

Dott. Bucci Aride Geologo, Via Montepetra Trabocchi, 83/F – 47030 Sogliano al Rubicone (FC)
tel. 349/5430080 Cod. Fisc. BCC RDA 79 I 21 C 573 O - P. IVA 03829020407



PROCEDIMENTO UNICO EX ART.53 - L.R. 24/2017 PER L'AMPLIAMENTO E LA RISTRUTTURAZIONE DELL'ATTIVITA' DI PRODUZIONE CONGLOMERATI BITUMINOSI E POTENZIAMENTO DELL'ATTIVITA' DI RECUPERO RIFIUTI NON PERICOLOSI – VIA PONARA.

LOCALITÀ:	Via Ponara
COMUNE	Bertinoro (FC) e Forlimpopoli (FC)
COMMITTENTE:	Romagnola Conglomerata SRL

RELAZIONE GEOLOGICA

MaGGIO 2025

IL COMMITTENTE:	IL TECNICO:
Romagnola Conglomerati SRL	Geol. Bucci Aride

INDICE

CAP. I. PREMESSA	pag. 2
CAP. II. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	pag. 3
CAP. III. INQUAD.TO GEOGRAFICO CARTOGRAFICO	pag. 4
CAP. IV. MODELLO GEOLOGICO	pag. 6
CAP. V. MODELLO GEOTECNICO	pag. 8
CAP. VI. ANALISI SUBSIDENZA	pag. 17
CAP. VII. CEDIMENTI EDOMETRICI	pag. 20
CAP. VII. RISCHIO IDROGEOLOGICO IDRAULICO	pag. 23
CAP. VIII. CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	pag. 25
CAP. IX. ANALISI MICROSISMICA	pag. 31
CAP. X. RISPOSTA SISMICA LOCALE III LIVELLO	pag. 30
CAP. XI. LIQUEFAZIONE	pag. 90
CAP. XII. CONCLUSIONI	pag. 92

PREMESSA

La Società Romagnola Conglomerati srl mi ha incaricato di redigere il presente studio geologico relativo al PROCEDIMENTO UNICO EX ART.53 - L.R. 24/2017 PER L'AMPLIAMENTO E LA RISTRUTTURAZIONE DELL'ATTIVITA' DI PRODUZIONE CONGLOMERATI BITUMINOSI E POTENZIAMENTO DELL'ATTIVITA' DI RECUPERO RIFIUTI NON PERICOLOSI – VIA PONARA, per l'inserimento urbanistico dell'area sita in Via Ponara in Località Panighina, Comune di Bertinoro e Comune di Forlimpopoli (FC), Comune di Forlì (FC).

L' intervento sarà realizzato ai sensi delle normative tecniche vigenti.

E' stato eseguito un rilevamento preliminare atto a delineare le condizioni geomorfologiche e idrogeologiche dell'area.

Le indagini geotecniche sono state programmate in funzione del tipo di intervento, hanno riguardato il volume significativo, ed hanno permesso la definizione del modello geologico di sottosuolo necessario alla progettazione.

Attraverso la modellazione geologica è stato possibile evidenziare eventuali criticità di tipo idrogeologico e geomorfologico derivante dalla realizzazione delle strutture in progetto.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La stesura della seguente relazione è stata compiuta in ottemperanza alle disposizioni contenute nelle normative di riferimento di seguito elencate:

- Legge 17 agosto 1942, n. 1150 (Bosetti e Gatti)
- legge n. 765 del 1967;
- AGI: raccomandazione sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Giugno 1977;
- "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione". D.M. 11 Marzo 1988;
- Istruzioni relative alle "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione". Circ. Min. LL.PP. n° 30483 24 Settembre 1988;
- Legge Regionale 20/2000; Disciplina generale sulla tutela ed uso del territorio;
- Ordinanza del Dipartimento della Protezione Civile e del Servizio Sismico Nazionale del 20 marzo 2003: "Nuove disposizioni per le costruzioni in zona sismica" pubblicata nella G.U. del 8 maggio 2003;
- Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: "Norme tecniche per le costruzioni" del 14 settembre 2005 geotecniche;
- Indirizzi per gli studi di micro zonazione sismica in Emilia Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica;
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n. 36 del 27.07.2007;

- "Nuove Norme tecniche per le costruzioni ". D.M. 14 Gennaio 2008;
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008. Circolare 2 febbraio 2009;
- "Nuove Norme tecniche per le costruzioni ". D.M. 17 Gennaio 2018;
- DGR 630/2019

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CARTOGRAFICO

L'area in oggetto è posizionata geograficamente in Via Ponara, in Comune di Bertinoro (FC).

Nel contesto cartografico il sito di colloca nel Foglio 100 della Carta Geologica d'Italia in scala 1 : 100.000; in scala 1 : 10.000 l'area compare nella Sezione 255 030 "Cesena" mentre in scala 1 : 5.000 nell'Elemento 255 034 della Carta Tecnica Regionale dell'Emilia Romagna.

Le coordinate geografiche WGS 84 rilevate tramite strumento GPS rendono:

LATITUDINE: 44.17

LONGITUDINE: 12.15

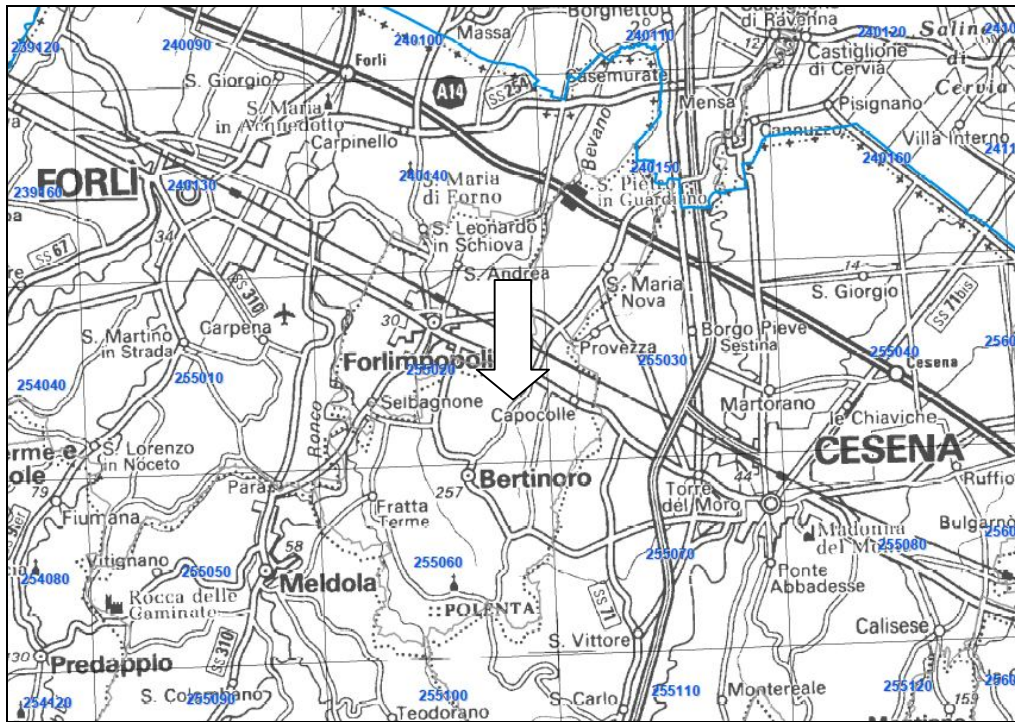


Fig. 1. Inquadramento Territoriale

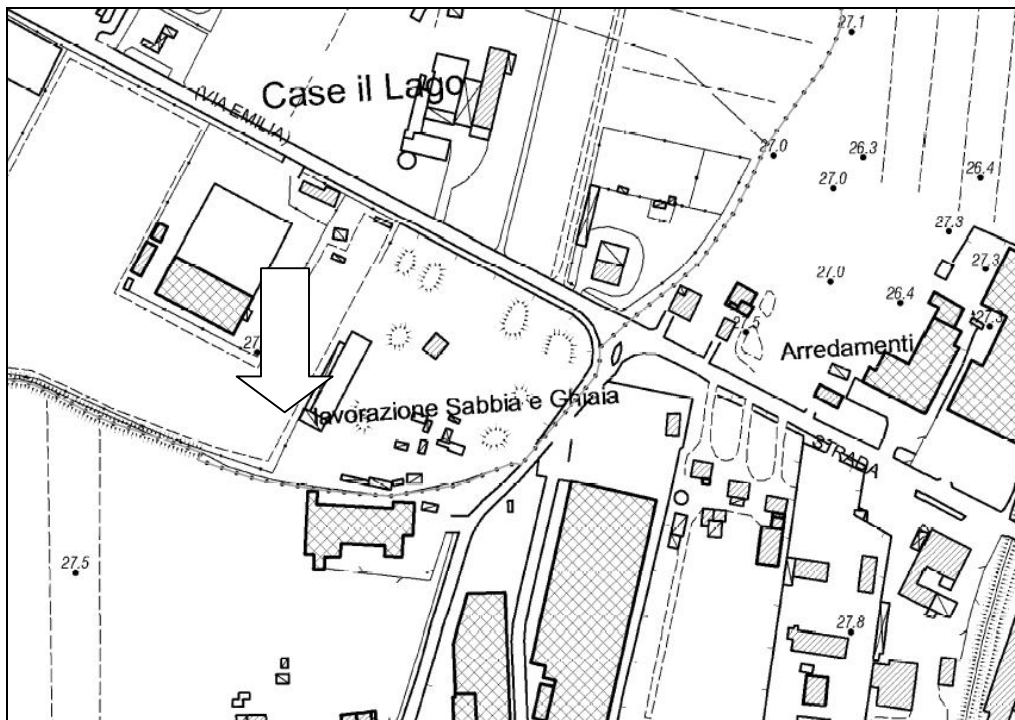


Fig. 2. Estratto Carta Tecnica Regionale dell'Emilia Romagna scala 1 : 5.000.

MODELLO GEOLOGICO

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il territorio della pianura cesenate e forlivese rappresenta il comparto iniziale, il raccordo, del consistente cuneo sedimentario costituito dagli apporti detritici alluvionali dei numerosi corsi d'acqua che dal territorio alpino e da quello appenninico hanno, durante il quaternario, hanno dato origine alla Pianura Padana.

Gli apporti detritici descritti sono attribuibili in larga parte alle colmate dei collettori idrici dello spartiacque Tosco Romagnolo.

La potenza di questo consistente accumulo detritico eterogeneo è dell'ordine chilometrico nelle aree ferraresi e si riduce sensibilmente fino alla scala decametrica di queste zone. I depositi quaternari appoggiano al di sopra dei depositi di età pliocenica.

La struttura tettonica dei terreni pliocenici alla base dei sedimenti alluvionali è assimilabile alla struttura tettonica appenninica affiorante a sud e che in questi luoghi appare sepolta dal bacino sedimentologico quaternario.

In periodo pliocenico tale zona costituiva un enorme bacino sedimentario che in fasi successive è stato colmato dai detriti trasportati dalle aree montuose dai principali canali idrici verso il Mare Adriatico.

La litologia più superficiale dell'area è caratterizzata dalla presenza di sedimenti fini di tipo argilloso,finanche sabbioso fine. Presenti ad intervalli disomogenei in profondità lenti sabbiose e livelli ghiaiosi appartenenti al prisma di divagazione degli antichi alvei fluviali, che nel tempo hanno modificato percorso e tracciato, e localmente a depositi di rotta degli argini naturali durante le fasi di massimo stress idrologico dei paleoalvei.

A scala locale è interessante indicare il passaggio del Torrente Bevano e dello Scolo Ponara.

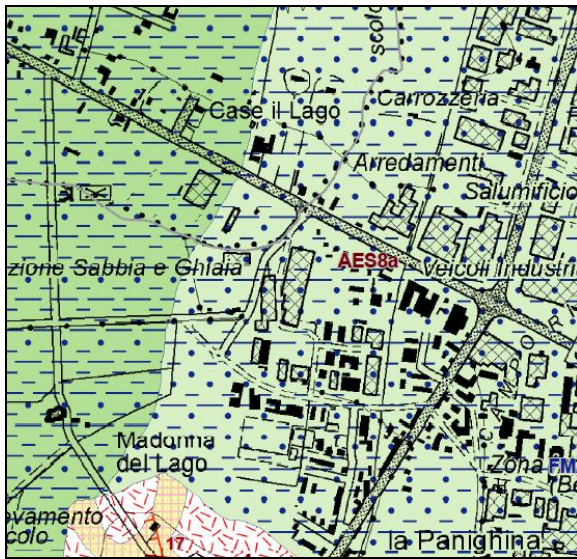
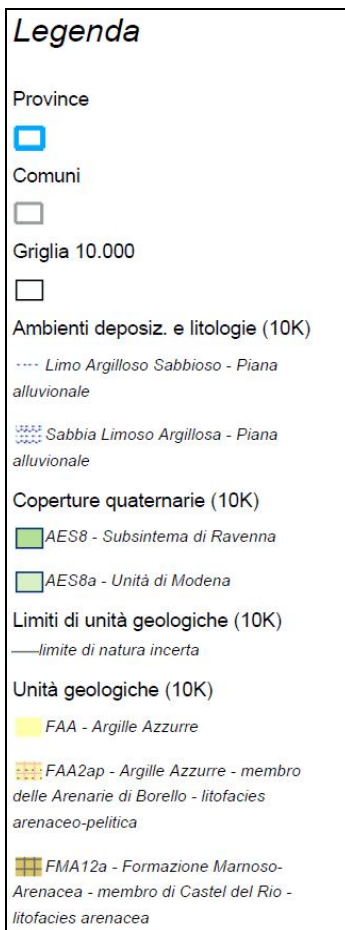


Fig. 3. Particolare Carta Geologica dell'Emilia Romagna



CONDIZIONE GEOMORFOLOGICA, IDROLOGICA E IDROGEOLOGICA

La morfologia pianeggiante costituisce il motivo principale dell'intorno analizzato.

Nel comparto e nel suo immediato intorno non sono riscontrate criticità di tipo geomorfologico.

A grande scala l'idrologia è caratterizzata dal passaggio dell'asse fluviale del Torrente Bevano il cui bacino è compreso tra quello dei Fiumi Uniti a nord e quello del Savio a sud.

Le sue sorgenti si trovano alle pendici di Monte Maggio (329 m), nei pressi di Bertinoro in provincia di Forlì-Cesena. In pianura il torrente raccoglie le acque di molti fossati, scoli agricoli e canali di bonifica.

Il Bevano prosegue il suo corso nella provincia di Ravenna in località Casemurate-San Zaccaria, in una zona dove un tempo vi era un'ampia palude, la Valle Standiana, ora bonificata.

Elemento di interesse è costituito dalla presenza della falda freatica a pari circa a – 2.00 m dal piano campagna nella stagione invernale con un abbassamento relativo durante la stagione estiva.

MODELLO GEOTECNICO

PROVA CPT / CPTe

La prova penetrometrica statica CPT (di tipo meccanico o elettrico) consiste essenzialmente nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta meccanica di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante ($v = 2 \text{ cm / sec} \pm 0,5 \text{ cm / sec}$).

La penetrazione viene effettuata tramite un dispositivo di spinta (martinetto idraulico), opportunamente ancorato al suolo con coppie di coclee ad infissione, che agisce su una batteria doppia di aste (aste coassiali esterne cave e interne piene), alla cui estremità è collegata la punta.

Lo sforzo necessario per l'infissione è misurato per mezzo di manometri, collegati al martinetto mediante una testa di misura idraulica.

La punta conica (del tipo telescopico) è dotata di un manicotto sovrastante, per la misura dell'attrito laterale.

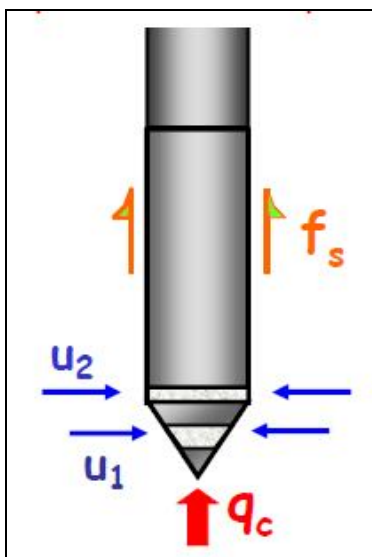


Fig. 4 - Schema Punta CPTE

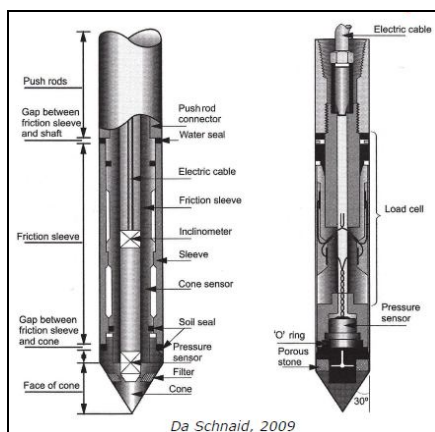


Fig. 5 - Pietra porosa collegata a trasduttore per misura elettrica

Le dimensioni della punta / manicotto sono standardizzate, e precisamente :

- diametro Punta Conica meccanica $D = 35,7 \text{ mm}$
- area di punta $A_p = 10 \text{ cm}^2$
- angolo di apertura del cono $\alpha = 60^\circ$
- superficie laterale del manicotto $A_m = 150 \text{ cm}^2$

Tramite la definizione dell'attrito laterale e dello sforzo a rottura del terreno è possibile ricostruire la litologia il primo sottosuolo.

STRATIGRAFIA DEL SOTTOSUOLO

STRATIGRAFIA CPTe1

STRATO 1	dal p.c a – 1,50 m	riporto antropico compattato
STRATO 2	da – 1,50 m a 10,30 m	Argille compatte e molto compatte
STRATO 3	da – 10,30 a - 13,50 m	Argille e limi argillosi
STRATO 4	da – 13,50 a – 15,00 m	Sabbie e limi sabbiosi

Livello falda – 2.00 m dal p.c.

STRATIGRAFIA CPTe2

STRATO 2	dal p.c a – 4,30 m	Argille compatte e molto compatte con laterizi e manufatti (canale di scolo riempito)
STRATO 3	da – 4,30 a - 11,10 m	Argille e limi argillosi
STRATO 4	da – 11,10 a – 12,00 m	Argille compatte e molto compatte

Livello falda – 2.00 m dal p.c.

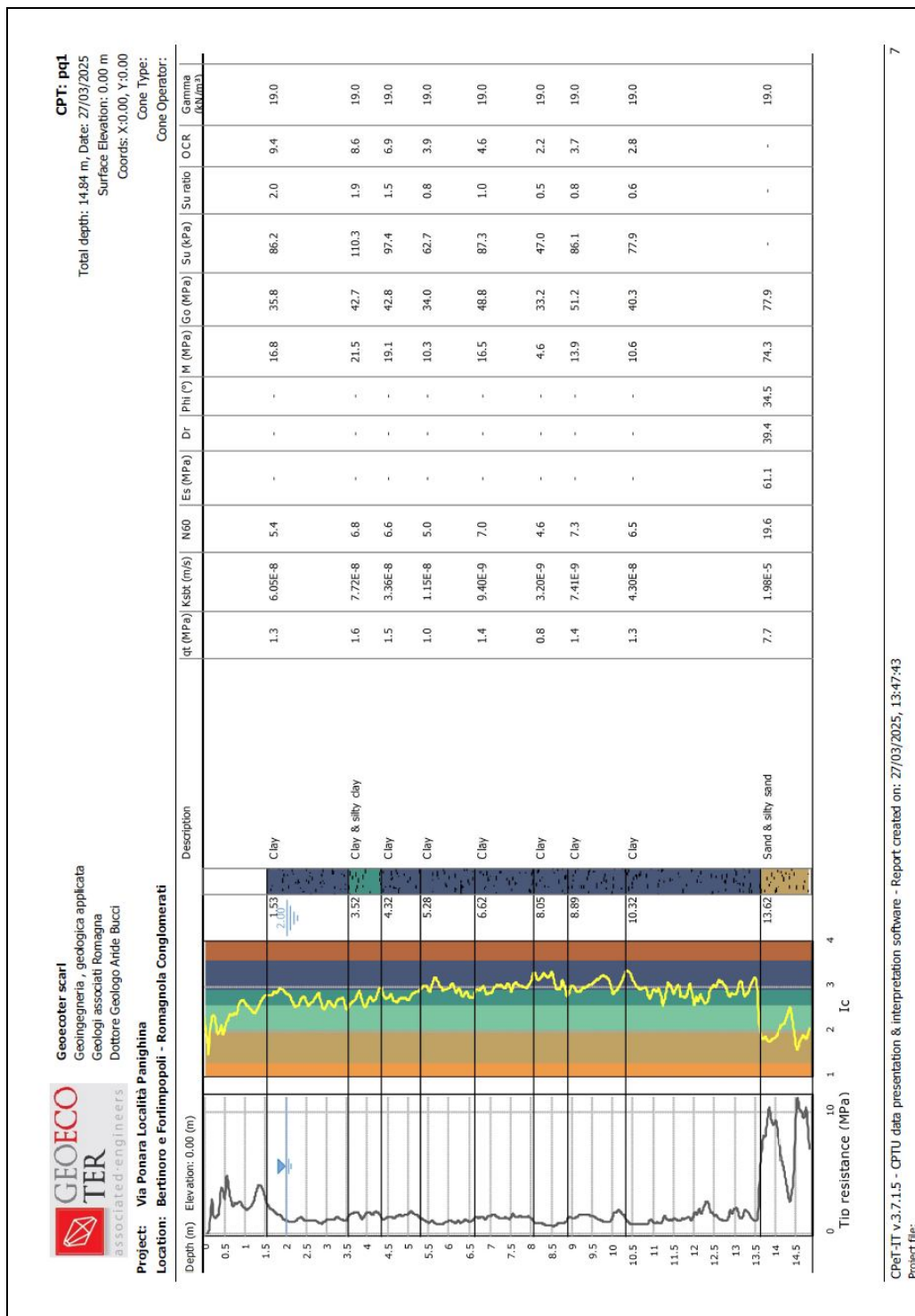


Fig. 5. Diagramma stratigrafico CPTe1

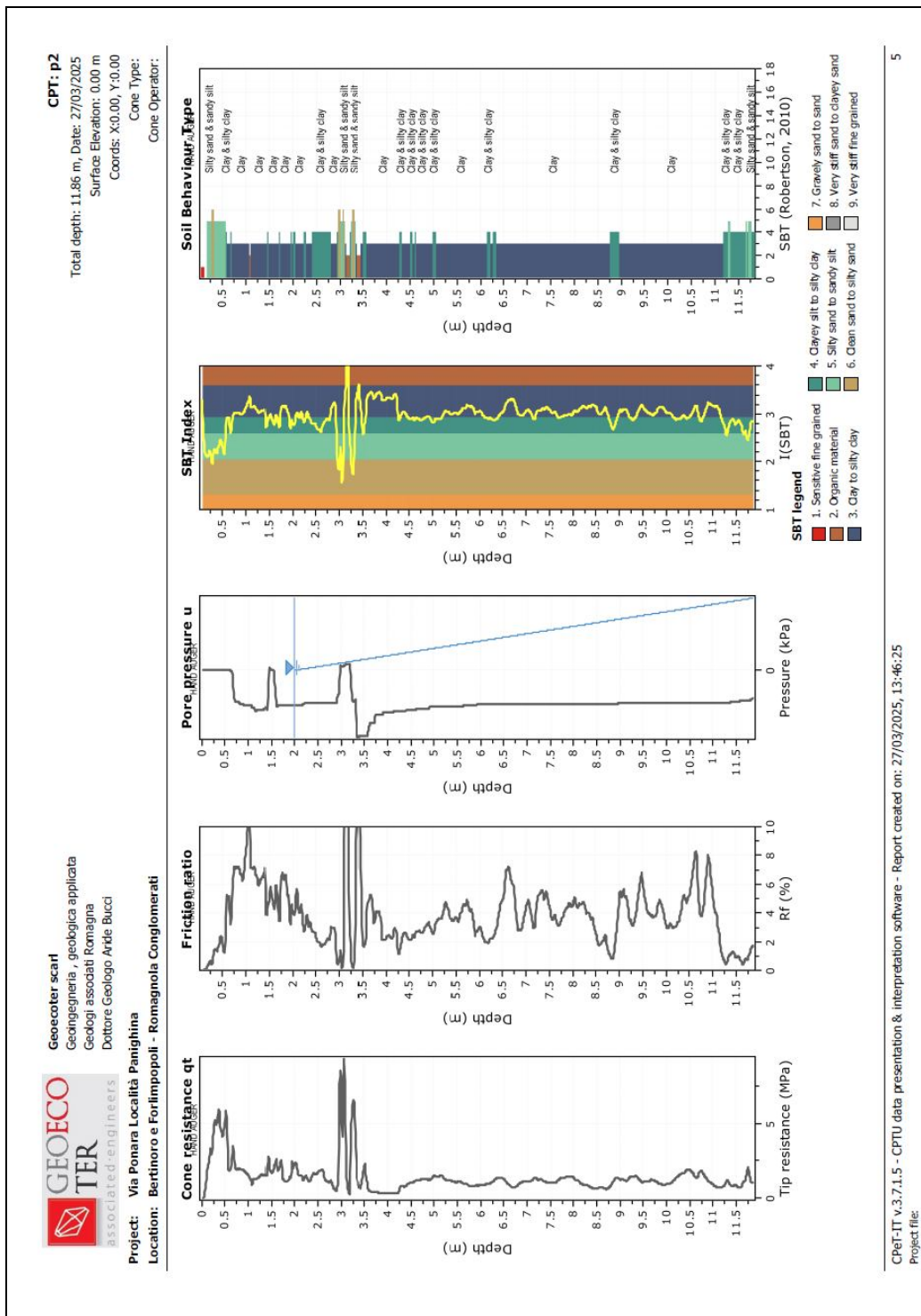


Fig. 6. Diagramma stratigrafico CPTe2

PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI

Si indicano in seguito le stime dei valori dei parametri geotecnici caratteristici dei terreni ricavati dalle correlazioni dirette delle CPTe e grazie ai dati di letteratura presenti sui terreni contermini al presente.

Nella presente trattazione vengono indicati i parametri medi delle argille dei limi e delle sabbie.

Legenda	
Nr:	Numero progressivo strato
Prof:	Profondità strato (m)
Tipo:	C: Coesivo. I: Incoerente. CI: Coesivo-Incoerente
Cu:	Coesione non drenata (Kg/cm ²)
C':	Coesione efficace (Kg/cm ²)
Mo:	Modulo Edometrico (Kg/cm ²)
G:	Modulo di deformazione a taglio (Kg/cm ²)
OCR:	Grado di sovraconsolidazione
Puv:	Peso unità di volume (t/m ³)
PuvS:	Peso unità di volume saturo (t/m ³)
Dr:	Densità relativa (%)
Fi:	Angolo di attrito efficace (°)
Ey:	Modulo di Young (Kg/cm ²)

Nr.Prof.	Tipo	Cu	c'	Mo	G	OCR	Puv	PuvS	Dr	Fi	Vs
1	I	--	--	50		--	1.70	1.90	--	33/35°	
2	C	0.50	0.50	40		--	1.80	1.90	--	18°	

3	C	0.75	0.07	55	--	1.80	1.80	--	18/20°
4	I	--	--	100	--	1.90	2.00	--	31/33°

RESISTENZE DEL TERRENO

Il progetto prevede l'ampliamento e la ristrutturazione dell'attività di produzione conglomerati bituminosi ed il potenziamento dell'attività di recupero rifiuti non pericolosi di Via Ponara.

È prevista la realizzazione di una nuova linea di nastro trasporto e di alcuni manufatti collegati quali box e silos per lo stoccaggio e la lavorazione del materiale di lavorazione.

Per fondazioni superficiali la capacità portante limite può essere determinata dalla relazione di Brich Hansen che in generale è espressa dalla seguente pressione di contatto limite critica P_{crit} :

$$P_{crit} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q + 0,5 \cdot B \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma \cdot b_\gamma$$

Peso specifico del terreno sotto il piano di posa = kg/mc 1900.00

Il calcolo sarà eseguito secondo l'approccio n. 2.

Coefficiente parziale per angolo resistenza a taglio: 1

Coefficiente parziale per coesione: 1

Coefficiente parziale per resistenza non drenata: 1

Coefficiente parziale per capacità portante: 2.3

Nuovo angolo di attrito: 17

Nuova coesione: 500.00

Larghezza fondazione: 1.50

Lunghezza fondazione: 1.50

Profondità di posa: 2.00

Falda: -2.00

Fattori di capacità portante:

$$N_g = 4.07$$

$$N_c = 13.10$$

$$N_q = 5.26$$

Fattori di forma:

$$S_g = 0.60$$

$$S_c = 1.40$$

$$S_q = 1.32$$

Fattori di inclinazione carico:

$$I_g = 1.00$$

$$I_c = 1.00$$

$$I_q = 1.00$$

Fattori di inclinazione fondazione:

$$B_g = 1.00$$

$$B_c = 1.00$$

$$Bq = 1.00$$

Fattori di inclinazione piano di campagna:

$$Gg = 1.00$$

$$Gc = 1.00$$

$$Gq = 1.00$$

Fattori di profondità piano di posa:

$$Dc = 1.33$$

$$Dq = 1.31$$

Indice di rigidezza $I_r = 184.100$

Indice di rigidezza critico $I_{rc} = 25.268$

Essendo $I_r > I_{rc}$ vale l'ipotesi di terreno incompressibile

I fattori correttivi di compressibilità sono unitari.

Capacità portante limite ultima = kg/mq 26220.646

Capacità portante limite ultima = kg/cm² 2.622

Resistenza di calcolo del terreno = kg/cm² 1.14

VERIFICA SECONDO LE NTC DM 17-01-2018 – CONDIZIONI CONSOLIDATE
DRENATE CD

Le verifiche Geotecniche agli stati limite ultimi SLU devono soddisfare la relazione

$R_d > E_d$

Fondazione diretta – plinto.

