

## VALUTAZIONE DEI FENOMENI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA IN UNA VALLE ALPINA DEL TRENTO: IL CASO STUDIO DI CANAZEI

M. Compagnoni <sup>(1)</sup>, G. Di Capua <sup>(2)</sup>, A. Franceschini <sup>(3)</sup>, G. Milana <sup>(2)</sup>, F. Pergalani <sup>(1)</sup>, A. Viganò <sup>(4)</sup>,

<sup>(1)</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano

<sup>(2)</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma

<sup>(3)</sup> Dipartimento di Protezione Civile, Provincia Autonoma di Trento

<sup>(4)</sup> Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, CRS, Udine

**Premessa.** Lo scopo del lavoro è lo studio di microzonazione sismica di livello 3 (ICMS, 2008) dell'abitato di Canazei, finalizzato alla definizione dei diversi fattori di amplificazione del moto sismico e degli spettri di risposta elastici in accelerazione in superficie, tali da consentire una delimitazione delle aree a comportamento sismico omogeneo e fornire le conoscenze necessarie alla pianificazione urbanistica locale ed alla corretta progettazione degli interventi edilizi, in accordo con le Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al DM 14-01-2008 (NTC, 2008).

L'area d'indagine è rappresentata dal fondovalle che comprende l'abitato di Canazei e le sue frazioni principali (Alba e Penia), per la quale è disponibile la Carta della Microzonazione Sismica Livello 1, basata sul modello geologico definito a scala 1:10000 dal Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento, che prevede la presenza di depositi alluvionali di natura ghiaiosa da mediamente grossolani a grossolani, con la presenza di locali trovanti.

**Indagini e caratterizzazione geofisica del sottosuolo.** Per la caratterizzazione geofisica dell'area di indagine sono state scelte indagini di tipo speditivo, comuni nella pratica professionale, quali n. 35 indagini HVSR per la definizione delle frequenze di risonanza, n. 21 indagini MASW combinate con indagini HVSR per la caratterizzazione del profilo di rigidità del sottosuolo, n. 1 indagine di tomografia elettrica (ERT) per la verifica della geometria del sottosuolo e n. 1 indagine di sismica in foro tipo Down-hole (DH) per la verifica del modello geofisico. Le indagini sono state concentrate lungo 6 sezioni trasversali alla valle, ritenute significative e rappresentative del suo assetto morfologico.

In Fig. 1 sono riportate le ubicazioni di tutte le indagini, ove con i pallini rossi sono indicate le indagini combinate HVSR-MASW, con i pallini gialli le misure di rumore ambientale HVSR, con il pallino verde l'indagine DH, con la linea rossa la traccia dell'indagine ERT e con le linee azzurre le tracce delle sezioni esaminate.

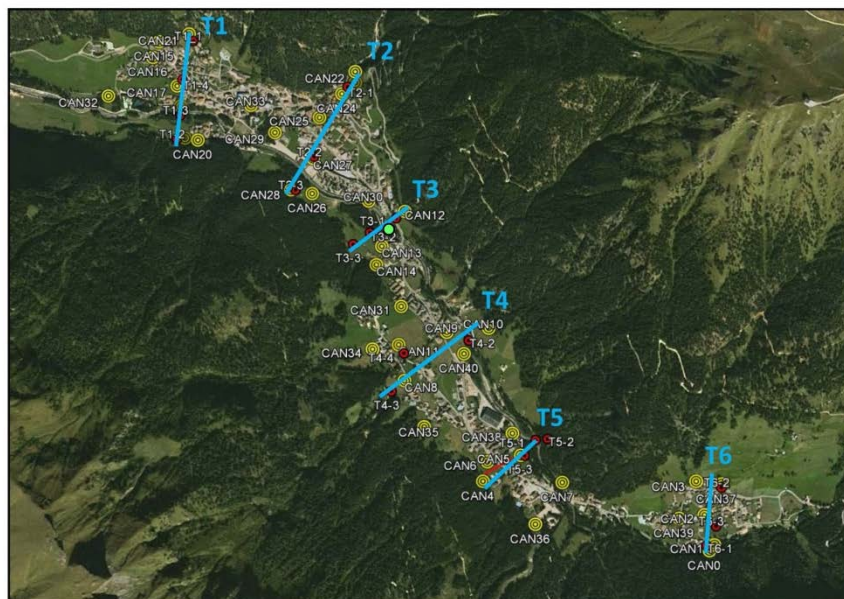


Fig. 1: Ubicazione dei punti di indagine eseguite lungo la valle del Torrente Avisio

