Strobbia, Surface wave methods for near-surface site characterization*, CRC Press, London 2014).*



*Figura 6. Illustrazione di una prova MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) attraverso i vari strumenti generalmente utilizzati per scopi di microzonazione sismica.*

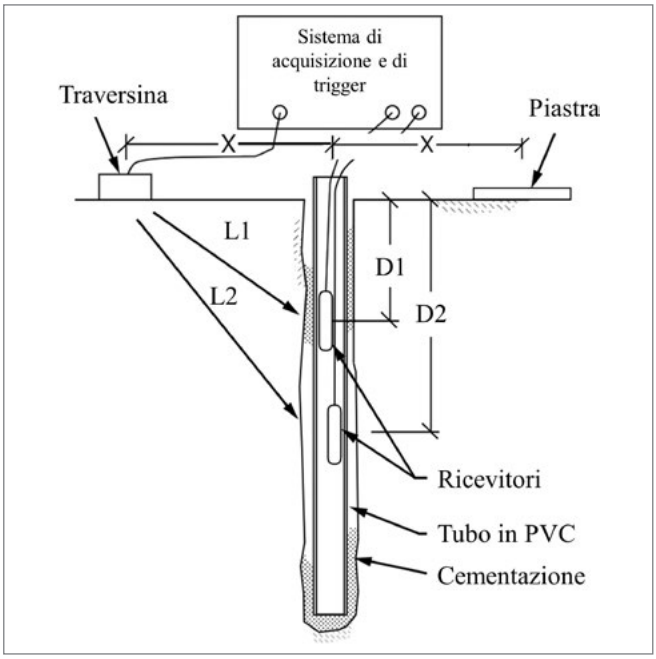


Figura 7. Schema della prova Down-Hole (DH) con due ricevitori.



Figura 8. Immagini delle varie attrezzature utilizzate per una prova Down-Hole (DH).

utilizzate per scopi di microzonazione sismica. La perturbazione meccanica avviene sulla superficie del piano campagna nelle immediate vicinanze del foro e l'onda viene rilevata da uno o più ricevitori posizionati all'interno del foro stesso, come schematizzato in Figura 7 e mostrato attraverso delle immagini in Figura 8. La misura viene quindi ripetuta variando la profondità alla quale sono collocati i ricevitori. L'interpretazione può essere effettuata seguendo diversi approcci. La strategia probabilmente più robusta è basata sull'interpretazione dei tempi diretti con la costruzione di una dromocrona che rappresenta la variazione dei tempi di primo arrivo con la profondità. Le pendenze medie consentono la stima delle velocità di propagazione medie per ciascuno strato. Alla minore risoluzione e sensibilità alle piccole variazioni, si accompagna, in tale interpretazione, una maggiore robustezza. Il risultato è tuttavia condizionato dalla scelta dell'operatore di considerare una certa discretizzazione del sottosuolo in strati di spessore variabile. Questa scelta è usualmente indirizzata dalle informazioni stratigrafiche ottenute durante la perforazione del sondaggio e dall'osservazione del dato sperimentale.

Come detto, i dipartimenti DISEG e DIATI, insieme con l'Università di Torino, hanno svolto una massiccia campagna di indagine nei territori dell'Italia centrale nell'ambito della microzonazione sismica, attraverso l'esecuzione di diverse prove geofisiche in sito, suddivise in diverse campagne di indagine. Le operazioni possono essere suddivise in due intervalli temporali. Il primo, da settembre 2016 a luglio 2017 che coinvolse la zona del reatino, in particolare Accumoli, Illica, Grisciano, San Giovanni, Tino e Fonte del Campo. La seconda campagna di indagine, che risale a settembre 2017, si è focalizzata sulla sezione denominata "Marche 3", principalmente nella provincia di Ascoli Piceno, quindi basse Marche.

Nel settembre 2016 sono state condotte principalmente prove di tipo MASW in cinque siti distribuiti tra Accumoli, Illica, Grisciano e Fonte del Campo. Queste operazioni sono state portate avanti in un periodo ancora emergenziale, per cui una vera e propria microzonazione sismica non era ancora iniziata, lavorando principalmente all'individuazione di zone più favorevoli da un punto di vista tecnico per una collocazione post-sisma di alloggi provvisori. In questo senso, la Figura 9 mostra le prove geofisiche in sito di tipo MASW condotte in piazza San Francesco (Accumoli) supervisionate da operatori del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, vista la condizione ancora emergenziale presente a settembre 2016. Il caso di studio di Fonte del Campo merita probabilmente maggiore risalto, essendo state condotte prove per onde superficiali anche di tipo passivo, sia multi stazione (con geometria circolare), sia a singola stazione (dette anche *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*, HVSR). Tali tipologie di prove non sono state debitamente descritte nella presente relazione, ma rappresentano ulteriori strumenti geofisici in sito per la caratterizzazione dei siti per scopi di microzonazione sismica. Le stesse località, con l'aggiunta di San Giovanni e Tino, vennero poi selezionate per le prove DH, che vennero portate avanti nel luglio 2017, quando l'emergenza era ormai lontana e si poté procedere all'esecuzione dei fori di sondaggio con le successive prove geofisiche in sito di tipo, questa volta, invasivo.