APPROCCIO 1 COMBINAZIONE 1 (STR) – A1 + M1 + R1

APPROCCIO 2 COMBINAZIONE 1 (STR) – A1 + M1 + R3

$$- \mathbf{Rd1-1} = P_{crit} / \gamma r1 = 2,622 / 1 = 2,622 \text{ kg/cmq}$$

$$R3 = R1 = \gamma r = 1$$

APPROCCIO 2 COMBINAZIONE 1 (GEO) – A1 + M1 + R3

$$\mathbf{Rd2-1} = P_{crit} / \gamma r3 = 2,622 / 2,3 = 1,14 \text{ kg/cmq}$$

Per il calcolo della resistenza di progetto in condizioni non drenate di seguito è ipotizzata la capacità portante dei terreni si è utilizzata sempre attraverso la formulazione di Brinch Hansen la coesione non drenata dello strato 1 con angolo di attrito efficace pari a zero.

Peso specifico del terreno sotto il piano di posa = kg/mc 1900.00

Il calcolo sarà eseguito secondo l'approccio n. 2.

Coefficiente parziale per angolo resistenza a taglio: 1

Coefficiente parziale per coesione: 1

Coefficiente parziale per resistenza non drenata: 1

Coefficiente parziale per capacità portante: 2.3

Nuovo angolo di attrito:

Nuova coesione: 5000.00

Fattori di forma:

$$S_g = 0.60$$

$$S_c = 1.20$$

Fattore di inclinazione carico $I_c = 1.00$

Fattore di inclinazione fondazione $B_c = 1.00$

Fattore di inclinazione piano di campagna $G_c = 1.00$

Fattore di profondità piano di posa $D_c = 1.40$

Capacità portante limite ultima = kg/mq 44539.356

Capacità portante limite ultima = kg/cmq 4.454

Resistenza di calcolo del terreno = kg/cmq 1.94

VERIFICA SECONDO LE NTC DM 17-01-2018 - CONDIZIONI NON DRENATE
CU

Le verifiche Geotecniche agli stati limite ultimi SLU devono soddisfare la relazione

$$R_d > E_d$$

Fondazione diretta – plinto.

APPROCCIO 1 COMBINAZIONE 1 (STR) – A1 + M1 + R1

APPROCCIO 2 COMBINAZIONE 1 (STR) – A1 + M1 + R3

- $R_{d1-1} = P_{crit} / \gamma_r1 = 4,454 / 1 = 4,454 \text{ kg/cmq}$

$R_3 = R_1 = \gamma_r = 1$

APPROCCIO 2 COMBINAZIONE 1 (GEO) – A1 + M1 + R3

$R_{d2-1} = P_{crit} / \gamma_r3 = 4,454 / 2,3 = 1,94 \text{ kg/cmq}$

ANALISI SUBSIDENZA

La fascia di territorio della Pianura emiliano romagnola e della costa, sono interessate da un fattore di criticità, vale a dire l'abbassamento della superficie terrestre causato da cambiamenti che avvengono nel sottosuolo; tale fenomeno definito subsidenza ha origini sia naturale che antropica.

L'estrazione dei fluidi dal sottosuolo (acqua e idrocarburi per uso agricolo, industriale e acquedottistico), ampiamente praticata nei nostri territori nelle ultime decine di anni, ha accelerato il processo.

Questo fenomeno diviene un fattore di rischio quando l'abbassamento del terreno è particolarmente rilevante o quando la topografia è già depressa e vicina o al di sotto del livello del mare.

Per una piana alluvionale come quella dei nostri luoghi i valori di subsidenza sono di origine naturale ed in quota parte antropica e sono attesi attorno a valori compresi nella forbice di 5/7.5 mm/anno.

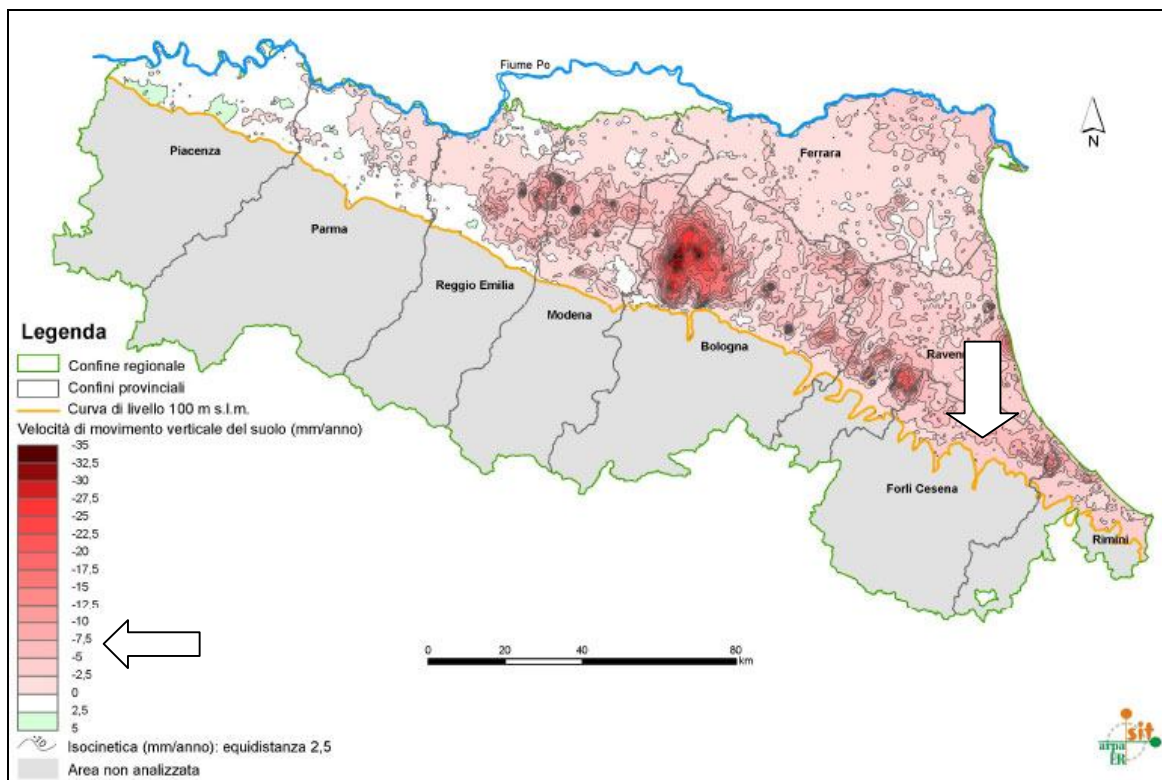


Fig. 7 - Carta della velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006/2011

CEDIMENTI EDOMETRICI

La compressibilità dei terreni è un fenomeno fisico intrinseco inevitabile, in particolare nelle aree dove estesi sono gli affioramenti di sedimenti alluvionali fini argillosi e limosi.

Nella stima dei cedimenti ho considerato carichi netti pari a 2.00kg/cmq, considerando una fondazione tipo plinto utilizzando le colonne stratigrafiche delle prove statiche CPTE realizzate.

Nel caso in oggetto si è stimato il cedimento edometrico utilizzando il modulo edometrico E_d , trascurando i cedimenti immediati che per i terreni in genere costituiscono la parte meno significativa.

CALCOLO DEL CEDIMENTO COL METODO EDOMETRICO

Il cedimento di una fondazione superficiale indica l'abbassamento del piano di posa a causa della deformazione del terreno sottostante.

Il controllo dei cedimenti può comportare una limitazione alle pressioni applicabili al terreno, anche se inferiori alla pressione ammissibile nei riguardi della capacità portante.

Lo studio dei cedimenti di una fondazione deve poter garantire che i cedimenti assoluti e differenziali causati dall'applicazione delle pressioni di progetto della fondazione, siano compatibili con la statica e la funzionalità della sovrastruttura.

Componenti del cedimento sono i rotolamenti e gli scorrimenti tra le particelle e la rottura dei granuli che modifica la struttura del materiale. Solo una piccolissima frazione del cedimento proviene dalla deformazione elastica dei granuli. La maggior parte del cedimento ha natura plastica e non può essere recuperato una volta scaricato il terreno. E', comunque, possibile trattare il terreno come materiale pseudostatico.

Il metodo edometrico assume che il terreno di fondazione si deforma esclusivamente in direzione verticale, senza espansioni o contrazioni laterali.

Le tensioni indotte dai carichi vengono calcolate con la teoria dell'elasticità, secondo la quale la tensione normale verticale è funzione esclusivamente dei carichi applicati e della geometria del problema.

Con il metodo edometrico il cedimento immediato risulta nullo ed il cedimento finale coincide con quello di consolidazione.

DATI DI CALCOLO

Strato di terreno n. 1

Spessore: m. 8.80

Peso specifico terreno: kg/mc 1900

Modulo edometrico terreno: kg/cm² 40.00

Strato di terreno n. 2

Spessore: m. 3.20

Peso specifico terreno: kg/mc 0

Modulo edometrico terreno: kg/cm² 55.00

Strato di terreno n. 3

Spessore: m. 1.50

Peso specifico terreno: kg/mc 0

Modulo edometrico terreno: kg/cm² 100.00

Il carico applicato è rettangolare.

Valore del carico: 20000.00

Larghezza fondazione: m 1.50

Lunghezza fondazione: m 1.50

RISULTATI DI CALCOLO

Carico netto = kg/m² 17150.000

Gli incrementi delle tensioni verticali al centro dei vari strati di terreno sono:

Profondità zeta= 440.00

Valore di sigma= 0.09

Profondità zeta= 1040.00

Valore di sigma= 0.02

Profondità zeta= 1275.00

Valore di sigma= 0.01

Cedimento edometrico = cm 1.77

I risultati rientrano nei range di riferimento.

RISCHIO IDROGEOLOGICO IDRAULICO

Il comparto oggetto di inserimento urbanistico presenta una perimetrazione nei rischi di tipo idrogeologico e idraulico derivante dalla cartografia regionale del PAI.

L'assenza di attività idrogeologica nei terreni di copertura alluvionale dovuta alla loro sostanziale impermeabilità nonché la conformazione geomorfologica di lieve rialzo topografico fanno escludere scenari di pericolosità potenziale, dal punto di vista idraulico inoltre, la presenza del Fiume Bevano e l'esclusione dell'area di intervento dall'evento alluvionale del Maggio 2023 fanno escludere rischi di inondazione ed allagamento secondo gli attuali modelli, sebbene sia presente nella cartografia di riferimento una perimetrazione come area di potenziale allagamento.

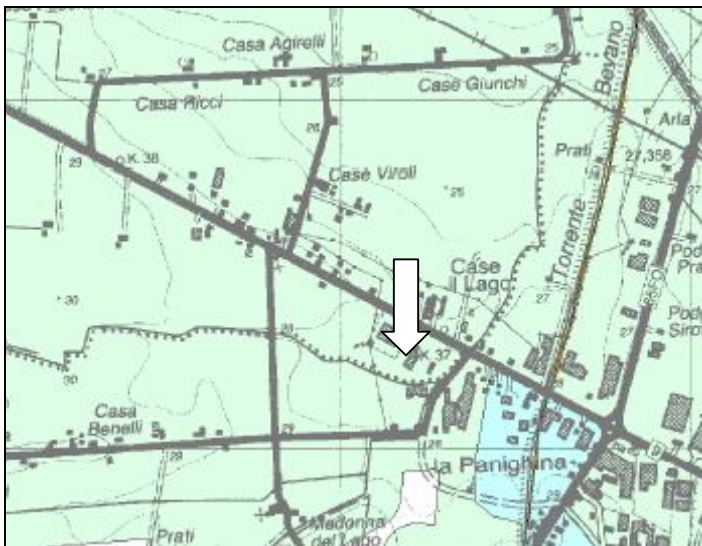















FIG. 9 - Perimetrazione aree a rischio idrogeologico – Piano Stralcio Rischio Idrogeologico



FIG. 10 - Perimetrazione aree a rischio idraulico – PAI Regione Emilia Romagna

Legenda	
Cartografia Catastale	
Acque catastali	
Strade catastali	
Fogli catastali	
Particelle	
Fabbricati	
	
Perimetrazione aree allagate eventi di maggio 2023	
Perimetrazione aree allagate eventi 02-04 maggio 2023 - Vers.4 Decr. SG 55/2024 AdBP	
Perimetrazione aree allagate eventi 16-17 maggio 2023 - Vers.4 Decr. SG 55/2024 AdBP	
Perimetrazione aree allagate eventi 02-04 maggio 2023 - Vers.3 Decr. SG 32/2024 AdBP	
Perimetrazione aree allagate eventi 16-17 maggio 2023 - Vers.3 Decr. SG 32/2024 AdBP	
Perimetrazione aree allagate eventi 02-04 maggio 2023 - Vers.5 Decr. SG 105/2024 AdBPo (VIGENTE)	
Perimetrazione aree allagate eventi 16-17 maggio 2023 - Vers.5 Decr. SG 105/2024 AdBPo (VIGENTE)	
	Ambiti amministrativi 2021
	Regione
	
	Provincia
	
	Comune
	

CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

PROCEDURA ANALISI E INTERPRETAZIONE DATI INDAGINE SISMICA

Nel caso in oggetto la categoria di sottosuolo è stata rilevata attraverso la realizzazione di n. 1 analisi sismica passiva a stazione singola HVSR, che hanno restituito una vsH a cui viene fatta corrispondere categoria C.

HVSR = 214 m/s

Strumentazione utilizzata e modalità esecutive

La misura di microtremore ambientale è stata effettuata per mezzo di un registratore sismico mostrato in figura.



Il registratore è composto da una terna di velocimetri, i quali trasmettono il segnale ad un sistema di acquisizione digitale a basso rumore.

Lo strumento è stato posizionato correttamente (tramite bolla sferica e piedini regolabili) sul terreno; inizia l'acquisizione dei microtremori: i modi di vibrare del terreno vengono amplificati, convertiti in forma digitale, organizzati e salvati su una memoria digitale. Successivamente i dati vengono trasferiti nel PC dove, mediante il codice di calcolo Grilla appositamente sviluppato, vengono analizzati ed elaborati come mostrato in seguito.

Procedura di analisi dati per stazione singola H/V

Dall'elaborazione della registrazione del rumore sismico ambientale, è stata ricavata la curva H/V (HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO) (Pag. 4).

Il grafico H/V TIME HISTORY (Pag. 4) mostra le “finestre temporali” analizzate per l’elaborazione della curva H/V e permette di individuare eventuali finestre di disturbo all’interno di una registrazione.

Il grafico DIRECTIONAL H/V (Pag. 4) rappresenta la proiezione del HVSR lungo le diverse direzioni, da 0° a 180° in senso orario, dove 0° rappresenta la direzione del Nord segnato sullo strumento (da 180° a 360° i risultati sono simmetrici). Questo permette di vedere se una componente orizzontale prevale sull’altra: cioè se la media HVSR riceve più il contributo da parte di un componente orizzontale.

In seguito, il grafico SINGLE COMPONENT SPECTRA (Pag. 5), mostra l’andamento delle singole componenti nelle tre direzioni (N-S_E-O_Verticale).

In base alle conoscenze stratigrafiche, utilizzando la curva H/V, è stato possibile realizzare su di essa un modello sintetico di Vs (EXPERIMENTAL VS. SYNTHETIC H/V) (Pag. 5) seguendo inoltre le linee guida Sesame, 2005 (Pag. 6). Infine viene calcolata la velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m di terreno ai sensi di legge (Norme Tecniche per le Costruzioni 2008, ex DM 14/09/2005) con la seguente formula:

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

dove h_i e V_{s_i} sono spessori e velocità dei singoli strati.

Indagine HVSR

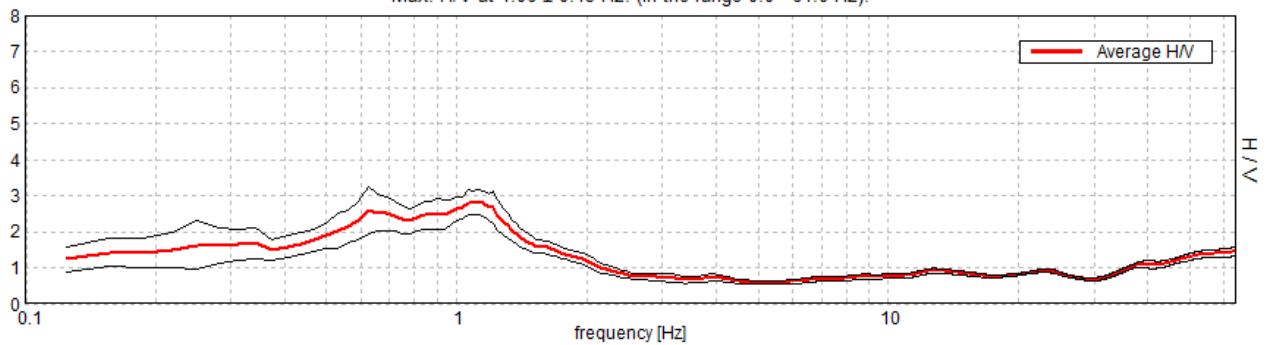
VIA PONARA ROMAGNOLA CONGLOMERATI,

Instrument: TRZ-0194/01-12
Data format: 16 byte
Full scale [mV]: n.a.
Start recording: 26/03/25 13:42:40 End recording: 26/03/25 13:54:40
Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
GPS data not available

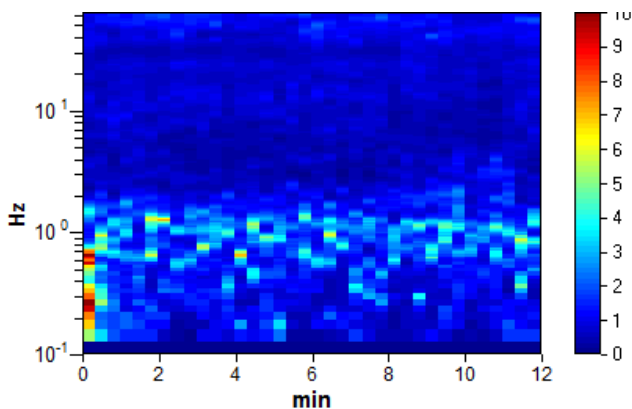
Trace length: 0h12'00". Analysis performed on the entire trace.
Sampling rate: 128 Hz
Window size: 20 s
Smoothing type: Triangular window
Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

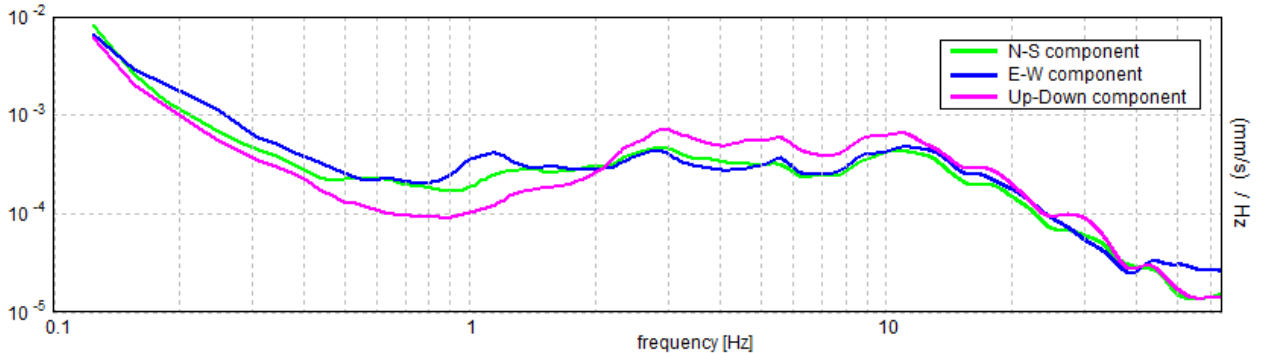
Max. H/V at 1.06 ± 0.43 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



H/V TIME HISTORY

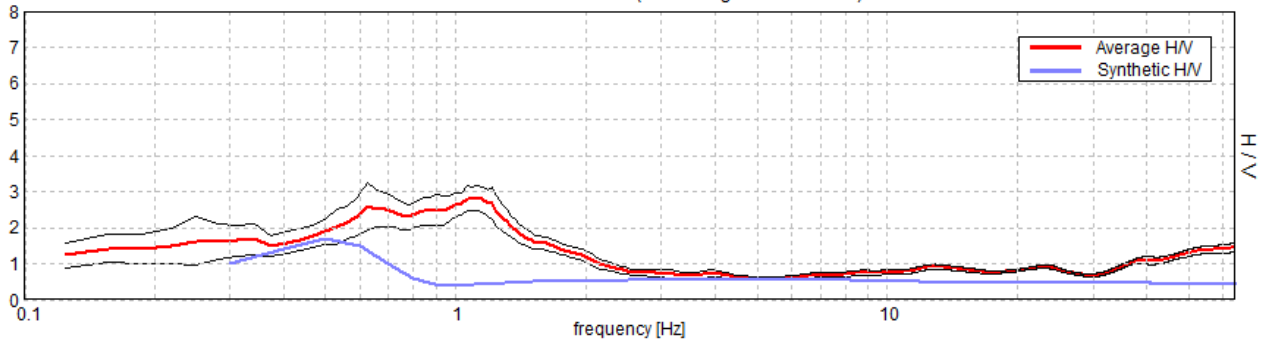


SINGLE COMPONENT SPECTRA



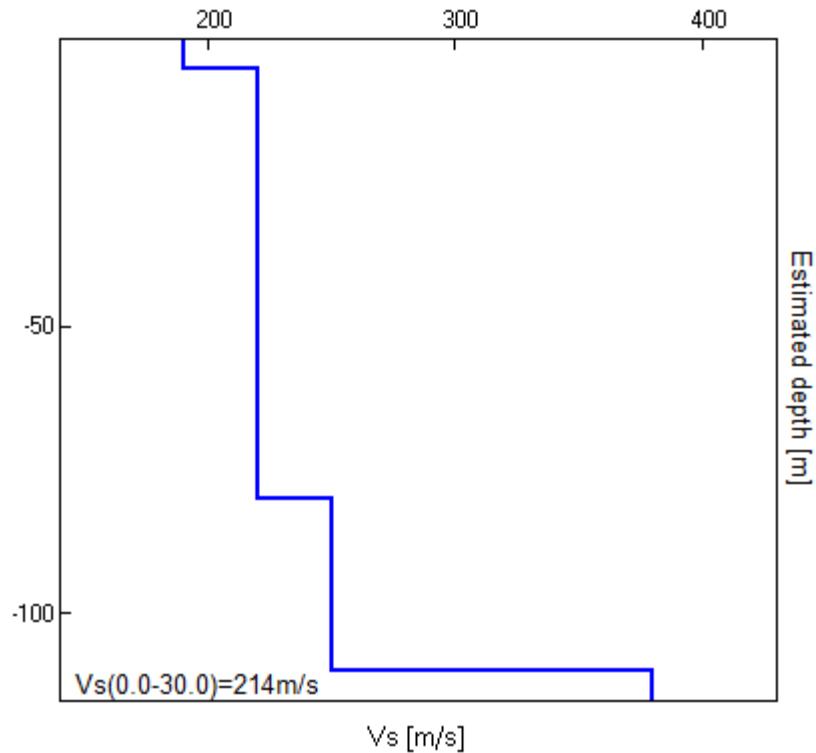
EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V

Max. H/V at 1.06 ± 0.43 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
5.20	5.20	190	0.42
80.20	75.00	220	0.42
110.20	30.00	250	0.42
inf.	inf.	380	0.42

Vs(0.0-30.0)=214m/s



[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.**]

Max. H/V at 1.06 ± 0.43 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	1.06 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	765.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 52 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$			NO
---	--	--	-----------

Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$		1.75 Hz		OK	
$A_0 > 2$		2.82 > 2		OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$		0.40178 < 0.05		NO	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$		0.42689 < 0.10625		NO	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$		0.3396 < 1.78		OK	
L_w	window length				
n_w	number of windows used in the analysis				
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles				
f	current frequency				
f_0	H/V peak frequency				
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency				
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$				
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0				
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f				
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$				
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$				
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided				
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve				
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$				
Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 f_0	0.2 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

ANALISI MICROSISMICA

Il territorio comunale di Forlimpopoli è stato sottoposto a zonazione sismica con secondo livello di approfondimento, nell'anno 2019, attraverso una serie di indagini sismiche passive e attive ed una serie di prove meccaniche ed indagini del sottosuolo già in possesso dell'amministrazione comunale.

Per zonazione sismica di 2° livello si intende quanto contenuto nell'Atto di Indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'Art 16, c.1 della L.R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di micro zonazione sismica in Emilia Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" approvato con Deliberazione dell'Assemblea legislativa della Regione

Emilia Romagna n. 112 del 2 Maggio 2007, poi aggiornata con il DGR 2193/2015 ed ora DGR 630/2019.

Tale analisi ha avuto lo scopo di individuare e di valutare il grado di pericolosità sismica locale attraverso la redazione di Tavole di MZS con la quantificazione delle amplificazioni locali per zona omogenee, distinguendole in tre diverse Microzone:

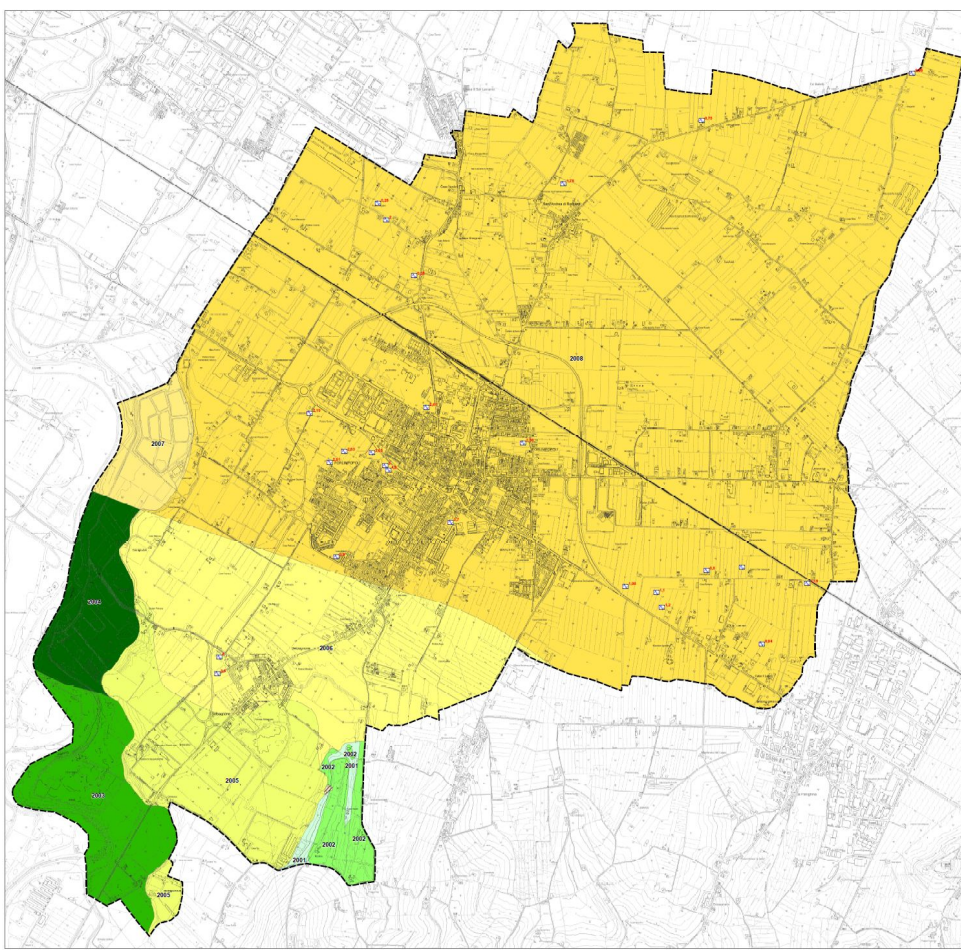


Fig. 10 – Carte delle Microzone MOPS micro zonazione sismica Comune di Forlimpopoli

Legenda	
Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali	
2001	ZONA 1: substrato coesivo sovraconsolidato e stratificato, non rigido ($V_s < 800$ m/s), costituito dalla formazione delle Argille Azzurre. In superficie è presente un orizzonte di alterazione dello spessore inferiore a 2,5 metri.
2002	ZONA 2: successione stratigrafica costituita da un orizzonte superficiale limo-argilloso avente spessore di 2,5-7,5 metri, con intercalazioni di livelli contenenti ciottoli, che ricopre un substrato coesivo sovraconsolidato stratificato non rigido ($V_s < 800$ m/s).
2003	ZONA 3: successione stratigrafica costituita da depositi ghiaiosi subaffioranti di origine alluvionale, con locali intercalazioni limo-sabbiose, aventi spessore complessivo 10-20 metri. I depositi ghiaiosi poggiano direttamente su un substrato coesivo sovraconsolidato stratificato non rigido ($V_s < 800$ m/s).
2004	ZONA 4: successione stratigrafica costituita da depositi ghiaiosi subaffioranti di origine alluvionale, con locali intercalazioni limo-sabbiose, aventi spessore complessivo 20-40 metri. I depositi ghiaiosi poggiano direttamente su un substrato coesivo sovraconsolidato stratificato non rigido ($V_s < 800$ m/s).
2005	ZONA 5: successione stratigrafica costituita da un orizzonte superficiale limo-argilloso avente spessore di 7,5-12,5 metri, che ricopre depositi ghiaiosi di origine alluvionale. I depositi ghiaiosi poggiano su un substrato coesivo sovraconsolidato stratificato non rigido ($V_s < 800$ m/s).
2006	ZONA 6: successione stratigrafica costituita da un orizzonte superficiale limo-argilloso avente spessore di 12,5-17,5 metri, che ricopre depositi ghiaiosi di origine alluvionale. I depositi ghiaiosi poggiano su un substrato coesivo sovraconsolidato stratificato non rigido ($V_s < 800$ m/s).
2007	ZONA 7: successione stratigrafica costituita da alternanze di depositi fini e grossolani, poggianti su un substrato coesivo sovraconsolidato stratificato non rigido ($V_s < 800$ m/s), situato a profondità maggiori di 50 metri dal piano campagna.
2008	ZONA 8: successione stratigrafica costituita da alternanze di depositi fini e grossolani, poggianti su un substrato coesivo sovraconsolidato stratificato non rigido ($V_s < 800$ m/s), situato a profondità maggiori di 50 metri dal piano campagna. In superficie è presente un orizzonte limo-argilloso che ricopre un primo livello ghiaioso situato a profondità maggiori di 20 metri dal piano campagna.

Via Ponara - **microzona 2008 - Pianura**

ZONA 8: successione stratigrafica costituita da alternanze di depositi fini e grossolani, poggianti su un substrato coesivo sovraconsolidato stratificato non rigido ($V_s < 800$ m/s), situato a profondità maggiori di 50 metri dal piano campagna. In superficie è presente un orizzonte limo-argilloso che ricopre un primo livello ghiaioso situato a profondità maggiori di 20 metri dal piano campagna.

