

CARATTERIZZAZIONE DEI SITI DELLE STAZIONI ACCELEROMETRICHE DEL TERRITORIO NAZIONALE

M. Moscatelli¹, E. Peronace¹, G. Naso², M. Coltella¹, V. Scionti¹, A. Pagliaroli¹, L. Luzi³, F. Pacor³, R. Puglia³, C. Felicetta¹, D'Amico M.³, D. Albarello⁴, R. Gallipoli⁵, M. Mucciarelli⁶ e

Gruppo di Lavoro GEORAN

¹ CNR IGAG, Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, Montelibretti (Roma)

² DPC, Dipartimento della Protezione Civile, Roma

³ INGV-MI, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Milano

⁴ Università di Siena, Dipartimento Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, Siena

⁵ CNR IMAA, Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale, Tito Scalo (PZ)

⁶ OGS, Osservatorio Geofisico Sperimentale, Trieste

Introduzione. Le informazioni disponibili per le postazioni delle reti accelerometriche sono generalmente insufficienti per una loro adeguata caratterizzazione sismica. L'incertezza nella caratterizzazione di dettaglio delle stazioni può avere notevoli ripercussioni sulla definizione della pericolosità sismica, a scala sia nazionale, sia locale. In particolare, un miglioramento delle conoscenze riguardanti il sottosuolo delle stazioni accelerometriche, attraverso la definizione di un modello geologico-tecnico di dettaglio, favorisce:

- una migliore interpretazione delle registrazioni;
- lo sviluppo e la revisione di leggi predittive del moto del suolo e, di conseguenza, l'aggiornamento delle mappe di pericolosità;
- una scelta più adeguata dell'input per studi di microzonazione sismica e risposta sismica locale;
- il potenziale aggiornamento delle forme spettrali di normativa e delle categorie di sottosuolo (NTC, 2008).

In questa nota sono presentati i primi risultati del progetto GEORAN, cofinanziato dal Dipartimento della Protezione Civile (Accordo DPC-CNR IGAG nell'ambito dell'Intesa operativa 621/06), il cui obiettivo è la caratterizzazione geologica, geotecnica e geofisica delle stazioni accelerometriche della Rete Accelerometrica Nazionale (RAN), attraverso l'applicazione di un protocollo per la definizione di livelli di qualità delle informazioni disponibili per ogni sito.

Ai fini della caratterizzazione, a seguito di una prima fase di valutazione, sono state selezionate 33 stazioni accelerometriche della rete RAN classificate come A e A* (ITACA 2.0; <http://itaca.mi.ingv.it>; Luzi *et al.*, 2008, Pacor *et al.*, 2011), in accordo con le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2008). In particolare, la classe A* è basata sulle informazioni geologiche di superficie, mentre la classe A si riferisce alla classificazione basata sulla misura della velocità delle onde di taglio nei primi 30 m ($V_{s,30}$).

Questa scelta è stata dettata dall'esigenza di verificare l'attendibilità della legge predittiva del moto del suolo proposta da Bindi *et al.* (2011), valida per il territorio nazionale, che utilizza i siti classificati come A e A* come siti di riferimento (assenza di amplificazione).

La caratterizzazione geologico-tecnica delle stazioni selezionate è attualmente in corso ed è stata affidata a diversi gruppi di ricerca coinvolti nel progetto. Di seguito vengono presentate: i) la procedura di caratterizzazione; ii) il protocollo per la valutazione del livello di qualità delle stazioni; iii) un esempio di applicazione alla stazione di Subiaco (Lazio).

Metodologia e fasi di lavoro. Nella prima fase del progetto sono stati definiti i criteri per la valutazione della qualità delle informazioni disponibili per le stazioni RAN.

La metodologia proposta considera come informazione di maggior rilievo la cartografia geologica, corredata da informazioni geomorfologiche e sezioni geologiche, ad una scala di dettaglio ($\geq 1:10.000$). Sono indispensabili inoltre, in ordine di priorità, i profili delle onde di taglio (V_s) e le frequenze di risonanza (f_0) dei siti.

