

**Committente** | **Sviluppatore**

**Green Power Marcallese Srl**

Via Cesare Ajraghi 30 – 20156 Milano  
greenpowermarcallesesrl@pec.it  
Partita IVA/C.F. 07110400962



**Agatos Green Power Lemuria Srl**

Via Cesare Ajraghi 30 – 20156 Milano  
Tel. +39 0248376601, Fax +39 0230131206  
Mail: info@agatos.it – Web: www.agatosenergia.it  
Partita IVA/C.F. 07110360968



# Nuovo impianto di recupero (R3) di rifiuti speciali non pericolosi (forsu) per la produzione di biometano nel comune di Marcallo con Casone (Mi)

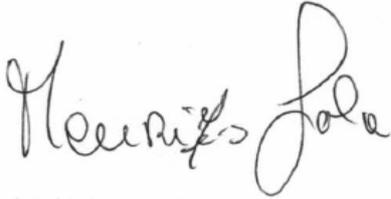
DOMANDA DI AUTORIZZAZIONE UNICA EX ART. 12 D.LGS.  
387/2003

## RELAZIONE GEOLOGICA

AI SENSI DELLA D.G.R. IX/2616 DEL 30 NOVEMBRE 2011 E  
DEL D.M. 14 GENNAIO 2008 (N.T.C. P.TO 6.2.1)

## I LEGALI RAPPRESENTANTI

Maurizio Sala  
(Green Power Marcallese s.r.l.)



Leonardo Rinaldi  
(Agatos Green Power Lemuria s.r.l.)

## I TECNICI

Ing. Alessandro Daneu



Dott. Geol. Ferruccio Tomasi  
Di GeoSFerA Studio Associato di Geologia



## SOMMARIO

<b>1. Premessa .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Quadro normativo di riferimento .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Descrizione del progetto e vincolistica .....</b>	<b>5</b>
3.1. Ubicazione e caratteristiche generali dell'intervento .....	5
3.2. Vita nominale, classe d'uso e periodo di riferimento per l'azione sismica .....	6
3.3. Vincoli di natura geologica .....	7
3.4. Classificazione sismica .....	9
<b>4. Contesto geologico di riferimento .....</b>	<b>10</b>
4.1. Inquadramento geologico .....	10
4.2. Geologia dei depositi superficiali .....	11
4.3. Geomorfologia .....	12
4.4. Geologia di sottosuolo .....	13
4.5. Idrografia superficiale .....	13
4.6. Idrogeologia .....	14
4.6.1. <i>Caratteri generali</i> .....	14
4.6.2. <i>Piezometria</i> .....	14
4.7. Vulnerabilità intrinseca dell'acquifero .....	19
4.8. Aspetti geologico tecnici .....	22
<b>5. Modellazione geologica .....</b>	<b>23</b>
5.1. Approfondimento geologico-idrogeologico .....	23
5.1.1. <i>Sondaggi geognostici</i> .....	23
5.1.2. <i>Monitoraggio piezometrico</i> .....	25
5.1.3. <i>Vulnerabilità intrinseca locale dell'acquifero</i> .....	26
5.2. Approfondimento geotecnico .....	27
5.2.1. <i>Risultati delle prove in sito</i> .....	28
5.2.2. <i>Caratterizzazione geotecnica</i> .....	31

5.2.3. Parametri geotecnici medi.....	33
5.2.4. Parametri geotecnici caratteristici.....	33
5.3. Approfondimento sismico.....	34
5.3.1. Verifica a liquefazione.....	35
<b>6. Analisi della pericolosità geologica.....</b>	<b>35</b>
6.1. Pericolosità sismica.....	35
6.2. Pericolosità geologica e geomorfologica.....	38
6.3. Pericolosità idraulica-idrogeologica.....	38
<b>7. Elementi di criticità'.....</b>	<b>38</b>
7.1. Elementi di criticità idrogeologica.....	39
7.2. Elementi di criticità geotecnica.....	39
7.3. Elementi di criticità sismica.....	39
7.4. Elementi di criticità ambientale.....	40
<b>8. Attendibilità del modello geologico e fattibilità dell'intervento.....</b>	<b>41</b>
<b>ALLEGATO 1 STRATIGRAFIE SONDAGGI GEOGNOSTICI.....</b>	<b>42</b>
<b>ALLEGATO 2 CARTA DELLA VULNERABILITÀ INTRINSECA DELL'ACQUIFERO.....</b>	<b>43</b>
<b>APPENDICE 1 APPROFONDIMENTO RELATIVO AGLI ASPETTI SISMICI.....</b>	<b>44</b>

## 1. Premessa

Nell'ambito della realizzazione di un nuovo impianto di recupero di rifiuti speciali non pericolosi (FORSU) per la produzione di biometano in Comune di Marcallo con Casone (MI), la società AGATOS GREEN POWER LEMURIA S.r.l. ha affidato a geoSFerA Studio Associato di Geologia l'incarico di redigere uno studio geologico del sito di intervento e di un suo intorno significativo, approfondendo gli aspetti legati al contesto idrogeologico, di caratterizzazione geotecnica e sismici, così come prescritto nelle Norme Geologiche di Piano di supporto al P.G.T. comunale.

Lo studio geologico è stato redatto compiendo preliminarmente un'accurata indagine bibliografica volta alla ricerca sia dei dati geologici e idrogeologici disponibili sia dei vincoli insistenti sull'area di interesse. In particolare sono state consultate le banche dati della Regione Lombardia (SIT - Sistema Informativo Territoriale), del Comune di Marcallo con Casone (Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica del Piano di Governo del Territorio) e della Città Metropolitana di Milano.

Le informazioni bibliografiche sono state integrate e confrontate con dati sito specifici raccolti con un'opportuna campagna di indagini, consistita in 1 sondaggio geognostico spinto fino alla profondità di 15 m dal p.c. poi allestito a piezometro, 1 sondaggio geognostico spinto fino alla profondità di 30 m dal p.c. e 4 prove penetrometriche dinamiche. Inoltre è stata eseguita un'indagine sismica in foro *Down-Hole* e sul rumore sismico ambientale con metodologia HVSR. I risultati e le interpretazioni delle varie indagini verranno descritti di seguito.

La presente relazione pertanto illustra i risultati dello studio con il fine di ricostruire il modello geologico dell'area e di un intorno significativo, così come previsto dalla normativa vigente (NTC 2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni – D.M. 14.01.2008" e relativa circolare applicativa) e di approfondire gli aspetti geologici evidenziati nelle Norme di Attuazione del vigente Studio Geologico, Idrogeologico e sismico a supporto del P.G.T.

## 2. Quadro normativo di riferimento

La presente relazione è stata redatta in accordo alla normativa vigente, in particolare:

**Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008** “Norme Tecniche per le Costruzioni” (pubblicato su G.U. Del 4 febbraio 2008 n. 29).

**Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009**, G.U. n. 47 del 26 febbraio 2009-Suppl. Ordinario. 27: “Istruzioni per l’applicazione delle “Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008”.

Pericolosità sismica e criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – allegato al voto n. 36 del 27.07.2007.

**Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003**

“Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”, e s.m.i.

**Eurocodice 8 (1998)**: Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture. Parte 5: fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003).

**Eurocodice 7.1 (1997)**: Progettazione geotecnica. Parte I: Regole generali. UNI.

**Eurocodice 7.2 (2002)**: Progettazione geotecnica. Parte II: Progettazione assistita da prove di laboratorio (2002). UNI.

**Eurocodice 7.3 (2002)**: Progettazione geotecnica. Parte II: Progettazione assistita da prove in sito (2002). UNI.

**Associazione Geotecnica Italiana (1977)** raccomandazioni sulla programmazione delle indagini geotecniche. "Quaderno", n. 1.

*Normativa Regione Lombardia*

**D.G.R. 11 luglio 2014 n. X/2129**: Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia.

**Legge Regionale 12 ottobre 2015 n. 33**: Disposizioni in materia di opere o costruzioni e relativa vigilanza in zone sismiche.

**D.G.R. 30 marzo 2016 n. X/5001**: Approvazione delle linee di indirizzo e coordinamento per l’esercizio delle funzioni trasferite ai comuni in materia sismica (artt. 3, comma 1 e 13 della l.r. 33/2015).

*Normativa in materia di pianificazione e vincolo idrogeologico:*

**Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico (PAI)** – Legge 18 maggio 1989 n. 183, art.17.Comma 6 ter- - adottato con deliberazione del Comitato Istituzionale n. 18 del 26 aprile 2001.

**L.R. 11 marzo 2005 n. 12 e s.m.i.** - “Legge di governo del territorio”.

**D.G.R. 30 novembre 2011 – n. IX/2616** - “Aggiornamento dei Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio, in attuazione dell’art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005 n. 12, approvati con d.g.r.22 dicembre 2005 n. 8/1566 e successivamente modificati con d.g.r. 28 maggio 2008 n. 8/7374”.

**Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) della Provincia di Milano.**

Approvato con deliberazione del Consiglio Provinciale n. 93 del 17.12.2013 e divenuto efficace con la pubblicazione sul Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia, Serie avvisi e concorsi n. 12 del 19.03.2014 dell'avviso di definitiva approvazione e deposito degli atti.

**Programma di Tutela e Uso delle Acque (P.T.U.A.).** Adottato con Deliberazione n. 1083 del 16 novembre 2005.

**Piano di Governo del Territorio (PGT) del Comune di Marcallo con Casone,** Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica, Novembre 2014.

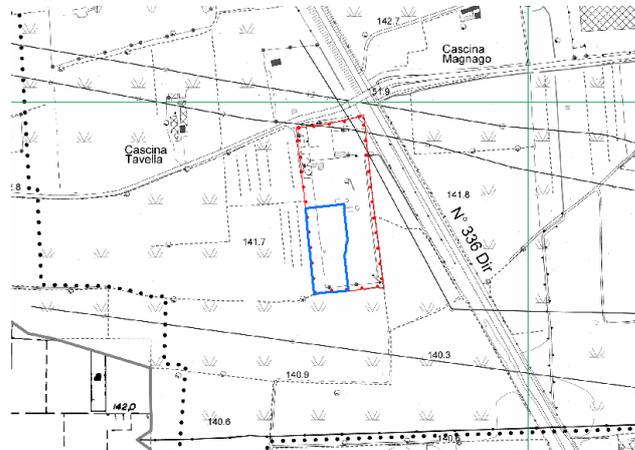
### 3. Descrizione del progetto e vincolistica

#### 3.1. Ubicazione e caratteristiche generali dell'intervento

L'area di intervento è situata alla periferia Sud occidentale del Comune di Marcallo con Casone, a ridosso della Strada Statale n. 336 dir. Ricade nella sezione A6d2 della Carta Tecnica Regionale e il suo centro ha coordinate UTM/WGS84 488630 – 5035737. Catastalmente interessa parte dei mappali 45 e 250 del Foglio n. 11.



**Fig. 3.1a** – Ubicazione del sito di indagine. Indicato con la freccia rossa.



**Fig. 3.1b** - Stralcio della sezione A6d2 della Carta Tecnica Regionale.

In rosso è delimitata l'area di proprietà comunale; in blu l'area di intervento.

L'area su cui è prevista la realizzazione dell'impianto (perimetro blu in fig. 3.1b) è compresa in una più vasta area di proprietà comunale (perimetro rosso in fig. 3.1b). L'area di interesse occupa una superficie di circa 10.000 m<sup>2</sup> ed è per buona parte ribassata, di circa 2 m, rispetto al piano campagna circostante; solo la parte occidentale è a piano campagna.

Il progetto prevede la realizzazione di un impianto per il trattamento della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU), con produzione di biometano. Per ogni maggiore dettaglio si rimanda alla documentazione di progetto.

### 3.2. Vita nominale, classe d'uso e periodo di riferimento per l'azione sismica

Il tipo di costruzione per l'ambito in progetto viene attribuito, secondo le indicazioni dei progettisti, ad **opere ordinarie (2)**, a cui è associata una vita nominale  $V_N = 50$  anni (NTC 2008 par. 2.4.1, tab. 2.4.1). Per vita nominale si intende il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è stata destinata.

Conformemente a quanto prescritto nelle NTC 2008 le costruzioni sono suddivise, in presenza di azioni sismiche e con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, in quattro classi d'uso; secondo le indicazioni fornite dai progettisti l'opera in oggetto rientra nella **classe d'uso III** definita come *“costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti nella classe IV. Ponti e reti viarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso”*.

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicando la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$  ( $V_R = V_N C_U$ ). Il valore del coefficiente d'uso  $C_U$  è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato in tabella:

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_U$	0,7	1	1,5	2

Per l'ambito in oggetto la classe d'uso relativa è la “III” con un periodo di riferimento ( $V_R$ ) pari a 75 anni. Riassumendo, le caratteristiche dell'opera in oggetto sono:

Tipo di costruzione	Classe d'uso	Coefficiente $C_u$	Vita nominale (anni) $V_n$	Periodo di riferimento (anni) $V_R$
2	III	1,5	50	75

### 3.3. Vincoli di natura geologica

Il presente studio riporta le determinazioni e i vincoli di natura prettamente geologica, relativi ai piani di assetto territoriale sovraordinati ed ordinati, che insistono sull'area in progetto e su un suo intorno significativo. In particolare sono presi in considerazione:

- Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.);
- Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (P.T.C.P.);
- Piano di Governo del Territorio (P.G.T.) – Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica.
- Reticolo Idrico Minore.

Dalla consultazione degli elaborati del P.A.I. non risulta la presenza di vincoli insistenti sull'area e in un suo intorno.

Dall'esame della Tavola 7 "Difesa del suolo" del P.T.C.P. di Milano (dicembre 2013) si evince che l'area oggetto di intervento fa parte del macrosistema idrogeologico componente il ciclo delle acque, nello specifico per ambiti di influenza del Canale Villoresi.

In tale ambito vigono le disposizioni di cui all'art. 38 delle Norme di Piano del P.T.C.P. ed in particolare, *"favorire, [...], l'immissione delle acque meteoriche sul suolo e nei primi strati del sottosuolo, evitando condizioni di inquinamento o di veicolazione di sostanze inquinanti verso le falde. Nelle eventuali trasformazioni urbanistiche e infrastrutturali è necessario favorire l'infiltrazione e l'invaso temporaneo delle precipitazioni meteoriche al fine di non causare condizioni di sovraccarico nella rete di drenaggio, in coerenza anche con le disposizioni del P.A.I. e del P.T.U.A."* (comma 3 lett. a).

In riferimento invece alla Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica (redatta da INTEGRA S.r.l. nel novembre 2014) di supporto al vigente P.G.T. comunale, l'area di intervento ricade in classe di fattibilità geologica con consistenti limitazioni (**3d**). Di seguito si riportano caratteristiche e prescrizioni della classe così come indicate nelle Norme Geologiche di Piano:

#### **Principali caratteristiche**

*Aree pianeggianti costituite da Ghiaie e Sabbie; coltre superficiale (max. 1 m) limoso-sabbiosa, localmente argillosa. Locale presenza di lenti coesive limoso-argillose.*

*Soggiacenza della falda, in particolare nel settore Sud-Sudest del territorio, maggiore o uguale a -5 m da piano campagna. Vulnerabilità della falda: da media a elevata.*

#### **Parere geologico sull'edificabilità**

*Favorevole con consistenti limitazioni legate all'avvicinamento della superficie piezometrica al piano campagna. Effettuare misurazioni del livello di falda sia nella stagione estiva che nella stagione invernale; predisporre in fase di progettazione dell'opera edificatoria, strumenti per il monitoraggio delle acque di prima falda (piezometri). Verificare le caratteristiche portanti del terreno.*

#### **Azioni edificatorie e opere ammissibili**

*Qualunque tipo di opera edificatoria risulta essere ammissibile a condizione che vengano verificate le possibili interazioni tra struttura e terreno che, considerato il livello di falda uguale o inferiore a 5 m da piano campagna, può essere soggetto a passaggi da zona satura a zona non satura in corrispondenza delle fondazioni. È consigliata l'esecuzione di piezometri per monitorare il livello di falda e per eseguire l'analisi delle acque. L'assetto idrogeologico impone di prendere in considerazione accorgimenti in caso di progettazione di insediamenti produttivi particolari, al fine di ridurre il rischio inquinamento delle acque sotterranee.*

**Approfondimenti e indagini minime preventive**

*Per ogni opera sono sempre previste Indagini Geognostiche (IGT); la tipologia e il numero di indagini sono commisurate al tipo e all'entità dell'opera stessa. Verificare la profondità della superficie piezometrica da piano campagna allo scopo di valutare una possibile interazione con fondazioni superficiali e progettare con sicurezza dispositivi a difesa della falda superficiale commisurate alla destinazione d'uso dell'opera in progetto e al grado di pericolosità potenziale per l'inquinamento di essa.*

**Interventi da prevedere in fase di progettazione**

*Sono sempre da prevedere opere di regimazione idraulica e di smaltimento delle acque superficiali e sotterranee (RE). Da prevedere il collettamento degli scarichi idrici nella rete fognaria (CO) e, in caso di insediamenti produttivi, in base al grado di rischio dell'attività produttiva, si devono prevedere sistemi di controllo ambientale (CA), quali ad esempio: la realizzazione di piezometri a monte e a valle dell'immobile allo scopo di monitorare le caratteristiche idrochimiche dell'acqua di falda, l'esecuzione di prelievi del terreno nei livelli superficiali, al fine di determinare una possibile forma di contaminazione in atto. I sistemi di controllo ambientale devono essere altresì previsti nei casi in cui sono in progetto nuovi insediamenti produttivi in aree precedentemente occupate da insediamenti potenzialmente a rischio inquinamento. La realizzazione di una ristrutturazione di impianti e/o strutture che abbiano una relazione diretta o indiretta con il sottosuolo e/o le acque (ad esempio reti fognarie sotterranee, installazione o dismissione di serbatoi per combustibili interrati, sistemi di raccolta e smaltimento delle acque di prima pioggia e asfaltatura piazzali), comporta la predisposizione di sistemi di controllo ambientale.*

**Norme sismiche da adottare in fase di progettazione:**

*Per gli edifici che rientrano nell'elenco del d.d.u.o. 19904/03, è necessario definire le azioni sismiche di progetto applicando il terzo livello di approfondimento (allegato 5 della d.g.r n. 8 /7374 del 05/08) o, in alternativa, applicazione dello spettro previsto dalla normativa nazionale per la zona sismica superiore.*

Per quanto riguarda il Reticolo Idrografico Minore, l'area di intervento è circondata da un sistema di fossi e canali diramatori (Diramatore 7 di Magenta) facenti parte del reticolo idrico di bonifica gestito dal Consorzio di Bonifica Est Ticino Villorese, il quale esercita le funzioni concessorie e di polizia idraulica. Per i suddetti reticoli il consorzio ha definito delle fasce di rispetto pari a 5 metri, intendendosi misurati dal piede dell'argine esterno o, in assenza di argine esterno in rilevato, dalla sommità della sponda incisa. L'articolo 3 del Regolamento Regionale 8 febbraio 2010 n. 3 sancisce le attività vietate all'interno del comprensorio di bonifica.

Come si può osservare dalla figura sottostante l'area di intervento è solo marginalmente interessata direttamente da uno di questi fossi e dalla relativa fascia di rispetto.

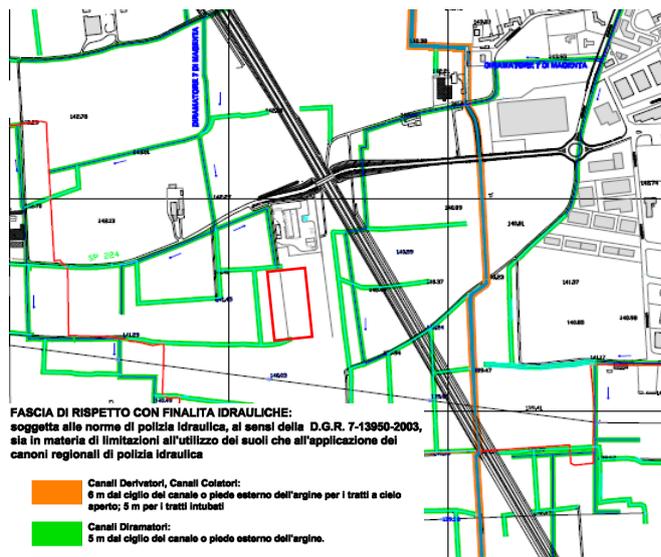


Fig. 3.2. - Stralcio Carta dei vincoli (Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica di supporto al P.G.T., novembre 2014). In rosso l'area di intervento.

### 3.4. Classificazione sismica

Il Comune di Marcallo con Casone, secondo la riclassificazione sismica del territorio nazionale (O.P.C.M. n.3274 del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", adottata con D.G.R. n.14964 del 7 novembre 2003) e sulla base della nuova D.G.R. 11 luglio 2014 n. X/2129 (Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia), ricade in **zona sismica 4**.

Ciascuna zona sismica è individuata (O.P.C.M. n.3274 del 20 marzo 2003, Allegato 1) secondo valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo  $a_g$ , con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, così come riportato nella tabella seguente:

Zona sismica	Accelerazione orizzontale con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni [ag/g]	Accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico [ag/g]
1	>0,25	0,35
2	0,15-0,25	0,25
3	0,05-0,15	0,15
4	<0,05	0,05

Nello specifico il Comune di Marcallo con Casone presenta un valore di  $a_{g,max}$  pari 0,03948 (D.G.R. 11 luglio 2014 n. X/2129 – Allegato A).

La normativa prevede che per l'azione sismica si adotti un procedimento sito specifico e non più zona specifico; tale procedimento verrà meglio descritto in appendice 1 a cui si rimanda.

## 4. Contesto geologico di riferimento

### 4.1. Inquadramento geologico

Il sito di interesse ricade nella Pianura Padana che è un bacino sedimentario instauratosi fin dal tardo Cretaceo al margine di due placche e nel quale si accumulavano, e si accumulano tutt'ora, i sedimenti provenienti dalle Alpi Meridionali (Sud-vergenti) e dagli Appennini (Nord-vergenti).

Il movimento relativo delle due placche è ancora attivo, con una direzione NNW-SSE e un tasso di convergenza minore di 1 cm l'anno.

Il bacino delimitato dalle due catene è sede della deposizione di una potente sequenza sedimentaria coeva all'innalzamento delle catene stesse, la cui messa in posto è stata facilitata dal fatto che la presenza stessa delle due catene ha portato alla flessione della crosta, generando così lo spazio necessario all'accumulo di sedimenti (Doglioni, 1993).

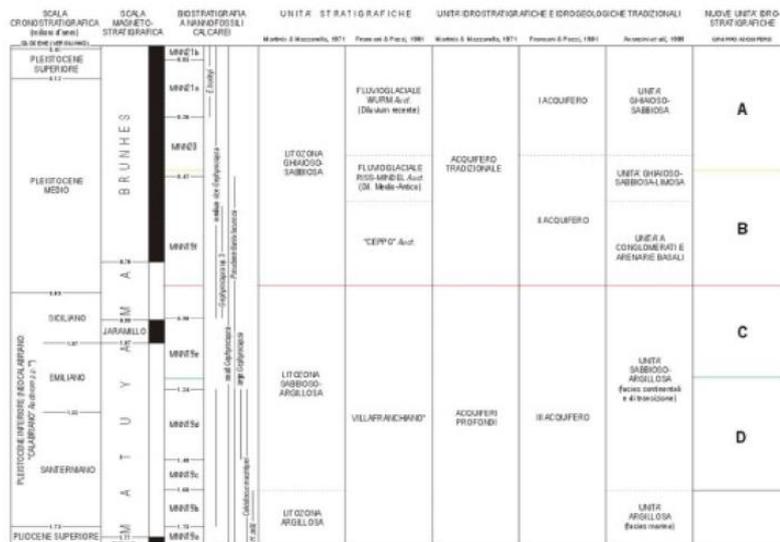
Con il Messiniano si assiste a una differenziazione tra la parte N e S del bacino. Mentre a S giocano un ruolo fondamentale i movimenti del fronte appenninico, che modificano anche in modo consistente la geometria del bacino, a N la tettonica si esplica mediante la formazione di ampie superfici di erosione e riattivazione di precedenti strutture sepolte. (Regione Lombardia & ENI Divisione Agip, 2002).

Il bacino occupato dalla Pianura Padana è sede di sedimentazione marina fino al tardo Pliocene quando si assiste al passaggio ad ambienti continentali. Il colmamento del bacino padano non avviene in modo sincrono su tutto il territorio ma si assiste ad una progressiva progradazione dei sedimenti continentali con due direzioni principali, da NW e da W (Regione Lombardia & ENI Divisione Agip, 2002). I ghiacciai quaternari giocano un ruolo importante sia per l'apporto sedimentario sia per la definizione della morfologia della pianura.

La successione sedimentaria plio-quaternaria è sede della maggior parte degli acquiferi sfruttabili a scopo idropotabile della pianura padana; per questo, negli ultimi decenni, è stata studiata a fondo soprattutto dal punto di vista idrogeologico. Allo scopo di elaborare modelli per la gestione delle risorse idriche, la stratigrafia del sottosuolo padano, quindi, è stata trattata riferendosi anche alle caratteristiche idrologiche con la definizione di unità idrostratigrafiche.

Regione Lombardia & ENI Divisione Agip (2002) hanno integrato i dati esistenti con dati provenienti da pozzi per l'esplorazione petrolifera, da profili sismici e da carotaggi continui. Tale integrazione, unita all'applicazione della stratigrafia sequenziale, ha permesso di aggiornare significativamente le conoscenze sull'architettura del sottosuolo padano.

La successione sedimentaria plio-quaternaria padana ha carattere generalmente regressivo: alla base sono presenti depositi torbiditici di mare profondo ricoperti da un prisma sedimentario progradante costituito da facies sedimentarie di scarpata, di piattaforma esterna, litorali, deltizie/lagunari, fluviali e fluvioglaciali (Regione Lombardia & ENI Divisione Agip, 2002). Nei profili sismici si riconoscono due direzioni prevalenti di progradazione dei corpi sedimentari: la prima assiale rispetto al bacino Padano, Est vergente, originata dal paleo-delta del Po, la seconda trasversale, Sud-Est vergente, originata dai sistemi deltizi ad alimentazione alpina (Regione Lombardia & ENI Divisione Agip, 2002).



**Fig. 4.1** - Schema delle diverse unità costituenti il sottosuolo della pianura padana, con particolare riferimento ai modelli storici dell'area milanese e alle nuove proposte. Regione Lombardia & ENI Divisione Agip (2002)

L'interpretazione dell'evoluzione del bacino padano attraverso la stratigrafia sequenziale ha permesso di individuare quattro limiti di sequenza principali con valenza bacinale e datazione assoluta. Tali limiti suddividono la successione in quattro unità idrostratigrafiche principali, ognuna delle quali rappresenta un gruppo acquifero: A, B, C, D (fig. 4.1). Ognuna di queste unità è composta da sistemi deposizionali a loro volta caratterizzati da un'organizzazione verticale di facies diverse, con un'alternanza ciclica di corpi sedimentari a granulometria prevalentemente grossolana con corpi sedimentari a granulometria prevalentemente fine. Le sequenze deposizionali riconosciute hanno spessore dell'ordine dei metri per gli ordini gerarchici inferiori e dell'ordine delle decine di metri per gli ordini gerarchici superiori (Regione Lombardia & ENI Divisione Agip, 2002).