Nell'ambito oggetto di studio, a supporto delle indagini geologiche e sismiche disponibili, sono state affiancate, onde ottenere dati puntuali, dalle n. 2 prove penetrometriche statiche CPTE come richiesto da DGR e n. 1 indagine sismica passiva a stazione singola

Il valore ricavato della V_{seq} è:

HVSR1: V_{sH} = 214 m/sec - picco frequenza 1,06 Hz

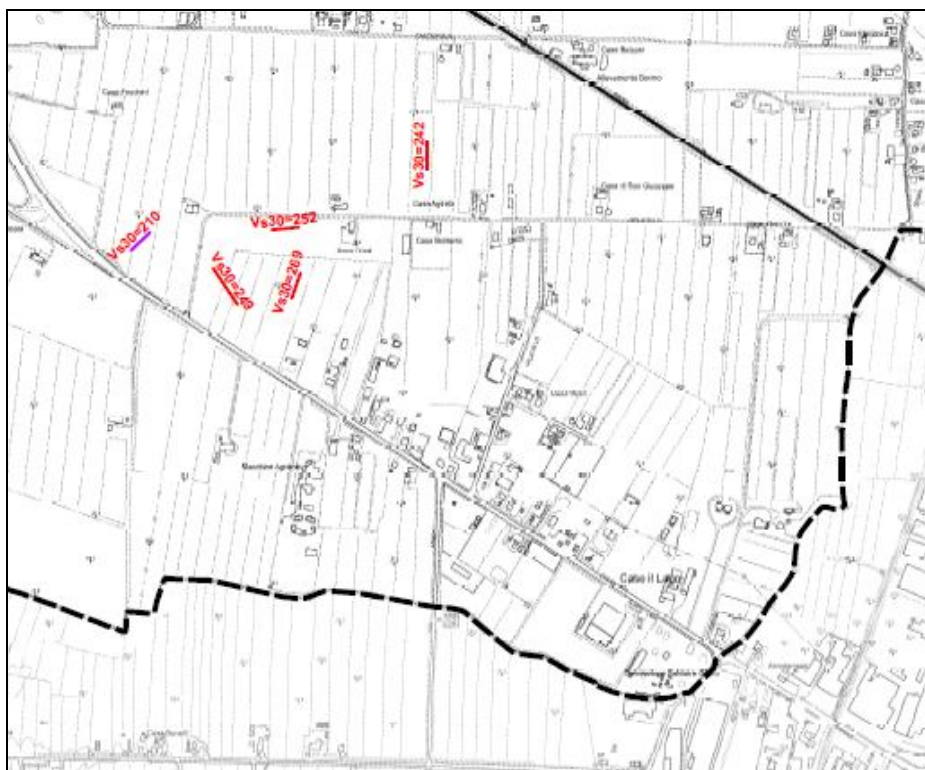


Fig. 11 – stralcio Carta VSH o Vs30 in M/s Comune di Forlimpopoli

La velocità vs_{30} ottenuta dalla prova ha permesso di risalire al fattore di amplificazione F.A. rispetto ad un suolo di riferimento. Questo fattore è espresso in termini di rapporto di accelerazione massima orizzontale ossia PGA/PGA_0 .

PGA viene ricavato da tabelle di riferimento in funzione delle velocità di VS_{30} .

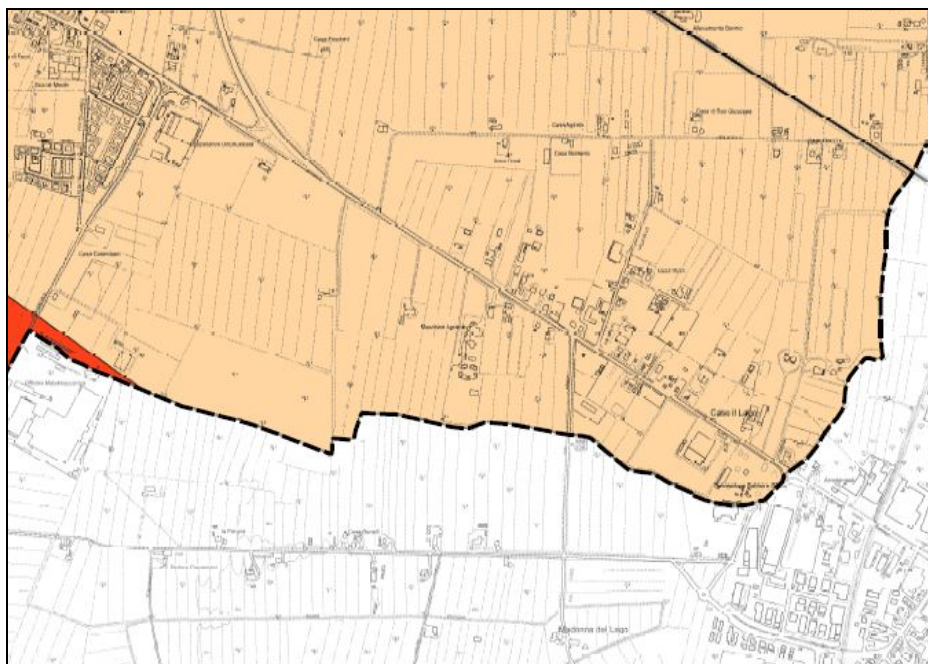


Fig. 12 – stralcio Carta Fa PGA (1.5/1.6 Via Ponara)

Fa – PGA 1.5/1.6

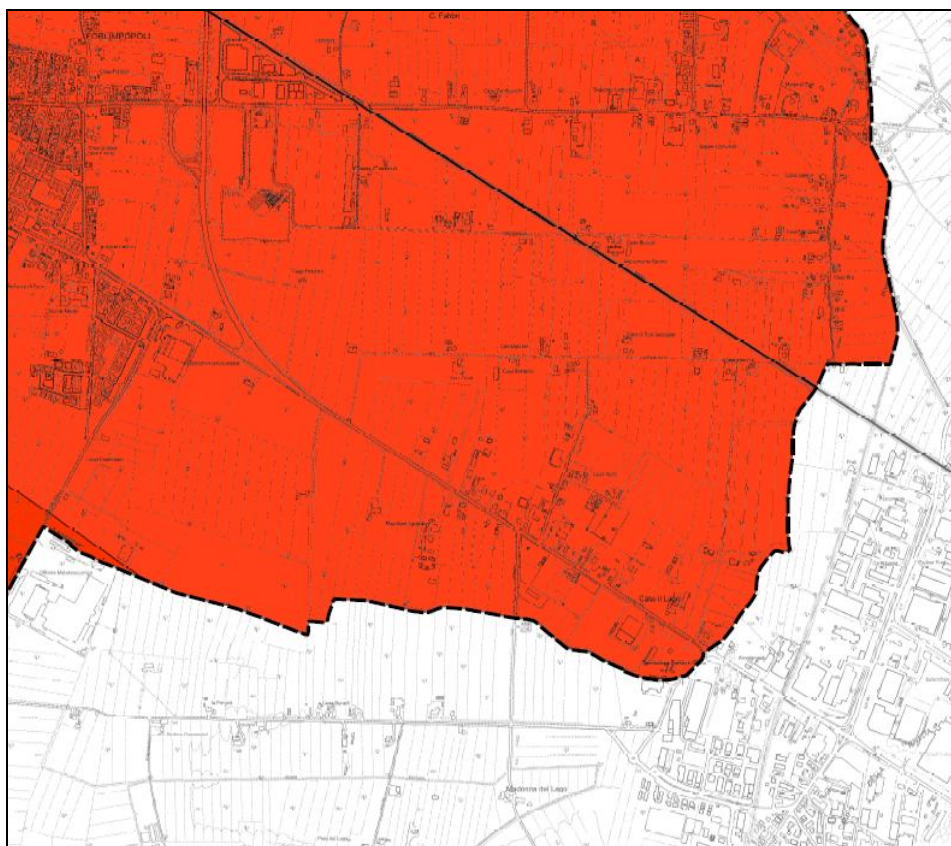
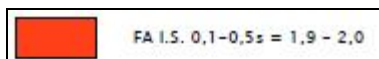


Fig. 13 – Carta Fa 0.1/0.5s



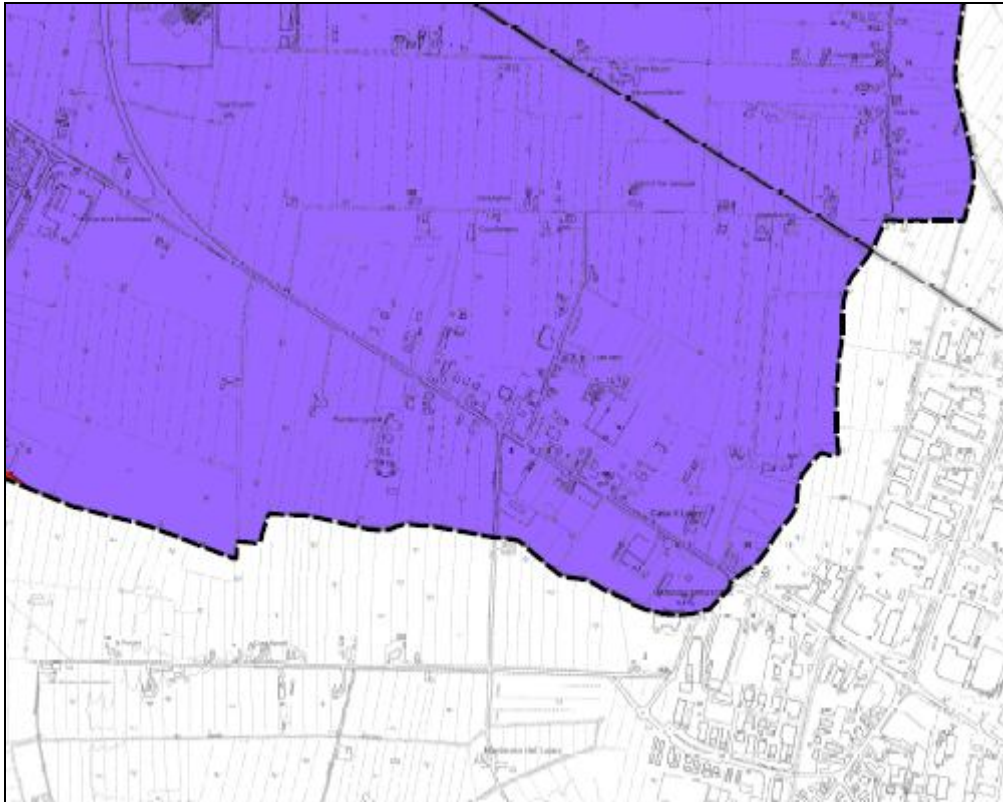
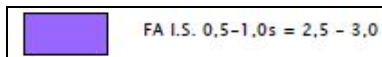


Fig. 14 – Carta Fa 0.5/1 s



PGA0 è stato ottenuto mediante un input spettrocompatibile fornito dal Servizio Sismico della Regione Emilia Romagna relativo al territorio comunale di Cesena, da cui si è risaliti all'accelerogramma di riferimento.

Questi valori sono stati usati per la valutazione del fattore di amplificazione sismica mediante le tabelle A2.1.1 del DGR 2193/2015, considerando un determinato contesto di riferimento Pianura

La tabella n. 8 riporta i Fattori di Amplificazione determinati secondo la DGR n. 2193/2015.

TABELLA N. 8 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DETERMINATI NEL II LIVELLO

MOPS	ZONA	TABELLA F.A.	Vs	FORMAZIONE GEOLOGICA	FATTORI DI AMPLIFICAZIONE				NOTE
					PGA	IS 0,1-0,5 S	IS 0,5-1 S	IS 0,5-1,5 S	
STAB	2001	Appennino substrato affiorante <<800 m/s	Vs30=350	FAA	1,9	1,9	1,5	-	
	2002	Appennino <<800 m/s	Vs5=200	AES AES _{8a} a4	2,0	1,7	1,4	-	
	2003	Appennino <<800 m/s	Vs15=350	AES _{8a} b1	1,8	1,6	1,4	-	
	2004	Appennino <<800 m/s	Vs30=350	AES _{8a} b1	1,9	2,1	1,7	-	
	2005	Margine tipo A	Vs10=250	AES ₈ AES _{8a}	2,0	2,0	1,8	-	
	2006	Margine tipo A	Vs15=250	AES ₈ AES _{8A}	2,0	2,2	2,1	-	
	2007	Margine tipo B	Vs30=300	AES _{8a} b1	1,6	1,8	2,3	2,4	
	2008	Margine tipo B	Vs30=250	AES ₈ AES _{8a}	1,6	1,9	2,5	2,7	
INSTAB	2009	Appennino <<800 m/s	Vs5=200	a2	2,0	1,7	1,4	-	Substrato FAA

I valori di di F.A. ricavati sono stati quindi ricavati dal PSC comunale per Via Ponara

F.A. (P.G.A) = 1.6
F.A. SI 1 - INTENSITA' SPETTRALE - 0.1s < To < 0.5s = 1.9
F.A. SI 2 - INTENSITA' SPETTRALE - 0.5s < To < 1.0s = 2.5

Fig. 16 – Tabella Fattori di amplificazione PSC comunale – ZONA 2008 Margine tipo B

Gli indirizzi della L.R.20/2000 dispongono che il calcolo delle risposta sismica locale nelle analisi di terzo livello sia eseguito sulla base di segnali di riferimento assegnati ad ogni comune. Tali segnali sono rappresentativi dello scuotimento atteso su un suolo di riferimento, quest'ultimo inteso come la superficie al di sotto della quale si può

assumere una velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) superiore o uguale a 800 m/s.

Per la definizione del moto di riferimento viene riportato la forma dello spettro di risposta normalizzato rappresentativo del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%) in Emilia-Romagna

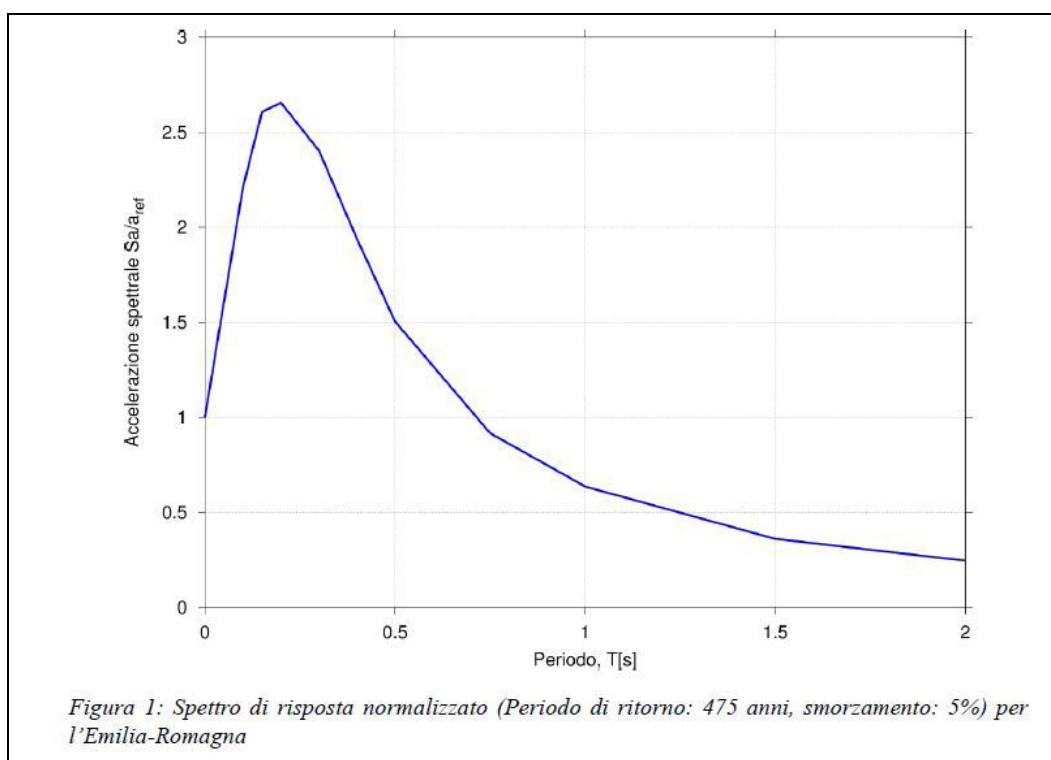


Fig. 17 – Spettro di risposta normalizzato ER

Dallo spettro di risposta normalizzato è possibile ottenere, moltiplicando i valori della tabella 1 per il valore di a_{refg} di ogni comune, lo spettro di risposta a probabilità uniforme che descrive le caratteristiche del moto sismico atteso per ogni comune dell'Emilia-Romagna.

Nella figura seguente infine è riportato lo spettro di risposta elastica normalizzato e quello scalato della componente orizzontale ricavato dalla tabella 2 dell'allegato A4 della norma di indirizzo regionale che per Forlimpopoli presenta un valore di

accelerazione massima orizzontale di picco al bedrock, per $T=0$, $a_{refg} = 0.199$ g e quindi di una a_{max} per T_0 di:

$$a_{max} = a_{refg} * PGA = 0.204 * 1.6 = 0.326 \text{ g}$$

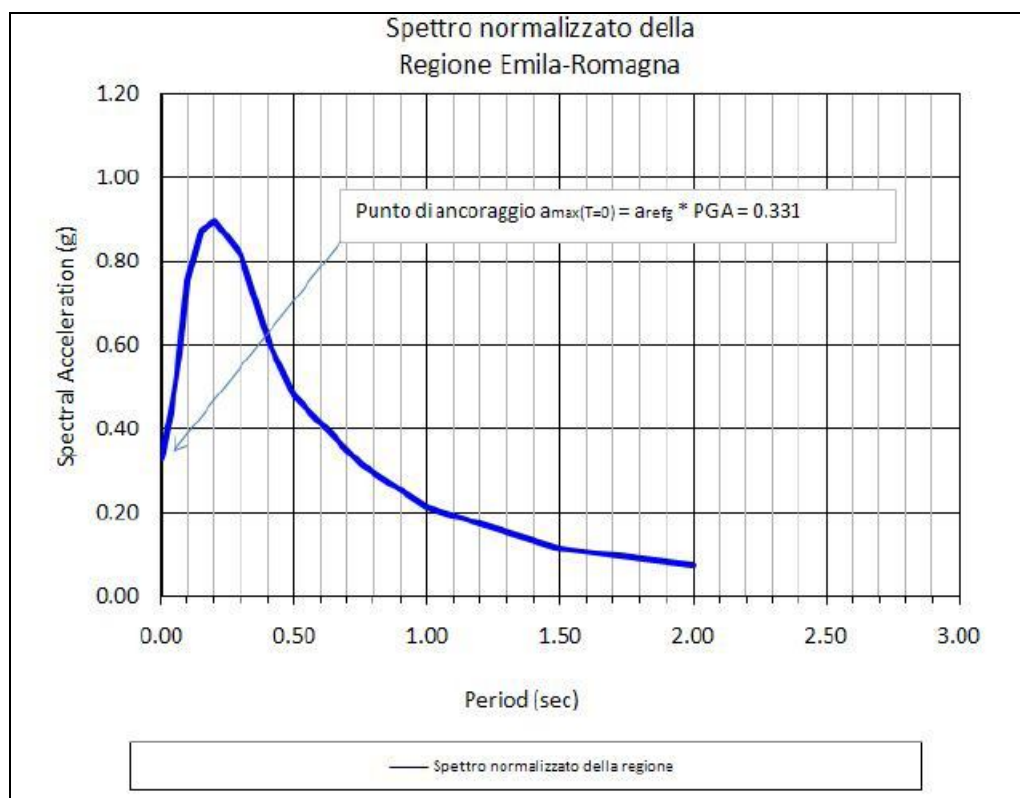


Fig. 18 – Spettro di risposta Punto di ancoraggio = 0.298 g

RELAZIONE TRA COEFFICIENTI DI AMPLIFICAZIONE ATTESI E VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE

Una delle principali cause di danneggiamento da sisma è dovuta dalla risonanza concomitante del terreno e della struttura denominato doppia risonanza.

Una struttura può ritenersi salva da possibili danneggiamenti da sisma solo quando la frequenza propria del terreno risulta superiore ai principali modi di vibrare delle strutture.

Una relazione tipica tra l'altezza di un edificio in c.a. o muratura e la frequenza del primo modo di vibrare della struttura è espressa dai grafici di Masi et al. 2008 di seguito riportati.

La lettura sismica effettuata ha evidenziato un picco di risonanza marcato, intorno a 1 hz; per edifici in c.a. di altezza di 10 m è plausibile il verificarsi del fenomeno di doppia risonanza, essendo il primo modo di vibrare del terreno comparabile con quello della struttura in edificazione; in ambito di progettazione strutturale il fenomeno atteso andrà considerato nei calcoli strutturali.

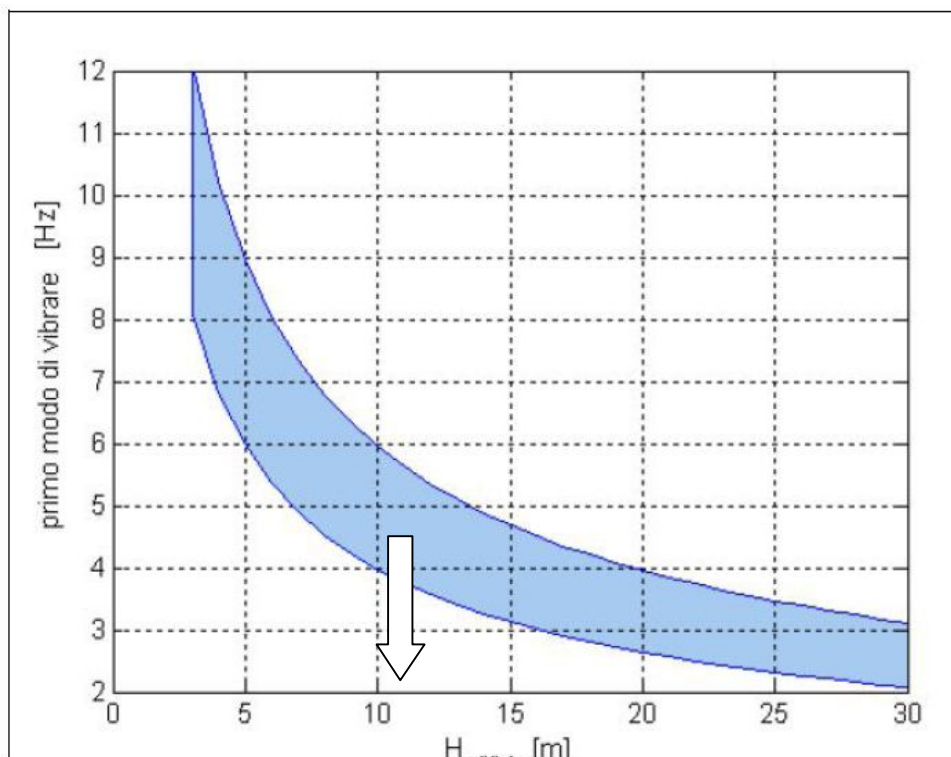
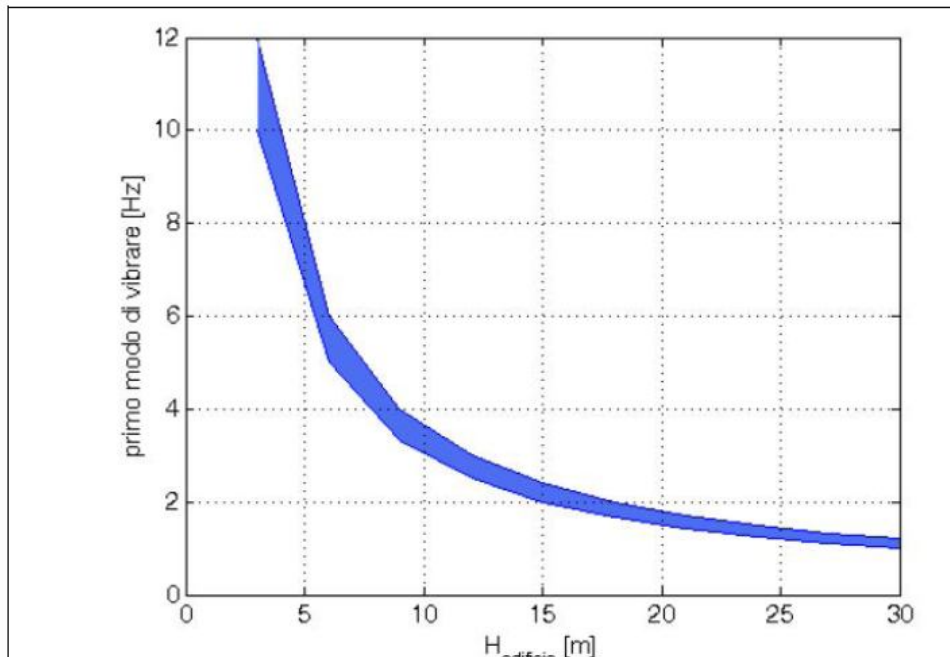


Fig. 21 – I° modo vibrare edifici c.a. in funzione di h



RISPOSTA SISMICA LOCALE III LIVELLO DI APPROFONDIMENTO

PROCEDURA DI CALCOLO

La procedura di calcolo adoperata da RSL per la valutazione della funzione di trasferimento presuppone come base di partenza uno o più accelerogrammi, od uno spettro di risposta in accelerazione, e la conoscenza della stratigrafia del sito attraverso i seguenti parametri geotecnici per ogni strato:

peso per unità di volume;

velocità di propagazione delle onde di taglio;

coefficiente di spinta laterale;

modulo di taglio iniziale (opzionale);

spessore;

indice di plasticità.

La non linearità del calcolo è introdotta dalla dipendenza del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso dalla deformazione.

Schematicamente la procedura è riassumibile nel seguente modo:

Valutazione dello spettro di Fourier dell'accelerogramma (omessa nel caso si debba analizzare uno spettro);

Ricerca di un errore relativo piccolo seguendo la procedura di:

Stima della funzione di trasferimento;

Valutazione della deformazione indotta in ciascuno strato;

Correzione del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso per ogni strato;

Le operazioni 2.1, 2.2 e 2.3 sono ripetute fino a quando la differenza di deformazione tra un'iterazione e la precedente non rimane al di sotto di una soglia ritenuta accettabile;

Trasformazione inversa di Fourier dello spettro precedentemente calcolato ed opportunamente pesato per mezzo della funzione di trasferimento calcolata.

Attraverso questa procedura è possibile “trasferire” l'accelerogramma dal bedrock in superficie. La deformazione per ciascuno strato viene corretta sulla base del rapporto fra deformazione effettiva e massima come suggerito dalla letteratura scientifica, ovvero

$$\frac{\gamma_{eff}}{\gamma_{max}} = \frac{M - 1}{10}$$

dove M rappresenta la magnitudo del sisma.

Per la valutazione della funzione di trasferimento, RSL considera un suolo variamente stratificato composto da N strati orizzontali di cui l'N-esimo è il letto di roccia

(bedrock). Ponendo come ipotesi che ciascuno strato si comporti come un solido di

Kelvin-Voigt $\left[\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma(z, t)}{\partial z \partial t} \right]$, la propagazione delle onde di taglio che attraversano gli strati verticalmente può essere definita dall'equazione dell'onda:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (1)$$

dove: u rappresenta lo spostamento; t il tempo; ρ la densità; G il modulo di deformazione al taglio; η la viscosità. Per onde armoniche lo spostamento può essere scritto come:

$$u(z, t) = U(z) e^{i\omega t} \quad (2)$$

che sostituita nella (1) pone

$$(G + i\omega\eta) \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho \omega^2 U \quad (3)$$

dove ω rappresenta la frequenza angolare. La (3) può essere riscritta come

$$G^* \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho \omega^2 U \quad (4)$$

avendo posto $G^* = G + i\omega\eta$, ovvero il modulo di deformazione al taglio complesso.