Altre informazioni, quali dati geotecnici di laboratorio o in sito diversi da V_s e f_0 , non sono state considerate per definire la qualità del sito.

Sulla base dei criteri sopra definiti, sono state identificate 5 classi di qualità, Q1-Q5 (Tab. 1).

Utilizzando le informazioni disponibili nel database ITACA (ITACA 2.0; <http://itaca.mi.ingv.it>; Luzi *et al.*, 2008; Pacor *et al.*, 2011), 112 stazioni che risultano installate su substrato rigido (A e A*) sono state preliminarmente classificate secondo le 5 classi di qualità.

Tab. 1 - Classi di qualità delle stazioni accelerometriche.

LEGENDA. C_S10: cartografia geologica e sezioni geologiche a scala $\geq 1:10.000$. C_S: cartografia geologica e sezioni geologiche a scala $< 1:10.000$. VS: velocità delle onde di taglio (misurate con diversi metodi). f₀: frequenze di risonanza del sito (acquisite con diversi metodi).

Classe di qualità	Informazioni disponibili
Q1	$C_{S_{10}} + V_s + f_0$
Q2	$C_{S_{10}} + V_s$
Q3	$C_{S_{10}} + f_0$
Q4	$C_{S_{10}}$ o $(V_s \text{ e/o } f_0)$
Q5	C_S
NC (non classificata)	-

Nella seconda fase del progetto, per le 112 stazioni selezionate è stata effettuata una raccolta di informazioni pregresse (con particolare riferimento ai nuovi studi di microzonazione sismica) ed è stata aggiornato il livello di qualità.

A tale scopo, è stata definita una procedura di acquisizione speditiva dei dati pregressi per la verifica e/o l'integrazione delle schede monografiche ITACA delle stazioni RAN. Tale procedura consiste nella raccolta e archiviazione di informazioni relative alle seguenti tematiche:

- 1) Topografia - verifica che la stazione sia posta su una superficie sub-orizzontale (superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $\leq 15^\circ$), identificando una sezione topografica di riferimento.
- 2) Geologia - verifica che la stazione sia posta su substrato rigido, mediante il reperimento di cartografia geologica e/o geologico-tecnica, possibilmente con scala $\geq 1:10.000$.
- 3) Indagini in sito - verifica che la stazione sia posta su substrato di riferimento mediante l'acquisizione delle indagini geognostiche e geofisiche pregresse.

Per ognuna delle 112 stazioni, tutte le informazioni raccolte sono state elaborate e riportate in una scheda di sintesi (Tab. 2).

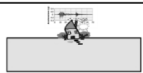
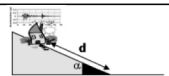
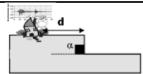
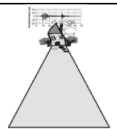
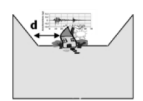
Nella terza fase del progetto, sulla base delle nuove informazioni acquisite e del riesame delle informazioni già disponibili, si è proceduto alla revisione del livello di qualità delle stazioni e della loro ri-assegnazione alle classi A e A*. Delle 112 stazioni iniziali, sono state selezionate in prima istanza 33 stazioni (Tab. 3), classificate come A e A* e con livello di qualità $Q > 1$. Le 33 stazioni sono attualmente oggetto di approfondimenti da parte dei diversi gruppi di ricerca, ai fini della loro caratterizzazione geologico-tecnica e per migliorarne il livello di qualità. Per tali stazioni, sono in fase di esecuzione indagini di campagna, quali rilevamento geologico-tecnico (scala $\geq 1:10.000$) e misure geofisiche (per la stima di f_0 e del profilo di V_s), finalizzate alla ricostruzione dei modelli geologico-tecnici di sottosuolo.

