



Attuazione DGRV n.1572/2013

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO PER LA “VARIANTE AL PUA N. 25” – ZTO C1/95

Relazione Illustrativa

Regione Veneto
Comune di Silea (TV)

Regione del Veneto	Soggetto realizzatore Dott. Geol. Enrico Farinatti  	LUGLIO 2023
--------------------	--	-------------

Sommario

1. INTRODUZIONE.....	3
2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITA' DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	4
2.1 Classificazione sismica del territorio comunale	4
2.2 Zonazione sismogenetica	6
2.3 Definizione della pericolosità di base.....	8
2.4 Analisi storica	10
2.4.1 Sismogenetica e correlazioni con le strutture	11
2.5 Faglie attive e faglie capaci.....	13
3. INDAGINI	15
3.2 Cenni sulle misure di sismica superficiale con le metodologie Masw e Re.Mi combinate	16
3.3 Cenni sulle misure tomografiche elettriche (ERT).....	18
3.4.1 Analisi delle risultanze.....	21
4. MICROZONAZIONE SISMICA	27
4.1 Introduzione	27
5. MODELLAZIONE NUMERICA DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE DI TERZO LIVELLO	28
5.1 Premessa	28
5.2 Modellazione sismica	29
5.2.1 Determinazione dell'accelerazione massima di riferimento	29
5.2.2 Determinazione Scelta progettuale.....	29
5.2.3 Analisi di disaggregazione.....	29
5.2.4 Estrazione Input Sismici	30
5.2.5 Modello sismostratigrafico.....	31
5.2.6 Analisi.....	33
5.2.7 Verifica alla liquefazione.....	37
6. CONCLUSIONI FINALI	41

ALLEGATI:

- Allegato 1 – Ubicazione indagini e modello geofisico-stratigrafico
- Allegato 2 - Curve di decadimento materiali
- Allegato 3 - Accelerogrammi di input (SLV)
- Allegato 4 - Accelerogrammi di output (SLV)
- Allegato 5 – Spettri di Output
- Allegato 6 - Spettri in formato digitale
- Allegato 7 – Carta della MS III Livello
- Allegato 8 – Carta delle Indagini
- Allegato 9 – Verifica a liquefazione

1. INTRODUZIONE

Lo scrivente, su incarico del Geom. Rino Guzzo e per conto di Seven Investimenti srl, ha redatto il seguente lavoro in risposta alla richiesta del Comune di Silea (comunicazione del 06/06/23, secondo cui l'ambito del PUA ricade *"in zone suscettibili di instabilità" della microzonazione sismica, per le quali è necessario un approfondimento di III livello*).

In particolare lo studio di microzonazione sismica di primo livello, colloca l'ambito in oggetto all'interno di un'area a rischio di liquefazione.

Nella Deliberazione della Giunta Regionale n. 1572 del 03/09/2013 che titola: "Definizione di una metodologia teorica e sperimentale per l'analisi sismica locale a supporto della pianificazione. Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica (DGR 71/2008, DGR 2877/2008 e D. lgs. 163/2006 e abrogazione DGR n. 3308/08)" sono appunto riportate le Linee Guida Regionali per la redazione degli studi di microzonazione sismica, durante le fasi di progettazione degli strumenti urbanistici. Le linee guida costituiscono una direttiva alla quale attenersi per la riduzione del rischio sismico (RS), che può così essere definito:

$$RS = \text{Pericolosità sismica} \times \text{Esposizione urbanistica} \times \text{Vulnerabilità dei centri urbani e delle opere}$$

Lo scopo primario di uno Studio di Microzonazione Sismica è quello di fornire dei criteri per l'individuazione delle aree soggette ad effetti di amplificazione locale ed instabilità in caso di terremoto in maniera da orientare le scelte, nella fase di progettazione urbanistica, verso aree a minore pericolosità sismica.

Secondo la DGR1572/2013, uno studio di Microzonazione Sismica, prevede tre livelli di approfondimento:

1°LIVELLO: si applica in sede di P.A.T., consente di delineare gli scenari della pericolosità sismica ed identifica, nella carta delle MOPS, le parti del territorio comunale suscettibili di effetti sismici locali: amplificazione del moto sismico, cedimenti, instabilità dei versanti,

liquefazione, rottura del terreno, ecc.;

2°LIVELLO: si applica in sede di P.I. a tutte le parti del territorio suscettibili di amplificazione sismica individuati nella precedente fase e per le quali si prevedono trasformazioni urbanistiche del territorio che comportano un incremento dei carichi urbanistici/insediativi e per il territorio compreso nel perimetro del “centro abitato” così come previsti dalla normativa vigente;

3°LIVELLO: si applica in sede di P.I. per le scelte di trasformazione urbanistica nelle aree con particolari criticità geologiche, geomorfologiche e geotecniche ed inoltre nelle aree in cui è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico.

Essendo il Comune di Silea provvisto di uno Studio di Microzonazione Sismica, redatto dallo Studio Mastella ed approvato dall'Amministrazione Comunale, per quanto riguarda le considerazioni sulla pericolosità sismica e l'inquadramento geologico, si rimanda a tale studio.

Nello specifico, essendo il sedime corrispondente alla lottizzazione in oggetto, classificato dal primo livello di approfondimento come “Zona di attenzione per liquefazione”, si è proceduto con il presente terzo livello di approfondimento.

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITA' DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Classificazione sismica del territorio comunale

Con l'entrata in vigore l'8/5/2003 della OPCM n. 3274, il territorio italiano è stato suddiviso in quattro zone sismiche; con l'introduzione della quarta zona sismica, tutto il territorio nazionale viene definito come sismico. Il Consiglio Regionale del Veneto, con delibera n. 67 del 3/12/2003, ha fatto proprio e approvato il nuovo elenco dei comuni sismici del Veneto e il Comune di Silea è stato classificato in Zona Sismica 3 cioè in questa zona possono verificarsi raramente forti terremoti.

Con l'OPCM n. 3519 del 28.04.2006 e il DGRV n. 71/2008, viene approvata la nuova “Mappa di pericolosità sismica del territorio Nazionale” espressa in termini di accelerazione massima al suolo (a_g max) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni)

riferita a suoli rigidi ($V_s > 800 \text{m/sec}$). Il valore di a_g , per il Comune di Silea, come si può vedere dalla fig.1, varia da 0.100g a 0.150g.

Infine, con il DGRV n. 244 del 09/03/2021 che approva l'aggiornamento dell'elenco delle zone sismiche del Veneto, il Comune di Silea rimane in zona sismica 3 (medio-bassa sismicità).

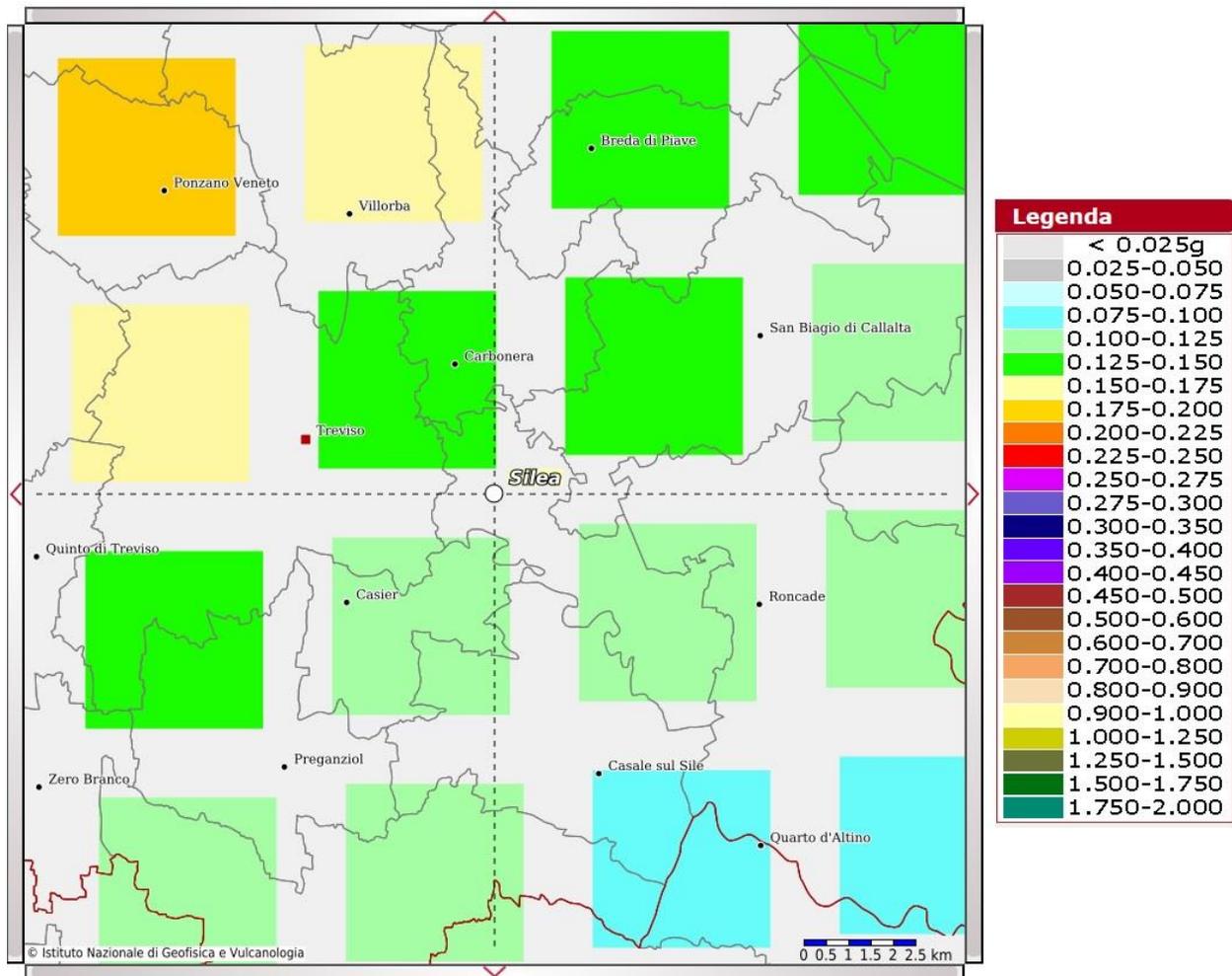


Fig.1 Mappa della pericolosità sismica dell'area –I quadrati indicano il nodo con espressi i valori di accelerazione (Fonte–Mappe interattive dell'Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia - <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>)

Come mostrato in fig.1, la zona in studio coincide con il nodo sismico n.11638, le cui caratteristiche di accelerazione a_g , sono indicate nella tabella di fig.2.

Valori di accelerazione per frequenze annuali di eccedenza			
Frequenza annuale di ecc.	PGA (g)		
	16° percentile	50° percentile	84° percentile
0.0004	0.237	0.259	0.326
0.0010	0.165	0.185	0.230
0.0021	0.123	0.140	0.170
0.0050	0.087	0.096	0.113
0.0071	0.074	0.083	0.093
0.0099	0.062	0.072	0.077
0.0139	0.053	0.062	0.065
0.0199	0.045	0.051	0.054
0.0332	0.035	0.038	0.041

Fig.2 Valori di accelerazione al suolo per i nodi indicati nella mappa e ricadenti nella zona in studio. (Fonte–Mappe interattive dell’Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia–<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>)

I valori indicati dovranno essere utilizzati nelle nuove progettazioni ai sensi della normativa vigente.

2.2 Zonazione sismogenetica

In ottemperanza all’OPCM 3274/03, l’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (di seguito denominato INGV) ha realizzato una nuova zonazione sismogenetica del territorio italiano, chiamata ZS9. Il Veneto centro-orientale ricade all’interno della zona 905 che comprende la fascia pedemontana e le prealpi del Veneto orientale (provincia di Treviso e Belluno) proseguendo a tutta la fascia prealpina e pedemontana del Friuli Venezia Giulia.

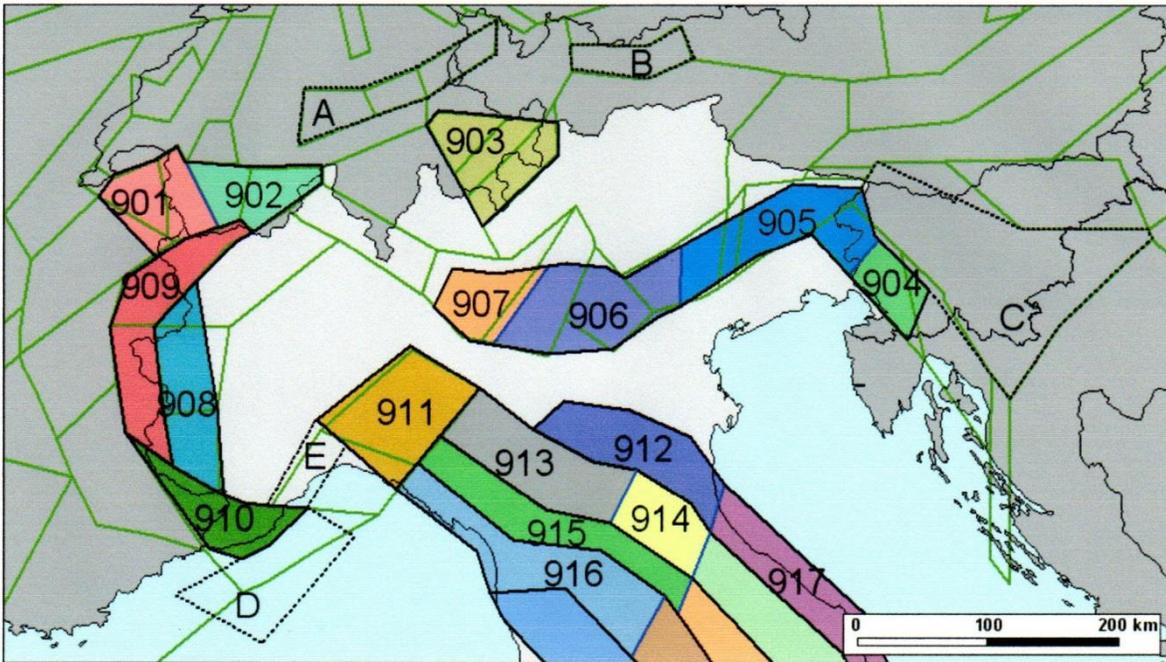


Fig.3 Zonazione sismogenetica ZS9 per il Nord Italia (bordi in nero e blu) a confronto con la zonazione adottata dal progetto SESAME (bordi verde, da Jiménez et al., 1991)

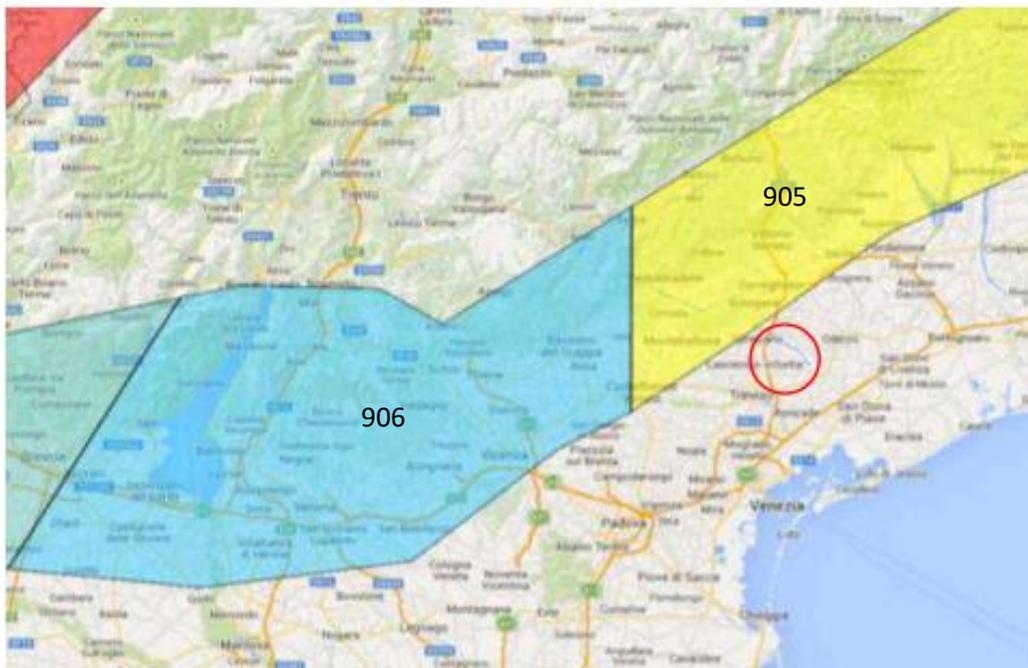


Fig.4 Ubicazione del comune di Silea rispetto alla zona sismogenetica 905

L'area si trova qualche decina di chilometri a sud della zona di massima convergenza tra la placca adriatica e quella europea; essa è caratterizzata da strutture a pieghe sud vergenti del sud alpino orientale, e faglie inverse associate (fig.5).

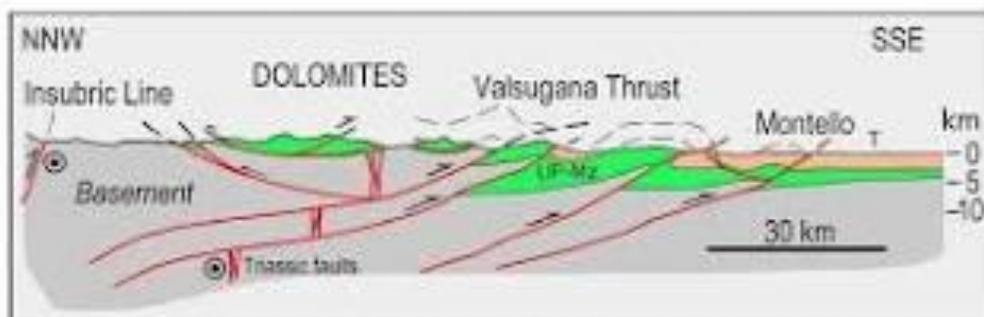


Fig.5 Sezione del ventaglio embriciato delle Alpi Meridionali, dalla Val Pusteria alla pianura veneta (da Doglioni & Carminati, 2008). La zona in studio si trova a Sud del rilievo del "Montello".

Per quanto riguarda la profondità efficace, ossia la profondità alla quale avviene il maggior numero di terremoti, sulla base dei cataloghi strumentali e di alcune assunzioni di partenza, il gruppo di lavoro dell'INGV, ha attribuito alla zona in studio una profondità efficace compresa tra 5 e 8 km, ed una magnitudo attesa massima di $M_{wMax} = 4.8$.

Zona	Numero di eventi Md>2.0	Numero di eventi Md>2.5	Numero di eventi Md>3.0	Magnitudo massima (Md)	Classe di profondità (km)	Profondità efficace (km)
901	18	15	2	4.0	8-12	8
902	34	25	2	3.8	8-12	10
903	23	19	2	4.5	8-12	9
904	13	9	1	3.4	5-8	7*
905	181	110	32	4.8	5-8	8*
906	41	34	13	4.7	5-8	8*
907	33	19	7	4.2	5-8	8*

Fig.6 Tabella riassuntiva sul numero di eventi sismici e relative magnitudo massima ZS9 n. 905 pari a 4,8.

2.3 Definizione della pericolosità di base

Secondo l'approccio più comune, adottato anche dalle normative italiane, la pericolosità sismica di un sito viene indicata attraverso il valore di accelerazione orizzontale (PGA) che ha una determinata probabilità di essere superato in un intervallo di tempo.

Con l'OPCM 3274/2003 si è avviato in Italia un processo per la stima della pericolosità sismica secondo il metodo classico di probabilità indipendente dal tempo di Cornell. Tale metodo prevede l'individuazione delle sorgenti sismiche e la suddivisione del territorio in zone con supposta uniforme probabilità di essere epicentro di futuri terremoti. Per ciascuna zona viene calcolato il tasso medio di terremoti di una certa magnitudo e il passaggio da magnitudo alla sorgente ad accelerazione risentita al sito, è effettuato attraverso opportune leggi di attenuazione. La probabilità di avere una certa PGA in un sito è data infine dal prodotto tra la probabilità condizionata di avere quella PGA da un terremoto di magnitudo M avvenuto a distanza R dal sito e le probabilità indipendenti che si verifichino eventi di quella M a quella R , integrando su tutti i possibili valori di M e R e per tutte le sorgenti della zona.

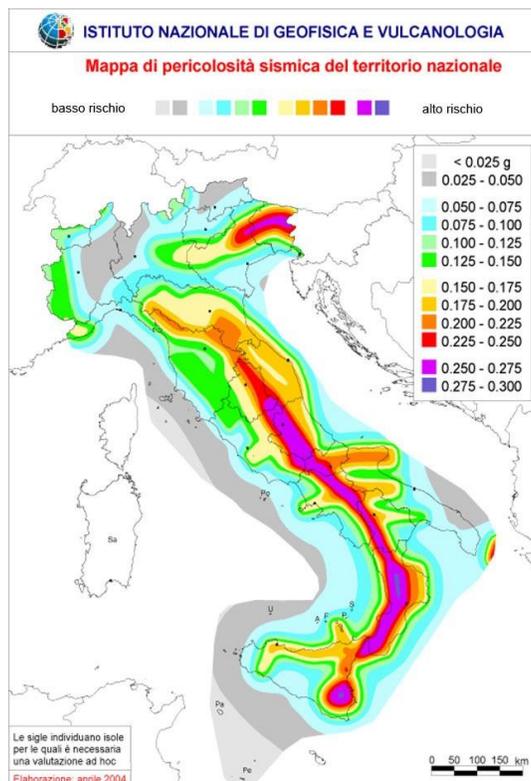


Fig.7 Mappa Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale

2.4 Analisi storica

Dall'analisi del catalogo CPTI15 (catalogo dei terremoti pubblicato nel 2016) possiamo rilevare la presenza dei terremoti che hanno generato effetti sul centro abitato di Silea e con magnitudo $M_w \geq 4.5$, dopo il 1300:

- anno 1914 Lucchesia con $M_w=5.63$;
- anno 2004 Slovenia nord-occidentale con $M_w=5.12$;

Il sisma con maggiore intensità registrato negli archivi INGV è avvenuto il 27.10.1914 nel lucchese (fonte CPTI15, coord. lat. 43.912, long. 10.598) con intensità epicentrale di 7 e magnitudo $M_w=5.63 \pm 0.08$.

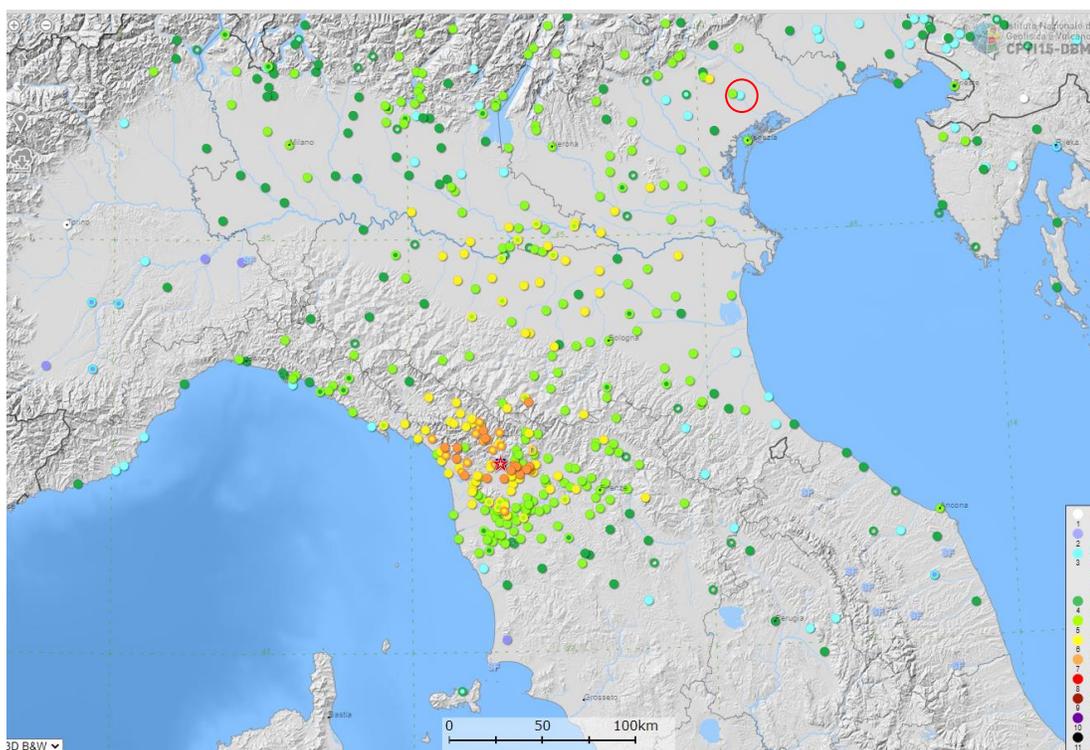


Fig. 8 Distribuzione delle intensità dal terremoto del 1914 con epicentro nella zona del lucchese (la stella indica l'area epicentrale, mentre il cerchio rosso la zona di Silea)

La consultazione del catalogo ISIDE dell'INGV ha evidenziato come non siano stati registrati

eventi sismici (a partire dal 1985) con epicentro ad un raggio di 30 km dal comune di Silea di intensità rilevante (magnitudo mai superiore a 3.6), come mostrato dalla seguente tabella.

Data e Ora (Italia) 📅🕒	Magnitudo 📊	Zona 📍	Profondità 📏	Latitudine	Longitudine
2017-01-29 13:54:32	ML 2.0	4 km SW Trevignano (TV)	11	45.72	12.06
2015-05-15 07:35:47	Mw 3.3	3 km SW Moriago della Battaglia (TV)	12	45.85	12.08
2015-05-12 04:02:50	ML 3.5	4 km S Moriago della Battaglia (TV)	10	45.83	12.11
2011-09-13 20:35:22	ML 3.6	3 km S Moriago della Battaglia (TV)	2	45.84	12.11
2011-07-31 14:36:35	ML 2.1	2 km NE Caerano di San Marco (TV)	6	45.80	12.02
2011-07-31 00:33:29	ML 2.0	2 km W Crocetta del Montello (TV)	8	45.82	12.02
2010-06-23 23:46:34	ML 2.9	2 km E Crocetta del Montello (TV)	5	45.82	12.06
2008-10-08 22:29:06	ML 2.3	3 km SW Mansuè (TV)	5	45.80	12.52
2006-01-02 03:43:03	ML 2.1	3 km NE Santa Maria di Sala (VE)	11	45.53	12.06
2005-09-08 22:51:18	ML 2.0	1 km S Sernaglia della Battaglia (TV)	13	45.87	12.13
2001-03-19 00:17:23	Md 2.5	3 km W Nervesa della Battaglia (TV)	5	45.83	12.18
1998-05-22 07:49:28	Md 2.4	2 km E Motta di Livenza (TV)	10	45.78	12.63
1998-04-18 05:32:57	Md 2.7	2 km SE Gorgo al Monticano (TV)	23	45.77	12.57
1993-04-09 21:11:30	Md 3.2	2 km SW Vidor (TV)	5	45.85	12.03
1990-06-28 21:30:10	Md 3.5	2 km N Codognè (TV)	5	45.89	12.43
1990-06-28 20:56:59	Md 3.1	3 km NW Codognè (TV)	5	45.89	12.40
1987-02-06 13:34:28	Md 2.4	3 km S Pieve di Soligo (TV)	10	45.88	12.18
1985-08-19 03:17:53	Md 2.6	1 km W San Biagio di Callalta (TV)	10	45.69	12.37

Fig. 9 Eventi sismici con epicentro nel raggio di 30 km dal comune di Silea

2.4.1 Sismogenetica e correlazioni con le strutture

Dal punto di vista strutturale, il territorio di Silea si colloca a ridosso della grande unità litologica delle Alpi meridionali. Quest'ultima è stata interessata dal rifting giurassico con l'individuazione di una piattaforma carbonatica bordata dal bacino carnico, bacino bellunese, bacino di Tolmino e dal plateau carnico-giulio. La placca Adria, che tettonicamente rappresenta un promontorio della placca africana (Channell, 1996) collocata lungo la pianura padana veneta e lungo il mare Adriatico, interagisce attivamente con la placca europea determinando il corrugamento alpino e appenninico e, conseguentemente, lo stress tettonico attuale.

L'Adria è costituita da crosta continentale che, nella porzione più settentrionale, è rappresentata dal substrato della pianura padana interagente con il fronte della catena

appenninica a sud e con il sud-alpino a nord. La collisione continentale tra la parte più settentrionale della placca Adria e quella europea ha portato alla formazione della catena alpina. La conseguente subduzione verso sud della placca europea e il sovrascorrimento della placca Adria (subduzione continentale, Bally et al., 1985) ha provocato la formazione di strutture di retro-thrust. Un importante ruolo di svincolo cinematico della placca Adria settentrionale viene svolto dalla Linea Schio-Vicenza (Babbucci et al., 2002): una faglia trascorrente sinistra (Plio-Quaternaria) che mette le Alpi meridionali a contatto con quelle centro-occidentali. Il blocco veneto-friulano (figura seguente) è caratterizzato da strutture tettoniche con direzioni variabili (Doglioni et al., 1987; Castellarin et al., 1992; Pontron et al., 2000). Nella zona friulana centrale si ha il massimo delle deformazioni e del raccorciamento per l'estrema embricazione sud-vergente delle unità. L'assetto strutturale della pianura veneta, che rappresenta l'avampaese di due catene montuose perimetrali, è condizionato dall'interferenza tra le strutture del Sud-alpino a nord e il fronte della catena dinarica a est (Merlini e al., 2002).