Questo può essere ulteriormente riscritto come

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \quad (5)$$

avendo posto

$$\eta = \frac{2G}{\omega} \xi \quad (6)$$

dove ξ rappresenta il coefficiente di smorzamento viscoso. Ciò posto, e fatta convenzione che l'apice * indica la natura complessa della variabili in gioco, la soluzione dell'equazione generica dell'onda è la seguente:

$$u(z, t) = E e^{i(\omega t + k^* z)} + F e^{i(\omega t - k^* z)} \quad (7)$$

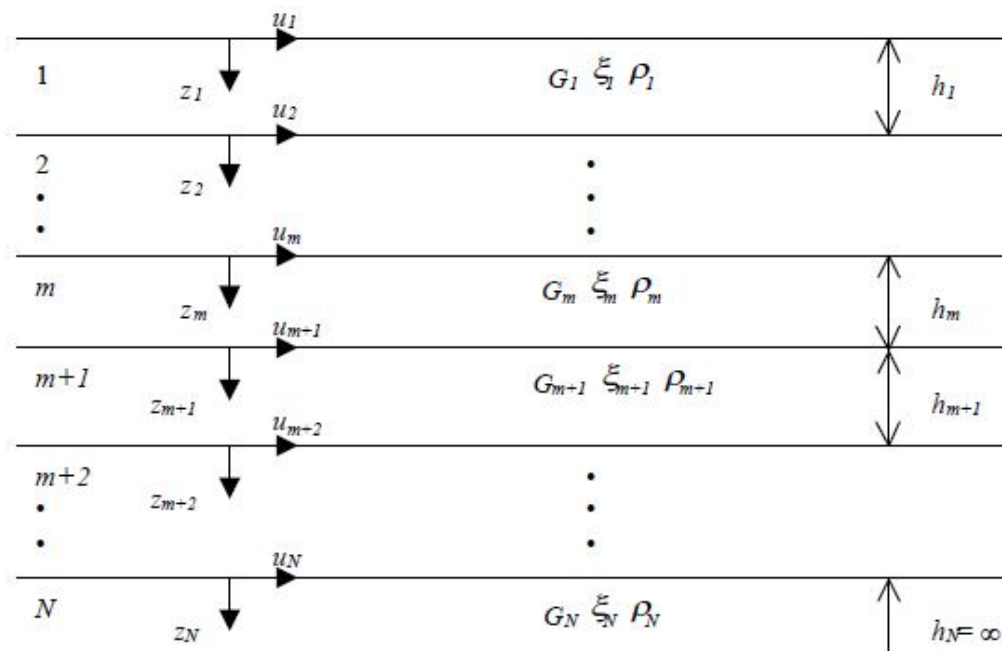


Figura 1: Esempio di stratigrafia per riferimento.

dove E e F dipendono dalle condizioni al contorno e rappresentano l'ampiezza d'onda che viaggia rispettivamente verso l'alto (-z) e verso il basso (+z), mentre k^* rappresenta il numero d'onda complesso dato dalla seguente espressione:

$$k^* = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \quad (8)$$

Il taglio invece è dato da:

$$\tau(z, t) = G^* \frac{dU}{dz} e^{i\omega t} = ik^* G^* [E e^{i(\omega t + k^* z)} + F e^{i(\omega t - k^* z)}] e^{i\omega t} \quad (9)$$

Per il generico strato m di spessore h_m gli spostamenti, rispettivamente in sommità ($z = 0$) ed al fondo ($z = h_m$), sono:

$$u_m(0, t) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$u_m(h_m, t) = (E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \quad (11)$$

Poiché deve essere rispettata la congruenza sullo spostamento all'interfaccia tra gli strati, ovvero lo spostamento in sommità ad uno strato deve essere uguale allo spostamento sul fondo di quello immediatamente sopra, se ne deduce che:

$$\frac{\tau_m}{k_m} = \dots \quad (12)$$

Usando la (10), (11) e la (12), ne consegue che

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \quad (13)$$

Il taglio in sommità ed al fondo dell' m-esimo strato è dato da:

$$\tau_m(0, t) = ik_m^* G_m^* [E_m - F_m] e^{i\omega t} \quad (14)$$

$$\tau_m(h_m, t) = ik_m^* G_m^* [E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}] e^{i\omega t} \quad (15)$$

Poiché fra uno strato e l'altro il taglio deve essere continuo si ha

$$\frac{\tau_m}{k_m} = \frac{\tau_{m+1}}{k_{m+1}} \quad (16)$$

ovvero

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}) \quad (17)$$

Sommando la (13) alla (17) e sottraendo la (17) alla (13) si ottiene

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (18)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (19)$$

dove α_m^* rappresenta il coefficiente di impedenza complesso al contorno tra gli strati m ed m+1, ed è dato dalla seguente espressione:

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} \quad (20)$$

Poiché in superficie il taglio è nullo,

$$\tau_1(0, t) = ik_1^* G_1^* [E_1 - F_1] e^{i\omega t} = 0$$

si deduce che $E_1 = F_1$.

Le equazioni (18) e (19) possono essere successivamente applicate agli strati successivi da 2 ad m. La funzione di trasferimento A_{mn} che lega gli spostamenti in sommità degli strati m ed n è definita dalla seguente espressione:

$$A_{mn} = \frac{u_m}{u_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (21)$$

A_{mn} rappresenta la funzione di trasferimento, ovvero la funzione che mette in relazione il modulo della deformazione tra i punti m e n.

In pratica lo stato deformativo di una stratigrafia rimane definito una volta nota la deformazione di un suo qualsiasi punto. Inoltre, poiché la velocità e l'accelerazione sono legati allo spostamento,

$$\dot{u}(z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u(z, t) \quad \ddot{u}(z, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 u(z, t) \quad (22)$$

La funzione di trasferimento A_{mn} può essere espressa anche in funzione delle velocità e dell'accelerazione al tetto degli strati n ed m:

$$A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{\dot{u}_m}{\dot{u}_n} = \frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (23)$$

La deformazione tangenziale rimane definita alla profondità z e al tempo t dalla relazione:

$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik^* (Ee^{ik^*z} - Fe^{-ik^*z}) e^{i\omega t} \quad (24)$$

E la corrispondente tensione tangenziale, dalla seguente espressione:

$$\tau(z, t) = G^* \gamma(z, t) \quad (25)$$

Ai fini di una corretta interpretazione del problema della risposta sismica locale, risulta utile riprodurre la rappresentazione schematica di Figura 2 in cui è riportata la terminologia utilizzata per lo studio del moto sismico di un deposito che poggia su un basamento roccioso.

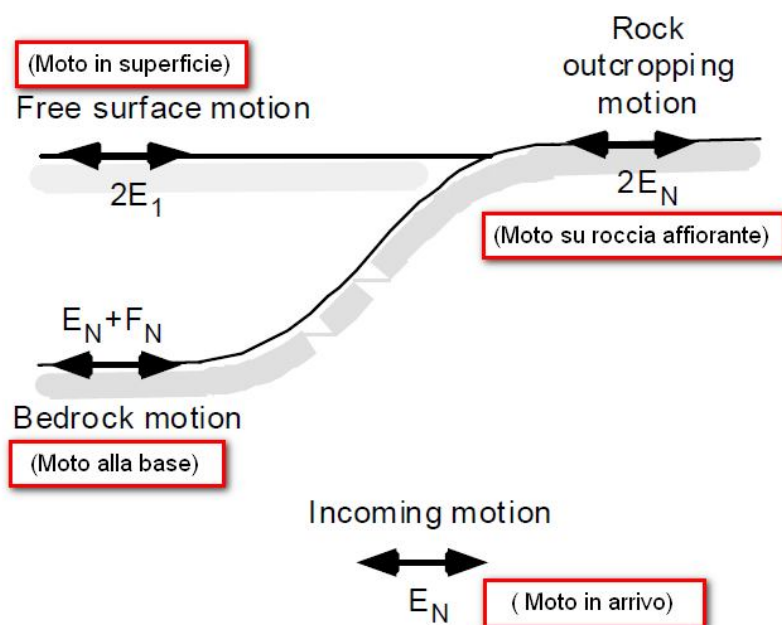


Figura 2: Schema di riferimento e terminologia utilizzata.

Le onde di taglio si propagano verticalmente attraverso il bedrock con ampiezza pari ad E_N ; al tetto del bedrock, sotto il deposito degli strati di terreno, il moto ha un'ampiezza pari a $E_N + F_N$. Sulla roccia affiorante, poiché le tensioni tangenziali sono nulle ($E_N = F_N$), il moto avrà ampiezza pari a $2E_N$. La funzione di trasferimento dal bedrock al bedrock-affiorante è la seguente:

$$A_{NN}(\omega) = \frac{2E_N}{E_N + F_N} \quad (26)$$

A è non lineare poiché G è funzione di γ . Nella procedura di calcolo infatti, da una stima iniziale del modulo di deformazione al taglio, si ottiene la tensione ipotizzando un legame lineare, per poi ottenere un nuovo valore di γ . Grazie a questo valore aggiornato si valuta un nuovo modulo G così da ripetere la procedura fino a quando la differenza tra la deformazione aggiornata e quella ottenuta dalla precedente iterazione

viene ritenuta accettabile. Il modello per $G(\gamma)$ adoperato è quello suggerito da Ishibashi e Zhang (1993) che tiene conto degli effetti della pressione di confinamento e dell'indice di plasticità:

$$G = G_{max} \cdot K(\gamma, PI)(\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0} \quad (24)$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \quad (25)$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145PI^{1.3}) \quad (26)$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & \text{per } PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{per } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{per } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{per } PI > 70 \end{cases} \quad (27)$$

dove G_{max} è dato dalla relazione

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (28)$$

dove ρ è la densità del terreno e V_s la velocità di propagazione delle onde di taglio nello stesso. La (28) fornisce il valore iniziale di G per la prima iterazione.

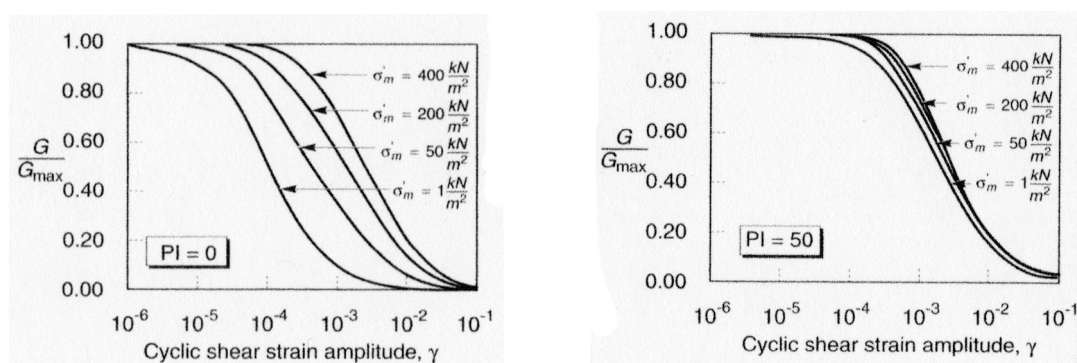


Figura 2: Influenza della pressione di confinamento e della plasticità sul modulo di deformazione al taglio.

Per quanto riguarda invece il coefficiente di smorzamento viscoso ξ , in conseguenza del modello introdotto dalla (24) si ha:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{4.8})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right] \quad (29)$$

da cui si deduce che anche ξ deve essere ricalcolato ad ogni iterazione.

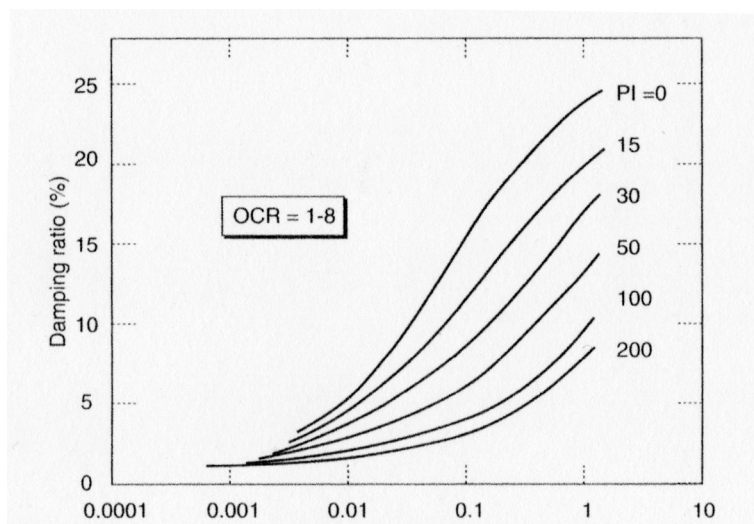


Figura 3: Influenza della plasticità sul coefficiente di smorzamento viscoso.

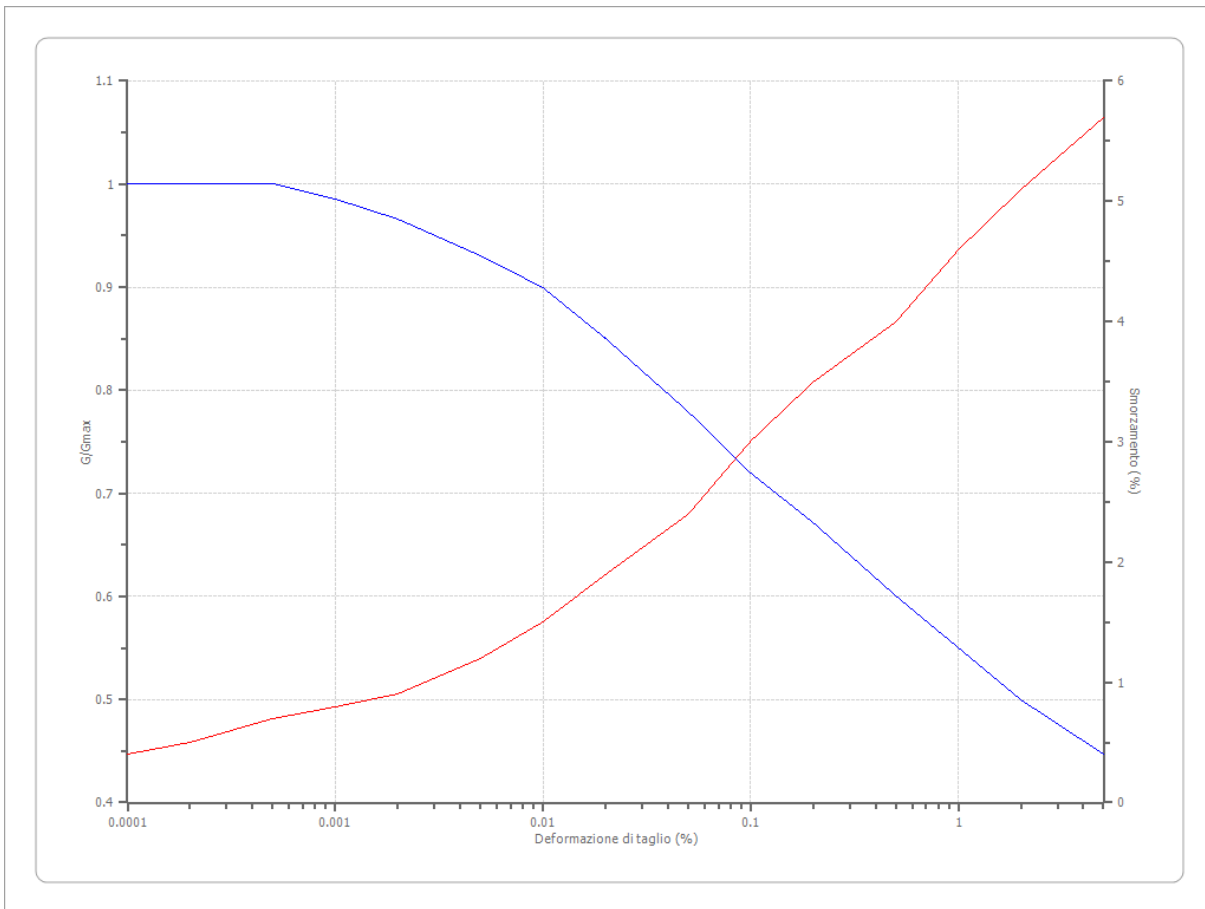
Dati generali

Descrizione	Risposta Sismica Locale di Terzo Livello
Committente	PUA Romagnola Conglomerati SRL
Cantiere	Via Ponara
Operatore della prova	Aride Bucci Geologo
Responsabile della prova	Aride Bucci
Data della prova	29/05/2025
Via	via Ponara Forlimpopoli
Latitudine	44.17401[°]
Longitudine	12.1531525[°]

Terreni

Idriss (1990) Rock

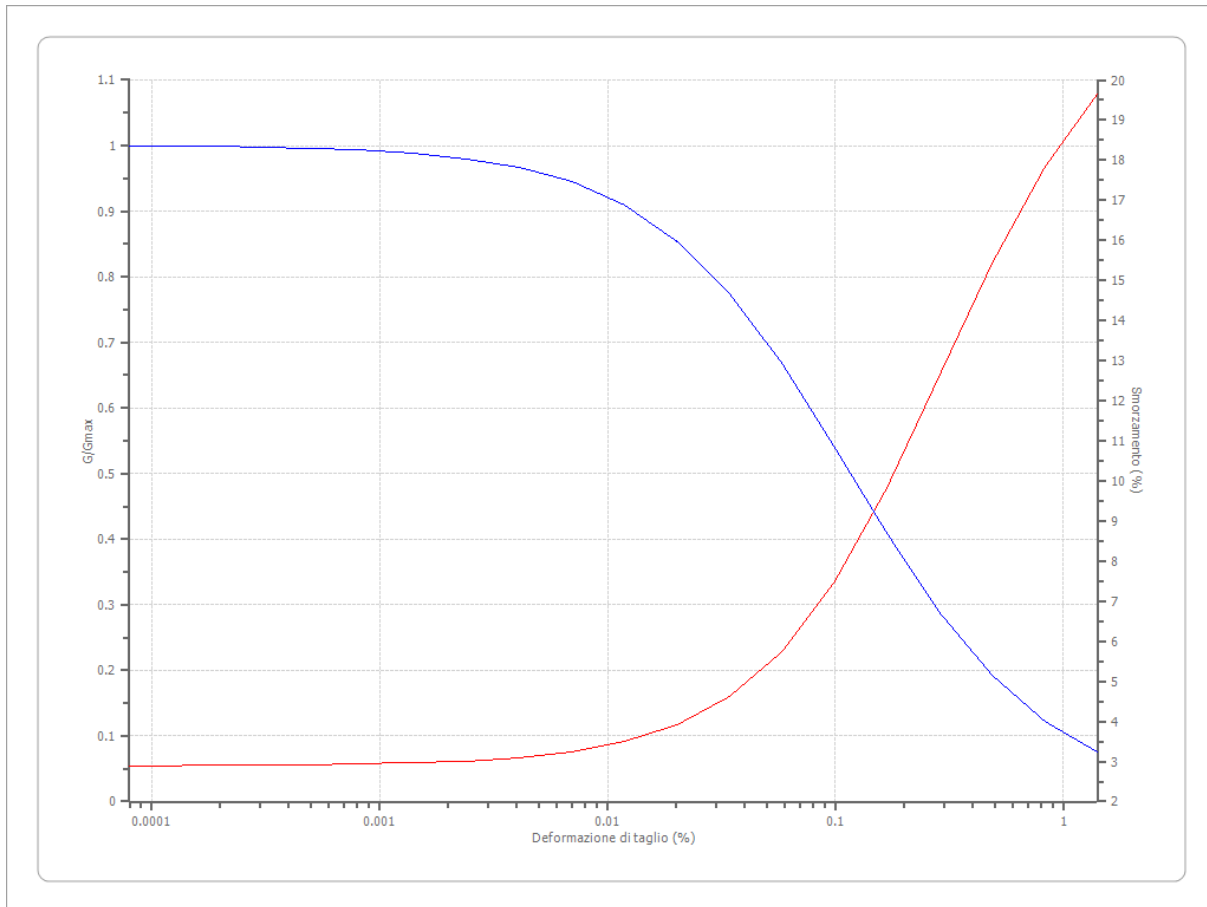
Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.400
0.0002	1.000	0.0002	0.500
0.0005	1.000	0.0005	0.700
0.001	0.986	0.001	0.800
0.002	0.966	0.002	0.900
0.005	0.931	0.005	1.200
0.010	0.900	0.010	1.500
0.020	0.850	0.020	1.900
0.050	0.779	0.050	2.400
0.100	0.720	0.100	3.000
0.200	0.671	0.200	3.500
0.500	0.600	0.500	4.000
1.000	0.550	1.000	4.600
2.000	0.500	2.000	5.100
5.000	0.447	5.000	5.700



- Argille limose

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.00008	1.000	0.00008	2.891
0.0001	0.9992	0.0001	2.8959
0.0002	0.9986	0.0002	2.8994
0.0003	0.9976	0.0003	2.9053
0.0005	0.9959	0.0005	2.9154
0.0008	0.9931	0.0008	2.9326
0.0014	0.9883	0.0014	2.962
0.0024	0.9802	0.0024	3.012
0.0041	0.9667	0.0041	3.0975
0.007	0.9445	0.007	3.2433
0.0119	0.9089	0.0119	3.4917
0.0202	0.854	0.0202	3.9125
0.0343	0.7742	0.0343	4.616

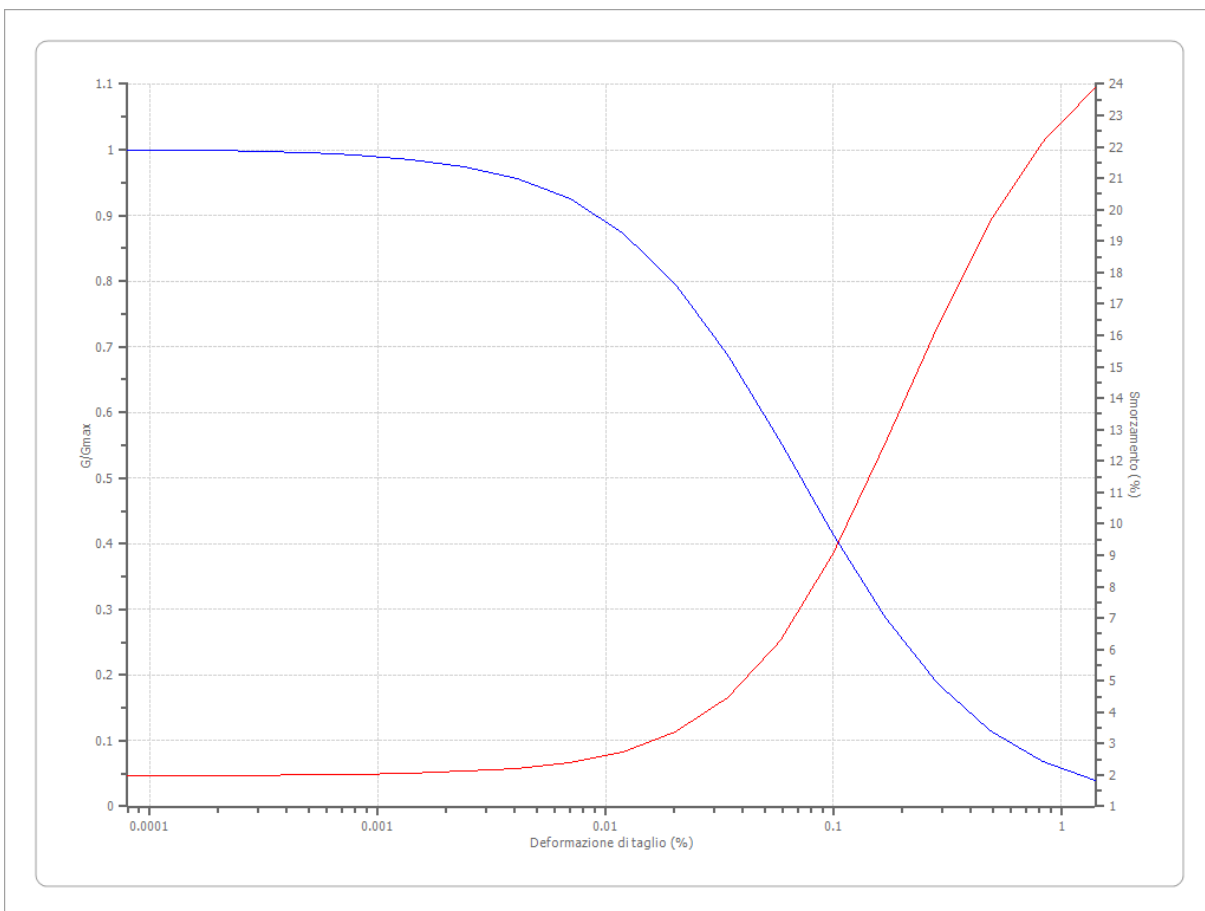
0.0583	0.6677	0.0583	5.7552
0.099	0.5408	0.099	7.4855
0.1684	0.4084	0.1684	9.848
0.2862	0.2881	0.2862	12.6362
0.4866	0.1918	0.4866	15.4287
0.8272	0.1221	0.8272	17.8243
1.4063	0.0754	1.4063	19.6357



Limi sabbiosi

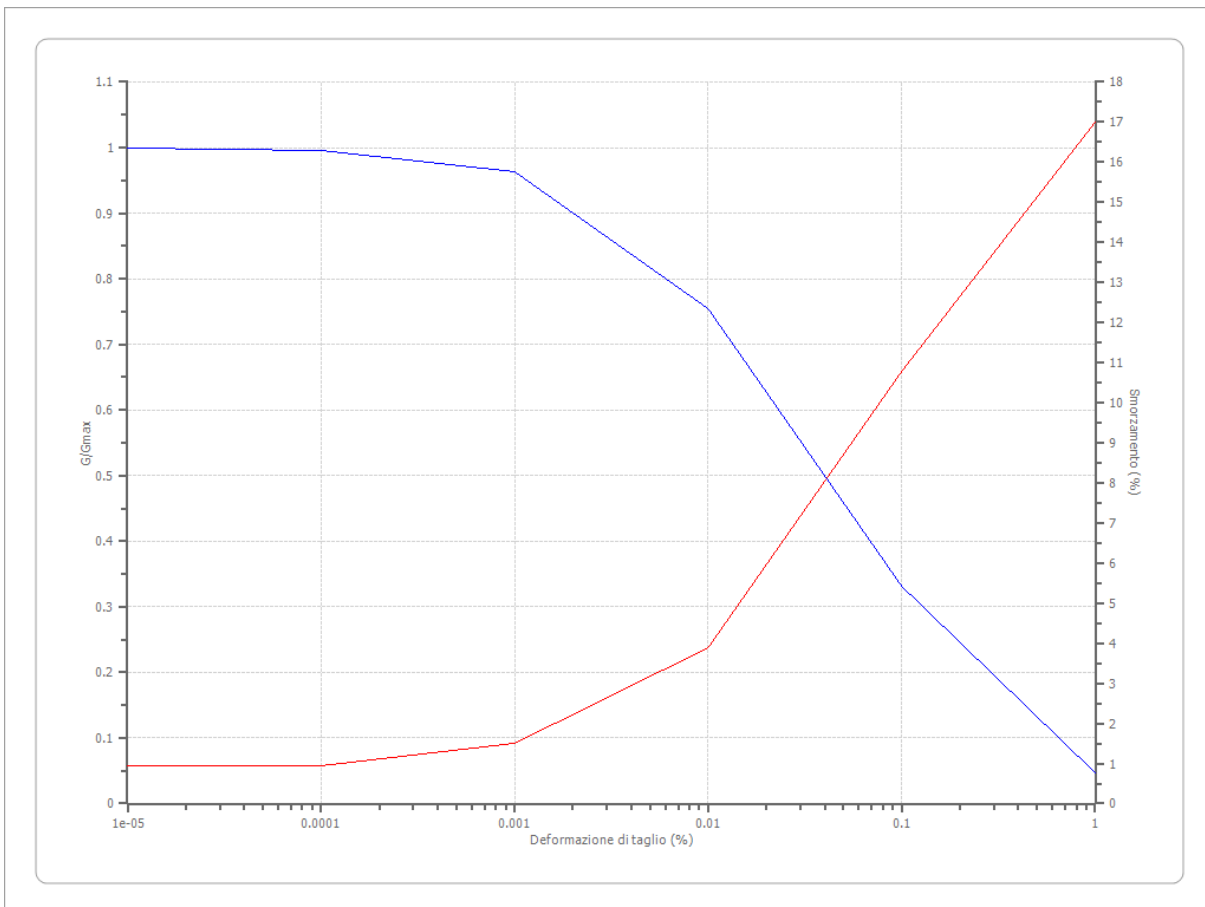
Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.00008	1.000	0.00008	1.9826
0.0001	0.99915	0.0001	1.98695
0.0002	0.9985	0.0002	1.9903
0.0003	0.9974	0.0003	1.9962
0.0005	0.9953	0.0005	2.0067

0.0008	0.9918	0.0008	2.02525
0.0014	0.98555	0.0014	2.05825
0.0024	0.97465	0.0024	2.11705
0.0041	0.956	0.0041	2.222
0.007	0.9246	0.007	2.4103
0.0119	0.87385	0.0119	2.7498
0.0202	0.7964	0.0202	3.36165
0.0343	0.6886	0.0343	4.4464
0.0583	0.556	0.0583	6.2701
0.099	0.41535	0.099	9.0215
0.1684	0.2876	0.1684	12.55055
0.2862	0.1867	0.2862	16.2968
0.4866	0.11545	0.4866	19.6163
0.8272	0.0691	0.8272	22.15295
1.4063	0.0405	1.4063	23.89285



Ghiaie

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.00001	1.000	0.00001	0.9488
0.0001	0.996	0.0001	0.9488
0.001	0.9624	0.001	1.4981
0.010	0.754	0.010	3.8938
0.100	0.3311	0.100	10.7935
1.000	0.0476	1.000	17.0087



Stratigrafia

n.	Descrizione	Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	Numero sottostrati	Gmax [MPa]	Smorzamento critico [%]	Peso unità vol. [kN/m³]	Vs [m/s]	Tensione verticale
----	-------------	----------------	--------------	---------	--------------------	------------	-------------------------	-------------------------	----------	--------------------

										[kPa]
1		--	20.0	Lombar dia - Argille limose	0	69.92	--	19.0	190.0	91.9
2		20.0	15.0	Lombar dia - Limi sabbiosi	0	98.67	--	20.0	220.0	333.8
3		35.0	45.0	Lombar dia - Ghiaie	0	208.77	--	20.0	320.0	713.1
4		oo	--	Idriss (1990) Rock	0	1370.03	--	21.0	800.0	942.3

Strato con falda: 2
 Strato rilevamento accelerogramma: 4 Interno

Data				Indicatore				Temperatura			
	--				--				--		
	--				--				--		
	--				--				--		
	--				--				--		
	--				--				--		

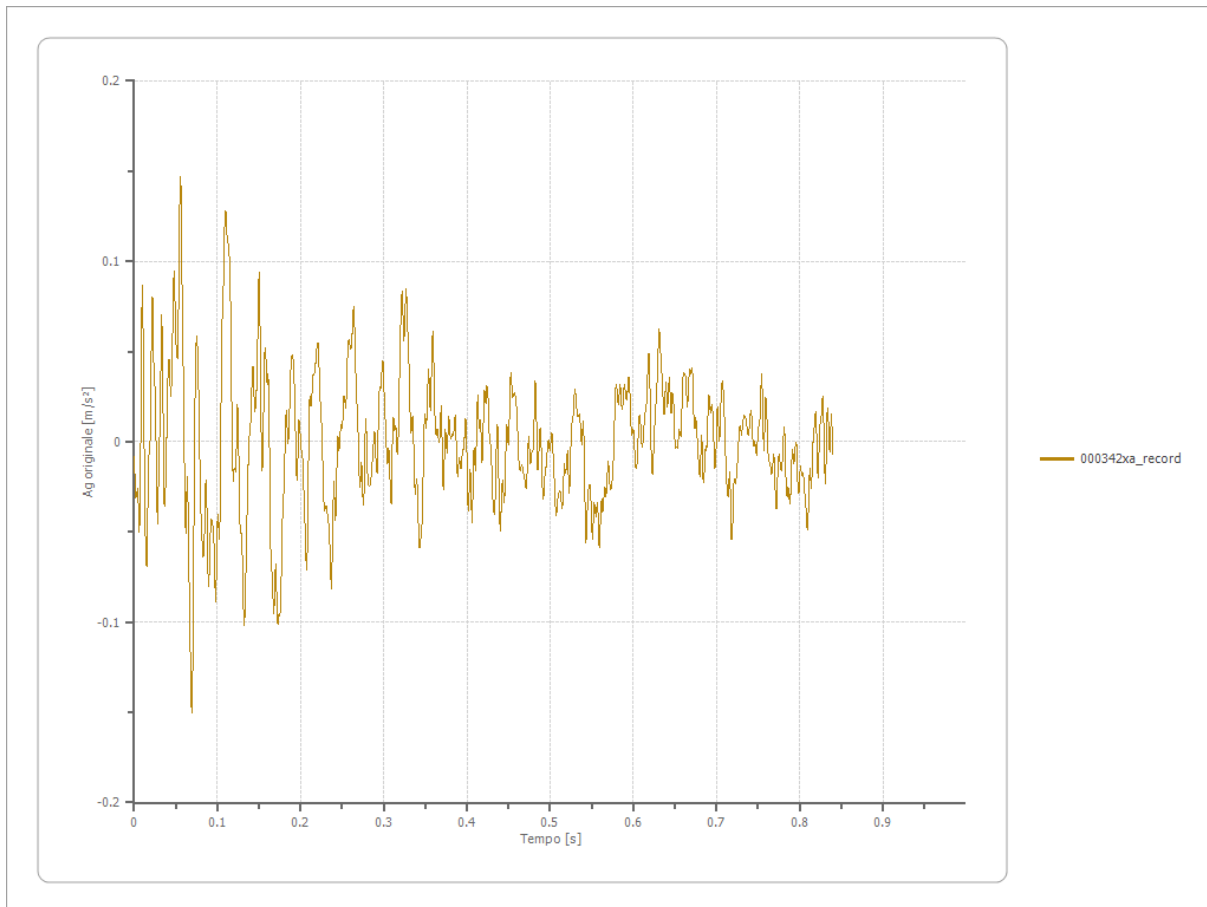
Elaborazione

Numero di iterazioni	50	
Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima		0.2
Tipo di modulo elastico	Shake	
Massimo errore percentuale di convergenza	--	