Il rilevamento geologico-tecnico, in particolare, è realizzato secondo le indicazioni delle "Linee guida per l'elaborazione della carta e delle sezioni geologico tecniche per la microzonazione sismica (CGT_MS)", di prossima pubblicazione da parte della Commissione tecnica per la microzonazione sismica (CTMS 2013a). Le informazioni utilizzate per la realizzazione della carta geologico-tecnica sono codificate e archiviate secondo gli "Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica" della Microzonazione Sismica - versione 3.0" (CTMS, 2013b).

Le misure geofisiche sono in corso di elaborazione e i metodi adottati dai diversi gruppi sono sia di tipo “passivo” e sia di tipo “attivo”. Per un approfondimento sulle tecniche generalmente utilizzate per la caratterizzazione geofisica si rimanda ai *deliverable* D6 e D7 del Progetto INGV-DPC S4 (2007-2009, <http://esse4.mi.ingv.it/>).

Nel paragrafo successivo viene descritto un esempio di applicazione della metodologia di caratterizzazione per la stazione di Subiaco (SBC).

Tab. 2 - Scheda riassuntiva delle informazioni pregresse disponibili per le 112 stazioni accelerometriche selezionate.

CodiceRete_Codice Stazione	NOME STAZIONE	DATA COMPILAZIONE	NOME COMPILATORE	CLASSE DI QUALITA' DA MONOGRAFIA	CLASSE DI QUALITA' ATTUALE	CAT.
TOPOGRAFIA	SCHEMA TIPO					
CodiceRete_Codice Stazione_1	Pianura, altopiano o versante con angolo di acclività $\alpha < 30^\circ$, grande piana alluvionale e costiera, piane deltizie, piane occupate da estuari (il limite della piana è lontano più di 1 km)					
CodiceRete_Codice Stazione_2	Versante (angolo di acclività $\alpha \geq 30^\circ$ e $\alpha < 60^\circ$)					
CodiceRete_Codice Stazione_3	Rupe con parete a forte acclività (angolo di acclività $\alpha \geq 60^\circ$) o orlo di terrazzo					
CodiceRete_Codice Stazione_4	Cresta allungata o cima					
CodiceRete_Codice Stazione_5	Valle stretta (ampia meno di 1 km)					
CARTA GEOLOGICA	FONTE			SCALA	Rappresentatività sottosuolo	
CodiceRete_Codice Stazione_CG						
NOME SONDAGGIO GEOGNOSTICO	FONTE			DISTANZA DALLA STAZIONE (m)	Rappresentatività sottosuolo	
CodiceRete_Codice Stazione_S1						
CodiceRete_Codice Stazione_Sn						
NOME INDAGINE GEOFISICA	FONTE	PARAMETRO (V _s o f ₀)	TIPO ACQUISIZIONE	DISTANZA DALLA STAZIONE (m)	Rappresentatività sottosuolo	
CodiceRete_Codice Stazione_GF1						
CodiceRete_Codice Stazione_GFn						
Note	CodiceRete_Codice Stazione					

Esempio di applicazione. La stazione accelerometrica di Subiaco (SBC), è stata scelta come esempio per illustrare tutta la metodologia proposta nel precedente paragrafo.

La stazione è ubicata a sud del centro abitato di Subiaco (Provincia di Roma) lungo un versante in rocce carbonatiche esposto a settentrione.

Tab. 3 - Tabella riassuntiva delle informazioni disponibili per le 33 stazioni classificate A e della classe di qualità, assegnata alla luce delle informazioni pregresse disponibili.

LEGENDA. Nel campo “Carta geologica”, il valore numerico indica la scala della carta (es. 10=1:10.000). VS: velocità delle onde di taglio (CH: Cross-Hole; ESAC: Extended Spatial Autocorrelation; MASW: Multichannel Analysis Surface Waves); f0: frequenza fondamentale (1: presente, 0: assente).