Le registrazioni acquisite in corrispondenza dei 35 siti di misura sono state selezionate ed elaborate, al fine di ottenere la funzione stazione rappresentativa: essa è rappresentata dai rapporti spettrali H/V degli spettri di Fourier relativi alle componenti orizzontali (H) e verticali (V) del rumore acquisito. I risultati ottenuti mostrano le seguenti caratteristiche generali:

- numerose stazioni posizionate ai bordi della vallata hanno evidenziato picchi della curva H/V nell'intervallo di frequenze 10-20 Hz, con ampiezze comprese tra 3 e 6. Queste frequenze sono imputabili a contrasti di impedenza piuttosto superficiali (entro pochi metri dal p.c.) tra la copertura del versante ed un substrato più rigido, che in molti casi, è stato possibile ipotizzare costituito dalla stessa roccia che affiora sui versanti molto acclivi che bordano la vallata;
- in circa 2/3 delle curve H/V si evidenzia un doppio picco di amplificazione nell'intervallo di frequenze tra 1 Hz e 10 Hz, con pochi casi in cui è presente anche un terzo picco. In linea generale, si presenta una prima frequenza con valori che variano nell'intervallo 2,5 Hz – 5,5 Hz ed una seconda (ed eventualmente terza) frequenza compresa nell'intervallo 6,0 Hz – 9 Hz, con ampiezze che variano tra 3 e 7. Queste frequenze sono imputabili a due/tre contrasti di impedenza esistenti nel sottosuolo, tra la superficie e il substrato rigido;
- in numerosi punti di misura, i risultati hanno mostrato curve H/V amplificate in bassa frequenza (< 1 Hz). Potendosi escludere cause legate all'installazione strumentale o al cattivo funzionamento dei sensori e/o della cavetteria di collegamento con la stazione di registrazione, le basse frequenze potrebbero essere dovute a varie cause, tra le quali quella legata all'intenso rumore di natura antropica, anche eterogeneamente diffuso, presente nell'area durante le acquisizioni. In ogni caso, le basse frequenze riscontrate non sono di interesse ingegneristico per la microzonazione sismica, a causa delle caratteristiche tipologico-strutturali delle costruzioni presenti nell'area esaminata.

I risultati delle indagini, espressi in termini di spessori e velocità delle onde di taglio  $V_s$  di ciascun sismo-strato individuato nel sottosuolo, sono stati tra loro assemblati, al fine di ricostruire sezioni trasversali alla valle, lungo le quali definire il modello geofisico e predisporre le simulazioni numeriche per la valutazione degli effetti sismici di sito.

Il modello geofisico del sottosuolo, ritenuto valido nell'ambito dell'intero tratto di valle esaminata, prevede una sequenza sismo-stratigrafica costituita da 3 diverse unità geofisiche (U1, U2 e U3), con un aumento di rigidità con la profondità; l'unità geofisica più superficiale, data la forte eterogeneità presente, è stata suddivisa in due sotto-unità (U1a e U1b).

A ciascuna unità geofisica così individuata sono stati assegnati, come valori della velocità delle onde di taglio  $V_s$ , i valori ottenuti dalla media dei valori sperimentali derivati dalle indagini, stimando i valori del peso di volume e del coefficiente di Poisson.

Per quanto riguarda le curve dell'andamento del modulo di taglio normalizzato ( $G/G_0$ ) e del rapporto di smorzamento ( $D$ ) con la deformazione tangenziale ( $\gamma$ ), in assenza di dati sperimentali e in considerazione della natura granulare prevalentemente grossolana dei materiali presenti nel sottosuolo della valle esaminata, si è fatto riferimento a dati disponibili in letteratura e riferiti ad alluvioni ghiaiose italiane (SSN, 2004) e a depositi ghiaiosi generici statunitensi (Rollins et alii, 1998); tali dati sono considerati, in ambito scientifico nazionale, di comprovata validità per materiali prevalentemente ghiaiosi.