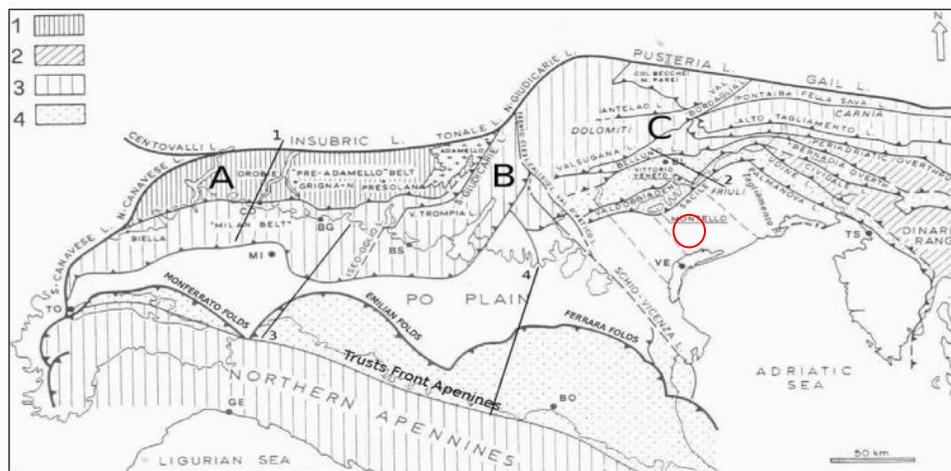


Fig.10 Assetto tettonico del Nord Italia. In rosso evidenziata l'area di Silea

L'area è caratterizzata da pieghe e sovrascorrimenti ad andamento ENE-OSO, prevalentemente vergenti a S-SE (Poli et al., 2008). La strutturazione della attuale fascia pedemontana, estesa dal Bassanese fino al fiume Tagliamento trae le sue origini nell'evento compressivo del Messiniano-Pliocene, ampiamente propagatosi all'interno della catena entro sistemi già strutturati (Castellarin et al., 1998b). Tuttora l'area presenta un'attività tettonica

rilevante, con una compressione attiva la cui velocità è stimata nell'ordine di qualche mm/a (D'Agostino et al., 2005). Negli ultimi 15 anni circa, le ipotesi cilindriche, che identificano come potenzialmente sismogenici alcuni sovrascorrimenti subparalleli, sono state riviste alla luce di nuovi dati, e di più moderni criteri di segmentazione; oltre a ridurre il numero di potenziali faglie attive rispetto ai precedenti studi, le analisi geomorfologiche delle deformazioni quaternarie, in particolare, si sono dimostrate adatte per quantificare l'attività di sovrascorrimenti ciechi, o pieghe-faglie di crescita (Galadini et al., 2005). La stretta di Quero e il rilievo del Montello sono gli elementi geologici e morfologici del distretto Pedemontana Sud attorno ai quali si sono maggiormente concentrati studi per il riconoscimento di faglie attive (p. es. Benedetti et al., 2000; Ferrarese e Sauro, 2005; Anselmi et al., 2007, 2011; Burrato et al., 2009). Nonostante ciò, il potenziale sismico dell'area resta ancora piuttosto controverso, e si moltiplicano gli studi per comprendere la relativa assenza di sismicità su faglie ritenute capaci di generare forti terremoti.

2.5 Faglie attive e faglie capaci

Negli anni '60 e '70 furono raccolti un gran numero di dati sull'attività Plio-Quaternaria delle faglie dell'Italia del NE, poi sintetizzati nella "Mappa Neotettonica dell'Italia" (CNR-PFG 1987). In questa vennero mappati i maggiori sistemi di thrust sud-vergenti che bordavano le pianure Veneta e Friulana ed influenzavano il dominio pre-Alpino, come strutture continue attive durante il Pliocene ed il Quaternario (faglie capaci).

La recente attività dei sovrascorrimenti che delimitano le pianure Veneta e Friulana viene rimarcata anche nella "Map of active faults between the Po and Piave River and Lake Como" (Castaldini & Panizza, 1991), che riporta 112 faglie attive nell'area compresa tra il lago di Garda e la regione Friulana. Gli autori hanno mappato 4 principali strutture compressive dirette ENE-SW: le linee Bassano-Valdobbiadene, Aviano, Sacile e Valsugana Sud, insieme con un gran numero di faglie minori.

Un sommario a scala regionale delle faglie attive che interessano la catena orientale delle Alpi Meridionali è stato recentemente proposto da Galadini et al. (2001). Il lavoro, che rileggeva criticamente la letteratura disponibile, riportava nuovi dati di campagna del settore W dell'area indagata. La mappa elaborata includeva le faglie principali (come tracce superficiali) la cui

lunghezza era consistente con terremoti di magnitudo $M=6,2$. Le faglie mappate sono caratterizzate dall'evidenza di attività o dall'indicazione di probabile attività durante il tardo Pleistocene-Olocene (dopo l'ultima massima espansione glaciale, LGM).

Il risultato di questa operazione fu un inventario di 8 faglie (si tratta di strutture continue maggiori) che interessavano l'area tra Thiene ed il bordo orientale Friulano. Una successiva rivisitazione critica del lavoro ridusse ulteriormente il numero di faglie attive.

La presenza di faglie attive in prossimità del territorio oggetto di studio può essere verificata consultando il catalogo DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) delle faglie capaci di generare sismi con magnitudo superiori a 5.5

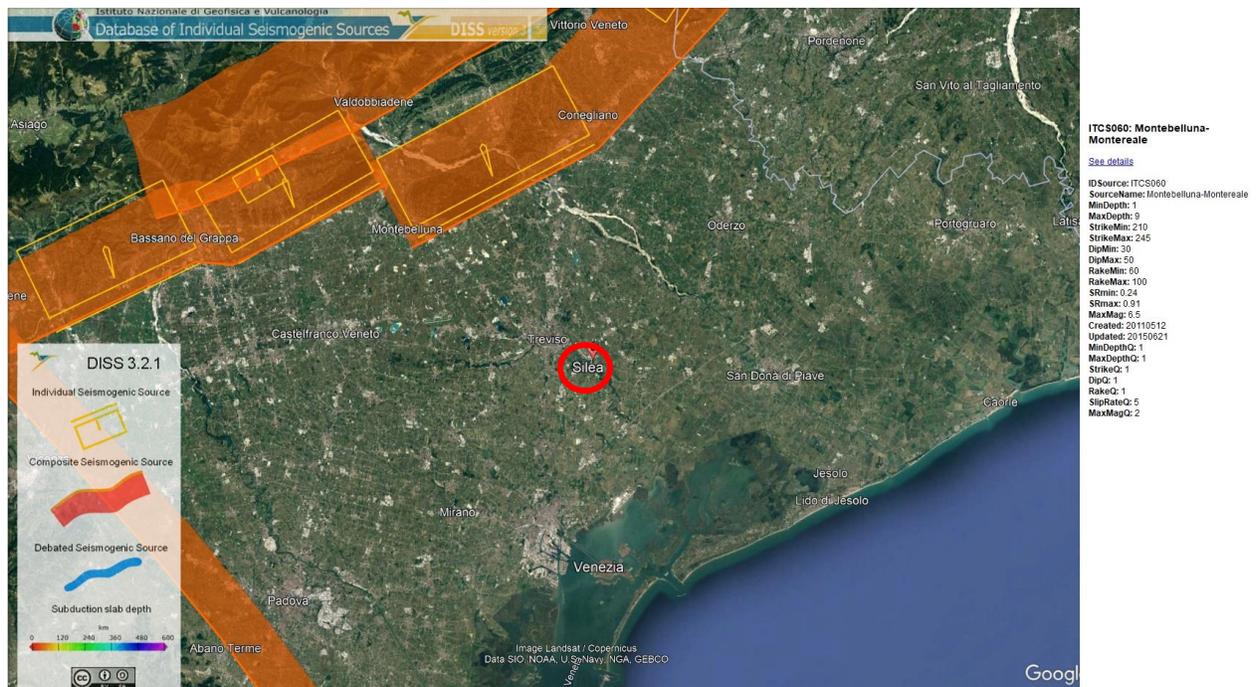


Fig. 11 Faglia Montebelluna–Montereale con riportata la posizione del comune di Silea.

Come si può osservare dall'immagine di figura 11, il territorio comunale di Silea si trova circa 16

km a SE della zona sismogenetica ITCS060 Montebelluna-Montereale, la quale possiede un andamento circa WSW-ENE, inclinazione tra i 30 e i 50 gradi ed immersione verso NW. La cinematica della faglia è di tipo compressivo con la possibilità di generare eventi sismici fino ad un massimo di magnitudo pari a 6.6 (ZS9 n. 905).

3. INDAGINI

Le indagini condotte all'interno dell'area in esame sono: due indagini sismica Re.Mi. + MASW e uno stendimento di tomografica elettrica (ERT).

Per quanto riguarda le indagini geotecniche, ci si affida ai dati presenti all'interno della relazione *“Indagine idrogeologica per il dimensionamento di un sistema di aggottamento della falda tramite wellpoint (e) Relazione geologico-geotecnica dei terreni di fondazione”, in comune di Silea (TV)* eseguita dal Dott. Geol. Silvia Onisto, per la quale sono state eseguite 3 prove penetrometriche statiche C.P.T. e 4 sondaggi goegnostici, disposte come nella seguente planimetria.



Fig. 12 Planimetria riportante la posizione delle prove penetrometriche

3.2 Cenni sulle misure di sismica superficiale con le metodologie Masw e Re.Mi combinate

Le misure Masw (sismica attiva) e Re.Mi. (sismica passiva) sono molto utili per ricavare il profilo della velocità delle onde S (V_s) nel sottosuolo.

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi), che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il metodo sfrutta le onde di superficie e il fenomeno della dispersione delle stesse (variazione della velocità di fase con il variare della frequenza).

Solitamente si tratta di onde di Rayleigh in caso di acquisizioni terrestri. In particolare, poiché le onde di Rayleigh si propagano lungo la superficie topografica in uno strato di profondità circa pari alla lunghezza d'onda, in mezzi stratificati verticalmente eterogenei, le diverse lunghezze d'onda, relative alla propagazione di armoniche a diversa frequenza, si propagano con velocità di fase che dipende dalle proprietà dei materiali interessati dalla propagazione. Ciò fa sì che la velocità di fase sia funzione della frequenza dell'onda stessa. Tale dipendenza prende il nome di dispersione geometrica e viene rappresentata tramite la curva di dispersione (velocità di fase vs. frequenza). La propagazione delle onde di superficie è un fenomeno multimodale, una stessa frequenza può propagarsi contemporaneamente a diverse velocità, e ogni velocità viene chiamata modo.

Dalla curva di dispersione sperimentale è possibile caratterizzare il sottosuolo in termini di variazione della velocità di propagazione delle onde di taglio (V_S), e quindi del modulo di rigidezza al taglio dinamico (G_0), in funzione della profondità.

L'utilizzo delle prove per onde superficiali ha molti campi di applicazione, dalla stima della V_{S30} richiesta dalle NTC18, alla valutazione dei parametri utili a studi approfonditi di pericolosità sismica; dalla caratterizzazione di discariche, alla valutazione della profondità e dello stato di alterazione di substrati superficiali in presenza di falde acquifere, nonché la caratterizzazione di versanti e depositi.

Generalmente il metodo assume come modello del terreno un mezzo elastico-lineare a strati omogenei. Nella maggior parte delle applicazioni, la tecnica è quindi utilizzata per stimare un profilo verticale 1D di V_S , ma vi sono molte applicazioni in siti con moderate variabilità laterali in cui il metodo consente di stimare distribuzioni di V_S pseudo-2D/3D.

Le indagini sono state condotte utilizzando un sismografo a 48 canali mod. ABEM Terraloc Pro a 24 bits.

Sono stati realizzati stendimenti con array lineare e un offset intergeofonico di 2 m e 5 m come distanza di battuta.

Sono state effettuate 10 registrazioni da 30 secondi ciascuna per il metodo passivo e una registrazione da 2 secondi, per il metodo attivo. I geofoni usati sono di tipo verticale da 4.5 Hz e grazie alla dinamica dello strumento (24bits, range dinamico 117 dB), consentono la

registrazione delle onde di superficie con contenuto in frequenza fino a circa 2Hz.

I dati acquisiti in campagna sono stati quindi elaborati ed è stato possibile ricostruire un modello Vs/profondità attendibile.

Qualora necessario, in fase di elaborazione, è possibile effettuare il picking della curva Velocità/frequenza per il solo modo fondamentale di vibrazione, oppure per diversi modi di vibrazione (fino al decimo). Nella fattispecie si è ricorsi al picking del primo modo di vibrazione.

3.3 Cenni sulle misure tomografiche elettriche (ERT)

La resistività elettrica rappresenta una delle proprietà fisiche più utilizzate per l'esplorazione geofisica del sottosuolo, grazie soprattutto all'ampio spettro di valori che essa può assumere al variare della natura dei corpi investigati.

Questa metodologia rappresenta uno dei sistemi d'indagine più conosciuti e affidabili, le cui principali applicazioni consentono di ricostruire la stratigrafia di massima dei terreni, rilevare la presenza di strutture sepolte, effettuare ricerche idriche o di acquiferi a diverso grado salino, monitorare movimenti degli acquiferi stessi o di fluidi in generale, mappare siti contaminati. Tale sistema d'indagine consente di ottenere la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo, elettricamente disomogeneo, immettendo una corrente continua mediante due elettrodi conficcati nel terreno, detti convenzionalmente AB, e misurando contemporaneamente la differenza di potenziale (d.d.p.) associata al campo elettrico generato tra due elettrodi distinti dai primi, detti convenzionalmente MN (fig.13).

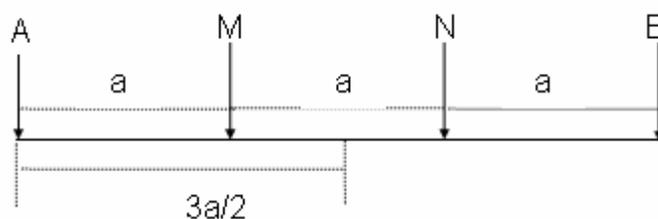


Figura 13 Schematizzazione del dispositivo quadripolare tipo WENNER, comunemente utilizzato per l'acquisizione di dati di resistività elettrica. AB: elettrodi di corrente; MN: elettrodi di potenziale.

Variando la distanza tra gli elettrodi A e B, o tra M e N, o tra AB e MN, e misurando ogni volta la corrente immessa agli AB e la differenza di potenziale "d.d.p." risultante agli MN, si ottiene la resistività detta apparente, secondo la formula:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \text{ dove } k = \pi \frac{AM * AN}{MN} \quad (\Omega m)$$

in cui k è la costante geometrica del dispositivo quadripolare e dipende soltanto dalle distanze interelettrodiche.

Il valore di resistività apparente varia in funzione: a) della posizione reciproca degli elettrodi A, B, M e N (quadripolo elettrico), in quanto parti diverse del corpo vengono investigate dal passaggio della corrente; b) dalla misura della risposta in termini di d.d.p..

A causa della loro maggiore convenienza in termini di tempi di esecuzione delle misure, la pratica geofisica ha privilegiato alcune combinazioni dei 4 elettrodi A, B, M e N, come ad esempio quella di fig. 9, detta quadripolo "**Wenner**", dove gli elettrodi sono equidistanziati e sullo stesso asse.

A passo costante (distanza interelettrodica) corrisponde una profondità di investigazione all'interno del terreno all'incirca costante, mentre per ottenere un'informazione a diverse profondità occorre allargare progressivamente il passo del quadripolo.

Nel presente lavoro è stato utilizzato un altro tipo di dispositivo che ha rivelato una maggior efficacia nelle indagini in terreni come quello in oggetto. Questa geometria quadripolare corrisponde al cosiddetto "**gradiente multiplo**" (Multiple Gradient Array), che presuppone la disponibilità di uno strumento multicanale in grado di effettuare sino a 8 misure di resistività contemporaneamente. In questo caso si mantiene fissa la posizione degli elettrodi di corrente, traslando quelli di potenziale e misurando di volta in volta la d.d.p.

La schematizzazione del dispositivo tipo "Gradient Array" è riportata in fig.14, con C₁ C₂ elettrodi di corrente e p₁ p₂ elettrodi di potenziale.



Figura 14 - Schematizzazione del dispositivo quadrupolare tipo "Gradient array", utilizzato per l'acquisizione dei dati di resistività elettrica

La maggior efficacia di queste misure sta nel fatto che esse risultano avere una grande capacità risolutiva sia in senso verticale che laterale. Essendo però composte da un numero di punti di misura molto elevato rispetto ai dispositivi elettrodi "tradizionali", non sono molto praticate, in quanto richiedono una strumentazione particolarmente sofisticata.

La **tomografia elettrica** rappresenta la tecnica di indagine geoelettrica che permette di acquisire informazioni in simultanea dipendenza della profondità e della distanza orizzontale interelettrodi, e che quindi consente di ottenere informazioni reali sui valori di resistività sia in senso verticale che laterale (lungo cioè una sezione bidimensionale).

Questa metodologia di misura, che nella pratica geofisica costituisce l'evoluzione attuale della nota prospezione geoelettrica, è stata messa a punto alcuni anni fa sfruttando i progressi dell'elettronica, sia per un'acquisizione automatica sul campo che per un'interpretazione dei dati in termini bi- e tri-dimensionali.

Tale tecnica permette di disporre sul terreno da investigare un numero elevato di elettrodi (32, 64 o più), con distanza reciproca dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richieste; attraverso gli elettrodi viene alternativamente inviata corrente o misurata la differenza di potenziale, in una sequenza pre-programmata. Si ottiene così l'andamento sia verticale che laterale della resistività apparente, che è uso rappresentare in forma di pseudosezione, ossia come tabella di valori organizzati in un piano di riferimento dove sull'asse orizzontale si riporta un valore corrispondente alla distanza sul terreno tra gli elettrodi più esterni, e sull'asse verticale un'ordinata ricavata dalla complessiva larghezza del quadrupolo.

Il risultato è quindi una figura bidimensionale nella quale tutti i punti di eguale resistività apparente vengono collegati da una curva detta iso-resistiva. Questo quadro deve essere quindi opportunamente “interpretato” in modo da poter desumere dalle resistività apparenti i valori della resistività reale e la geometria della sua distribuzione.

Nelle indagini è stato utilizzato un georesistivimetro mod. ABEM Terrameter LS2 con compensazione automatica dei potenziali spontanei.

Il trasmettitore di corrente opera con correnti da 0.2 a 2500 mA, con un voltaggio massimo di ± 600 V ed un impulso t di corrente variabile da 0.1 a 4 sec. Il ricevitore, a otto canali, ha un'impedenza min. di 10 M Ω . La precisione di $\Delta V/I$ risulta superiore allo 0.5%.

I dati sono stati elaborati e interpretati in termini di profili di resistività mediante il software ZondRes2D.

Come già anticipato è stato realizzato uno stendimento lineare, con interdistanza tra gli elettrodi di 5 m.

3.4.1 Analisi delle risultanze

MASW 01

L'indagine eseguita ha permesso la determinazione dell'andamento della velocità delle Vs fino a circa 40 m di profondità.

Di seguito si riportano le immagini relative alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh e del modello che ne deriva previa inversione dei dati. L'errore quadratico medio calcolato è del 1.73%.

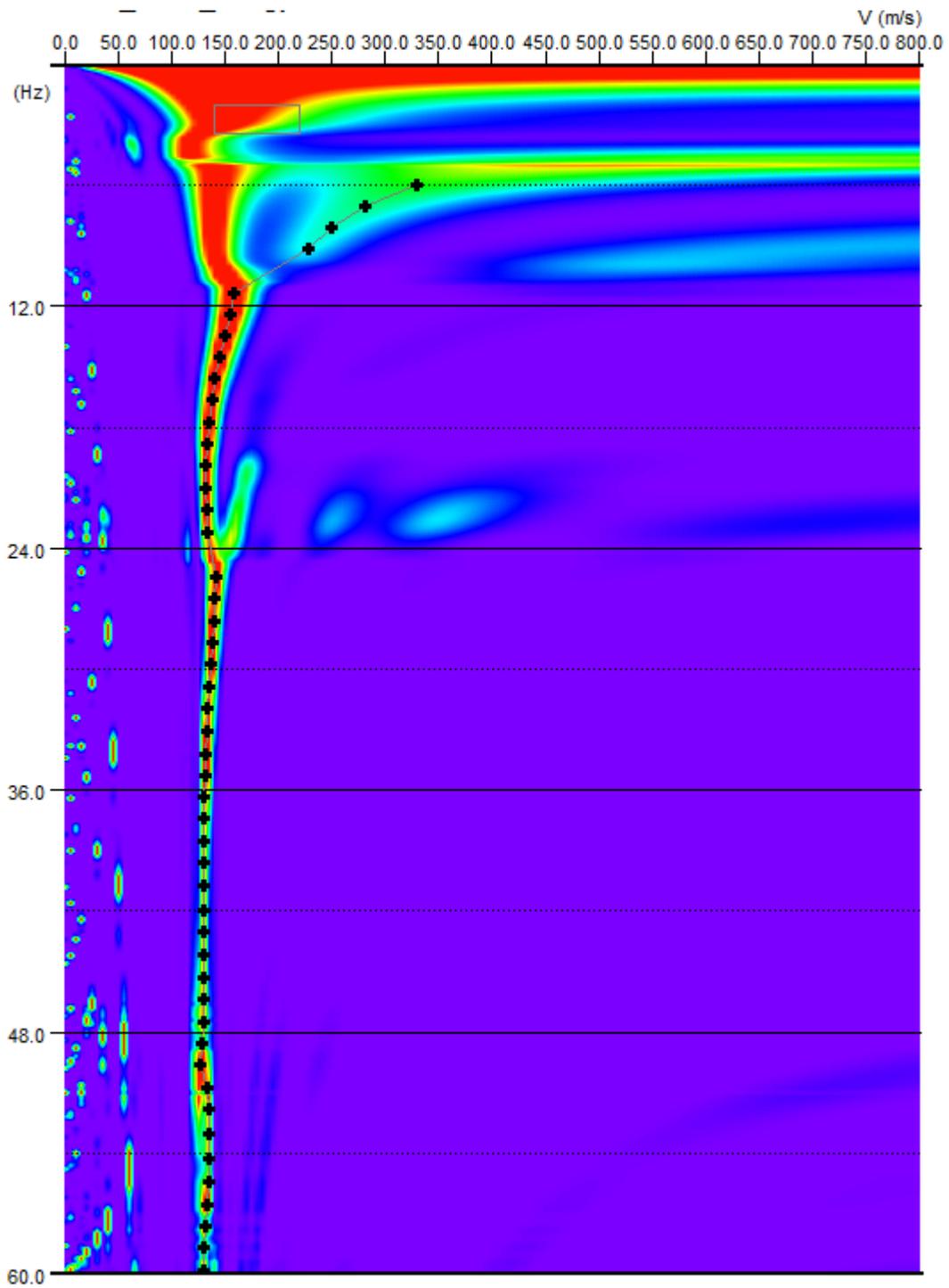


Fig. 15 CURVA DI DISPERSIONE CUMULATIVA METODI ATTIVO E PASSIVO

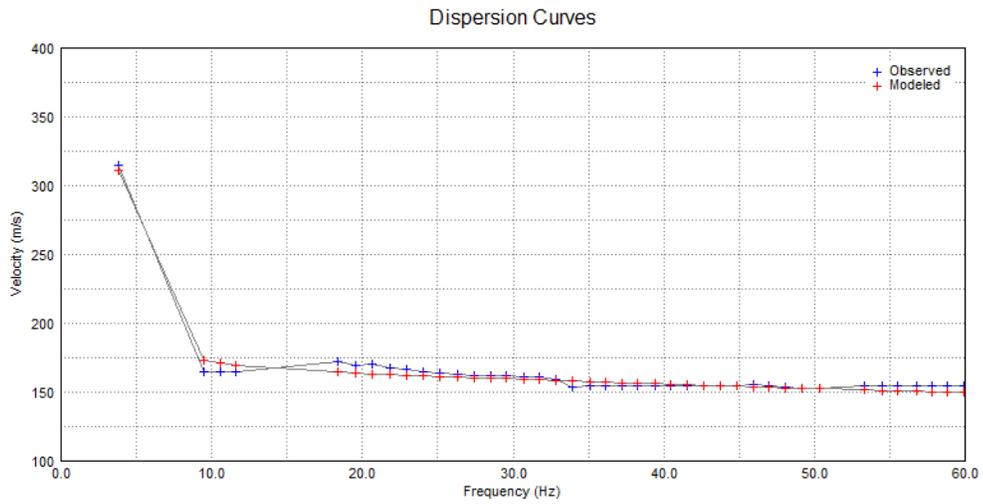


Fig.16 CURVA DI DISPERSIONE MISURATA (BLU) E CALCOLATA (ROSSO)

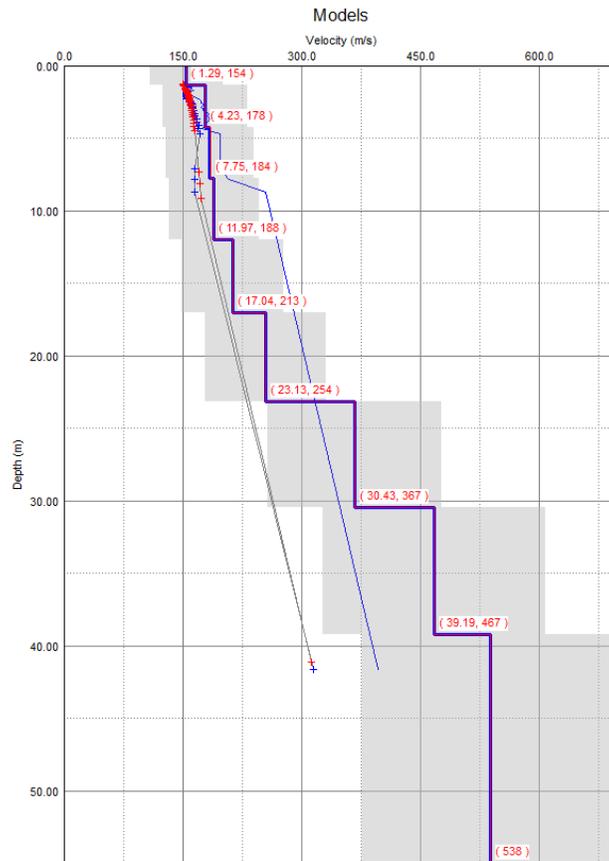


Fig. 17 MODELLO RISULTANTE DALL'INVERSIONE DEI DATI

La V_{seq} è stata ricavata dalla formula:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{v_i}}$$

Nel caso specifico è risultato:

$V_{seq} = 226 \text{ m/s}$

Si tratta quindi di un suolo tipo **C**.

MASW 02

L'indagine eseguita ha permesso la determinazione dell'andamento della velocità delle Vs fino a circa 40 m di profondità.

Di seguito si riportano le immagini relative alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh e del modello che ne deriva previa inversione dei dati. L'errore quadratico medio calcolato è del 0.97%.

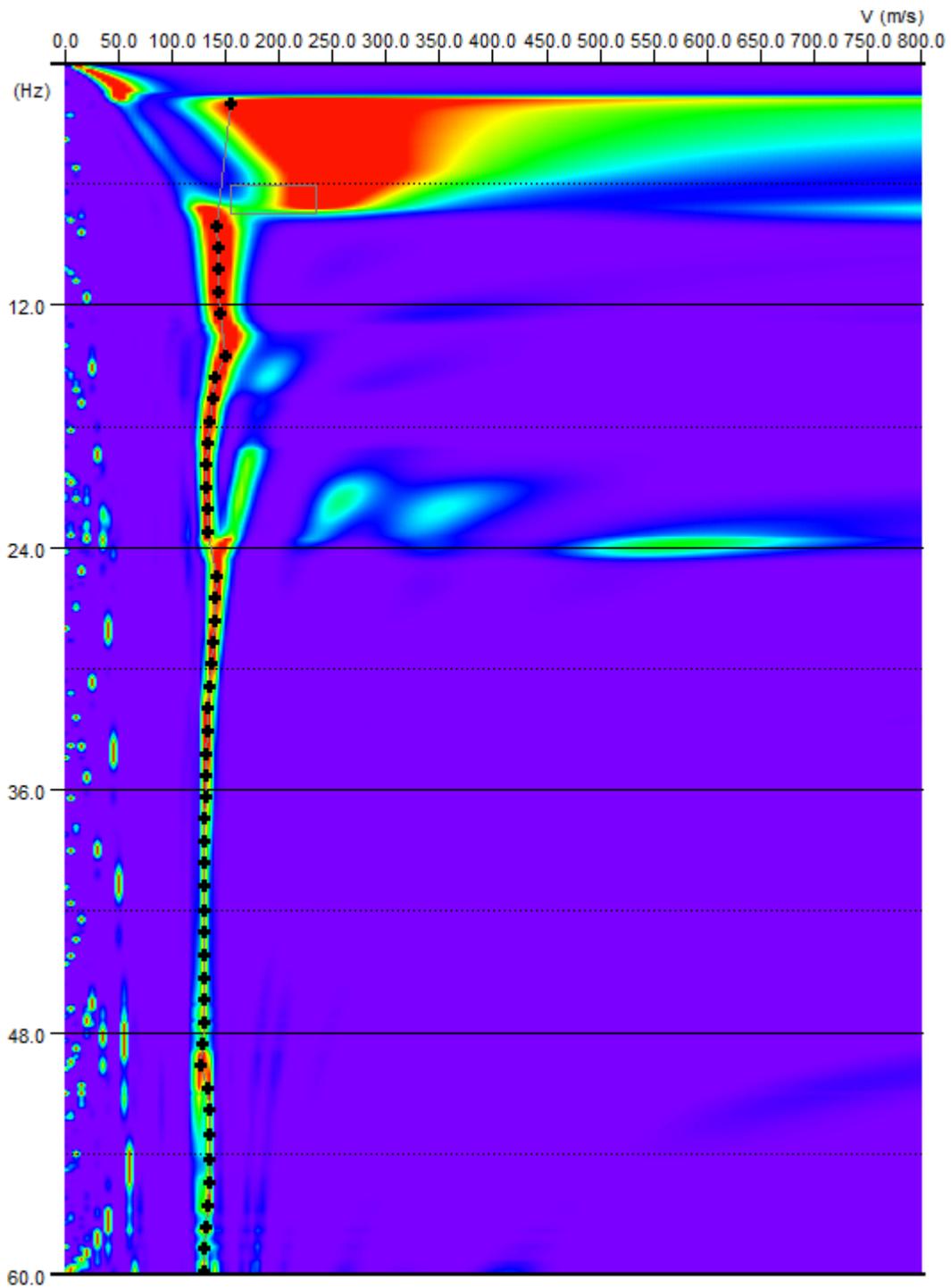


Fig. 18 CURVA DI DISPERSIONE CUMULATIVA METODI ATTIVO E PASSIVO

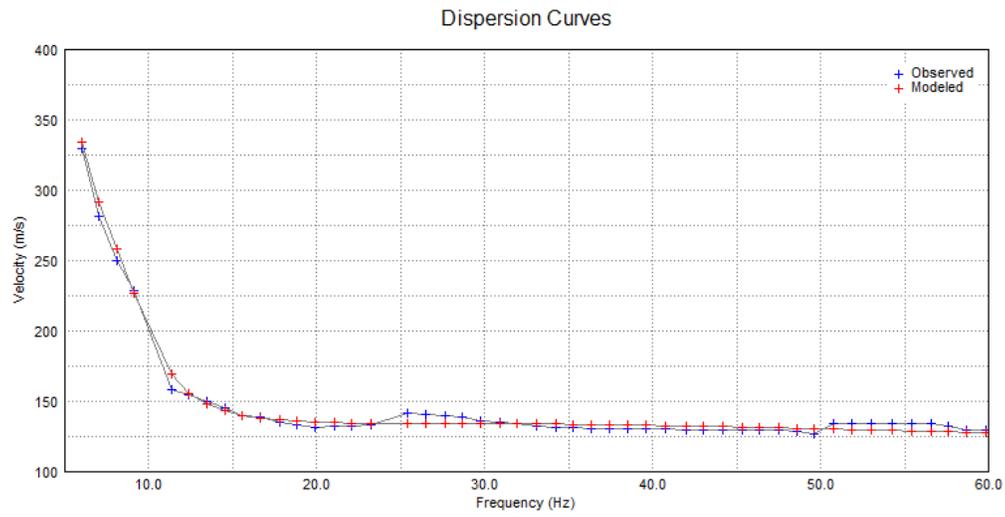


Fig.19 CURVA DI DISPERSIONE MISURATA (BLU) E CALCOLATA (ROSSO)

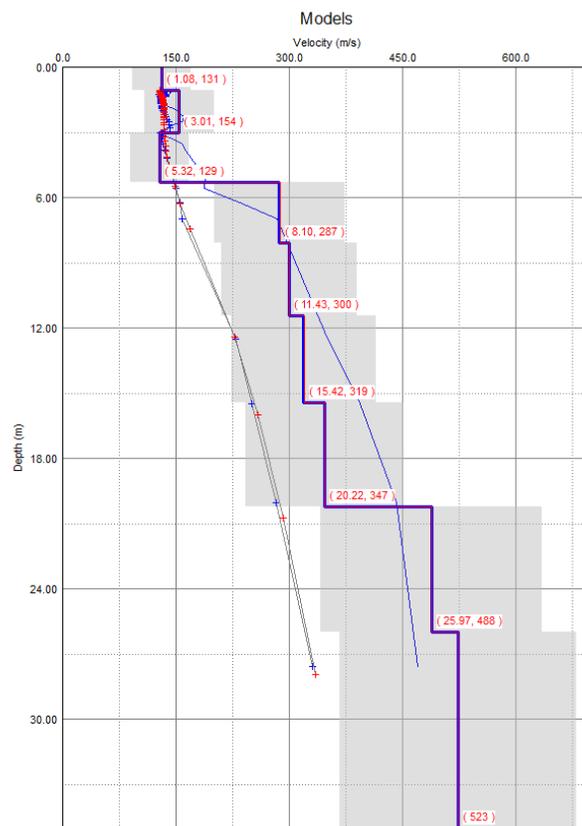


Fig. 20 MODELLO RISULTANTE DALL'INVERSIONE DEI DATI

La V_{seq} è stata ricavata dalla formula:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{v_i}}$$

Nel caso specifico è risultato:

$$V_{seq} = 285 \text{ m/s}$$

Si tratta quindi di un suolo tipo **C**.