## 4.2. Geologia dei depositi superficiali

I depositi superficiali della zona sono di origine fluvioglaciale cioè originati dagli scaricatori glaciali dei ghiacciai pleistocenici. Di fatto, l'area interessata dall'opera costituiva all'epoca delle glaciazioni un'ampia piana fluvioglaciale percorsa dagli scaricatori glaciali provenienti da Nord. Questi scaricatori avevano percorsi leggermente diversi nelle varie glaciazioni, per cui, attualmente, la pianura non è costituita in superficie da un'unica unità uniformemente distribuita, ma presenta delle "fasce" di territorio nelle quali sono presenti sedimenti di unità ed età differenti. Il limite tra le diverse unità è spesso marcato anche da limiti tra morfologie che, nelle aree di pianura, sono generalmente costituiti da terrazzi in cui quello più giovane è posto a quota inferiore.

Nell'area considerata, tuttavia, a questa differenza di età di sedimenti non corrisponde una morfologia netta. In particolare, dai dati a disposizione appare come l'area sia interessata in superficie da depositi appartenenti all'Allogruppo di Besnate indifferenziato (Pleistocene Medio Superiore), corrispondente al penultimo grande ciclo di avanzate glaciali.

L'unità è costituita, in termini generali, da depositi fluvioglaciali di natura ghiaioso-sabbiosa dati principalmente da ghiaie a supporto clastico, da massive a grossolanamente stratificate, a matrice variabile tra sabbiosa e sabbioso limosa. A tetto delle ghiaie possono essere presenti in modo discontinuo sedimenti totalmente pedogenizzati di spessore in genere 0,5 m oppure sedimenti limosi

con contenuto variabile di sabbia e argilla e talora sparsi clasti, caratteristici per il marcato arrossamento.

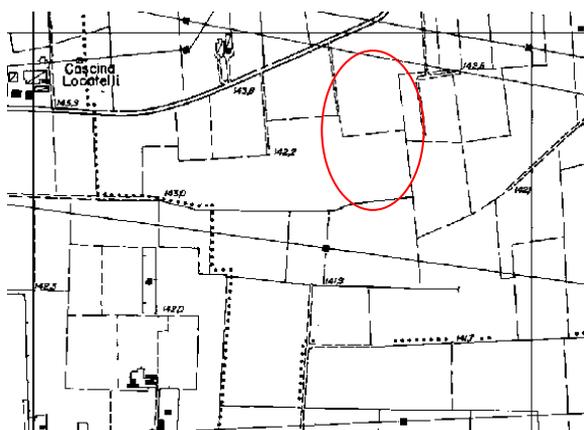
Secondo la banca dati regionale (Basi ambientali della pianura) l'area interessata dal progetto si caratterizza per la presenza di "sabbie poco gradate con limo".

### 4.3. Geomorfologia

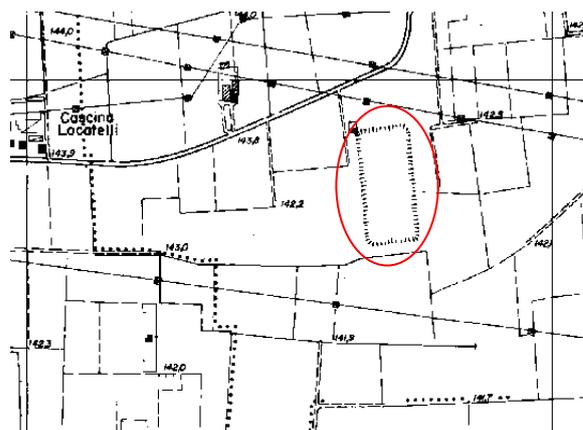
L'area oggetto di intervento si inserisce in un contesto geomorfologico di media-bassa pianura; il territorio risulta essere infatti pianeggiante con debole pendenza, da NNE a SSW, di circa 0,15-0,2%. Dal punto di vista altimetrico il comune di Marcallo con Casone è compreso nella fascia di quote tra circa 150 m s.l.m. e i 140 m s.l.m.

L'attuale assetto morfologico del territorio è qui dovuto principalmente all'azione degli scaricatori glaciali quaternari che da Nord trasportavano ingenti quantità di sedimenti, formando ampie piane fluviali/fluvioglaciali (sandur). Più di recente l'impatto antropico ha perturbato l'assetto morfologico del territorio, con la coltivazione di cave di ghiaie e sabbie, l'apertura di fontanili e di un sistema di canali ad uso irriguo e la costruzione di rilevati e dossi per il passaggio di importanti vie di comunicazione.

Nello specifico l'area di intervento si trova per buona parte ribassata rispetto al circostante piano campagna. La parte bassa ha una quota media di 139,5 m s.l.m., mentre il piano campagna "originario", immediatamente circostante l'area, ha una quota mediamente di 141,5 m s.l.m. Questo fa sì che ci sia una differenza di quota di circa 2 m tra la parte scavata e il piano campagna.



**Fig. 4.2a.** Stralcio CTR sezione A6d2, edizione 1980-83, dove non è cartografata l'area ribassata



**Fig. 4.2b.** Stralcio CTR sezione A6d2, edizione 1994, dove è cartografata l'area ribassata

La realizzazione dello scavo può essere ricondotto a un periodo compreso tra gli anni '80 e i primi anni '90, essendo riportata nell'edizione 1994 della CTR ma non in quella precedente, come evidenziato negli stralci cartografici soprastanti. Secondo quanto riferito dall'Amministrazione comunale lo scavo è stato realizzato con lo scopo di creare un'area di espansione dello sfioratore di troppo pieno delle acque di prima e seconda pioggia.

## 4.4. Geologia di sottosuolo

Grazie ai dati stratigrafici desumibili dai numerosi sondaggi sia pubblici sia privati realizzati nel territorio di Marcallo con Casone, è possibile definire a grandi linee i caratteri litologici di sottosuolo. Fino a 20-25 metri dal piano campagna la litologia prevalente è costituita da alternanze di ghiaie e sabbie; al di sotto si ha una diminuzione granulometrica d'insieme con la presenza di sabbie prevalenti fino a circa 40 metri dal piano campagna. Dopo i 40 metri e fino a 85 metri di profondità le litologie sono nuovamente a prevalenza ghiaioso sabbiosa in cui si intercalano lenti a granulometria limosa e argillosa.

Più in profondità, fino a 250 metri dal piano campagna, si ha un susseguirsi di corpi sedimentari a litologia limosa e argillosa a cui si intervallano livelli ghiaioso sabbiosi.

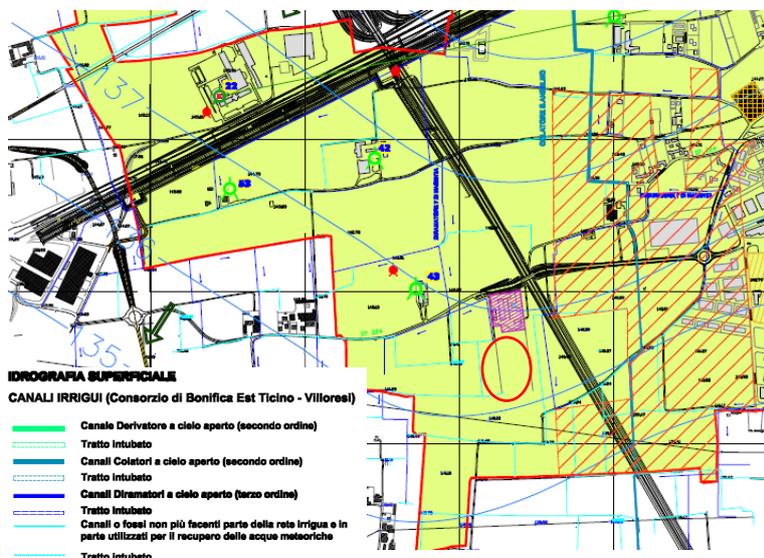
Per i dettagli stratigrafici sito specifici si rimanda al successivo capitolo 5.

## 4.5. Idrografia superficiale

Il territorio di Marcallo con Casone è caratterizzato da una fitta rete di canali artificiali, prettamente per uso irriguo, suddivisi in Derivatori, Colatori e Diramatori, la cui gestione è affidata al Consorzio di Bonifica Est Ticino-Villoresi. Negli ultimi anni alcuni rami dei canali irrigui diramatori sono stati esclusi dalla rete irrigua, trovandosi quindi in parte abbandonati e in parte utilizzati come invaso di recupero delle acque meteoriche.

Stessa sorte hanno subito i fontanili che, precedentemente presenti sul territorio, sono scomparsi da oltre due decenni; attualmente, i fontanili attivi più vicini si trovano più a Sud nei comuni di Boffalora sopra Ticino e Magenta.

L'area di intervento, con riferimento al vigente Studio Geologico di supporto al P.G.T. comunale, è quindi inserita in questo quadro idrografico, orlata a Est, a Ovest e a Sud da fossi scollegati dalla rete irrigua o utilizzati per il recupero delle acque meteoriche e da canali derivatori a cielo aperto di terzo ordine (Derivatore 7 di Magenta).



**Fig. 4.3** - Stralcio Carta Idrogeologica con elementi idrografici (Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica di supporto al P.G.T., novembre 2014). In rosso l'area di intervento.

Attualmente la porzione Sud dell'area è adibita a spaglio, su suolo libero, da sfioratore di troppo pieno delle acque di prima e seconda pioggia provenienti da Marcallo con Casone e comuni limitrofi. Questo si

traduce in un allagamento periodico dell'area, specie in concomitanza di intensi eventi piovosi, con altezze idriche di 30-60 cm.

Si fa presente che è in vigore un'autorizzazione allo scarico rilasciata da Cap Holding, con scadenza nel dicembre 2016. Alla scadenza del titolo autorizzativo ARPA ha prescritto la realizzazione di una vasca volano da realizzarsi a monte dello sfioratore (che passa al margine orientale dell'area comunale di cui l'area di intervento fa parte).

## 4.6. Idrogeologia

### 4.6.1. Caratteri generali

I caratteri idrogeologici del territorio in cui si inserisce l'area di intervento sono ricostruibili grazie alle stratigrafie dei pozzi pubblici e privati presenti sul territorio. È possibile quindi distinguere due unità idrogeologiche principali; tale suddivisione è confermata in uno studio realizzato nel dicembre 1995 dalla Provincia di Milano inerente le risorse idriche sotterranee.

Le unità riconosciute sono dalla più superficiale:

**Litozona delle sabbie e ghiaie prevalenti:** costituita in prevalenza da depositi sabbioso ghiaiosi molto permeabili, in cui si intercalano materiali più fini o livelli in cui le sabbie e le ghiaie hanno matrice argilloso limosa. Il letto di tale unità è posto ad una profondità di 52-56 metri dal piano campagna, in corrispondenza di uno strato passante da argilla gialla a sabbia e ghiaia fine gialla. Tale unità è sede della falda freatica superficiale e di altre falde semi confinate con essa in comunicazione. La soggiacenza della falda superficiale risulta variabile dai 5 ai 9 metri dal piano campagna e considerando la buona permeabilità dei litotipi questa risulta avere un alto grado di vulnerabilità e quindi potenzialmente soggetta a rischio inquinamento.

**Litozona delle alternanza sabbioso argillose:** costituita da orizzonti sabbiosi, sabbioso-ghiaiosi, talvolta in matrice limoso argillosa, a cui si alternano strati di argille e limi localmente torbosi, il cui tetto è posto alla profondità di 80 e 85 metri dal piano campagna. Tale litozona, specie in corrispondenza degli strati a granulometria più grossolana, è sede di falde di tipo confinato. La presenza di strati poco permeabili garantisce un buon grado di protezione delle falde interne alla litozona, riducendo il rischio di veicolazione di eventuali inquinanti provenienti dall'acquifero superficiale.

Nel territorio della Provincia di Milano è individuata una vasta area (P.T.C.P. vigente, dicembre 2013), che si sviluppa a Nord della linea di monte dei fontanili, in cui la struttura del sottosuolo e la natura dei terreni consentono l'infiltrazione delle acque verso le falde, con funzione di ricarica degli acquiferi, anche grazie all'apporto dei corsi d'acqua naturali e artificiali. Nell'ambito del P.T.C.P. (Tavola 7 Difesa del Suolo) è stato individuato l'ambito, denominato, di influenza del Canale Villoresi, che garantisce la distribuzione stagionale di acqua derivata dal Ticino su un reticolo di 1400 km, con una rilevante importanza territoriale per il contributo generato ai fini della ricarica sotterranea e soprattutto della funzione drenante che il sistema di canali svolge durante tutto l'arco dell'anno.

Il territorio di Marcallo con Casone, di cui fa parte l'area di intervento, ricade in tale contesto idrogeologico.

### 4.6.2. Piezometria

Avvalendosi di quanto riportato nel vigente studio geologico di supporto al P.G.T. comunale (novembre 2014) si deduce che la superficie piezometrica decresce, da Nord a Sud, da un valore di 144 m s.l.m. a 135 m s.l.m. con un progressivo avvicinamento alla superficie topografica, individuando un'area a Sud

del territorio comunale di Marcallo con Casone dove la soggiacenza risulta inferiore di 5 metri dal piano campagna (periodo estivo). Il flusso idrico della falda è orientato in direzione NNE-SSW, con un gradiente idraulico compreso tra il 2 e il 3 per mille.

Il sito oggetto di intervento, da quanto deducibile dalla Tavola 2 “Carta idrogeologica con elementi idrografici” (allegata al vigente studio geologico di supporto al P.G.T. comunale, novembre 2014), è compreso tra la isopiezometrica dei 137 m s.l.m. e la isopiezometrica dei 136 m s.l.m., corrispondente ad una soggiacenza tra i 4 e 5 metri dal piano campagna (che si riducono a 2-3 metri in considerazione del fatto che il sito di interesse è ribassato di circa 2 metri dal piano campagna circostante).

Dai dati consultabili sul Sistema Informativo Ambientale della Provincia di Milano, risulta che per l'anno 2013 (ultimo dato disponibile) la superficie piezometrica nell'area di intervento era a circa a 134-135 m s.l.m. a marzo e 135-136 m s.l.m. a settembre, che fa ricadere l'area nell'intervallo di soggiacenza, definito dalla Provincia di Milano, compresa tra 5 e 10 metri da p.c.; se si considera invece che il sito di interesse è ribassato di circa 2 metri dal piano campagna circostante l'area ricadrebbe nell'intervallo di soggiacenza compreso tra 0 e 5 m.

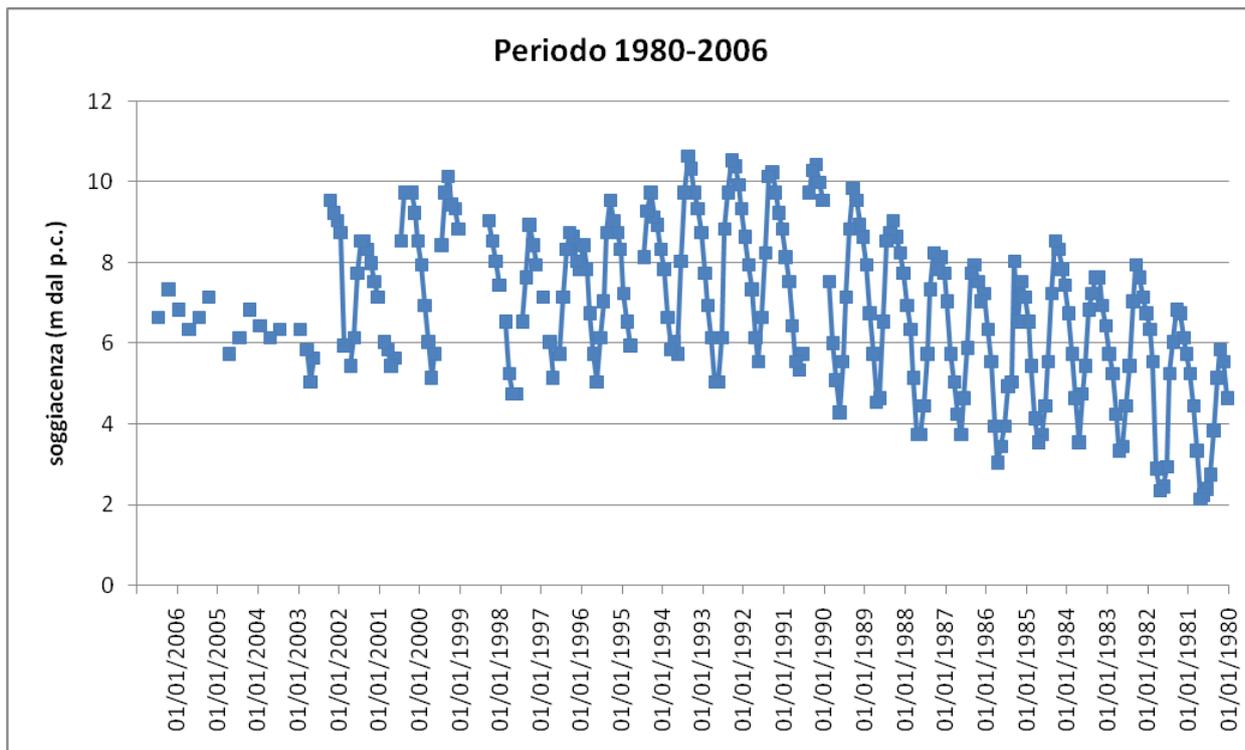
Per considerare le variazioni della falda durante l'anno e sul lungo periodo sono stati valutati i dati di piezometria dei pozzi vicini all'area di interesse di cui sono presenti serie storiche significative (fonte dati: Sistema Informativo Falda, Città Metropolitana di Milano). In particolare i pozzi presi in considerazione sono quelli di Tabella 4.1.

Codice pozzo SIA	Comune	Coordinata X	Coordinata Y	Distanza dal punto di interesse (km)
0151340001	Marcallo C.C.	1490207	5037106	2 verso NE
0151340004	Marcallo C.C.	1490298	5037079	2 verso NE
0151300013	Magenta	1489225	5034561	1,3 verso S

**Tab. 4.1** - Elenco dei pozzi usati per la determinazione del livello di falda nella zona di interesse

Analizzando la serie storica dei dati di falda del pozzo 0151340001, che va dal 1980 al 2006 (ultimi dati disponibili online) si osserva una marcata variazione nell'andamento del livello di falda. A partire dagli anni '80 fino agli inizi degli anni '90 si ha un progressivo aumento della profondità della falda; in seguito, fino al 2006 si ha un'inversione di tendenza con un leggero innalzamento del livello. Nel periodo 2002-2006, tuttavia, i dati di piezometria non sono rilevati con cadenza mensile; non è escluso quindi che i valori reali possano essere leggermente maggiori. Nel periodo 1990-2006, successivo al periodo di abbassamento degli anni '80 la falda registra valori minimi di profondità (circa 5 m da p.c.) nei mesi di agosto e settembre e massimi di profondità (circa 10 m da p.c.) nei mesi di aprile e maggio mantenendo sostanzialmente invariato l'andamento stagionale degli anni precedenti.

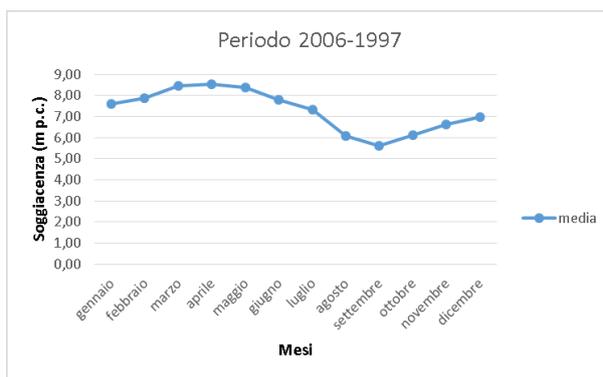
Nell'arco dell'anno, considerando il periodo 1980-2001, la falda oscilla mediamente di 4,5 m; per il calcolo dell'oscillazione è stato escluso l'intervallo 2002-2006 e gli anni 1994 e 1998 in quanto in questi periodi non erano presenti i dati relativi ai mesi di massimo o di minimo livello della falda. Confrontando i dati relativi ai mesi di giugno e settembre, per i quali esistono i dati fino al 2006, sembra esserci, nei primi anni 2000, una riduzione dell'ampiezza dell'oscillazione rispetto agli anni precedenti.



**Fig. 4.4** - Soggiacenza del pozzo 0151340001 nel periodo 1980-2006. Si osserva l'abbassamento del livello di falda nel periodo 1980-1990 e la risalita successiva. Si noti anche la frammentazione dei dati a partire dall'anno 2002.

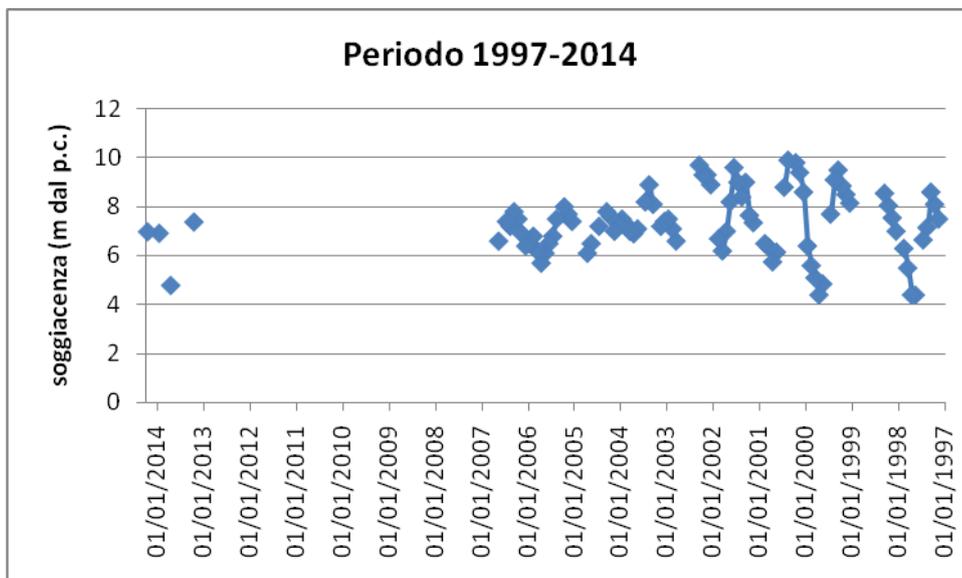


**Fig. 4.5** – Soggiacenza media mensile della falda nel periodo 2006-1990 (pozzo 0151340001)



**Fig. 4.6** – Soggiacenza media mensile della falda nel periodo 2006-1990 (pozzo 0151340004)

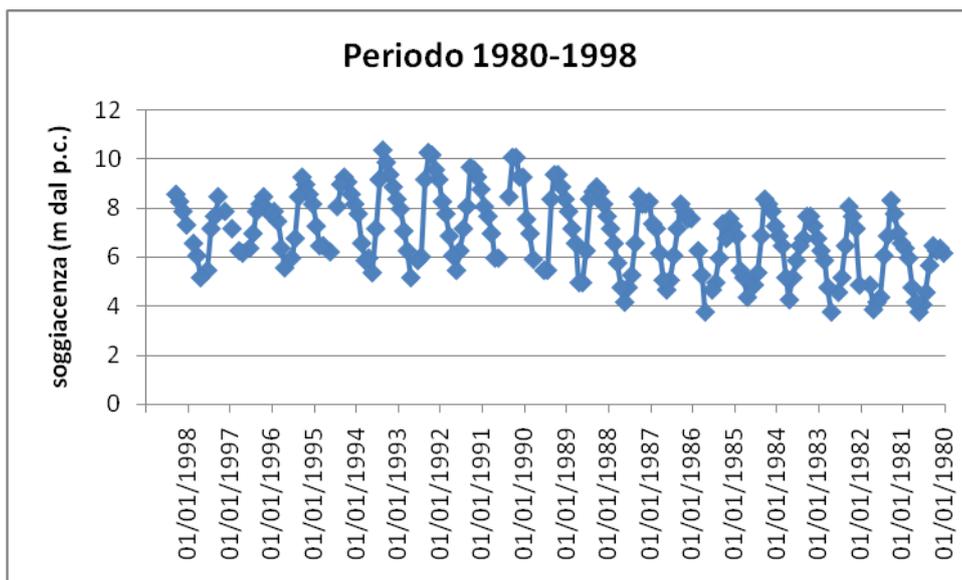
La serie storica disponibile per l'altro pozzo comunale (codice SIF 0151340004), sebbene più frammentaria, copre il periodo 2006-1997 e mostra alcuni dati negli anni 2013 e 2014, confermando le medesime caratteristiche; la falda risulta infatti più alta nei mesi da agosto ad ottobre e più profonda nei mesi di marzo, aprile e maggio. L'oscillazione della falda si attesta mediamente a 3 metri e anche in questo caso sembra esserci una riduzione dell'ampiezza delle oscillazioni a partire dai primi anni 2000.



**Fig. 4.7** - Soggiacenza del pozzo pozzo 0151340004 nel periodo 1997-2014. Si osserva la tendenza alla riduzione dell'oscillazione annuale a partire dai primi anni 2000.

Per completezza è stata anche analizzata la serie storica disponibile di un pozzo in Comune di Magenta (codice SIF 0151300013), ubicato poco più di un kilometro a Sud dell'area di interesse. La serie storica abbraccia un periodo di tempo che va dal 1998 al 1980.

Come nel pozzo 0151340001 si nota un progressivo abbassamento del livello di falda dagli anni '80 all'inizio degli anni '90 cui segue un progressivo innalzamento che non raggiunge i livelli precedenti. Anche in questo caso si registra una bassa soggiacenza nei mesi estivi/tardo estivi e alta soggiacenza nei mesi primaverili. Per il calcolo dell'oscillazione annuale è stato escluso il 1998 in quanto in quest'anno non sono stati registrati i dati relativi ai mesi con il minimo livello di soggiacenza. La media dell'oscillazione annuale nel periodo 1980-1997 è di circa 3,8 m; a partire dal 1994 si assiste ad una lieve riduzione dell'oscillazione.



**Fig. 4.8** - Soggiacenza del pozzo 0151300013 nel periodo 1980-1998. Si osserva l'abbassamento del livello di falda nel periodo 1980-1990 e la risalita successiva.