In Tab. 1 sono riportati i parametri geofisici adottati per ciascuna unità geofisica nell'ambito delle 6 sezioni trasversali esaminate; sono riportati i valori del peso di volume ( $\gamma$ ), del coefficiente di Poisson ( $\nu$ ), del rapporto di smorzamento interno ( $D_0$ ) e della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ):

UNITA' GEOFISICA	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (-)	$D_0$ (%)	$V_s$ (m/s)					
				Sezione 1	Sezione 2	Sezione 3	Sezione 4	Sezione 5	Sezione 6
U1a	18.5	0.40	0.010	200					
U1b	19.0	0.40	0.010	270	260	290	310	250	300
U2	20.0	0.45	0.010	470	410	490	510	440	520
U3	22.0	0.40	0.007	780	670	720	740	680	-
Substrato rigido	24.0	0.37	0.005	1000	930	1200	1000	940	800

Tab. 1 – Parametri costituenti il modello geofisico del tratto di Valle del T. Avisio analizzato

**Definizione del moto sismico di input.** Al fine di effettuare le modellazioni numeriche per la valutazione degli effetti sismici di sito si è reso necessario avere a disposizione accelerogrammi e spettri di risposta in accelerazione, da utilizzare come inputs sismici nella modellazione stessa. In questo lavoro sono stati utilizzati accelerogrammi registrati opportunamente selezionati e scalati, così come prescritto dalla normativa vigente. Per ottenere questi risultati ci si è basati sui dati relativi alla mappa di pericolosità sismica nazionale (GdL, 2004), nei quali sono riportati, per diversi periodi di ritorno, i valori di accelerazione massima attesa ( $a_{max}$ ) e delle ordinate spettrali degli spettri di risposta in accelerazione al 5% dello smorzamento critico su una griglia regolare. Il tempo di ritorno considerato è stato quello di 475 anni, in quanto valore convenzionalmente utilizzato per studi di pericolosità.

Per il Comune di Canazei si sono scelti i 4 punti della griglia di riferimento che racchiudono il punto di ubicazione secondo l'ISTAT del comune e calcolate le relative distanze: il valore di  $a_{max}$  assegnato al Comune è stato ottenuto come media ponderata, con l'inverso della distanza, dei valori assegnati ai quattro punti della griglia (Tab. 2):

Valori di $a_{max}$ (g) – Comune di Canazei				
ID 7857	ID 7858	ID 8079	ID 8080	Media Ponderata
0.0626	0.0654	0.0664	0.0695	<b>0.066</b>

Tab. 2- Valori di  $a_{max}$  assegnati ai 4 punti della griglia di riferimento e valore medio ponderato

Per la scelta degli accelerogrammi registrati si è fatto riferimento alla Banca dati ITACA (Pacor et alii, 2011): per la selezione delle 5 storie accelerometriche utilizzate nelle analisi numeriche è stato seguito quanto previsto dalla normativa vigente ed in particolare la scelta effettuata si è basata sulla coerenza in termini di sismicità storica di Canazei e caratteristiche sismogenetiche della sorgente; coppia magnitudo-distanza dalla sorgente; massima accelerazione orizzontale attesa (0.066 g); registrazioni effettuate su substrato rigido o bedrock sismico. Le registrazioni scelte sono state oggetto di scalatura, al fine di rendere spettro-compatibile la media dei relativi spettri di risposta con lo spettro di risposta previsto dalla normativa per il Comune di Canazei e per sottosuolo di categoria A.

In Tab. 3 sono riportate le principali caratteristiche delle 5 registrazioni selezionate, inerenti il nome e la sigla della stazione di registrazione, il nome, la magnitudo momento e il regime tettonico dell'evento registrato, la distanza della stazione dall'epicentro dell'evento, la componente del moto, la litologia su cui è posta la stazione e il valore del picco di accelerazione registrato.