4. MICROZONAZIONE SISMICA

4.1 Introduzione

Per la stesura della Microzonazione di terzo livello, si è fatto riferimento agli “Standard di rappresentazione e archiviazione informatica – Microzonazione sismica ”vers.4.0” della Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica e alle “Linee guida per l’esecuzione di studi di microzonazione sismica”, allegato “A” della DGRV n. 1572 del 03.09.2013. Quest’ultima prevede il terzo livello per le “aree in cui è prevista la realizzazione urbanizzazioni” nonché abbiano una valore di $PGA > 0.125g$.

Gli elaborati cartografici realizzati, secondo gli standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0, per la Microzonazione di terzo livello, sono i seguenti: - Carta delle Indagini scala 1:2.000 (All. 8); - Carta della Pericolosità Sismica Locale alla scala 1:2.000 (All. 7).

Nella “**Carta delle Indagini**” alla scala 1:2.000 sono state ubicate le indagini descritte nel capitolo 3. Questa zona è caratterizzata dalla presenza del litotipo “*Ghiaie pulite con granulometria poco assortita, miscela di ghiaia e sabbia*” (descrizione dalla Relazione illustrativa della microzonazione sismica redatta dallo Studio Mastella). Sono state eseguite due prove

MASW+REMI e una ERT.

5. MODELLAZIONE NUMERICA DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE DI TERZO LIVELLO

5.1 Premessa

La DGRV n.1572/2013 stabilisce che il terzo livello deve essere applicato a diverse categorie determinate nella Carta della Pericolosità sismica:

Il terzo livello di microzonazione sismica è stato concepito per quantificare correttamente la risposta sismica locale di sito, in quanto la procedura di secondo livello, con gli abachi, a volte non risulta corretta perché creata con modelli che non riescono a riprodurre il comportamento dinamico di tutti i terreni.

Il sito in esame si trova in una zona potenzialmente instabile a causa di possibili fenomeni di liquefazione (ZAlq dalla relazione di Microzonazione sismica compiuta dallo Studio Mastella), per cui ricade nella casistica dei siti da approfondire al terzo livello in sede di PI e/o PUA.

La valutazione della risposta sismica locale mediante analisi 2D permette di definire una realistica risposta sismica stratigrafica di terreni "affetti" da problematiche bidimensionali (sia sepolte sia topografiche). Questo approccio è ritenuto la via ufficiale delle **NTC2018 (Cap. 3.2.2)** e consente, in determinati casi e mediante il confronto con la relativa categoria di sottosuolo (**Cap. 3.2.2 NTC2018**), elementi di risparmio rispetto all'approccio semplificato di normativa (categorie di sottosuolo), poiché identifica amplificazione per intervalli di periodi solitamente più limitati rispetto a quelli di normativa.

Per la determinazione delle caratteristiche dinamiche dei terreni, sono stati eseguiti due sismici condotti secondo la metodologia MASW attiva e passiva.

I contenuti della relazione sulla modellazione sismica sono:

- 1) Determinazione dell'accelerazione massima di riferimento;
- 2) Definizione scelta progettuale (V_n , C_u , Stati Limite);

- 3) Stima dei parametri di disaggregazione (es. M-R);
- 4) Modalità di estrazione degli input sismici e loro rappresentazione.
Indicazione del codice utilizzato e del fattore di scala medio finale;
- 5) Indicazione della sismostratigrafia utilizzata nell'analisi (Vs, spessori, densità e tipologia materiali);
- 6) Indicazione del tipo di software e certificazione del grado di qualità in output dell'analisi.

5.2 Modellazione sismica

5.2.1 Determinazione dell'accelerazione massima di riferimento

L'accelerazione massima di riferimento è quella dettata dalle NTC 2018 e già utilizzata negli approcci semplificati di cui si è accennato in premessa.

Date le coordinate del sito (WGS84: Lat. 45,651099, Long. 12,290132) si è proceduto, tramite l'apposito foglio di calcolo "Spettri NTC 2008" del ministero LL.PP. a individuare le PGA da utilizzare nel sito in esame che, vista la tipologia di opera (si veda paragrafo successivo) sono pari a 0.126 g (SLV).

5.2.2 Determinazione Scelta progettuale

Trattandosi di una lottizzazione per edifici residenziali, la classe delle costruzioni è la II. Ne consegue un coeff. d'uso $C_u = 1.5$, con vita nominale $V_n = 50$ anni e un tempo di ritorno T_r di 475 anni per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

5.2.3 Analisi di disaggregazione

La disaggregazione della pericolosità sismica è una operazione che consente di determinare il contributo di varie sorgenti sismogenetiche alla pericolosità sismica del sito in esame. Per questo tale analisi viene condotta in termini di magnitudo (M) e distanza (R). In particolare, per il progetto oggetto del presente studio, si sono cautelativamente tenuti in considerazione terremoti

di magnitudo compresi tra 4.0 e 7.0 e di una distanza compresa in un raggio di 30 km dal sito in esame.

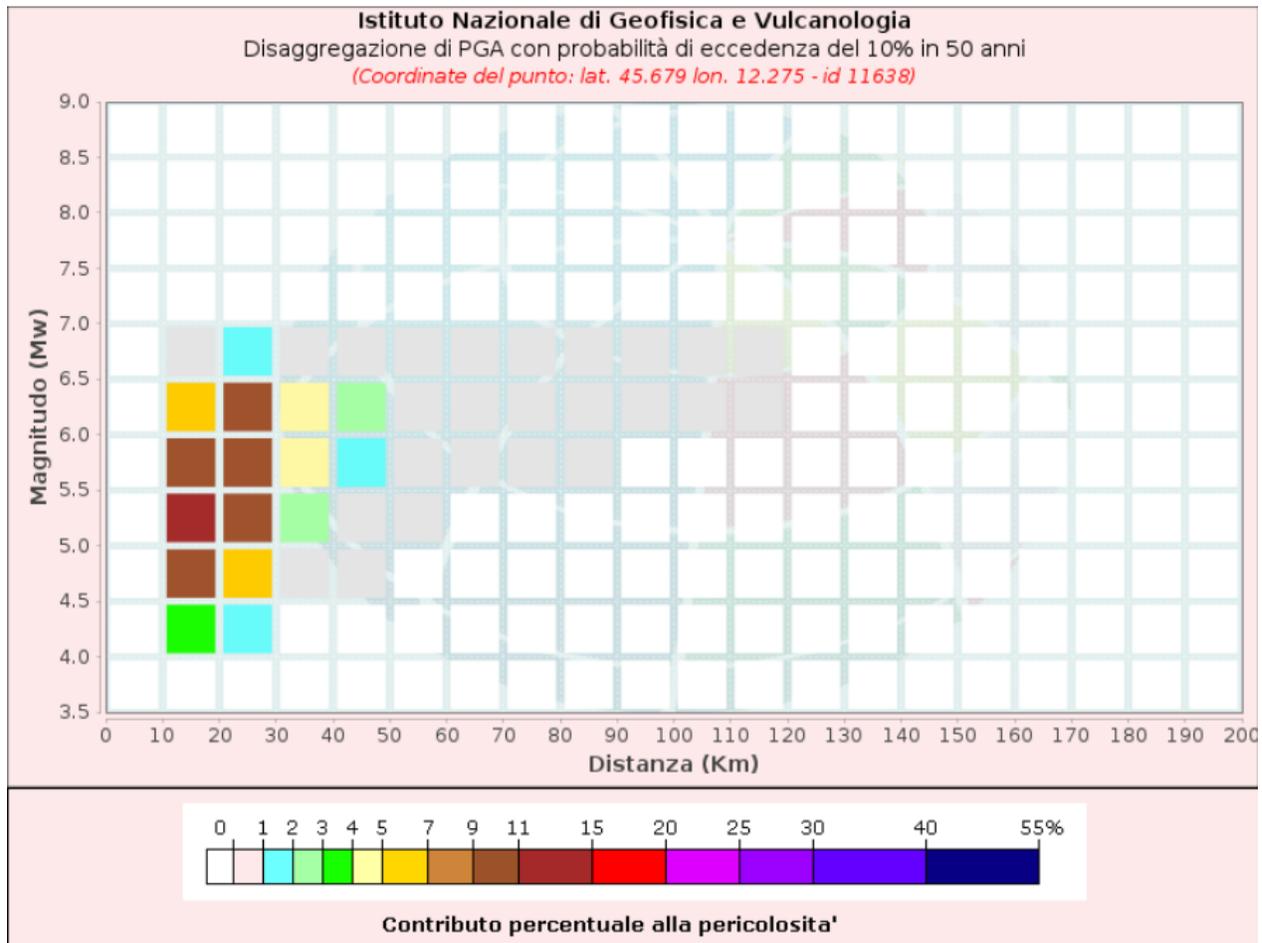


Fig. 23: analisi di disaggregazione del sito in esame (SLV)

5.2.4 Estrazione Input Sismici

Per studi di RSL è richiesta l'estrazione di 7 accelerogrammi di input spettro-compatibili. Il codice utilizzato per questa operazione è il Rexelweb, che permette l'estrazione degli accelerogrammi previa definizione di una serie di parametri:

- Target spectrum utilizzato: NTC2018, suolo tipo A
- I parametri di disaggregazione

- I parametri derivanti dalla scelta progettuale
- Le tolleranze max e min rispetto allo spettro target.

Seguendo questa procedura è stato estratto un set di 7 accelerogrammi (all. 5) con fattore di scala medio pari a 1.00 e una magnitudo media pari a 6.0 per lo SLV.

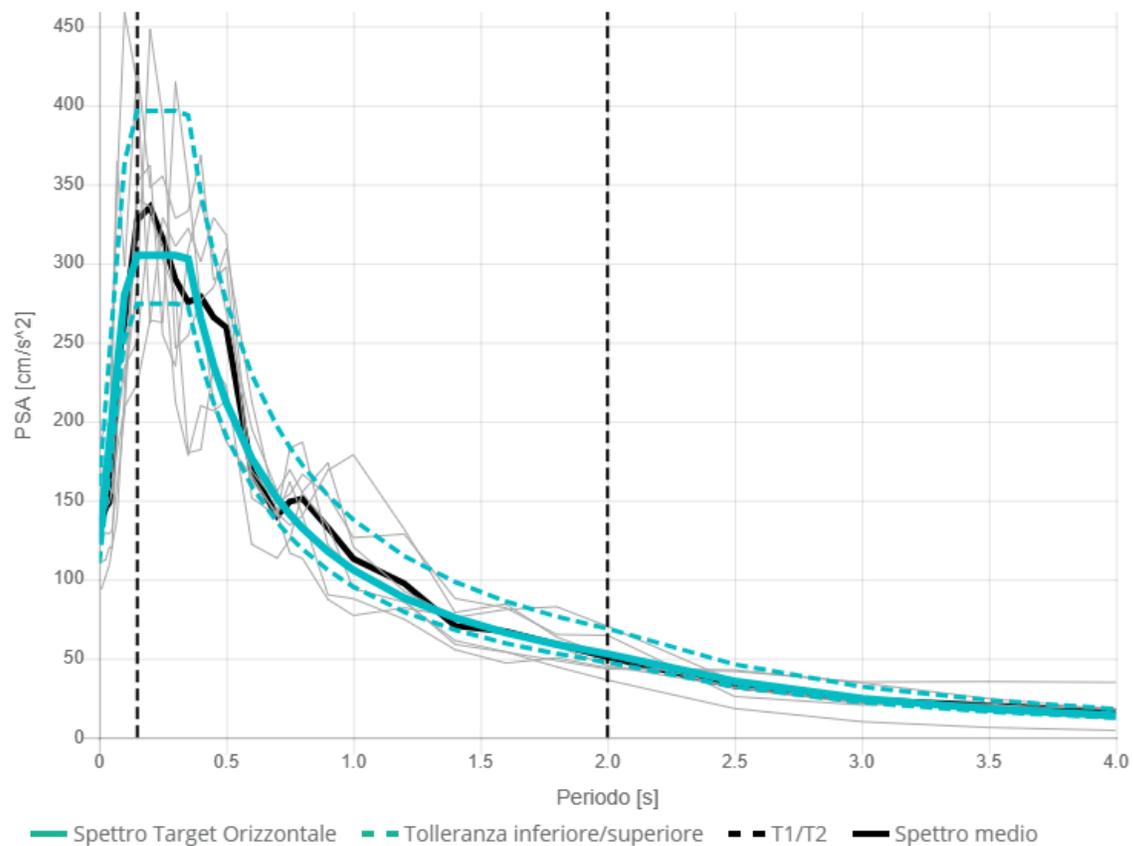


Fig. 24: Combinazione degli spettri dei sette accelerogrammi estratti (SLV).

5.2.5 Modello sismostratigrafico

Il modello sismostratigrafico, è stato ottenuto in base ai dati desunti dalle prove effettuate, che evidenziano un andamento delle velocità alterno: agli strati ghiaiosi corrispondono velocità maggiori, a quelli limosi argillosi corrispondono velocità minori; questo fino a 40 m da p.c.. La massima profondità raggiunta dalle indagini, non ha consentito di arrivare al bedrock sismico;

per estrapolazione lineare si è ipotizzato dunque un bedrock avente $V_s=800$ m/s, alla profondità di 50 m. E' opportuno sottolineare che i dati sismici raccolti, unitamente alle tomografie elettriche e alla stratigrafia di due sondaggi, effettuati proprio in corrispondenza della lottizzazione in oggetto, nonché alle prove penetrometriche statiche di cui si è accennato in precedenza, hanno permesso una ricostruzione stratigrafica attendibile.

In sostanza, il sito è caratterizzato da una alternanza di strati fini e grossolani, fino a almeno 50 m da p.c.. L'all. 3 riporta la sezione stratigrafica ricostruita sulla base dei dati raccolti; essa è lunga circa 160 m e si estende da N a S. Come detto si tratta di terreni eterogenei in superficie, fino a circa 20 m da p.c.. La porzione nord, superficialmente, è caratterizzata da prevalenza di sabbie, mentre nella zona centrale e meridionale prevalgono i terreni fini. In profondità prevalgono sedimenti grossolani (ghiaie e sabbie).

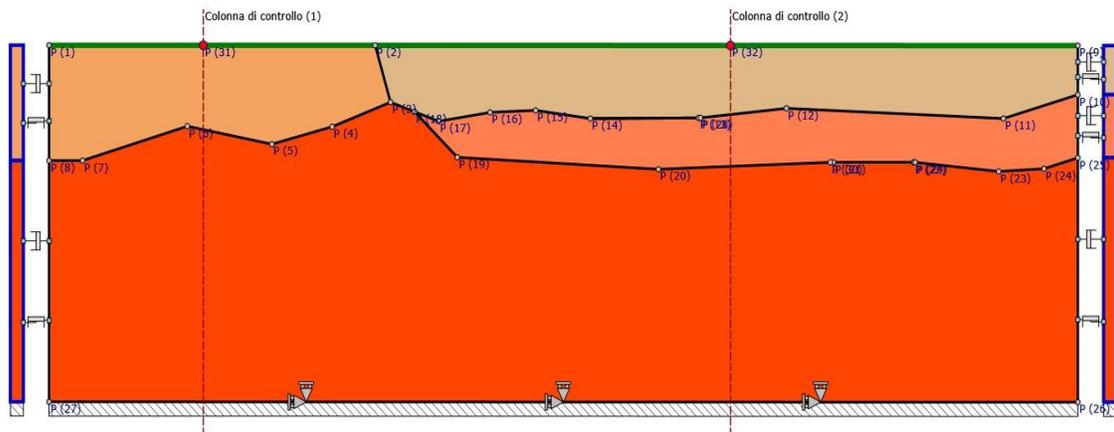


Fig. 25: Modello stratigrafico 2D.

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

Strato	Descrizione	S[m]	ρ [Kg/m ³]	V_s [m/s]	γ	Curva decadimento
Misto	terreno pervalentemente	-	1800.00	200.00	0.35	Sand Seed & Idriss

superficiale	sabbioso					(1970)
Misto superficiale 2	terreno prevalentemente limoso argilloso	-	1800.00	150.00	0.40	Vucetic & Dobry, PI=15
Ghiaie e sabbie	-	-	1800.00	500.00	0.30	EPRI (93), 50-120 ft
Sabbie	Sabbie prevalenti	-	1800.00	300.00	0.35	Sand Seed & Idriss (1970)

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche strati.

dove:

- S = spessore del singolo strato;
- ρ = densità di massa del singolo strato;
- V_s = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato;
- γ = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato;

Non essendo in possesso di prove dinamiche eseguite su campioni raccolti in sito (colonne risonanti, taglio ciclico, ecc...) che restituiscano le curve dinamiche G/G_0 e il Damping, si sono adottati modelli disponibili in bibliografia, **avendo comunque cura di sceglierli in base alle classificazioni litologiche disponibili dai sondaggi e CPT presenti.**

I tipi di suolo su cui si è basata l'analisi di RSL, sono riportati nella stessa tabella sopra riportata. In all. 2 sono riportate le rispettive curve di decadimento.

Per quanto concerne il bedrock, si è ipotizzata una densità di 22 kN/mc.

5.2.6 Analisi

L'analisi RSL è stata condotta con il software LSR-2D (Stacec), in modalità monodimensionale poiché siamo in presenza di una situazione piano parallela. Il metodo utilizzato è quello Lineare Equivalente con un rapporto di deformazione efficace pari a 0.55, desunto dalla nota relazione:

$$Ratio = \frac{M - 1}{10}$$

dove M = magnitudo di riferimento (6.5).

Il DampingFactor è pari al 5%. Secondo la nota formula:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0.55$$

$\eta = 1$ per un Damping pari al 5%.

Gli accelerogrammi di output, calcolati secondo l'opzione "outcrop" per il piano di posa in superficie, sono riportati in all. 6; in all. 7 sono riportati gli spettri di risposta di output calcolati in superficie.

I risultati che verranno riportati nel seguito si riferiscono ai punti "di controllo" presi a riferimento per il calcolo della RSL posti sull'attuale piano campagna.

Le verifiche che seguono sono state condotte considerando come classe d'uso la II vista la tipologia degli edifici interessati.

I risultati delle analisi di risposta sismica locale sono rappresentati nel seguito in termini di parametri caratteristici dei moti sismici calcolati in superficie, spettri di risposta di pseudo- accelerazione PSA dei moti sismici calcolati in superficie e fattori di amplificazione del moto sismico, definiti come:

$$FA = \frac{PSA\ output}{PSA\ input}$$

dove:

PSA output = spettro di risposta di pseudo-accelerazione del moto sismico, calcolato in superficie, nell'intorno del picco massimo di accelerazione così come definito in ICMS;

PSA input = spettro di risposta di pseudo-accelerazione del moto sismico di input, così come definito in ICMS

$$FA_{PGA} = \frac{PGA(output)}{PGA(input)}$$

dove:

PGA (output) = accelerazione orizzontale massima di output in superficie per t=0

PGA (input) = accelerazione orizzontale massima di input su suolo rigido per t=0

In all. 6 (reso in formato digitale) sono riportati gli spettri di risposta ottenuti nei punti di controllo e per i diversi stati limite, inclusi i corrispondenti spettri parametrizzati.

In tab. 2 i relativi fattori d'amplificazione.

Nome sito	Stato Limite	F _{PGA}	FA
P31	SLV	2,371	3,25
P32	SLV	2,755	3,19

Tabella 2 – Fattori di amplificazione F_{PGA} e FA del sito in oggetto in corrispondenza di ogni punto di controllo

La carta di MS di III livello (all. 7) riporta i fattori di amplificazione per i 3 periodi spettrali: 0.1-0.5, 0.4-0.8, 0.7-1.1 s.

I risultati hanno mostrato una risposta in termini di accelerazioni alla superficie, con valori di picco superiori agli spettri semplificati per terreni tipo C (si veda l'allegato 5, che riporta gli spettri di output, e l'all. 6 con gli spettri in formato digitale); si evidenzia anche un'amplificazione per periodi più elevati, intorno a 0,8 – 1,0 sec, non rilevabile con gli approcci semplificati.

Di questo fatto il progettista dovrà tenere conto.

In generale si registra una risposta più alta in corrispondenza del punto P32, comprensibile poiché è quello posto più a sud e dunque su terreni meno rigidi che, per contro, al letto hanno uno strato con buone caratteristiche meccaniche. L'andamento generale delle accelerazioni orizzontali è riportato nella figura che segue, con il grafico che riproduce i valori di accelerazione sul piano campagna.

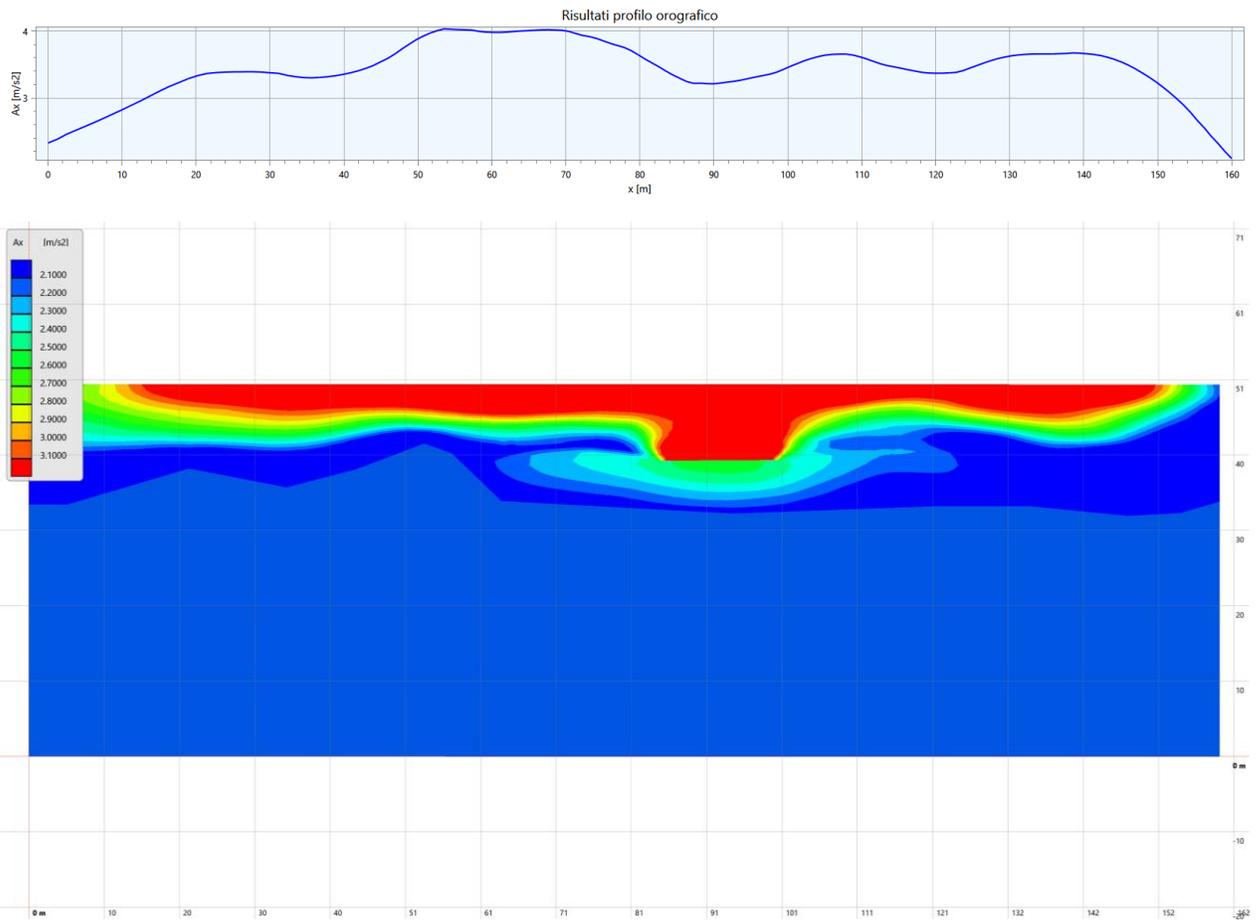


Fig. 26: Profilo recante i valori di accelerazione con il grafico delle accelerazioni in superficie

Di seguito si riporta la relativa tabella per la parametrizzazione degli spettri di output ottenuti.

PARAMETRI SPETTRI DI OUTPUT

<i>Punto di controllo</i>	$A_g [g]$	F_0	S	$A_{max} [g]$	$T_b [sec]$	$T_c [sec]$	$T_d [sec]$
P (31)	0.125	3.142	2.371	0.296	0.128	0.384	2.100
P (32)	0.125	2.878	2.755	0.344	0.227	0.681	2.100

Tabella 3 – Valori ottenuti per la parametrizzazione degli spettri in corrispondenza di ogni punto di controllo relativamente allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

dove:

- A_g : accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F0$: valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- S : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- A_{max} : punto di ancoraggio a $T=0$ dello spettro di output;
- T_b : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_c : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- T_d : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

5.2.7 Verifica alla liquefazione

Le onde sismiche interagiscono con le particolari condizioni locali (caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno e ammassi rocciosi, e proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono) e questa interazione determina una specifica **risposta sismica locale** (insieme delle modifiche in termini di ampiezza, frequenza e durata che un moto sismico subisce propagandosi attraverso un deposito di materiali sciolti e degli spostamenti indotti dal moto ondoso nel deposito stesso) rispetto a quella che si avrebbe in un sito di riferimento ideale (rigido con piano campagna orizzontale). Siti con differenti condizioni locali manifestano differenti risposte sismiche ad uno stesso terremoto, ovvero uno stesso sito risponde in maniera diversa a terremoti differenti. Le modifiche del moto sismico prodotte dalle condizioni locali vengono indicate come **effetti di sito**.

Gli effetti di sito possono riguardare sia i terreni a comportamento sismico stabile, i quali sotto le sollecitazioni dinamiche si mantengono lontani dalla rottura e sono soggetti a deformazioni permanenti limitate, sia i terreni a comportamento instabile, che viceversa giungono a rottura e si deformano permanentemente in maniera significativa.

Nel primo caso si parla di effetti:

- stratigrafici = amplificazione delle sollecitazioni e del moto sismico, dovuta a fenomeni di risonanza tra onde sismiche e terreni causati principalmente dal contrasto di rigidità tra un basamento roccioso e di depositi di materiali sciolti sovrastanti;
- di bordo = risposta sismica ai margini di depositi di valle;
 - topografici = modifiche delle caratteristiche del moto sismico causate da fenomeni di focalizzazione delle onde per effetto della configurazione topografica del terreno.

Nel secondo caso, per effetti di sito si intendono:

- liquefazione = riduzione della resistenza a taglio causata dall'aumento delle pressioni

interstiziali in un terreno saturo granulare, tale da generare deformazioni permanenti significative o anche l'annullamento delle tensioni efficaci nel terreno;

- cedimenti per addensamento = cedimenti e deformazioni permanenti dei terreni a grana grossa non saturi causati dalle vibrazioni sismiche;

- cedimenti per riconsolidazione = cedimenti dovuti alla dissipazione delle sovrappressioni interstiziali che si accumulano in un terreno fine soffice e plastico durante uno scuotimento sismico;

- instabilità dei versanti = perdita di equilibrio di un versante dovuto all'incremento delle azioni destabilizzanti (forze di inerzia proporzionali all'accelerazione sismica) ed alla riduzione delle azioni resistenti (decadimento della resistenza a taglio ed accumulo di pressioni interstiziali).

Per la valutazione quantitativa del fenomeno di liquefazione gli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" nonché le linee guida AGI (Associazione Geotecnica Italiana) "Aspetti Geotecnici della Progettazione in Zona Sismica" forniscono metodi specifici di calcolo ed elencano tutti i casi in cui è possibile escludere che si verifichi tale fenomeno, ovvero:

- Eventi sismici attesi di magnitudo inferiore a 5;
- Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni free-field minori di 0.1g;
- Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni free-field minori di 0.15 g e terreni ricadenti in una delle seguenti categorie:

-contenuto di fine superiore al 20% con indice di plasticità $IP > 10$;

-contenuto di fine superiore al 35% e resistenza $(N_{160}) > 20$

-frazione fine trascurabile e resistenza $(N_{160}) > 25$;

dove $(N_{160}) > 20$ valore della resistenza penetrometrica N_{SPT} misurato nel corso delle prova Standard Penetration Test, normalizzato;

- Profondità media stagionale della falda superiore ai 15m dal piano campagna;
- Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 28 (a) nel caso di materiale con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ ed in Figura 28(b) per coefficienti di uniformità $U_c > 3.5$.

