

INDAGINI PER LO STUDIO DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DI EDIFICI STORICI NEL CENTRO DI MACERATA

Paola Monaco

Università dell'Aquila
paola.monaco@univaq.it

Gianfranco Totani

Università dell'Aquila
gianfranco.totani@univaq.it

Giovanni Bosco

Università dell'Aquila
giovanni.bosco@univaq.it

Ferdinando Totani

Ingegnere professionista, L'Aquila
ferdinando.totani@gmail.com

Sommario

La nota riassume i risultati di una campagna di indagini eseguite nel centro di Macerata, parte di uno studio finalizzato alla valutazione della vulnerabilità sismica di due edifici storici di proprietà dell'Università di Macerata. Le indagini in sito, spinte fino a 40-100 m di profondità, comprendono sondaggi, prove down-hole e misure di V_s mediante dilatometro sismico in fori riempiti di ghiaia, oltre a prove basate su onde di superficie e misure di rumore sismico. Le prove di laboratorio eseguite su campioni indisturbati comprendono, tra le altre, prove cicliche/dinamiche. La nota descrive sinteticamente l'interpretazione dei risultati delle indagini, finalizzata alla ricostruzione del modello geotecnico di sottosuolo e dei relativi parametri da utilizzare come input in analisi di risposta sismica locale per la valutazione dell'azione sismica sugli edifici oggetto di studio.

1. Inquadramento generale

Gli eventi sismici che hanno colpito l'Italia centrale nel 2016-2017 hanno causato danni strutturali in una vasta area, che comprende anche il centro storico di Macerata. In seguito a tali eventi l'Università di Macerata ha promosso una serie di studi finalizzati alla valutazione della vulnerabilità sismica e alla progettazione di eventuali interventi di miglioramento/adequamento sismico di edifici storici di sua proprietà. In tale contesto è stata pianificata una campagna di indagini geotecniche e geofisiche nei siti in cui sono localizzati due edifici universitari, Loggia del Grano (Sito 1) e Piazza Strambi (Sito 2).

I siti sono prossimi al bordo settentrionale del colle di Macerata, ad un'altitudine di 300-315 m s.l.m.. Dal punto di vista geologico l'area è caratterizzata dalla presenza di una formazione Pliocenica di base estesa fino a grande profondità, costituita da terreni prevalentemente a grana fine (argille, argille limose e argille marnose) includenti sottili strati di sabbia da fine a media, localmente cementati fino ad assumere le caratteristiche di una roccia arenaria tenera. I materiali più grossolani sono costituiti da arenaria stratificata e sabbia con sottili strati di argilla limosa. Tale formazione è ricoperta da depositi Quaternari costituiti principalmente da sabbie fini limose e limi sabbiosi, sabbie argillose e occasionalmente da argille tenere con materia organica. La falda acquifera, non rilevata dalle indagini

qui descritte, si trova presumibilmente a grandi profondità. Dettagli sulla geologia dell'area di Macerata e altre informazioni correlate sono reperibili negli elaborati prodotti nell'ambito degli studi di microzonazione sismica di 3° livello promossi dopo la sequenza sismica del Centro Italia 2016-2017, con il coordinamento del Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni (CentroMS), disponibili sul sito istituzionale del Comune di Macerata.

2. Indagini in sito

Il programma delle indagini eseguite nei due siti (Fig. 1) comprende quattro sondaggi a carotaggio continuo spinti fino a 40-100 m di profondità (S1, S2, S3, S4), due prove down-hole (DH-S1, DH-S2) fino a 40 m, prove con dilatometro sismico con misure di velocità di propagazione delle onde di taglio V_S all'interno di due fori riempiti di ghiaia (SDMT1, SDMT2) fino a 40-100 m e, a profondità minori, attraverso il terreno in prossimità degli stessi fori (SDMT1bis, SDMT2bis), misure di rumore ambientale in due postazioni (HVSR1, HVSR2) e prove basate su onde di superficie lungo tre allineamenti (MASW1, MASW2, MASW3).