Codice ITACA 2.0	Nome	Carta geologica	VS	f0	Classe di qualità (Q)
ALT	AULETTA (PETINA)	50	CH	0	Q4
AVT	AVETRANA	50	0	0	Q5
BRC	BARCIS	50	0	0	Q5
CFL	CEFALU	50	0	1	Q4
CME	CAMAIORE	10	0	0	Q4
CRL	CORLEONE	25	0	0	Q5
CRV	CAROVIGNO	50	0	0	Q5
CVM	CIVITELLA MARITTIMA	10	0	0	Q4
GNU	GIANO NELLUMBRIA	10	0	0	Q4
GSM	GIOIOSA MAREA	25	0	1	Q4
LNT	LENTINI	10	0	1	Q3
LSP	LA SPEZIA	10	0	1	Q3
LSS	LEONESSA (NUOVA)	20	0	1	Q4
LVR	LIVORNO	10	0	1	Q3
MCN	MORCONE	100	0	0	Q5
MND	MANFREDONIA	5	0	1	Q3
MNF	MONTE FIEGNI (FIASTRA)	50	0	0	Q5
MNN	MANFREDONIA	5	0	1	Q3
MNT	MONTICIANO	10	0	0	Q4
MRA	MARATEA	25	ESAC	1	Q4
ORP	ORSARA DI PUGLIA	5	0	1	Q3
PPL1	PORTOPALO DI CAPO PASSERO 1	20	0	0	Q5
RGS	RAGUSA	100	MASW	1	Q4
SBC	SUBIACO	100	0	1	Q4
SCS	S. CESAREA TERME	25	0	0	Q5
SDG	SANNICANDRO GARGANICO	5	0	1	Q3
SDV	S. DORLIGO DELLA VALLE	50	0	0	Q5
SLO	SELLANO	10	0	0	Q4
SPM	SPOLETO (MONTELUCCO)	10	0	0	Q4
SRC	SIRACUSA	10	0	1	Q3
SUS	SUSA	10	0	0	Q4
TGG	TREGNAGO (COLLINA)	10	0	1	Q3
VSD	VIESTE (DANTE)	5	0	1	Q3

La prima fase del lavoro ha riguardato la consultazione dei dati riportati nella scheda monografica della stazione, estratta dal database ITACA (<http://itaca.mi.ingv.it>; Luzi *et al.*, 2008; Pacor *et al.*, 2011). Nello specifico, la monografia di Subiaco, riporta: i) informazioni relative all'ubicazione geografica, ii) caratteristiche topografiche, iii) geomorfologia del sito, iv) geologia (Carta Geologica d'Italia a scala 1:100.000). Nella monografia della stazione, secondo i criteri di EC8 (EN 1998-1, 2005) e NTC08 (NTC, 2008), il sito viene classificato in classe di suolo A* ($V_{s,30} > 800$ m/s, stimata sulla base delle sole caratteristiche geologiche) e in classe topografica T2, cioè collocato su un versante con angolo di inclinazione medio $> 15^\circ$.

I dati appena descritti sono stati quindi utilizzati per classificare la stazione secondo i livelli di qualità di Tab. 1; sulla base delle informazioni disponibili la stazione è rientrata in classe Q5.

La fase di lavoro successiva è consistita nell'acquisizione di ulteriori dati pregressi, funzionali alla verifica e all'integrazione dei dati riportati nella monografia ITACA. Una volta confermate le condizioni morfologiche del sito, mediante l'esecuzione di profili topografici su modelli digitali del terreno a passo 20 m, si è proceduto alla ricerca e alla raccolta di informazioni geologiche, geotecniche e geofisiche.

A tale scopo sono state consultate varie fonti di dati, quali portali cartografici nazionali, regionali e locali, nonché alcune banche dati sulle instabilità geologiche.

In particolare, lo studio di microzonazione sismica del Comune di Subiaco (Ferri e Sette, 2012) è stato utilizzato per reperire le informazioni sulle caratteristiche geologico-tecniche delle rocce su cui è posta la stazione. Si tratta di calcareniti e calcari biodetritici caratterizzati da una scarsa fratturazione.