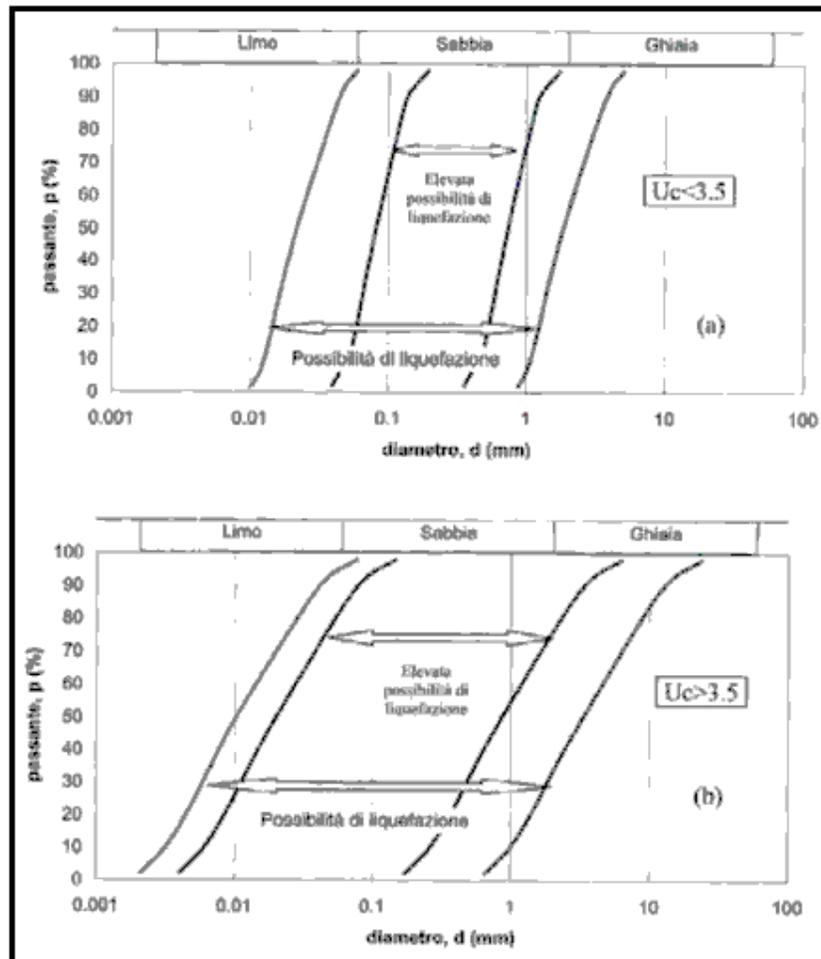


Fig.27 – Fusi granulometrici dei terreni suscettibili a liquefazione

Fatta questa premessa possiamo valutare se il sito in oggetto, o parte di esso, sia da sottoporre a verifica di liquefazione.

Come abbiamo visto nel paragrafo relativo alla sismicità storica, i terremoti attesi possono avere magnitudo superiori a 5, pur essendo il contributo percentuale alla pericolosità del sito derivante da terremoti con magnitudo > 5 , piuttosto bassa.

Le accelerazioni attese sono sempre ampiamente sopra la soglia riportata nelle linee guida della Protezione Civile.

Per quanto concerne i dati granulometrici e lo stato di addensamento dei depositi alluvionali, pur non essendovi molti riscontri, è possibile fare le seguenti considerazioni:

- dall'analisi delle indagini condotte, e in particolare dall'ERT, è possibile stabilire che l'area Nord è prevalentemente caratterizzata da depositi granulari;
- il grado di addensamento è talvolta compatto;
- la falda è presente a quote inferiori a 15m da p.c.

E' dunque opportuno condurre delle verifiche relative al potenziale di liquefazione, che si baseranno sulle velocità V_s misurate nel corso delle indagini geofisiche condotte e sull'analisi di RSL relativamente alla determinazione del rapporto dello sforzo ciclico (CSR).

Per quanto concerne i dati di base, per il calcolo si farà riferimento alle condizioni più penalizzanti riscontrate:

- accelerazione di picco pari a 0.296 g;
- velocità $V_s = 200$ m/s (velocità minima misurata della coltre detritica immersa in acqua mediante Masw)
- Magnitudo di riferimento $M_w = 6.6$
- Profondità della falda 1 m da p.c.

La verifica è stata eseguita supponendo la presenza di una percentuale di limo e/o argilla compresa tra 5% e 35%.

In base ai dati ottenuti dalle prove geognostiche condotte, dall'indagine MASW e dal valore della ag in superficie ottenuto dallo studio della RSL, si è proceduto alla verifica a liquefazione per i livelli con ghiaia e sabbia incontrati fino alla profondità di 20 m da p.c., così come previsto dalle linee guida AGI (secondo il metodo Idriss e Boulanger, 2004).

Viene calcolato il coefficiente di sicurezza (previa una "normalizzazione" dei dati ottenuti per riportarli alla magnitudo di riferimento):

$$F_s = CRR_{7.5} / CSR_{7.5}$$

$CSR_{7.5}$ = rapporto di tensione ciclica (per $M=7.5$). Valore ottenuto dall'analisi di RSL condotta.

Come si può osservare NON esiste un reale rischio di liquefazione.

6. CONCLUSIONI FINALI

Lo studio di approfondimento di III livello, effettuato in ottemperanza alle richieste dell'amministrazione comunale ha consentito di **escludere il rischio di liquefazione per il sito in oggetto**, nonché ha consentito di restituire spettri di risposta rigorosi, sulla base dei quali è possibile fare valutazioni realistiche sulle amplificazioni di sito. Si restituisce, per il lotto oggetto di approfondimento, la carta di MS di III livello per i diversi fattori di amplificazioni previsti dalle linee guida relative agli ICMS.

In linea di massima le accelerazioni calcolate presentano dei valori di picco superiori a quanto si otterrebbe con gli approcci semplificati.

In allegato si riportano anche gli spettri di risposta in formato digitale per un opportuno utilizzo in sede di calcolo strutturale.

Rovigo, Luglio 2023

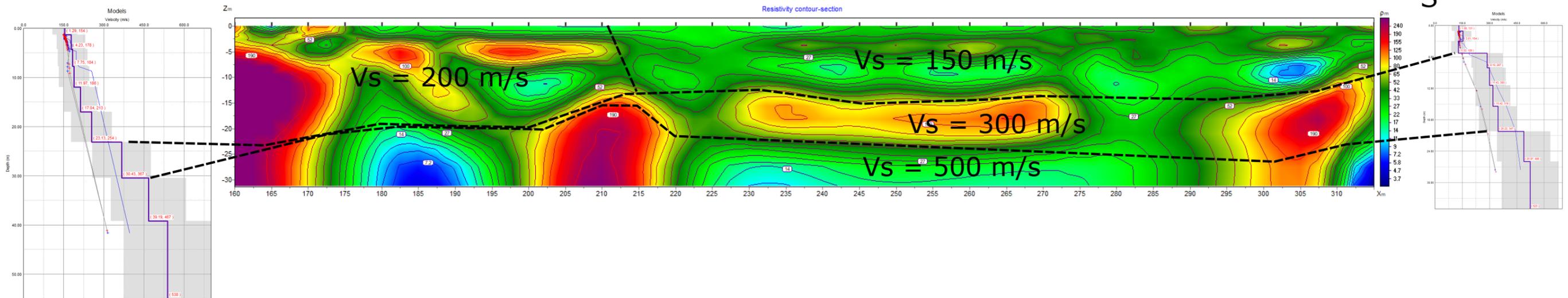

Emilio Farinatti


ALLEGATI

ALLEGATO 1: UBICAZIONE INDAGINI E MODELLO GEOFISICO-STRATIGRAFICO



N



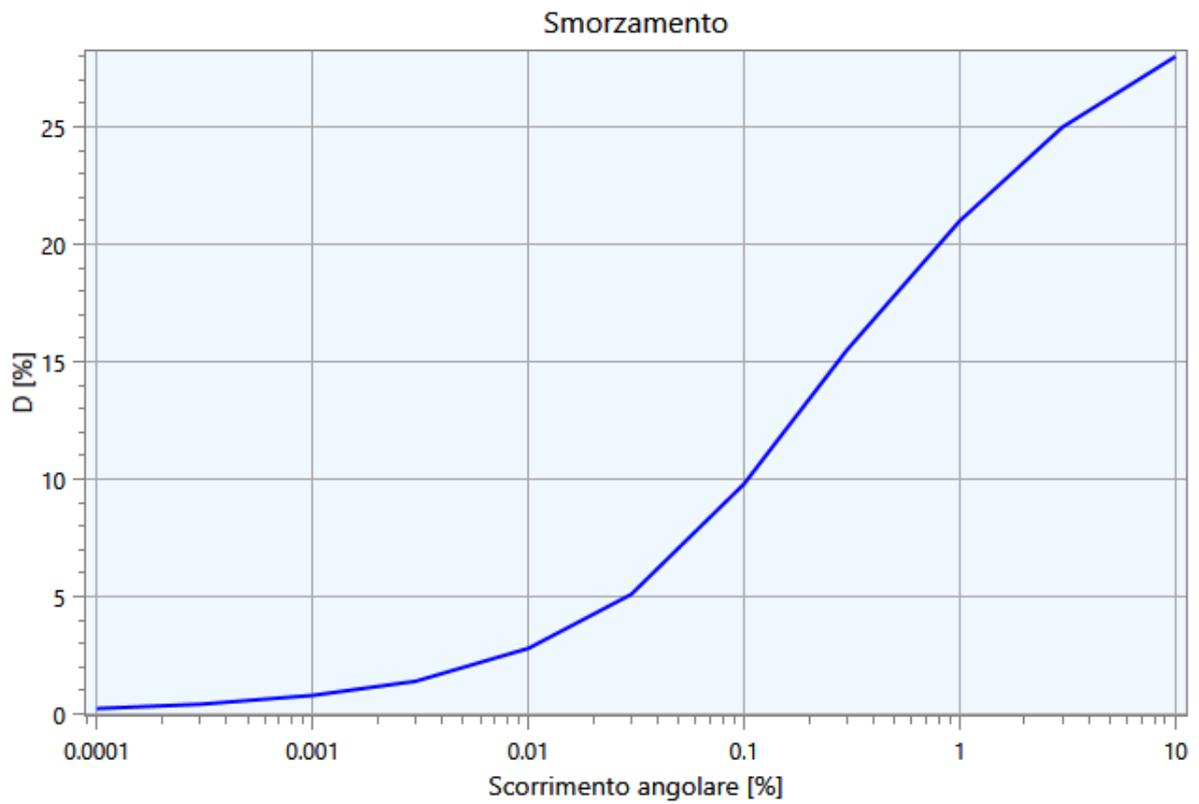
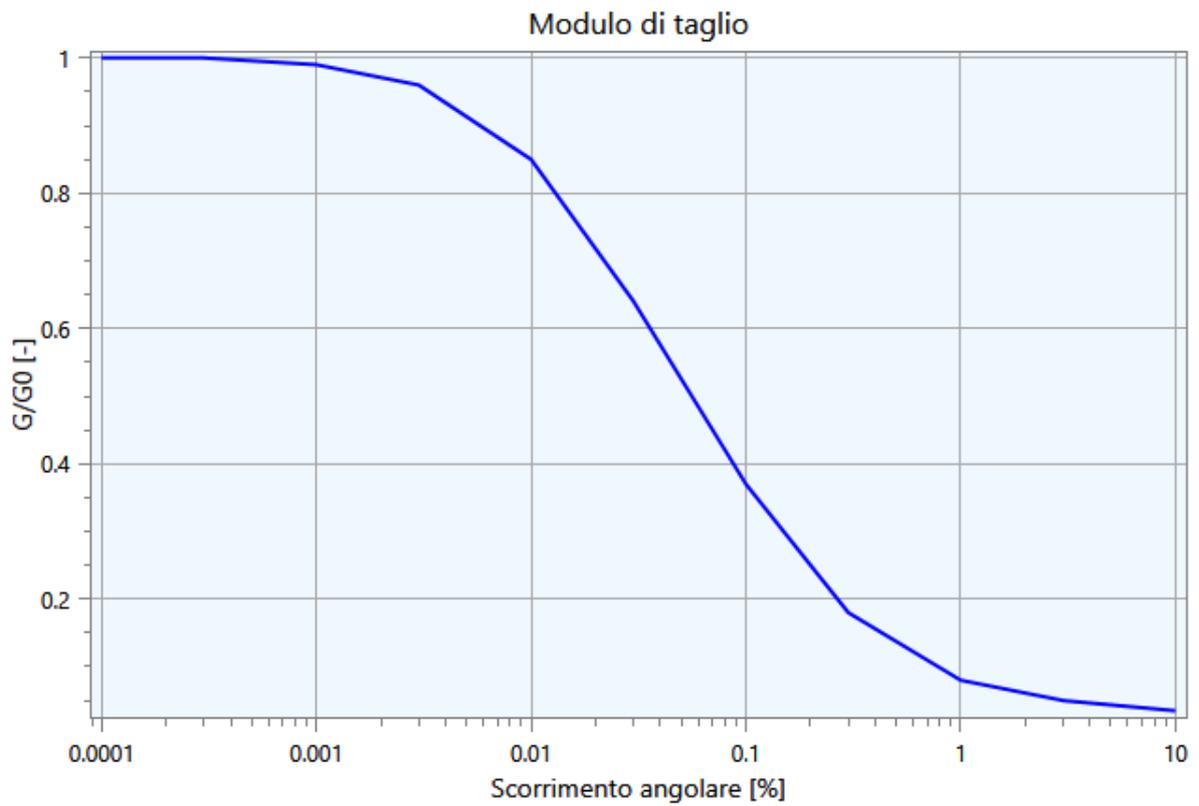
S



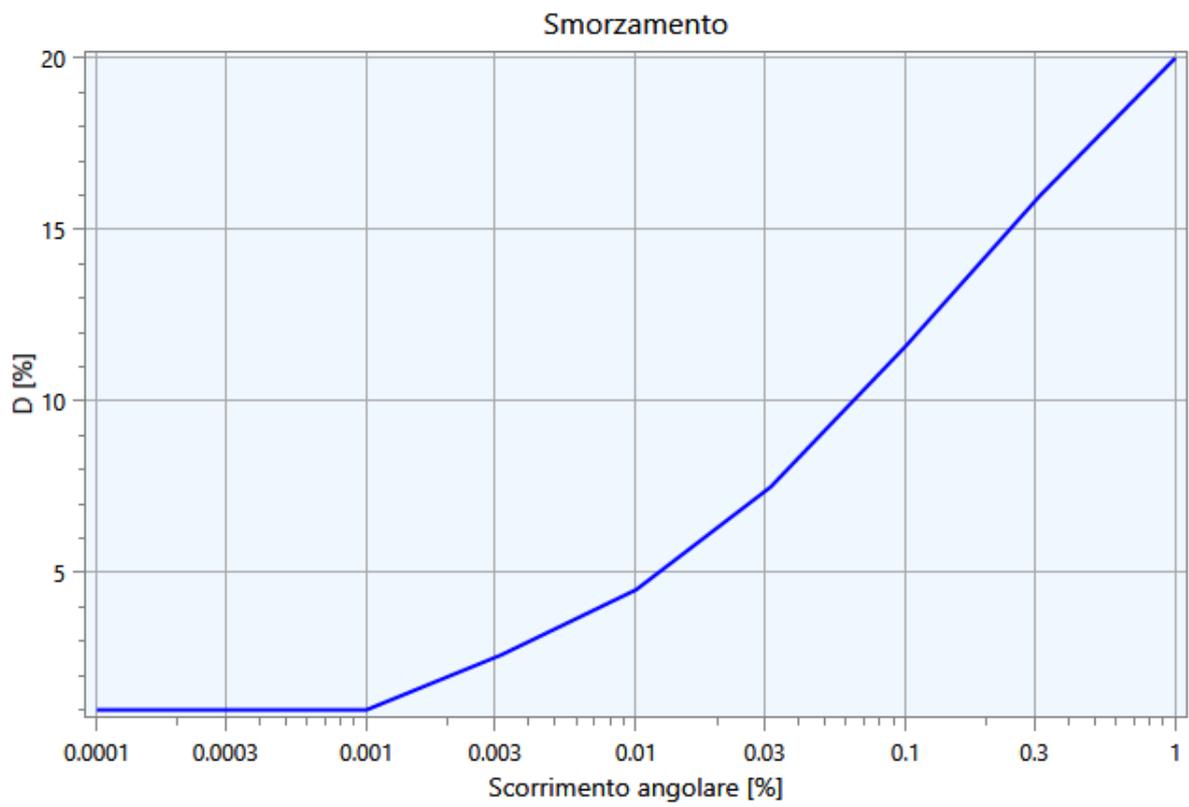
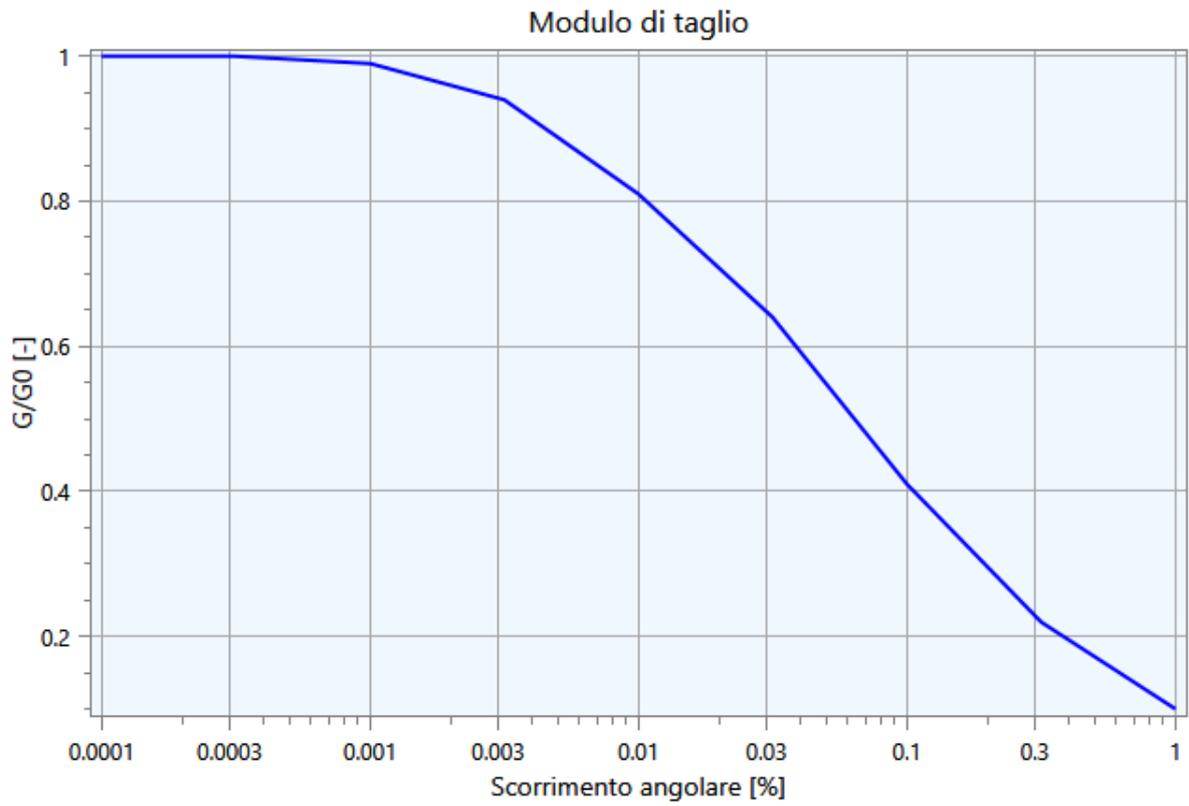
IND.A.G.O. s.n.c.
 Indagini e Opere Ambientali e Geologiche
 via Balzan, 1 - 45100 Rovigo - tel. 0425-25185
www.indago-rovigo.it

ALLEGATO 2 - Curve di Decadimento dei Materiali

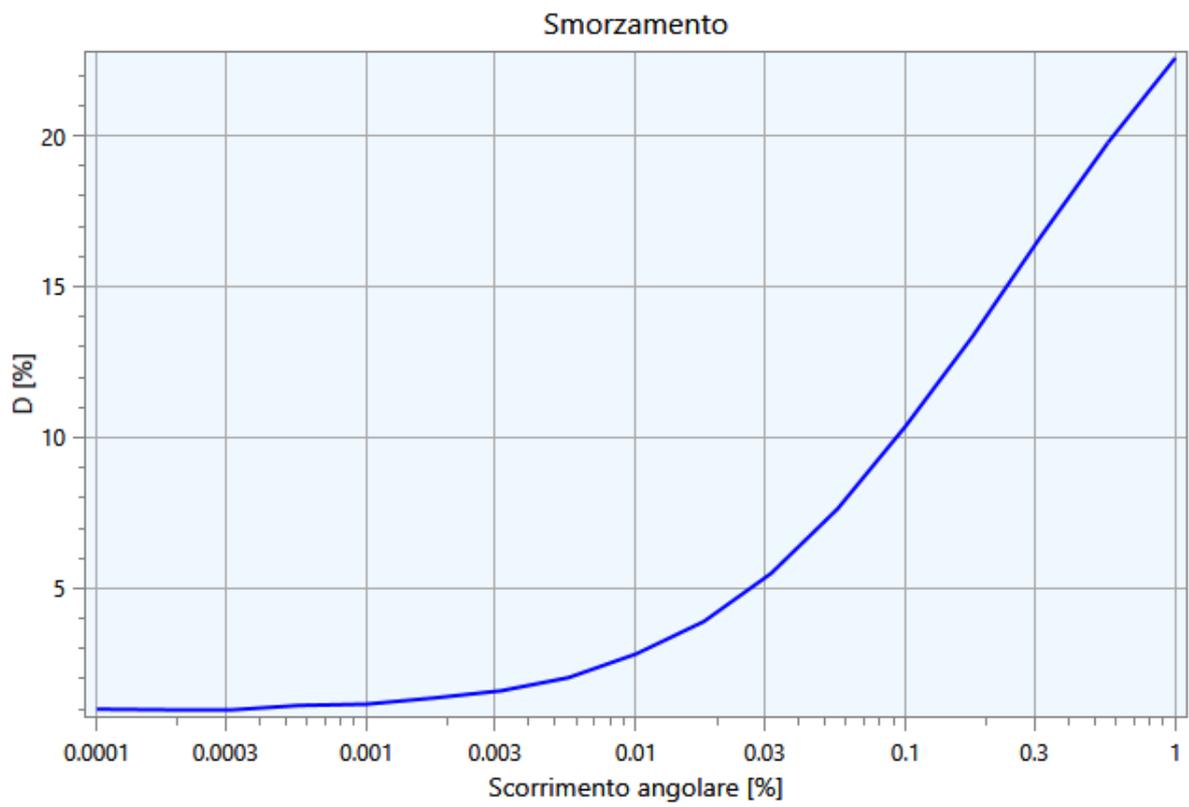
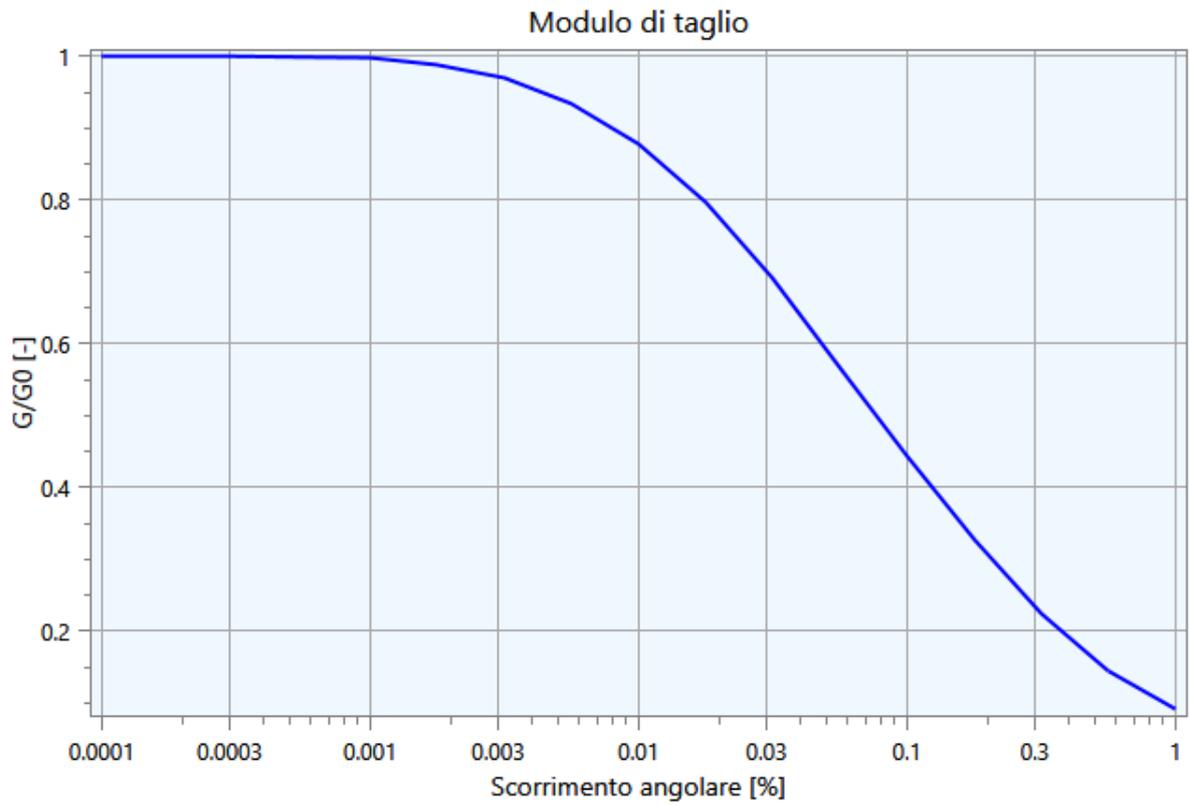
Curva n. 1: Sand Seed & Idriss (1970)



Curva n. 2: Vucetic & Dobry, PI=15

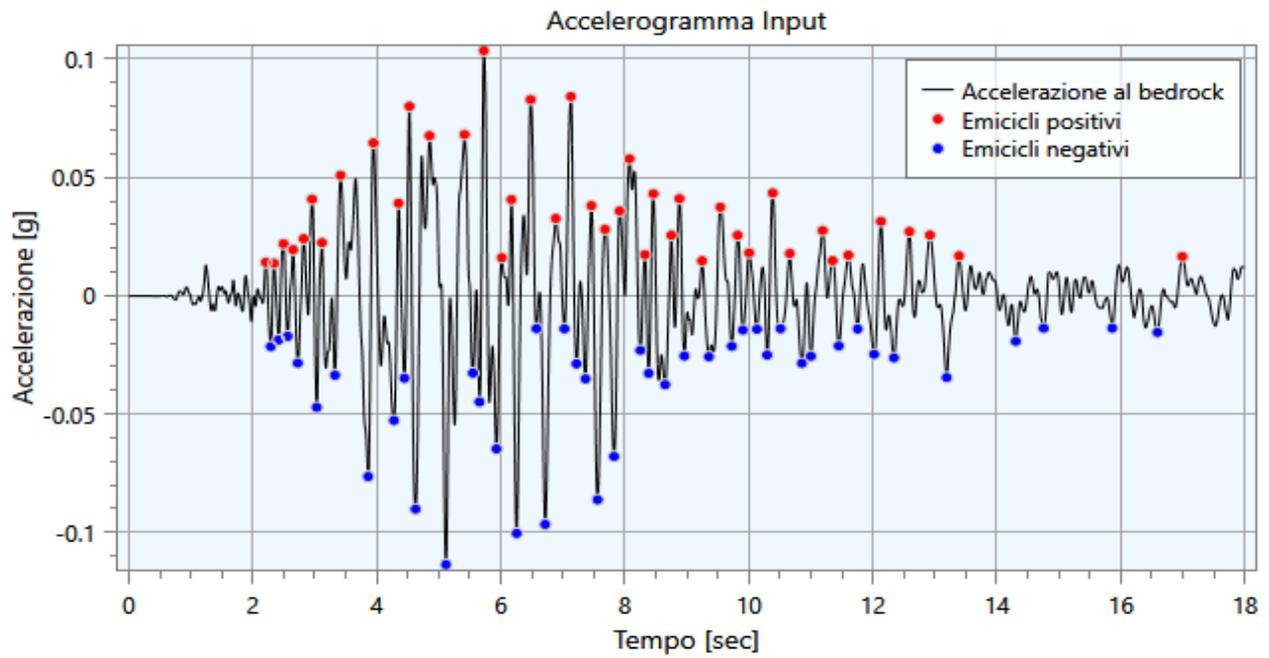


Curva n. 3: EPRI (93), 50-120 ft

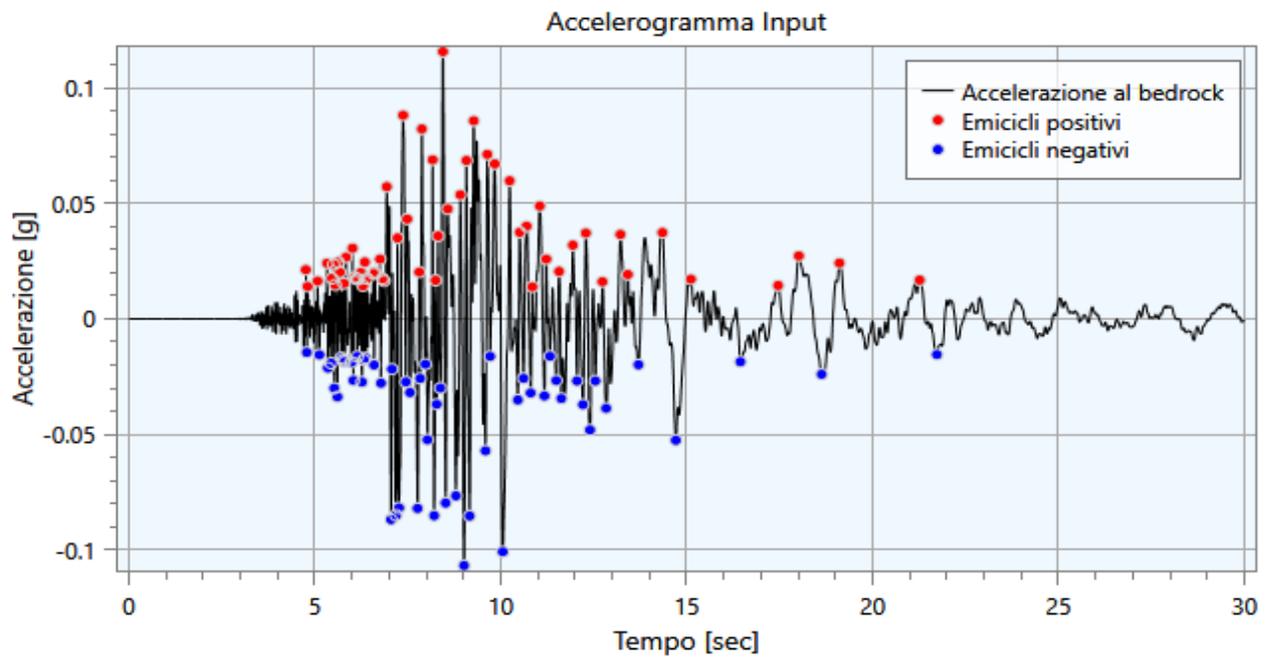


ALLEGATO 3 - Accelerogrammi e Spettri di Input

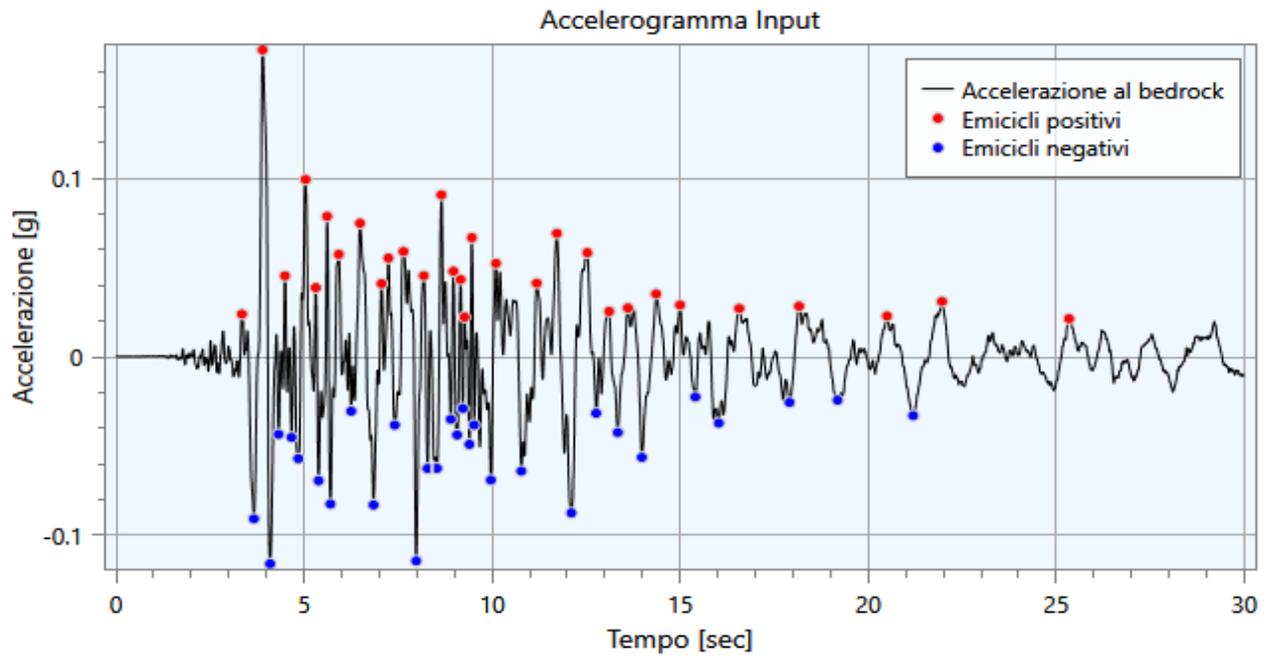
Nome: Acc (1)