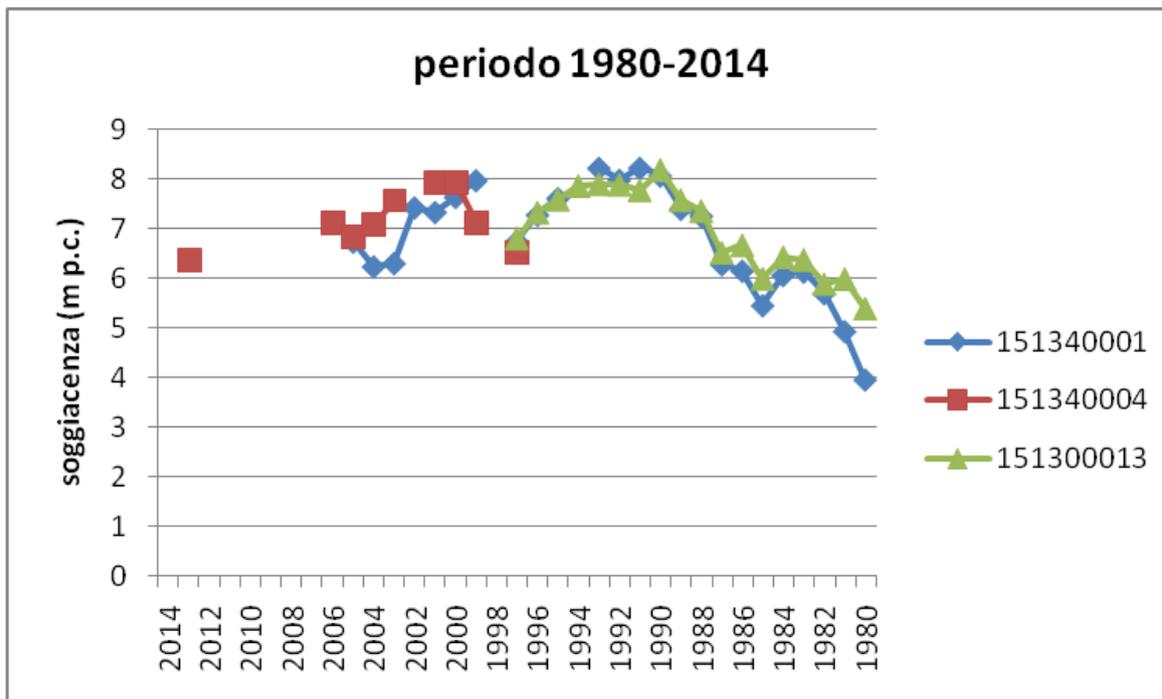


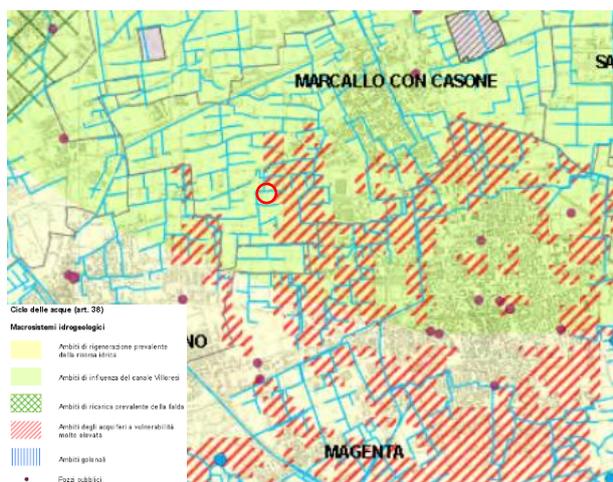
Fig. 4.9 – Confronto delle serie storiche dei pozzi analizzati.

Dal confronto delle serie storiche dei pozzi indicati (cfr. fig. 4.9) è possibile affermare che a partire dal 1980 la falda si è abbassata di oltre 4 m nel Comune di Marcallo con Casone fino all'inizio degli anni '90; tale situazione è riscontrabile anche nel limitrofo comune di Magenta sebbene con un abbassamento inferiore. A partire da quegli anni la falda è risalita non raggiungendo però (almeno fino al 2014) i livelli degli anni precedenti.

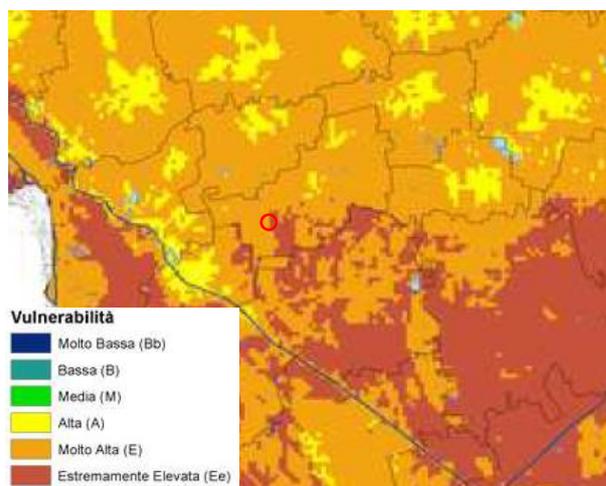
Allo stato attuale delle conoscenze non è possibile prevedere se la falda tornerà, nei prossimi anni ai livelli dei primi anni '80.

#### 4.7. Vulnerabilità intrinseca dell'acquifero

Nel P.T.C.P. vengono individuate aree di particolare fragilità (Ambiti degli acquiferi a vulnerabilità molto elevata) rispetto alla diffusione di sostanze inquinanti rilevate dalle analisi condotte dalla Provincia di Milano (tratto da: *Nuova carta della vulnerabilità della falda ai nitrati come strumento per pianificazione delle risorse idriche e gestione delle emergenze*) sullo stato di inquinamento delle acque sotterranee. Per vulnerabilità degli acquiferi si intende la suscettività delle acque sotterranee contenute negli strati permeabili del sottosuolo (gli acquiferi) a subire una variazione negativa della loro qualità naturale a causa dell'inquinamento prodotto da attività antropiche. Il grado di vulnerabilità di un acquifero dipende da molti fattori ambientali, tra cui la permeabilità, lo spessore e la litologia, la natura dei suoli che lo sovrastano, la profondità della falda che esso contiene.



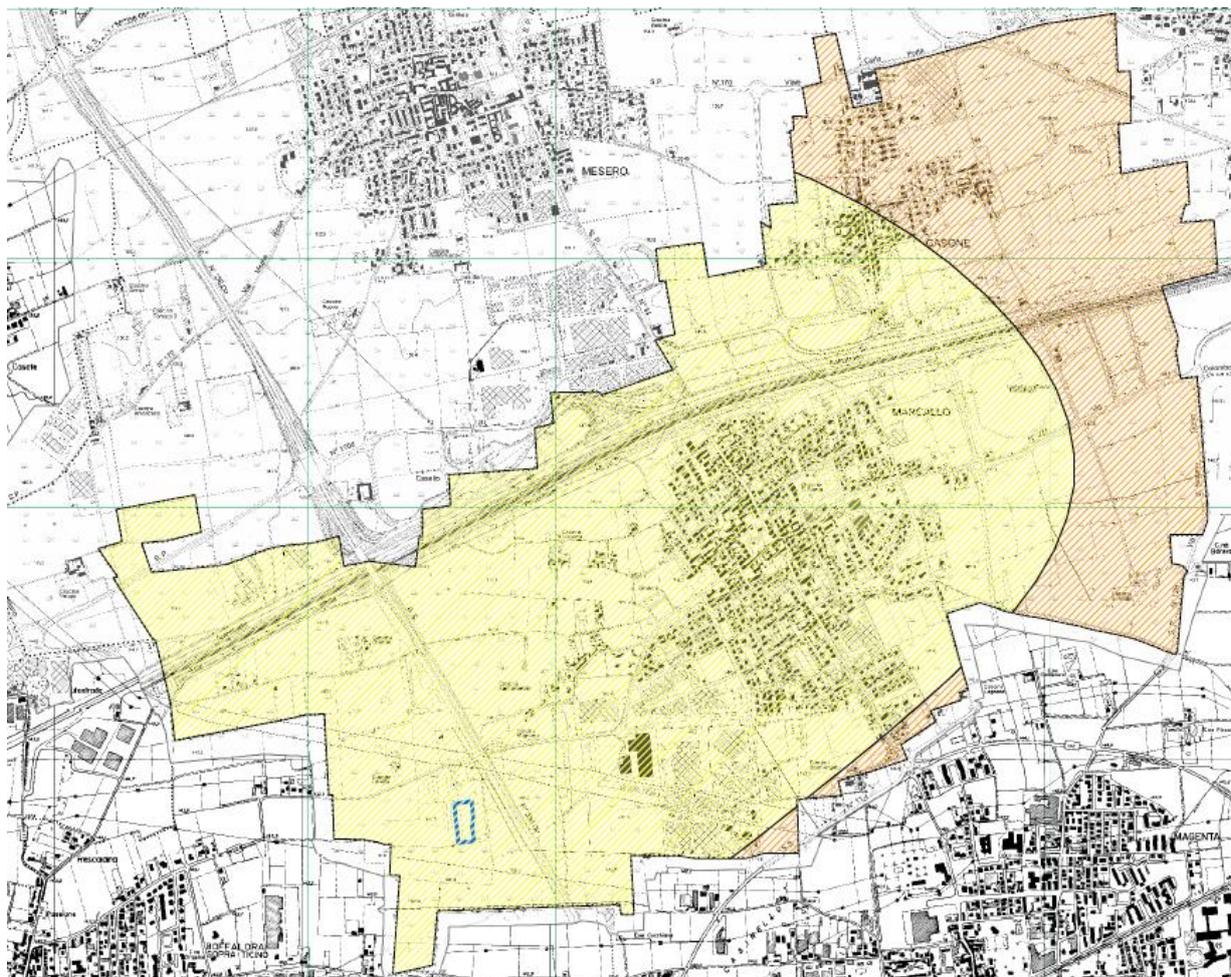
**Fig. 4.10a** - Stralcio Tavola 7 Difesa del Suolo (P.T.C.P. vigente, dicembre 2013). In rosso l'area di intervento.



**Fig. 4.10b** - Stralcio Carta della Vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento (Provincia di Milano). In rosso l'area di intervento.

Il territorio di Marcallo con Casone è in parte interessato da vulnerabilità **molto elevata** degli acquiferi, (cfr. fig. 4.10a, barrato rosso) o **estremamente elevata** (cfr. fig. 4.10b); l'area di intervento, in particolare, risulta al di fuori di tale perimetrazione, presentando comunque una vulnerabilità **molto alta (E)** (cfr. fig. 4.10b, colore arancione).

Anche nell'ambito del Programma di Tutela e Uso delle Acque (P.T.U.A.) della Regione Lombardia è stato affrontato il tema della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero. Dalla consultazione dello strato informativo, scaricabile sul Geoportale regionale, è possibile notare una diversa perimetrazione della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero rispetto a quanto riportato nel vigente P.T.C.P.



*Fig. 4.11 – Carta della Vulnerabilità intrinseca dell’acquifero (P.T.U.A. Regione Lombardia; strato informativo, su taglio comunale, scaricabile da GeoPortale regionale). In arancione: vulnerabilità elevata; in giallo: vulnerabilità alta. In blu l’area di intervento.*

La parte orientale del territorio comunale presenta un grado di vulnerabilità intrinseca **elevato (E)** (in arancione), mentre la restante parte del territorio presenta un grado di vulnerabilità intrinseca **alto (A)** (in giallo). L’area di intervento, secondo la perimetrazione del P.T.U.A., si inserisce in un ambito a vulnerabilità intrinseca alto.

Nel vigente Studio Geologico, Idrogeologico e Sismico di supporto al P.G.T. comunale è stato approfondito, come indicato all’art. 38 comma 3 lettera c delle NdA del P.T.C.P., il tema della vulnerabilità intrinseca dell’acquifero. L’analisi elaborata ha tenuto in considerazione i caratteri geologici e idrogeologici locali, tra cui: le caratteristiche litologiche e di permeabilità del non saturo, la soggiacenza della falda, la permeabilità dell’acquifero e la modalità di circolazione delle acque sotterranee in falda. Considerando quindi tali fattori è risultato che tutto il territorio di Marcallo con Casone presenta un grado di vulnerabilità intrinseca **da medio ad elevato**.

I vari strumenti di pianificazione vigenti propongono pertanto una diversa perimetrazione/classificazione per l’ambito di vulnerabilità intrinseca dell’acquifero. È comunque chiaro

che il sito in oggetto fa parte di un territorio che presenta alto/elevato grado di vulnerabilità della falda. Nel capitolo 5 verrà approfondito il discorso “vulnerabilità della falda” in considerazione del modello geologico sito specifico.

## 4.8. Aspetti geologico tecnici

Da un punto di vista geologico tecnico, da piano campagna fino a circa 10 metri di profondità, il territorio di Marcallo con Casone risulta sostanzialmente omogeneo. In senso verticale è suddiviso, per quanto deducibile dallo Studio Geologico, Idrogeologico e Sismico di supporto al P.G.T. vigente, in tre unità:

**UNITA' 1:** in prevalenza costituita da sabbia limosa con ghiaia da piccola a media, localmente passante a limo sabbioso, con grado di addensamento da sciolto a poco addensato, spessore 1,2-2,5 metri. Presenta un peso di volume pari a 1,62-1,64 t/m<sup>3</sup>, un angolo di attrito efficace di 30°-31° e una densità relativa del 33-44%.

**UNITA' 2:** in prevalenza costituita da ghiaia da media a grossolana con sabbia in matrice limosa, sabbia ghiaiosa in matrice limosa, localmente con ciottoli, con grado di addensamento da mediamente addensato ad addensato; spessore medio 3-6 metri. Presenta un peso di volume pari a 1,85-1,89 t/m<sup>3</sup>, un angolo di attrito efficace di 32°-33° e una densità relativa del 41-53%.

**UNITA' 3:** in prevalenza costituita da ghiaia sabbiosa con scarsa matrice limosa, sabbia ghiaiosa pulita, con grado di addensamento da mediamente a molto addensato; spessore 4-6 metri. Presenta un peso di volume pari a 1,96-2,1 t/m<sup>3</sup>, un angolo di attrito efficace di 34°-37° e una densità relativa del 53-64%.

## 5. Modellazione geologica

In questo capitolo viene definito il modello geologico del sito di interesse, elaborato mediante approfondimenti di indagine ed elaborazione di dati pregressi.

Stante il quadro geologico generale, descritto nel capitolo precedente, gli approfondimenti riguardano l'ambito stratigrafico, geotecnico, idrogeologico e sismico.

Sono state pertanto eseguite delle indagini geognostiche e geotecniche, consistite in due sondaggi a carotaggio continuo, uno spinto fino alla profondità di 15 metri e uno fino alla profondità di 30 metri e quattro prove penetrometriche dinamiche. Il sondaggio a 15 metri è stato poi attrezzato a piezometro per il periodico monitoraggio dei livelli di falda.

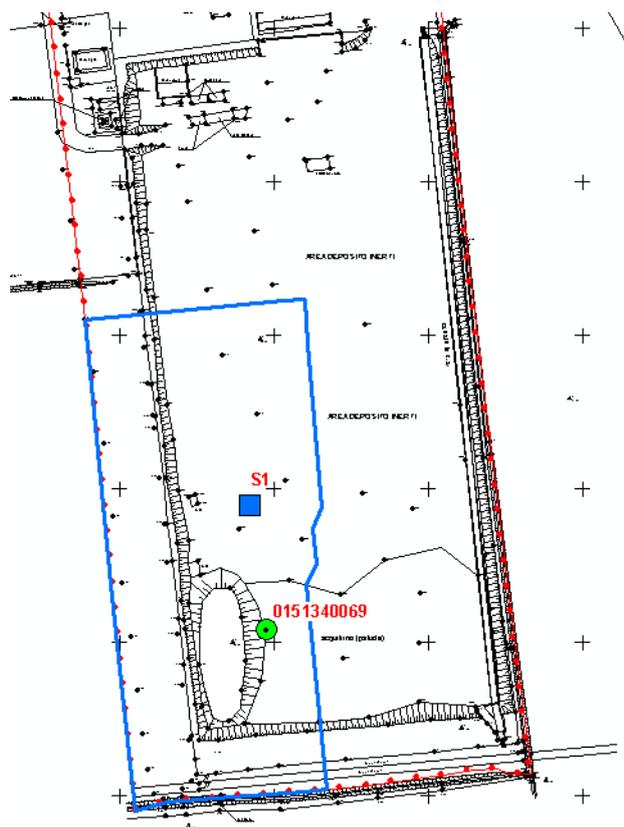
È stata anche eseguita un'indagine sismica, con prova Down-Hole e HVSR, i risultati della quale però verranno ampiamente descritti nella specifica relazione di modellazione sismica del sito.

### 5.1. Approfondimento geologico-idrogeologico

#### 5.1.1. Sondaggi geognostici

Nel mese di luglio 2016 sono stati realizzati, dalla ditta A4e di Varese, due sondaggi a carotaggio continuo (cfr. fig. 5.1); uno è stato spinto fino alla profondità di 15 metri (successivamente attrezzato a piezometro per il monitoraggio periodico dei livelli di falda, a cui è stato attribuito, da Città Metropolitana di Milano, il codice identificativo SIF **0151340069**) e l'altro è stato spinto fino alla profondità di 30 metri (successivamente attrezzato con colonna cieca in PVC per l'esecuzione di prova sismica in foro Down-Hole, denominato **S1**). Dai sondaggi è stato quindi possibile il riconoscimento in dettaglio della stratigrafia dei terreni in sito.

Di seguito si riportano le stratigrafie di dettaglio, la cui scheda identificativa completa è riportata in allegato 1:



**Fig. 5.1** - Ubicazione dei sondaggi eseguiti.

Base topografica: Rilievo Celerimetrico realizzato da Terramap, giugno 2016. In blu l'area di intervento.

SONDAGGIO S1 (prof. 30 m)	
PROFONDITA' (m)	STRATIGRAFIA
0,0-1,5	Terreno di riporto e rimaneggiato.
1,5-2,2	Sabbie medio grossolane ghiaiose.
2,2-2,8	Ghiaie sabbiose.
2,8-3,0	Sabbie medio grossolane ghiaiose.
3,0-6,5	Ghiaie eterometriche con sabbie grossolane, debolmente limose.
6,5-7,8	Sabbie grossolane con ghiaie.
7,8-8,2	Ghiaie eterometriche con sabbie grossolane.
8,2-8,6	Sabbie grossolane con ghiaie. Limite netto con:
8,6-9,5	Limi anche argillosi di colore grigio scuro.
9,5-11,7	Ghiaie e sabbie con limi, di colore grigio scuro. Ciottoli anche di 10 cm.
11,7-12,0	Limi sabbiosi e/o sabbie limose compatte con clasti da millimetrici a 2/3 cm. Alcuni clasti si presentano debolmente alterati (arenizzati). Colore d'insieme marrone rossiccio. Limite netto.
12,0-15,2	Sabbie grossolane e ghiaie, di colore oca, debolmente limose. Clasti da 1/2 cm a massimo 10 cm.
15,2-26,0	Sabbie medie debolmente limose, con sparsi clasti centimetrici.
26,0-28,0	Sabbie medie con abbondanti clasti, anche debolmente ghiaiose.
28,0-30,0	Sabbie medie debolmente limose con sparsi clasti.

SONDAGGIO 0151340069 (prof. 15 m)	
PROFONDITA' (m)	STRATIGRAFIA
0,0-2,9	Terreno di riporto e rimaneggiato.
2,9-7,0	Sabbie grossolane e ghiaie eterogeniche. Clasti da 1/2 cm a 10 cm.
7,0-7,2	Sabbie limose con ghiaie. Colore marrone ocra.
7,2-8,0	Sabbie grossolane.
8,0-9,0	Limi anche argillosi di colore grigio scuro.
9,0-10,5	Sabbie limose con ghiaie di colore grigio scuro.
10,5-13,5	Sabbie limose con ciottoli.
13,5-15,0	Sabbie medie limose.

Riassumendo si può affermare che la successione stratigrafica del sito di interesse è costituita da una sequenza di sabbie ghiaiose e ghiaie sabbiose fino alla profondità di 8,0/8,6 metri. La sequenza è interrotta da un orizzonte (evidenziato nelle tabelle sovrastanti) di circa un metro di spessore costituito da limi di colore scuro (segno di una abbondante presenza organica). Osservando le stratigrafie disponibili dei pozzi, sia pubblici sia privati, in territorio comunale (codice SIF 0151340001 – 0151340002 – 0151340003 – 0151340004 – 0151340005 – 0151340006 - 0151340040), localizzati a circa 2 km a Nord Est dell'area in studio, si nota sempre la presenza di questo orizzonte scuro, anche se ad una maggiore profondità, tra circa 11 e 13 metri.

Al di sotto di questo orizzonte la successione riprende con litologie a prevalenza sabbiosa con ghiaie subordinate.

È interessante notare che in S1 è stato riconosciuto un orizzonte di alterazione (da 11,7 m a 12,0 m) attribuibile a un paleosuolo sepolto, in corrispondenza del quale è possibile far coincidere un limite tra due eventi deposizionali di età diversa.

### 5.1.2. Monitoraggio piezometrico

In considerazione della generale bassa soggiacenza della falda che caratterizza il territorio e in ottemperanza delle disposizioni previste nelle NdA dello Studio Geologico vigente, relative alla classe di fattibilità geologica in cui è ricompreso il sito, si è deciso di attrezzare a piezometro uno dei due sondaggi.

Questo per permettere il monitoraggio della profondità della superficie piezometrica sito specifica, valutando quindi la possibile interazione con le fondazioni e indirizzare le scelte progettuali.

Il piezometro è stato realizzato allestendo il sondaggio 0151340069 con tubo infiltrometrico (3 metri cieco e 12 metri fenestrati) in PVC del diametro di 3", comprensivo di dreno in ghiaietto siliceo e cementazione superficiale con boiaccia cementizia. Il tubo piezometrico è stato poi protetto da chiusino in metallo rosso lucchettabile.

La falda, misurata a conclusione dei lavori (22 luglio 2016) e dopo adeguato spurgo fino a completa chiarificazione delle acque, si attesta a -2,55 m da piano di calpestio. Si fa presente che il piano di calpestio si riferisce al piano dello scavo attualmente in essere ( $\pm 139,5$  m s.l.m.), che si presenta ribassato di circa 2 metri dal piano campagna naturale ( $\pm 141,5$  m s.l.m.) delle aree circostanti.

Nei mesi successivi alla realizzazione del piezometro sono state prese altre misure di profondità della falda, i cui dati sono elencati nella tabella seguente.

Data misura	Soggiacenza m da piano di calpestio	Soggiacenza m da piano campagna	Piezometria m s.l.m.
17/08/2016	1,70	±3,70	±137,80
07/09/2016	1,83	±3,83	±137,67
27/09/2016	2,50	±4,50	±137,00

**Tab. 5.1** – Misure della soggiacenza della falda.

### 5.1.3. Vulnerabilità intrinseca locale dell'acquifero

La stima della vulnerabilità intrinseca, nell'area di interesse, dell'acquifero superficiale è stata effettuata utilizzando il metodo SINTACS (Civita, 2005). L'evoluzione del metodo SINTACS è passata negli anni attraverso cinque release; nella presente analisi è stata adottata la release R5.

Il metodo considera sette parametri di input per determinare la vulnerabilità, dai quali deriva l'acronimo SINTACS:

- Soggiacenza;
- Infiltrazione efficace;
- Non-saturo;
- Tipologia della copertura;
- Acquifero (caratteristiche idrogeologiche del);
- Conducibilità idraulica dell'acquifero;
- Superficie topografica (acclività della).

I singoli parametri di input, convertiti in punteggi attraverso alcuni abachi previsti dal metodo, sono poi "esaltati" con l'utilizzo di varie stringhe (linee di pesi moltiplicatori) che permettono di modellare la metodologia sulla situazione effettiva del territorio. L'indice di vulnerabilità intrinseca (I) è quindi così calcolato:

$$I = W_S S + W_I I + W_N N + W_T T + W_A A + W_C C + W_S S$$

Dove:

W è il peso relativo della stringa prescelta;

S, I, N, T, A, C, S sono il punteggio di ciascuno dei sette parametri considerati dal metodo.

#### Risultati

L'analisi si è basata su dati di input ricavati sia dal modello geologico di sito sia su dati bibliografici che meglio si adattano alla situazione locale. Per l'ambito in oggetto è stata poi utilizzata la stringa di pesi moltiplicatori (tabella seguente) relativa alle aree soggette ad impatto rilevante. Questa linea di pesi serve a modellare situazioni territoriali che favoriscono impatti importanti da fonti diffuse di inquinamento potenziale. Si tratta di territori, con insaturo costituito in prevalenza da mezzi a permeabilità matriciale, morfologicamente adatti ad antropizzazione estensiva, con colture che prevedono abbondanti trattamenti con fitofarmaci, concimi chimici, applicazioni di fert-irrigazione, spargimento di liquami; aree a discarica incontrollata, lagoni, vasche di dispersione, oleodotti, collettori fognari, ecc.; aree industriali attive e dismesse, aree urbanizzate e assimilabili.

Parametro	I. normale	Impatto rilevante	Drenaggio	Carsismo	Fessurato
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4

**Tab. 5.2** – Stringa di pesi moltiplicatori previsti per SINTACS R5.

Nella tabella seguente sono riportati i punteggi assegnati ai diversi parametri, i pesi moltiplicatori scelti e i valori totali. Nella parte bassa della tabella sono inoltre indicati il valore di vulnerabilità totale ed il grado di vulnerabilità stimato:

Parametro	Valore	Punt.	Peso	Tot.
Soggiacenza	1,7 m	10	5	50
Infiltrazione	395 mm/a	6	5	30
Non-saturo	Alluvioni medio fini	4	4	16
Tipologia copertura	Sottile o assente	10	5	50
Acquifero	Alluvioni medio fini	7	3	21
Conducibilità idraulica	10 <sup>-3</sup> m/s	9	2	18
Superficie topografica	0,2 %	10	2	20
	<b>Vulnerabilità</b>			<b>205</b>
	<b>GRADO</b>			<b>E (Elevato)</b>

**Tab. 5.3** – Stima della vulnerabilità intrinseca locale dell'acquifero.

In base all'analisi eseguita l'area di intervento presenta un grado di vulnerabilità dell'acquifero superficiale elevato. Il fatto che l'area si trovi ribassata di circa 2 m rispetto al piano campagna circostante influisce notevolmente sulla soggiacenza della falda (prossima al piano di scavo) e sullo spessore delle coperture soprafalda riducendo l'effetto autodepurativo.

Il grado di vulnerabilità è inoltre influenzato dalla morfologia pianeggiante, che favorisce il ristagno e l'infiltrazione di eventuali inquinanti dispersi nel terreno.

In allegato 2 viene riportata una carta di vulnerabilità intrinseca dell'acquifero, elaborata interpolando quanto riportato (cfr. par. 4.7) negli strumenti di pianificazione (regionale, provinciale e comunale) e quanto risultato dall'analisi sulla vulnerabilità locale della falda.

## 5.2. Approfondimento geotecnico

La valutazione delle caratteristiche geotecniche del sito è stata fatta, partendo dal modello geologico e da dati pregressi elaborati nell'ambito della pianificazione comunale, mediante l'esecuzione di 4 prove penetrometriche dinamiche. Le indagini sono state posizionate (cfr. figura 5.2) in modo da avere una copertura rappresentativa dell'area su cui sarà realizzata l'opera in progetto, anche tenuto conto della logistica del sito che al momento dell'indagine si presentava per buona parte inaccessibile in quanto occupata da accumuli di terreno e macchinari in disuso.

Lo scopo dell'esecuzione delle prove penetrometriche è stato quello di caratterizzare il sottosuolo dal punto di vista litotecnico, definendo i parametri geotecnici medi e caratteristici dei terreni presenti in sito.

Le prove penetrometriche dinamiche sono state eseguite, dalla ditta A4e di Varese, utilizzando un Penetrometro Dinamico superpesante PAGANI DPSH TG 63-100, con peso del maglio di 63,5 kg e altezza di caduta pari a 75 cm, con punta conica di area pari a 20,43 cm<sup>2</sup>, misurando il numero di colpi (N30) necessari ad infiggere nel terreno, per tratti consecutivi di 30 cm, una punta conica collegata alla superficie da una batteria di aste senza soluzione di continuità. La profondità massima raggiunta è stata di 10,2 metri.