I rapporti spettrali (HVRS) tra la componente orizzontale e verticale degli spettri di risposta di accelerazione (5% di smorzamento), eseguiti sui terremoti registrati dalla stazione (Progetto DPC-RELUIS 2010-2013), mostrano una curva caratterizzata da un andamento senza alcun picco evidente, tipica di un substrato rigido.

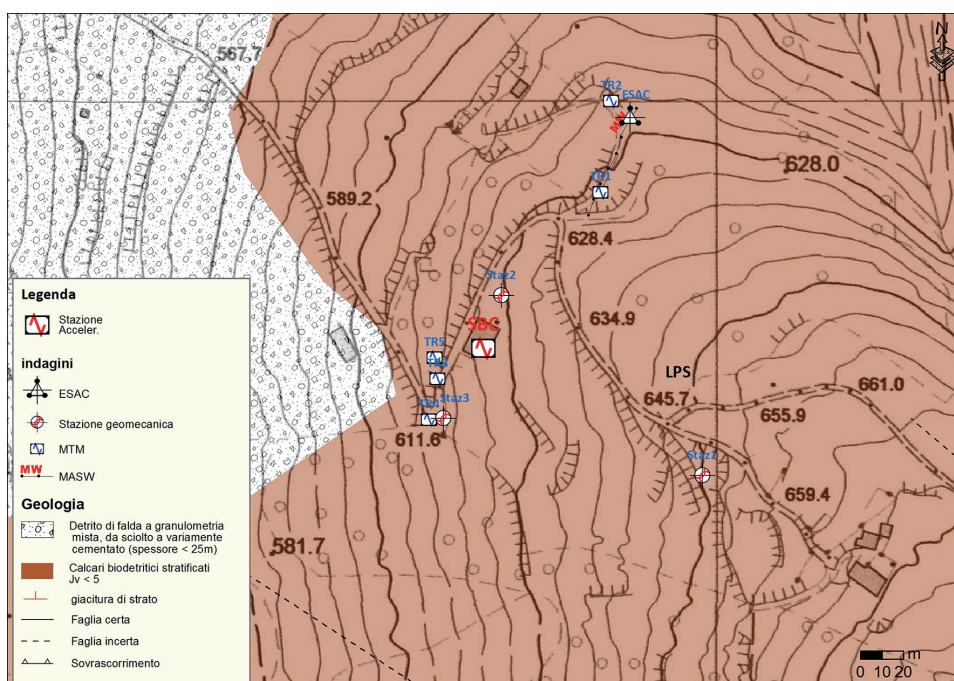


Fig. 1 – Carta geologico-tecnica con l'ubicazione delle indagini funzionali alla caratterizzazione della stazione accelerometrica di Subiaco (SBC).

La raccolta dei dati pregressi ha consentito un aggiornamento della classe di qualità della stazione alla classe Q4 (carta geologica a scala $<1:10.000 + f_{0,HVRS}$).

La fase conclusiva del lavoro è consistita nella caratterizzazione geologico-tecnica e geofisica di dettaglio, mediante: i) esecuzione di un rilevamento geologico-tecnico degli affioramenti rocciosi a scala 1:5.000 ii) acquisizione di rumore sismico a singola stazione (rapporti spettrali HVSR) e in configurazione di array (per ottenere il profilo di velocità delle onde S). Sulla base dei dati di nuova acquisizione, la stazione accelerometrica di Subiaco è classificata come Q1 ($C_{S_{10}} + V_s + f_0$).

Sulla nuova carta geologico-tecnica relativa alla stazione di Subiaco (Fig. 1) sono state riportate tutte le informazioni disponibili (geologia, geologia strutturale, geomorfologia, caratteristiche litologiche, ubicazione delle indagini), ricavate dai nuovi rilevamenti di campagna, dalle indagini pregresse e da quelle di nuova esecuzione.

