

RISPOSTA SISMICA LOCALE A SUPPORTO DELLA MICROZONAZIONE SISMICA: IL CASO DI PIETRACAMELA (APPENNINO CENTRALE)

L. Minarelli¹, S. Amoroso², M. Stefani³, M. Fazzini³

¹ Geotema Srl - Spin-off dell'Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, Italy

² Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, L'Aquila, Italy

³ Università degli Studi di Ferrara - Ferrara, Italy

Contesto geologico. Il territorio del comune di Pietracamela è posto alle pendici settentrionali del Massiccio del Gran Sasso, in un'area caratterizzata da un'elevata attività sismica, associata ad un contesto tettonico distensivo. Nell'ultimo secolo, l'area è stata ripetutamente interessata dagli eventi sismici, nel 1909, 1950, 1956, 2009 e, recentemente, da quelli del 2016-2017. Il nucleo storico presenta un fitto tessuto urbano di elevata valenza architettonica, diffusamente danneggiato dalle recenti accelerazioni sismiche, che hanno agito sulle murature antiche prevalentemente realizzate in pietrame. In seguito a questi eventi, è stato disposto lo studio di microzonazione sismica, da noi condotto nell'ambito degli studi di emergenza svolti nei comuni abruzzesi colpiti dalla recente sequenza sismica. Il substrato geologico dell'area studiata è caratterizzato da spessi corpi miocenici di torbiditi terrigene e terrigene bioclastiche, che formano il footwall dell'importante sovrascorrimento alla base delle successioni carbonatiche mesozoiche che formano l'imponente massiccio del Gran Sasso. La successione, parte del Gruppo della Laga, è formata la formazione delle Marne con Cerrognna, suddivisibile in due membri, uno inferiore calcarenitico-calcirudítico (CRRb), caratterizzato da banchi e strati spessi di arenarie ibride e bioclasti risedimentati, intercalati da argille, marne e marne-calcaree ed uno superiore marnoso-calcareenitico (CRRa), costituito da marne e marne-calcaree, intercalato da arenarie e calcareniti medio-fini. Seguono sedimenti bacinali più fini, argilloso-marnose, di età in parte messiniana, ricchi di foraminiferi planctonici e perciò noti come Argille ad Orbulina (UAM3). Sopra al substrato, nell'area del centro storico, poggiano potenti corpi di frana di età tardo-quadernaria, messi in posto con meccanismi gravitativi complessi. Nell'area sono presenti anche depositi tardo-pleistocenici da meccanismi di trasporto in massa, che sembrano riflettere condizioni periglaciali. I vari tipi di depositi gravitativi sono caratterizzati spesso da una vistosa cementazione carbonatica, associata a depositi travertinosi, che irrigidiscono notevolmente i sedimenti superficiali, modificando profondamente le loro proprietà meccaniche. Nei pressi del centro abitato sono ancora attivi importanti movimenti gravitativi, anche di crollo.

Il nucleo storico principale è posto su un corpo di paleofrana accumulato sulla destra idrografica del Rio Arno. Sul lato opposto del rio, sorge un altro nucleo urbano, interessato da movimenti gravitativi ancora in atto che ha spesso registrato un maggiore livello di danno sismico sulle strutture architettoniche, come quelle della chiesa principale. Ad una profondità di