Stazione	Sigla	Evento	Mw	Regime tettonico	Distanza Epicentrale (km)	Comp.	Litologia	pga (g)
S. Rocco	SRC0	FRIULI 2° shock	5.6	Faglia inversa	25.9	W-E	Roccia	0.095
S. Rocco	SRC0	FRIULI 4° shock	5.9	Faglia inversa	16.4	N-S	Roccia	0.131
Giarre	GRR	GOLFO DI PATTI	6.0	Faglia trascorrente	60.3	N-S	Roccia	0.029
Giarre	GRR	GOLFO DI PATTI	6.0	Faglia trascorrente	60.3	W-E	Roccia	0.020
S. Leonardo V.P.	SLP	MASSICCO ORTLES	4.8	Faglia trascorrente	18.7	W-E	Roccia	0.062

Tab. 3 – Principali caratteristiche delle registrazioni selezionate

Nonostante i dati di disaggregazione della pericolosità sismica forniscano indicazioni sulla distanza degli eventi dell'ordine dei 50-60 km, si sono scelte anche registrazioni con distanze epicentrali inferiori, dell'ordine dei 15-25 km, in quanto rappresentative degli eventi oggetto di maggior risentimento al sito.

**Modellazione numerica.** In relazione alle caratteristiche morfologiche, geologiche, geotecniche e geofisiche del tratto di valle del T. Avisio esaminato, prevedendo la presenza contemporanea di fenomeni di amplificazione sismica di tipo stratigrafico e geometrico (geometria sepolta tipo valle) è stato scelto di utilizzare un codice di calcolo bidimensionale ed in particolare il programma QUAD 4v\_p, nato dalla revisione del programma QUAD4M (Hudson et alii, 1993); esso permette di modellare qualsiasi sezione caratterizzata da diversi materiali con qualsiasi andamento geometrico, utilizza il metodo degli elementi finiti in stato di deformazione piana (FEM) e discretizzando il dominio del continuo in un sistema equivalente di sottodomini più piccoli (mesh). Il moto di input è rappresentato sotto forma di storia temporale dell'accelerazione ed è applicato simultaneamente a tutti i nodi della frontiera considerata come substrato deformabile (compliant base).

Le analisi numeriche sono state effettuate in punti scelti in modo da avere una rappresentatività dei profili caratterizzati da diverse sequenze di unità geofisiche e diversi spessori. I risultati, finalizzati alla valutazione delle amplificazioni attese, sono stati espressi in termini sia di fattori di amplificazione  $F_a$  (Pergalani et alii, 1999), sia in termini di spettri di risposta elastici in pseudo-accellerazione al 5% dello smorzamento critico. Dagli spettri elastici in pseudo-velocità al 5% dello smorzamento critico (PSV) è stata calcolata l'intensità spettrale (SI) negli intervalli di periodo:

0.1-0.5 s : assunto come rappresentativo di edifici con strutture particolarmente rigide e sviluppo verticale indicativamente fino a 5 piani

0.5-1.5 s : assunto come rappresentativo del periodo proprio di edifici con strutture flessibili e sviluppo verticale indicativamente compreso tra i 5 e i 15 piani

0.1-2.5 s : così come definito da Housner

Il fattore di amplificazione  $F_a$  è stato definito come il rapporto tra le intensità spettrali calcolate sugli spettri di risposta in pseudo-velocità al 5% dello smorzamento critico del moto in superficie e del moto di input, calcolati per i diversi intervalli di periodo ( $F_{a,0.1-0.5}$  -  $F_{a,0.5-1.5}$  -  $F_{a,0.1-2.5}$ ).

Le modellazioni sono state eseguite applicando i 5 accelerogrammi di input a ciascuna sezione di analisi, calcolando i relativi spettri di risposta in pseudo-accellerazione al 5% dello smorzamento critico: i valori spettrali così ottenuti sono stati tra loro mediati, calcolando uno spettro di risposta elastico medio per ciascun punto di analisi. Gli spettri di risposta medi in pseudo-accellerazione ottenuti per ogni punto di analisi sono stati confrontati con lo spettro di risposta di normativa corrispondente alla categoria di sottosuolo a cui appartiene la colonna stratigrafica analizzata (individuata tramite definizione del parametro  $V_{S30}$ ).

Per poter effettuare questo confronto gli spettri di risposta calcolati sono stati adattati alla forma definita dalla normativa, la quale prevede 3 diversi tratti di curva rispettivamente ad accelerazione,

velocità e spostamento costante, utilizzando la procedura prevista negli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (ICMS, 2008).