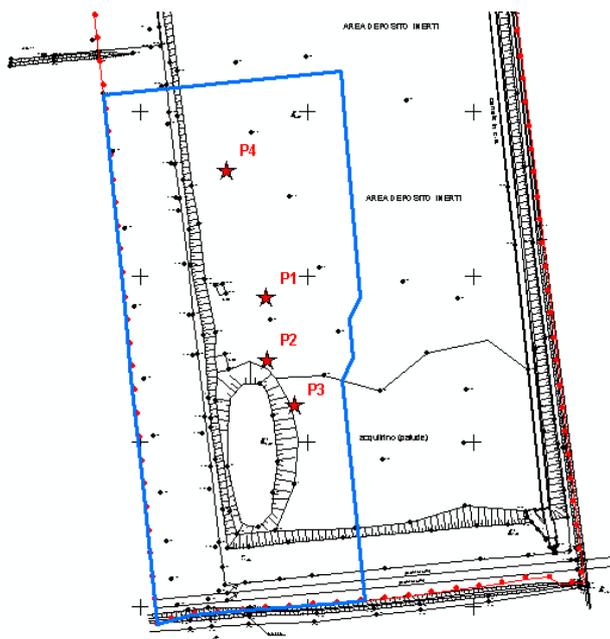


Fig. 5.2 - Ubicazione delle prove penetrometriche DPSH

Base topografica: Rilievo Celerimetrico realizzato da Terramap, giugno 2016. In blu l'area di intervento.

### 5.2.1. Risultati delle prove in sito

I risultati delle prove in sito sono sintetizzati nelle tabelle successive e nei profili geotecnici di cui al paragrafo successivo.

**PROVA: P1**

Strumento utilizzato... DPSH TG 63-100 PAGANI  
 Prova eseguita in data 15/07/2016  
 Profondità prova 10,2 mt  
 Falda rilevata si

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Res. dinamica (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )
0,30	24	0,753	126,54	168,12	6,33	8,41
0,60	25	0,747	120,06	160,72	6,00	8,04
0,90	14	0,792	71,24	90,01	3,56	4,50
1,20	8	0,836	43,01	51,43	2,15	2,57

1,50	4	0,831	19,75	23,76	0,99	1,19
1,80	2	0,826	9,82	11,88	0,49	0,59
2,10	2	0,822	9,76	11,88	0,49	0,59
2,40	3	0,817	13,53	16,56	0,68	0,83
2,70	3	0,813	13,46	16,56	0,67	0,83
3,00	3	0,809	13,39	16,56	0,67	0,83
3,30	7	0,805	29,05	36,10	1,45	1,80
3,60	6	0,801	24,78	30,94	1,24	1,55
3,90	3	0,797	12,33	15,47	0,62	0,77
4,20	2	0,794	7,68	9,68	0,38	0,48
4,50	2	0,790	7,65	9,68	0,38	0,48
4,80	3	0,787	11,42	14,51	0,57	0,73
5,10	3	0,784	10,72	13,67	0,54	0,68
5,40	5	0,781	17,79	22,78	0,89	1,14
5,70	9	0,778	31,91	41,00	1,60	2,05
6,00	12	0,775	40,06	51,66	2,00	2,58
6,30	13	0,723	40,46	55,97	2,02	2,80
6,60	16	0,720	49,62	68,88	2,48	3,44
6,90	9	0,768	28,20	36,73	1,41	1,84
7,20	13	0,716	37,96	53,05	1,90	2,65
7,50	14	0,713	40,76	57,13	2,04	2,86
7,80	12	0,761	35,43	46,54	1,77	2,33
8,10	15	0,709	41,26	58,17	2,06	2,91
8,40	10	0,757	29,37	38,78	1,47	1,94
8,70	6	0,755	16,75	22,17	0,84	1,11
9,00	5	0,753	13,92	18,47	0,70	0,92
9,30	5	0,752	13,89	18,47	0,69	0,92
9,60	7	0,750	18,52	24,70	0,93	1,23
9,90	8	0,748	21,12	28,23	1,06	1,41
10,20	10	0,747	26,34	35,28	1,32	1,76

**PROVA: P 2**

Strumento utilizzato... DPSH TG 63-100 PAGANI  
 Prova eseguita in data 15/07/2016  
 Profondità prova 9,60 mt  
 Falda rilevata si

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Res. dinamica (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )
0,30	7	0,853	41,81	49,03	2,09	2,45
0,60	6	0,847	32,67	38,57	1,63	1,93
0,90	7	0,842	37,87	45,00	1,89	2,25
1,20	4	0,836	21,51	25,72	1,08	1,29
1,50	4	0,831	19,75	23,76	0,99	1,19
1,80	3	0,826	14,73	17,82	0,74	0,89
2,10	3	0,822	14,64	17,82	0,73	0,89
2,40	3	0,817	13,53	16,56	0,68	0,83
2,70	2	0,813	8,98	11,04	0,45	0,55
3,00	3	0,809	13,39	16,56	0,67	0,83
3,30	2	0,805	8,30	10,31	0,41	0,52
3,60	2	0,801	8,26	10,31	0,41	0,52
3,90	1	0,797	4,11	5,16	0,21	0,26
4,20	1	0,794	3,84	4,84	0,19	0,24
4,50	2	0,790	7,65	9,68	0,38	0,48
4,80	3	0,787	11,42	14,51	0,57	0,73
5,10	2	0,784	7,14	9,11	0,36	0,46
5,40	2	0,781	7,12	9,11	0,36	0,46

5,70	5	0,778	17,73	22,78	0,89	1,14
6,00	8	0,775	26,71	34,44	1,34	1,72
6,30	11	0,773	36,60	47,36	1,83	2,37
6,60	16	0,720	49,62	68,88	2,48	3,44
6,90	20	0,718	58,59	81,61	2,93	4,08
7,20	21	0,666	57,04	85,69	2,85	4,28
7,50	16	0,713	46,58	65,29	2,33	3,26
7,80	33	0,611	78,23	127,98	3,91	6,40
8,10	19	0,709	52,26	73,69	2,61	3,68
8,40	4	0,757	11,75	15,51	0,59	0,78
8,70	5	0,755	13,95	18,47	0,70	0,92
9,00	6	0,753	16,70	22,17	0,84	1,11
9,30	8	0,752	22,22	29,56	1,11	1,48
9,60	25	0,650	57,33	88,21	2,87	4,41

**PROVA: P 3**

Strumento utilizzato...

DPSH TG 63-100 PAGANI

Prova eseguita in data

15/07/2016

Profondità prova

9,30 mt

Falda rilevata

si

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Res. dinamica (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )
0,30	14	0,803	78,72	98,07	3,94	4,90
0,60	13	0,797	66,61	83,58	3,33	4,18
0,90	10	0,842	54,10	64,29	2,71	3,21
1,20	11	0,836	59,14	70,72	2,96	3,54
1,50	10	0,831	49,38	59,41	2,47	2,97
1,80	10	0,826	49,09	59,41	2,45	2,97
2,10	14	0,772	64,18	83,17	3,21	4,16
2,40	13	0,767	55,06	71,77	2,75	3,59
2,70	20	0,763	84,23	110,42	4,21	5,52
3,00	12	0,809	53,58	66,25	2,68	3,31
3,30	16	0,755	62,27	82,51	3,11	4,13
3,60	15	0,751	58,08	77,36	2,90	3,87
3,90	16	0,747	61,65	82,51	3,08	4,13
4,20	17	0,744	61,17	82,25	3,06	4,11
4,50	18	0,740	64,47	87,08	3,22	4,35
4,80	26	0,687	86,43	125,79	4,32	6,29
5,10	17	0,734	56,85	77,45	2,84	3,87
5,40	18	0,731	59,95	82,01	3,00	4,10
5,70	7	0,778	24,82	31,89	1,24	1,59
6,00	12	0,775	40,06	51,66	2,00	2,58
6,30	12	0,773	39,93	51,66	2,00	2,58
6,60	13	0,720	40,32	55,97	2,02	2,80
6,90	12	0,768	37,60	48,97	1,88	2,45
7,20	16	0,716	46,72	65,29	2,34	3,26
7,50	13	0,713	37,85	53,05	1,89	2,65
7,80	12	0,761	35,43	46,54	1,77	2,33
8,10	3	0,759	8,83	11,63	0,44	0,58
8,40	4	0,757	11,75	15,51	0,59	0,78
8,70	6	0,755	16,75	22,17	0,84	1,11
9,00	17	0,703	44,19	62,81	2,21	3,14
9,30	13	0,702	33,71	48,03	1,69	2,40

**PROVA: P 4**

Strumento utilizzato...

DPSH TG 63-100 PAGANI

Prova eseguita in data

15/07/2016

Profondità prova

9,90 mt

Falda rilevata

sì

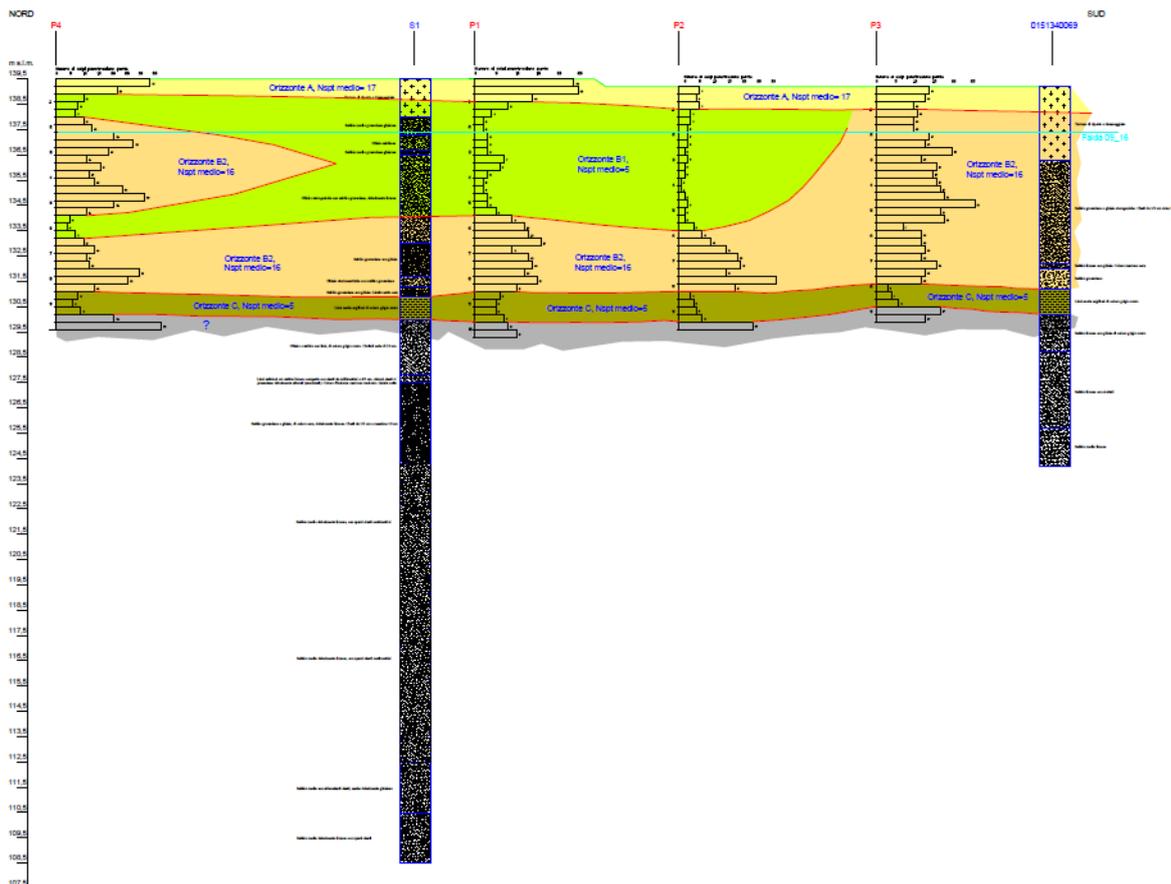
Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Res. dinamica (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm <sup>2</sup> )
0,30	34	0,703	167,36	238,17	8,37	11,91
0,60	22	0,747	105,65	141,44	5,28	7,07
0,90	10	0,842	54,10	64,29	2,71	3,21
1,20	8	0,836	43,01	51,43	2,15	2,57
1,50	7	0,831	34,56	41,58	1,73	2,08
1,80	10	0,826	49,09	59,41	2,45	2,97
2,10	13	0,772	59,59	77,23	2,98	3,86
2,40	21	0,717	83,15	115,94	4,16	5,80
2,70	28	0,713	110,20	154,59	5,51	7,73
3,00	19	0,759	79,59	104,90	3,98	5,25
3,30	11	0,805	45,65	56,73	2,28	2,84
3,60	16	0,751	61,96	82,51	3,10	4,13
3,90	12	0,797	49,33	61,88	2,47	3,09
4,20	14	0,744	50,37	67,73	2,52	3,39
4,50	24	0,690	80,15	116,11	4,01	5,81
4,80	32	0,637	98,63	154,81	4,93	7,74
5,10	21	0,684	65,44	95,68	3,27	4,78
5,40	11	0,781	39,14	50,12	1,96	2,51
5,70	5	0,778	17,73	22,78	0,89	1,14
6,00	4	0,775	13,35	17,22	0,67	0,86
6,30	7	0,773	23,29	30,14	1,16	1,51
6,60	10	0,770	33,17	43,05	1,66	2,15
6,90	14	0,718	41,02	57,13	2,05	2,86
7,20	11	0,766	34,37	44,89	1,72	2,24
7,50	12	0,763	37,38	48,97	1,87	2,45
7,80	30	0,661	76,94	116,35	3,85	5,82
8,10	26	0,659	66,47	100,83	3,32	5,04
8,40	14	0,707	38,40	54,29	1,92	2,71
8,70	8	0,755	22,33	29,56	1,12	1,48
9,00	6	0,753	16,70	22,17	0,84	1,11
9,30	9	0,752	25,00	33,25	1,25	1,66
9,60	21	0,650	48,16	74,09	2,41	3,70
9,90	38	0,598	80,21	134,07	4,01	6,70

### 5.2.2. Caratterizzazione geotecnica

Dall'analisi dei dati ottenuti, confrontandoli con il quadro geologico del sito e di un suo intorno significativo, è stato possibile ricostruire il modello litotecnico del sottosuolo, identificando quattro orizzonti caratterizzati da valori di  $N_{SPT}$  omogenei e estendibili arealmente per tutto il sito in oggetto.

Nella sezione di figura 5.3 sono riportati i grafici di prova, gli orizzonti riconosciuti con indicato il numero medio di colpi  $N_{SPT}$  e la stratigrafia dei due sondaggi eseguiti.

La sezione geotecnica è stata tracciata, analogamente a quelle geologiche, con linea retta sulla quale sono stati proiettati i risultati delle quattro prove penetrometriche.



**Fig. 5.3** - Sezione geotecnica N-S dell'area di intervento.

Dall'analisi dei dati di prova e della sezione geotecnica si può notare come generalmente vi sia un orizzonte superficiale (**orizzonte A**) da poco addensato ad addensato, che, dalla superficie, si estende con spessore da 0,6 a 0,9 metri; questo presenta un numero medio di colpi ( $N_{spt}$ ) pari a 17, con un minimo di 6 colpi in P2 e un massimo di 28 colpi in P4. L'estrema variabilità è dovuta al fatto che a tale livello corrispondono depositi rimaneggiati e di riporto.

Al di sotto del livello superficiale si hanno, a seconda del punto di indagine, due orizzonti con caratteristiche geotecniche differenti; questo sono stati denominati **Orizzonte B1** e **Orizzonte B2**. I due orizzonti si trovano sia affiancati che sovrapposti l'uno all'altro.

L'orizzonte B1, meglio espresso in corrispondenza delle prove P1 e P2, si presenta da poco addensato a sciolto, con numero medio di colpi ( $N_{spt}$ ) pari a 5. Lo spessore massimo è di 4,8 metri in corrispondenza di P2. Lateralmente l'Orizzonte B1 tende a chiudersi verso P3 e a interdigitarsi con l'Orizzonte B2 verso P4, dove raggiunge uno spessore minimo di 0,9 metri.

L'Orizzonte B2, meglio espresso in corrispondenza della prova P3 ma sempre presente comunque in tutte e quattro le verticali di prova, si presenta moderatamente addensato, con numero medio di colpi ( $N_{spt}$ ) pari a 16 con un minimo di 12 in P1 e un massimo di 18 in P2 e P4. Lo spessore dell'orizzonte varia da un massimo di 6,8 metri in P3 a un minimo di 2,1 metri in P4.

Dal confronto con le stratigrafie dei sondaggi è possibile associare a questi due orizzonti una successione di depositi costituiti da sabbie ghiaiose e ghiaie con sabbie, che giustificano una variabilità laterale e verticale nelle caratteristiche geotecniche.

Più in profondità è poi riconoscibile, esteso per tutta l'area, un orizzonte poco addensato che ben corrisponde con il livello limoso scuro osservato nei sondaggi. Questo (**Orizzonte C**) presenta un numero di colpi medio ( $N_{spt}$ ) pari a 5, con un minimo di 4 in P3 e un massimo di 7 in P4. L'orizzonte C ha uno spessore massimo di 1,2 metri in P1 e P2 e minimo di 0,9 metri in P3 e P4.

Al di sotto dell'Orizzonte C le prove si interrompono in corrispondenza di un netto aumento nel numero di colpi  $N_{spt}$  e del grado di consistenza dei depositi, corrispondenti a ghiaie e sabbie come emerso dai sondaggi.

### 5.2.3. Parametri geotecnici medi

Sulla scorta dei risultati ottenuti dalle prove penetrometriche dinamiche eseguite in sito sono stati determinati, sulla base delle più note correlazioni in letteratura specifica e grazie all'uso del software Dynamic Probing della GeoStru Software (2011), i parametri geotecnici medi degli orizzonti riconosciuti. I parametri geotecnici medi sono illustrati di seguito.

	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ sat (KN/m <sup>3</sup> )	DR(%)	$\phi$ (°)	Modulo di Young (KN/m <sup>2</sup> )	Modulo edometrico (KN/m <sup>2</sup> )
Orizzonte A	18,39	21,07	84,92	32,05	23538,32	9615,16
Orizzonte B1	15,02	18,52	43,27	28,49	11548,31	5421,79
Orizzonte B2	18,19	19,7	66,71	31,34	17176,51	9285,96
Orizzonte C	15,42	18,53	37,81	28,75	10401,91	145060,01

**Tab. 5.4 - Parametri geotecnici medi dei principali orizzonti individuati**

- L'angolo d'attrito interno ( $\phi$ ) è stato ricavato dai valori di resistenza penetrometrica applicando la correlazione proposta da Japanese National Railway;
- I valori del peso di volume del terreno ( $\gamma$ ) sono scelti nell'ambito degli usuali intervalli di variazione, compatibili con la natura granulometrica ed il grado di addensamento dei terreni indagati;
- Il valore dell'Indice di densità (ID%) è stato ricavato in base alla correlazione con dati delle prove S.P.T. e del carico litostatico, applicando la correlazione proposta da Meyerhof (1957)
- Il valore del Modulo di Young è stato calcolato in base alla relazione di Schultze-Menzenbach.
- Il valore del Modulo Edometrico è stato calcolato in base alla relazione di Menzenbach e Malcev.

### 5.2.4. Parametri geotecnici caratteristici

Il D.M. 14.01.2008 adotta dall'Eurocodice 7 (Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules) il concetto dei valori caratteristici dei parametri geotecnici. Il valore caratteristico di un parametro geotecnico è inteso come una stima cautelativa (a favore della sicurezza) del valore che influenza l'insorgere dello stato limite.

La metodologia, delineata dall'EC7, per definire il valore caratteristico è quella di utilizzare metodi statistici, per cui la derivazione del valore caratteristico deve essere tale che la probabilità calcolata di un valore peggiore (più sfavorevole) che governa l'insorgere dello stato limite in considerazione non sia maggiore del 5%.

I valori caratteristici sono pertanto determinabili con la seguente relazione:

$$X_k = X_m (1 + Z \cdot V_X)$$

dove:

$X_k$  valore caratteristico desiderato

$X_m$  valore medio del campione

Z parametro dipendente dalla legge di distribuzione della probabilità e dalla probabilità di non superamento adottata

VX coefficiente di variazione (COV) del valore considerato, definito come il rapporto tra lo scarto quadratico medio e la media dei valori

L'Eurocodice 7 fissa, per una distribuzione di tipo gaussiano, un valore di Z uguale a -1,645 (probabilità di non superamento del 5%), da cui:

	$\gamma_k$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_k \text{ sat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	DRk(%)	$\phi_k$ (°)	Modulo di Young k (KN/m <sup>2</sup> )	Modulo edometrico k (KN/m <sup>2</sup> )
Orizzonte A	17,14	19,58	75,90	29,96	13055,38	7126,29
Orizzonte B1	14,01	18,34	30,56	27,74	11548,31	4525,89
Orizzonte B2	16,49	17,12	51,44	29,37	9943,05	6566,69
Orizzonte C	14,47	18,37	30,57	28,05	10401,91	5470,49

K: da intendersi quale parametro caratteristico

**Tab. 5.5 - Parametri geotecnici caratteristici dei principali orizzonti individuati**

### 5.3. Approfondimento sismico

Il comune di Marcallo con Casone, ricadente in **zona sismica 4** (d.g.r. 11 luglio 2014 n. X/2129), è dotato di uno studio sulla pericolosità sismica locale di I e II livello (ai sensi dell'Allegato 5 alla d.g.r. 30 novembre 2011 n. IX/2616), volto alla valutazione dell'amplificazione sismica locale. Da tale studio, a cui si rimanda per i dettagli di analisi, è emerso che la normativa (sismica) nazionale non risulta pienamente sufficiente a salvaguardare gli effetti di amplificazione sismica locale.

In osservanza alle norme tecniche e prescrizioni per le aree a pericolosità sismica locale (PSL), parte integrante delle vigenti Norme geologiche di Piano, essendo l'opera in progetto inserita in ambito **Z4a** (zona di fondo valle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi, con effetti di amplificazioni litologiche e geometriche) e compresa nell'elenco tipologico degli edifici e opere rilevanti di cui al D.D.U.O. 21 novembre 2003 n. 19904, la progettazione dovrà essere condotta definendo le azioni sismiche di progetto a mezzo di analisi di approfondimento di III livello (ai sensi dell'Allegato 5 alla d.g.r. 30 novembre 2011 n. IX/2616). Si rammenta che l'intervento edificatorio prevede la realizzazione di un impianto di recupero di rifiuti speciali non pericolosi (FORSU) per la produzione di biometano.

L'analisi di III livello prevede un approccio di tipo quantitativo e costituisce lo studio di maggior dettaglio; la valutazione della pericolosità sismica locale è stata effettuata ricorrendo alla metodologia numerica mediante modellazione monodimensionale 1D, con l'utilizzo di opportuni codici di calcolo, che ha permesso di definire una realistica risposta sismica per l'ambito geologico-stratigrafico del sito in oggetto, non affetto da problematiche bidimensionali (sia sepolte sia topografiche). I concetti fondamentali su cui si basano i codici di calcolo numerico riguardano la teoria della propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo e la teoria del comportamento non lineare e dissipativo dei terreni in condizioni dinamiche.

Questo approccio è anche ritenuto la via ufficiale delle NTC2008 (Cap. 3.2.2) e consente il confronto con la relativa categoria di sottosuolo ottenuta in via semplificativa.

**Si rimanda all'appendice 1 per i dettagli di analisi e i risultati relativi all'approfondimento inerente agli aspetti sismici.**

### 5.3.1. Verifica a liquefazione

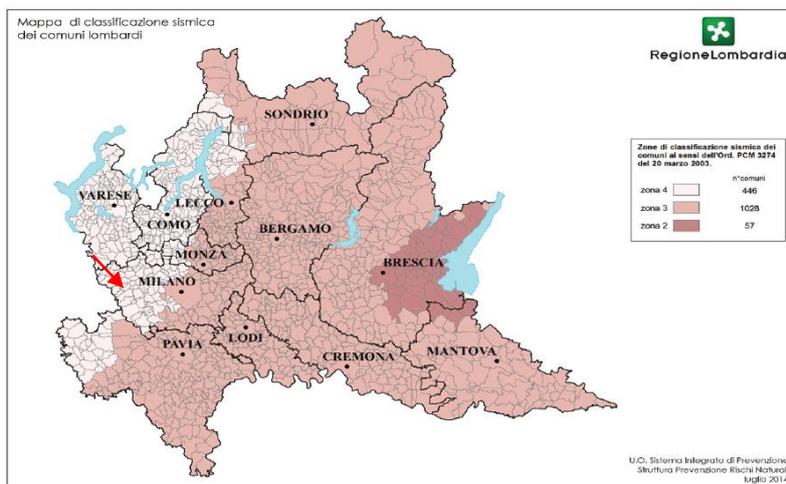
La verifica a liquefazione è stata omessa dall'analisi di approfondimento in quanto, come indicato al paragrafo 7.11.3.4.2 delle NTC 2008, le accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) sono, per il sito in oggetto, inferiori a 0,1g (cfr. par. 3.4 della presente relazione e 4.1.1 appendice 1).

## 6. Analisi della pericolosità geologica

Per la definizione della pericolosità geologica di base dell'area di interesse si è fatto riferimento agli strumenti di pianificazione di Bacino, regionali, provinciali e comunali (Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica del Piano di Governo del Territorio), nonché alla nuova classificazione sismica del territorio regionale.

### 6.1. Pericolosità sismica

Il Comune di Marcallo con Casone e, di fatto, l'area in studio, secondo la riclassificazione sismica del territorio nazionale (O.P.C.M. n.3274 del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", adottata con D.G.R. n.14964 del 7 novembre 2003) e sulla base della nuova DGR 11 luglio 2014 n. X/2129 (Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia), ricade in **zona sismica 4**.

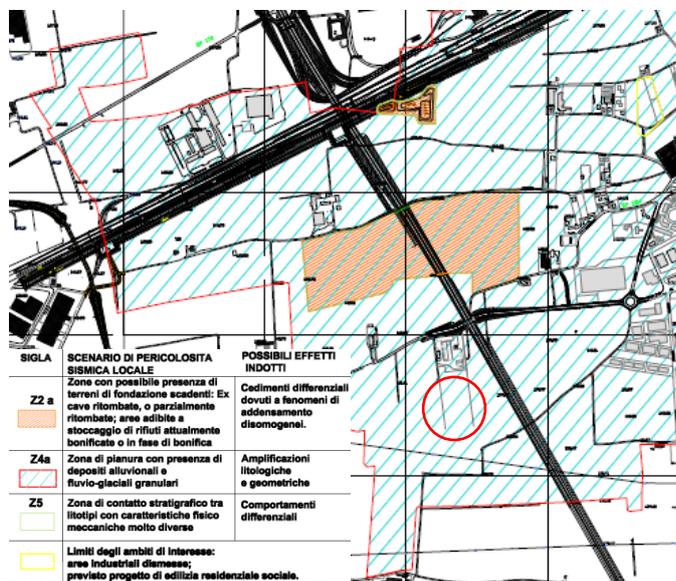


**Fig. 6.1** - Mappa di classificazione sismica dei comuni lombardi (D.G.R. n. X/2129 del 11 luglio 2014). La freccia rossa indica il Comune di Marcallo con Casone.