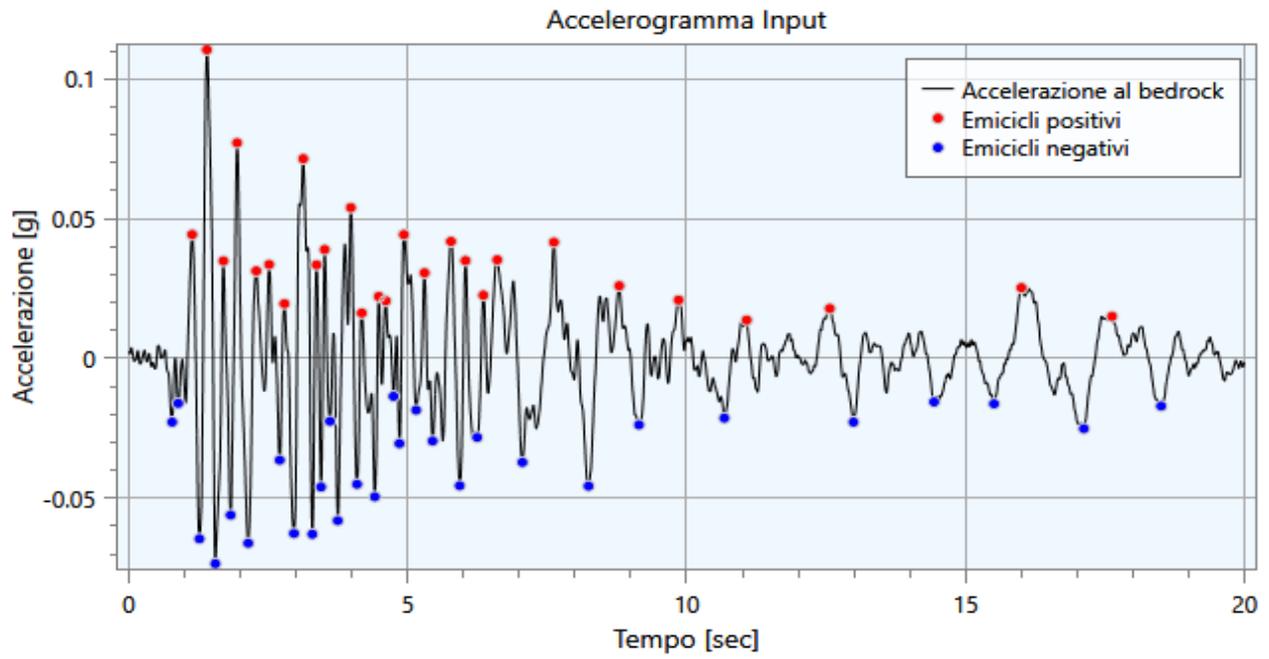
Nome: Acc (2)



Nome: Acc (3)

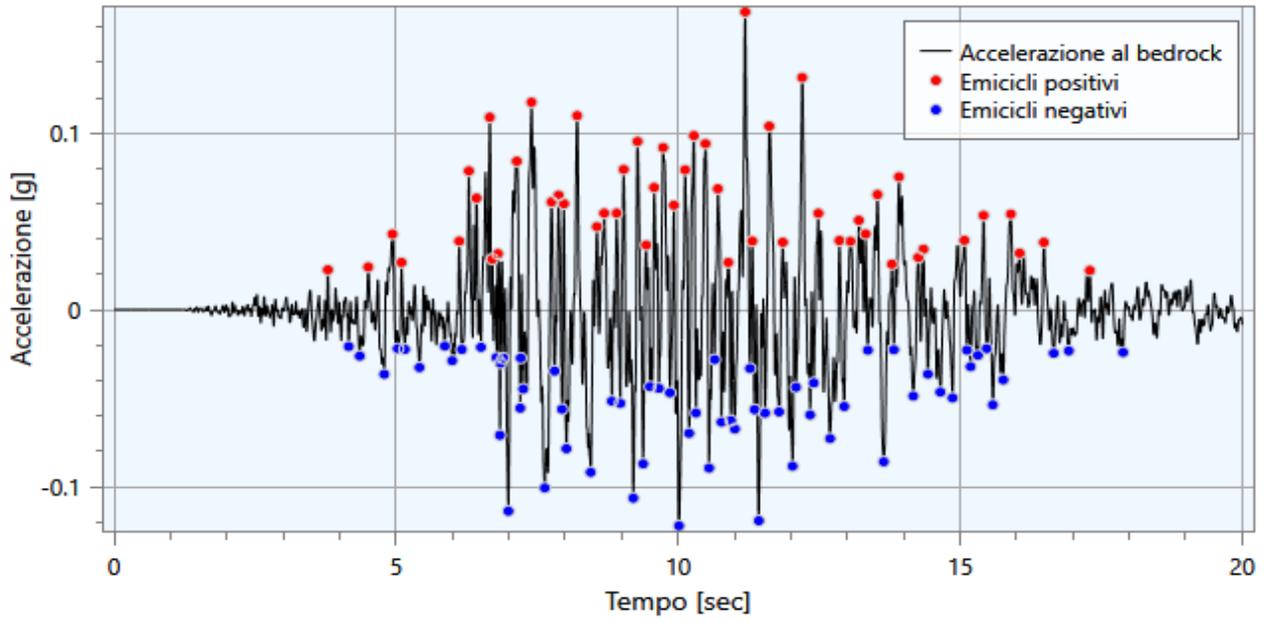


Nome: Acc (4)



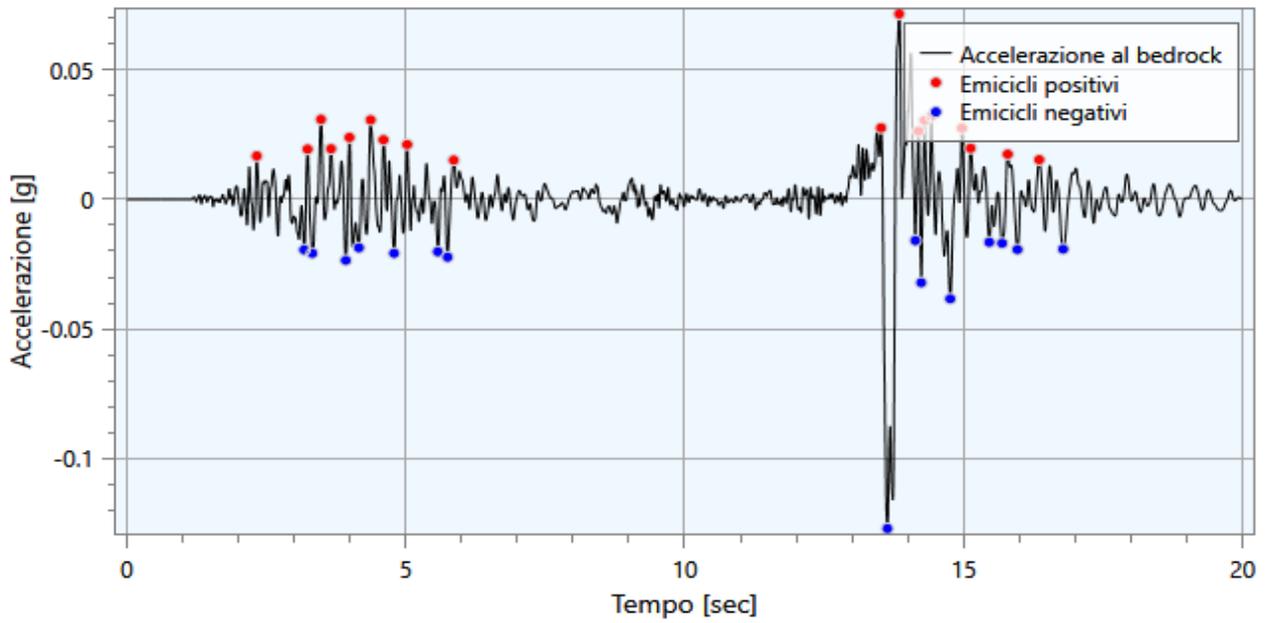
Nome: Acc (5)

Accelerogramma Input

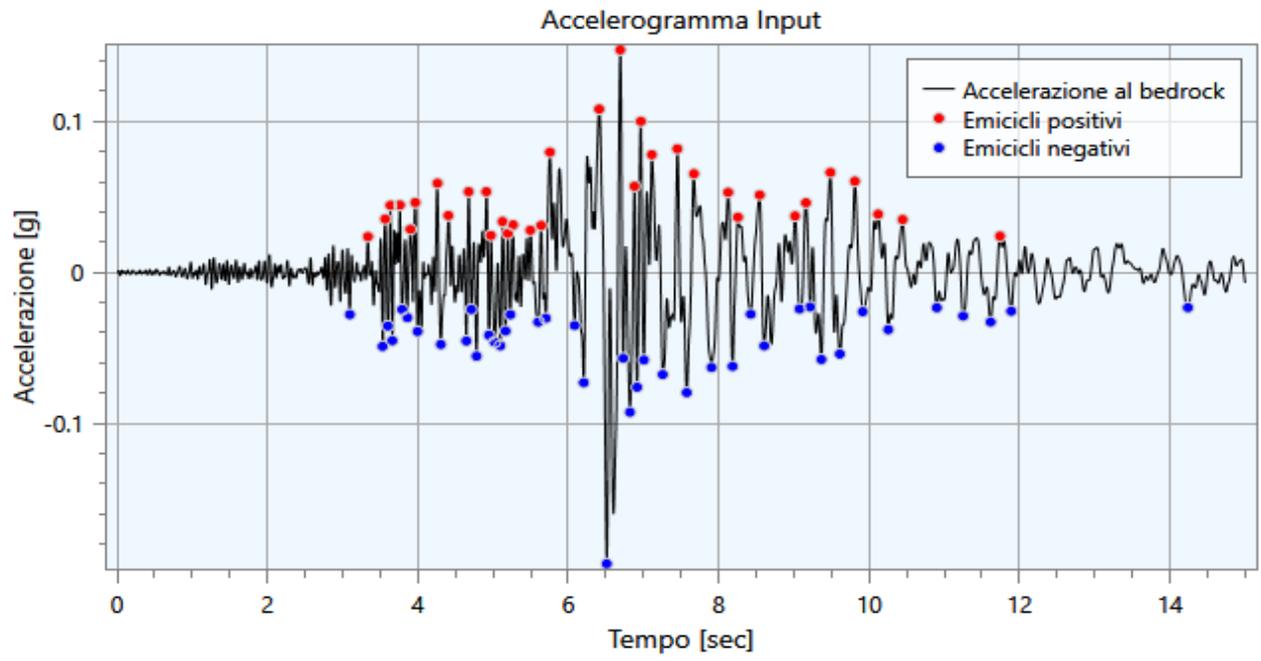


Nome: Acc (6)

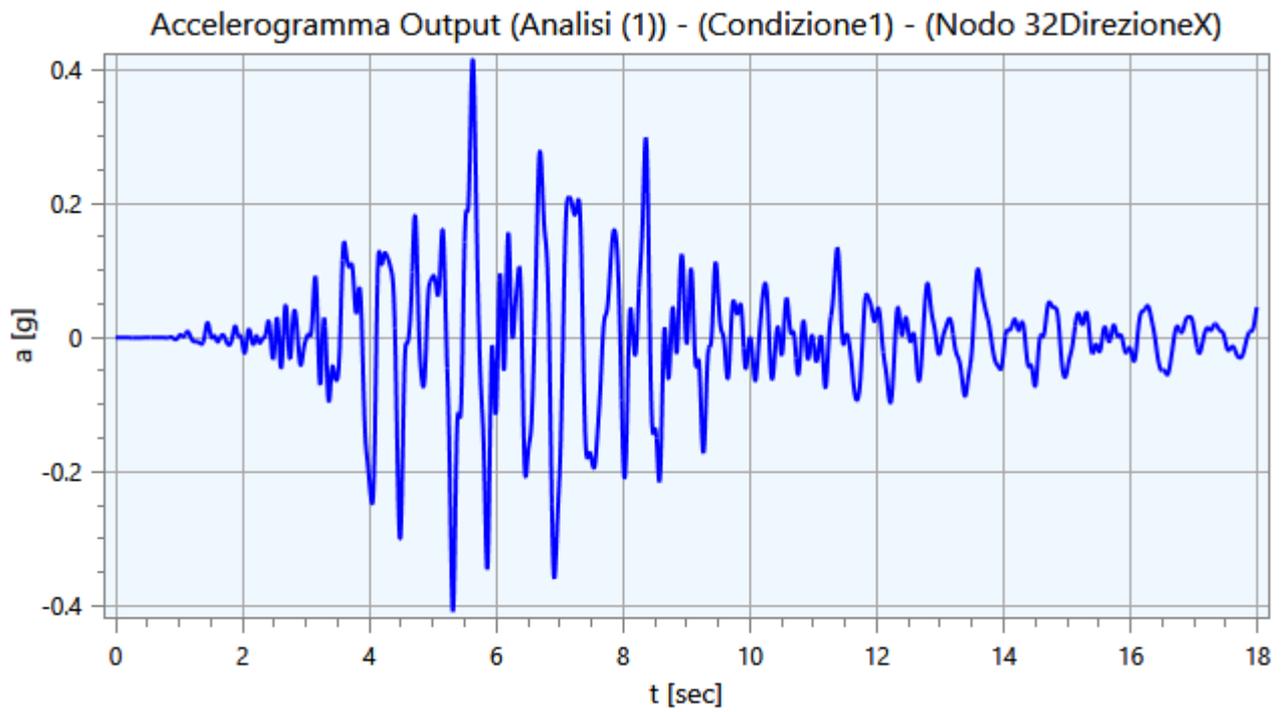
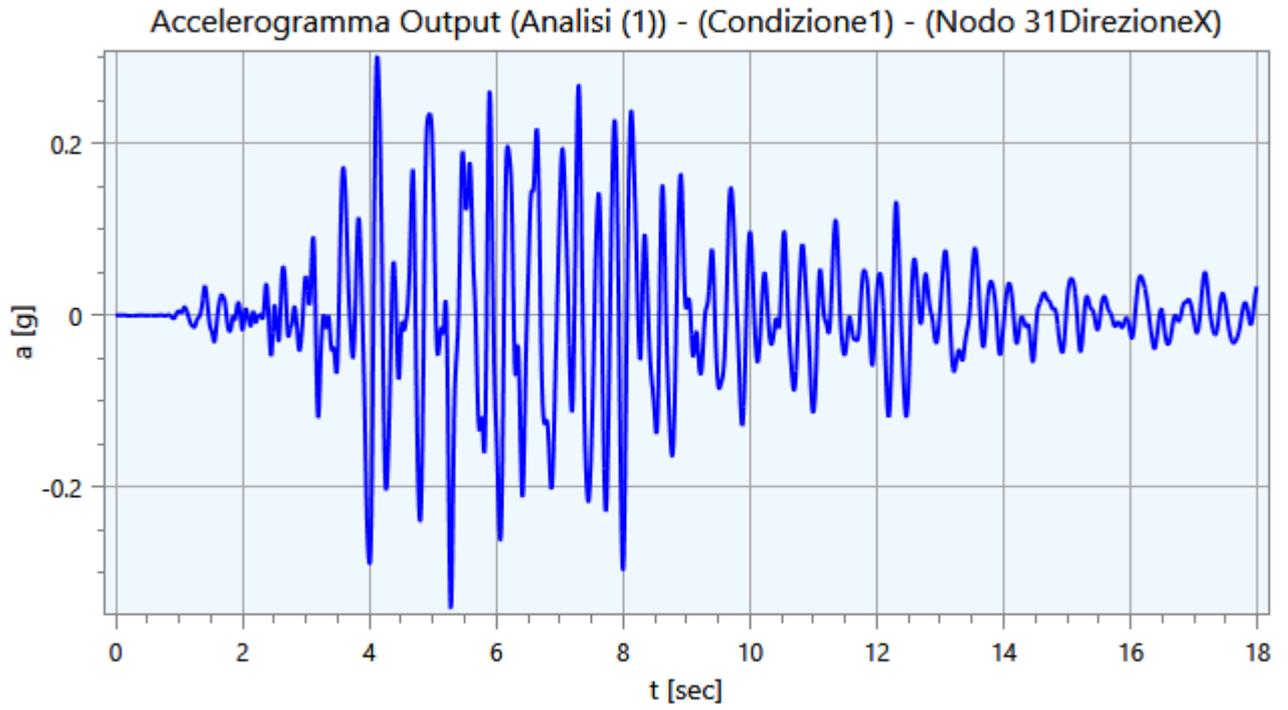
Accelerogramma Input



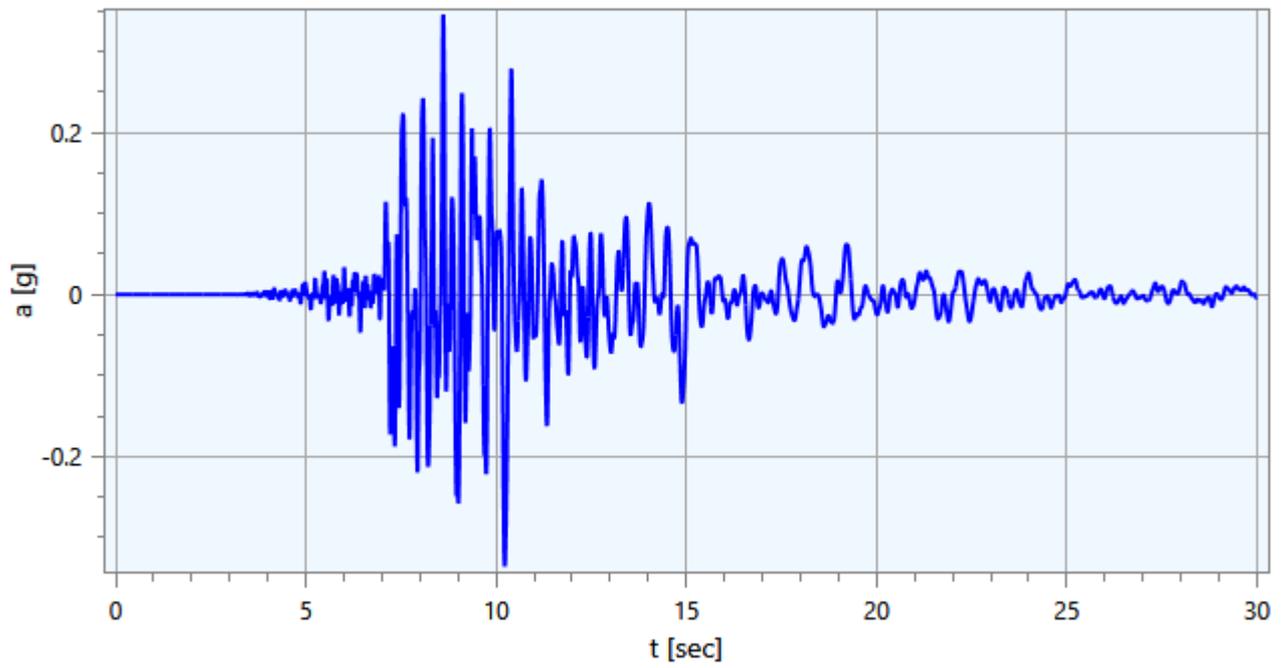
Nome: Acc (7)



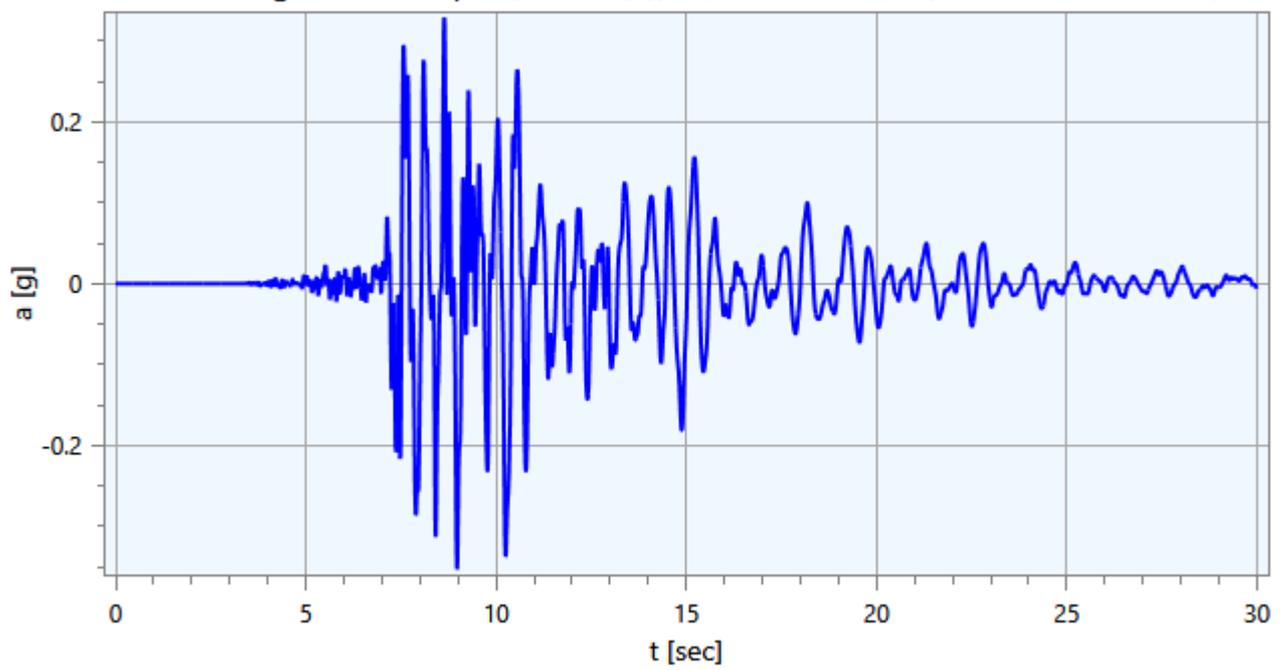
ALLEGATO 4 - Accelerogrammi Output



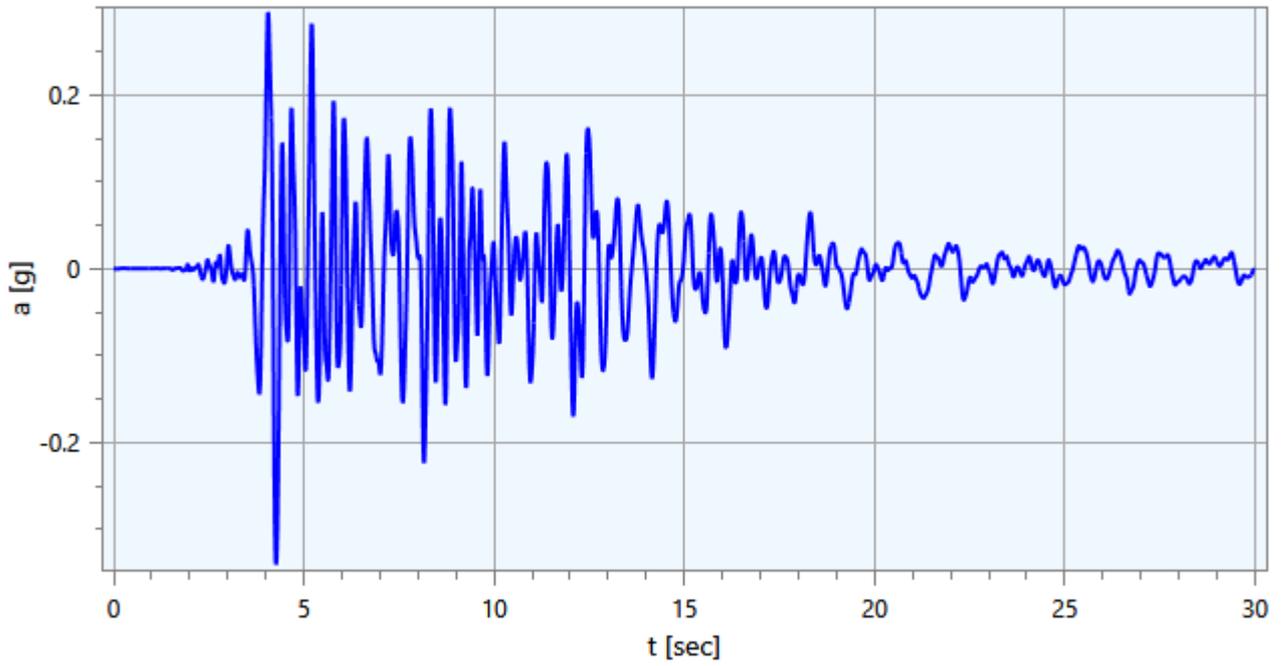
Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione2) - (Nodo 31DirezioneX)



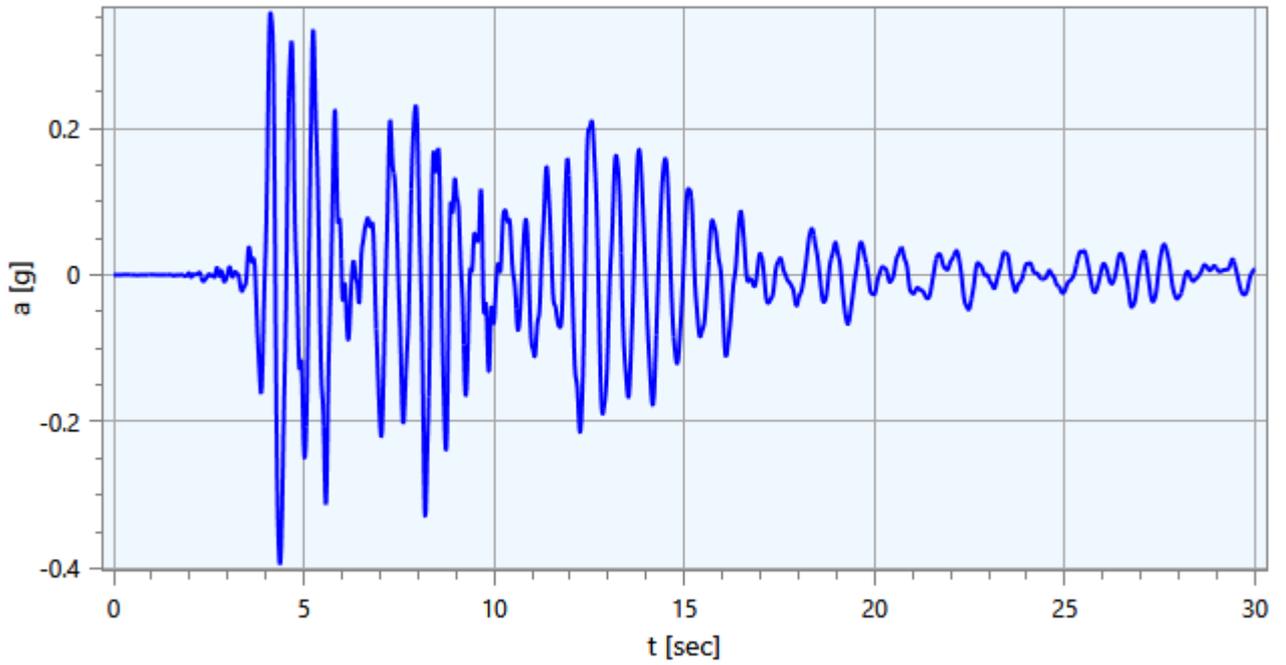
Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione2) - (Nodo 32DirezioneX)



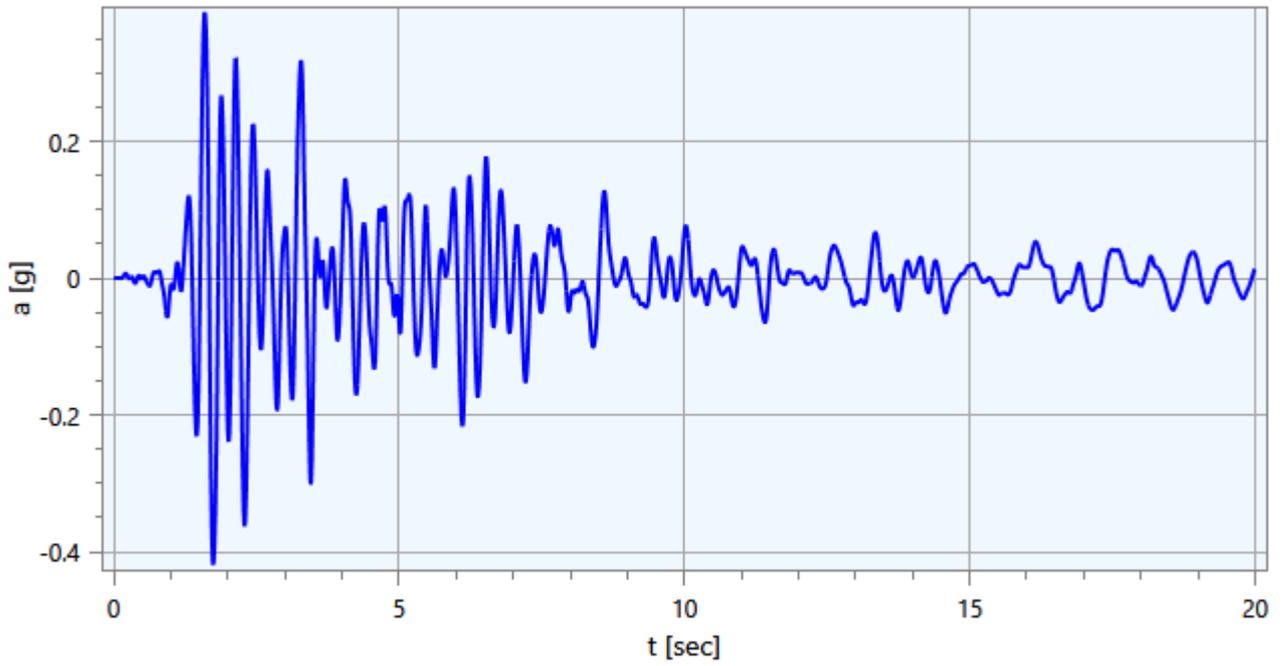
Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione3) - (Nodo 31DirezioneX)