In Fig. 2, a titolo esemplificativo, è riportata per la sezione 2 passante per l'abitato di Canazei la traccia della sezione e la sezione con l'indicazione dei punti analizzati; la mesh di analisi; la tabella dei valori dei fattori di amplificazione medi per ciascun punto di analisi; i grafici, per ogni punto analizzato, degli spettri elastici di risposta in pseudo-accelerazione di output medi al 5% dello smorzamento critico, calcolati utilizzando i 5 accelerogrammi scelti, lo spettro di input medio e lo spettro di risposta elastico prescritto dalla normativa vigente per Canazei, con riferimento alla relativa categoria di sottosuolo; i grafici, per ogni punto analizzato, degli spettri elastici di risposta in pseudo-accelerazione di output medi adattati, mediante la procedura proposta negli ICMS, per agevolarne il confronto con lo spettro di risposta elastico prescritto dalla normativa vigente per Canazei, con riferimento alla relativa categoria di sottosuolo.

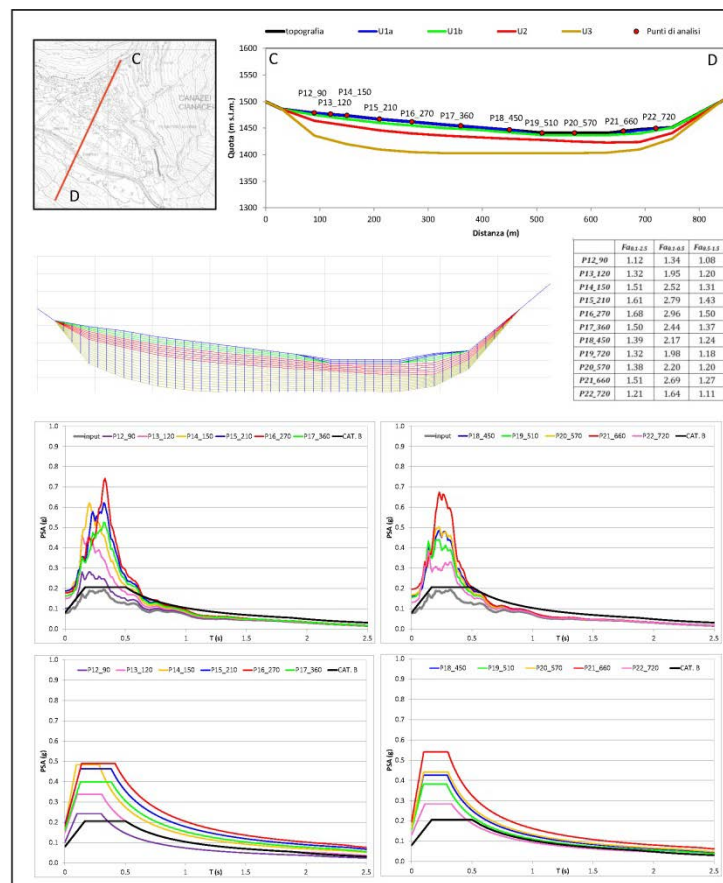


Fig. 2: Esempio di risultati ottenuti per la sezione 2 di analisi

Per completare l'indagine numerica, in alcuni punti di analisi ritenuti più significativi di ogni sezione, è stata condotta un'analisi monodimensionale, finalizzata alla valutazione dell'influenza, sui risultati, della geometria della valle analizzata, applicando il codice di calcolo SHAKE\_s nato dalla revisione di SHAKE91 (Idriss e Sun, 1992). Lungo ciascuna sezione sono stati scelti alcuni punti di analisi, ubicati al bordo e al centro della valle, tali da evidenziare le eventuali differenze esistenti tra l'effetto di amplificazione lito-stratigrafica 1D con l'effetto combinato di amplificazione lito-stratigrafica e di geometria sepolta 2D.

I confronti mostrano in termini di fattori di amplificazione un aumento del valore di  $F_{a_{0.1-0.5}}$  nel caso della modellazione 2D dell'ordine del 20-40% in corrispondenza del centro della valle e di meno del 5% in corrispondenza dei bordi della stessa, ad esclusione di alcuni casi localizzati, legati alla particolare forma di chiusura; il valore di  $F_{a_{0.5-1.5}}$  tende a restare invariato in corrispondenza dei bordi della valle e ad aumentare del 5-15% in corrispondenza del centro valle. In termini di forme spettrali si evidenzia come le geometrie di chiusura della valle tendano a spostare le amplificazioni verso periodi più bassi e ad incrementarle localmente nell'intervallo di periodo compreso tra 0.1 e 0.2 s, mentre la geometria della valle, nel suo complesso, tenda ad aumentare l'amplificazione in tutto l'intervallo di periodo compreso tra 0.1 e 0.5 s, mentre per periodi superiori a 0.5 s le risposte monodimensionale e bidimensionale tendano a coincidere.