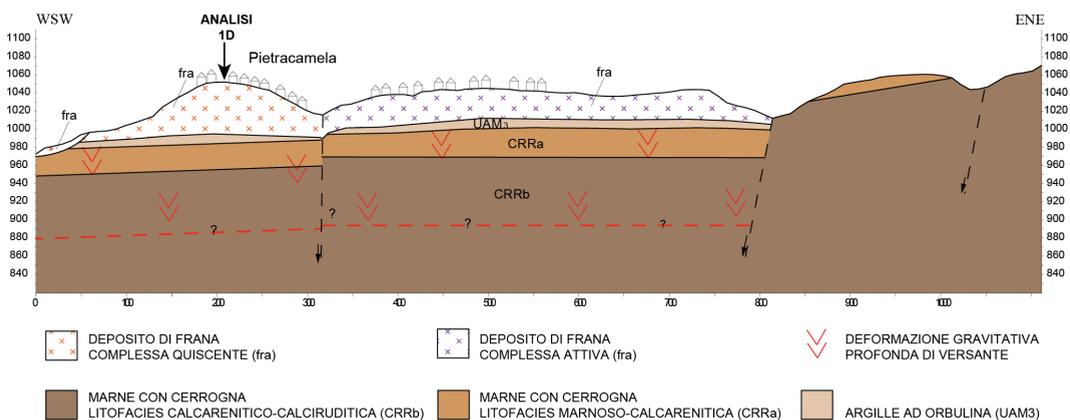


Fig. 1 - Sezione WSW-ENE passante per l'abitato di Pietracamela.

circa 30-40 metri, il corpo di frana poggia qui sulla formazione della Argille ad Orbulina (UAM3 in Fig.1, che segue la simbologia adottata nel progetto cartografico CARG), costituita da marne argillose e siltiti marnose di colore dal grigio-azzurro all'avana, sottilmente stratificate e ricche di foraminiferi planctonici. Nell'area oggetto di studio, tali depositi risultano erosi in condizioni subaerea prima dell'accumulo di frana e presentano uno spessore residuo di una decina di metri.

Caratterizzazione geotecnica. Il centro storico di Pietracamela si sviluppa su una cresta allungata WSW-ENE, sopra i 1000 m s.l.m di quota. La cresta è costituita da depositi di frana tardo-quadernari, sovrapposti ad un substrato geologico formato dall'alternanza di strati arenaceo-pellico del Gruppo della Laga, immergenti ad alto angolo verso WNW (Fig. 1). Nell'area dell'abitato, i depositi di frana sono formati da blocchi fortemente eterometrici di arenarie e arenarie bioclastiche, anche plurimetrici, che formano una struttura normalmente clastosostenuta, associata una matrice siltoso-sabbiosa e limoso argillosa, alimentati dalla degradazione di versanti prevalentemente arenacei. Il corpo registra spesso una significativa precipitazione biochimica di croste e livelli travertinosi, attiva nell'intervallo fra diversi eventi franosi. Questa precipitazione carbonatica dovuta ad azioni biologiche in acque continentali ha frequentemente indotto una pervasiva cementazione e rilitificazione dei corpi di frana stabilizzati, mentre quelli attivi ovviamente presentano un assai più basso grado di coerenza meccanica. Sotto la porzione occidentale del centro storico, il corpo di frana è dominato da blocchi prevalentemente calcareo-bioclastici ed è costituito da un'alternanza di depositi franosi, derivanti da eventi passati, di matrice prevalentemente calcarea a blocchi carbonatici. Ad una profondità di circa 30-40 metri, il corpo di frana poggia qui sulla formazione della Argille ad Orbulina. Nell'area oggetto di studio, tali depositi risultano erosi in condizioni subaerea prima dell'accumulo di frana e presentano uno spessore residuo di una decina di metri e mostrano un certo grado di alterazione subaerea che ne ha degradato le proprietà meccaniche. Al di sotto, si trova la formazione delle Marne con Cerrognia, sempre meno alterata procedendo verso il basso. Le successioni mioceniche sono coinvolte in importanti deformazioni plio-pleistoceniche, che hanno indotto lo sviluppo di ampie pieghe scollate dal loro substrato geologico, intersecate da un sistema di faglie, anche ad alto angolo. La giacitura degli strati è stata in parte modificata da movimenti gravitativi profondi.