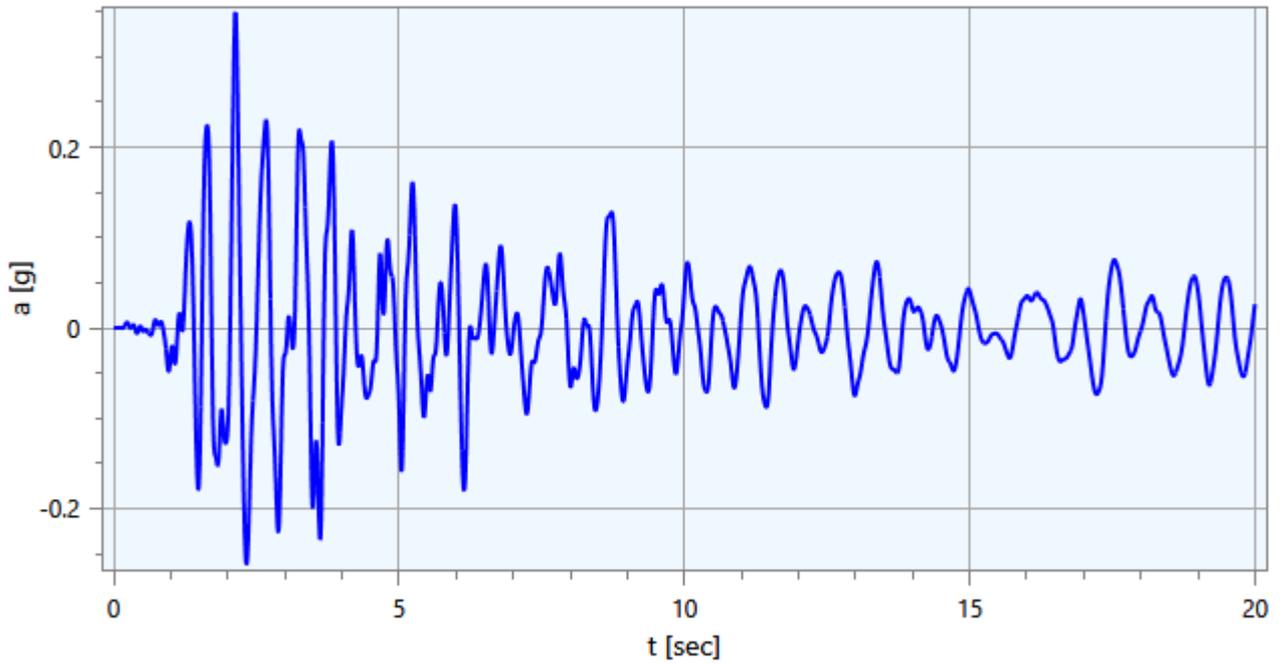
Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione3) - (Nodo 32DirezioneX)



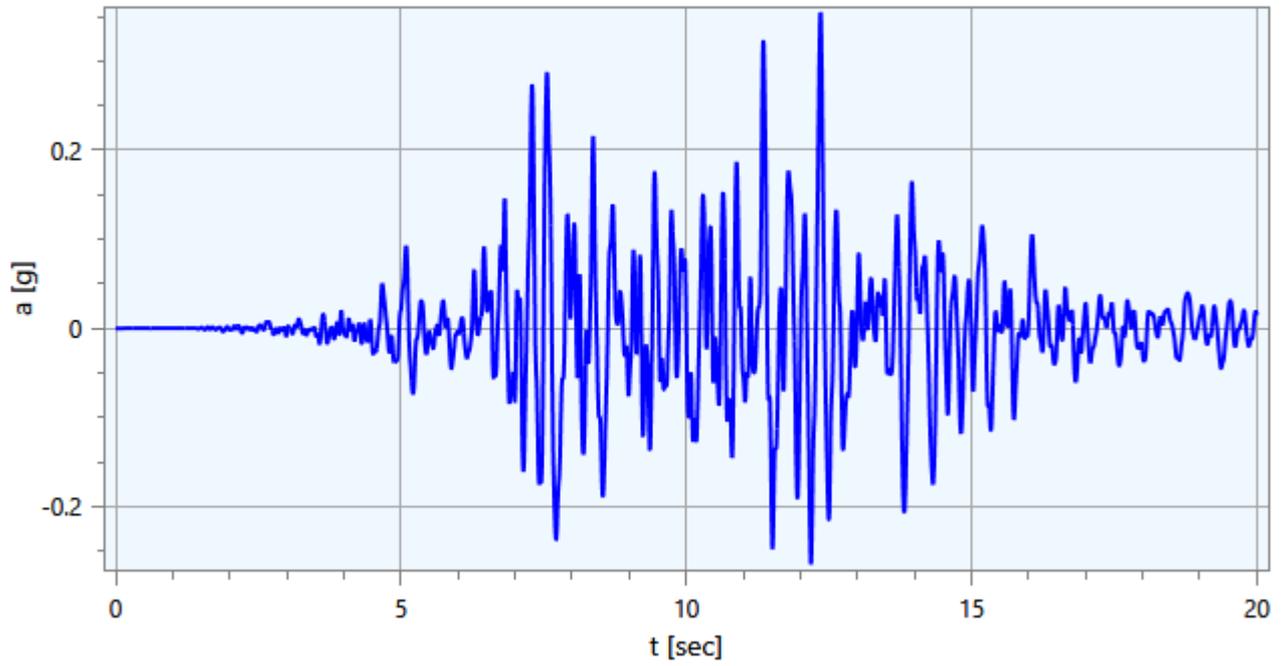
Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione4) - (Nodo 31DirezioneX)



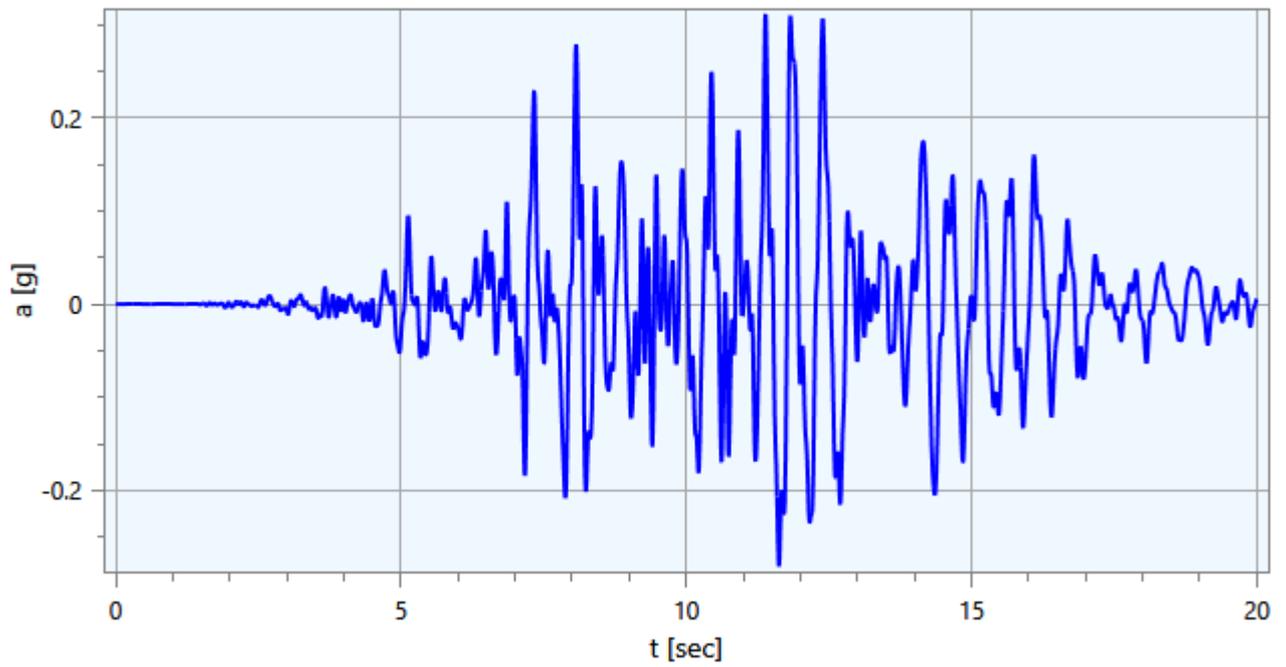
Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione4) - (Nodo 32DirezioneX)



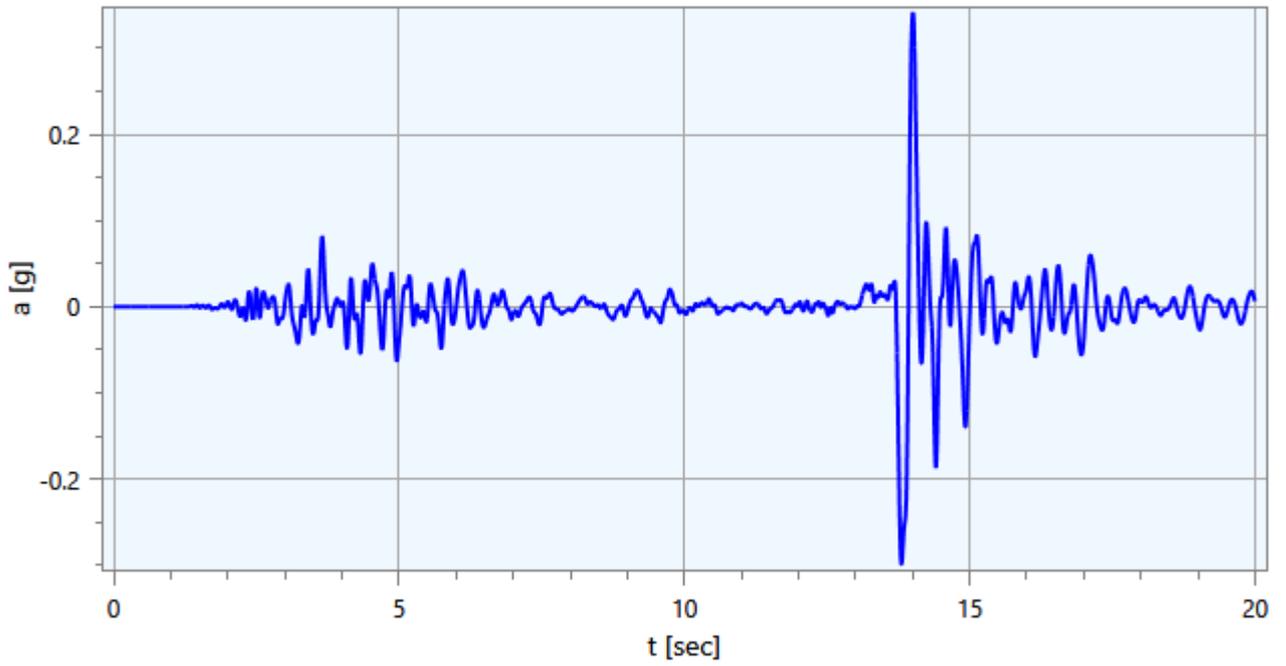
Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione5) - (Nodo 31DirezioneX)



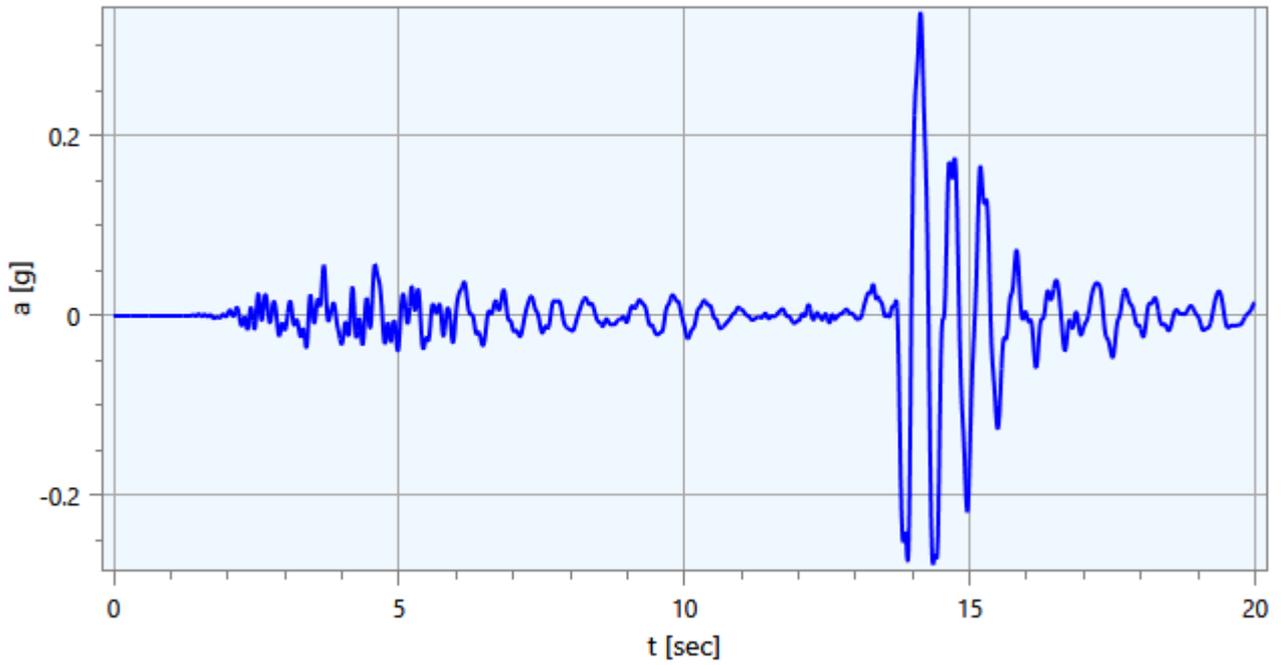
Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione5) - (Nodo 32DirezioneX)



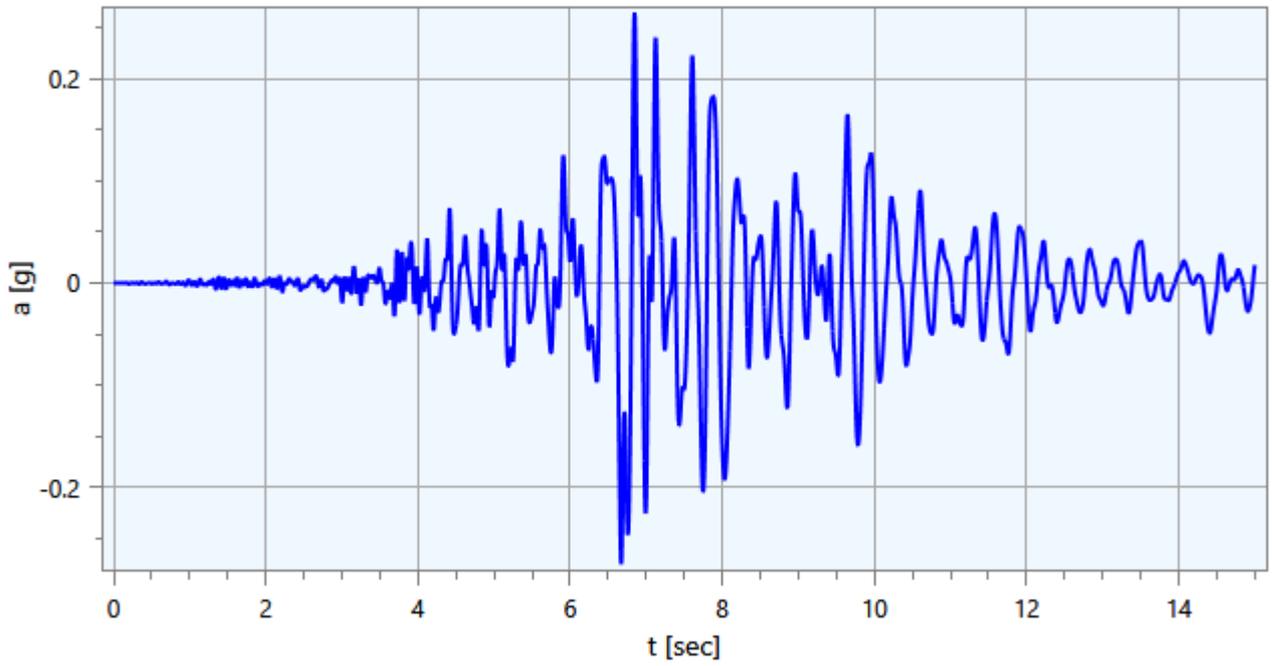
Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione6) - (Nodo 31DirezioneX)



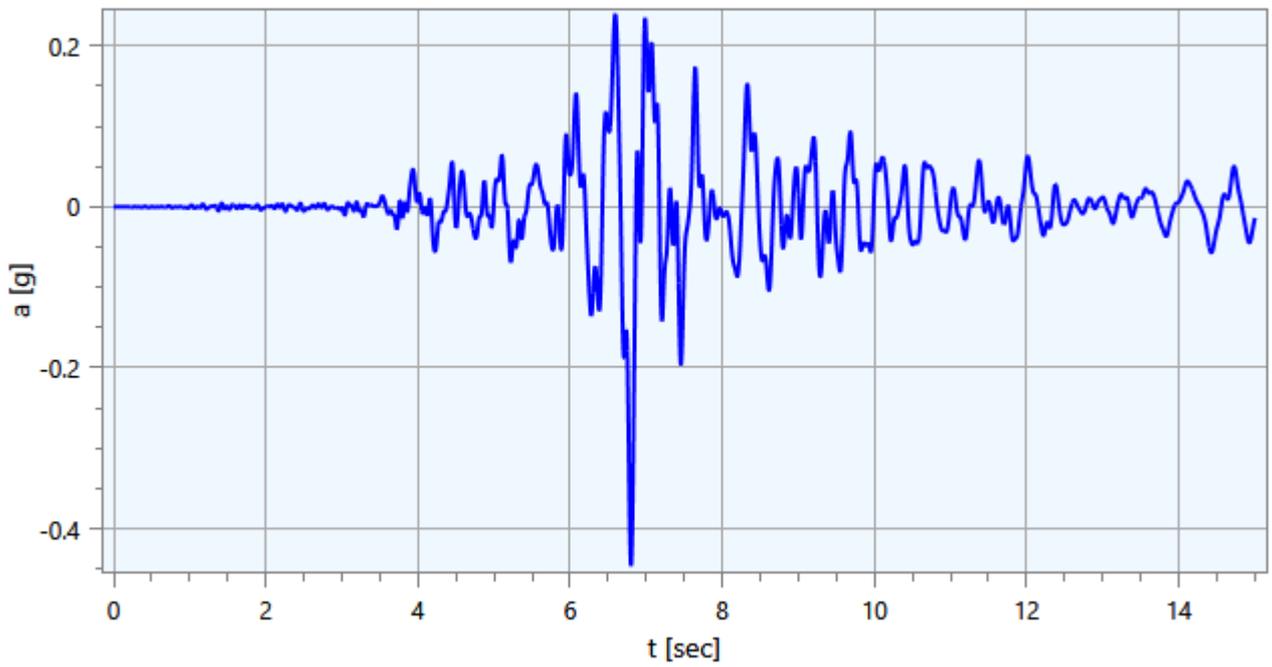
Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione6) - (Nodo 32DirezioneX)



Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione7) - (Nodo 31DirezioneX)

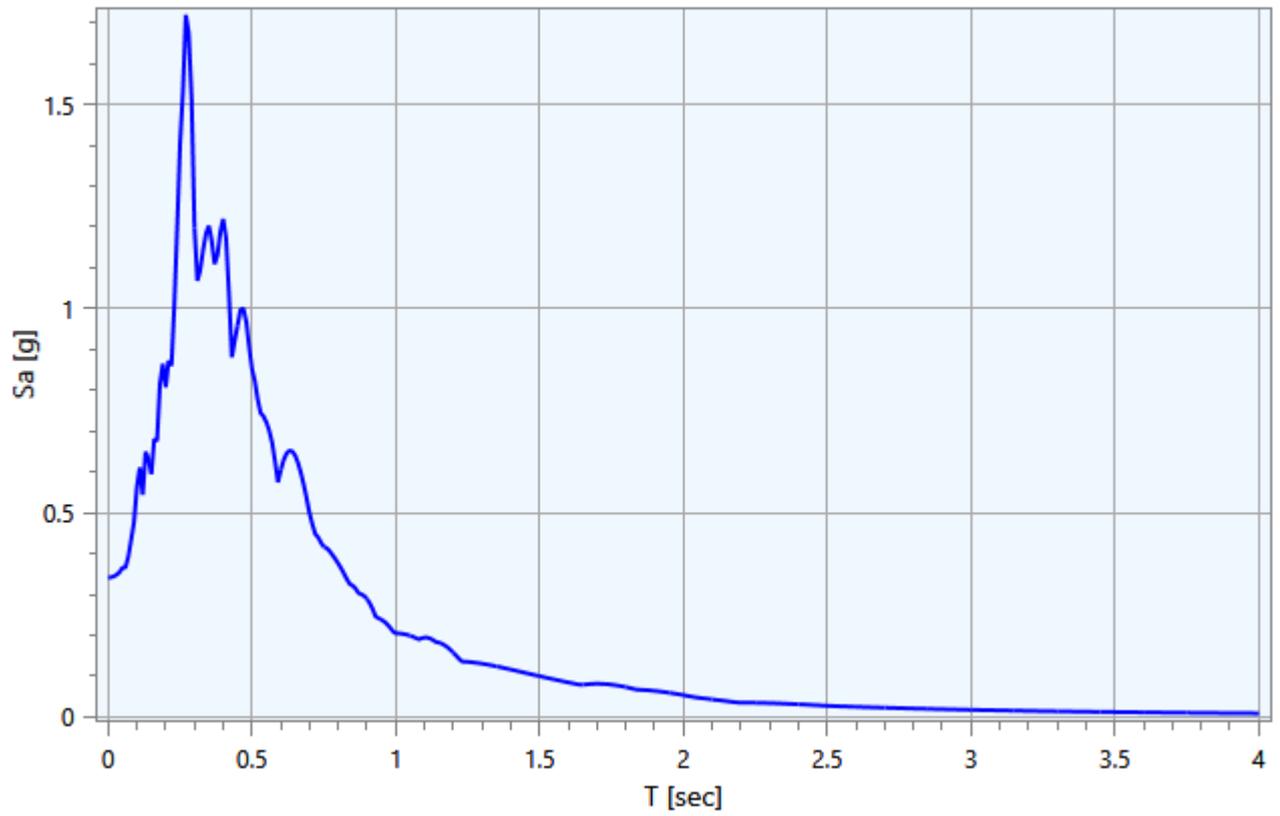


Accelerogramma Output (Analisi (1)) - (Condizione7) - (Nodo 32DirezioneX)

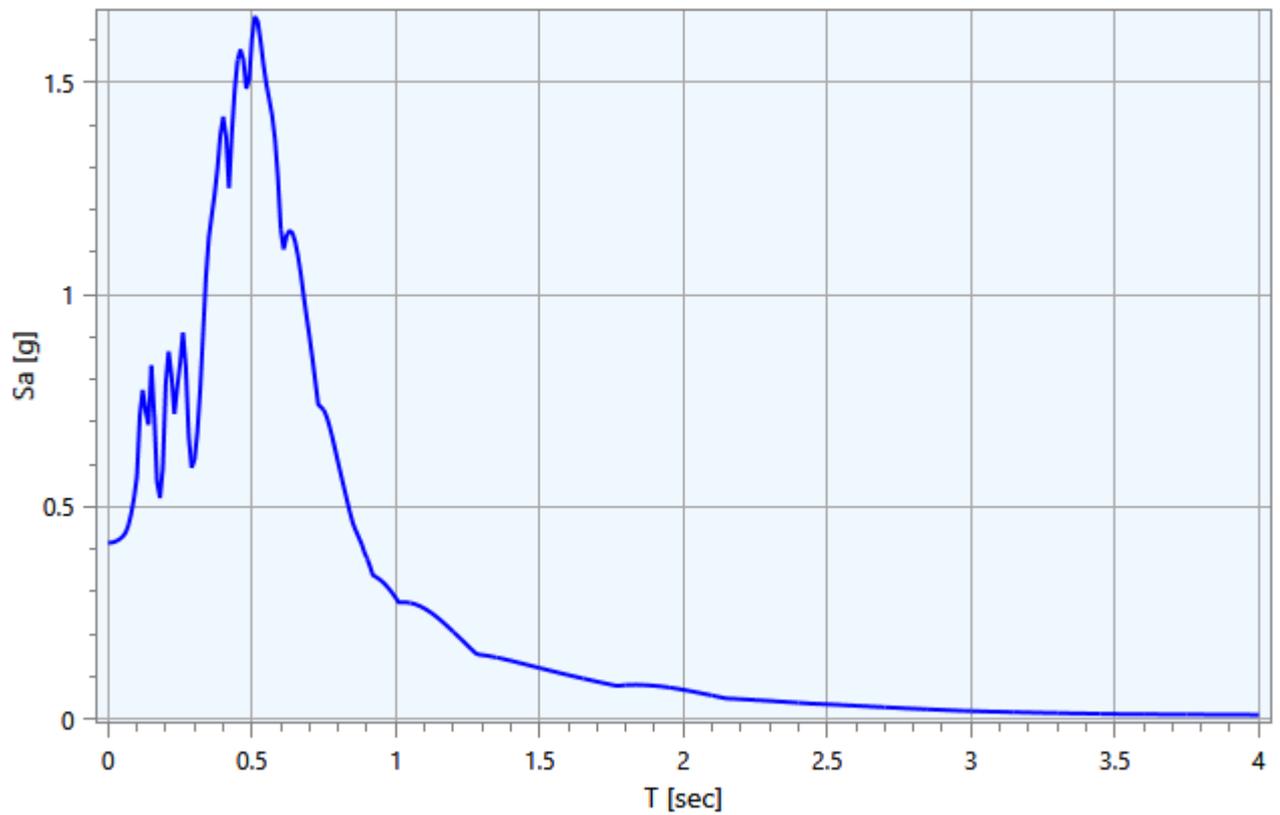


ALLEGATO 5 - Spettri Output

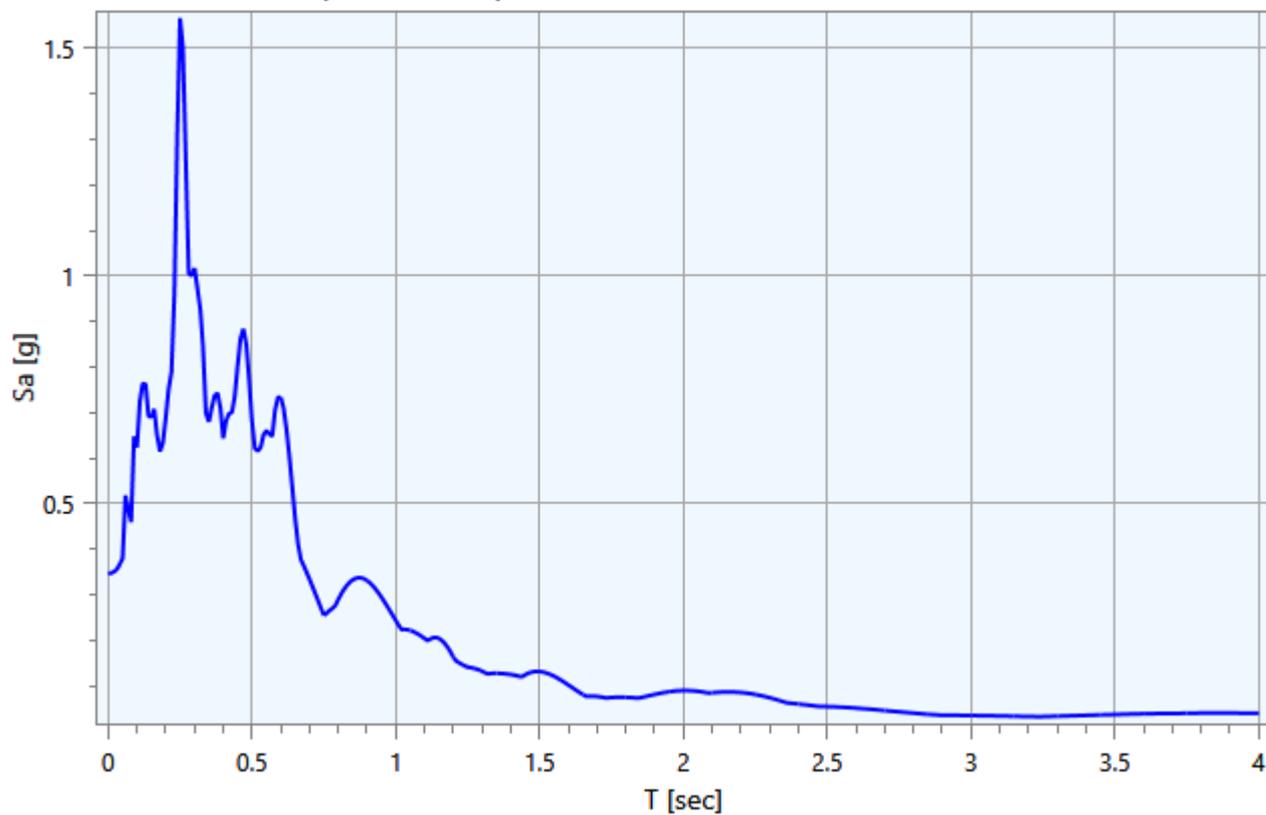
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione1) - (Nodo 31DirezioneX)