Si è evidenziato, infatti, come la risposta sismica del tratto di Valle del T. Avisio esaminato sia concentrata prevalentemente nei bassi periodi e come il contributo amplificativo legato all'effetto lito-stratigrafico sia prevalente rispetto a quello legato all'effetto di geometria sepolta.

I risultati del confronto tra modellazioni 1D e 2D permettono inoltre di verificare la validità delle formule semplificate utilizzate per la definizione del coefficiente di forma C (ICMS, 2008), in grado di discriminare le valli strette ( $C > 0.25$ ), per le quali si prevede un forte contributo degli effetti bidimensionali legati alla geometria di valle, dalle valli larghe ( $C < 0.25$ ), per le quali tali effetti possono considerarsi trascurabili; il coefficiente di forma è definito sulla base dei soli caratteri morfologici, ovvero dal rapporto tra lo spessore massimo della coltre di riempimento delle valli (h) e la semilarghezza (l) della stessa. Tale valore, calcolato lungo ciascuna sezione di analisi, varia tra un minimo di 0.14 e un massimo di 0.30 (sezione n. 3), che confrontati il valore di soglia di 0.25, mostrano come la valle esaminata nel tratto di monte presenti una conformazione sostanzialmente larga, passante a stretta, muovendosi verso quote inferiori, situazione in linea generale confermata dai risultati delle modellazioni.

**Sintesi dei risultati.** I risultati delle simulazioni numeriche mostrano in generale la presenza di fenomeni di amplificazione sismica di tipo lito-stratigrafico e geometrico in corrispondenza del tratto analizzato all'interno della Valle del T. Avisio, con valori da alti a molto alti nell'intervallo di periodo di vibrazione compreso tra 0.1 e 0.5 s e da medio-bassi a bassi nell'intervallo di periodo di vibrazione compreso tra 0.5 e 1.5 s; le simulazioni numeriche hanno evidenziato in generale un livello di deformazione finale dei materiali dell'ordine di 0.02-0.03%, con valori massimi dell'ordine dei 0.06-0.07%, ovvero all'interno del campo elastico non lineare, confermando la validità del codice numerico utilizzato.

I confronti eseguiti tra gli spettri di risposta elastici prescritti dalla normativa vigente e gli spettri di output ottenuti dalle analisi numeriche bidimensionali FEM mostrano una generale incongruenza, in quanto le amplificazioni attese nell'area superano quanto fissato dalla procedura semplificata contenuta nella normativa italiana mediante l'uso delle categorie di sottosuolo.

Per quanto riguarda la rappresentazione cartografica dei risultati in termini di fattori di amplificazione calcolati negli intervalli di periodo 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s nell'ambito della Valle del T. Avisio si è operato individuando il perimetro dell'area analizzata, sulla base dell'estensione delle tracce delle

sezioni esaminate, ed ubicando i punti di analisi lungo ciascuna sezione, distinti in funzione del valore di  $Fa_{0.1-0.5}$ , valore ritenuto più significativo ai fini delle operazioni di estrapolazione areale dei dati puntuali. In base alla distribuzione dei punti di analisi e dei risultati in termini di  $Fa_{0.1-0.5}$  è stata eseguita l'extrapolazione areale dei risultati puntuali, seguendo come criterio guida il modello geologico, trascurando le singolarità. Sulla base delle estrapolazioni areali eseguite sono state individuate 8 zone omogenee dal punto di vista delle amplificazioni sismiche, alle quali corrispondono gradi di amplificazione diversi e in particolare aree stabili non soggette a fenomeni di amplificazione sismica (zona 1), aree caratterizzate da fenomeni di amplificazione sismica bassi (zona 2), medio-bassi (zona 3), medi (zona 4), medio-alti (zona 5), alti (zona 6), molto alti (zona 7) ed estremamente alti (zona 8). La carta riportata in Fig. 3 mostra le 8 zone omogenee alle quali è associato lo spettro di risposta più cautelativo ottenuto dalle analisi numeriche.