Per lo studio di risposta sismica locale è stata presa in considerazione l'area del centro storico di Pietracamela (Fig. 1), poggiante su depositi di frana non interessati da attività recente costituiti da una parte superficiale prevalentemente ghiaiosa con blocchi litoidi e ben cementati che passano ad una matrice meno cementata e prevalentemente sabbiosa fino al contatto con la sottostante formazione delle Argille ad Orbulina. La cresta su cui sorge il centro storico ha le caratteristiche tipiche di un accumulo di frana antico e mostra pendii inclinati di 22° nel settore ad W e di circa 18° nel settore E, valori di cui si è tenuto in considerazione per il calcolo dell'amplificazione topografica nelle analisi 1D.

Per gli studi di microzonazione sismica di terzo livello, sono state effettuate indagini geologiche, geotecniche e geofisiche sul sottosuolo. Sulla base del modello di sottosuolo così ricostruito, sono state sviluppate le analisi monodimensionali della risposta sismica locale, utilizzando il codice di calcolo STRATA (Kottke & Rathje, 2008).

La definizione del modello di sottosuolo si è basata su un rilevamento geologico di superficie a grande scala, sondaggi stratigrafici, prove cicliche/dinamiche di laboratorio, indagini di sismica attiva tipo down-hole (DH) e multichannel analysis of surface waves (MASW), e di sismica passiva, che analizzano il rumore sismico ambientale (HVSr). Per il sito del centro storico di Pietracamela sono stati quindi identificati vari litotipi, caratterizzati da varie proprietà fisiche e meccaniche:

- ai depositi di frana con clasti e megaclasti litoidi (FRA1), con spessore di 20 metri, è stata assegnata una velocità delle onde di taglio $V_s \approx 1300$ m/s, legata al loro alto grado di cementazione e precipitazione travertionosa, con peso di volume $\gamma \approx 22$ kN/m³ e coefficiente di Poisson $\nu \approx 0.35$;

- per i depositi di frana poco cementata a matrice sabbiosa (FRA2), con spessore di 10 metri, è stata assegnata $V_s \approx 770$ m/s, con $\gamma \approx 20$ kN/m³ e $\nu \approx 0.30$;
- per le Argille ad Orbulina (UAM3), con spessore massimo di 10 metri, è stata assegnata $V_s \approx 700$ m/s, con $\gamma \approx 22$ kN/m³ e $\nu \approx 0.30$;
- per la litofacies CRRa della formazione delle Marne con Cerrognna, assunta come il bedrock sismico, è stata assegnata $V_s \approx 1100$ m/s con $\gamma \approx 22$ kN/m³ e $\nu \approx 0.35$.

Tab. 1 - Sintesi dei parametri geotecnici associati al modello di sottosuolo del centro storico di Pietracamela.

Litologia	Profondità (m)	V _s (m/s)	γ (kN/m ³)	ν (-)	D (%) (analisi lineare)	Curve G/G ₀ - γ e D (analisi lineare equivalente)
FRA1	0 - 20	1300	22.0	0.35	0.5	Lineare D= 0.5%
FRA2	20 - 30	770	20.0	0.30	2	Rollins <i>et al.</i> (1998)
UAM3	30 - 40	700	22.0	0.30	1	Lineare D= 1.0%
CRRa	Bedrock	1100	24.0	0.35	0.5	Lineare D= 0.5%

I dati e le stime numeriche attribuite al modello geotecnico di sottosuolo sono stati importati nel programma di calcolo 1D STRATA. Vedi Tab. 1 ove: (i) descrive la litologia; (ii) la profondità e gli spessori, dei vari sismostrati; (iii) i valori di velocità delle onde di taglio V_s ; (iv) i valori del peso per unità di volume γ ; (v) il coefficiente di Poisson (ν); (vi) l'incremento del fattore di smorzamento D (%) utilizzato per le analisi lineari; (vii) le curve di decadimento del modulo di taglio ($G/G_0 - \gamma$) e di incremento del fattore di smorzamento ($D - \gamma$) utilizzate nelle analisi lineari equivalenti.