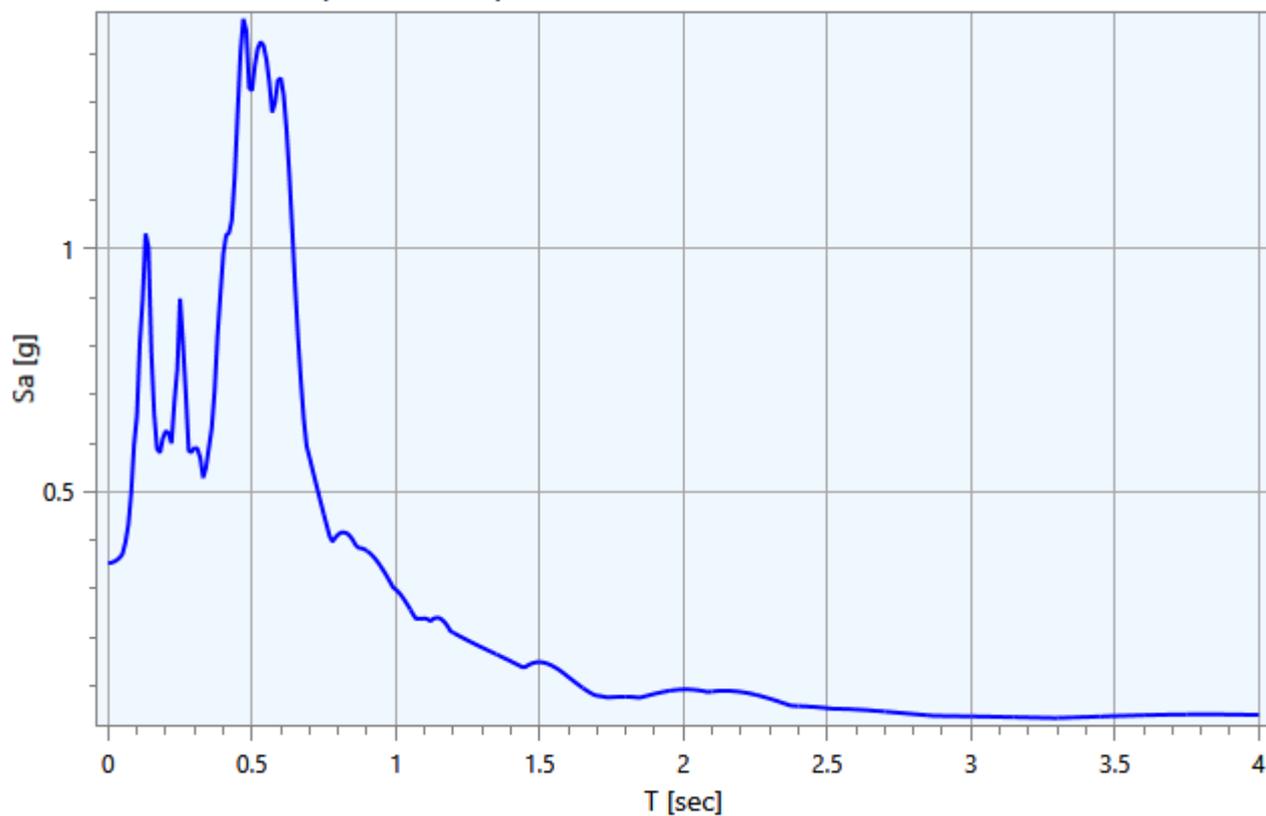
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione1) - (Nodo 32DirezioneX)



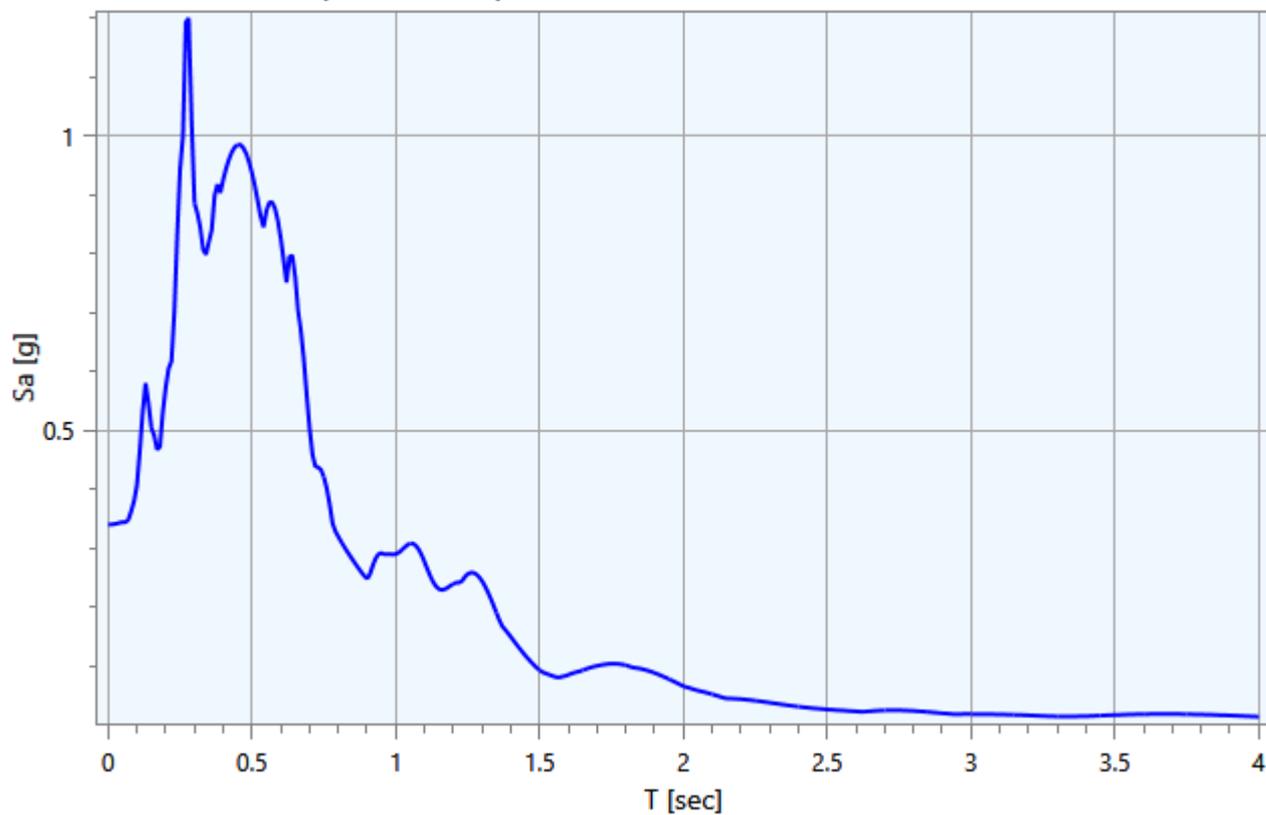
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione2) - (Nodo 31DirezioneX)



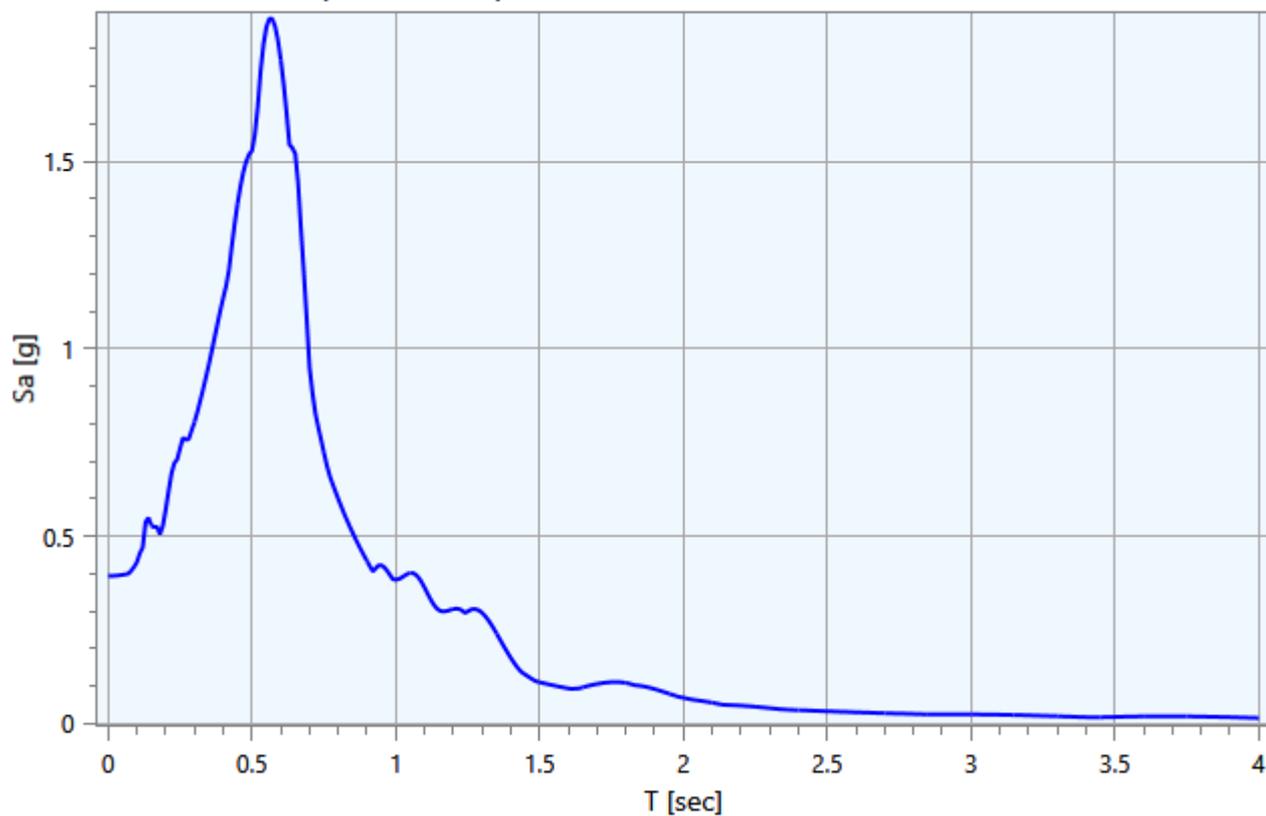
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione2) - (Nodo 32DirezioneX)



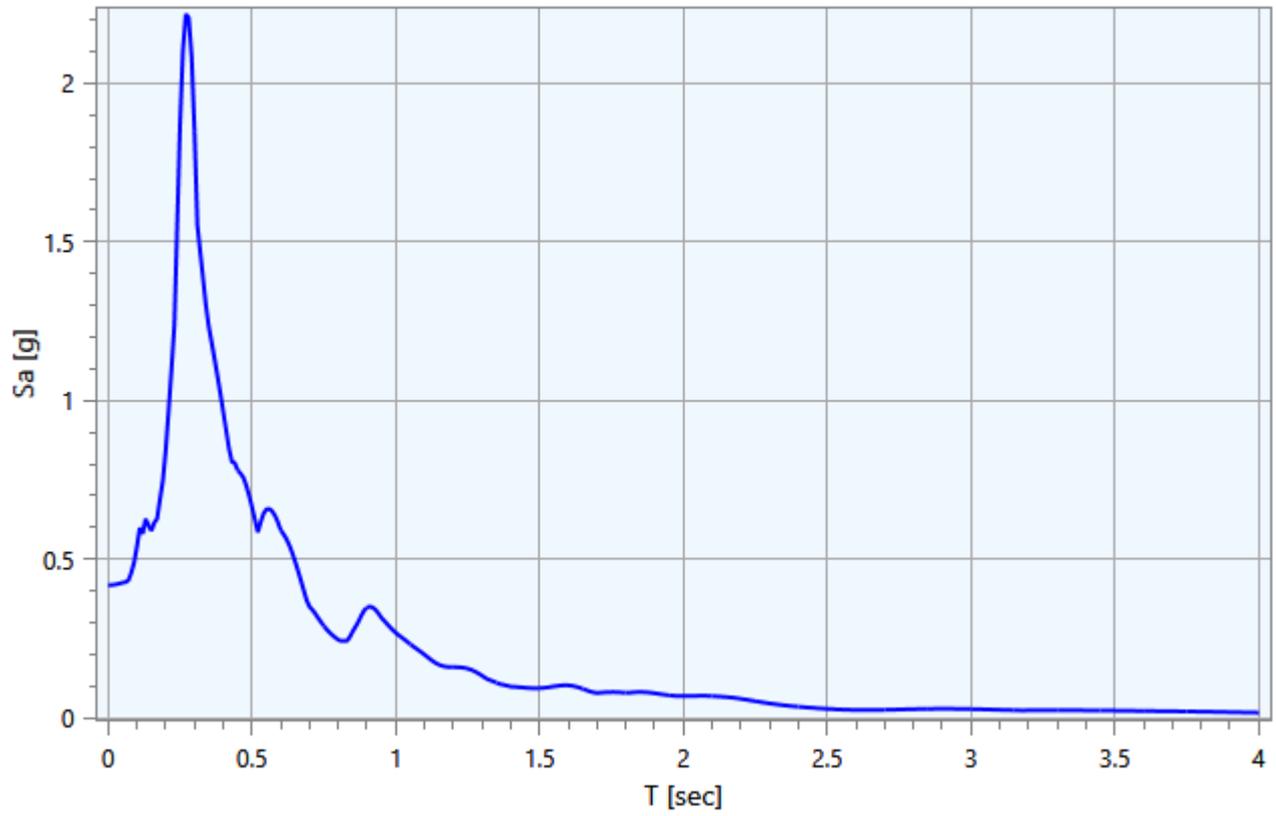
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione3) - (Nodo 31DirezioneX)



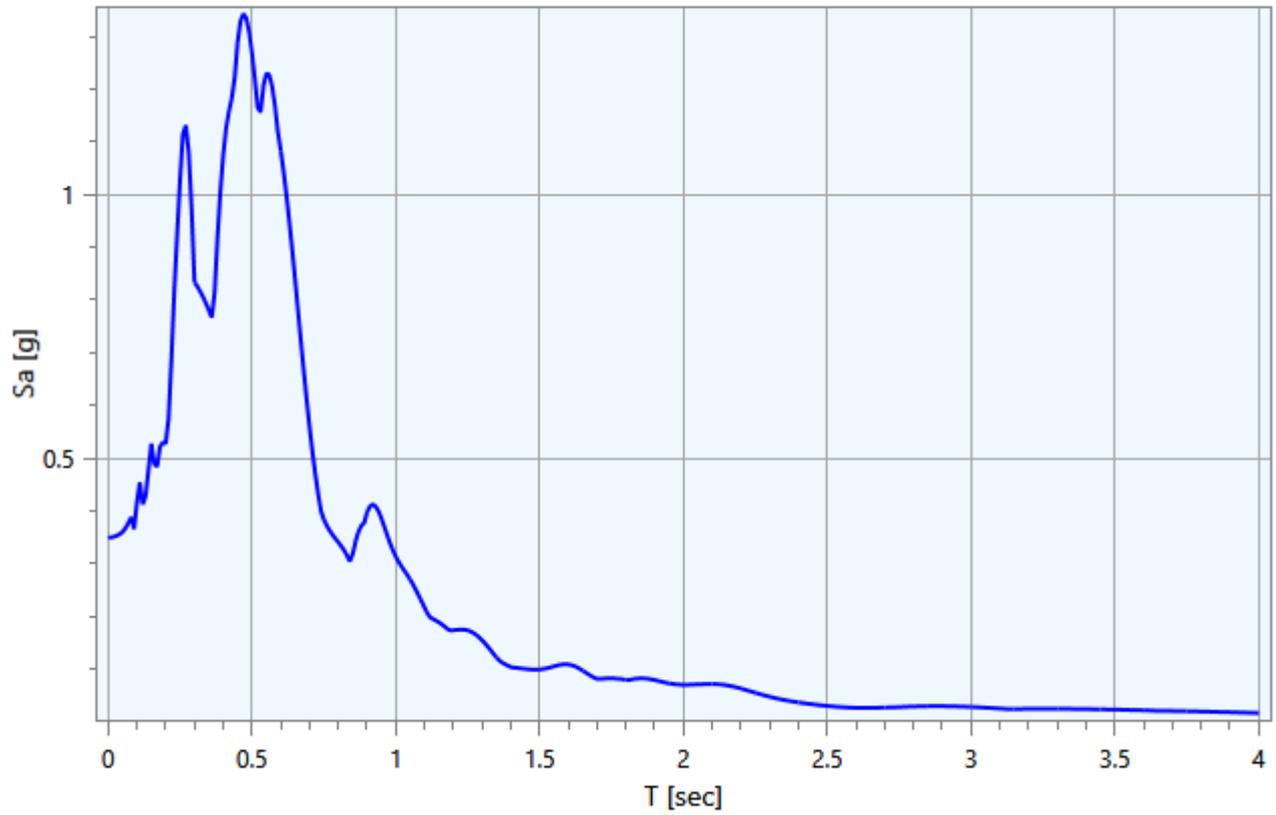
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione3) - (Nodo 32DirezioneX)



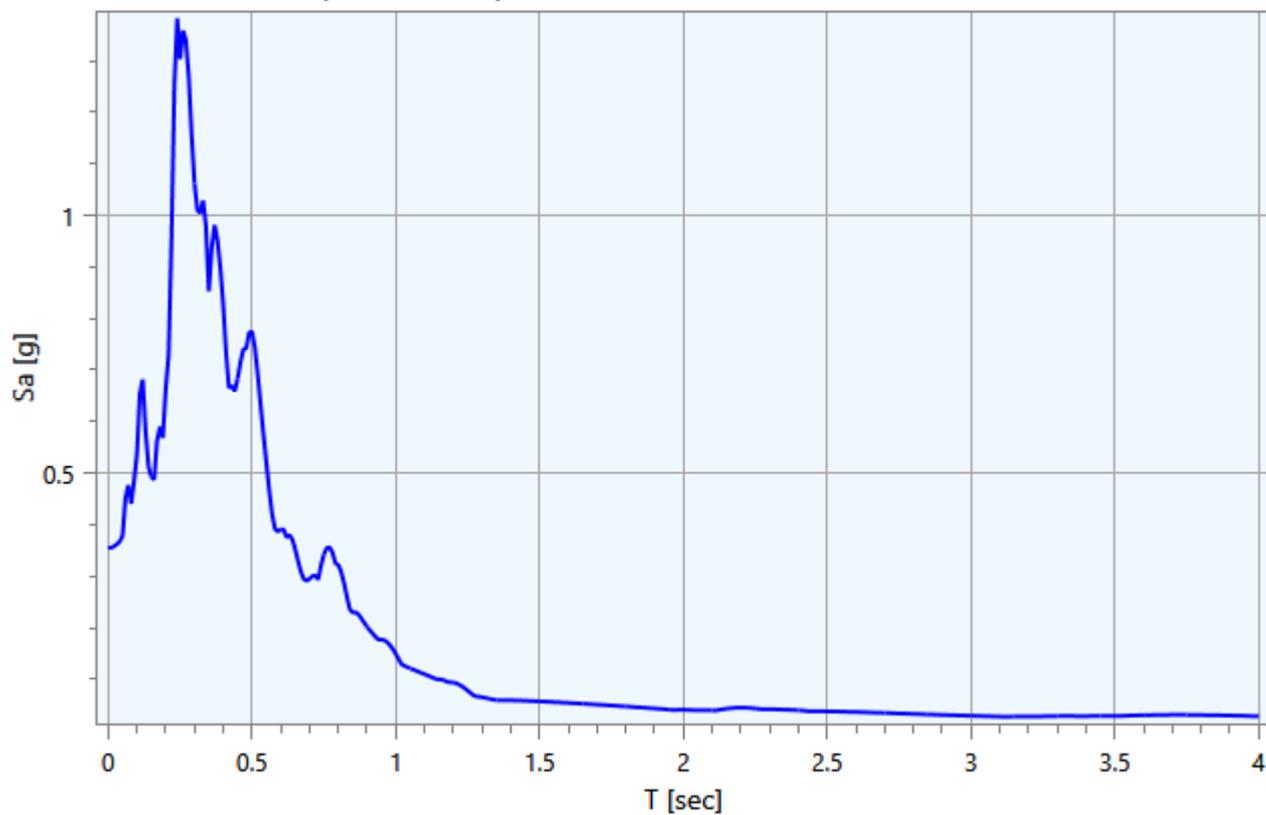
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione4) - (Nodo 31DirezioneX)



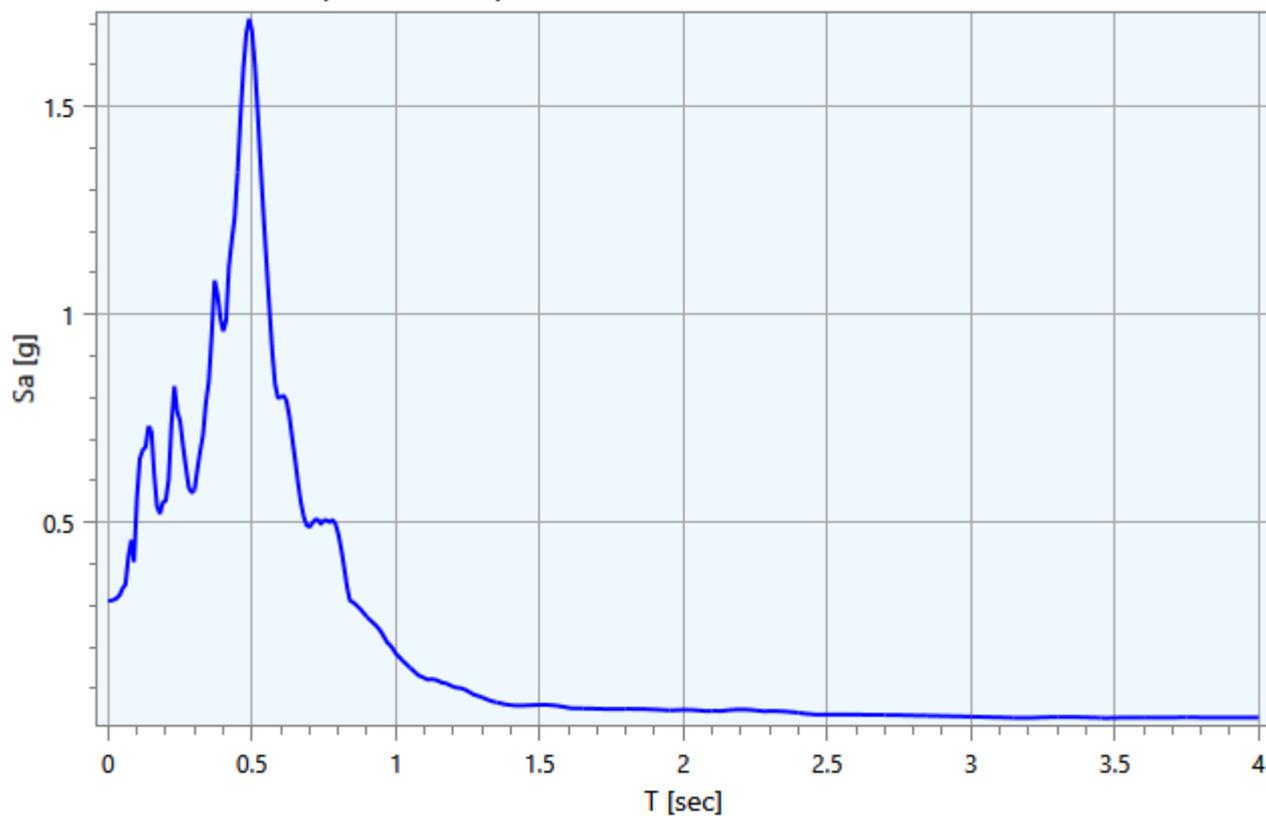
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione4) - (Nodo 32DirezioneX)



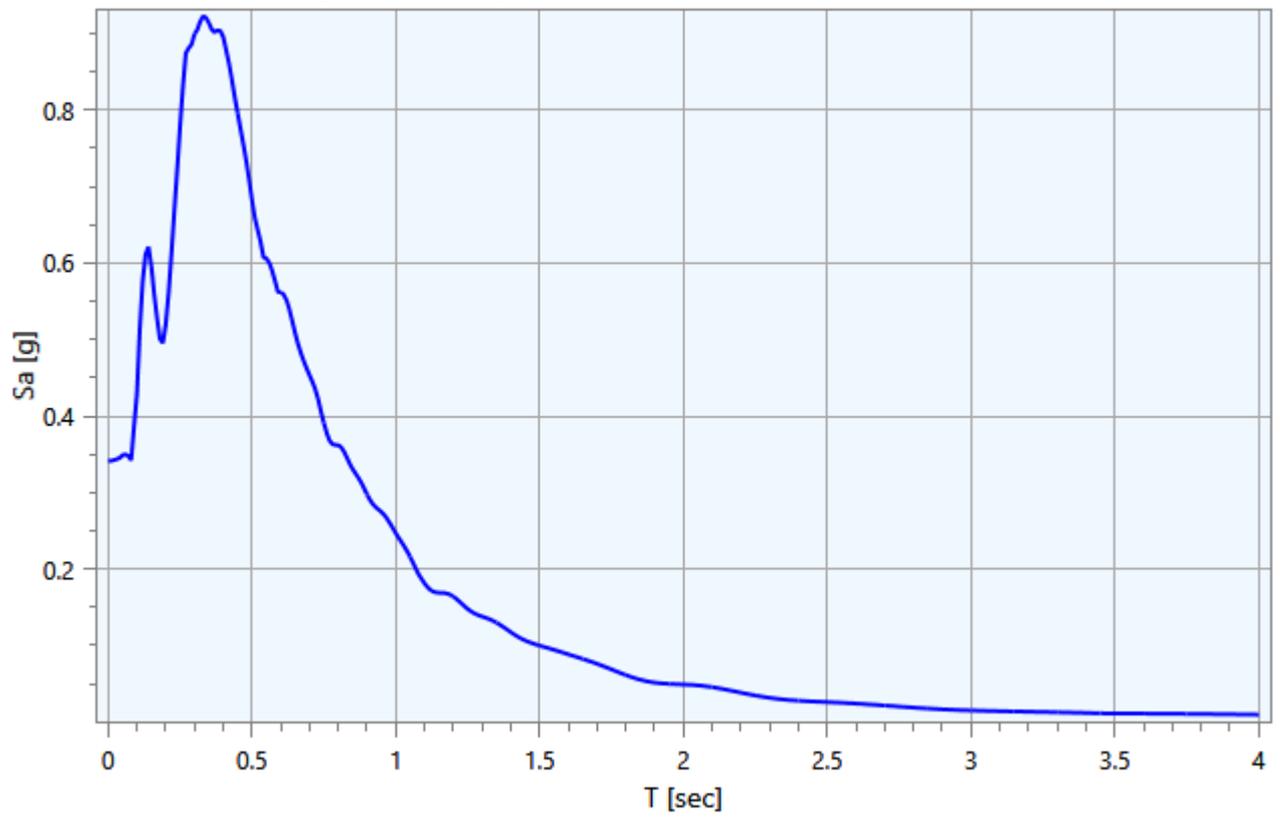
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione5) - (Nodo 31DirezioneX)



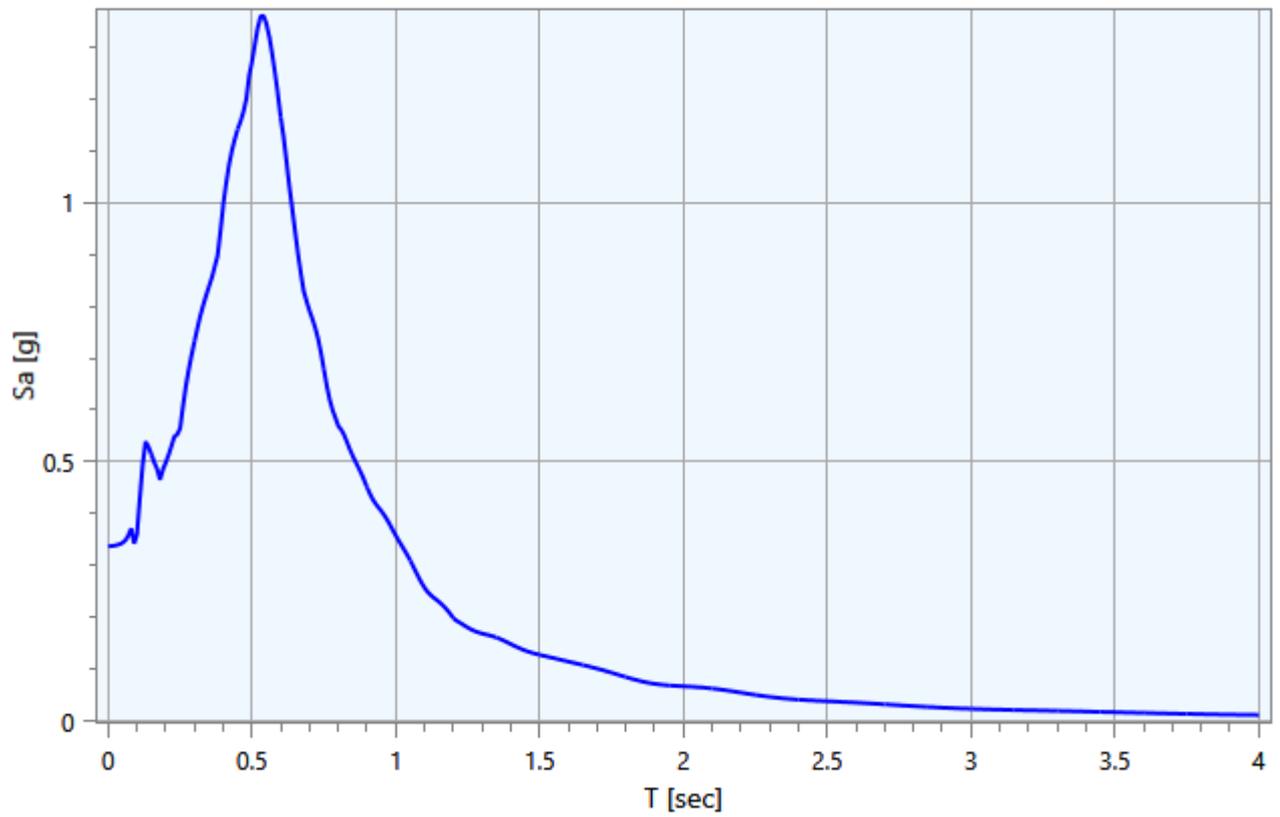
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione5) - (Nodo 32DirezioneX)