File 000342xa_record:

Accelerogramma importato

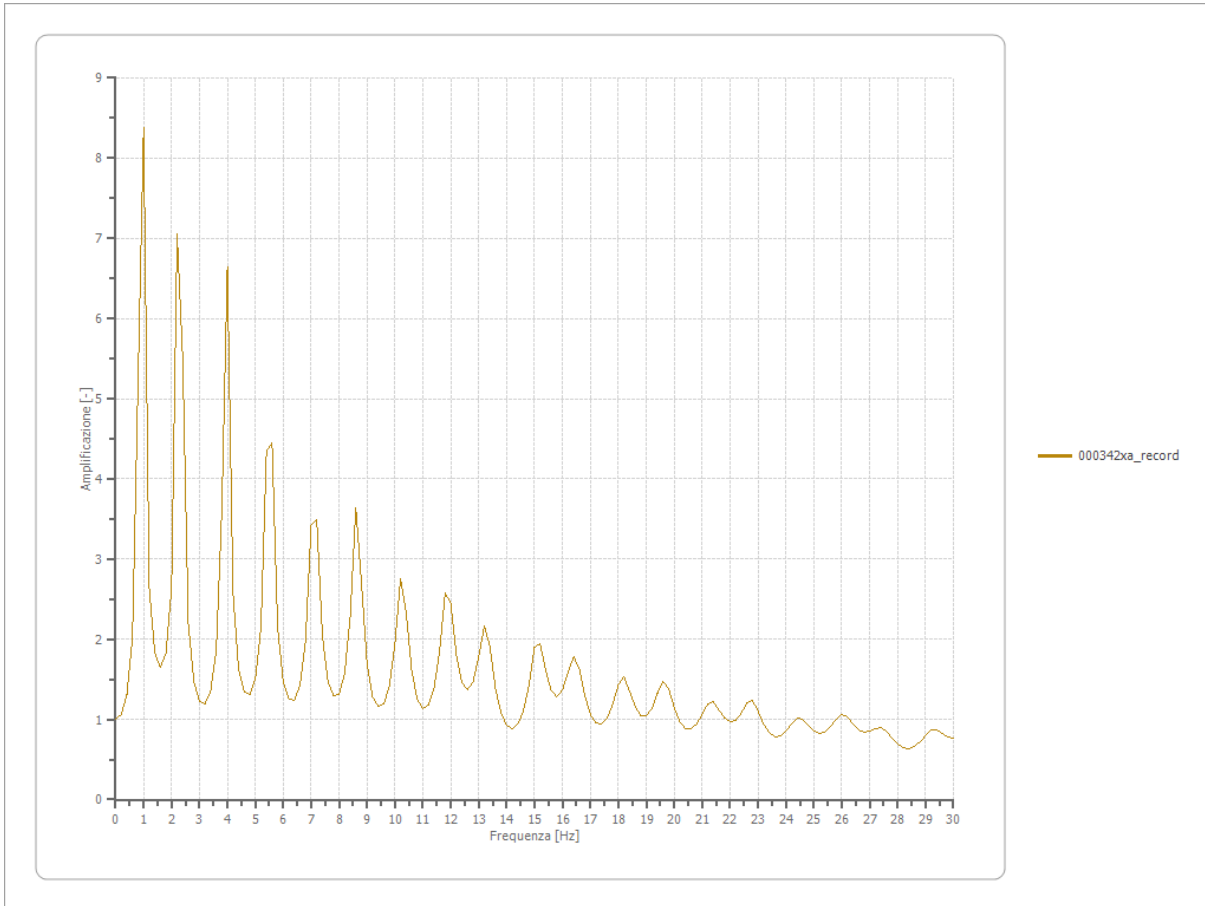
Nome del file	000342xa_record
Durata della traccia	0.840 [s]
Accelerazione massima	0.150 [m/s ²]
Periodo con accelerazione massima	0.069 [s]



Amplificazione

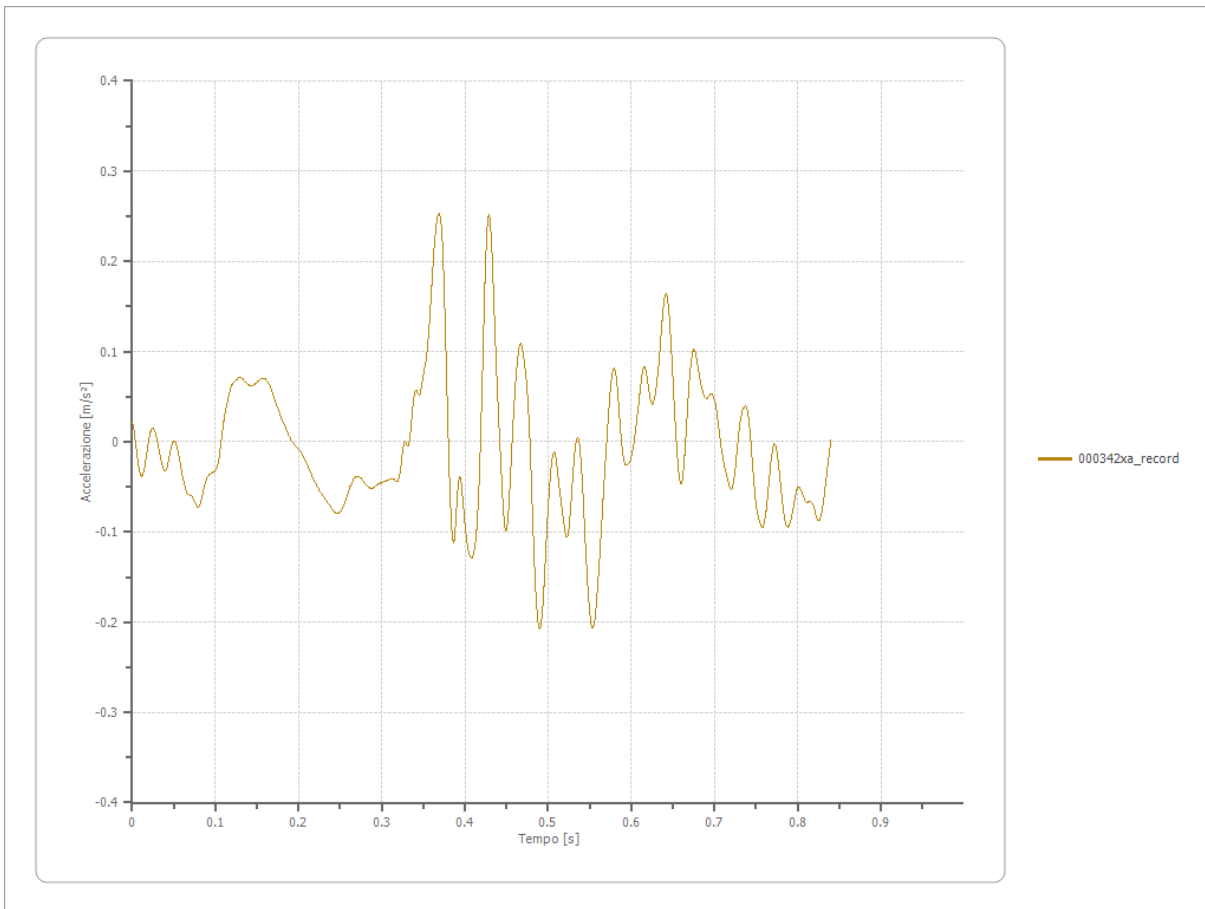
Strato iniziale
Strato finale

4 Interno
1 Affiorante



Accelerazione

Strato	1 Affiorante
Pga	0.253 [m/s ²]
Pga0	0.326 [m/s ²]
Pga/Pga0	0.775
Accelerazione massima	0.253 [m/s ²]
Periodo accelerazione massima	0.369 [s]



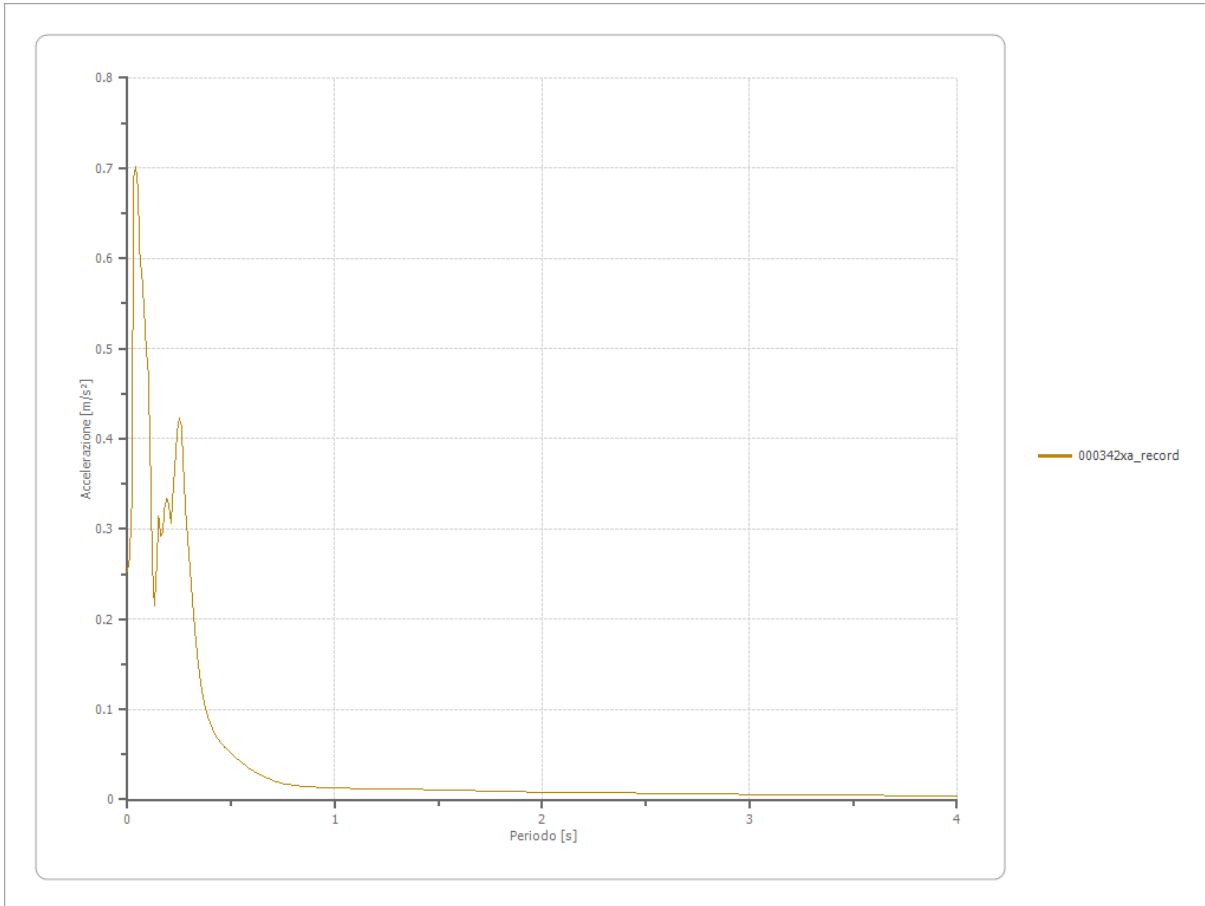
Trasformata di Fourier

Strato	1 Affiorante
Numero di campioni del filtro a media mobile	1

Spettri

Accelerazione

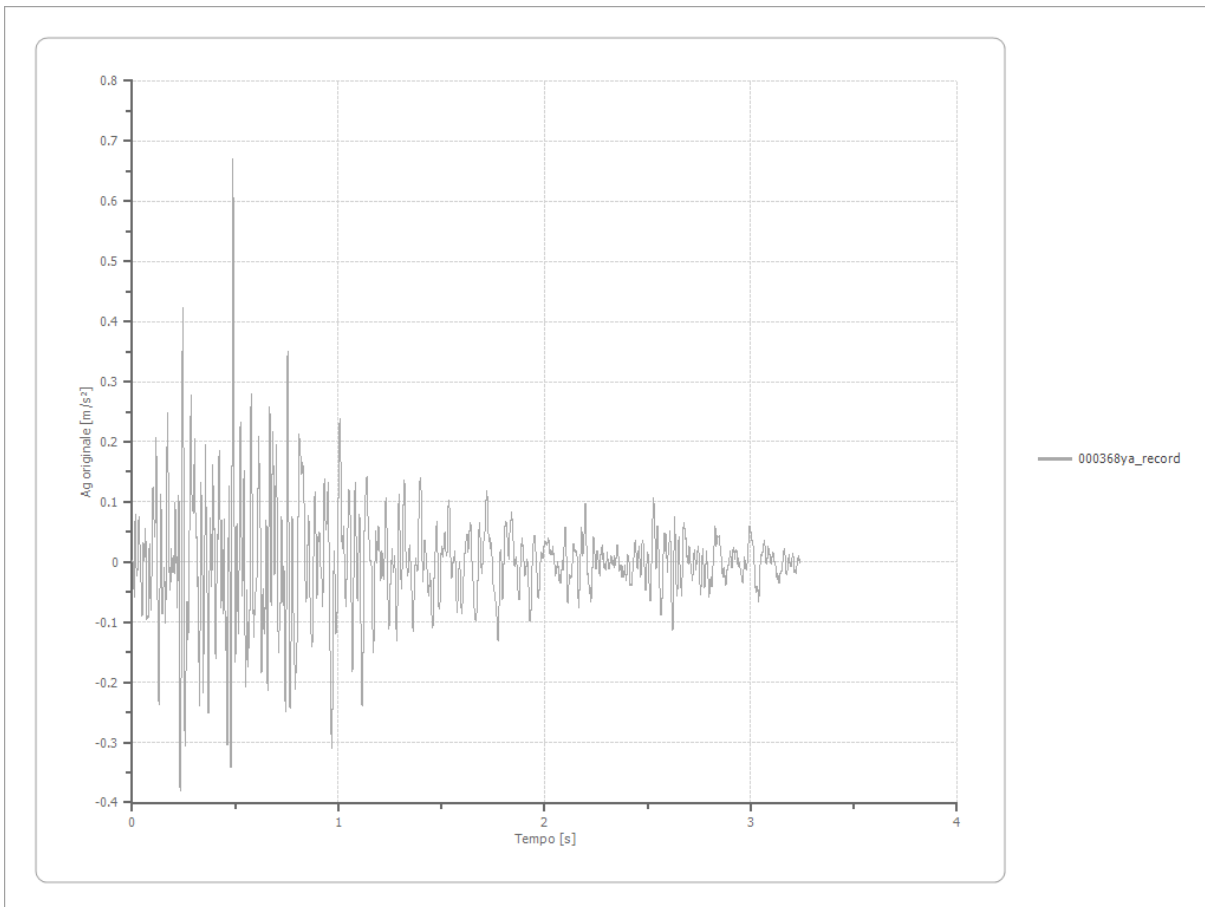
Accelerazione massima	0.702 [m/s²]
Periodo accelerazione massima	0.040 [s]



File 000368ya_record:

Accelerogramma importato

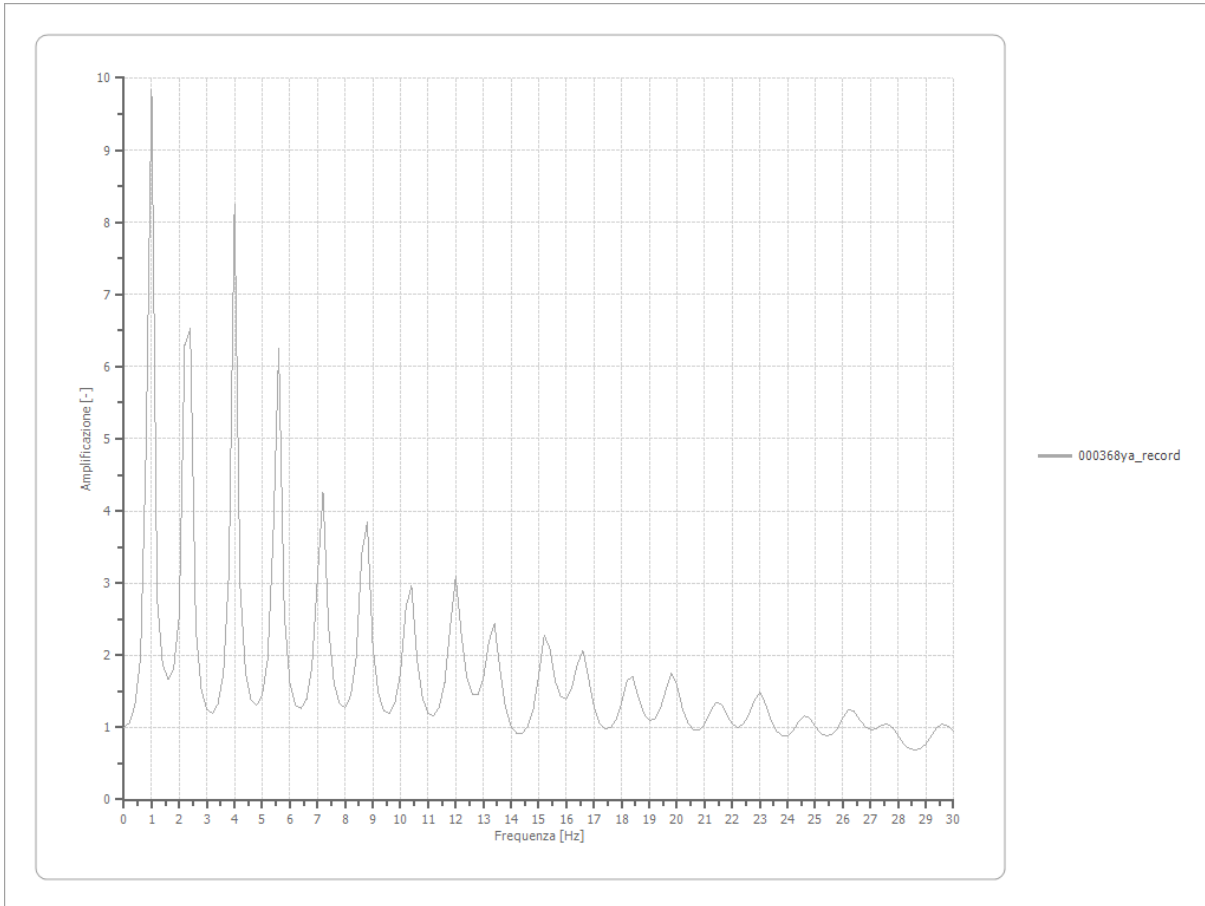
Nome del file	000368ya_record
Durata della traccia	3.240 [s]
Accelerazione massima	0.671 [m/s²]
Periodo con accelerazione massima	0.488 [s]



Amplificazione

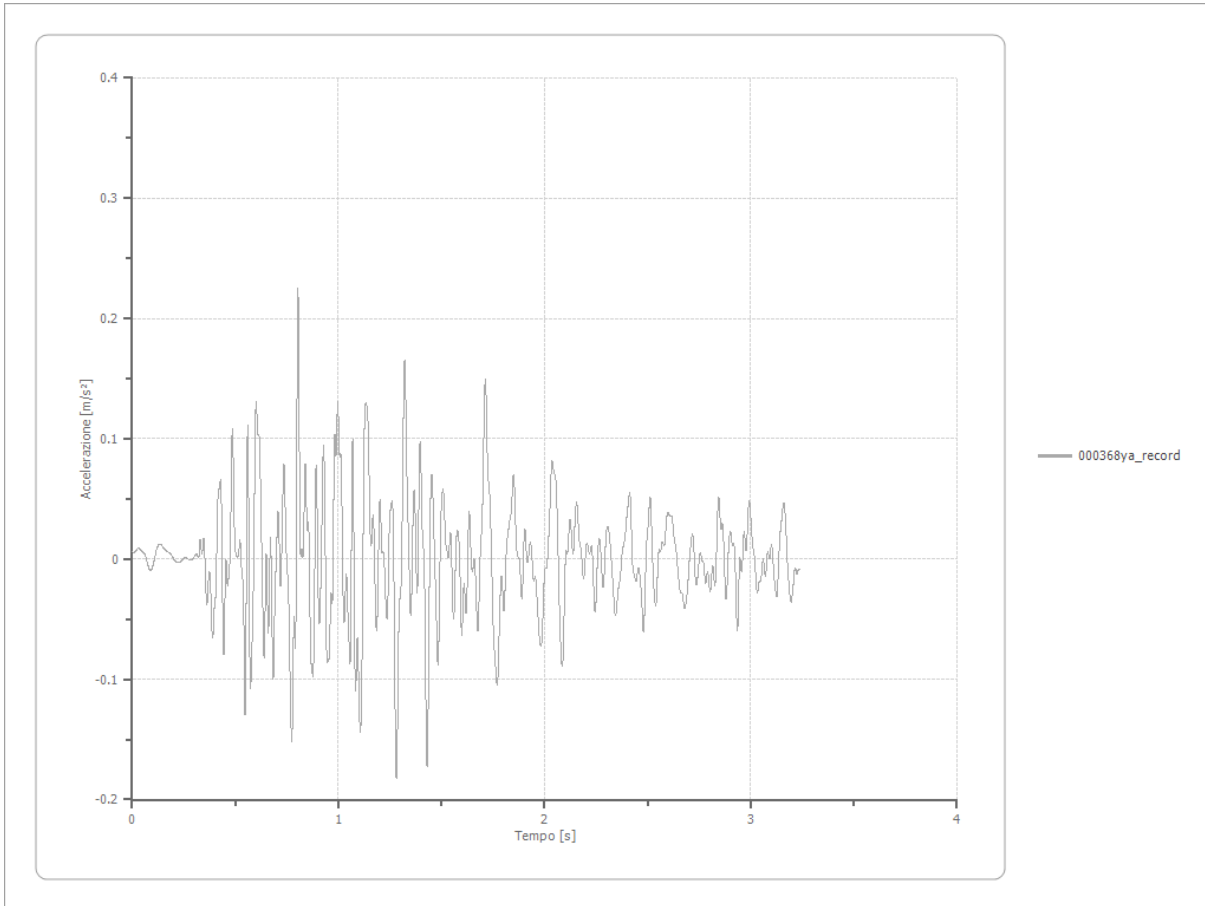
Strato iniziale
Strato finale

4 Interno
1 Affiorante



Accelerazione

Strato	1 Affiorante
Pga	0.225 [m/s ²]
Pga0	0.326 [m/s ²]
Pga/Pga0	0.691
Accelerazione massima	0.225 [m/s ²]
Periodo accelerazione massima	0.804 [s]



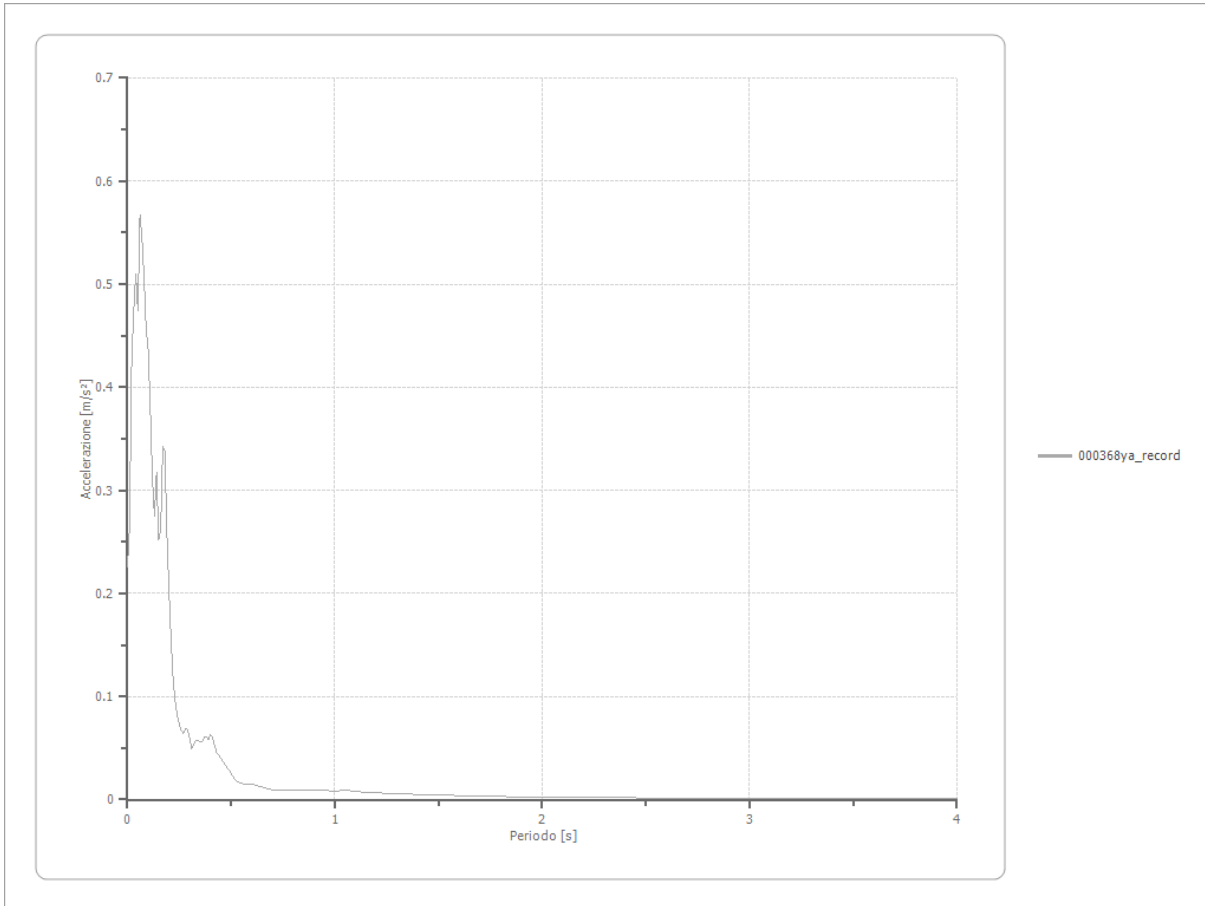
Trasformata di Fourier

Strato	1	Affiorante
Numero di campioni del filtro a media mobile	1	

Spettri

Accelerazione

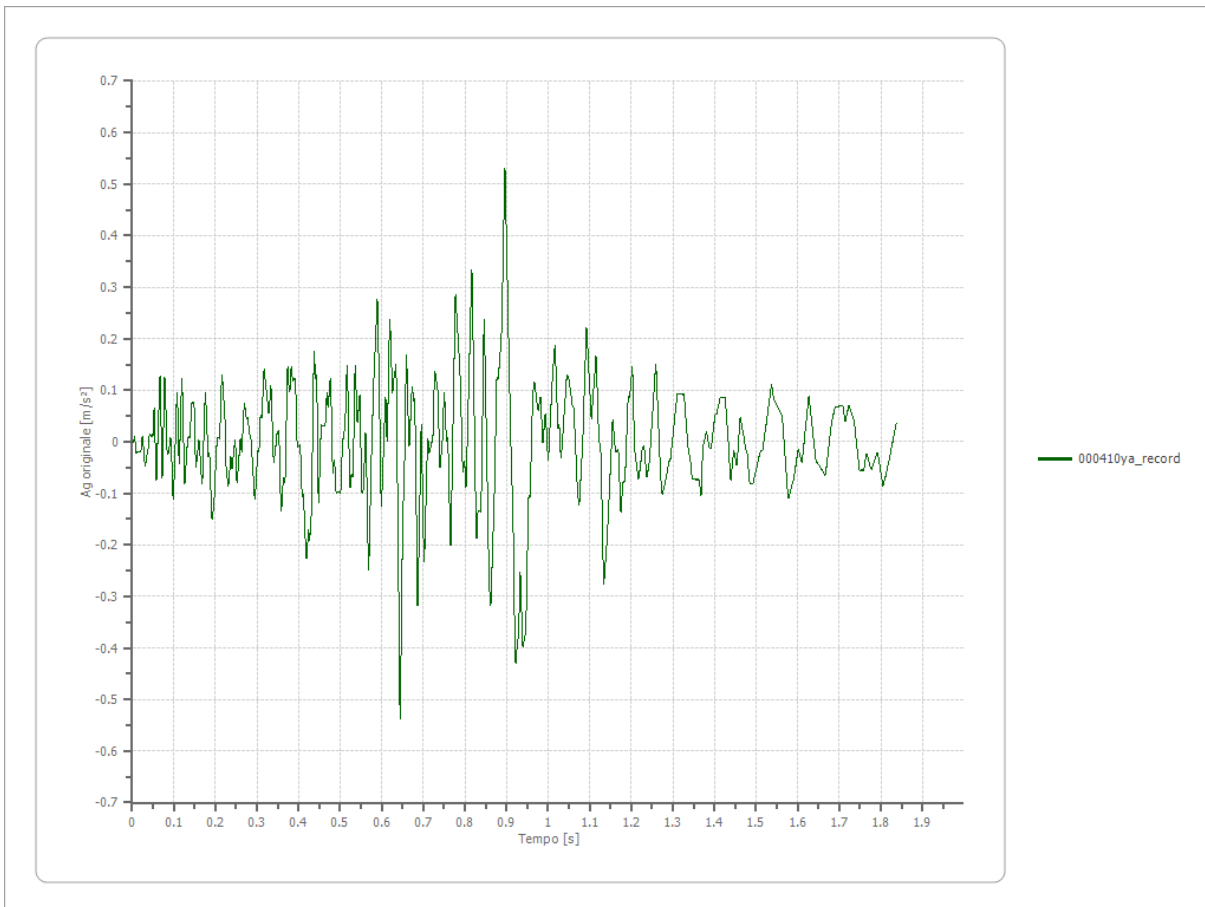
Accelerazione massima	0.567 [m/s ²]
Periodo accelerazione massima	0.060 [s]