La calibrazione del modello geotecnico è stata effettuata tramite un'analisi lineare monodimensionale, impostando i valori del fattore di smorzamento D di Tab. 1. Si è quindi realizzata un'analisi lineare-equivalente monodimensionale, utilizzando le curve $G/G_0 - \gamma$ e $D - \gamma$ riportate in Tab. 1. Per i depositi di frana quiescente FRA2 sono stati scelti i valori proposti dalla curva di Rollins et al. (1998), mentre per i restanti litotipi e per il basamento sismico (CRRa), è stato ipotizzato un comportamento lineare, data l'elevata rigidità delle rocce considerate:

- per le Argille ad Orbulina (UAM3) è stato assunto $D = 1.0\%$;
- per i depositi di frana (FRA1) e per le Marne con Cerrognna (CRRa) è stato assunto un valore di $D = 0.5\%$.

Valutazione della risposta sismica locale. Durante l'elaborazione dei dati per la microzonazione sismica è stato utilizzato il programma open-source STRATA che definisce soluzioni elastico-lineari e lineari equivalenti per la risposta sismica 1D di un sito. Esso comporta l'assunzione che i corpi geologici considerati presentino una geometria piano parallela, il che può essere assunta come una semplificazione accettabile per un intorno di estensione abbastanza ridotta, come quello qui considerato. Per poter giungere ad una corretta risoluzione dell'analisi lineare equivalente, la procedura di calcolo svolge una sequenza di analisi lineari, aggiornando i valori di G e D nel dominio temporale in funzione di g , effettuando una serie di iterazioni che conducono ad una convergenza finale, con un errore di tolleranza minore di quello prescritto in fase di input.

Per il caso di studio, si è considerato l'intervallo di frequenze 0-20 Hz, mentre la deformazione equivalente utilizzata per l'aggiornamento dei parametri dinamici, è stata assunta pari a 0.50, ipotizzando un sisma di magnitudo 6. In una prima fase, si è effettuata un'analisi lineare per la calibrare il modello di sottosuolo e per confermare la profondità del tetto del bedrock sismico. In questa fase, si sono confrontate la funzione di trasferimento ottenuta dall'analisi lineare monodimensionale con quella ottenuta dalla misura del rumore reale più prossima, caratterizzata da una frequenza fondamentale di 4.11 Hz. Una volta calibrato il modello di sottosuolo ideale, si è passati all'analisi lineare equivalente, utilizzando i parametri sintetizzati in Tab. 1. L'input

sismico è stato fornito dal Centro MS per le attività di Microzonazione Sismica di III livello. Per il Comune di Pietracamela sono stati selezionati sette accelerogrammi naturali su roccia spettrocompatibili per un tempo di ritorno di 475 anni.

Una volta conclusa l'analisi equivalente lineare e noti gli spettri di risposta per ogni punto, l'amplificazione sismica è stata quantificata attraverso il calcolo del fattore di amplificazione FA , rapporto tra l'integrale dello spettro di pseudo-accelerazione di output PSA_{out} per tre differenti intervalli temporali di integrazione (0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s e 0.7-1.1 s) e i corrispondenti parametri di input:

$$FA = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{in}(T)dT} \tag{1}$$

$$FA = \frac{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0.1}^{0.8} PSA_{in}(T)dT} \tag{2}$$

$$FA = \frac{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{in}(T)dT} \tag{3}$$

Nell'analisi si è considerata l'amplificazione topografica, calcolata utilizzando la formula di Paolucci *et al.* (2002). Per il sito di Pietracamela il periodo corrisponde a 0.3 s. Esso è stato messo in relazione con la lunghezza totale della base del pendio alle V_s medie, attribuite ai sismostrati presenti in profondità fino alla base del pendio stesso. Conoscendo il rapporto tra l'altezza del pendio e la sua semi-lunghezza, tramite l'abaco elaborato da Pagliaroli *et al.* (2007), è stato individuato il valore dell'influenza topografica, stimato pari ad 1.4.