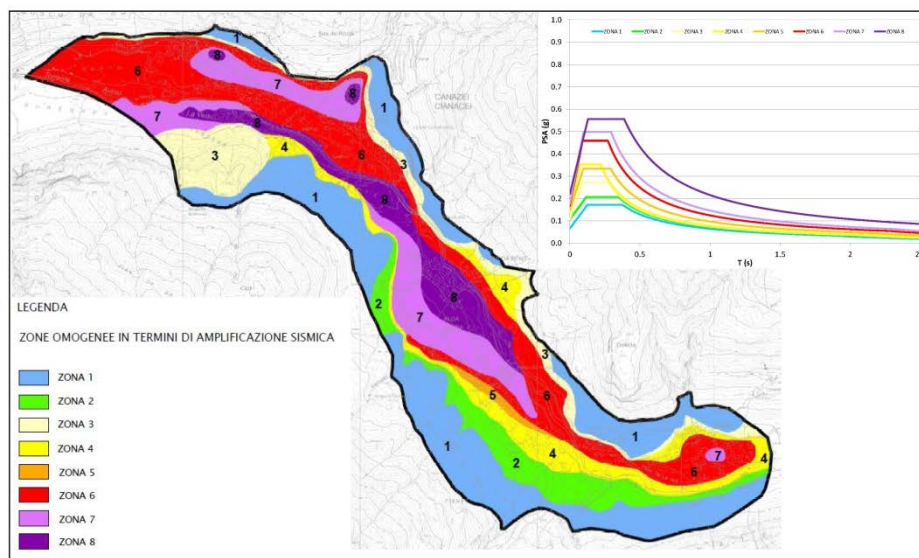


Fig. 3: Carta delle zone omogenee con indicazione degli spettri di risposta ad esse associati

**Utilizzo dei risultati.** Il presente studio ha fornito come prodotti finali le mappe dei fattori di amplificazione considerando due diversi intervalli di periodo di vibrazione, che potranno essere utilizzate in ambito urbanistico e di pianificazione, al fine di definire possibili graduatorie in termini di amplificazioni sismiche e allocare in modo ottimale le future destinazioni d'uso del territorio.

La mappa delle zone omogenee potrà essere utilizzata in fase di progettazione, considerando lo spettro di risposta elastico associato a ciascuna zona, previa verifica della corrispondenza in termini di caratteristiche geologiche e geofisiche, da confrontare con lo spettro proposto dalla normativa vigente, per una migliore valutazione della sicurezza in fase di progettazione.

In corrispondenza dei singoli punti di analisi (n. 62) si potrà fare riferimento al corrispondente spettro di risposta ottenuto dalle analisi numeriche, in qualità di risultati di analisi di risposta sismica locale come definito dalla normativa vigente.



**Bibliografia**

- GdL MPS; 2004: Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapp. conclusivo per il DPC, INGV, Milano-Roma, pp 65 + 5 appendici.
- Hudson MB., Idriss IM., Beikae M.; 1993: QUAD4M, A computer program for evaluating the seismic response of soil structure by variable damping finite element procedures. Report of Dept. of Civil & Env. Eng., Univ. of California, Davis.
- ICMS; 2008: Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, Italy, 3 vol. and Dvd.
- Idriss IM., Sun J.I.; 1992: User's manual for SHAKE91, A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. Report of Dip. of Civil & Environmental Eng., University of California, Davis.
- NTC; 2008: Norme Tecniche per le Costruzioni, DM 14 gennaio 2008, Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma ([www.cslp.it](http://www.cslp.it))
- Pacor F., Paolucci R., Luzi L., Sabetta F., Spinelli A., Gorini A., Nicoletti M., Marcucci S., Filippi L., 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.
- Pergalani F., Romeo R., Luzi L., Petrini V., Pugliese A., Sanò T.; 1999: Seismic microzonation of the area struck by Umbria-Marche (central Italy) Ms 5.9 earthquake of the 26 september 1997, Soil Dyn. Earthq. Eng., vol. 18, 4, pp. 279-296.
- Rollins KM., Evans MD., Diehl NB., Daily III WD.; 1998: Shear modulus and damping relationship for gravels, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 124 n. 5, pp. 396-405.
- SSN; 2004: Banca dati delle curve di degrado del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento – Servizio Sismico Nazionale – CD.