Le Figure 2 e 3 mostrano, rispettivamente per il Sito 1 e 2, le stratigrafie schematiche ricavate dai sondaggi e i profili con la profondità della V_S misurata nello stesso foro di sondaggio mediante prove down-hole (DH) o misure con dilatometro sismico (SDMT) in fori riempiti di ghiaia e, dove disponibili, mediante la normale procedura SDMT nel terreno vergine, confrontati con i profili di V_S ottenuti dall'interpretazione delle prove di superficie (MASW) più vicine.

In base alle stratigrafie dei sondaggi sono state identificate tre unità di terreno: l'Unità A comprende tutti i terreni a grana fine, argillosi e limosi; l'Unità B comprende i terreni a grana più grossa, sabbiosi e limosi; l'Unità C comprende l'arenaria cementata. Al di sotto di uno strato superficiale di materiale di riporto antropico di spessore 0.7-2.7 m si incontrano, a profondità variabili (5.7-8.0 m nel Sito 1, 5.3-5.5 m nel Sito 2), i depositi Quaternari recenti, costituiti principalmente da limi argillosi (A) e da sabbie limose e argillose (B), nel solo sondaggio S3 preceduti da uno strato di argilla organica e argilla limosa con inclusioni di torba argillosa a profondità 2.7-5.3 m. I depositi Quaternari poggiano sulla formazione marnoso-argillosa Pliocenica, il cui limite superiore non è stato raggiunto dai sondaggi S1-S4. Nei primi 40-50 m tutte le stratigrafie mostrano intercalazioni di strati di terreni a grana fine e grossa. A profondità maggiori di 50 m (sondaggio S4) le argille limose e i limi argillosi all'interno della formazione marnoso-argillosa sono frequentemente intercalati con livelli di sabbie limose fini, sabbie argillose e limose fini, limi sabbiosi e argillosi di spessore 20-50 mm. Una descrizione più dettagliata delle caratteristiche dei vari strati è riportata da Monaco et al. (2021).

Le misure di V_S con SDMT nei fori di sondaggio S3 e S4 sono state eseguite utilizzando la tecnica introdotta da Totani et al. (2009), largamente utilizzata nell'area dell'Aquila dopo il terremoto del 2009 (Monaco et al. 2013), con alcune differenze. Il modulo sismico SDMT, dotato di due ricevitori (Marchetti et al. 2008), è stato inserito fino al fondo del foro e quindi fatto scorrere verso l'alto utilizzando la sonda man mano che il foro veniva progressivamente riempito con ghiaia fine-media

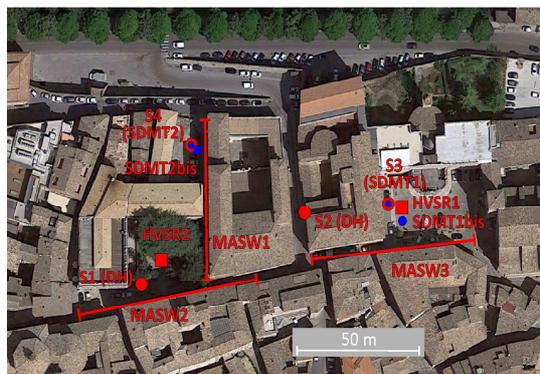


Fig 1. Planimetria con ubicazione delle indagini in sito

pulita, mantenendo sempre lo strumento all'interno del riempimento ed eseguendo misure di V_S ogni 0.50 m di profondità (come nella prova SDMT usuale ma senza misure DMT, prive di significato nel riempimento). La tecnica si basa sull'ipotesi che il percorso compiuto dalle onde S generate in superficie fino ai due ricevitori include due brevi tratti nel riempimento all'incirca della stessa lunghezza, che non influenzano il ritardo tra i due sismogrammi e la V_S interpretata. Tale ipotesi è stata validata sperimentalmente mediante confronto tra V_S ottenute in fori riempiti di ghiaia e nel terreno vergine con la procedura di penetrazione usuale (Totani et al. 2009). Per queste misure di V_S è stata utilizzata una sorgente sismica "potenziata", specificamente progettata e testata presso l'Università dell'Aquila in precedenti campagne di indagine (Totani et al. 2016) per migliorare la qualità del segnale e ridurre l'incertezza nell'interpretazione di V_S quando si eseguono misure con SDMT in fori profondi. La sorgente ("Martello Tirino", Fig. 2c) è costituita da un martello a pendolo con una massa di 130 kg e un'altezza di caduta di 2 m che colpisce orizzontalmente una piastra in acciaio zavorrata posta lungo un lato del dispositivo di spinta, con linea di impatto parallela agli assi dei ricevitori.