File 000410ya_record:

Accelerogramma importato

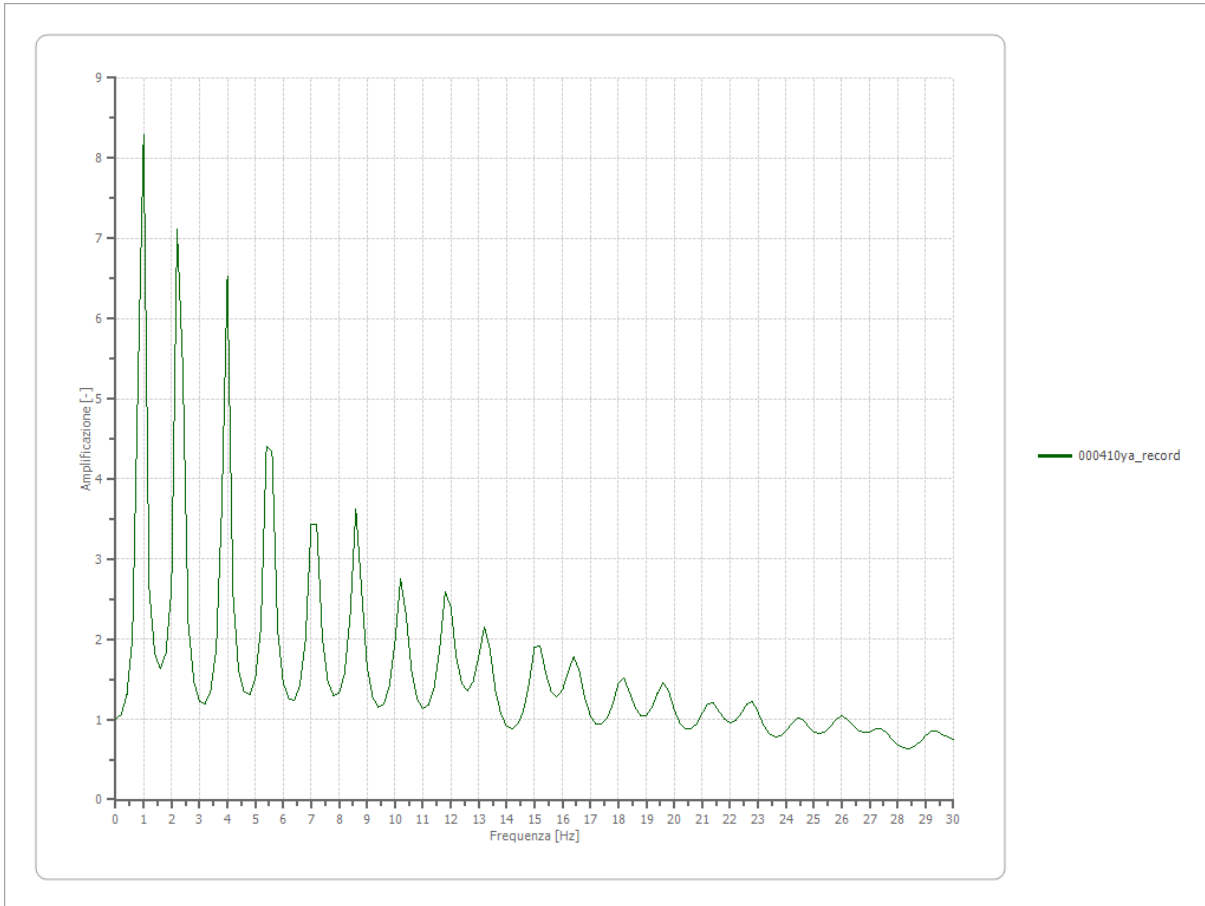
Nome del file	000410ya_record
Durata della traccia	1.837 [s]
Accelerazione massima	0.538 [m/s²]
Periodo con accelerazione massima	0.644 [s]



Amplificazione

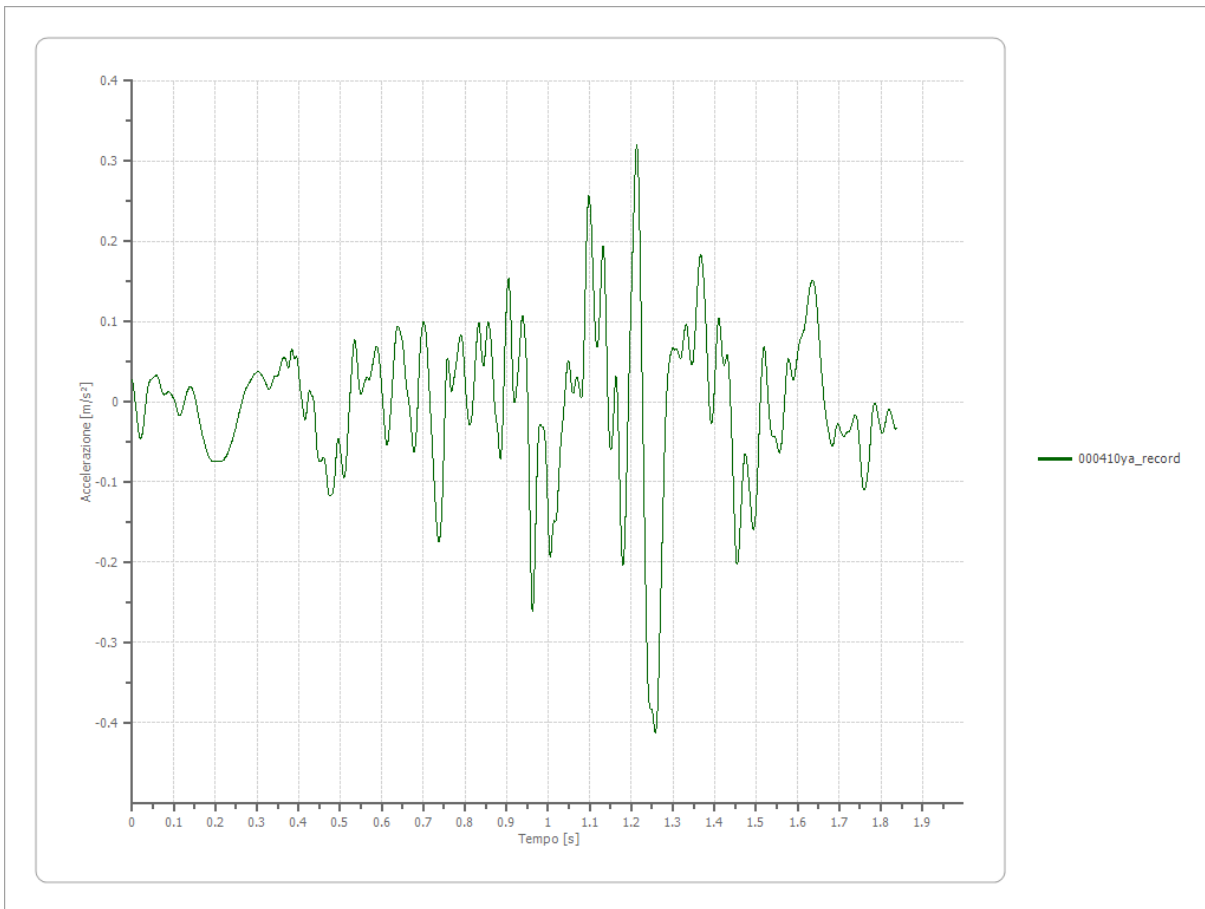
Strato iniziale
Strato finale

4 Interno
1 Affiorante



Accelerazione

Strato	1 Affiorante
Pga	0.413 [m/s ²]
Pga0	0.326 [m/s ²]
Pga/Pga0	1.266
Accelerazione massima	0.413 [m/s ²]
Periodo accelerazione massima	1.258 [s]



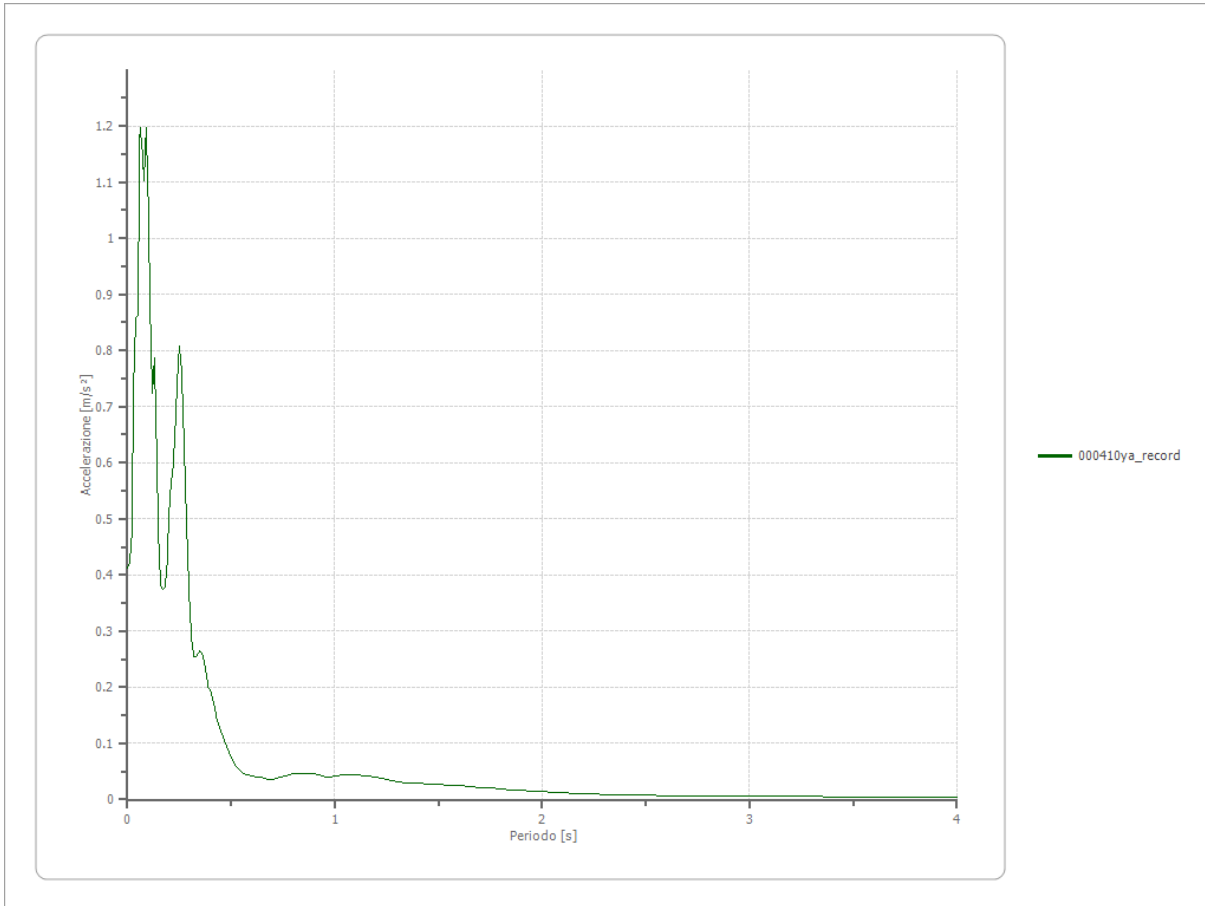
Trasformata di Fourier

Strato	1 Affiorante
Numero di campioni del filtro a media mobile	1

Spettri

Accelerazione

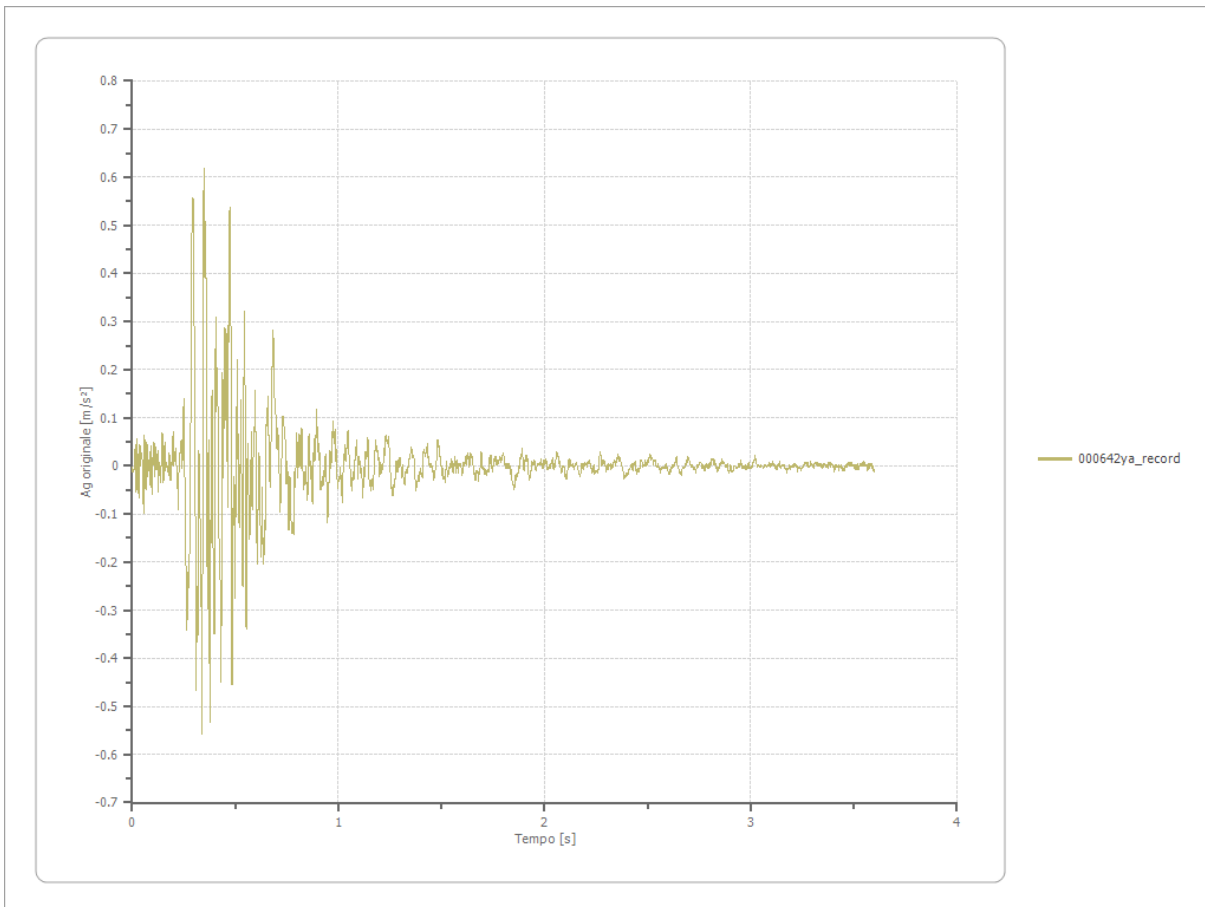
Accelerazione massima	1.197 [m/s²]
Periodo accelerazione massima	0.060 [s]



File 000642ya_record:

Accelerogramma importato

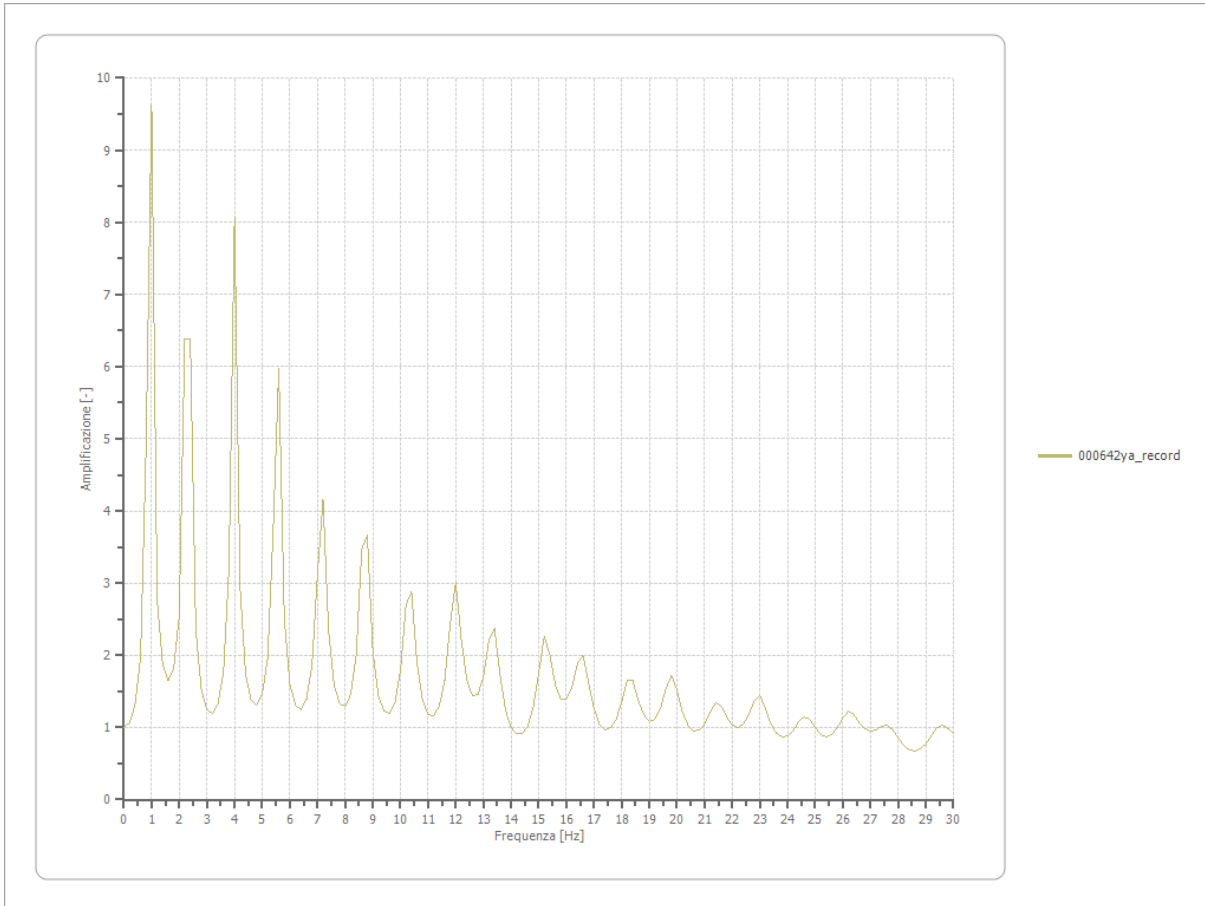
Nome del file	000642ya_record
Durata della traccia	3.598 [s]
Accelerazione massima	0.618 [m/s ²]
Periodo con accelerazione massima	0.348 [s]



Amplificazione

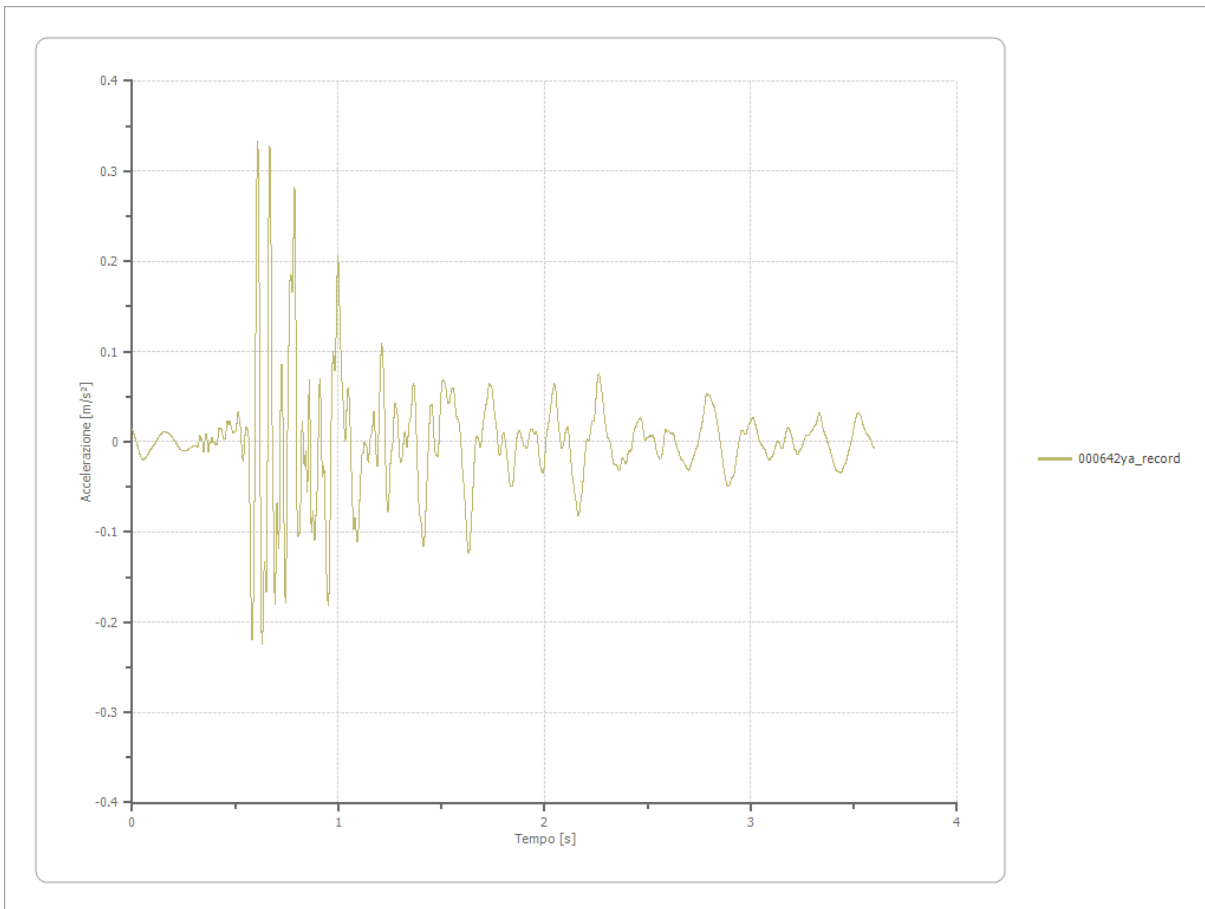
Strato iniziale
Strato finale

4 Interno
1 Affiorante



Accelerazione

Strato	1 Affiorante
Pga	0.333 [m/s ²]
Pga0	0.326 [m/s ²]
Pga/Pga0	1.023
Accelerazione massima	0.333 [m/s ²]
Periodo accelerazione massima	0.608 [s]



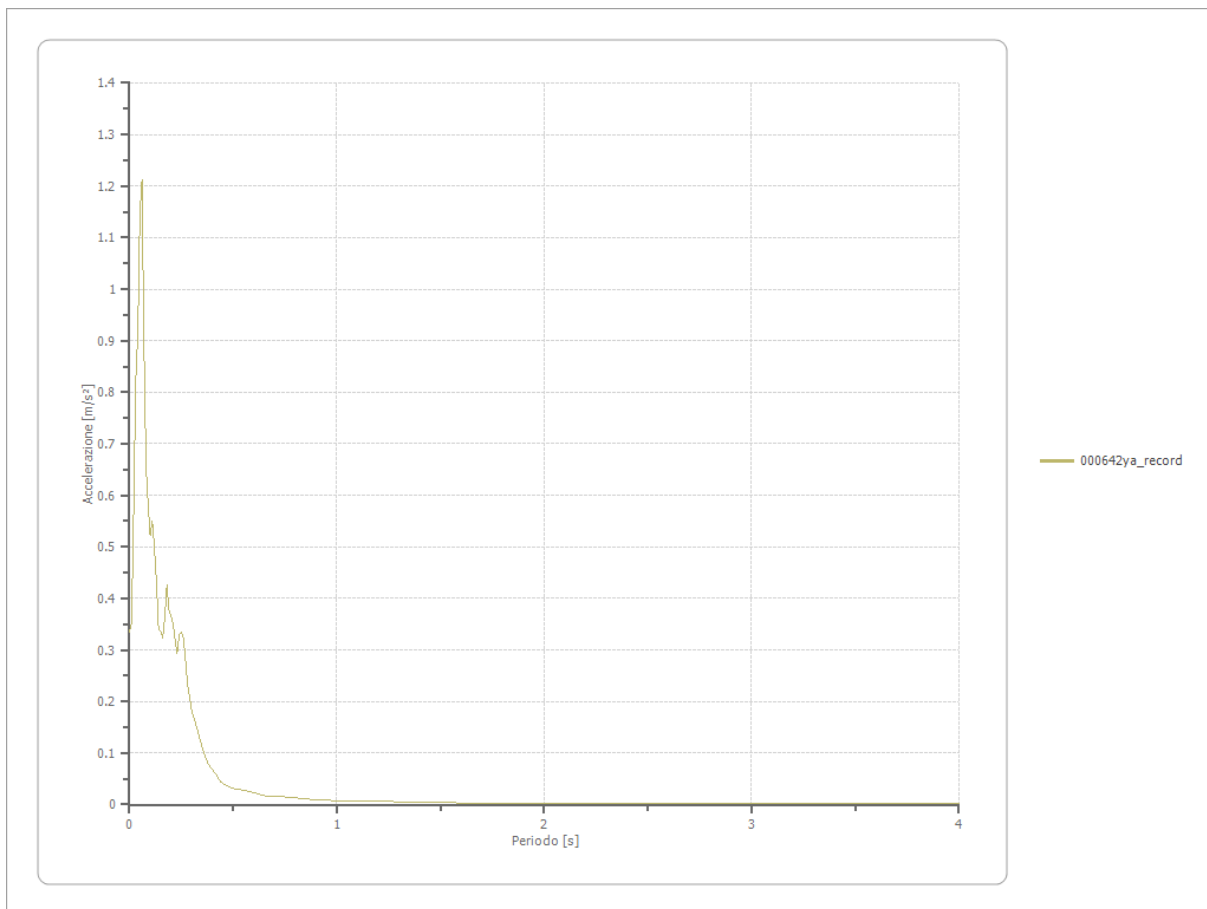
Trasformata di Fourier

Strato	1 Affiorante
Numero di campioni del filtro a media mobile	1

Spettri

Accelerazione

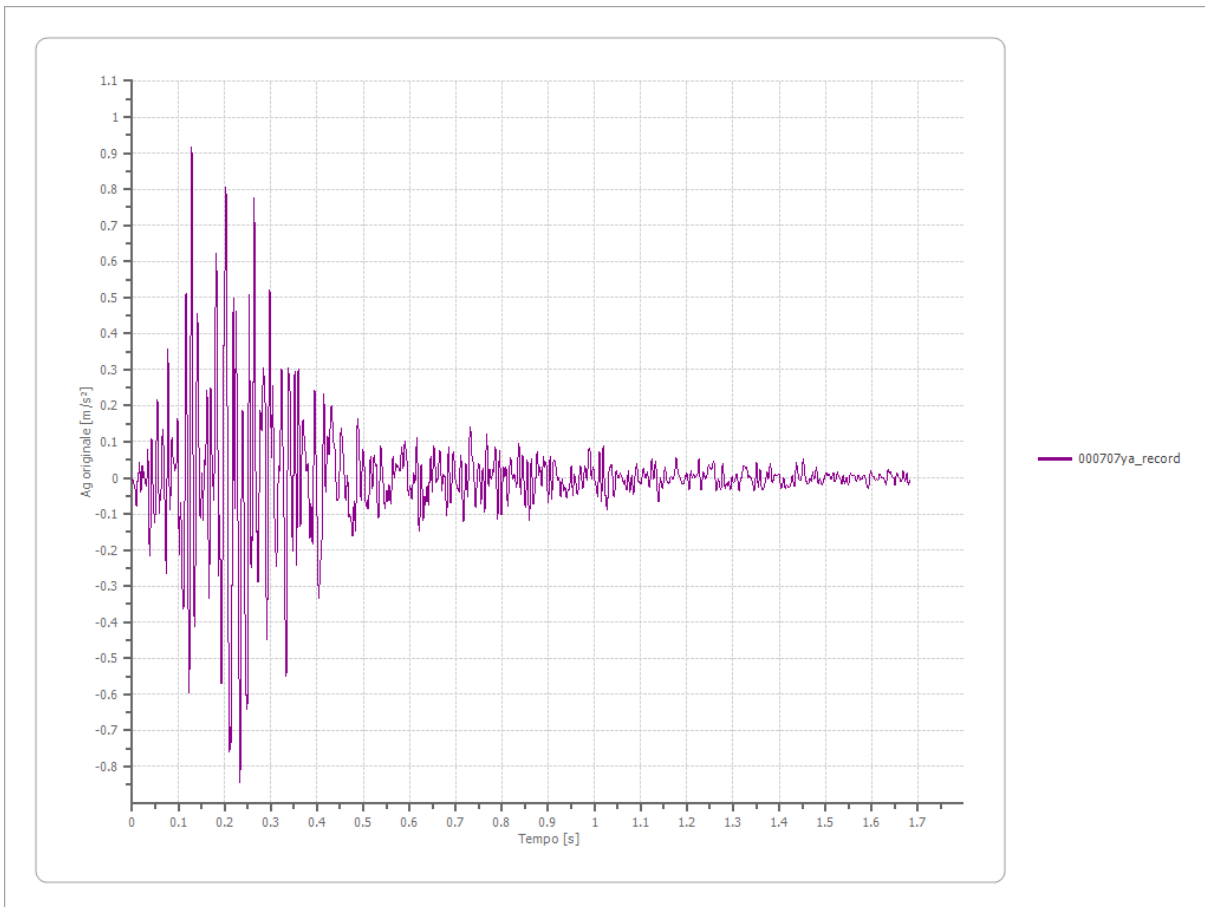
Accelerazione massima	1.212 [m/s²]
Periodo accelerazione massima	0.060 [s]