Il Comune di Marcallo con Casone è dotato di uno studio inerente la Pericolosità sismica Locale di I e II livello, redatto in conformità all'allegato 5 alla D.G.R. n. 8 /7374 del 05/08. Buona parte del territorio rientra nello scenario (PSL I livello) **Z4a** – *Zona di pianura con presenza di depositi alluvionali e fluvioglaciali granulari, con effetti attesi, in caso di sisma, di amplificazioni litologiche e geometriche.*

Localmente sono stati anche individuati scenari Z2a e Z5, con effetti attesi, in caso di sisma, rispettivamente di cedimenti differenziali dovuti a fenomeni di addensamento disomogenei e comportamenti differenziali.

Il sito di intervento, nello specifico, ricade all'interno dello scenario PSL Z4a.



**Fig. 6.2** - Stralcio Carta della Pericolosità sismica locale (Componente Geologica, Idrogeologica e Sismica di supporto al P.G.T., novembre 2014). In rosso l'area di intervento.

In base alla succitata D.G.R. il Comune di Marcallo con Casone è dotato anche di un'analisi sismica di II livello, a cui si rimanda per tutti i dettagli di analisi. I risultati di tale analisi definiscono che la normativa (sismica) nazionale non risulta pienamente sufficiente a salvaguardare gli effetti di amplificazione sismica locale.

Pertanto, in osservanza alle norme tecniche e prescrizioni per le aree a pericolosità sismica locale (PSL), parte integrante delle vigenti Norme geologiche di Piano, essendo l'opera in progetto ricompresa nell'elenco tipologico degli edifici e opere rilevanti di cui al D.D.U.O. 21 novembre 2003 n. 19904, nella fattispecie assimilabile alla categoria "Strutture non di competenza statale connesse con la produzione, trasporto e distribuzione di materiali combustibili", la progettazione dovrà essere condotta definendo le azioni sismiche di progetto a mezzo di analisi di approfondimento di III livello (cfr. appendice 1) secondo le metodologie dell'allegato 5 alla D.G.R. n. IX/2616 del 30 novembre 2011.

La valutazione della pericolosità sismica del sito di interesse è stata anche eseguita sulla base dei dati elaborati dall'Istituto di Geofisica e Vulcanologia nell'ambito del progetto S1 e reperibili sul sito <http://esse1-gis.mi.ingv.it>, dove sono disponibili, in forma interattiva, le mappe probabilistiche della pericolosità sismica del territorio nazionale, espressa con diversi parametri dello scuotimento su una griglia regolare a passo 0,05°.

Individuato il sito di interesse (inserendo le coordinate nel sistema ED50) si individua il riquadro corrispondente al valore di  $a(g)$  più vicino (fig. 6.3), da cui si avrà un grafico (fig. 6.4) in cui viene mostrato il contributo percentuale delle diverse coppie di dati magnitudo-distanza epicentrale alla pericolosità di base del punto di interesse.

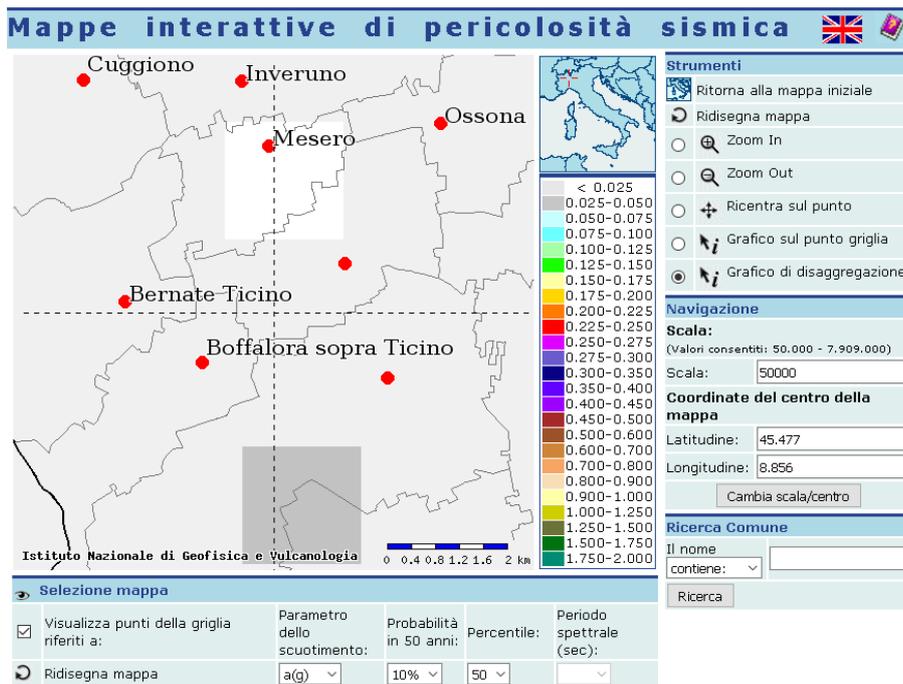


Fig. 6.3 - Mappa interattiva di pericolosità sismica per il sito di interesse

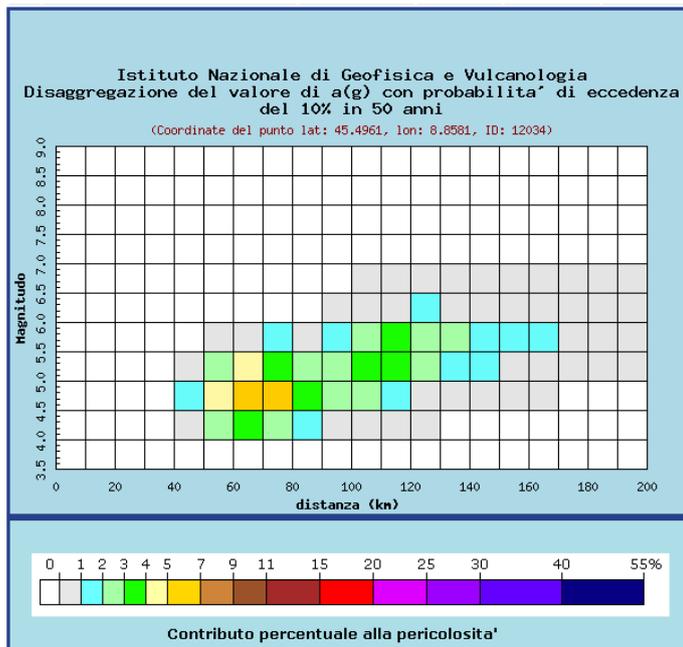


Fig. 6.4 – Disaggregazione, grafico dei contributi alla pericolosità per intervalli di magnitudo e distanza epicentrale

Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 45.4961, lon: 8.8581, ID: 12034)										
	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.698	1.440	0.887	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	2.200	4.460	2.680	0.372	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	3.040	6.440	4.060	0.946	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	2.270	5.380	3.770	1.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	1.250	3.560	2.850	0.843	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.564	2.270	2.290	1.020	0.077	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.215	2.130	3.400	2.940	0.583	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.035	1.370	3.270	3.220	0.849	0.079	0.000	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.652	2.600	2.820	1.020	0.128	0.000	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.254	1.840	2.160	0.883	0.124	0.000	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.081	1.170	1.610	0.733	0.113	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.023	0.705	1.190	0.598	0.094	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.006	0.500	1.090	0.697	0.077	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.334	0.963	0.801	0.064	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.244	0.956	0.965	0.052	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.150	0.816	0.944	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000

Fig. 6.5 – Disaggregazione, tabella dei contributi alla pericolosità per intervalli di magnitudo e distanza epicentrale

Per l'ambito in studio si ha che la massima percentuale, pari a 6,44%, si ha per terremoti di magnitudo compresa tra 4.5 e 5.0 nel range di distanza tra 60 e 70 km.

## 6.2. Pericolosità geologica e geomorfologica

L'area in studio, essendo inserita in un contesto morfologico di pianura, non presenta e non presenterà problematiche legate alla dinamica di versante o di instabilità tettonica.

## 6.3. Pericolosità idraulica-idrogeologica

L'area in studio non si presenta interessata da fenomeni di esondazione in atto e potenziali, in quanto lontana da qualsiasi importante corso d'acqua. Il sistema di canali irrigui che circondano l'area non mostra situazioni di pericolosità. L'unico aspetto da tenere presente è che l'area è soggetta ad allagamento periodico (in concomitanza di intensi eventi piovosi) per sfioro delle acque di troppo pieno, di prima e seconda pioggia, provenienti da Marcallo con Casone e da alcuni comuni limitrofi. Indicativamente l'allagamento interessa buona parte dell'area in oggetto, con altezze massime stimate di 50/60 cm. Questo aspetto dovrebbe però risolversi a seguito della realizzazione di una vasca volano, prescritta da ARPA allo scadere (dicembre 2016) dell'autorizzazione allo scarico.

## 7. Elementi di criticità

Il modello geologico del sito, definito sulla base di dati bibliografici e indagini sito specifiche, permette di focalizzare l'attenzione su quattro potenziali aspetti di criticità.

## 7.1. Elementi di criticità idrogeologica

La falda è sicuramente l'elemento principale da tenere in considerazione, in quanto presenta una bassa soggiacenza (principalmente nei mesi estivi) e un'elevata vulnerabilità. Tali aspetti, per il sito di interesse, sono dovuti al fatto che l'area si trova scavata di circa 2 metri rispetto al piano campagna circostante. Da quanto emerso dall'analisi storica dei dati, inoltre, sembra che in passato la falda abbia raggiunto livelli ben più alti di quelli odierni e, allo stato attuale, non è possibile escludere un futuro innalzamento della falda.

Pertanto si rende necessario predisporre opere di raccolta, drenaggio e smaltimento delle acque meteoriche, nonché di smaltimento delle acque reflue secondo i termini della normativa vigente, al fine di ridurre il rischio di inquinamento delle acque sotterranee.

Tale aspetto deve essere considerato anche durante le fasi di realizzazione dell'opera onde evitare sia danni a persone e cose, sia possibili fenomeni di inquinamento della falda.

Inoltre, in considerazione dell'impianto che verrà realizzato, si deve prevedere un sistema di controllo ambientale periodico della falda allo scopo di monitorarne le caratteristiche idrochimiche; questo, ad esempio, può essere effettuato con la realizzazione di piezometri a monte e a valle dell'impianto, sfruttando comunque se possibile il piezometro già realizzato in questa fase di indagine.

## 7.2. Elementi di criticità geotecnica

L'analisi geotecnica ha evidenziato che i terreni in sito presentano caratteri disomogenei da monte a valle, specie nei livelli superficiali. Nella parte Nord si hanno, a partire da 1 m di profondità, depositi poco addensati a scadenti caratteristiche geotecniche; spostandosi verso Sud i caratteri geotecnici migliorano. In senso verticale le caratteristiche geotecniche migliorano per tutta l'area dalla profondità di 5/6 metri, anche se bisogna considerare la presenza di un livello (limi argillosi) tra 8 e 9 metri di profondità in corrispondenza del quale i caratteri geotecnici sono nuovamente scadenti.

In tale contesto, anche in relazione della bassa soggiacenza e oscillazioni stagionali della falda e delle possibili future variazioni di livello che possono interagire con le fondazioni superficiali, si consiglia di valutare la possibilità di prevedere la realizzazione di fondazioni profonde (pali o micropali).

Essendo poi previsto, ai fini della realizzazione dell'impianto, uno sbancamento verso Ovest, arretrando l'attuale scarpata dello scavo, trattandosi di depositi sciolti a prevalente comportamento granulare, si dovrà porre attenzione al mantenimento della stabilità delle pareti di sterro per tutta la durata del cantiere, adottando sostegni provvisori delle pareti, pendenze idonee ed eventualmente predisponendo la posa di teli impermeabili per la protezione dagli eventi meteorici intensi causa di erosione e dissesto.

Numero e ubicazione delle indagini penetrometriche hanno poi dovuto tenere conto dello stato di fatto dell'area di indagine (questa per buona parte, infatti, non è risultata accessibile per la presenza di ingenti cumuli detritici e macchinari in disuso). Si consiglia, pertanto, di valutare la possibilità di integrare, quando l'area di intervento sarà completamente accessibile, quanto fino ad ora fatto con una ulteriore campagna di indagine geotecnica, questo con lo scopo di meglio caratterizzare il modello litotecnico di sottosuolo.

## 7.3. Elementi di criticità sismica

L'applicazione dell'analisi numerica (cfr. Appendice 1) ha confermato quanto emerso nell'analisi di II livello eseguita nell'ambito dello studio Geologico, Idrogeologico e Sismico di supporto al vigente P.G.T. Dal confronto con lo spettro proposto dalla normativa per le zone sismiche 4 e per le categorie di suoli B e C si può vedere che la norma non risulta sufficiente a tener in conto gli effetti di amplificazione.

Pertanto in fase di progettazione è opportuno applicare lo spettro ricavato dall'analisi, per i relativi stati limite considerati.

#### 7.4. Elementi di criticità ambientale

Si ricorda che i terreni asportati a seguito degli scavi e allontanati dall'area di cantiere dovranno essere gestiti ai sensi del DM 10 agosto 2012, n. 161 e successive modifiche e integrazioni (Legge 9 agosto 2013 n. 98, art. 41 comma 2 e art. 41 bis). Il decreto ha la finalità di migliorare l'uso delle risorse naturali e di prevenire la produzione dei rifiuti. Tali finalità sono perseguite stabilendo i criteri qualitativi e quantitativi da soddisfare affinché i materiali da scavo siano classificabili come sottoprodotti e non come rifiuti. Le terre e rocce da scavo, ottenute quali sottoprodotti, possono essere utilizzate per rinterri, riempimenti, rimodellazioni e rilevati purché sia accertato che non provengono da siti contaminati o sottoposti ad interventi di bonifica, e che le loro caratteristiche chimiche e chimico-fisiche siano tali che il loro impiego nel sito prescelto non determini rischi per la salute e per la qualità delle matrici ambientali interessate ed avvenga nel rispetto delle norme di tutela delle acque superficiali e sotterranee.

## 8. Attendibilità del modello geologico e fattibilità dell'intervento

In relazione alle informazioni reperite, alle indagini e approfondimenti effettuati, il modello geologico di riferimento presenta un sufficiente grado di affidabilità nel descrivere la “complessità” geologica dell’area di studio.

In considerazione di quanto sopra scritto, in merito alla situazione geologica idrogeologica e geotecnica che emerge dalle valutazioni effettuate e nel rispetto, nella progettazione, delle prescrizioni indicate e di quanto richiesto a norma di legge secondo il DM 14.01.2008, nell’area d’intervento non sono emerse sostanziali controindicazioni alla fattibilità di proposte di intervento edificatorio.

Varese, dicembre 2016

**GeoSFerA**

Studio Associato di Geologia

Dott. Geol. Ferruccio Tomasi

Dott. Geol. Andrea Strini

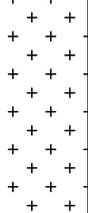


## ALLEGATO 1 STRATIGRAFIE SONDAGGI GEOGNOSTICI

## ALLEGATO 2 CARTA DELLA VULNERABILITA' INTRINSECA DELL'ACQUIFERO

## APPENDICE 1 APPROFONDIMENTO RELATIVO AGLI ASPETTI SISMICI

<b>Committente</b> Agatos Green Power Lemuria srl	<b>Progetto</b> Realizzazione impianto di trattamento FORSU		<b>Comune</b> Marcallo con Casone (MI)	<b>Località</b> Ecocentro	<b>Data</b> 22 luglio 2016
<b>Sigla indagine</b> 0151340069	<b>Tipo indagine</b> Sondaggio	<b>Coordinate (X, Y)</b> 0488647 - 5035704	<b>Quota (m s.l.m.)</b> 139,5	<b>Profondità raggiunta (m)</b> 15,0	<b>Note</b> Sondaggio attrezzato a piezometro

Scala (mt)	Spessore (mt)	Litologia	Descrizione	Campione ambientale	Granulometria	Limiti di Attemberg	Infiltrometrica	Carico su piastra	Falda m da p.c.	SPT (n. colpi)	Caratteristiche piezometro
1	2,9		Terreno di riporto e rimaneggiato						1,70 (17/08/2016) 1,83 (19/09/2016)		
2									2,50 (27/09/2016) 2,55 (22/07/2016)		
3	4,1		Sabbie grossolane e ghiaie eterogeneiche. Clasti da 1/2 cm circa 10 cm								
4	0,2		Sabbie limose con ghiaie. Colore marrone ocre								
5	0,8		Sabbie grossolane								
6	1,0		Limi anche argillosi di colore grigio scuro								
7	1,5		Sabbie limose con ghiaie di colore grigio scuro								
8	3,0		Sabbie limose con ciottoli								
9	1,5		Sabbie medie limose								
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

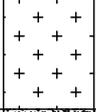
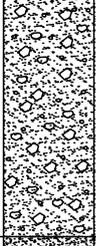
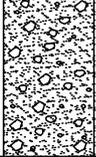
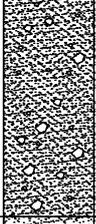
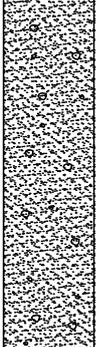
Cieco

3,0 m da p.c.

Fenestrato

diam. 3"

<b>Committente</b> Agatos Green Power Lemuria srl	<b>Progetto</b> Realizzazione impianto di trattamento FORSU		<b>Comune</b> Marcallo con Casone (MI)	<b>Località</b> Eccentro	<b>Data</b> 21 luglio 2016
<b>Sigla indagine</b> S1	<b>Tipo indagine</b> Sondaggio	<b>Coordinate (X, Y)</b> 0488642 - 5035744	<b>Quota (m s.l.m.)</b>	<b>Profondità raggiunta (m)</b> 30,0	<b>Note</b> Sondaggio per esecuzione prova Down Hole

Scala (mt)	Spessore (mt)	Litologia	Descrizione	Campione ambientale	Granulometria	Limiti di Attemberg	Infiltrometrica	Carico su piastra	Falda	SPT (n. colpi)	Note
1	1,5		Terreno di riporto e rimaneggiato								
2	0,7		Sabbie medio grossolane ghiaiose								
	0,6		Ghiaie sabbiose								
3	0,2		Sabbie medio grossolane ghiaiose								
4											
5	3,5		Ghiaie eterogenee con sabbie grossolane, debolmente limose								
6											
7	1,3		Sabbie grossolane con ghiaie								
8	0,4		Ghiaie eterometriche con sabbie grossolane								
	0,4		Sabbie grossolane con ghiaie. Limite netto con:								
9	0,9		Limi anche argillosi di colore grigio scuro								
10											
11	2,2		Ghiaie e sabbie con limi, di colore grigio scuro. Ciottoli anche di 10 cm.								
12	0,3		Limi sabbiosi c/o sabbie limose compatte con clasti da millimetrici a 2/3 cm. Alcuni clasti si presentano debolmente alterati (arenizzati). Colore d'insieme marrone rossiccio. Limite netto								
13											
14	3,2		Sabbie grossolane e ghiaie, di colore ocra, debolmente limose. Clasti da 1/2 cm a massimo 10 cm								
15											
16											
17											
18	10,8		Sabbie medie debolmente limose, con sparsi clasti centimetrici								
19											
20											

segue

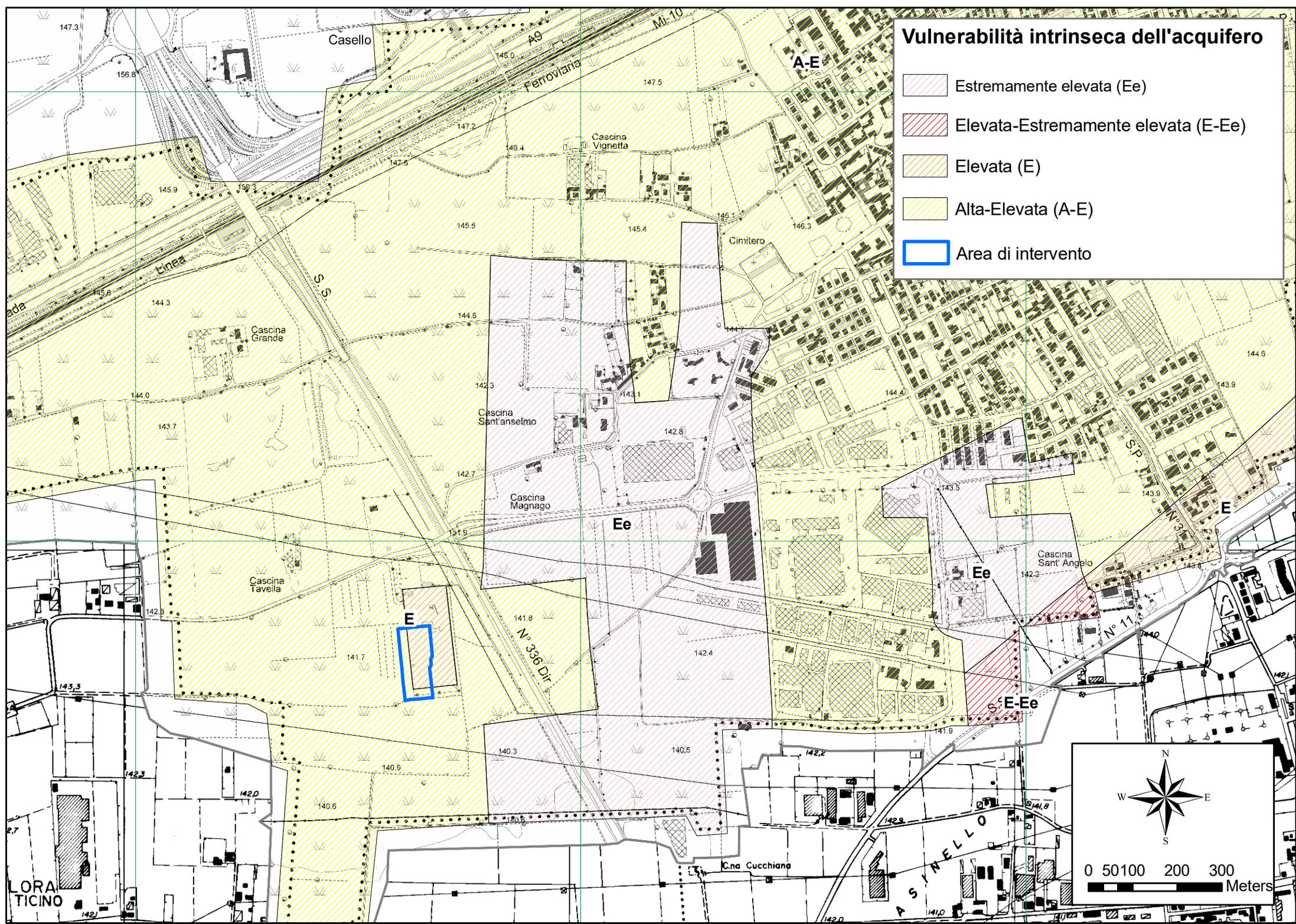
<b>Committente</b> Agatos Green Power Lemuria srl	<b>Progetto</b> Realizzazione impianto di trattamento FORSU	<b>Comune</b> Marcallo con Casone (MI)	<b>Località</b> Ecocentro	<b>Data</b> 21 luglio 2016
<b>Sigla indagine</b> S1	<b>Tipo indagine</b> Sondaggio	<b>Coordinate (X, Y)</b> 0488642 - 5035744	<b>Quota (m s.l.m.)</b>	<b>Profondità raggiunta (m)</b> 30,0
<b>Note</b> Sondaggio per esecuzione prova Down Hole				

Scala (mt)	Spessore (mt)	Litologia	Descrizione	Campione ambientale	Granulometria	Limiti di Atterberg	Infiltrometrica	Carico su piastra	Falda	SPT (n. colpi)	Note
------------	---------------	-----------	-------------	---------------------	---------------	---------------------	-----------------	-------------------	-------	----------------	------

19											
20											
21											
22	10,8		Sabbie medie debolmente limose, con sparsi clasti centimetrici								
23											
24											
25											
26											
27	2,0		Sabbie medie con abbondanti clasti, anche debolmente ghiaiose								
28											
29	2,0		Sabbie medie debolmente limose con sparsi clasti								
30											
31											
32											
33											
34											
35											
36											
37											
38											

# Vulnerabilità intrinseca dell'acquifero

-  Estremamente elevata (Ee)
-  Elevata-Estremamente elevata (E-Ee)
-  Elevata (E)
-  Alta-Elevata (A-E)
-  Area di intervento



LORATICINO

ASINELLO

**Committente** | **Sviluppatore**

**Green Power Marcallese Srl**

Via Cesare Ajraghi 30 – 20156 Milano  
greenpowermarcallesesrl@pec.it  
Partita IVA/C.F. 07110400962



**Agatos Green Power Lemuria Srl**

Via Cesare Ajraghi 30 – 20156 Milano  
Tel. +39 0248376601, Fax +39 0230131206  
Mail: info@agatos.it – Web: www.agatosenergia.it  
Partita IVA/C.F. 07110360968



# Nuovo impianto di recupero (R3) di rifiuti speciali non pericolosi (forsu) per la produzione di biometano nel comune di Marcallo con Casone (Mi)

DOMANDA DI AUTORIZZAZIONE UNICA EX ART. 12 D.LGS.  
387/2003

## RELAZIONE GEOLOGICA

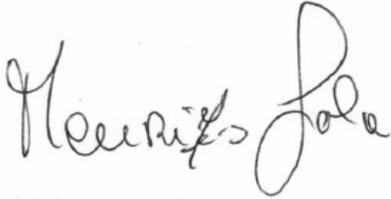
AI SENSI DELLA D.G.R. IX/2616 DEL 30 NOVEMBRE 2011 E  
DEL D.M. 14 GENNAIO 2008 (N.T.C. P.TO 6.2.1)

**APPENDICE 1 – APPROFONDIMENTO RELATIVO AGLI ASPETTI SISMICI**

AU\_EL05\_APP1\_SISM\_REV(0)\_20161205 PRIMA EMISSIONE DICEMBRE 2016

## I LEGALI RAPPRESENTANTI

Maurizio Sala  
(Green Power Marcallese s.r.l.)



Leonardo Rinaldi  
(Agatos Green Power Lemuria s.r.l.)