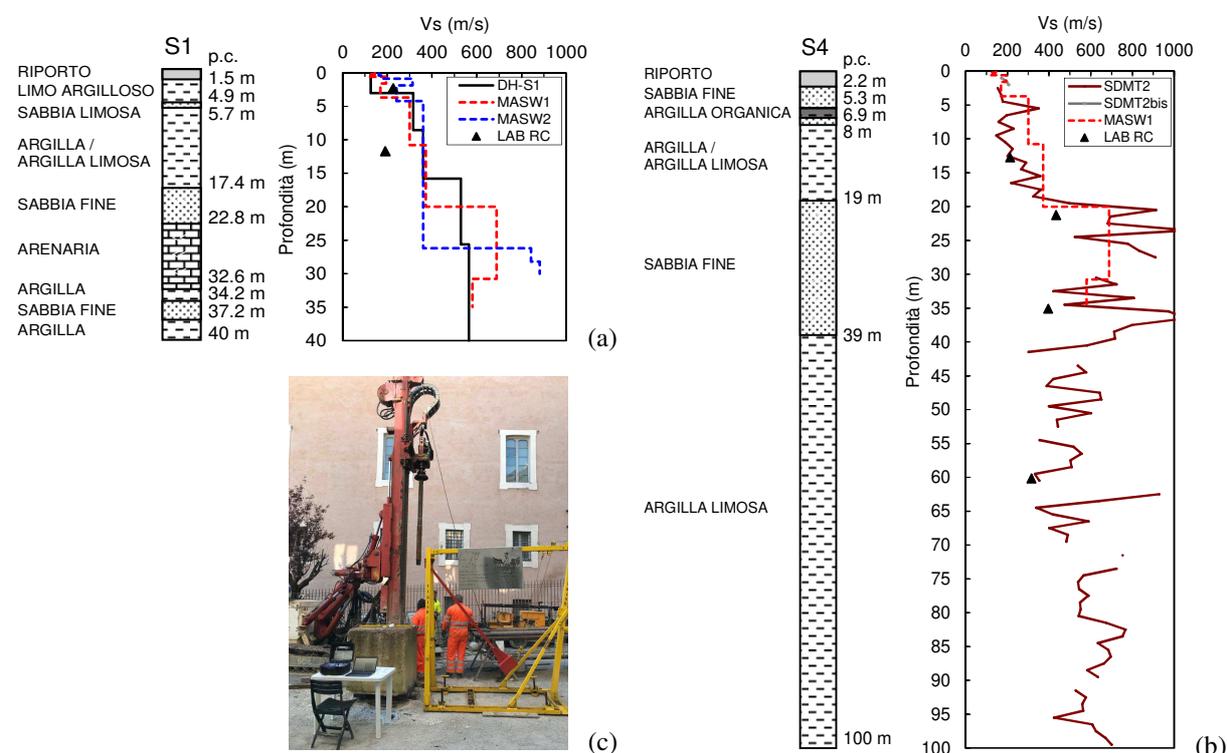


Fig 2. Sito 1 – Stratigrafia schematica e profili di V_S ottenuti (a) da DH e MASW, (b) da SDMT in foro riempito di ghiaia e MASW. (c) Esecuzione di misure di V_S con SDMT nel foro di sondaggio S4 riempito di ghiaia utilizzando la sorgente sismica "potenziata" ("Martello Tirino").