La seconda fase, come detto, ebbe inizio nel settembre 2017 nell'area denominata "Marche 3". In questo caso i



Figura 9. Immagine delle prove in sito condotte nella piazza principale di Accumoli (piazza San Francesco) in piena fase emergenziale (settembre 2016).

fori di sondaggio erano già stati eseguiti, per cui si procedette alla caratterizzazione combinata mediante prove MASW e DH per la microzonazione sismica dell'area ascolana. Questa fase coinvolse il Politecnico di Torino nella caratterizzazione di Acquasanta Terme, Appignano del Tronto, Castel di Lama, Colli del Tronto, Force, Montedinove, Montefalcone Appennino, Montemonaco, Offida, Palmiano, Roccafluvione, Rotella e Venarotta. Questo blocco di indagini fu propedeutico alla microzonazione sismica della zona, per la quale il Politecnico di Torino adottò una funzione di controllo e coordinamento anche delle operazioni affidate ai professionisti in loco, principalmente per le attività di geologia.

1.3 Modellazione numerica

Una volta ottenuto un modello di sottosuolo attendibile dell'area di interesse, è possibile realizzare il corrispondente modello numerico utile ad effettuare la valutazione quantitativa della risposta sismica del sito.

La costruzione del modello numerico richiede innanzitutto la scelta di un quadro di riferimento per la modellazione del comportamento meccanico dei terreni, in termini di scelta del legame costitutivo maggiormente appropriato. La modellazione completa del comportamento tenso-deformativo richiederebbe l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che, oltretutto, difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione, generalmente si preferisce fare riferimento a legami costitutivi semplificati, i quali, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre in modo adeguato la risposta del terreno in riferimento a specifiche applicazioni. In tale ambito, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi e accuratezza dei risultati. Tale approccio fa sostanzialmente riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche, adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Definita la tipologia di approccio da applicare e i legami costitutivi da utilizzare, il passo successivo consiste nella definizione del modello geometrico di riferimento. A tal proposito, le analisi geologiche precedentemente effettuate forniscono preziose informazioni riguardo l'assetto morfologico e strutturale della zona di interesse, permettendo di valutare adeguatamente la tipologia di simulazioni numeriche da condurre. Nel caso in cui non siano attesi particolari fenomeni di amplificazione dovuti a effetti topografici o a particolari geometrie