Nel caso in esame, la parte di rilevamento geologico-tecnico si è concentrata nel rilievo geomeccanico dell'ammasso roccioso, i cui risultati hanno permesso di riconoscere una scarsa fratturazione ($J_v < 5$, Fig.2).

Le misure di rumore ambientale eseguite utilizzando due sensori con diverse frequenze proprie hanno mostrato HVSR piatti fino ad oltre 20 Hz, indicativi di un substrato rigido (Fig. 3). Anche la curva di dispersione ottenuta con tecnica ESAC ha un andamento rettilineo relativamente costante tra 1500 e 1700 m/s (Fig. 3).

In base ai dati di nuova acquisizione, il sottosuolo della stazione accelerometrica di Subiaco (SBC) è classificato come A (EC8 e NTC08).

Applicazioni e sviluppi futuri. La caratterizzazione geologico-tecnica delle stazioni accelerometriche è di fondamentale importanza per studi sismologici e applicazioni ingegneristiche (es. interpretazione delle registrazioni o stima più robusta della pericolosità sismica).

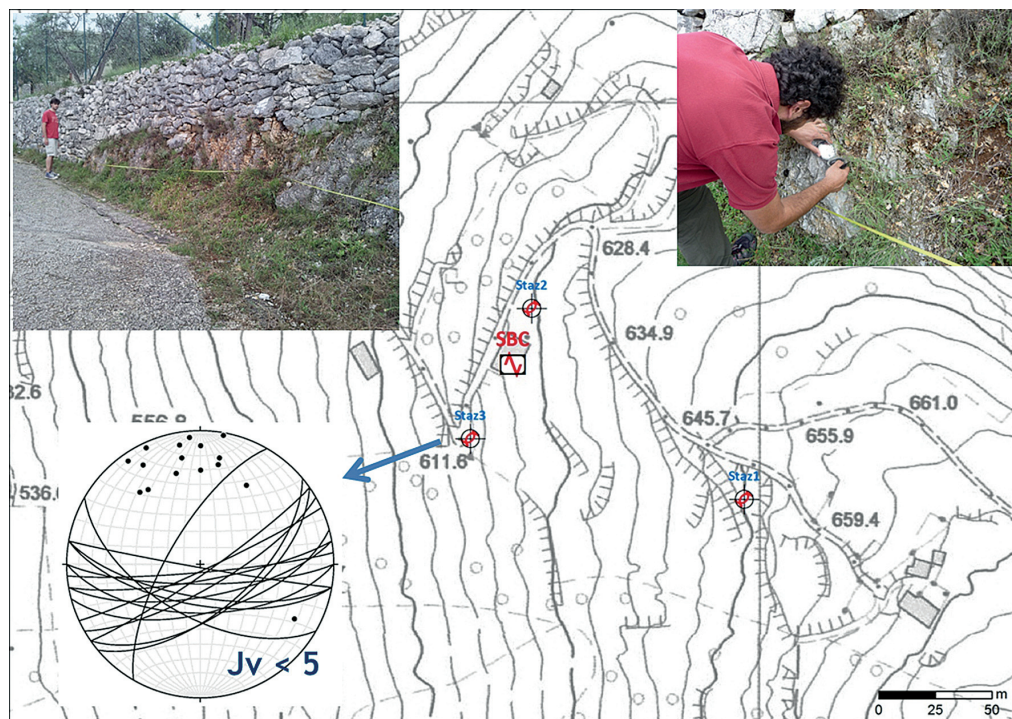


Fig. 2 – Carta con l'ubicazione delle stazioni di rilevamento strutturale (foto in alto) realizzate nei pressi della stazione accelerometrica di Subiaco (SBC).