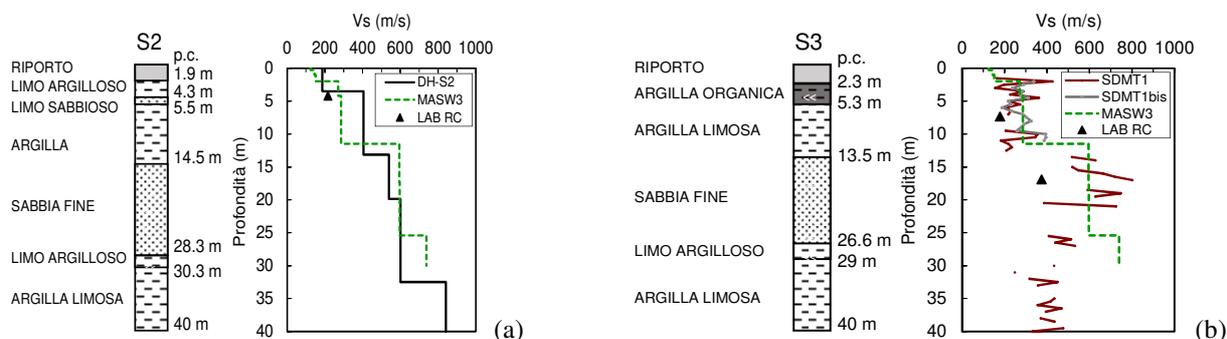


Fig 3. Sito 2 – Stratigrafia schematica e profili di V_S ottenuti (a) da DH e MASW, (b) da SDMT in foro riempito di ghiaia e MASW.

I profili di V_S ottenuti con tecniche diverse sono generalmente in accordo tra loro e ragionevolmente coerenti con la stratigrafia del terreno. In generale V_S aumenta con la profondità, mostrando valori più elevati in corrispondenza di strati di sabbia fine (B) o arenaria (C), dove si possono trovare valori di $V_S > 800$ m/s. Nel sondaggio più profondo (S4, Fig. 2b) i valori di V_S ottenuti da SDMT2 sono circa 200-300 m/s nei primi ≈ 20 m, aumentano fino a circa 700-800 m/s tra ≈ 20 m e 40 m, quindi si riducono a circa 400 m/s e al di sotto di 40 m aumentano quasi linearmente con la profondità, fino a raggiungere circa 600-700 m/s alla massima profondità indagata di 100 m.

3. Prove di laboratorio

Tutti i campioni di terreno (17) prelevati nel corso dei sondaggi sono stati sottoposti a prove di laboratorio per la determinazione delle proprietà fisiche (peso dell'unità di volume, contenuto d'acqua, peso specifico dei grani, limiti di Atterberg, distribuzione granulometrica, grado di saturazione, indice dei vuoti). I dati delle proprietà fisiche sono riepilogati in Tabella 1.

Tabella 1. Riassunto delle proprietà fisiche dei campioni di terreno

Campione	Profondità (m)	Unità	γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	e	S (%)	w_n (%)	w_l (%)	w_p (%)	PI (%)	A (%)	L (%)	S (%)	G (%)
S1-C1	2.15-2.45	A	20.57	26.97	0.527	85	16.3	45	19	26	44	52	4	0
S1-C2	11.50-11.90	A	21.11	26.84	0.482	93	16.3	49	19	30	52	46	2	0
S1-C3	25.00-25.50	C	18.45	---	---	---	18.5	---	---	---	---	---	---	---
S1-C4	39.80-40.00	A	21.08	26.91	0.515	99	18.5	42	18	24	41	55	4	0
S2-C1	4.00-4.40	A1	17.06	26.23	0.893	69	22.9	38	19	19	27	34	35	4
S2-C2	8.00-8.30	A	21.37	26.52	0.467	100	18.0	45	21	24	45	50	5	0
S2-C3	12.00-12.30	A	21.24	26.51	0.456	98	16.5	44	19	25	44	50	6	0
S2-C4	32.60-33.00	A	21.27	26.42	0.456	100	17.0	39	19	25	36	57	7	0
S3-C1	7.10-7.60	A	20.09	26.54	0.571	89	18.7	45	19	26	42	54	4	0
S3-C2	3.00-3.50	A2	16.49	27.14	1.534	97	53.6	57	33	25	23	44	27	6
S3-C3	4.50-5.00	A2	17.34	26.30	1.189	100	44.1	56	28	28	29	50	18	3
S3-C4	16.70-17.10	B	19.99	26.30	0.509	77	14.5	---	---	---	11	29	60	0
S4-C1	5.00-5.50	A1	19.14	26.33	0.650	81	19.7	33	17	16	26	50	23	1
S4-C2	12.50-13.00	A	20.97	26.19	0.467	99	17.2	45	19	26	44	48	8	0
S4-C3	21.00-21.50	B	20.08	26.23	0.593	98	21.7	---	---	---	17	32	51	0
S4-C4	35.00-35.20	B (C)	18.88	26.33	0.676	79	19.9	---	---	---	11	20	68	1
S4-C5	60.00-60.30	A	21.95	26.61	0.383	99	13.9	38	18	20	41	56	3	0