## I TECNICI

Ing. Alessandro Daneu



Dott. Geol. Ferruccio Tomasi  
Di GeoSFerA Studio Associato di Geologia



## SOMMARIO

<b>1. Introduzione</b>	<b>3</b>
1.1. Premesse	3
1.2. Scopo delle indagini	3
1.3. Descrizione dei contenuti della relazione	4
<b>2. Caratterizzazione sismica</b>	<b>4</b>
2.1. Indagine Down-Hole	4
2.1.1. Metodologia di indagine	4
2.1.2. Strumentazione utilizzata	5
2.2. Indagine HVSr	6
2.2.1. Metodologia di indagine	6
2.2.2. Strumentazione utilizzata	7
<b>3. Interpretazione, elaborazione dati e risultati</b>	<b>8</b>
3.1. Indagine Down-Hole	8
3.1.1. Interpretazione in Down-Hole con il metodo diretto	8
3.1.2. Interpretazione in Down-Hole con il metodo intervallo	10
3.1.3. Elaborazione dei dati	11
3.1.4. Correlazione tra le velocità delle onde sismiche e i parametri elastici e geomeccanici	11
3.1.5. Risultati	14
3.2. Indagine in HVSr	17
3.2.1. Interpretazione HVSr	17
3.2.2. Risultati	17
<b>4. Analisi della risposta sismica locale</b>	<b>18</b>
4.1. Definizione input sismico	19
4.1.1. Parametri sismici di base	19
4.1.2. Accelerogrammi di input	22
4.2. Modello sismostratigrafico di input	34
4.3. Risultati – Stato Limite SLV	36

4.3.1. Elaborazione .....	36
4.3.2. Fattori di amplificazione .....	36
4.3.3. Spettro medio di risposta elastico .....	36
4.3.4. Spettro normalizzato di risposta elastico .....	37
4.3.5. Parametri spettro normalizzato .....	38
4.3.6. Confronto tra gli spettri .....	39
4.3.7. Confronto spettro normativa.....	39
4.4. Risultati – Stato Limite SLD .....	40
4.4.1. Elaborazione .....	40
4.4.2. Fattori di amplificazione .....	40
4.4.3. Spettro medio di risposta elastico .....	41
4.4.4. Spettro normalizzato di risposta elastico .....	42
4.4.5. Parametri spettro normalizzato .....	43
4.4.6. Confronto tra gli spettri .....	44
4.4.7. Confronto spettro normativa.....	44
4.5. Risultati – Stato Limite SLO .....	45
4.5.1. Elaborazione .....	45
4.5.2. Fattori di amplificazione .....	45
4.5.3. Spettro medio di risposta elastico .....	46
4.5.4. Spettro normalizzato di risposta elastico .....	47
4.5.5. Parametri spettro normalizzato .....	48
4.5.6. Confronto tra gli spettri .....	49
4.5.7. Confronto spettro normativa.....	49

## 1. Introduzione

Il comune di Marcallo con Casone, ricadente in **zona sismica 4** (d.g.r. 11 luglio 2014 n. X/2129), è dotato di uno studio sulla pericolosità sismica locale di I e II livello (ai sensi dell'Allegato 5 alla d.g.r. 30 novembre 2011 n. IX/2616), volto alla valutazione dell'amplificazione sismica locale. Da tale studio, a cui si rimanda per i dettagli di analisi, è emerso che la normativa (sismica) nazionale **non** risulta pienamente sufficiente a salvaguardare gli effetti di amplificazione sismica locale.

In osservanza alle norme tecniche e prescrizioni per le aree a pericolosità sismica locale (PSL), parte integrante delle vigenti Norme geologiche di Piano, essendo l'opera in progetto inserita in ambito **Z4a** (zona di fondo valle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi, con effetti di amplificazioni litologiche e geometriche) e compresa nell'elenco tipologico degli edifici e opere rilevanti di cui al D.D.U.O. 21 novembre 2003 n. 19904, la progettazione dovrà essere condotta definendo le azioni sismiche di progetto a mezzo di analisi di approfondimento di III livello (ai sensi dell'Allegato 5 alla d.g.r. 30 novembre 2011 n. IX/2616). Si rammenta che l'intervento edificatorio prevede la realizzazione di un impianto di recupero di rifiuti speciali non pericolosi (FORSU) per la produzione di biometano.

### 1.1. Premesse

L'analisi di III livello prevede un approccio di tipo quantitativo e costituisce lo studio di maggior dettaglio; la valutazione della pericolosità sismica locale è stata effettuata ricorrendo alla metodologia numerica mediante modellazione monodimensionale 1D, con l'utilizzo di opportuni codici di calcolo, che ha permesso di definire una realistica risposta sismica per l'ambito geologico-stratigrafico del sito in oggetto (cfr. Relazione geologica), non affetto da problematiche bidimensionali (sia sepolte sia topografiche). I concetti fondamentali su cui si basano i codici di calcolo numerico riguardano la teoria della propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo e la teoria del comportamento non lineare e dissipativo dei terreni in condizioni dinamiche.

Questo approccio è anche ritenuto la via ufficiale delle NTC2008 (Cap. 3.2.2) e consente il confronto con la relativa categoria di sottosuolo ottenuta in via semplificativa.

Il presente documento pertanto riferisce sulle prove geofisiche, di tipo sismico attivo e passivo, condotte a supporto dello studio di caratterizzazione sismica del sottosuolo presso il quale verrà realizzato l'impianto di trattamento della FORSU e sui risultati dell'analisi di Risposta Sismica Locale.

### 1.2. Scopo delle indagini

La caratterizzazione sismica-dinamica del terreno è stata eseguita attraverso prove geofisiche di tipo sismico attivo e passivo, di cui:

- Indagine sismica in foro di tipo Down-Hole per la determinazione diretta dei profili di velocità  $V_p$  e  $V_s$  nel sottosuolo;
- Prospezione geofisica con acquisizione ed analisi dei microtremiti (HVSr) e con processo di inversione e interpretazione secondo metodologia di analisi del rapporto spettrale H/V o di Nakamura, per la determinare l'eventuale comportamento amplificativo del terreno.

### 1.3. Descrizione dei contenuti della relazione

La presente relazione illustrerà la metodologia di acquisizione, la strumentazione utilizzata, le tecniche e modalità di inversione/interpretazione e verranno evidenziati i risultati ottenuti con la campagna di prospezione geofisica a supporto della caratterizzazione sismica del sottosuolo.

Dopo un quadro descrittivo delle tecniche di indagine, riportate nel Capitolo 2 (Caratterizzazione sismica), si riportano le modalità di interpretazione ed analisi dei dati acquisiti e i risultati, di cui al Capitolo 3 (Interpretazione, elaborazione dati e risultati).

L'analisi di Risposta Sismica Locale viene descritta nel Capitolo 4, e qui vengono forniti gli spettri elastici ottenuti dalle elaborazioni.

## 2. Caratterizzazione sismica

Ai fini della caratterizzazione sismica dell'area oggetto di intervento, i dati sono stati acquisiti secondo diverse tecniche di indagine:

- Indagine sismica in foro di tipo Down-Hole per la determinazione diretta dei profili di velocità  $V_p$  e  $V_s$  nel sottosuolo;
- Prospezione geofisica con acquisizione ed analisi dei microtremori (HVSR) e con processo di inversione e interpretazione secondo metodologia di analisi del rapporto spettrale H/V o di Nakamura, per la determinare l'eventuale comportamento amplificativo del terreno.

### 2.1. Indagine Down-Hole

#### 2.1.1. Metodologia di indagine

Le prove sismiche Down-Hole vengono eseguite con lo scopo di misurare la velocità delle onde sismiche dirette che si propagano dalla superficie nel terreno in profondità.

Il terreno viene energizzato in superficie, in prossimità di testa foro, e la registrazione avviene in foro grazie ad un geofono triassiale ancorato a profondità via via crescenti

Le onde sismiche possono essere generate energizzando il terreno in direzione verticale oppure in direzione trasversale (parallelamente al suolo). Nel primo caso verranno generate prevalentemente onde compressive che si propagano in profondità e vengono registrate al meglio dal geofono verticale. Nel secondo caso verranno generate prevalentemente onde di taglio visibili principalmente sui geofoni con l'asse posto orizzontalmente.



Le onde di taglio hanno velocità inferiori a quelle compressive e quindi raggiungeranno la terna geofonica quando già il primo fronte d'onda compressiva è già transitato. Questo passaggio costituisce

un disturbo per la misura delle onde trasversali in quanto i geofoni orizzontali si trovano ancora in movimento all'arrivo dell'onda trasversale.

Per migliorare il rapporto fra l'energia dell'onda compressiva e l'energia dell'onda trasversale a favore di quest'ultima, si realizza una doppia energizzazione orizzontale con verso opposto. La sottrazione delle forme d'onda relative a queste due acquisizioni riduce sensibilmente la componente compressiva presente nel segnale.

La misura dei primi arrivi sismici deve essere realizzata con precisione e un dettaglio non superiore al decimo di millisecondo. Ogni ritardo fra il momento dell'impulso dato al terreno e l'inizio della registrazione al sismografo si traduce in un errore significativo nei valori di velocità misurati. Per annullare ogni effetto di ritardo, viene posizionato un geofono in prossimità del punto di battuta a testa foro. La forma d'onda prodotta da questo geofono viene acquisita su un canale del sismografo e viene analizzata separatamente, in modo da poter valutare ogni possibile anticipo o ritardo. Il valore del tempo del primo fronte di arrivo a questo geofono è sempre lo stesso per tutte le battute e il segnale è ricco di alte frequenze grazie alla prossimità con la sorgente e quindi è preciso il tempo misurato.

L'analisi dei dati prevede che le battute eseguite in diversi momenti vengano raccolte a ricostruire un unico sismogramma, identico a quello che sarebbe stato ricevuto da una catena di tanti geofoni quante sono le quote di misura nel foro. In particolare vengono raggruppate in un unico sismogramma le forme d'onda relative al geofono verticale e in un altro sismogramma le forme d'onda relative ai geofoni orizzontali. Poiché i geofoni orizzontali sono due e il sismogramma uno solo è necessario che le forme d'onda vengano fra loro composte secondo un certo angolo che viene opportunamente modificato dal programma di interpretazione a cercare il piano di oscillazione principale dell'onda di taglio. La progressiva modifica dell'angolo di composizione, accompagnata dalla grafica in tempo reale della forma d'onda composta, consente di individuare quel valore per il quale è minima l'energia dell'onda compressiva e massima quella dell'onda trasversale. Questo valore dell'angolo di composizione, diverso per ciascuna profondità, viene utilizzato per la creazione dell'unico sismogramma delle onde di taglio.

### 2.1.2. Strumentazione utilizzata

L'acquisizione è stata effettuata tramite l'utilizzo di un sismografo a 24 bit DAQlinkIII prodotto dalla Seismic Source Co. (USA) utilizzando al massimo 5 canali di registrazione. Lo strumento viene collegato via cavo al geofono da foro per la prova Down Hole.



*Acquisitore DagLink III*

Nella tabella seguente vengono riportate le caratteristiche tecniche del sismografo DaqLink III:

<b>Caratteristiche tecniche DaqLink III</b>	
<b>Channels</b>	1-24 (multiple units can be used together)
<b>A/D conversion</b>	24 bit high speed sigma delta converters
<b>Dynamic range</b>	144 dB
<b>Bandwidth</b>	DC to 15KHz Analog filter flat response to 8000Hz Digital filter bandwidth – 85% of sample rate
<b>Common mode rejection</b>	Greater than 100dB
<b>Crosstalk</b>	Better than 125dB
<b>Noise floor</b>	0.2µV RMS noise
<b>Trigger accuracy</b>	+/- 1ms at all sample rates
<b>Anti-alias filter</b>	85% of Nyquist frequency
<b>Digital Filters</b>	User selectable frequency
<b>Sample intervals</b>	0.0208, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 ms

## 2.2. Indagine HVSR

### 2.2.1. Metodologia di indagine

La metodologia microtremori HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) è una tecnica di analisi passiva non invasiva a stazione singola del rumore sismico ambientale presente attorno ad una determinata posizione sulla superficie del terreno. Essa consiste essenzialmente nel calcolare il rapporto fra le ampiezze degli spettri di Fourier delle componenti orizzontale e verticale di tale rumore e analizzare i picchi (o massimi di tale funzione).

Quello che ci si aspetta è che le eventuali frequenze di risonanza caratteristiche del sito specifico corrispondano ad alcuni dei massimi eventualmente presenti nella funzione H/V. L'ampiezza di questi massimi è proporzionale, anche se non linearmente, all'entità dei contrasti di impedenza sismica esistenti.

La presente metodologia permette di indagare profondità difficilmente raggiungibili con altre metodologie e dunque è possibile evidenziare picchi anche a frequenze molto basse.

Il rumore è naturalmente presente sempre per effetto di micro-vibrazioni propagantesi nel terreno; studi precedenti hanno concluso che ciò che le origina provenga principalmente da una moltitudine di deboli sorgenti, tra loro non correlate, riferibili in ultima analisi ai più disparati meccanismi di propagazione di impulsi-vibrazioni indotti in mezzi solidi anche da regioni remote, e il loro conseguente scattering, definito come il processo fisico per cui le onde vengono deflesse in modo casuale dalle irregolarità presenti nel terreno. E' lecito assumere almeno in prima istanza che queste micro-sorgenti di rumore abbiano una distribuzione casuale attorno al punto di osservazione.

Sorgenti di tipo antropico (tipicamente direzionali) possono comunque essere sempre presenti e complicare le interpretazioni dei dati, dal momento che possono introdurre picchi ulteriori nella funzione H/V, non riferibili a risonanze, ma nei medesimi range di frequenze.

Le vibrazioni ambientali possono anche essere categorizzate in base al loro tipico contenuto in frequenza, a seconda delle fonti che le hanno originate; inoltre possono presentarsi non trascurabili variazioni-oscillazioni come quelle dipendenti dall'ora del giorno-notte e dalle condizioni atmosferiche.

### 2.2.2. Strumentazione utilizzata

Le misurazioni sono state effettuate in acquisizione continua con una terna triassiale di geofoni Vibraloc, le cui caratteristiche sono riassunte nella tabella riportata qui sotto.



Acquisitori Vibraloc e Daq Link III

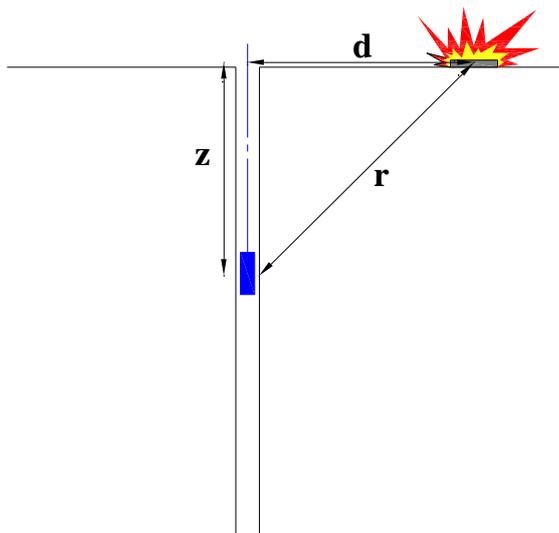
Caratteristiche tecniche VIRBALOC	
Channels	3 geophone channels, 1 microphone channel for air-pressure monitoring
Frequency range	2-250 Hz (-3 dB)
Record length	Fixed length or Auto mode 2 - 100 s, expands automatically up to 1 - 1000 s
Recording modes	Event mode Peak value mode Continuous mode
Sampling frequency	User selectable: 100, 500, 1000, 2000 or 4000 Hz
Measuring range	+ /- 250 mm/s
Resolution	Better than 0.02 mm/s up to 31 mm/s Better than 0.1 mm/s up to 250 mm/s

## 3. Interpretazione, elaborazione dati e risultati

### 3.1. Indagine Down-Hole

#### 3.1.1. Interpretazione in Down-Hole con il metodo diretto

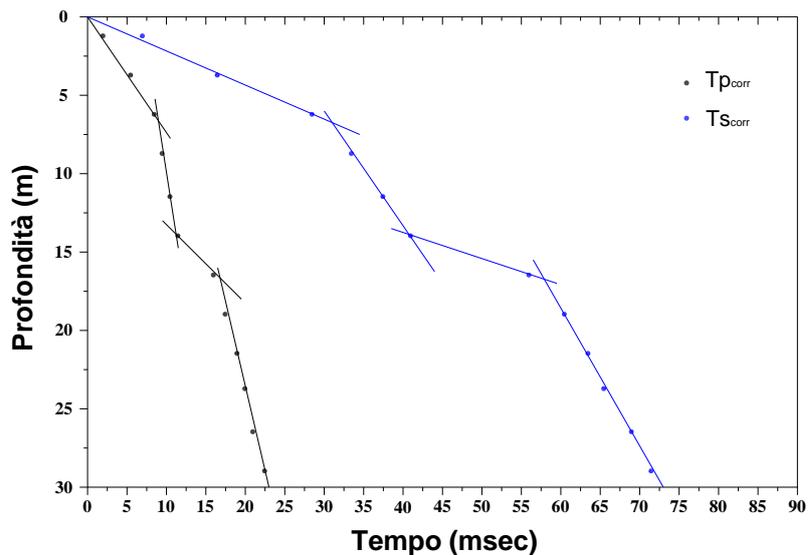
Per poter interpretare il Down-Hole con il metodo diretto, inizialmente, bisogna correggere i tempi di tragitto ( $t$ ) misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde.



Se  $d$  è la distanza della sorgente dall'asse del foro,  $r$  la distanza fra la sorgente e la tripletta di sensori,  $z$  la profondità di misura è possibile ottenere i tempi corretti ( $t_{corr}$ ) mediante la seguente formula di conversione:

$$1.0) t_{corr} = \frac{z}{r} t$$

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico  $t_{corr} - z$  in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali.

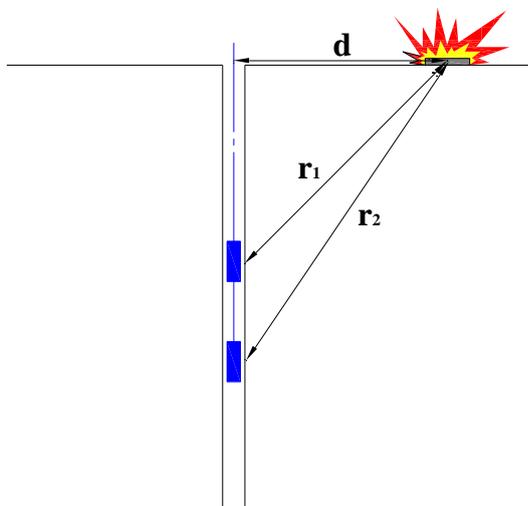


Ottenuti graficamente i sismostrati si ottengono la densità media, funzione della velocità e della profondità, e i seguenti parametri:

- 1) Coefficiente di Poisson medio:  $2.0) \nu_{\text{medio}} = 0.5 \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}$
- 2) Modulo di deformazione a taglio medio:  $3.0) G_{\text{medio}} = \rho V_s^2$
- 3) Modulo di compressibilità edometrica medio:  $4.0) E_{d\text{medio}} = \rho V_p^2$
- 4) Modulo di Young medio:  $5.0) E_{\text{medio}} = 2\rho V_s^2 (1 + \nu)$
- 5) Modulo di compressibilità volumetrica medio:  $6.0) E_{v\text{medio}} = \rho \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$

### 3.1.2. Interpretazione in Down-Hole con il metodo intervallo

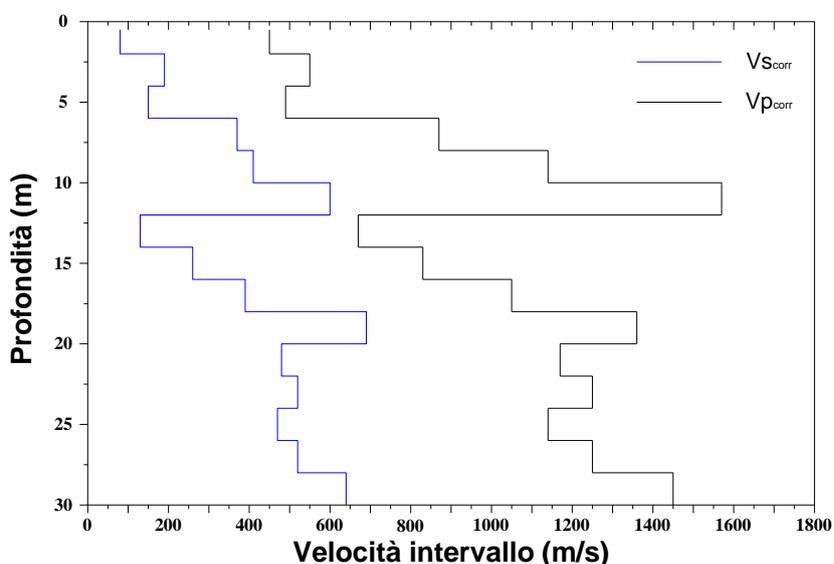
Con il metodo intervallo i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità, consentendo così di migliorare la qualità delle misure (velocità d'intervallo).



Quando si dispone di un solo ricevitore, cioè nell'ipotesi in cui le coppie non corrispondano ad un unico impulso, i valori di velocità determinati vengono definiti di pseudo-intervallo, consentendo solo un'apparente migliore definizione del profilo di velocità.

Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti con la 1.0) e la velocità intervallo delle onde P e S, con relativo grafico, con la formula seguente:

$$7.0) V_{p,s} = \frac{z_2 - z_1}{t_{2corr} - t_{1corr}}$$



Ottenute le velocità intervallo si calcolano la densità, il coefficiente di Poisson, il modulo di deformazione a taglio, il modulo di compressibilità edometrica, il modulo di Young, il modulo di compressibilità volumetrica per ogni intervallo con le formule riportate sopra.

Il metodo intervallo presenta però dei limiti:

- a) Non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti;
- b) Non è applicabile nel caso in cui  $t_{2,corr} < t_{1,corr}$ .

Ambedue le procedure d'interpretazione sopra descritte sono comunque suscettibili di una critica fondamentale, cioè si basano sull'ipotesi che i percorsi delle onde siano rettilinei e coincidenti con quelli che collegano la sorgente ai ricevitori. Di solito ciò non è esatto, dato che, prima di giungere ai ricevitori, le onde subiscono fenomeni di rifrazione che ne modificano il percorso.

### 3.1.3. Elaborazione dei dati

L'energizzazione è avvenuta a testa foro su un apposito asse ancorato al terreno. L'impulso di trigger è stato dato dalla chiusura di un circuito collegato alla mazza battente.

L'elaborazione dei dati è avvenuta con un apposito programma rispettando la seguente procedura di trattamento:

- Immissione dei file dei dati in sequenza alle varie profondità;
- Estrazione della componente longitudinale della vibrazione sismica dal segnale del geofono verticale;
- Composizione per rotazione della componente trasversale della vibrazione sismica a partire dai segnali dei geofoni orizzontali;
- Definizione dei tempi di arrivo per le onde longitudinali e trasversali;
- Calcolo delle distanze fra i punti di energizzazione e di ricezione;
- Compilazione e stampa delle tabelle e plottaggio delle forme d'onda relative alle onde longitudinali e trasversali.

### 3.1.4. Correlazione tra le velocità delle onde sismiche e i parametri elastici e geomeccanici

La liberazione istantanea di energia nel terreno genera un sistema di onde sismiche la cui propagazione è regolata dalle classiche leggi della fisica.

Tale fenomenologia è trattata e descritta nel capitolo sismico delle scienze geofisiche.

Le deformazioni e le tensioni generate da una sollecitazione artificiale impulsiva sono abbastanza complesse ma nell'ambito di cui si tratta in queste note è sufficiente fare riferimento ai due tipi principali di onde sismiche, (dette anche onde di volume - body waves): le onde sismiche di compressione (longitudinali, onde prime) e le onde sismiche di taglio (trasversali, onde seconde).

Le onde di volume si propagano nel terreno in ogni direzione ed intercettando il piano topografico danno origine sullo stesso ad onde di natura diversa (Rayleigh e Love) che si propagano esclusivamente in superficie.

Nel loro complesso, le onde sismiche creano sollecitazioni e conseguenti deformazioni nel mezzo attraversato che generalmente ricadono nel campo elastico del diagramma sforzi/deformazioni. Pertanto in questo ambito sono applicabili le relazioni classiche della teoria dell'elasticità.

Le onde sismiche longitudinali sono deformazioni che si propagano in linea retta con un'alternanza continua di compressioni e dilatazioni della materia lungo il percorso di propagazione.

Ogni particella di materia oscilla attorno al suo punto di quiete lungo un asse coincidente con il raggio di propagazione dell'onda sismica.

Le onde sismiche di taglio sono invece deformazioni che si propagano nella stessa direzione delle precedenti ma con movimento oscillatorio delle particelle ortogonale alla traiettoria dei raggi sismici.

Per la descrizione dettagliata di questi fenomeni è sufficiente far riferimento ai testi generali di geofisica. La velocità di propagazione delle onde sismiche dipende dalle costanti elastiche e dalla densità del mezzo attraversato, e pertanto risulta variabile in funzione delle caratteristiche geomeccaniche e fisiche del terreno o delle rocce.

In uno stesso tipo di materiale le velocità di propagazione dei vari tipi di onde differiscono tra loro: le più veloci sono le onde di compressione, a cui seguono le onde di taglio e successivamente le diverse onde superficiali.

Poiché le tensioni e le deformazioni che si generano nel campo sismico sono di modestissima entità anche il terreno e le rocce sollecitate in questo ambito possono essere considerati in prima approssimazione come materiali omogenei, isotropi ed elastici. E' applicabile quindi la legge di Hooke (proporzionalità tra lo sforzo applicato  $d$  e la deformazione prodotta  $e$ ):

$$d = e \times E$$

La costante  $E$ , definita come rapporto tra sollecitazione e conseguente deformazione longitudinale, rappresenta il modulo elastico (o di Young) del materiale. E' importante sottolineare che in campo dinamico si parla di modulo elastico dinamico (e non statico), ricavandosi tale modulo da prove dinamiche (o sismiche). Il rapporto tra la sollecitazione ortogonale (trasversale o di taglio) e la deformazione definisce il modulo di elasticità tangenziale (o di taglio)  $G$ .

Il rapporto tra la tensione idrostatica e la deformazione cubica (o di volume) definisce il modulo di compressione cubica (o di bulk)  $k$ .

Infine il coefficiente (o rapporto) di Poisson  $\nu$  è definito come il rapporto tra la deformazione trasversale e quella longitudinale.

Tale coefficiente varia da 0 a 0.5 con valore medio di 0.25 per molte rocce: i valori tendono a 0.05 per materiali estremamente duri ed a 0.45 per i materiali incoerenti.

Per i fluidi il coefficiente assume il valore limite di 0.5.

In senso più generale possono ancora essere definite le costanti di Lamè  $I$  e  $m$  come caratteristiche elastiche indipendenti dalle direzioni lungo cui vengono registrate le deformazioni. Queste due costanti sono definite dalle relazioni:

$$I = \frac{(v \times E)}{[(1+v)(1-2v)]} \quad (1)$$

$$m = \frac{E}{2(1+v)} \quad (2)$$

Analogamente il modulo  $E$  e il coefficiente  $\nu$  possono essere espressi in funzione delle costanti di Lamè  $I$  e  $m$ :

$$E = \frac{m(3I+2m)}{(I+m)} \quad (3)$$

$$v = \frac{I}{2(I+m)} \quad (4)$$

La seconda costante di Lamè  $m$  ha lo stesso significato fisico del modulo di elasticità tangenziale  $G$  prima definito.

Dimensionalmente il modulo elastico e le due costanti di Lamè esprimono il rapporto tra una forza ed una superficie mentre il coefficiente di Poisson è adimensionale.

Un'ultima costante entra a far parte delle relazioni tra caratteristiche elastiche e velocità: si tratta della densità  $r$  espressa come rapporto tra massa e volume.