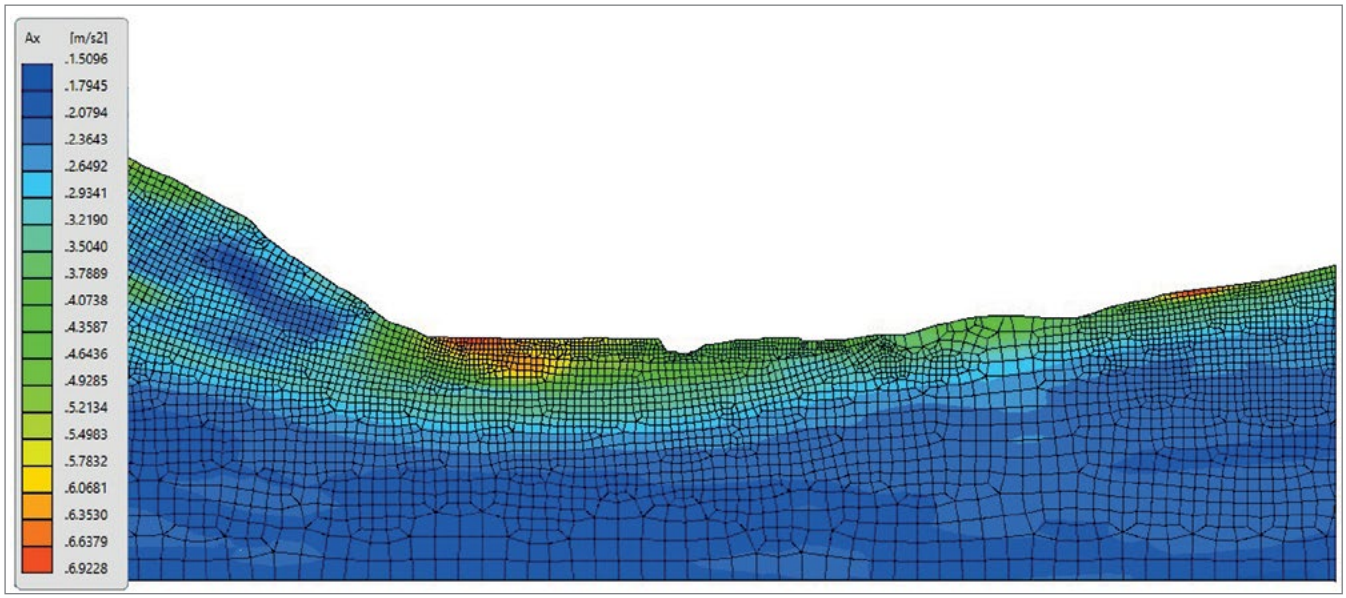


Figura 10. Risultati delle simulazioni numeriche 2D effettuate per gli studi di microzonazione del Comune di Accumoli in termini di accelerazione massima attesa (simulazioni effettuate mediante il codice LSR 2D, STACEC s.r.l.).

sepolte, sarà possibile effettuare delle modellazioni monodimensionali di risposta sismica locale, tenendo comunque in conto le eventuali eterogeneità dell'area di interesse. In caso contrario, sarà necessario procedere mediante simulazioni numeriche bidimensionali, discretizzando quindi il deposito di terreno mediante una mesh di elementi finiti piani, di forma quadrangolare o triangolare, alla base del quale sarà applicato l'input sismico. Tali simulazioni permettono quindi di definire il moto sismico atteso in superficie, valutandone contestualmente la variabilità spaziale.

In Figura 10 sono riportati, a titolo di esempio, i risultati delle simulazioni numeriche 2D realizzate dal gruppo di lavoro del DISEG per gli studi di microzonazione sismica del Comune di Accumoli (in frazione Grisciano), in termini di accelerazione massima attesa nei diversi elementi che costituiscono il modello numerico.

Nell'ambito degli studi di microzonazione sismica, il Politecnico di Torino (DISEG) si è occupato di fornire assistenza ai professionisti incaricati di condurre le analisi di risposta sismica locale 1D, e di svolgere, quando necessario, le simulazioni numeriche 2D. Le analisi sono state svolte con il codice di calcolo LSR 2D (STACEC s.r.l.), agli elementi finiti, che consente di effettuare analisi lineari equivalenti nel dominio del tempo. I risultati di tali simulazioni sono quindi stati elaborati al fine di ottenere, per ogni microzona omogenea in prospettiva sismica identificata, i relativi fattori di amplificazione così come precedentemente definiti.

2. Il caso studio di Montedinove

L'esempio riportato in questa sezione ha lo scopo di mostrare l'importanza della "visione di insieme" che è possibile raggiungere attraverso uno studio di microzonazione sismica e che rappresenta probabilmente il maggior punto di forza di tali studi. In aggiunta, il caso studio condensa al suo interno le osservazioni presentate nelle sezioni precedenti dedicate alle prove (sia in laboratorio, che geofisiche in sito) e alla modellazione numerica. Tale esempio riguarda il comune marchigiano di Montedinove. Il comune di Montedinove (AP) è uno dei 140 Comuni interessati dagli eventi sismici verificatisi a far data dal 24 agosto 2016, per i quali è stato svolto uno studio di microzonazione sismica di terzo livello nell'ambito delle attività previste dall'OPCM n. 24 del 12 maggio 2017 all'interno del blocco denominato "Marche 3". Lo studio ha coinvolto tre zone differenti: le località di Lapedosa e Croce Rossa, particolarmente danneggiate dalla sequenza sismica, e il centro storico[8].