γ = peso dell'unità di volume naturale; γ_s = peso specifico dei grani; e = indice dei vuoti; S = grado di saturazione; w_n = contenuto d'acqua naturale; w_l = limite liquido; w_p = limite plastico; PI = indice di plasticità; A = argilla; L = limo; S = sabbia; G = ghiaia

Su campioni selezionati sono state eseguite 9 prove edometriche, 9 prove di colonna risonante (RC) e 2 prove di taglio torsionale ciclico (CTS). Le prove edometriche eseguite su terreni a grana fine (A) hanno indicato una bassa compressibilità legata alla sovraconsolidazione indotta dalla storia geologica, congruente con i valori relativamente bassi dell'indice dei vuoti (Monaco et al. 2021). Le prove RC e CTS sono state eseguite applicando una pressione di consolidazione prossima alla tensione efficace media in sito p' stimata mediante la relazione $p' = [(1 + 2 K_0) \cdot \sigma'_v] / 3$, in cui σ'_v è la tensione verticale efficace in sito, assumendo un coefficiente di spinta a riposo $K_0 = 1$ (da SDMT) e assenza di falda.

La Fig. 4 riassume i risultati ottenuti da prove RC in termini di variazione del modulo di taglio G , normalizzato rispetto al suo valore a piccole deformazioni G_0 , e del rapporto di smorzamento D in funzione della deformazione di taglio γ . Le curve ottenute su campioni appartenenti alla stessa unità stratigrafica sono raggruppate rispettivamente in Fig. 4a (A, argille limose), Fig. 4b (A1, limi e sabbie argillose) e Fig. 4c (B, sabbie limose e argillose). Da notare che le curve $G/G_0 - \gamma$ e $D - \gamma$ determinate su campioni distinti appartenenti all'Unità A (Fig. 4a) e all'Unità B (Fig. 4c) sono molto simili.

La Fig. 4d mostra la variazione di G_0 in funzione di p' determinata da prove RC su campioni prelevati nell'Unità A (argille limose) a profondità variabili tra 2.15-2.45 m e 60.00-60.30 m dal piano campagna. In Fig. 4d è mostrata anche la correlazione *best-fit* che esprime la dipendenza di G_0 da p' .

I valori di V_S ottenuti in laboratorio da prove RC sono stati confrontati con i corrispondenti valori di V_S ottenuti in sito (Figure 2b e 3b), risultando generalmente simili o leggermente inferiori.