Le velocità longitudinale  $V_p$  e trasversale  $V_s$  si correlano alle costanti elastiche con le relazioni:

$$V_p = \left[ \frac{I + 2m}{r} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$V_s = \left[ \frac{m}{r} \right]^{1/2} \quad (6)$$

Pertanto, avendo determinato i valori di  $V_p$  e  $V_s$  con rilievi sismici ed il valore della densità con prove di laboratorio, è possibile calcolare i valori delle costanti elastiche che caratterizzano i terreni esaminati con le espressioni:

$$v = 0.5 \times \frac{\left[ \frac{V_p}{V_s} \right]^2 - 2}{\left[ \frac{V_p}{V_s} \right]^2 - 1} \quad (7)$$

$$E = r \times V_p^2 \times \frac{[(1+v)(1-2v)]}{(1-v)} = 2r \times V_s^2 (1+v) \quad (8)$$

L'analisi delle varie relazioni illustrate permette una serie di considerazioni assai interessanti che si traducono in altrettanti comportamenti fisici riscontrabili nell'applicazione pratica.

Il confronto fra le espressioni (5) e (6) delle velocità conferma come per uno stesso materiale la velocità longitudinale abbia sempre un valore superiore a quello trasversale.

Per i fluidi il coefficiente di Poisson vale 0.5 e la seconda costante di Lamè  $m = 0$ , ne risulta che nei fluidi non possono essere trasmessi sforzi di taglio e quindi la velocità longitudinale ha sempre un valore superiore a quello della velocità trasversale.

Il rapporto tra le velocità di propagazione  $V_s/V_p$  è solo funzione del coefficiente di Poisson: al variare del coefficiente da 0 a 0.5, il rapporto varia da 0.7 a 0. Per il valore medio delle rocce ( $v = 0.25$ ) il rapporto vale  $V_s/V_p = 0.58$ .

Merita essere ricordato infine che i parametri ricavati per via dinamica hanno in genere valori superiori a quelli ricavati da prove statiche in laboratorio proprio per il diverso campo di sollecitazione applicata e la diversa deformazione raggiunta.

I valori di velocità di propagazione delle onde longitudinali variano da poche centinaia di metri al secondo sino ad alcune migliaia (7-8) di metri al secondo.

Velocità inferiori alla velocità del suono nell'aria (344 m/s) sono misurabili in terreni soffici superficiali anidri con elevato contenuto di materiali organici.

Gli stessi materiali, saturi d'acqua, incrementano i loro valori sino a 500-800 m/s.

I terreni incoerenti alluvionali presentano valori variabili tra 600 e 1800 m/s con prevalenza di velocità superiori a 1400 m/s per quelli saturi d'acqua.

Si ricorda che il valore della velocità nell'acqua varia tra 1480 e 1520 m/s al variare della temperatura e della salinità.

La velocità nelle rocce sedimentarie spazia tra valori di 2000 e 5000 m/s incrementandosi sia con la profondità dei sedimenti che con la loro età geologica.

Le rocce metamorfiche si attestano tra i valori di 3000 e 5000 m/s mentre le rocce ignee intrusive ed effusive salgono sino ai massimi valori di 8000 m/s.

Per l'anisotropia delle rocce tutti questi valori cambiano in funzione della direzione di propagazione rispetto alla stratificazione con differenze variabili dal 5 al 25%.

Analogamente questi valori, che si riferiscono a rocce sane, compatte ed omogenee, tendono a decrescere in funzione dell'alterazione dei loro componenti mineralogici, del grado di fratturazione e delle discontinuità stratigrafiche.

Da tutte queste premesse scaturisce che per via sismica è possibile definire le caratteristiche di un ammasso roccioso, o comunque di un grande volume di roccia, ottenendo valori significativi dell'insieme piuttosto che del puntuale.

Molti studiosi e sperimentatori hanno proposto correlazioni di vario genere tra i valori di velocità e le varie caratteristiche geomeccaniche e la bibliografia è ricca di spunti e riferimenti.

### 3.1.5. Risultati

Di seguito si riportano i risultati della prova sismica Down-Hole

Registrazione Nr.	Z (m)	Tp (msec)	Ts (msec)
1	2.00	3.70	10.20
2	4.00	6.90	20.20
3	6.00	8.70	27.50
4	8.00	10.50	33.50
5	10.00	12.60	39.70
6	12.00	14.50	45.20
7	14.00	16.70	51.20
8	16.00	18.40	56.00
9	18.00	19.90	60.50
10	20.00	21.20	64.00
11	22.00	22.40	67.00
12	24.00	23.60	70.50
13	26.00	24.70	74.00
14	28.00	25.80	77.00
15	30.00	26.85	79.80

#### Tempi corretti

SR (m)	Tpcorr (msec)	Tscorr (msec)
2.0881	3.544	9.7698
4.0448	6.8237	19.9765
6.0299	8.6568	27.3635
8.0225	10.4706	33.4062
10.018	12.5774	39.6287

12.015	14.4819	45.1436
14.0129	16.6847	51.153
16.0113	18.3871	55.9607
18.01	19.889	60.4664
20.009	21.1905	63.9712
22.0082	22.3917	66.9751
24.0075	23.5926	70.478
26.0069	24.6934	73.9803
28.0064	25.7941	76.9823
30.006	26.8446	79.7841

### Parametri calcolati

Vp (m/s)	Vs (m/s)	g (kN/mc)	v	G (MPa)	Ed (MPa)	E (MPa)	Ev (MPa)
564.33	204.71	20.37	0.4242	87.05	661.51	247.95	545.45
609.81	195.95	18.85	0.4424	73.80	714.79	212.90	616.39
1091.05	270.75	19.58	0.4672	146.36	2376.74	429.48	2181.59
1102.66	330.98	20.04	0.4505	223.86	2484.62	649.42	2186.14
949.31	321.41	19.73	0.4353	207.84	1813.10	596.63	1535.99
1050.14	362.65	20.02	0.4323	268.48	2251.32	769.09	1893.34
907.94	332.81	19.58	0.4224	221.15	1645.91	629.13	1351.05
1174.81	416.00	20.30	0.4283	358.23	2857.00	1023.32	2379.36
1331.65	443.88	20.45	0.4375	410.87	3697.88	1181.25	3150.05
1536.69	570.65	21.23	0.42	704.97	5112.13	2002.12	4172.17
1665.00	665.80	21.66	0.4048	979.10	6123.03	2750.88	4817.57
1665.42	570.96	21.12	0.4334	702.08	5973.39	2012.72	5037.29
1816.86	571.05	21.08	0.4452	700.97	7095.66	2026.08	6161.04
1817.03	666.22	21.53	0.4223	974.45	7248.49	2771.92	5949.23
1903.85	713.83	21.70	0.4182	1127.53	8020.56	3198.13	6517.18

**Vp:** velocità delle onde compressive; **Vs:** velocità delle onde trasversali; **g:** densità relativa; **v:** coefficiente di Poisson; **G:** modulo di deformazione di taglio; **Ed:** modulo di compressibilità edometrica; **E:** modulo di Young; **Ev:** modulo di compressibilità volumetrica

### Sismostrati con metodo diretto

Profondità (m)
4
14
30

### Valori medi

Vp medio (m/s)	Vs medio (m/s)	g medio (kN/mc)	v medio	G medio (MPa)	Ed medio (MPa)	E medio (MPa)	Ev medio (MPa)
586.51	200.2	18.63	0.43	76.14	653.46	218.37	551.94
1014.2	320.82	19.64	0.44	206.13	2059.96	595.47	1785.13
1575.79	573.63	21.35	0.42	716.49	5406.82	2040.02	4451.5

**Metodo diretto**

**Profondità di riferimento:**                    **30   m**  
**VS30:**   **379,54   m/s**

**Sismostrati con metodo Intervallo**

Profondità (m)
4
14
30

## Valori medi

Vp medio (m/s)	Vs medio (m/s)	g medio (kN/mc)	v medio	G medio (MPa)	Ed medio (MPa)	E medio (MPa)	Ev medio (MPa)
587.07	200.33	19.61	0.43	80.43	688.15	230.43	580.92
1020.22	323.72	19.79	0.44	213.54	2114.34	614.75	1829.62
1613.91	577.3	21.13	0.43	744.78	5766.02	2120.8	4772.99

**Metodo intervallo**

**Profondità di riferimento:**                    **30   m**  
**VS30:**   **381,81   m/s**

L'analisi delle onde di Rayleigh a partire dai dati di sismica attiva ha consentito di determinare il profilo verticale delle velocità  $V_s$  e, di conseguenza, del parametro  $V_{S30}$ , che risulta pari a circa 380 m/s (considerando come riferimento il piano di campagna).

Rispetto alle norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14 settembre 2005) il sito in esame rientra quindi nella categoria B "Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e valori del  $V_{S30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero  $NSPT_{30} > 50$  nei terreni a grana grossa e  $c_{u30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).

Si sottolinea come il valore di  $V_{S30}$  sia molto vicino al limite inferiore della categoria B di appartenenza; quindi nei risultati dell'Analisi di Risposta sismica Locale verranno messi a paragone gli spettri elastici calcolati e i relativi spettri da normativa sia per la categoria di suolo B sia per la categoria di suolo C.

## 3.2. Indagine in HVSR

### 3.2.1. Interpretazione HVSR

Le operazioni di campagna consistono nella disposizione di opportuni sensori in posizione piana sul terreno e nell'acquisizione delle vibrazioni per un intervallo di tempo tale da disporre alla fine di una finestra temporale abbastanza ampia e dunque di una statistica sufficiente, necessaria per le elaborazioni HVSR successive.

Le vibrazioni che vengono registrate dagli strumenti sono oscillazioni aventi bassissima ampiezza, specie se rapportata a quella tipica indotta da terremoti o da sorgenti attive artificiali (tipo MASW) e sono costituite da una combinazione di onde di diverso tipo; l'informazione utile al presente scopo è contenuta prevalentemente nella componente di tipo Rayleigh.

Nel caso in cui la morfologia del sottosuolo contenga variazioni di impedenza sufficientemente consistenti, ad esempio strati a diversa composizione, gli spettri in frequenza delle componenti registrate esibiranno andamenti tali che calcolandone i rapporti, possono mostrare, come detto in precedenza, i picchi caratteristici.

Questi picchi possono essere associati a determinate profondità, specialmente quando si ha a disposizione un dato di riferimento aggiuntivo, tipicamente proveniente da una prova di tipo Down-Hole o di tipo Masw, in grado di fornire il vincolo iniziale sulla successione locale in profondità dei macrostrati al processo di inversione della curva HVSR estratta dai dati.

La frequenza di risonanza  $f_0$  di una copertura di materiale omogeneo e di spessore  $H$ , sovrapposta a un basamento rigido in condizioni di stratificazione piana, assumendo un comportamento elastico-lineare, è data dalla formula:

$$f_0 = \frac{\overline{V_s}}{4H}$$

dove  $V_s$  è la velocità media delle onde S nel sedimento.

Utilizzando questa relazione approssimata è possibile stimare, a partire dalla frequenza di risonanza ricavata dall'analisi HVSR, lo spessore della copertura una volta nota la velocità media delle onde di taglio  $V_s$  o, viceversa, la velocità media se lo spessore  $H$  è noto.

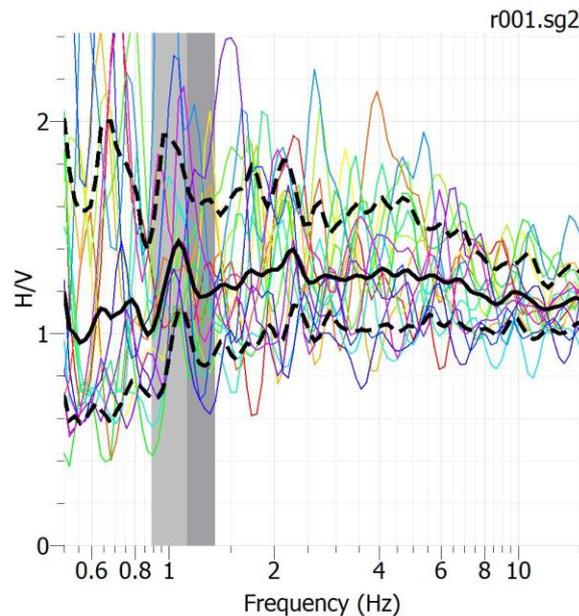
Eventuali picchi multipli presenti nello spettro dei rapporti HVSR possono essere ricondotti a determinate profondità (stimate) sfruttando questa stessa equazione; inoltre con questo sistema si può verificare che un determinato picco in frequenza corrisponda effettivamente ad uno dei salti di impedenza desunti.

Studi teorici dimostrano che le frequenze di picco ricavate dalle curve H/V corrispondono alle frequenze di risonanza della funzione di trasferimento, mentre l'ampiezza delle curve H/V non consente di stimare l'ampiezza della funzione di trasferimento.

L'eventuale assenza di massimi della funzione H/V suggerisce la mancanza di fenomeni di amplificazione sismica, dovuti a risonanze per rilevanti contrasti di impedenza.

### 3.2.2. Risultati

Nel caso specifico è stata registrata ed interpretata una prova HVSR. Di seguito si riportano i risultati della prova HVSR che mostra un picco a circa **1.12 Hz**.



## 4. Analisi della risposta sismica locale

Di seguito verrà illustrata nel dettaglio l'Analisi di Risposta Sismica Locale, finalizzata alla progettazione di un edificio rilevante. Verranno descritti tutti i passaggi sia per la preliminare acquisizione dei parametri di input (sismici e geologico-tecnici) sia per la successiva analisi di Risposta Sismica Locale. A tale proposito, l'analisi di Risposta Sismica Locale è stata svolta con il software Geostru RSL III 2016, analizzando lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (**SLV**) e gli Stati Limite di Esercizio **SLD** (*Stato Limite di Danno*) e **SLO** (*Stato Limite di Operatività*) e secondo gli indirizzi regionali (Allegato 5 alla d.g.r. 30 novembre 2011 n. IX/2616).

Il processo di analisi prevede:

- Estrazione degli accelerogrammi naturali da utilizzare come input sismici opportunamente scalati al valore di accelerazione del sito;
- Definizione del modello sismostratigrafico (spessori,  $V_s$ , peso di volume, densità, curve  $G/G_0$  e  $\xi$ );
- Calcolo dello spettro di risposta di input;
- Trasformazione del moto di input dal dominio del tempo al dominio delle frequenze (spettro di Fourier);
- Esecuzione dell'analisi: sulla base del modello sismostratigrafico e quindi della funzione di trasferimento tipica del sito, lo spettro di input sarà modificato nell'attraversare il profilo;
- Alla fine dell'analisi sarà definito uno spettro di output, relativo alla modifica dello spettro di input sulla base delle caratteristiche geologico-tecniche del sito;
- Mediante antitrasformata di Fourier sarà definito l'accelerogramma di output, tramite il quale il programma calcolerà lo spettro di risposta di output.

## 4.1. Definizione input sismico

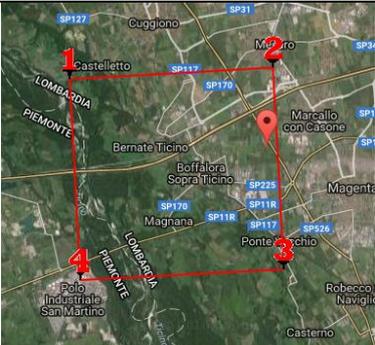
Per la definizione dell'input sismico di modellazione della RSL è necessario definire i parametri sismici di base del sito e almeno 5 accelerogrammi di riferimento con caratteristiche compatibili con il sito in esame.

### 4.1.1. Parametri sismici di base

La prima informazione necessaria è quella di definire i parametri sismici di base del sito e in particolar modo l'accelerazione di base (**ag**) del sito di progetto, al valore della quale bisognerà scalare gli accelerogrammi costituenti l'input sismico. Per la definizione dei parametri sismici di base sono necessarie alcune informazioni relative al progetto e alla sua localizzazione spaziale:

- 1) **Coordinate del sito** in gradi sessadecimali e nel sistema di riferimento ED50;
- 2) **Vita di riferimento (Vr)** come moltiplicazione della Vita nominale (**Vn**) e del Coefficiente d'uso (**Cu**) derivanti dalla scelta progettuale;
- 3) **Stati limite** del progetto, a cui corrispondono differenti **ag** in funzione dei differenti periodi di ritorno **Tr**.

La definizione dei parametri sismici di base è stata effettuata utilizzando il foglio di calcolo Spettri-NTCver.1.0.3 rilasciato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Sito di riferimento	Coordinate geografiche ellissoide ED50			
	Numero sito	ID sito (allegato B NTC)	Latitudine	Longitudine
	1	12033	45.4934 [°]	8.7870 [°]
	2	12034	45.4961 [°]	8.8581 [°]
	3	12256	45.4462 [°]	8.8620 [°]
	4	12255	45.4435 [°]	8.7910 [°]

Sito in esame	Coordinate ED50	Lat. 45,476164 [°]	Long. 8,855917 [°]

Da quanto fornito dai progettisti i dati riferiti al progetto sono:

Tipo di costruzione	2
Classe d'uso	III
Coefficiente Cu	1,5
Vita nominale (anni) Vn	50
Periodo di riferimento (anni) Vr	75

### FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE:       LATITUDINE:

Ricerca per comune

REGIONE:       PROVINCIA:       COMUNE:

**Elaborazioni grafiche**

Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

**Elaborazioni numeriche**

Tabella parametri

**Nodi del reticolo intorno al sito**



**Reticolo di riferimento**



**Controllo sul reticolo**

Sito esterno al reticolo

Interpolazione su 3 nodi

Interpolazione corretta

**Interpolazione**

superficie rigata

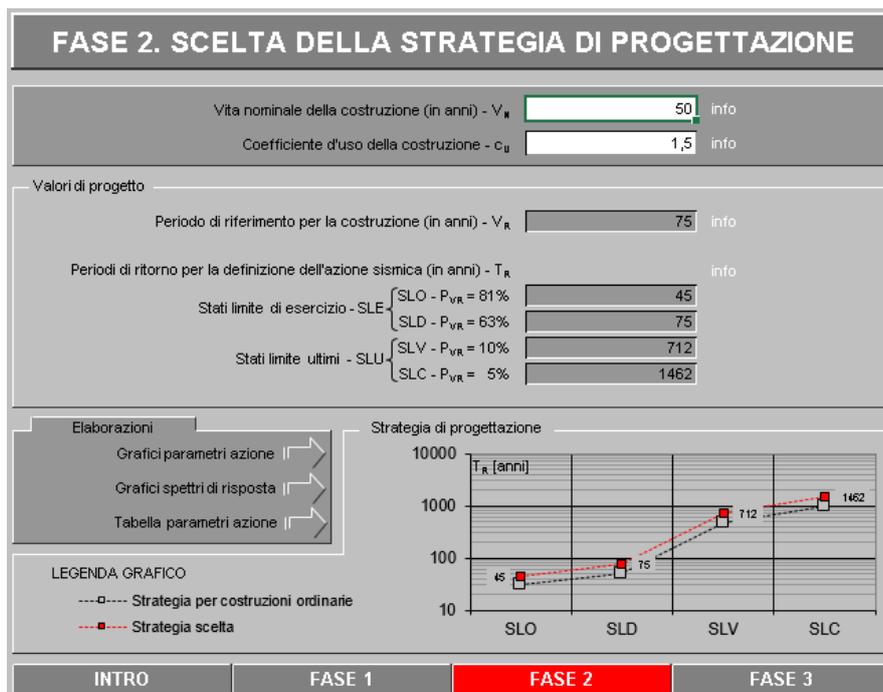
La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, a "Ricerca per coordinate".

INTRO      **FASE 1**      FASE 2      FASE 3

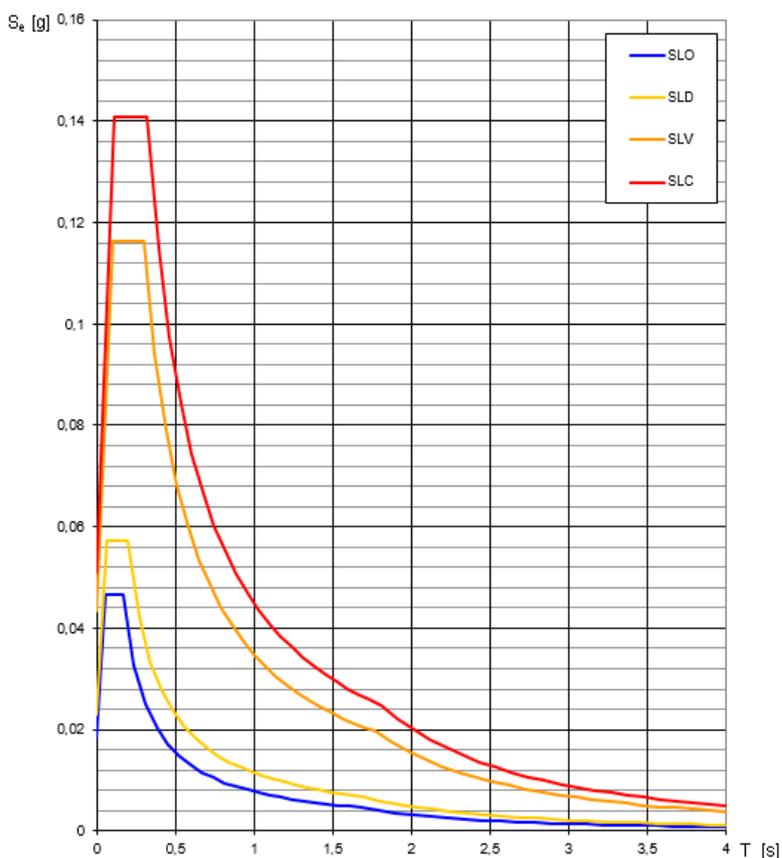
Fig. 4.1 – Spettri NTC, definizione parametri sismici: individuazione della pericolosità del sito

Tab.4.1-Valori dei parametri $a_g$ , $F_0$ , $T_c^*$ per i periodi di ritorno di riferimento $T_r$			
$T_r$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$	$T_c^*$ [s]
30	0,016	2,538	0,160
50	0,019	2,521	0,168
72	0,022	2,490	0,198
101	0,026	2,583	0,209
140	0,029	2,594	0,223
201	0,032	2,616	0,236
475	0,039	2,660	0,288
975	0,047	2,705	0,308
2475	0,057	2,815	0,332

$T_r$ = tempo di ritorno;  $a_g$ = accelerazione massima al sito;  $F_0$ = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;  $T_c^*$ = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.



**Fig. 4.2** – Spettri NTC, definizione parametri sismici: strategia di progettazione



**Fig. 4.3** – Spettri NTC, definizione parametri sismici: spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite

Tab.4.2-Valori dei parametri sismici per i periodi di ritorno $T_r$ associati a ciascuno Stato Limite				
Stato Limite	Parametri sismici			
	$T_r$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$	$T_c^*$ [s]
Operatività (SLO)	45	<u>0,019</u>	2,524	0,166
Danno (SLD)	75	<u>0,023</u>	2,503	0,200
Salvaguardia vita (SLV)	712	<u>0,043</u>	2,685	0,299
Prevenzione collasso (SLC)	1492	0,051	2,752	0,318

$T_r$ = tempo di ritorno;  $a_g$ = accelerazione massima al sito;  $F_o$ = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;  $T_c^*$ = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Ipotizzando di lavorare per lo Stato Limite Ultimo **SLV** (*Stato Limite di Salvaguardia della Vita*) e per gli Stati Limite di esercizio **SLD** (*Stato Limite di Danno*) e **SLO** (*Stato Limite di Operatività*), i valori di  $a_g$  da adottare per scalare gli accelerogrammi di input sono:

SLV  $a_g=0,043$  g

SLD  $a_g=0,023$  g

SLO  $a_g=0,019$  g

Le NTC08, in presenza di azioni sismiche, richiedono le verifiche allo SLO solo per gli elementi non strutturali e per gli impianti di strutture di classi d'uso III e IV (NTC08, punto 7.1). Lo SLO si utilizza anche come riferimento progettuale per quelle opere che devono restare operative durante e subito dopo il terremoto. Le verifiche allo SLC sono, invece, richieste solo per le costruzioni o ponti con isolamento e/o dissipazione (NTC08, punto 7.10).

#### 4.1.2. Accelerogrammi di input

Regione Lombardia, nell'ambito della definizione di procedure per la valutazione degli effetti sismici di sito nel territorio lombardo, ha selezionato una serie di accelerogrammi (diagramma in funzione del tempo che rappresenta le accelerazioni al suolo in un dato sito) registrati da utilizzare nell'analisi di Risposta Sismica Locale di III livello.

Il territorio regionale è stato suddiviso in 8 fasce nelle quali i comuni presentano valori di accelerazione massima attesa al suolo e valori dell'ordinata spettrale massima compresi in un range del  $\pm 10\%$  del valore medio. Per ognuna di queste fasce sono stati selezionati 5 accelerogrammi rappresentativi della sismicità del sito in analisi, compatibili con le caratteristiche sismogenetiche della sorgente, con coppia magnitudo-distanza dalla sorgente e con la massima accelerazione orizzontale attesa e registrate su bedrock sismico. La scelta degli accelerogrammi si è avvalsa della banca dati accelerometrica di eventi italiani ITACA (Luzi L., Sabetta F., 2006).

Coerentemente con quanto previsto dalle NTC2008 e dalla circolare esplicativa, sono stati individuati gli eventi sismici compatibili con le caratteristiche sismogenetiche della sorgente, per il territorio lombardo, che prevedono un meccanismo prevalentemente compressivo, con profondità comprese tra 8-12 km, caratterizzati da una magnitudo massima attesa di 5.5 e distanze epicentrali variabili tra 5-80 km.

Per ogni fascia, quindi, sono stati messi a disposizione 5 accelerogrammi registrati da utilizzare nelle analisi dinamiche dei sistemi geotecnici.

Il Comune di Marcallo con Casone, come da elenco di Regione Lombardia, appartiene alla Fascia 1.