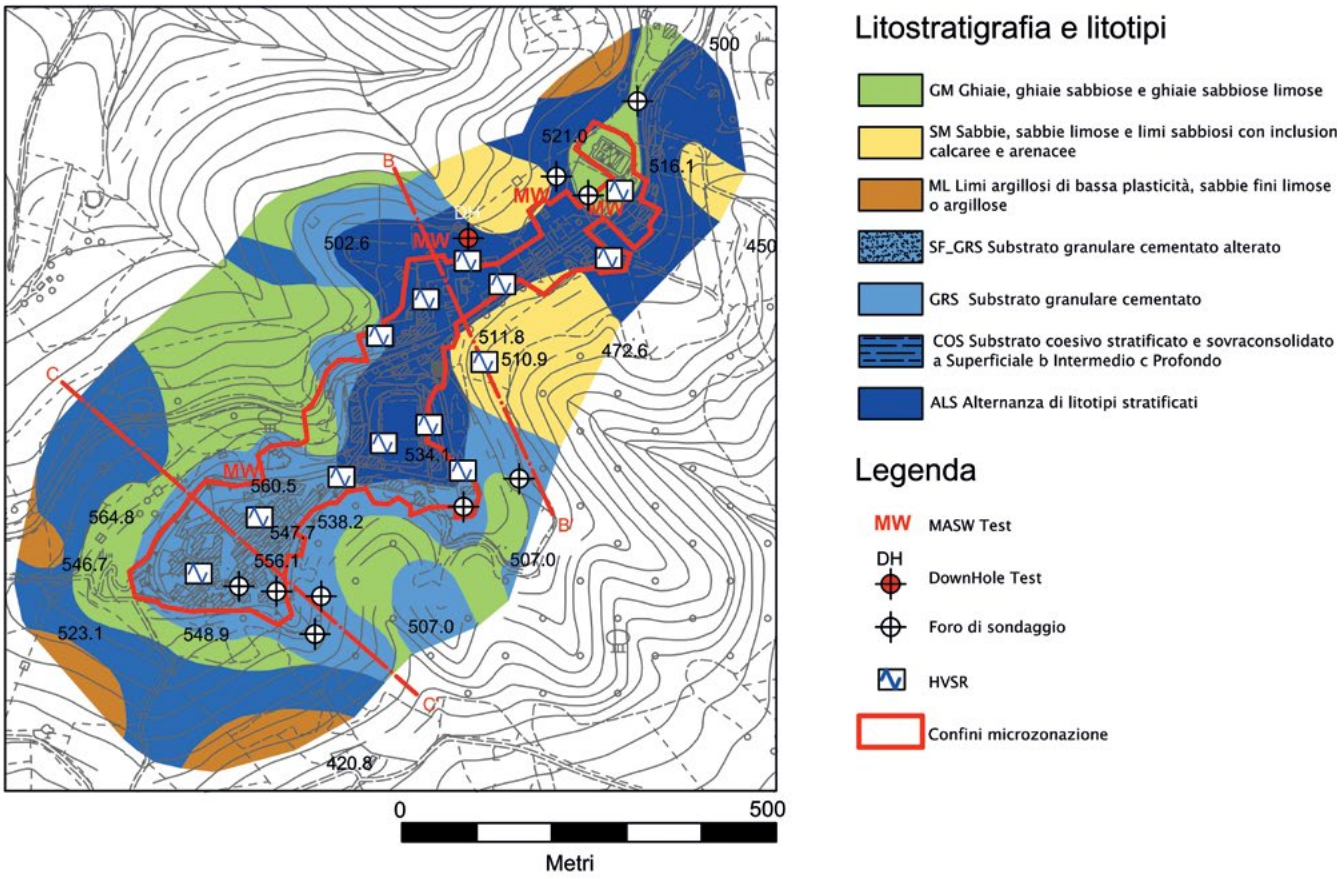
Dal punto di vista morfostrutturale la zona del centro storico è caratterizzata da una dorsale in direzione NE-SO. In Figura 11 sono riportate la carta geologica e le sezioni trasversali. La formazione delle Argille Azzurre, costituente il substrato geologico, è presente sotto forma di diversi litotipi, identificati come: ALS (alternanza di litotipi stratificati), GRS (substrato granulare cementato) e COS (substrato coesivo sovraconsolidato). In cresta il substrato è affiorante, mentre lungo i fianchi sono presenti coperture eluvio-colluviali di spessore variabile (3-15 m) classificabili come GM (ghiaie e ghiaie sabbiose), SM (sabbie e sabbie limose) e ML (limi argillosi di bassa plasticità).