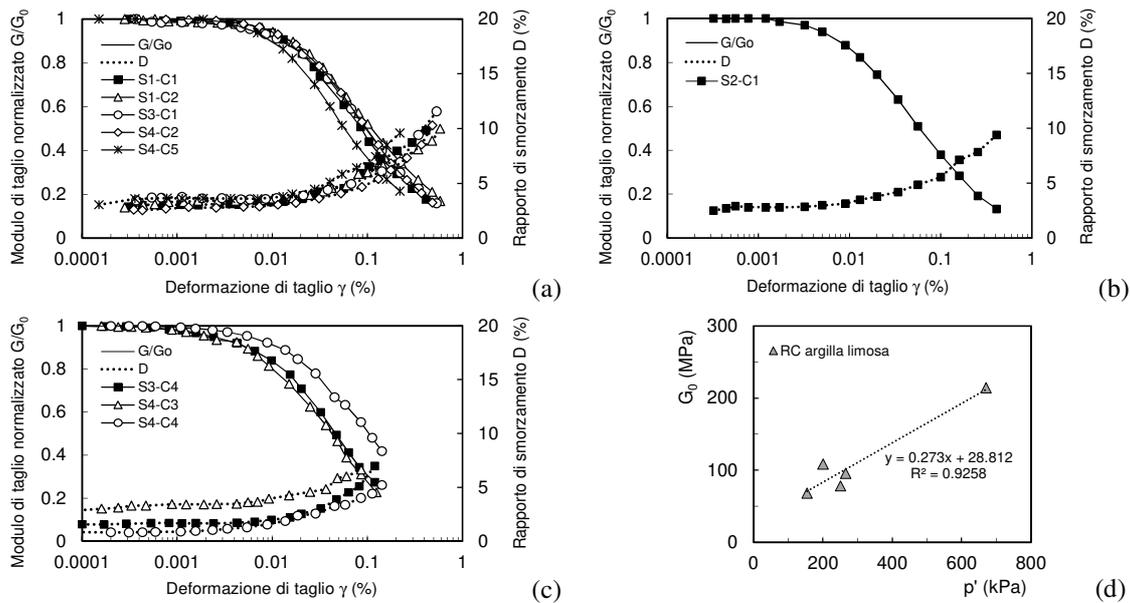


Fig 4. Modulo di taglio normalizzato G/G_0 e rapporto di smorzamento D in funzione della deformazione di taglio γ da prove RC: (a) Unità A (argille limose); (b) Unità A1 (limi argillosi e sabbie); (c) Unità B (sabbie limose e argillose). (d) Variazione del modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 in funzione della tensione efficace media p' nell'Unità A (argille limose) da prove RC.

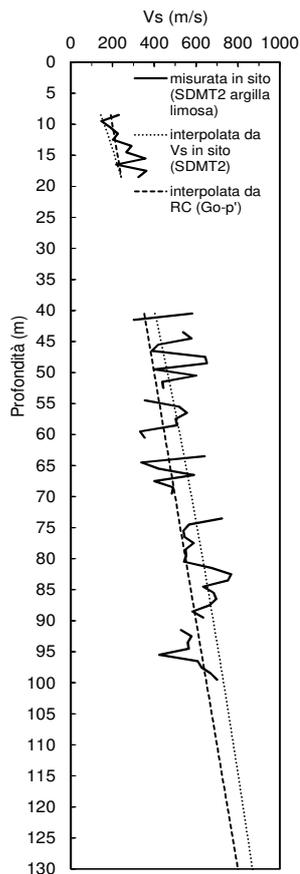


Fig 5. Estensione del profilo di V_S in sito ottenuto da SDMT2 (sondaggio S4) in argille limose fino alla profondità oltre la quale $V_S > 800$ m/s in base a migliore interpolazione dei dati di prove RC di laboratorio e V_S misurata in sito