I risultati delle analisi di risposta sismica sono illustrati in Fig. 2 come spettri di risposta in accelerazione in funzione del periodo per uno smorzamento tipico del 5%. La figura riporta inoltre la media degli spettri di input (in nero) e di output (in blu). Risulta evidente come gli spettri di risposta ottenuti mostrino un'amplificazione significativa rispetto a quelli di input.

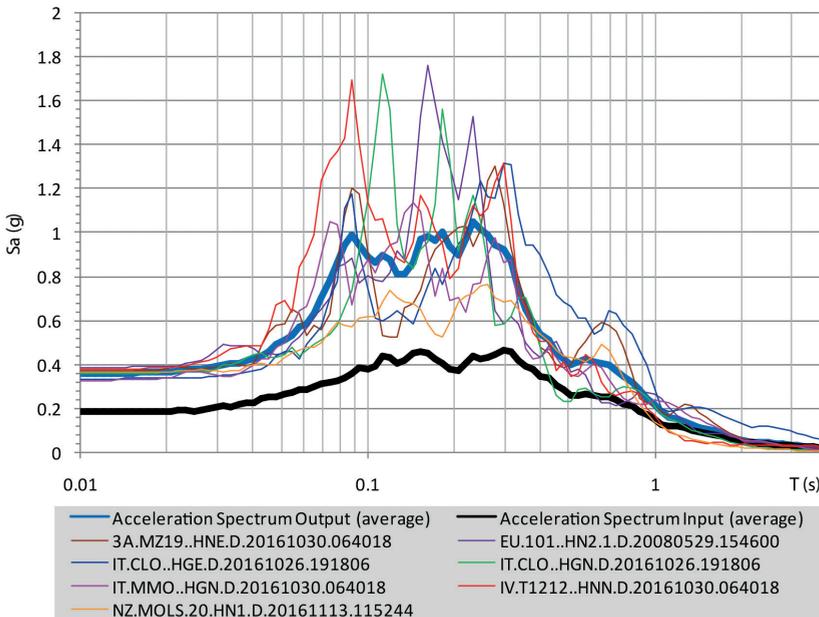


Fig. 2 - Spettri di risposta in superficie per i sette accelerogrammi e il loro spettro medio.

Tramite le formule (1), (2) e (3) e il fattore di amplificazione topografico si è calcolato il fattore di amplificazione relative alla media dei sette accelerogrammi utilizzati (Tab. 2). I valori di FA confermano che il fenomeno di amplificazione in superficie rispetto al moto alla base è assai significativo.

Tab. 2 - Media dei valori dei Fattori di Amplificazione per ogni range di periodo.

FA 0.1-0.5 s	FA 0.4-0.8 s	FA 0.7-1.1 s
1.67	1.14	1.07

Bibliografia

- Gruppo di Lavoro INGV sul terremoto in centro Italia (2016). *Rapporto di sintesi sul Terremoto in centro Italia Mw 6.5 del 30 ottobre 2016*, doi: 10.5281/zenodo.166019 https://ingvterremoti.files.wordpress.com/2016/11/ita20161110_rapporto_centroitalia_def.pdf.
- Kottke A.R., Rathje E.M.; 2008: *Technical manual for Strata*, University of California, Berkeley.
- Pagliaroli A., Lanzo G., D'Elia B., Costanzo A., Silvestri F.; 2007: *Topographic amplification factors associated to cliff morphology: numerical results from two case studies in Southern Italy and comparison with EC8 recommendations*. XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Workshop on geotechnical aspect of EC8, Madrid (Spain), September 25, 2007, CD-ROM, 10 pp.
- Paolucci R.; 2002: *Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31: pp. 1831-1853.
- Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., Daily III W.D.; 1998: *Shear modulus and damping relationships for gravels*. J Geotech. and Geoenv. Engineering 124, pp.396-405.