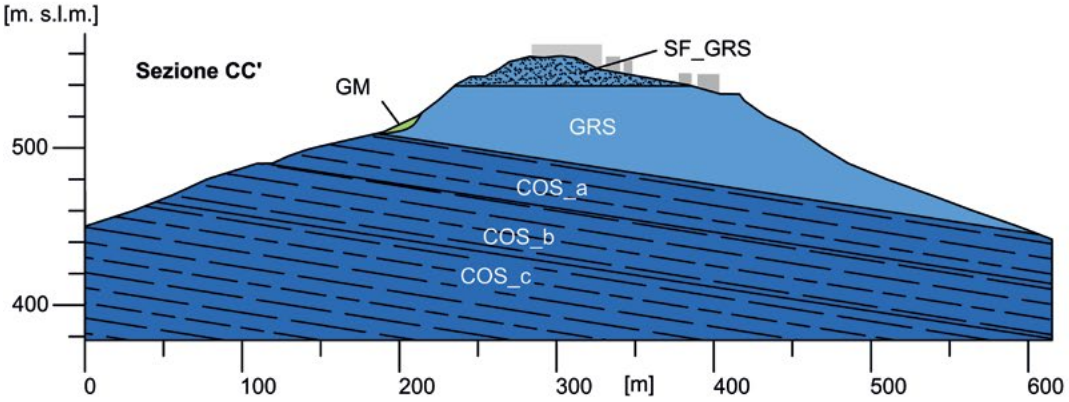
Il modello di sottosuolo è stato definito sulla base delle informazioni disponibili reperite durante la realizzazione della microzonazione sismica di livello 1 e in seguito integrate mediante una campagna di prove geofisiche in sito e di laboratorio. La posizione delle prove geofisiche in sito (sia invasive che non invasive) eseguite è identificata in Figura 11, mentre in Figura 12b è riportato come esempio il risultato della prova DH eseguita in cresta, in termini di profilo di velocità delle onde di taglio (V_S) e delle onde di compressione (V_P). In Tabella 1 sono riportate le caratteristiche geotecniche adottate e i modelli di variazione del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento identificati come rappresentativi del comportamento dei terreni oggetto di studio (le curve di variazione del modulo di taglio e dello smorzamento sono rappresentate in Figura 12a).

La principale difficoltà nella definizione del modello di sottosuolo in questo caso è sorta nell'identificazione del bedrock sismico. Le prove di tipo HVSR (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*) hanno evidenziato una frequenza di risonanza caratteristica pari a 10-15 Hz, consistente con il contrasto di impedenza tra il GRS (V_S~1400 m/s) e il soprastante ALS (V_S~530 m/s), portando quindi a ipotizzare che il bedrock sismico fosse proprio il GRS. D'altra parte, le indagini geologiche suggerivano la presenza del COS, caratterizzato da valori inferiori di V_S, sottostante il GRS. Tale evidenza è stata in seguito confermata dalle prove di tipo MASW e HVSR eseguite nella vicina contrada Lapedosa, che hanno permesso di suddividere il COS in tre unità (COS_a, COS_b e COS_c) caratterizzate da V_S crescente con la profondità. L'unità inferiore (COS_c) rappresenta il bedrock sismico del modello.

Al fine di valutare le implicazioni in termini di amplificazione sismica delle differenti ipotesi, sono state svolte delle simulazioni numeriche 2D delle sezioni riportate in Figura 11, identificando il GRS come bedrock (Shallow Bedrock, SB) oppure includendo gli strati di COS nel modello (Deep Bedrock, DB). Successivamente, sono state effettuate alcune analisi su un modello monodimensionale derivante dall'ipotesi DB, al fine di mettere in risalto gli effetti bidimensionali di amplificazione. I risultati sono riportati in Figura 13 in termini di fattori di amplificazione ottenuti dalle simulazioni numeriche 2D relativi a tre campi di periodi (0,1-0,5 s, 0,4-0,8 s e 0,7-1,1 s) e spettri di accelerazione risultanti dalle analisi 1D e 2D sotto l'ipotesi di bedrock profondo nei punti in cresta.

Dal confronto tra modelli DB e SB, risulta evidente come la presenza degli strati di COS comporti uno smorzamento delle alte frequenze e conseguentemente una minore amplificazione dell'azione sismica a bassi periodi (0,1-0,5 s). Viceversa, ad alti periodi (0,7-1,1 s), si riscontra una





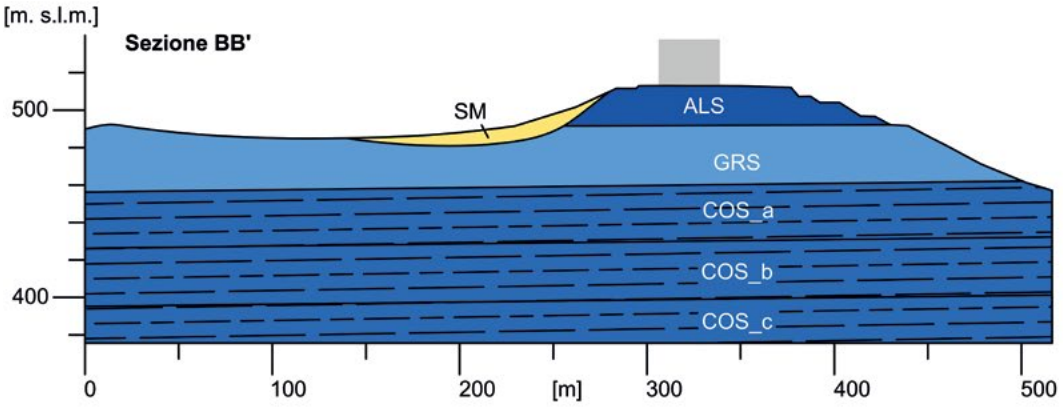


Figura 11. Carta geologica e sezioni trasversali del centro storico di Montedinove (modificata da A. Pagliaroli, et. al, Site response analyses for complex geological and morphological conditions: relevant case-histories from 3rd level seismic microzonation in Central Italy, *in «Bulletin of Earthquake Engineering», 2019).*