4. Profilo di V_S e identificazione del bedrock sismico

Un aspetto critico che emerge dall'analisi dei risultati delle indagini descritte in precedenza è legato al fatto che, nonostante la notevole profondità raggiunta (100 m), non è stato possibile individuare né il *bedrock* geologico né il *bedrock* "sismico" (caratterizzato da $V_S > 800$ m/s). A tale scopo le misure di rumore ambientale sono risultate di scarso aiuto, avendo indicato possibili variazioni di impedenza a profondità dell'ordine di 40-60 m (HVSRI) e 35-55 m (HVSRI2), mentre le misure di V_S ottenute da SDMT2 (Fig. 2b) indicano che il valore di soglia $V_S = 800$ m/s non viene raggiunto entro la profondità di 100 m. Pertanto, considerando che queste informazioni sono essenziali per ricostruire un modello di sottosuolo affidabile per le analisi di risposta sismica locale, la profondità del "bedrock sismico" è stata stimata, in prima approssimazione, a partire dalle informazioni disponibili in base ai dati delle prove di laboratorio e in sito. La relazione $G_0 - p'$ in Fig. 4d, determinata da prove RC di laboratorio per l'Unità A (argille limose), è stata utilizzata per estendere il profilo di V_S con la profondità ottenuto da SDMT2 fino alla profondità oltre la quale $V_S > 800$ m/s, da assumere come profondità del "bedrock sismico" nelle analisi di risposta sismica locale. A tale scopo, i valori di p' sono stati convertiti in corrispondenti valori di profondità assumendo un valore costante $K_0 = 1$ (ipotesi ragionevole essendo i depositi sovraconsolidati). La linea di tendenza risultante è mostrata in Fig. 5, confrontata con la linea ottenuta come migliore interpolazione dei valori

di V_S misurati in sito da SDMT2 nell'Unità A. Le due linee di interpolazione di laboratorio e in sito indicano che il valore $V_S \approx 800$ m/s viene raggiunto a profondità comprese tra circa 115 m e 130 m al di sotto del piano campagna.

5. Conclusioni

I risultati della campagna di indagini descritte in questa nota hanno permesso di ricostruire un modello di sottosuolo affidabile per analisi di risposta sismica locale nel centro storico di Macerata.

In condizioni geologiche relativamente uniformi, come nel caso di Macerata, è necessario estendere le indagini a notevoli profondità per determinare la posizione del "bedrock sismico" ($V_S > 800$ m/s). Questa potrebbe essere erroneamente collocata a profondità inferiori basandosi sull'interpretazione dei risultati di indagini meno profonde, ad esempio spinte solo fino ai "canonici" 30 m, non in grado di cogliere l'inversione del profilo di V_S con la profondità.

Il dilatometro sismico si dimostra uno strumento efficace e affidabile per ottenere misure di V_S fino a grandi profondità. Una caratteristica tecnica di particolare rilevanza per questo scopo è la presenza nel modulo sismico SDMT di un amplificatore di segnale in grado di fornire una chiara registrazione delle forme d'onda. Questa caratteristica, combinata con l'utilizzo di una sorgente sismica appositamente progettata costituita da un martello pesante in grado di fornire notevole energia, consente di estendere le misure a profondità maggiori di quelle usuali, fino a 100 m e oltre.

Ai fini della ricostruzione di un modello di sottosuolo affidabile per le analisi di risposta sismica locale, il profilo di V_S fino alla profondità del "bedrock sismico" può essere definito in base alla combinazione delle misure di V_S in sito e della relazione $G_0 - p'$ ottenuta in laboratorio da prove di colonna risonante su campioni prelevati fino a grandi profondità.

Bibliografia

Marchetti S., Monaco P., Totani G., Marchetti D. (2008). "In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT)", Geotech. Spec. Publ. GSP 180, 292–311.

Monaco P., Totani G., Amoroso S., Totani F., Marchetti D. (2013). "Site characterization by seismic dilatometer (SDMT) in the city of L'Aquila", Rivista Italiana di Geotecnica, 3/2013, 8–22.

Monaco P., Totani G., Bosco G., Totani F. (2021). "Site characterization for assessment of the seismic vulnerability of ancient buildings in the center of Macerata." Proc. 6th Int. Conf. on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation ISC'6, Budapest, <https://www.issmge.org/publications/online-library>

Totani G., Monaco P., Marchetti S., Marchetti D. (2009). " V_S measurements by seismic dilatometer (SDMT) in non-penetrable soils", Proc. 17th ICSMGE, Alexandria, 2, 977–980.

Totani G., Monaco P., Totani F., Lanzo G., Pagliaroli A., Amoroso S., Marchetti D. (2016). "Site characterization and seismic response analysis in the area of Collemaggio, L'Aquila (Italy)", Proc. 5th Int. Conf. on Geotechnical and Geophysical Site Characterization ISC'5, Gold Coast, 2, 1051–1056.