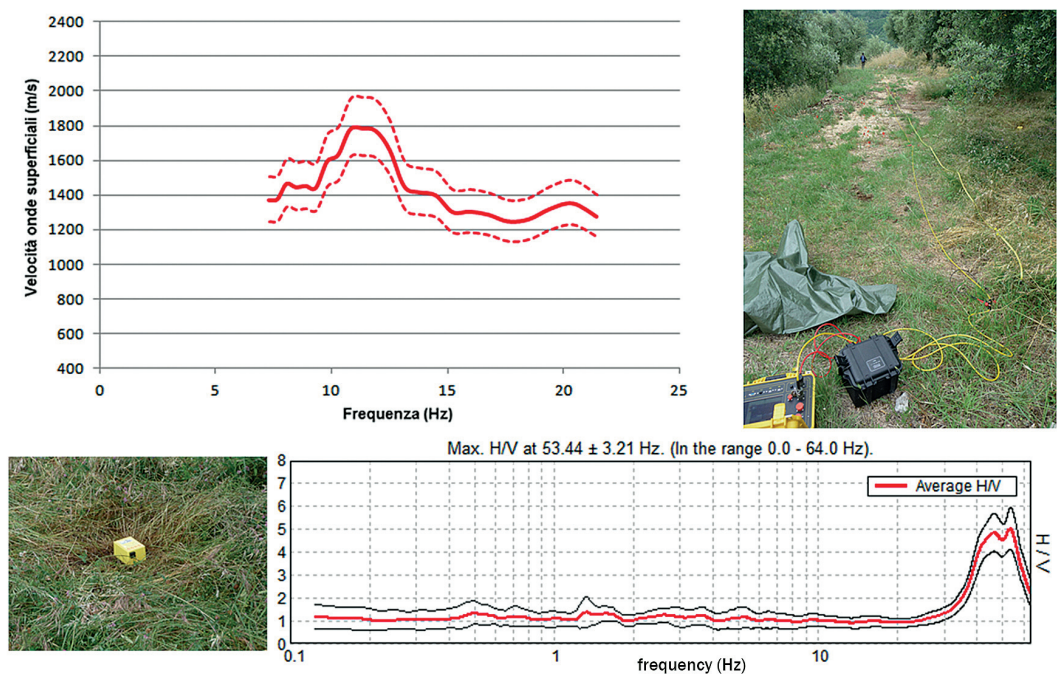


Fig. 3 – Curva di dispersione delle onde superficiali da indagine passiva tipo antenna sismica (in alto) e rapporto spettrale H/V da misura di sismica passiva a stazione singola (in basso) per la stazione di Subiaco (SBC).

I siti di registrazione vengono comunemente caratterizzati da misure geofisiche e geotecniche puntuali, che non consentono di individuare la presenza di eterogeneità laterali, le quali possono causare effetti di amplificazione bi o tri-dimensionali.

A tale scopo, è di fondamentale importanza la cartografia geologico-tecnica di dettaglio. Questo gruppo di lavoro ritiene, quindi, che la carta geologico-tecnica con scala≥1:10.000, corredata di sezioni rappresentative, costituisca un elemento imprescindibile per la caratterizzazione delle stazioni e per poter discriminare la presenza di effetti rilevanti per la risposta sismica del sito.

In termini applicativi, le classi di qualità proposte in questo lavoro consentono di discriminare le stazioni per le quali possono essere effettuate modellazioni avanzate (Tab. 4).

Tab. 4 - Possibile utilizzo delle stazioni accelerometriche in funzione della classe di qualità (cfr. Tab. 1).

Classe di qualità	Possibile utilizzo
Q1	Modello 1D, modello 2D, individuazione di instabilità, profondità del bedrock, classificazione dei siti per normative
Q2	Modello 1D, modello 2D, individuazione di instabilità, profondità del bedrock
Q3	Modello 1D, profondità del bedrock
Q4	-
Q5	-

La procedura presentata in questa nota sarà applicata alle 33 stazioni riportate in Tab. 3. In futuro si prevede di applicare la stessa procedura a tutte le stazioni della RAN, per proporre eventualmente una nuova classificazione sismica dei suoli basata sulla risposta sismica locale.