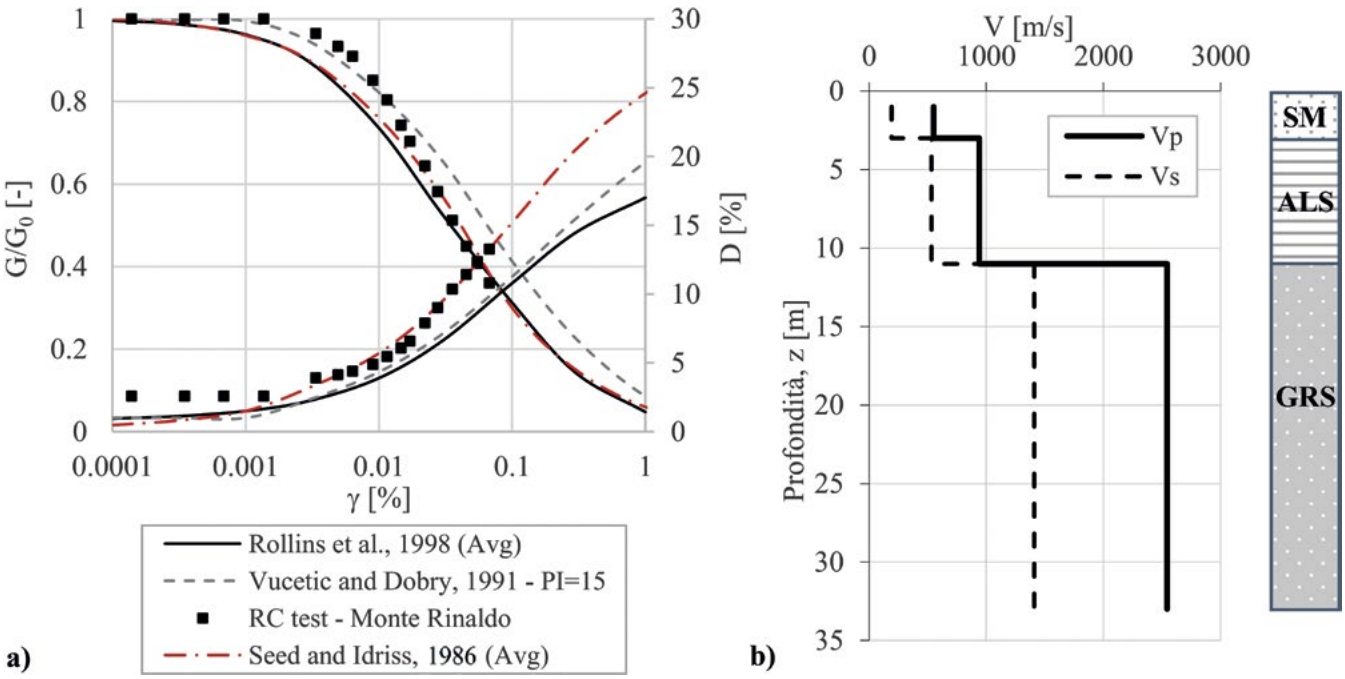


Figura 12. Modello di sottosuolo: a) curve di variazione del modulo di rigidezza a taglio e del rapporto di smorzamento; b) profilo di VS e VP ottenuto mediante prove Down-Hole (DH). (da S. Foti et. al., Microzonazione sismica e risposta sismica locale: specificità e aspetti critici. Analisi e Progetto delle Opere Geotecniche in Zona Sismica, *XXV Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino, 2018).*

Litotipo	VS [m/s]	ν[-]	γ[kN/m³]	Modello di variazione non lineare
SF_GRS	550	0.35	19.0	Rollins et al. (1998) - Average
GRS	1400	0.28	22.0	Lineare Elastico - D_0 = 0,5%
GM	340	0.35	18.6	Rollins et al. (1998) - Average
SM	190	0.43	17.6	Seed and Idriss (1986) - Average
ALS	530	0.27	19.6	Vucetic and Dobry (1991) - PI=15
COS_a	560	0.46	19.6	RC Test (Monte Rinaldo)
COS_b	650	0.46	19.6	RC Test (Monte Rinaldo)
COS_c	800	0.46	19.6	Lineare Elastico - D_0 = 0,5%