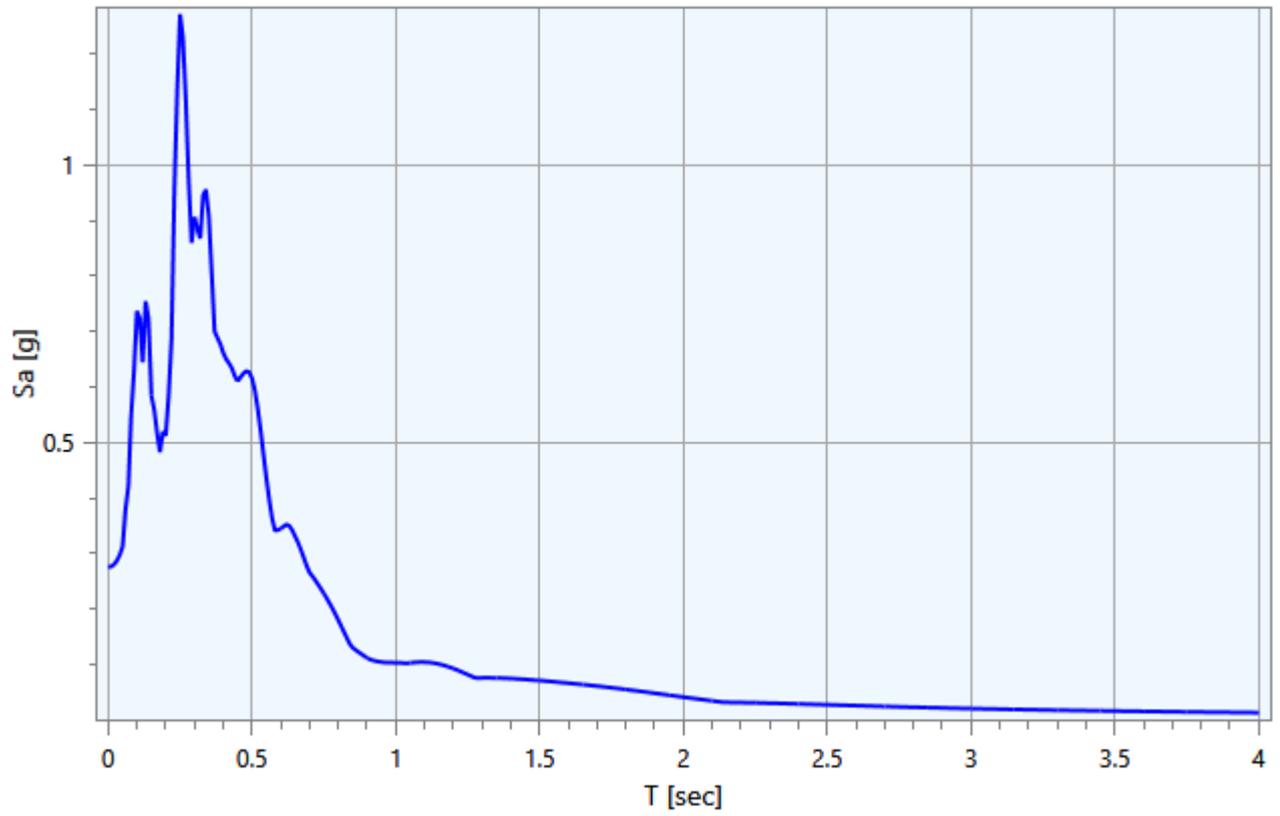
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione6) - (Nodo 31DirezioneX)



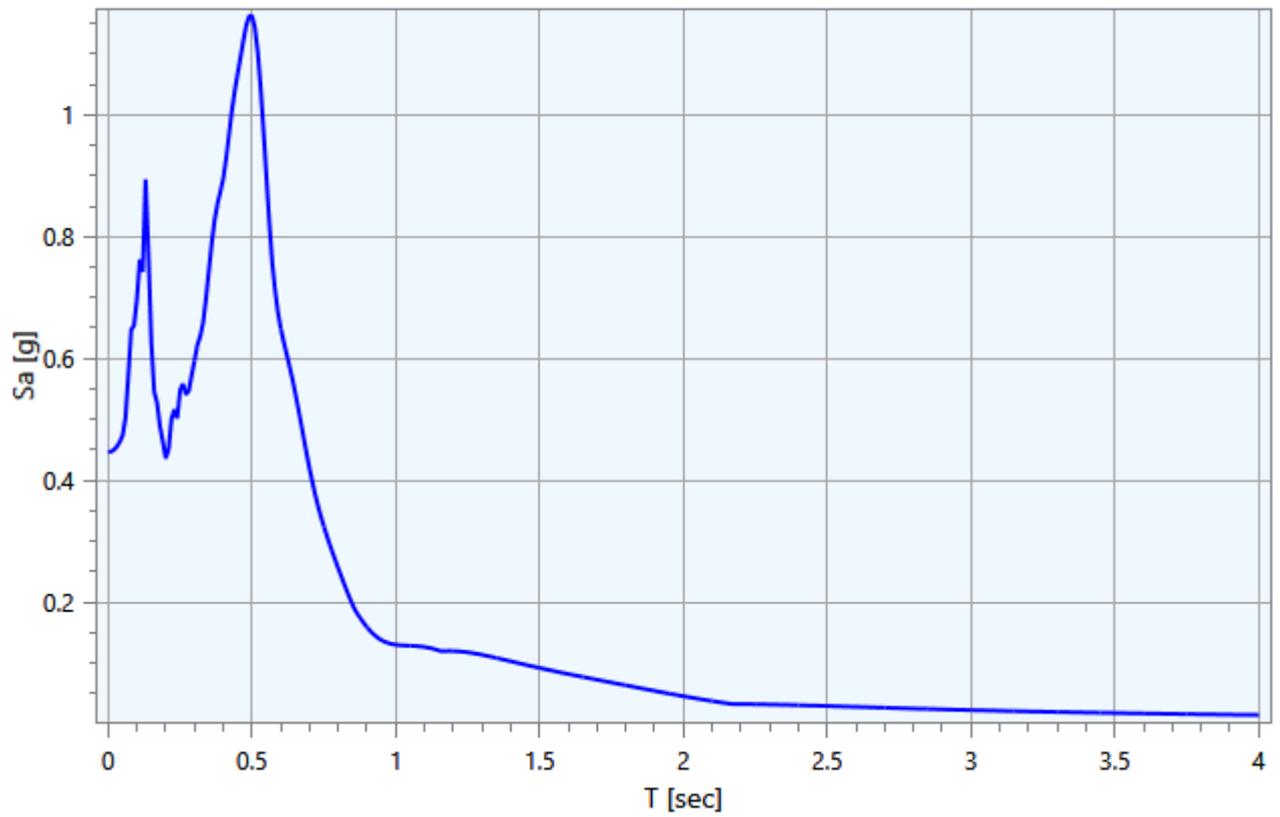
Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione6) - (Nodo 32DirezioneX)

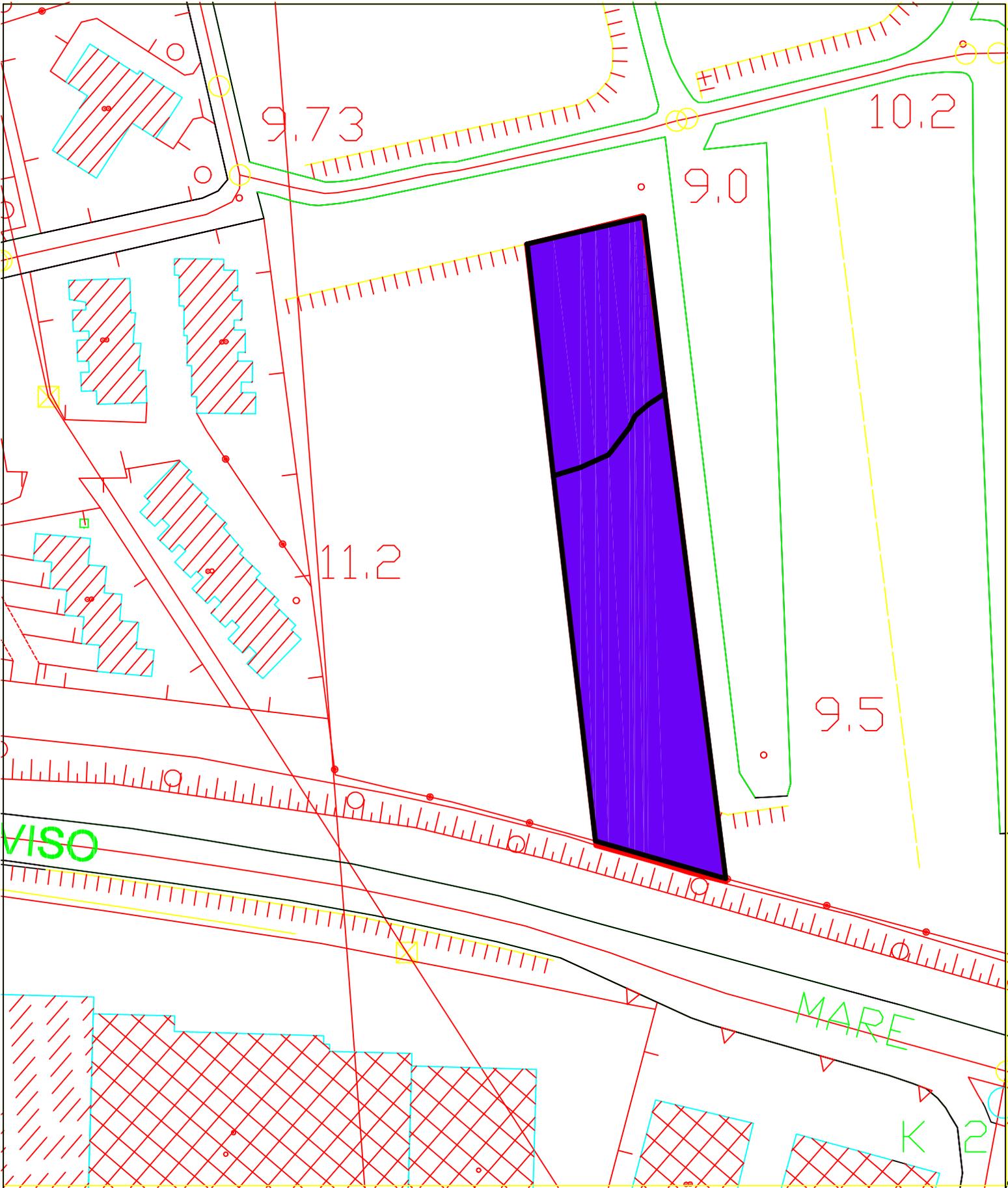


Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione7) - (Nodo 31DirezioneX)



Accelerazione spettrale Output (Analisi (1)) - (Condizione7) - (Nodo 32DirezioneX)

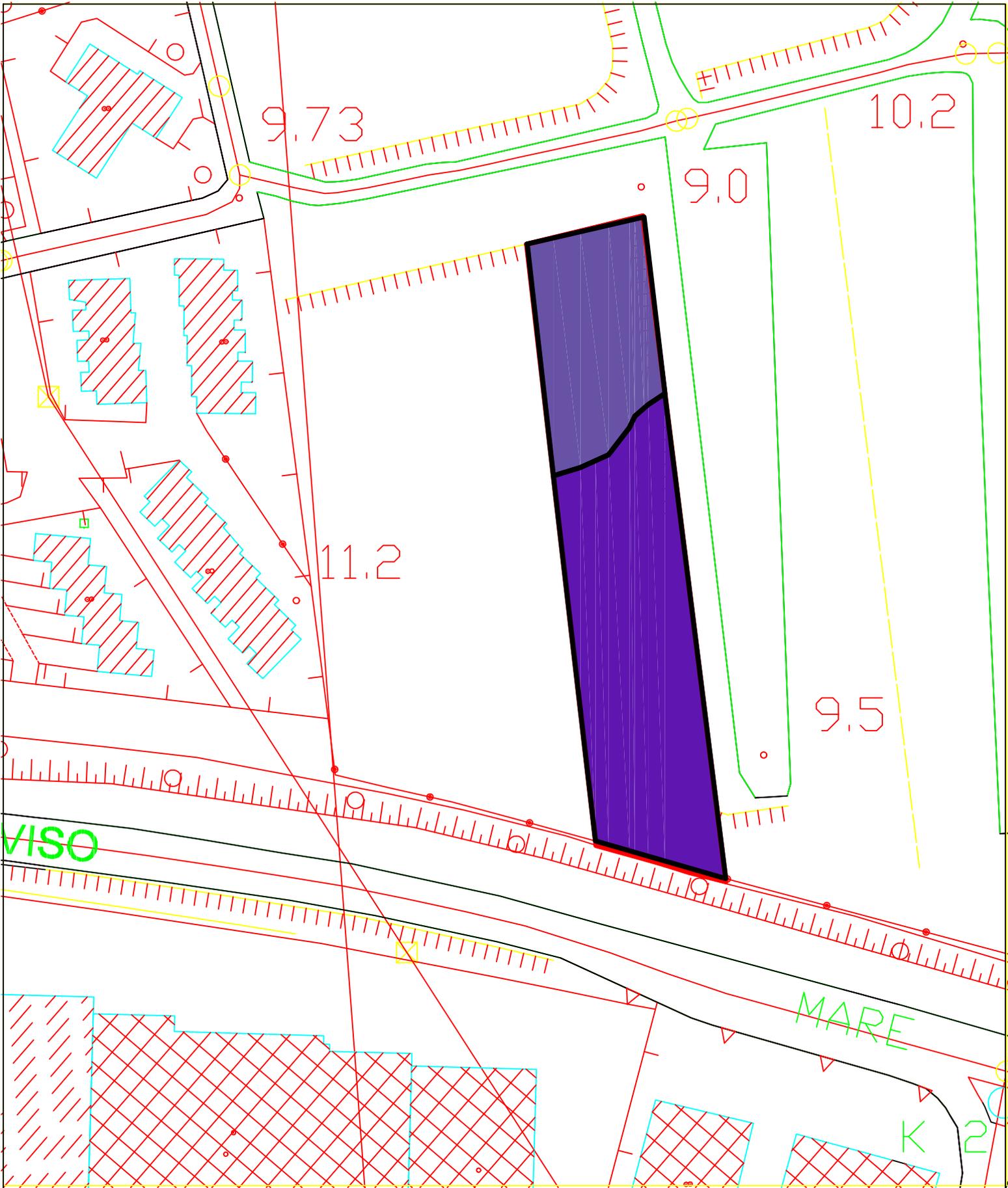




CARTA DELLA MICORZONAZIONE SISMICA DI 3° LIVELLO
ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI
PERIODO FA0105

Scala 1:2000

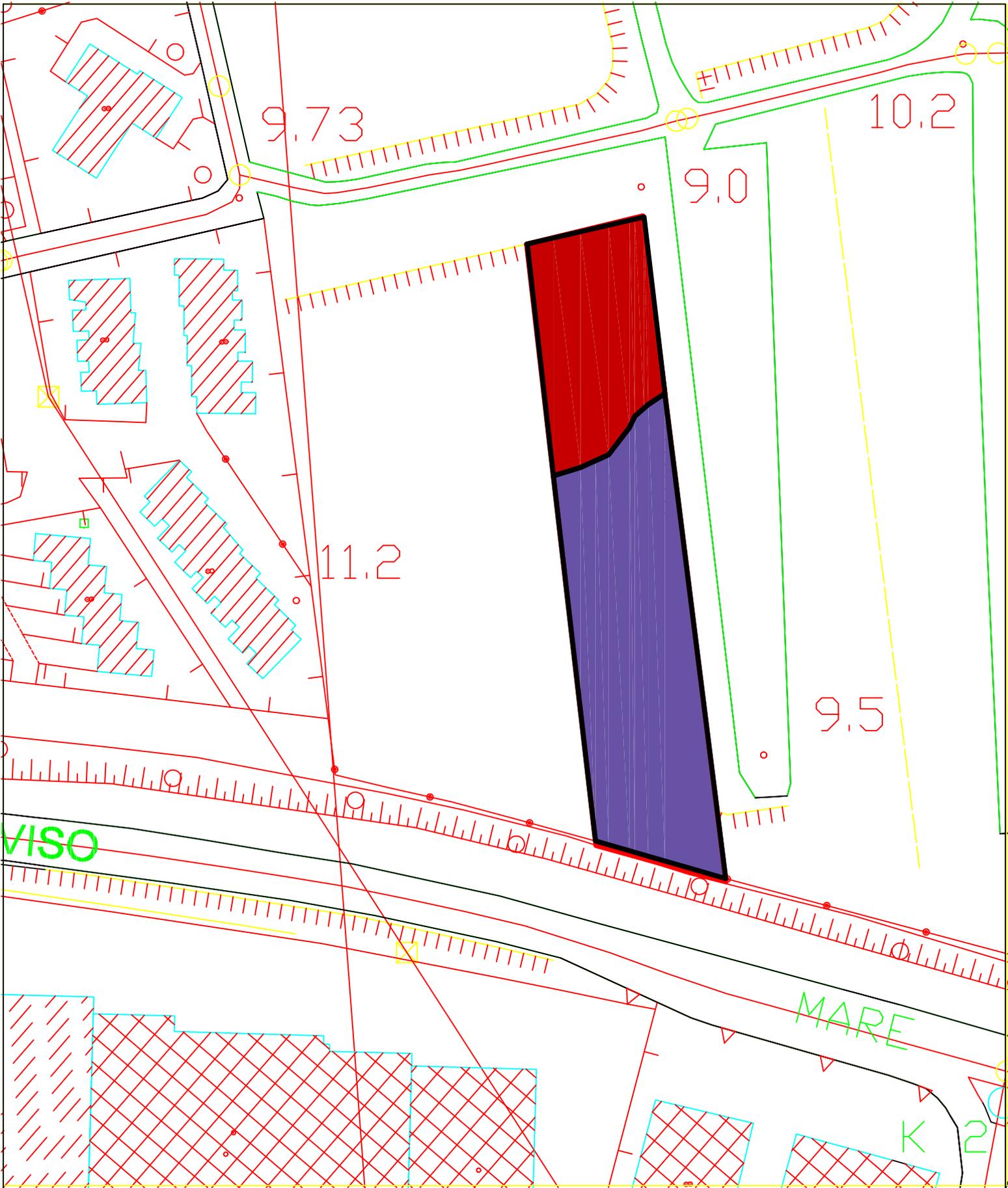
Zone stabili suscettibili di amplificazione locali (Classi dei parametri di smottamento)	
	1.1 - 1.2
	1.3 - 1.4
	1.5 - 1.6
	1.7 - 1.8
	1.9 - 2.0
	2.1 - 2.2
	2.3 - 2.4
	2.5 - 2.6
	3.1 - 3.2
	>3.2



CARTA DELLA MICRORZONAZIONE SISMICA DI 3° LIVELLO
ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI
PERIODO FA0408

Scala 1:2000

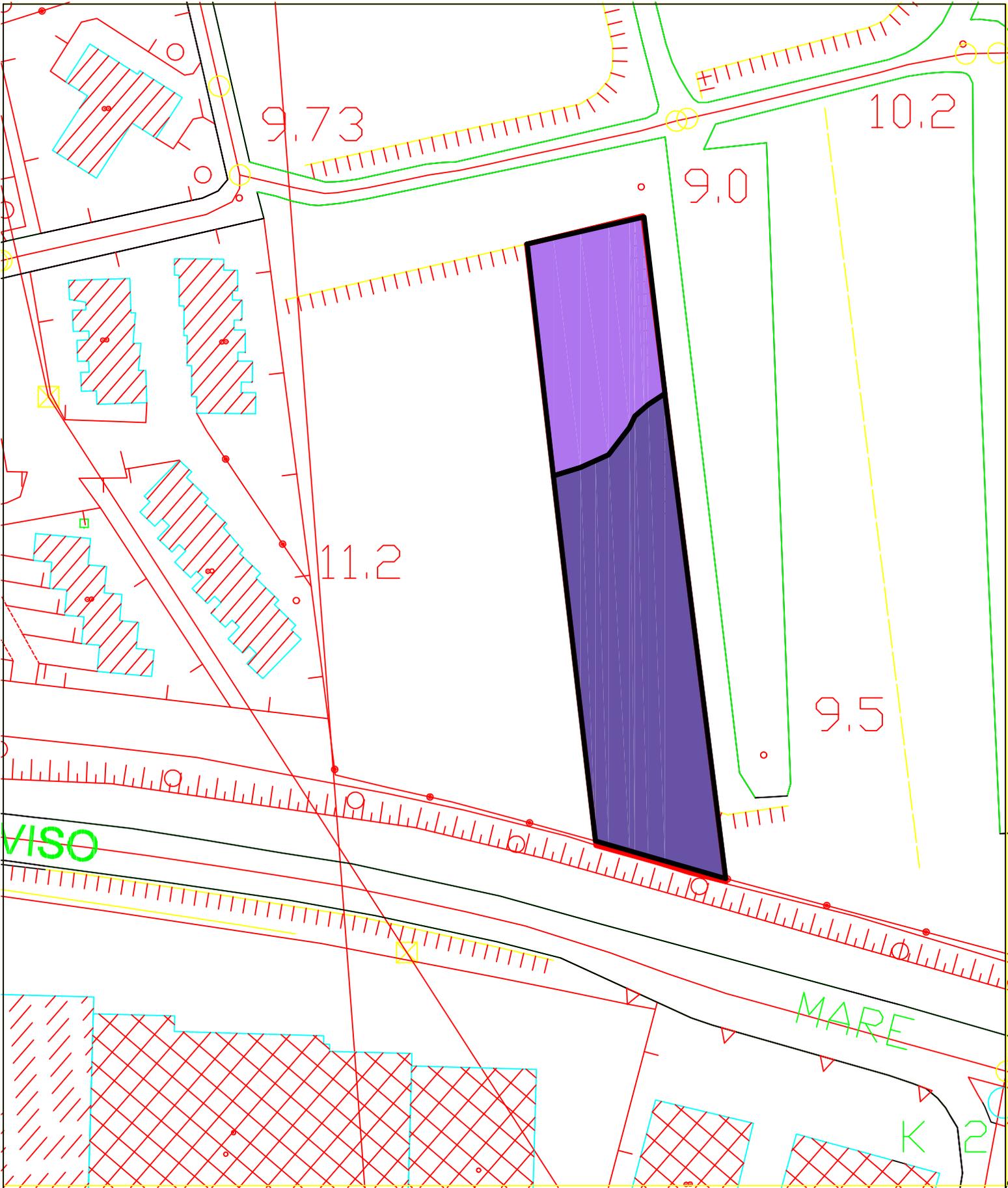
Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (classi del parametro di amplificazione)	
Lightest yellow	1.1 - 1.2
Light yellow	1.3 - 1.4
Yellow	1.5 - 1.6
Light orange	1.7 - 1.8
Orange	1.9 - 2.0
Dark orange	2.1 - 2.2
Red-orange	2.3 - 2.4
Red	2.5 - 2.6
Dark red	2.7 - 2.8
Dark purple	2.9 - 3.0
Medium purple	3.1 - 3.2
Dark purple	3.3



CARTA DELLA MICRORZONAZIONE SISMICA DI 3° LIVELLO
ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI
PERIODO FA0711

Scala 1:2000

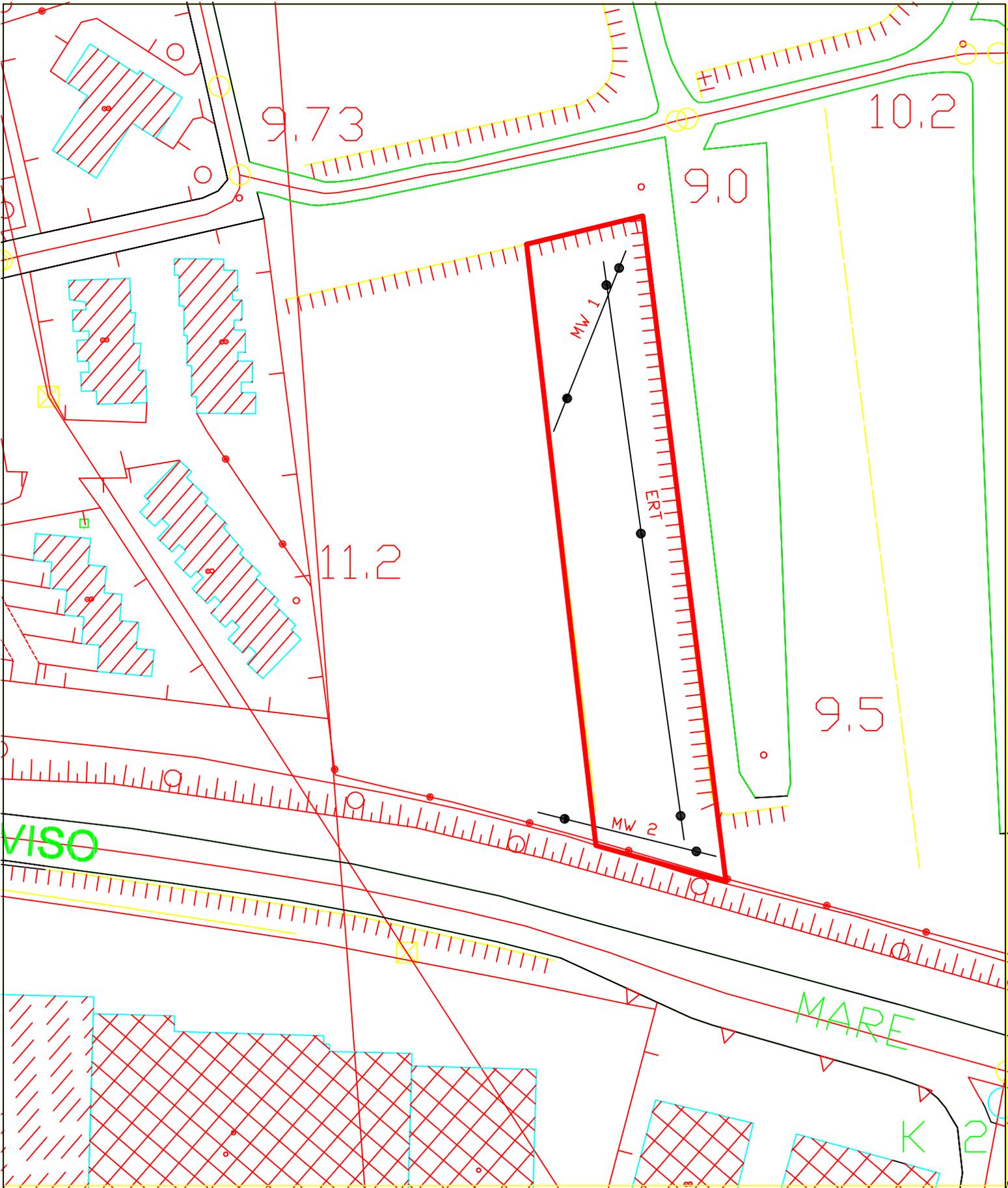
Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (classi del parametro di amplificazione)	
	1.1 - 1.2
	1.3 - 1.4
	1.5 - 1.6
	1.7 - 1.8
	1.9 - 2.0
	2.1 - 2.2
	2.3 - 2.4
	2.5 - 2.6
	2.7 - 2.8
	2.9



CARTA DELLA MICRORZONAZIONE SISMICA DI 3° LIVELLO
ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI (CATEGORIE DI PERICOLO DI AMPLIFICAZIONE)*

Scala 1:2000

Color	Value Range
Lightest Yellow	1.1 - 1.2
Yellow	1.3 - 1.4
Light Orange	1.5 - 1.6
Orange	1.7 - 1.8
Red-Orange	1.9 - 2.0
Red	2.1 - 2.2
Dark Red	2.3 - 2.4
Light Purple	2.5 - 2.6
Medium Purple	2.7 - 2.8
Dark Purple	2.9



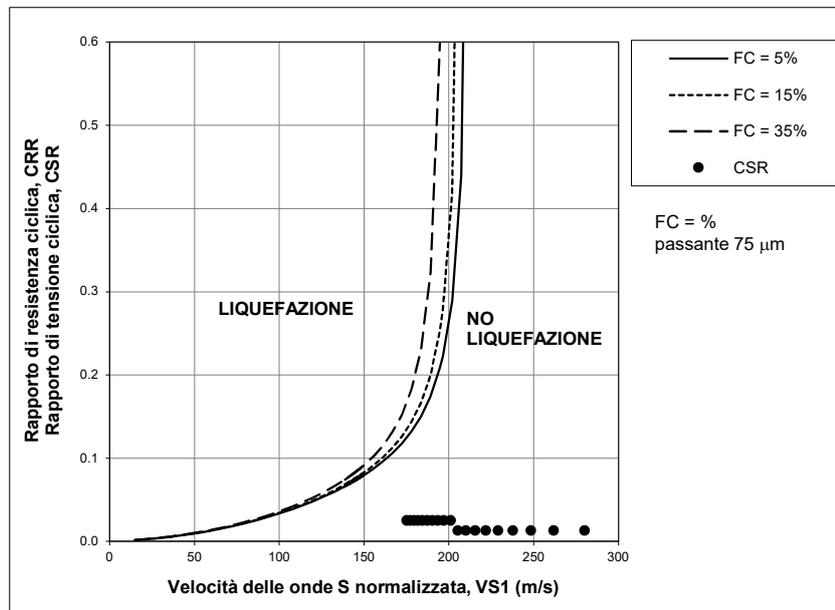
CARTA DELLE INDAGINI
Scala 1:2000

ERT	Tomografia elettrica
MW	ReMi Masw

VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE

profondità (m)	Vs	Vs1	CSR 7.5	F _s = CRR _{7.5} /CSR _{7.5}	IPL
2.0	200	280	0.013	9.18	0.00
3.0	200	262	0.013	6.43	0.00
4.0	200	248	0.013	3.82	0.00
5.0	200	238	0.013	0.81	1.41
6.0	200	229	0.013	-3.37	0.00
7.0	200	222	0.013	-10.80	0.00
8.0	200	216	0.013	-31.37	0.00
9.0	200	210	0.013	-1239.91	0.00
10.0	200	205	0.013	52.31	0.00
11.0	200	201	0.025	15.48	0.00
12.0	200	197	0.025	11.57	0.00
13.0	200	194	0.025	9.57	0.00
14.0	200	190	0.025	8.34	0.00
15.0	200	187	0.025	7.49	0.00
16.0	200	185	0.025	6.86	0.00
17.0	200	182	0.025	6.37	0.00
18.0	200	180	0.025	5.98	0.00
19.0	200	177	0.025	5.65	0.00
20.0	200	175	0.025	5.38	0.00

0<IPL<2 Basso
2<IPL<5 Moderato
5<IPL<15 Alto
IPL>15 molto alto



La velocità delle onde sismiche viene ricondotta ad un valore Vs1, ovvero ad un valore normalizzato ad una tensione efficace p_a = 100 kPa attraverso la:

$$V_{S1} = C_V \cdot V_S = V_S \cdot (p_a / \sigma'_{v0})^{0.25}$$

$$\text{RAPP. TENSIONALE CICLICO } CSR = \tau_{\text{media}} / \sigma' = 0.65 \cdot (a_{\text{max}} / g) \cdot (\sigma_v / \sigma'_v) \cdot r_d$$

a_{max} = accelerazione di picco al piano campagna

g = accelerazione di gravità

σ_v/σ'_v = tensione totale ed efficace nel sottosuolo

r_d = coefficiente riduttivo dell'azione sismica alla profondità d'interesse che tiene conto della deformabilità del sottosuolo

$$\text{COEFFICIENTE DI SICUREZZA ALLA LIQUEFAZIONE } F_s = CRR_{7.5} / CSR_{7.5}$$

$$CSR \text{ riferito ad terremoto di magnitudo 7.5 } (CSR)_{M=7.5} = (CSR)_M / MSF$$

fattore di scala per la magnitudo MSF = 6.9 * EXP(-M/4) - 0.058

$$\text{RAPP. DI RESISTENZA CICLICA (riferito a M = 7.5) } CRR_{7.5} = 0.022x(V_{S1}/100)^2 + 2.8x(1/(V_{S1}^* - V_{S1}) - 1/V_{S1}^*)$$