In particolare, la nuova classificazione potrà essere realizzata individuando le stazioni con configurazione geologico-geotecnica 1D del sottosuolo, priva di effetti di sito complessi, quali:

- sottosuolo instabile (frane, liquefazioni, strutture antropiche, ecc.);
- profilo di V_s con inversioni di velocità;
- effetti geometrici 2-3D rilevanti;
- effetti di *near-fault*;
- effetti di *hangingwall-footwall* rispetto al piano della faglia-sorgente.

Estraendo gli spettri delle stazioni classificate 1D e normalizzandoli rispetto alla propria PGA, sarà possibile ottenere spettri di riferimento da associare a condizioni-tipo di sottosuolo.

Riconoscimenti. L'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (IGAG) del Consiglio Nazionale delle Ricerche ringrazia il Dipartimento della Protezione Civile (Intesa operativa 621/06). Si ringrazia, inoltre, il Gruppo di Lavoro GEORAN, costituito dai gruppi di ricerca del CNR IGAG, del CNR IMAA, dell'INGV-MI, dell'OGS, dell'Università di Siena, dell'Università di Bologna (responsabile S. Castellaro) e dell'Università di Genova (responsabile S. Barani), per la realizzazione dei rilievi geologico-tecnici e per l'esecuzione delle misure geofisiche di superficie.

Bibliografia

- Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., Ameri G. e Paolucci R.; 2011: *Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database*. Bull. Earthquake Eng., **9**(6), 1899-1920. DOI 10.1007/s10518-011-9313-z.
- CTMS; 2013a: *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Microzonazione sismica - Linee guida per l'elaborazione della carta e delle sezioni geologico tecniche per la microzonazione sismica (CGT_MS) (bozza)*. Commissione tecnica per la microzonazione sismica, Dipartimento della Protezione Civile.
- CTMS; 2013b: *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Microzonazione sismica (versione 3.0)*. Commissione tecnica per la microzonazione sismica, Dipartimento della Protezione Civile.
- <http://protezionecivile.regione.abruzzo.it/files/rischio%20sismico/microzonazione/StandardMS_3_0_open.pdf>
- DPC-INGV; 2007-2009: *Project S4 – D6. Progress report on the application of surface-waves methods for seismic site characterization (Technical report)*. Task 3 Working Group, <<http://esse4.mi.ingv.it>>.
- DPC-INGV; 2007-2009: *Project S4 – D7. Application of surface-waves methods for seismic site characterization of ITACA stations (Technical report)*. Task 3 Working Group, <<http://esse4.mi.ingv.it>>.
- EN 1998-1; 2005: *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. CEN, European Committee for Standardization.
- Ferri D. e Sette S.; 2012: *Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (scala 1:10.000)*. Microzonazione sismica di livello 1, Regione Lazio, D.G.R. Lazio 545/2010 - 490/2011.
- Luzi L., Hailemichael S., Bindi D., Pacor F., Mele F. e Sabetta F.; 2008: *ITACA (Italian ACcelerometric Archive): A Web Portal for the Dissemination of Italian Strong-motion Data*. Seismological Research Letters, **79**(5), 716-722, DOI: 10.1785/gssrl.79.5.716.
- NTC; (2008): *Norme Tecniche per le Costruzioni*. DM 14 gennaio 2008, Suppl. Ordinario n. 30 alla G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008.
- Pacor F., Paolucci R., Luzi L., Sabetta F., Spinelli A., Gorini A., Nicoletti M., Marcucci S., Filippi L. e Dolce M.; 2011: *Overview of the Italian strong motion database ITACA 1.0*. Bull. Earthquake Eng., **9**(6), 1723-1739, DOI: 10.1007/s10518-011-9327-6.
- Research Project DPC-RELUIS 2010-2013 <<http://www.reluis.it/>>.