Tabella 1. Proprietà geotecniche del modello di sottosuolo di Montedinove.

maggiore amplificazione dell'azione sismica nei modelli costruiti sotto l'ipotesi di bedrock profondo data dal contrasto d'impedenza tra la porzione profonda del COS (COS_c) e quella intermedia (COS_b). Tale effetto non è ovviamente presente nel modello SB. Il confronto tra le simulazioni 1D e 2D (ipotesi DB) evidenzia invece il ruolo degli effetti di sito bidimensionali. In entrambe le sezioni, per periodi inferiori a 1 s, si riscontrano infatti marcati effetti di amplificazione topografica. In particolare, per la sezione CC', caratterizzata da una morfologia di cresta più accentuata, il fattore di aggravio topografico varia tra 2 e 3 in funzione del periodo spettrale preso in considerazione. Se si fosse fatto ricorso ai metodi semplificati prescritti dalla normativa per valutare gli effetti topografici in assenza di analisi 2D si sarebbe quindi commesso un errore a sfavore di sicurezza.
Tali considerazioni non sarebbero state possibili in assenza di una visione d'insieme del territorio. Gli strati di COS sottostanti il GRS non sarebbero infatti stati inclusi in un modello basato esclusivamente su prove realizzate in prossimità del centro storico. Questo avrebbe comportato una sovrastima dell'azione sismica a bassi periodi e una sottostima ad alti periodi. Inoltre, in assenza di un modello di sottosuolo abbastanza esteso, non sarebbe stato possibile eseguire delle simulazioni numeriche 2D. Si sarebbe quindi fatto ricorso ad analisi 1D incapaci di cogliere gli accentuati effetti topografici che caratterizzano i fenomeni di amplificazione del sito.