File 000707ya_record:

Accelerogramma importato

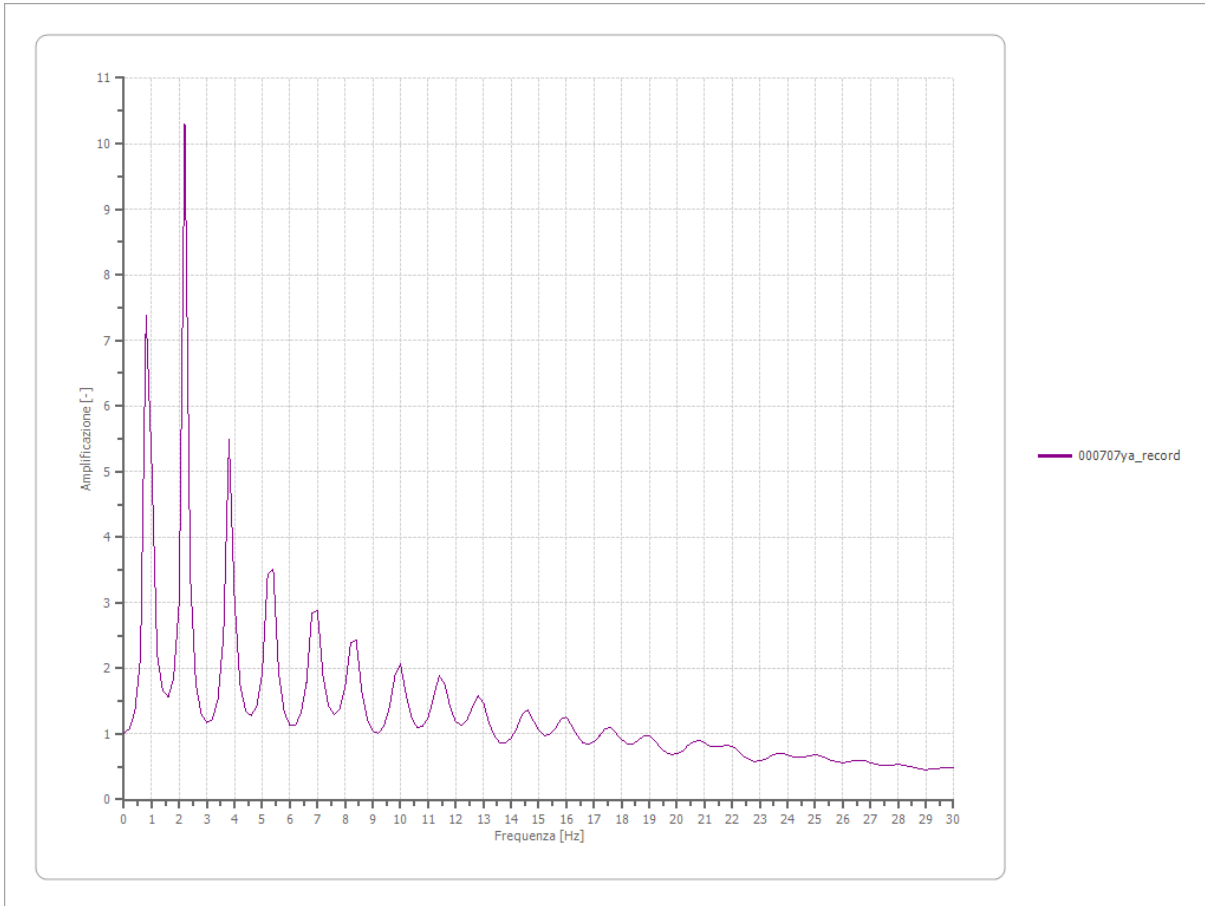
Nome del file	000707ya_record
Durata della traccia	1.682 [s]
Accelerazione massima	0.916 [m/s²]
Periodo con accelerazione massima	0.128 [s]



Amplificazione

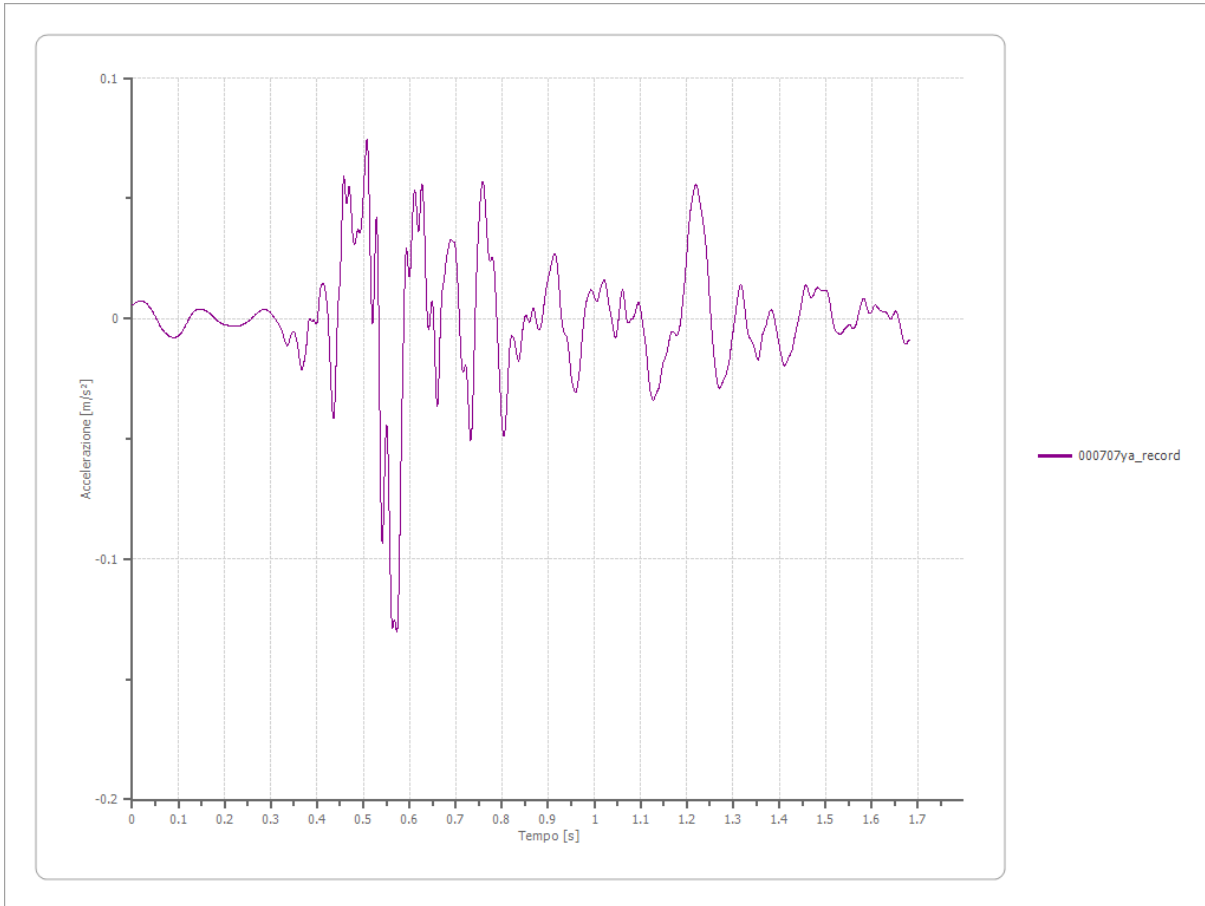
Strato iniziale
Strato finale

4 Interno
1 Affiorante



Accelerazione

Strato	1 Affiorante
Pga	0.130 [m/s ²]
Pga0	0.326 [m/s ²]
Pga/Pga0	0.400
Accelerazione massima	0.130 [m/s ²]
Periodo accelerazione massima	0.572 [s]



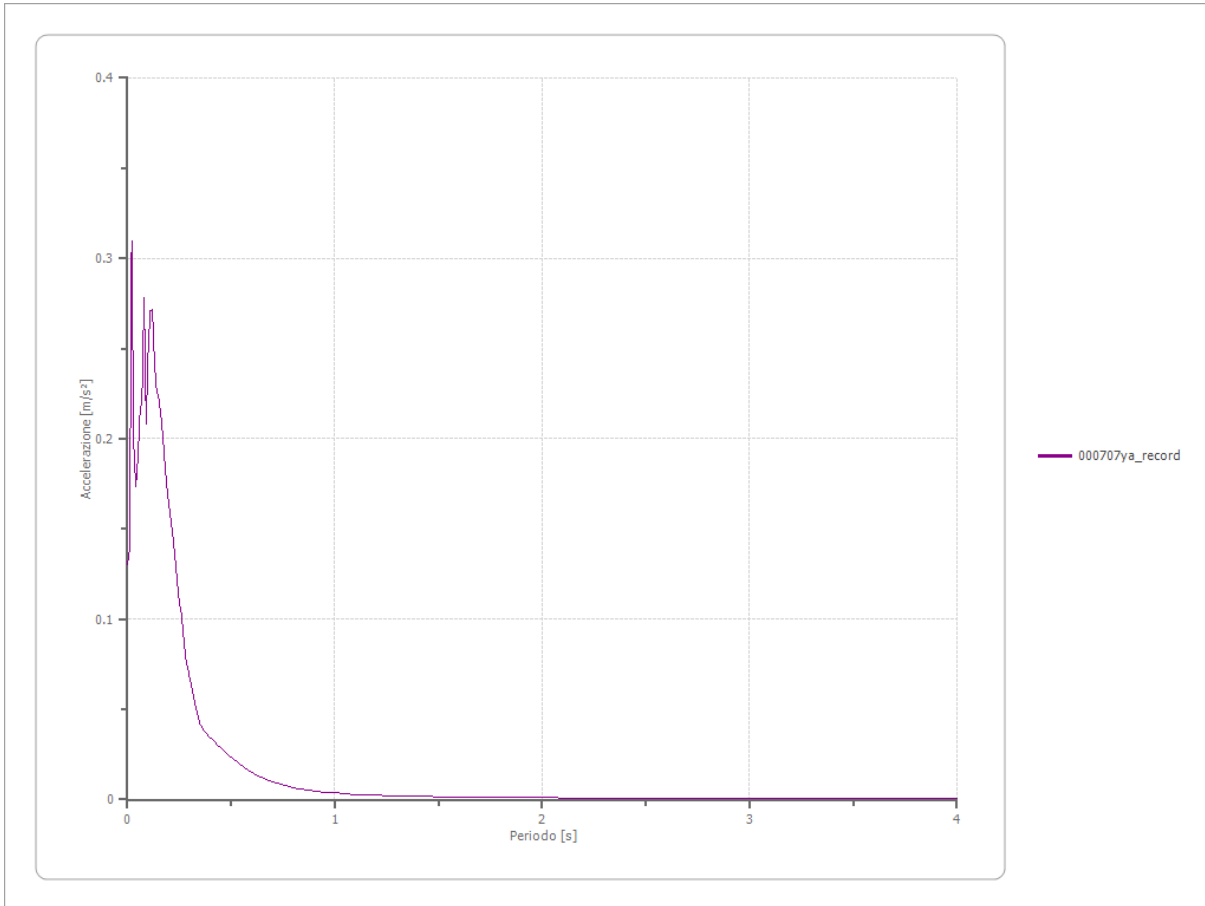
Trasformata di Fourier

Strato 1 Affiorante
Numero di campioni del filtro a media mobile 1

Spettri

Accelerazione

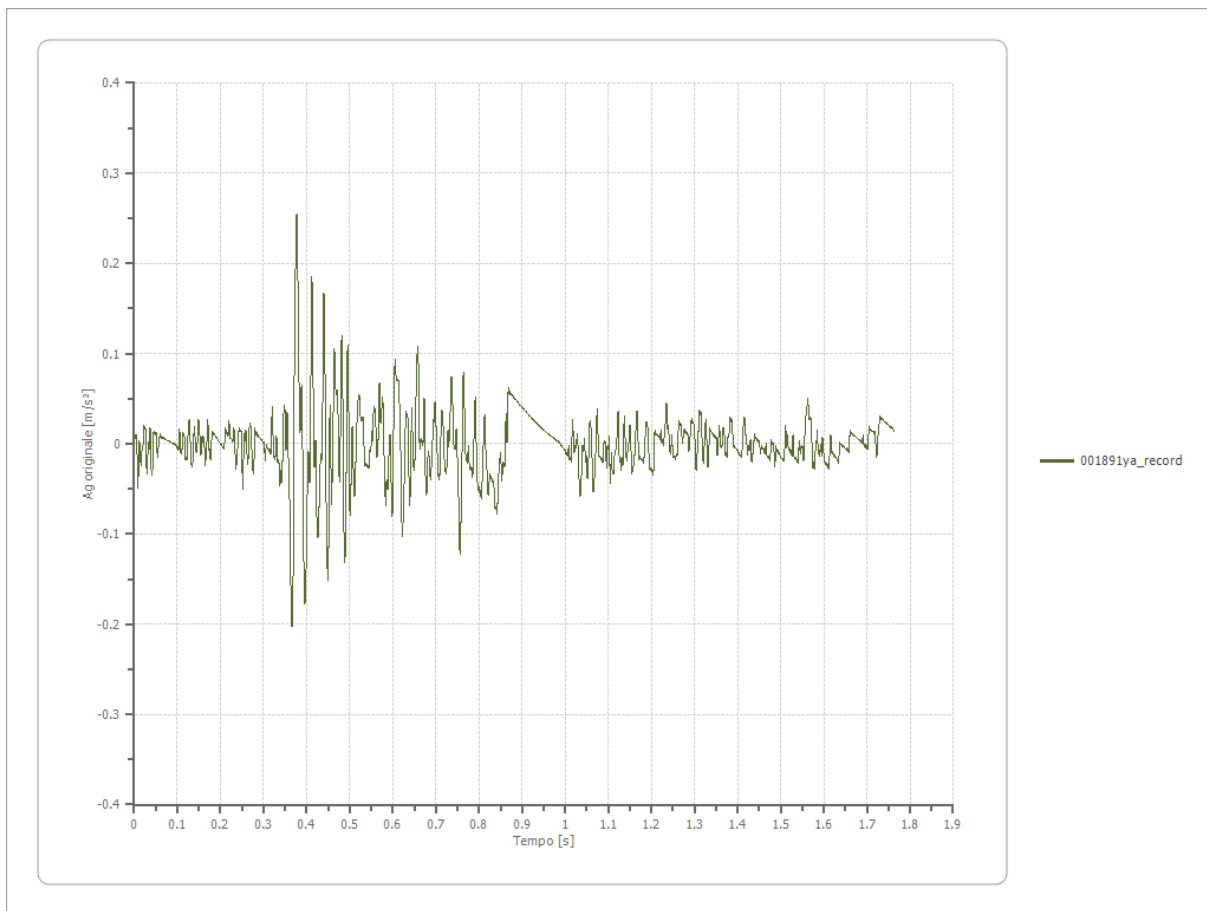
Accelerazione massima 0.310 [m/s²]
Periodo accelerazione massima 0.020 [s]



File 001891ya_record:

Accelerogramma importato

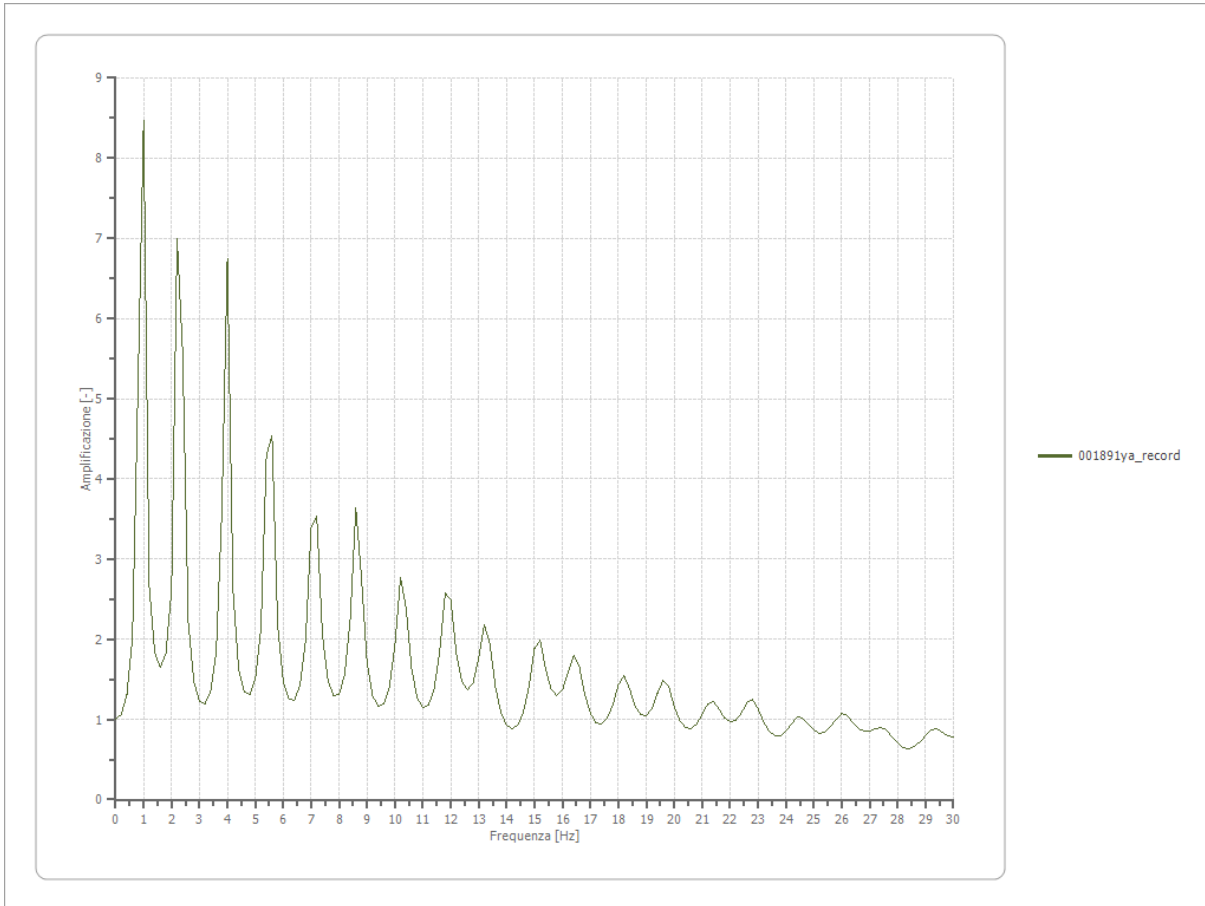
Nome del file	001891ya_record
Durata della traccia	1.763 [s]
Accelerazione massima	0.255 [m/s^2]
Periodo con accelerazione massima	0.377 [s]



Amplificazione

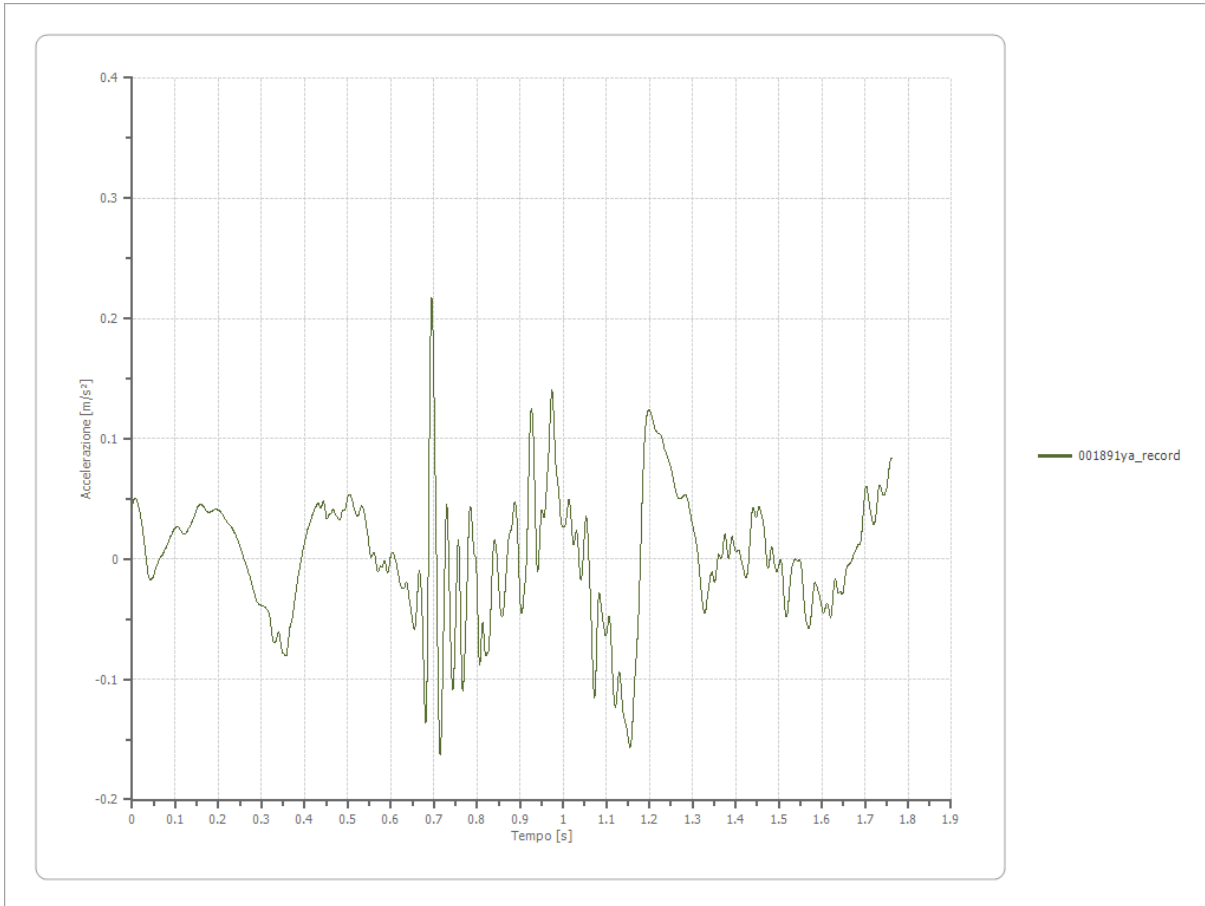
Strato iniziale
Strato finale

4 Interno
1 Affiorante



Accelerazione

Strato	1 Affiorante
Pga	0.217 [m/s ²]
Pga0	0.326 [m/s ²]
Pga/Pga0	0.666
Accelerazione massima	0.217 [m/s ²]
Periodo accelerazione massima	0.695 [s]



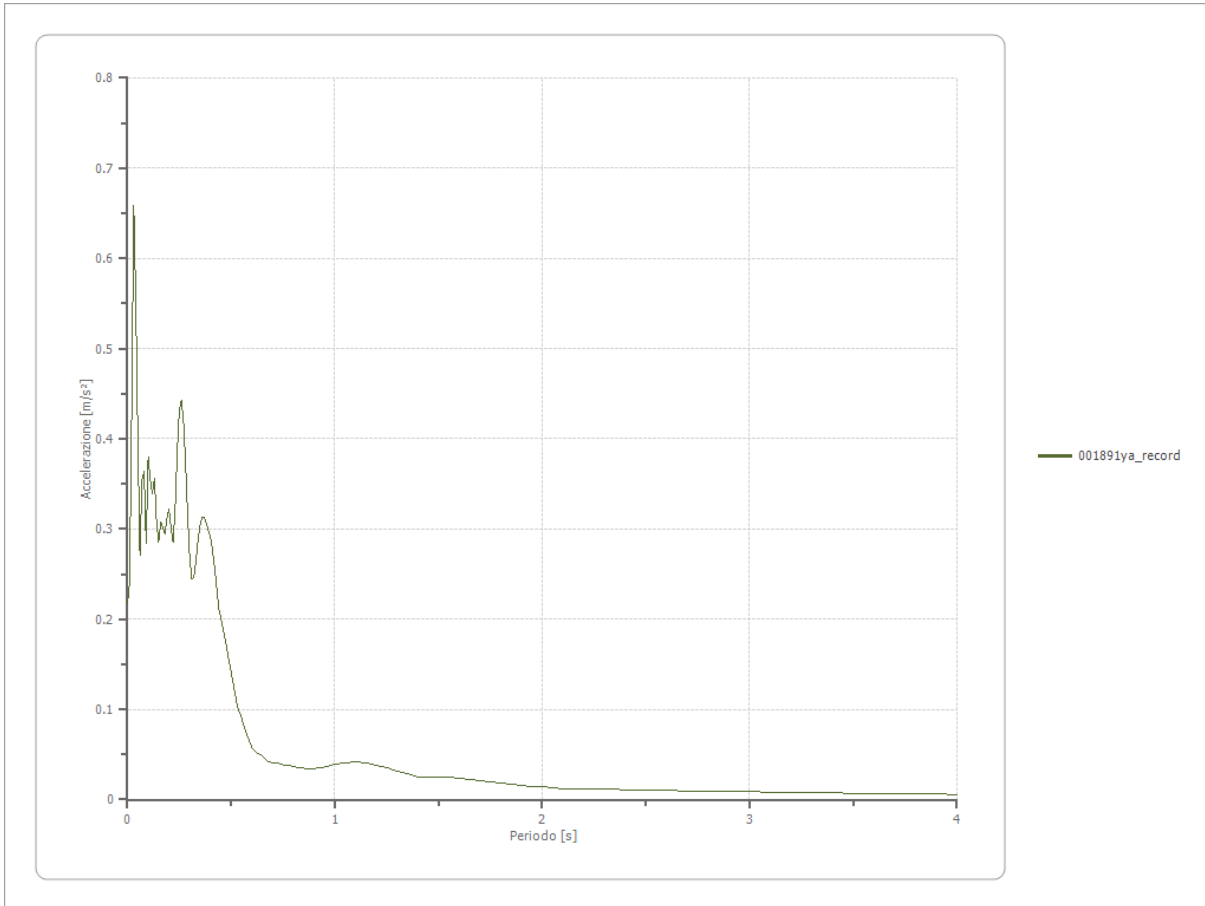
Trasformata di Fourier

Strato 1 Affiorante
Numero di campioni del filtro a media mobile 1

Spettri

Accelerazione

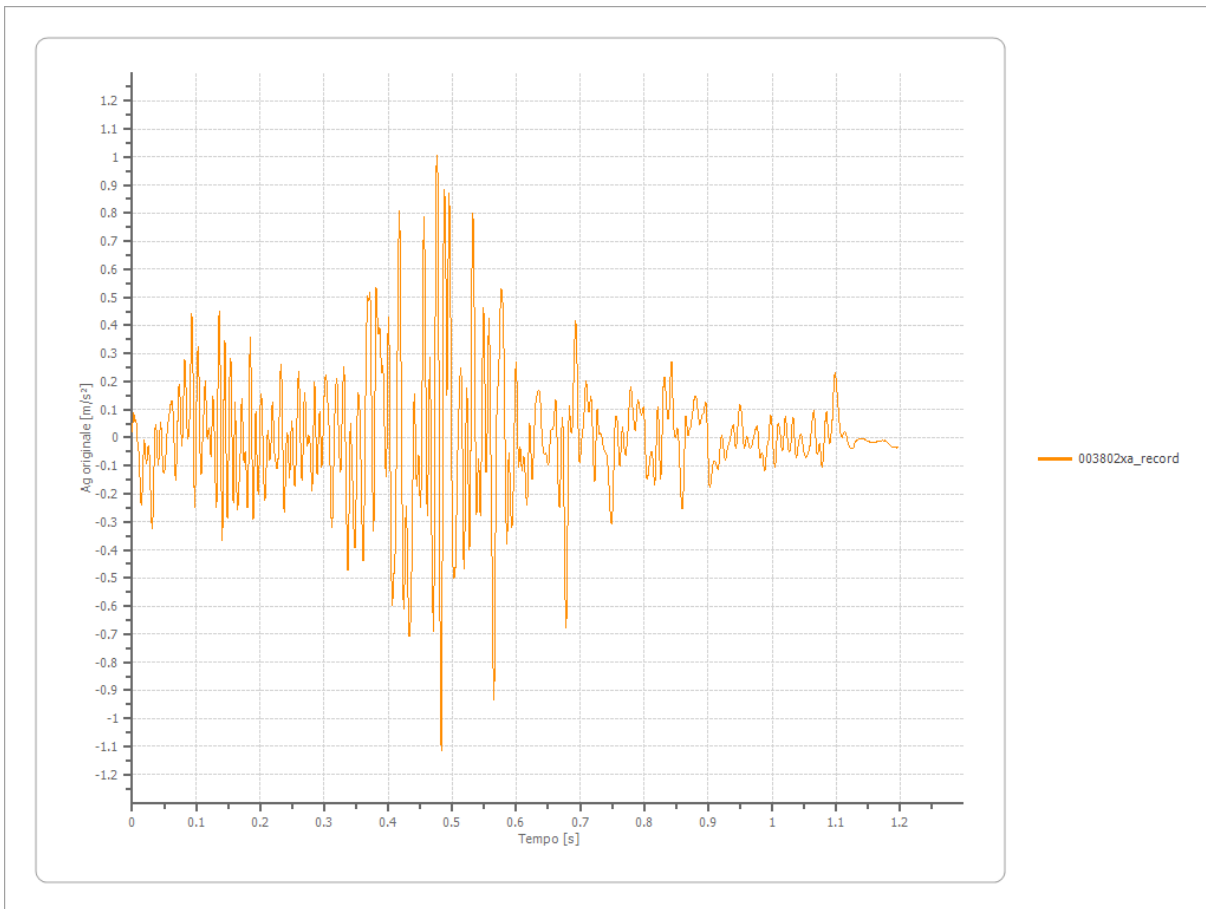
Accelerazione massima 0.659 [m/s²]
Periodo accelerazione massima 0.030 [s]



File 003802xa_record:

Accelerogramma importato

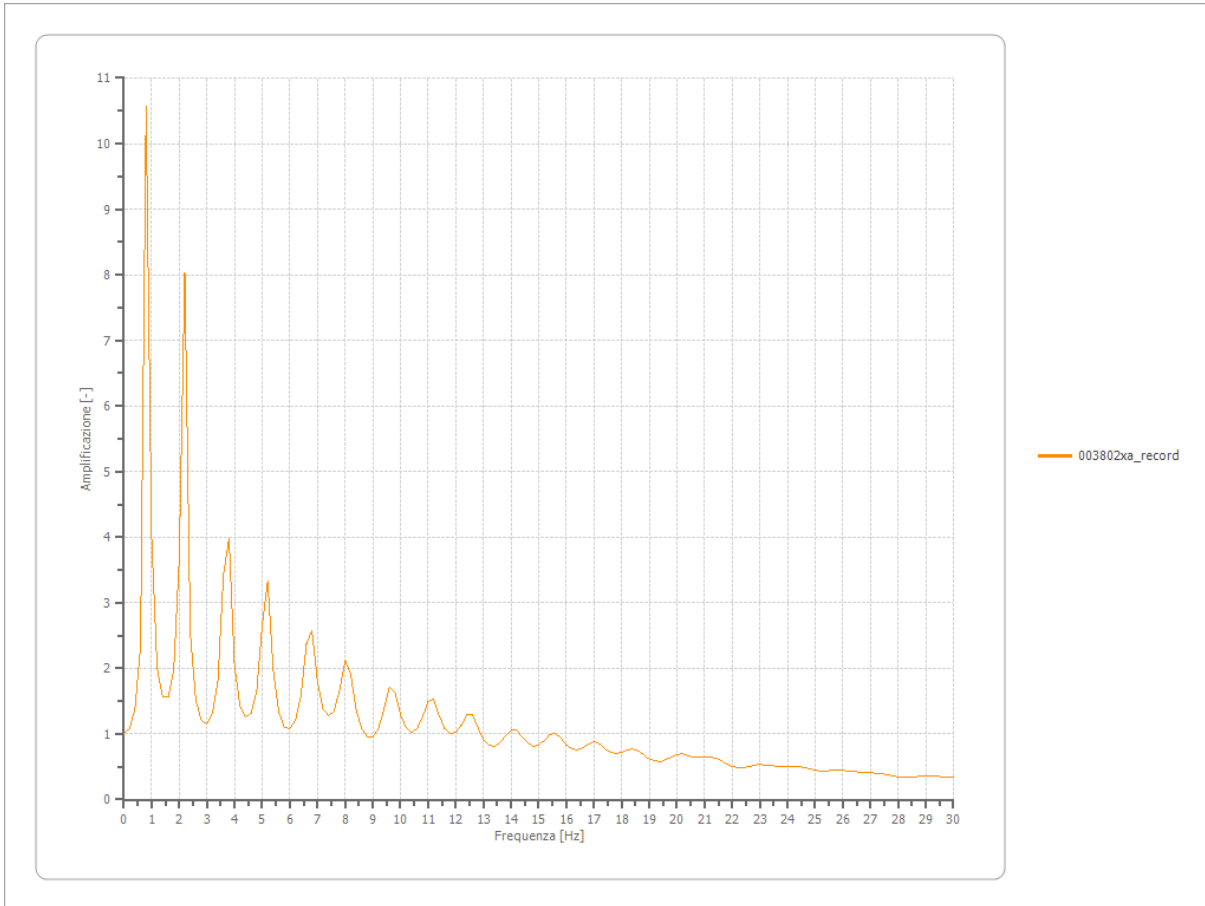
Nome del file	003802xa_record
Durata della traccia	1.196 [s]
Accelerazione massima	1.113 [m/s ²]
Periodo con accelerazione massima	0.483 [s]



Amplificazione

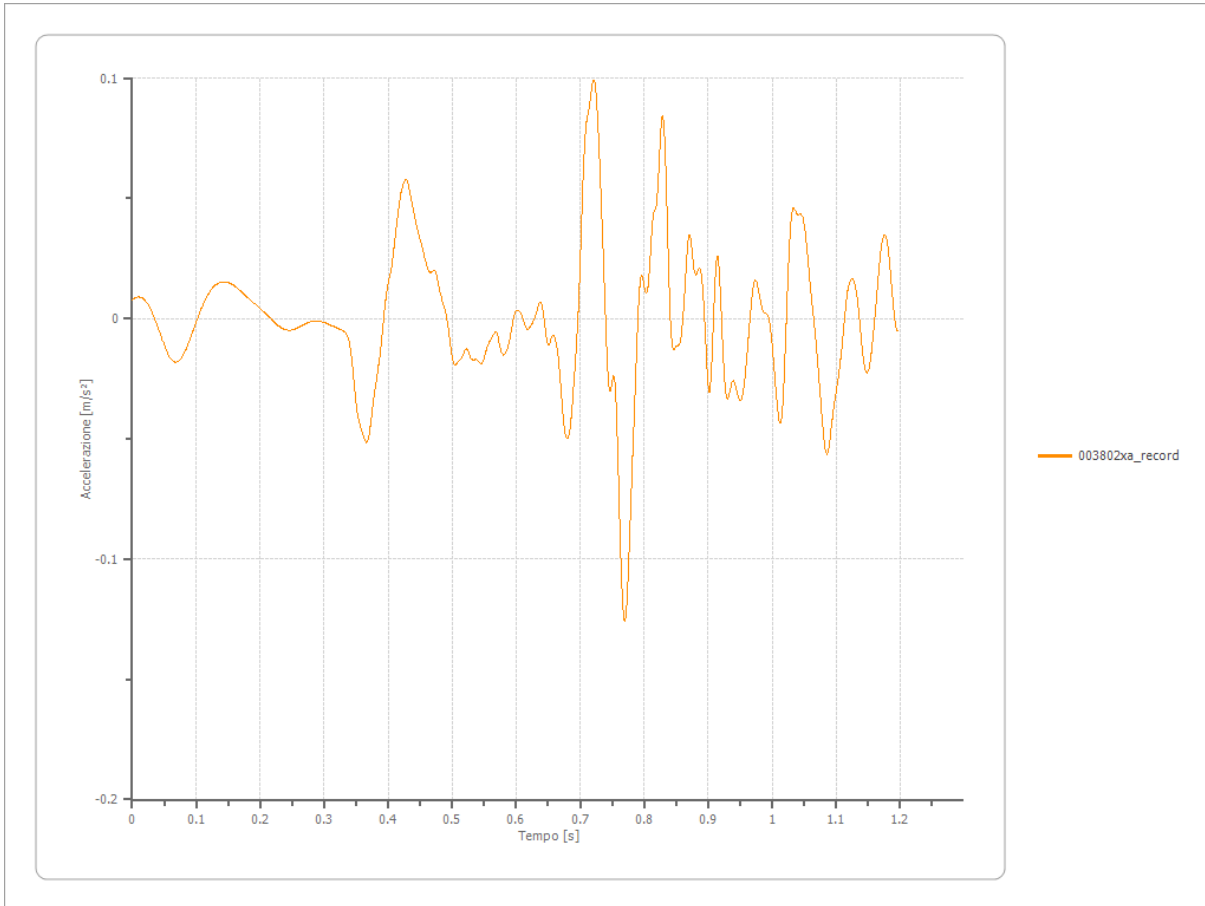
Strato iniziale
Strato finale

4 Interno
1 Affiorante



Accelerazione

Strato	1 Affiorante
Pga	0.126 [m/s ²]
Pga0	0.326 [m/s ²]
Pga/Pga0	0.386
Accelerazione massima	0.126 [m/s ²]
Periodo accelerazione massima	0.770 [s]



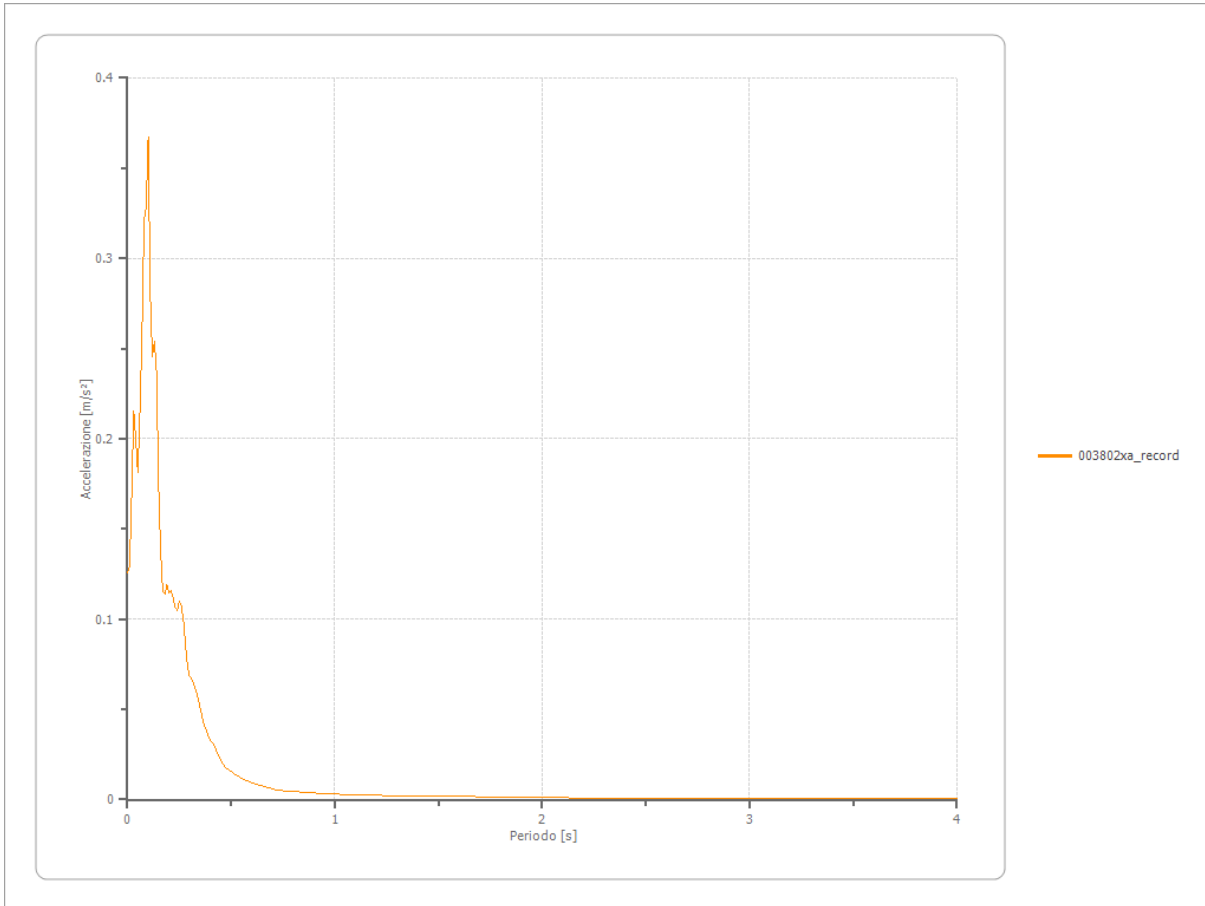
Trasformata di Fourier

Strato 1 Affiorante
Numero di campioni del filtro a media mobile 1

Spettri

Accelerazione

Accelerazione massima 0.367 [m/s²]
Periodo accelerazione massima 0.100 [s]



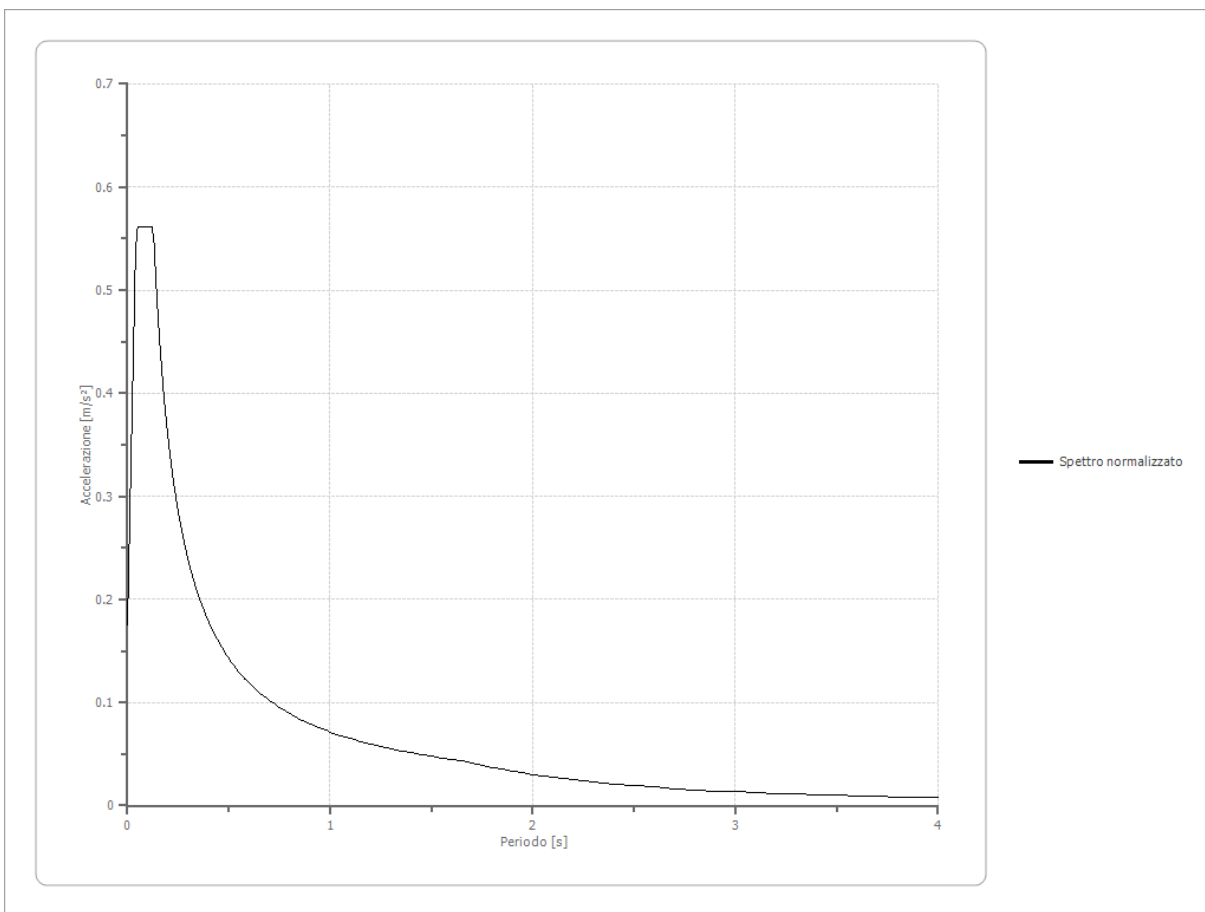
Fattori di amplificazione ICMS 2008

Tai	0.020 [s]
Tvi	0.100 [s]
Tao	0.060 [s]
Tvo	0.260 [s]
Sami	0.776 [m/s ²]
Svmi	0.005 [m/s]
Samo	0.561 [m/s ²]
Svmo	0.011 [m/s]
Fa	0.723 [-]
Fv	2.503 [-]
TB	0.042 [s]
TC	0.127 [s]
TD	1.683 [s]
SA(0)	0.175 [m/s ²]
SA(TB)	0.561 [m/s ²]

Fattori di amplificazione su intensità spettrale

Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	Int. Housner input [m]	Int. Housner output [m]	Int. Housner input/output [m]	FA
--------------------	---------------------	------------------------	-------------------------	-------------------------------	----

Spettro normalizzato di risposta elastico



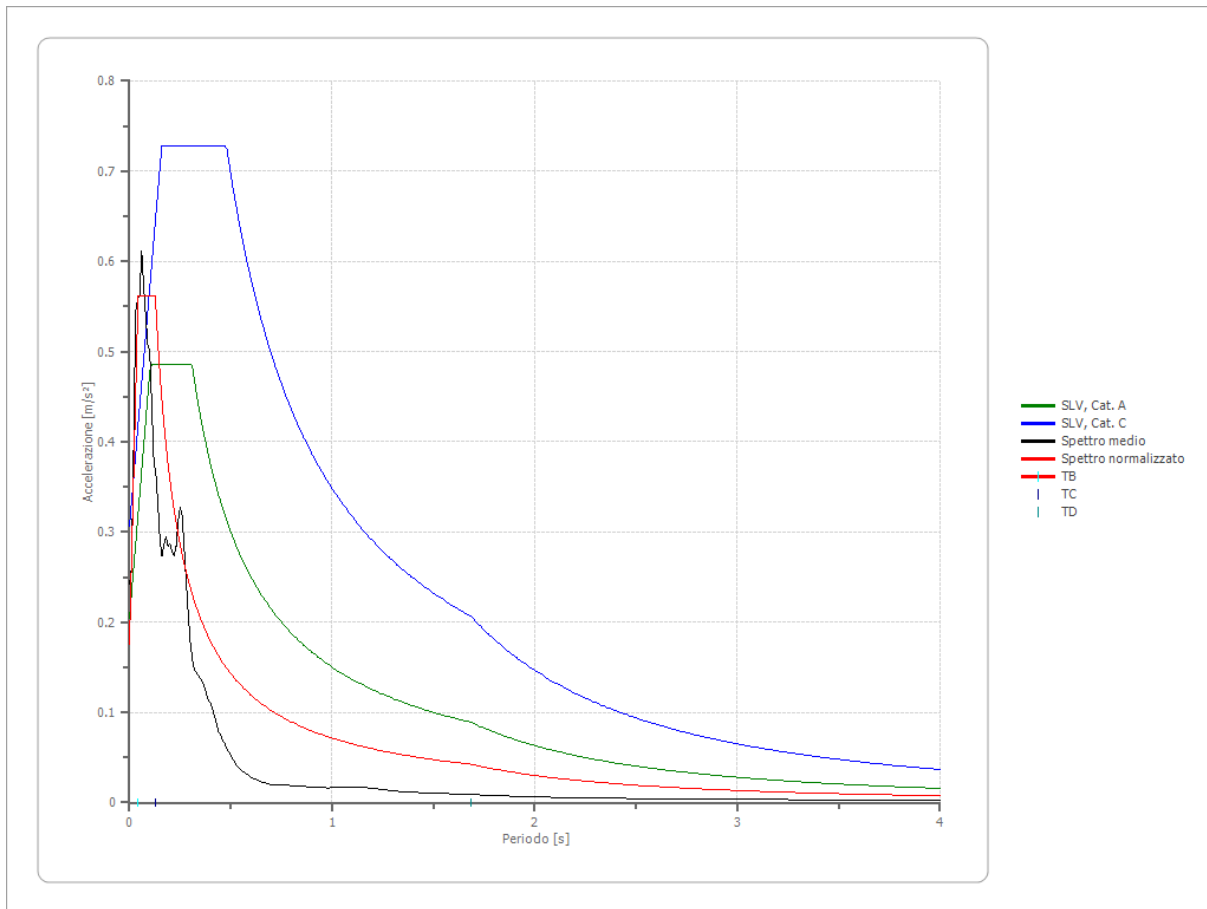
Parametri spettro normalizzato

Ag [m/s ²]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [m/s ²]	Se(TB) [m/s ²]	S
0.175	3.200	--	0.042	0.127	1.683	0.175	0.561	0.860

Confronto spettro normativa

Tipo di spettro: Spettro di progetto

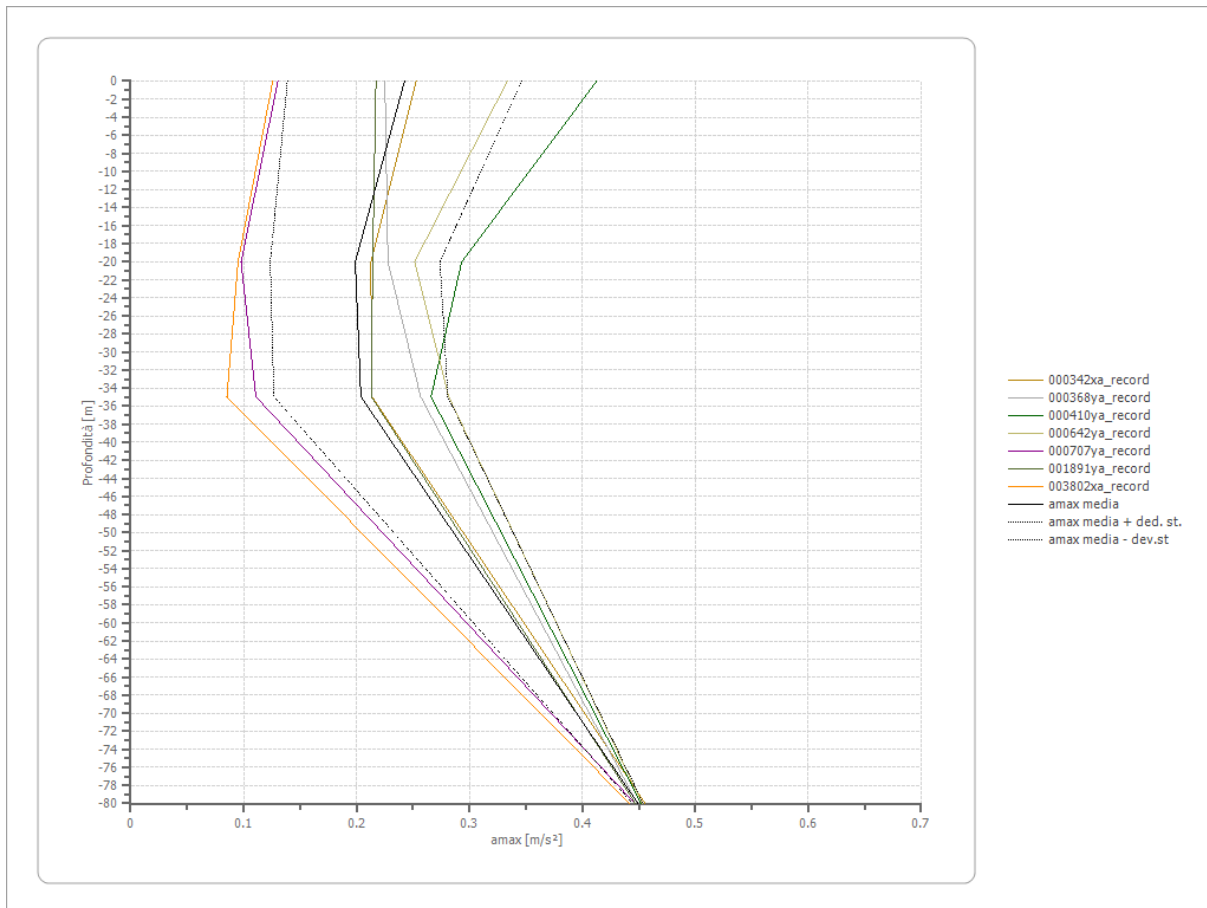
	Operatività à SLO Cat. A	Danno SLD Cat. A	Salvaguardia vita SLV Cat. A	Prev. collasso SLC Cat. A	Operatività à SLO Cat. C	Danno SLD Cat. C	Salvaguardia vita SLV Cat. C	Prev. collasso SLC Cat. C
Tr [anni]	30	50	475	975	30	50	475	975
ag [m/s ²]	0.063	0.081	0.204	0.256	0.063	0.081	0.204	0.256
Fo	2.413	2.404	2.38	2.437	2.413	2.404	2.38	2.437
Tc* [s]	0.268	0.27	0.309	0.32	0.268	0.27	0.309	0.32
Ss	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	1.50	1.50	1.50
St	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.62	1.62	1.55	1.53
TB [s]	0.089	0.090	0.103	0.107	0.145	0.146	0.159	0.163
TC [s]	0.268	0.270	0.309	0.320	0.435	0.437	0.478	0.489
TD [s]	1.626	1.633	1.683	1.704	1.626	1.633	1.683	1.704
Se(0) [m/s ²]	0.063	0.081	0.204	0.256	0.095	0.122	0.306	0.384
Se(TB) [m/s ²]	0.152	0.195	0.486	0.624	0.228	0.292	0.728	0.936



Profilo a max

	0.0 [m]	20.0 [m]	35.0 [m]	80.0 [m]
000342xa_record [m/s ²]	0.253	0.213	0.214	0.456
000368ya_record [m/s ²]	0.225	0.228	0.257	0.449
000410ya_record [m/s ²]	0.413	0.293	0.266	0.452
000642ya_record [m/s ²]	0.333	0.251	0.282	0.453
000707ya_record [m/s ²]	0.130	0.098	0.111	0.447
001891ya_record [m/s ²]	0.217	0.214	0.213	0.447

003802xa_record [m/s ²]	0.126	0.095	0.085	0.442
media [m/s ²]	0.242	0.199	0.204	0.449
Dev. St. [m/s ²]	0.104	0.075	0.077	0.005



VERIFICA LIQUEFAZIONE

Con il termine liquefazione si intende la perdita di resistenza al taglio di un mezzo granulare sotto falda determinata da un aumento della pressione dell'acqua nei pori. Tale incremento può essere dovuto da varie cause, il D.M. del 4/02/2008, contiene al punto 7011.3.4.2 le linee guida per valutare la suscettibilità alla liquefazione dei terreni.

Una valutazione semplificata della suscettibilità alla liquefazione può essere ottenuta considerando le seguenti condizioni:

- Magnitudo del sisma
- Accelerazione massime attese al piano campagna
- Profondità media stagionale della falda
- Tipo di deposito

Con l'approccio semplificato la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

- 1) eventi sismici attesi di Magnitudo $M < 5$
- 2) accelerazioni massime attese al p.c. in assenza di manufatti $< 0.1 g$
- 3) profondità media stagionale della falda $> 15 m$ dal p.c.
- 4) depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata a una tensione efficace verticale di 100 kPa
- 5) distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nelle fasce granulometriche critiche in funzione dei coefficienti di uniformità U.

Nello studio in oggetto la procedura semplificata può essere utilizzata essendo le circostanze all'interno del perimetro dei punti sovraesposti.

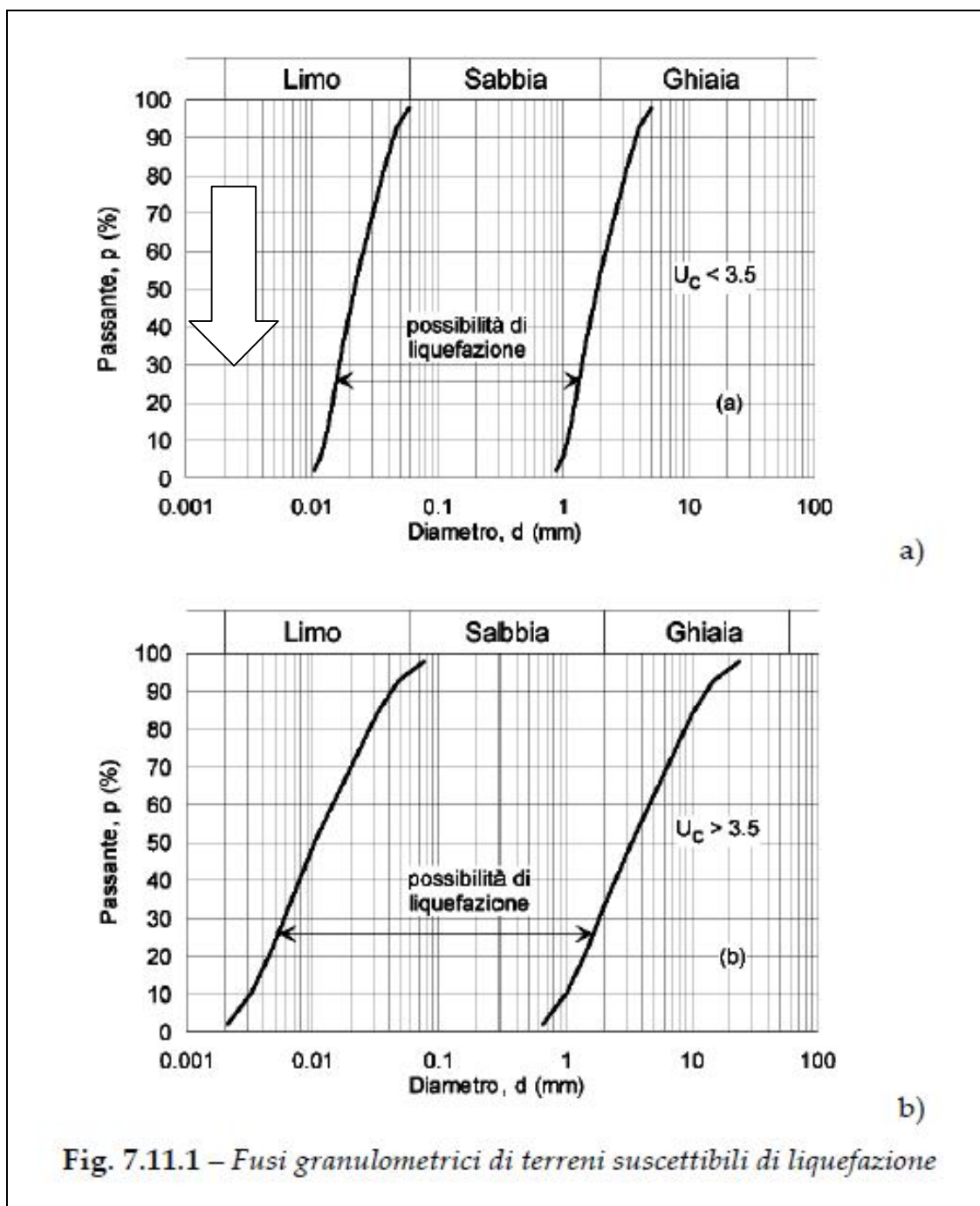


Fig. 7.11.1 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione

Il volume di terreno considerato, per la presenza di terreni fini argillosi e limosi, è risultato dall'analisi, non liquefacibile.

CONCLUSIONI

I dati geofisici rilevati durante la campagna geognostica del presente PUA, hanno evidenziato un picco di risonanza intorno a 1 hz.

I parametri geotecnici dei terreni misurati hanno permesso una preliminare stima dei cedimenti edometrici, tali valori risultano nel range di riferimento e andranno verificati in sede di progettazione definitiva sismica attraverso la realizzazione di una nuova puntuale campagna geognostica all'uso dedicata.

Il volume di terreno considerato, per la presenza costante di terreni a granulometria fine, non è liquefacibile, anche in questo caso per l'eventuale presenza di vene sabbiose all'interno del lotto, si prescrive una verifiche analitica puntuale in sede di autorizzazione sismica.