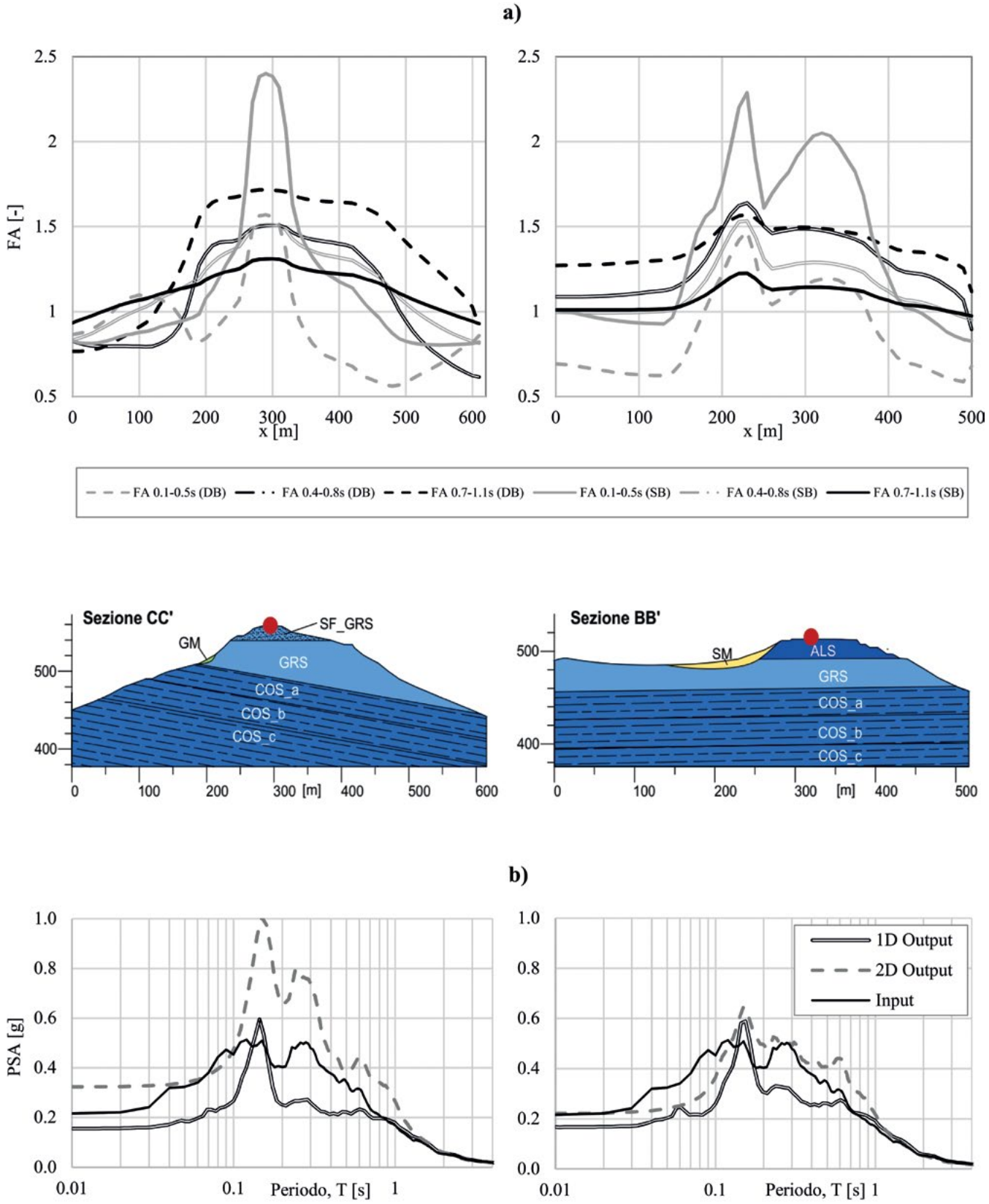


Figura 13. Risultati delle simulazioni numeriche: a) Fattori di amplificazione ottenuti dalle simulazioni 2D in tre campi di periodi (0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s e 0.7-1.1 s); b) Spettri di risposta in accelerazione (smorzamento convenzionale ξ=5%) in cresta (punti evidenziati in rosso nelle sezioni) risultanti dalle simulazioni 1D e 2D sotto l'ipotesi di bedrock profondo (da S. Foti, et. al. Microzonazione sismica e risposta sismica locale: specificità e aspetti critici. Analisi e Progetto delle Opere Geotecniche in Zona Sismica, *XXV Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino, 2018).*

Note

[1] Centro MS, www.centromicrozonazionesismica.it.

[2] www.geerassociation.org.

[3] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *DM 17/01/2018, Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni*, 2018.

[4] Gruppo di lavoro MS, *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*, in *Conferenza delle Regioni e delle Provincie autonome*, Dipartimento della protezione civile, Roma 2008; Gruppo di lavoro MS, *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*, 2011; Gruppo di lavoro MS-AQ, *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*, Regione Abruzzo–Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 2010.

[5] Andrea Ciancimino, Giuseppe Lanzo, Giorgio Alleanza, Sara Amoroso, Roberto Bardotti, Giovanni Biondi, Ernesto Cascone, Francesco Castelli, Anita Di Giulio, Anna D'Onofrio, Sebastiano Foti, Valentina Lentini, Claudia Madiai, Giovanna Vessia, *Dynamic characterization of fine-grained soils in Central Italy by laboratory testing*, in «Bulletin of Earthquake Engineering», 2019; DOI: 10.1007/s10518-019-00611-6.

[6] Sebastiano Foti, Fabrice Hollender, Flora Garofalo, Dario Albarello, Michael Asten, Pierre-Yves Bard, Cesare Comina, Cécile Cornou, Brady Cox, Giuseppe Di Giulio, Thomas Forbriger, Koichi Hayashi, Enrico Lunedei, Antony Martin, Diego Mercerat, Matthias Ohrnberger, Valerio Poggi, Florence Renalier, Deborah Sicilia, Valentina Socco, *Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project*, in «Bulletin of Earthquake Engineering», n. 16, 2018, pp. 2367-2420; DOI: 10.1007/s10518-017-0206-7.

[7] *Ibidem*.

[8] Ulteriori informazioni al riguardo possono essere trovate in: Sebastiano Foti, Mauro Aimar, Andrea Ciancimino, Federico Passeri, *Microzonazione sismica e risposta sismica locale: specificità e aspetti critici. Analisi e Progetto delle Opere Geotecniche in Zona Sismica*, XXV Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino, 2018; Alessandra Angelici, *Microzonazione Sismica di Livello 3 del Comune di Montedinove* ai sensi dell'ordinanza del Commissario Straordinario n. 24 registrata il 15 maggio 2017 al n. 1065, Comune di Montedinove, *Relazione illustrativa*, 2018; A. Pagliaroli, F. Pergalani, A. Ciancimino, A. Chiaradonna, M. Compagnoni, F. De Silva, S. Foti, S. Giallini, G. Lanzo, F. Lombardi, L. Luzi, L. Macerola, M. Nocentini, A. Pizzi, M. Tallini C. Teramo, *Site response analyses for complex geological and morphological conditions: relevant case-histories from 3rd level seismic microzonation in Central Italy*, in «Bulletin of Earthquake Engineering», 2019; DOI:10.1007/s10518-019-00610-7.

BY-NC-SA