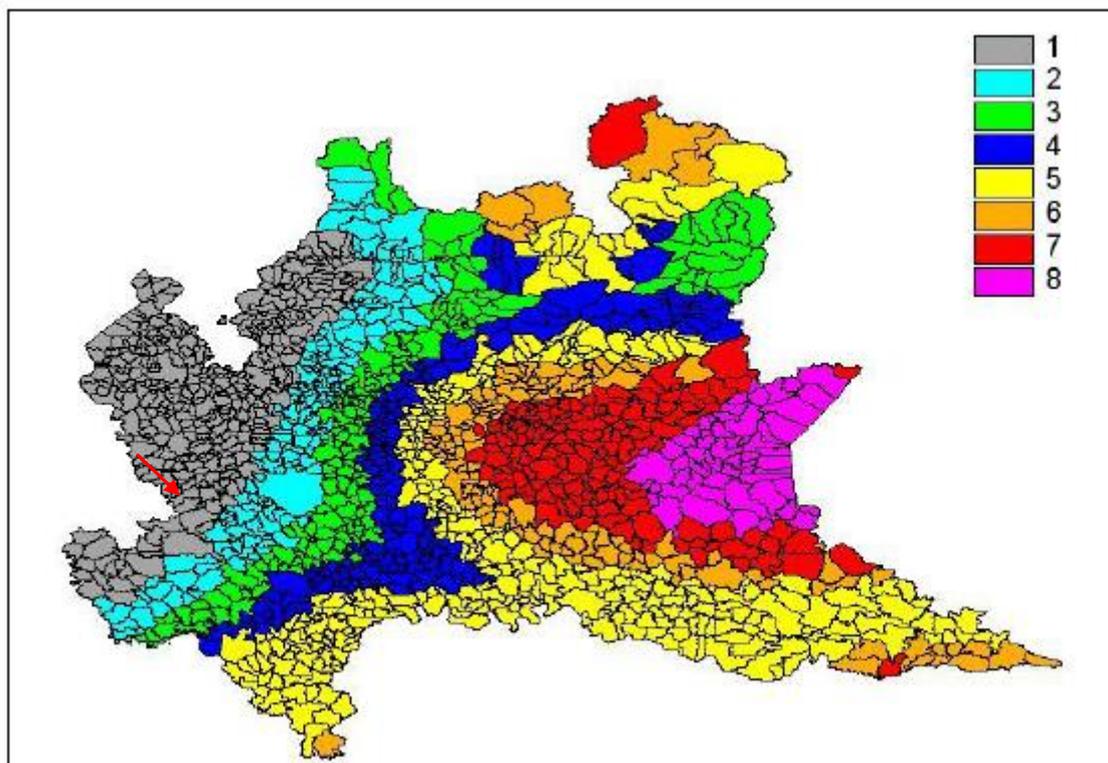


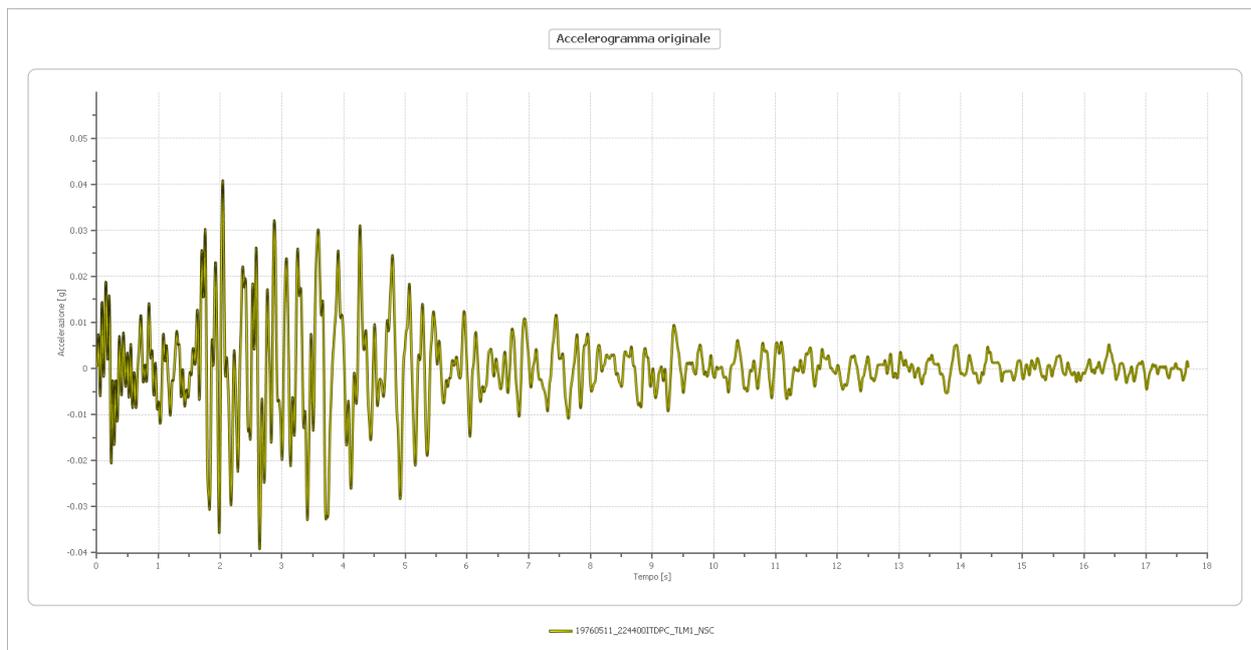
Fig. 4.4 – Mappa del raggruppamento dei comuni nelle 8 fasce. Il Comune di Marcallo con Casone è indicato con la frecci rossa

Nella tabella seguente vengono riportati gli accelerogrammi di input di Fascia 1 e le relative caratteristiche delle stazioni di misura.

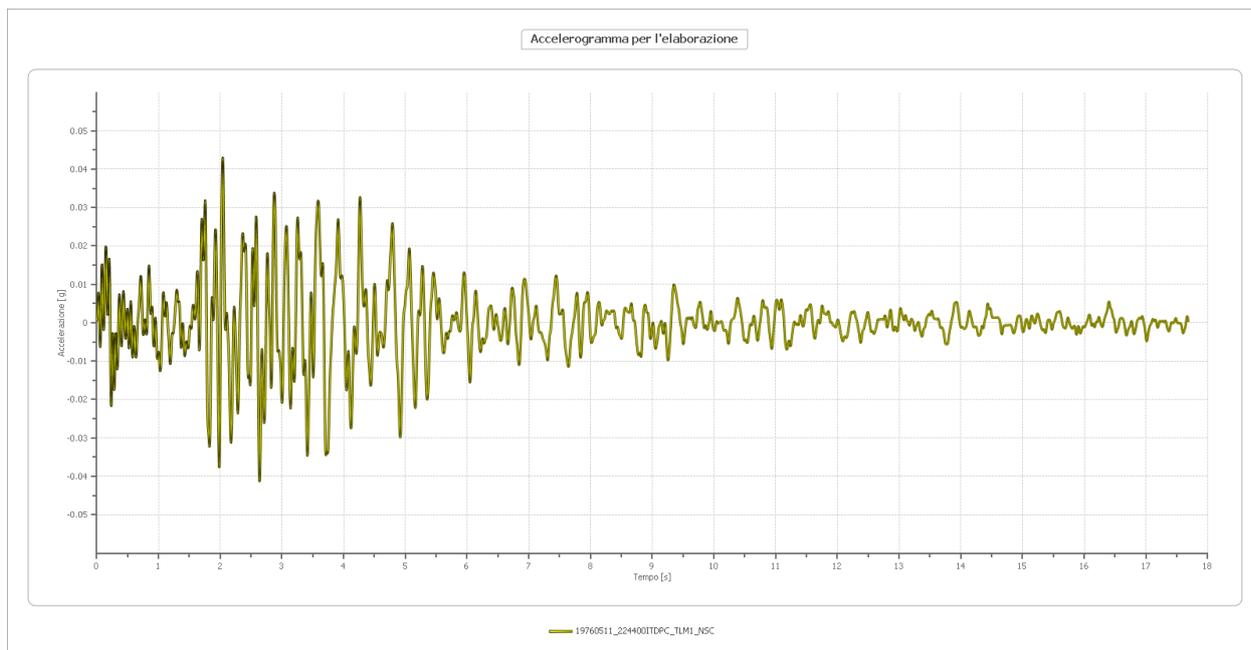
ID staz.	Nome	Comune	Litologia	Accelerogramma
TLM1	Tolmezzo centrale-Diga Ambiesta 1	Verzegnis	Calcari dolomitici con intensa fratturazione	19760511_224400ITDPC_TLM1_NSC
SMT	Somplago Centrale-Cunicolo Pompe	Cavazzo Carnico		19760911_163501ITDPC_SMT_NSC
SMT	Somplago Centrale-Cunicolo Pompe	Cavazzo Carnico		19770916_234807ITDPC_SMT_WEC
GVD	Gavardo-Gazzino Vallio Terme	Vallio Terme	Dolomia Principale	20041124_225939ITDPC_GVD_NSC
GVD	Gavardo-Gazzino Vallio Terme	Vallio Terme		20041124_225939ITDPC_GVD_WEC

Gli accelerogrammi sono stati opportunamente scalati e normalizzati in ragione dello Stato Limite considerato, in modo che il PGA (Peak Ground Acceleration o Picco in accelerazione) di input corrisponda al valore di  $a_g$ , come riportato in tabella 4.2.

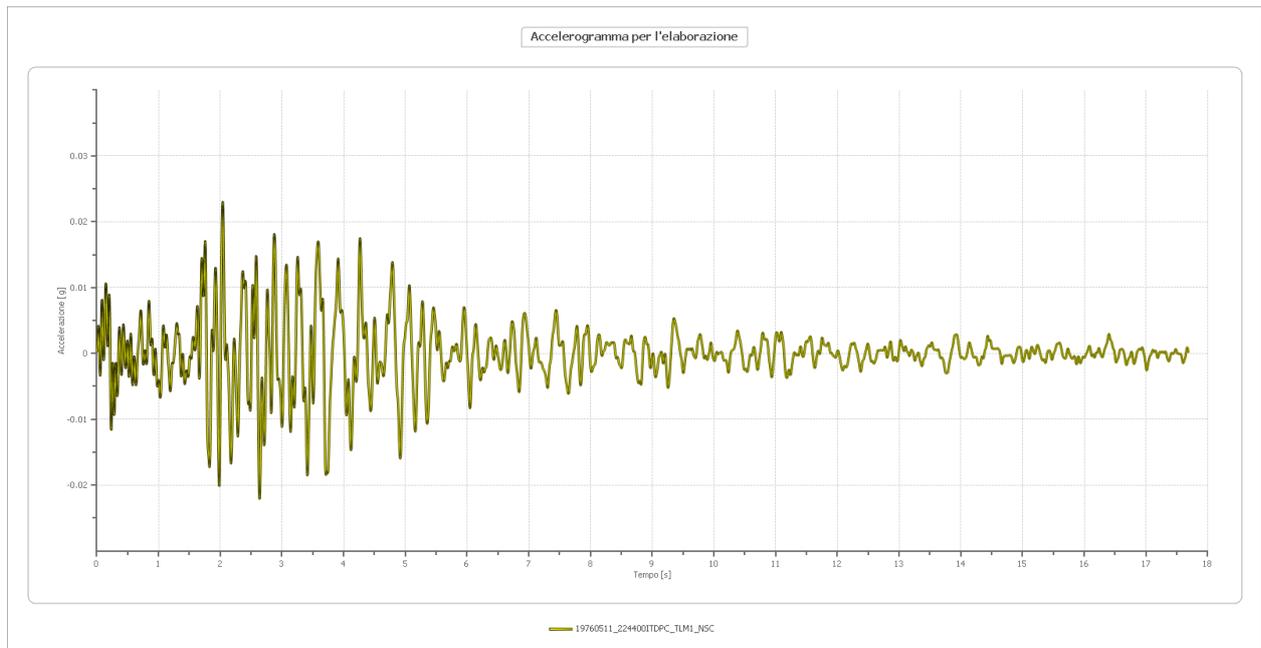
Di seguito si riportano gli accelerogrammi originali e i rispettivi accelerogrammi scalati per l'elaborazione.



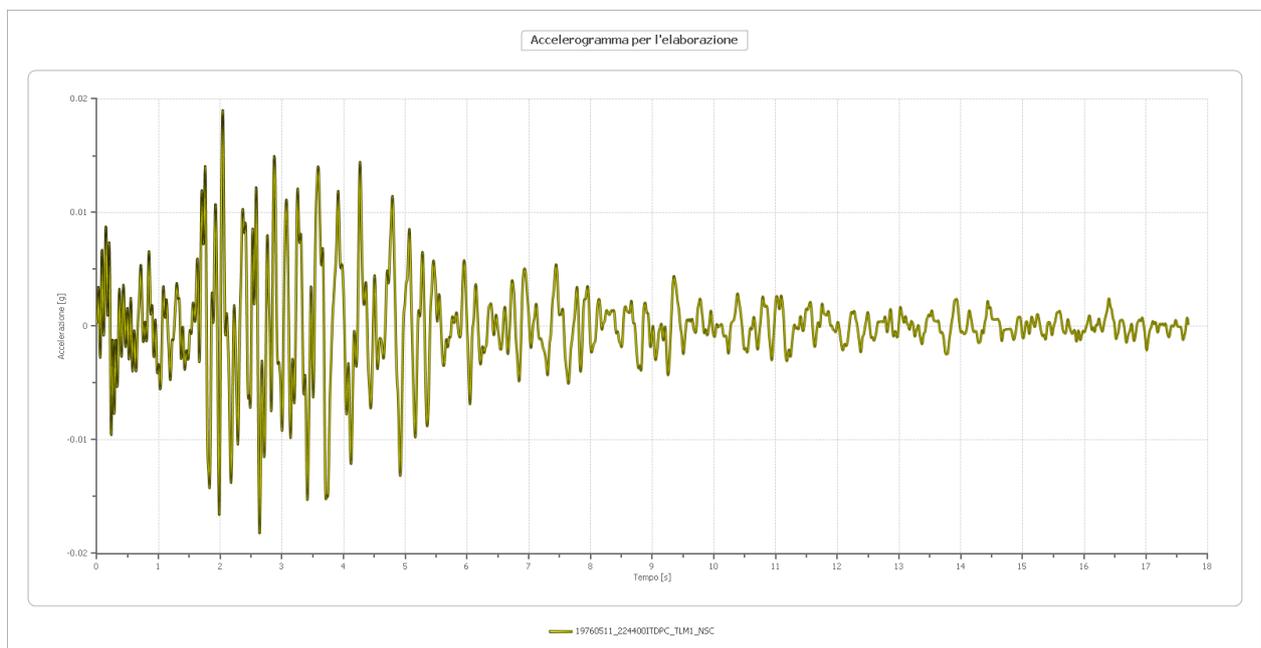
**Fig. 4.5** – Accelerogramma originale 19760511\_224400ITDPC\_TLM1\_NSC



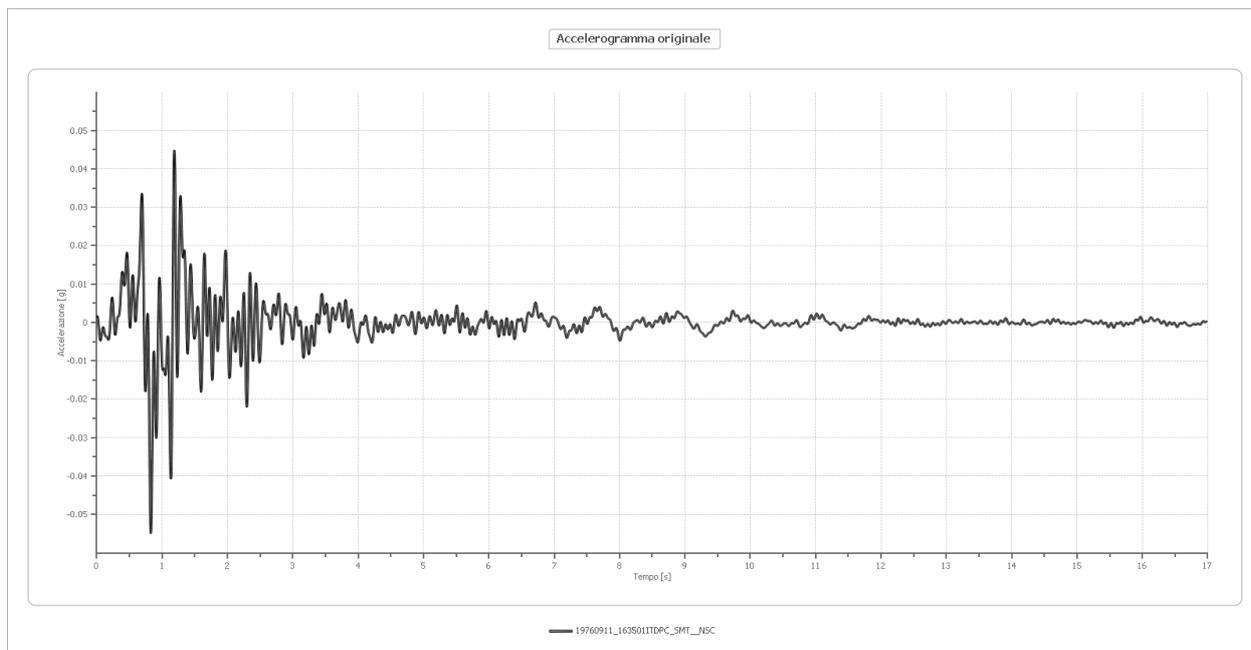
**Fig. 4.6** – Accelerogramma 19760511\_224400ITDPC\_TLM1\_NSC scalato per l'elaborazione (SLV:  $ag=0,043$ )



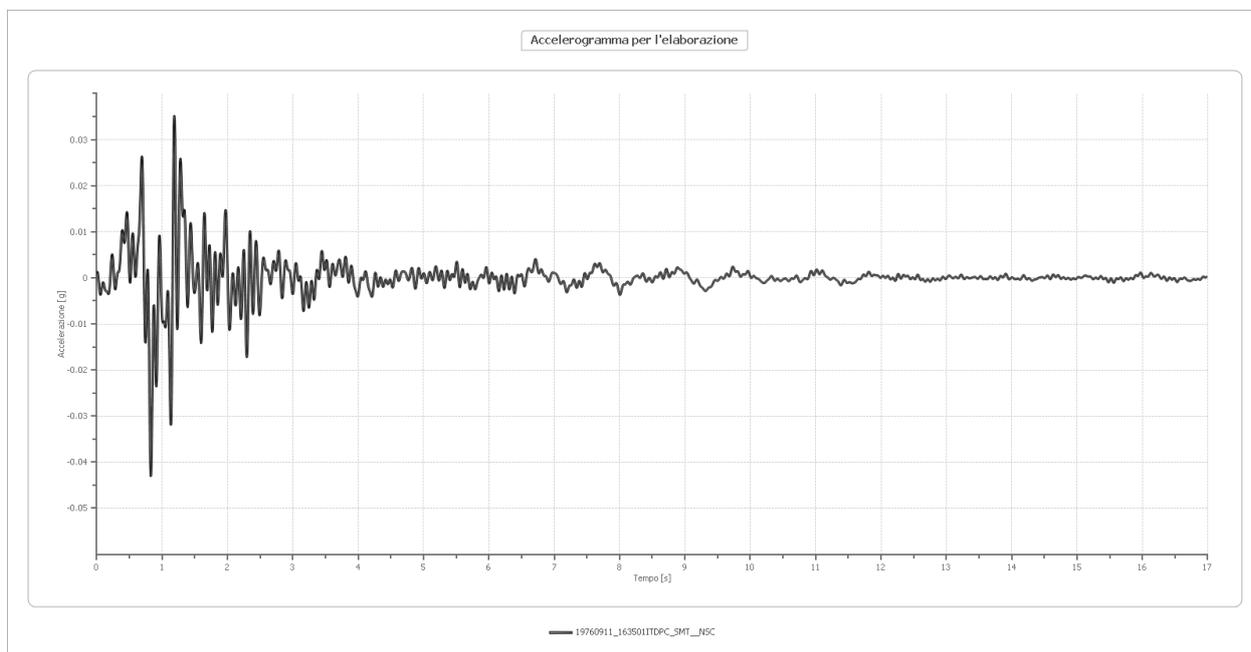
**Fig. 4.7** – Accelerogramma 19760511\_224400ITDPC\_TLM1\_NSC scalato per l'elaborazione (SLD:  $ag=0,023$ )



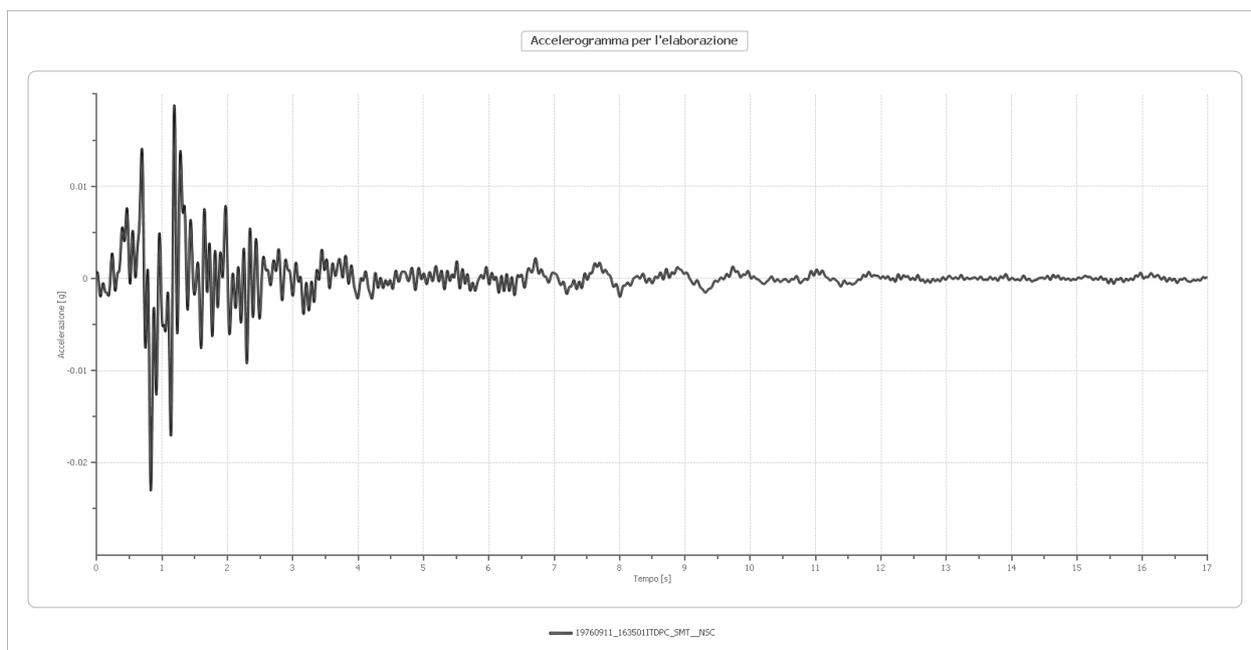
**Fig. 4.8** – Accelerogramma 19760511\_224400ITDPC\_TLM1\_NSC scalato per l'elaborazione (SLO:  $ag=0,019$ )



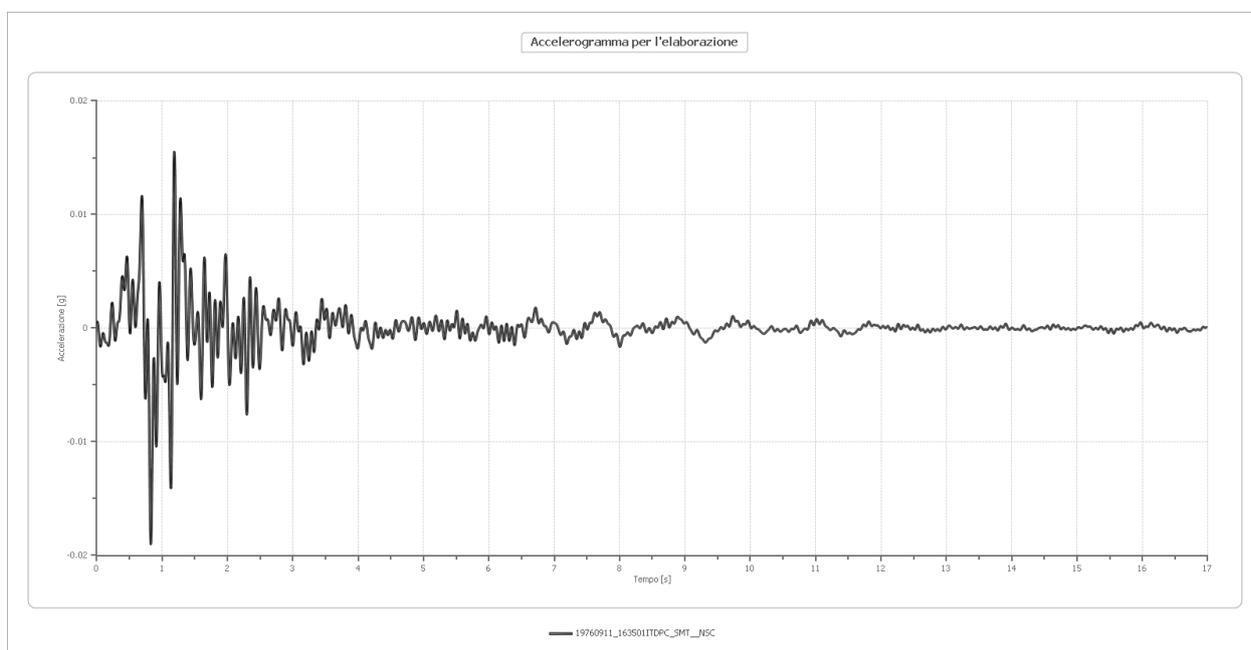
**Fig. 4.9** – Accelerogramma originale 19760911\_163501TDPC\_SMT\_\_NSC



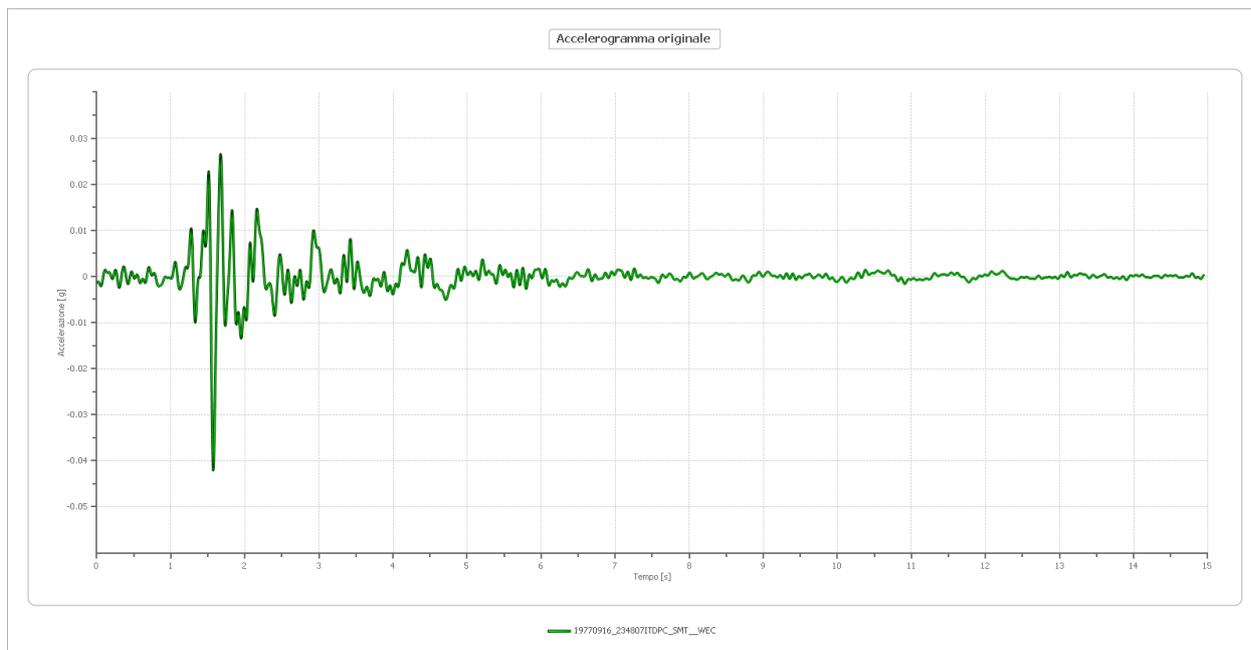
**Fig. 4.10** – Accelerogramma 19760911\_163501TDPC\_SMT\_\_NSC scalato per l'elaborazione (SLV:  $ag=0,043$ )



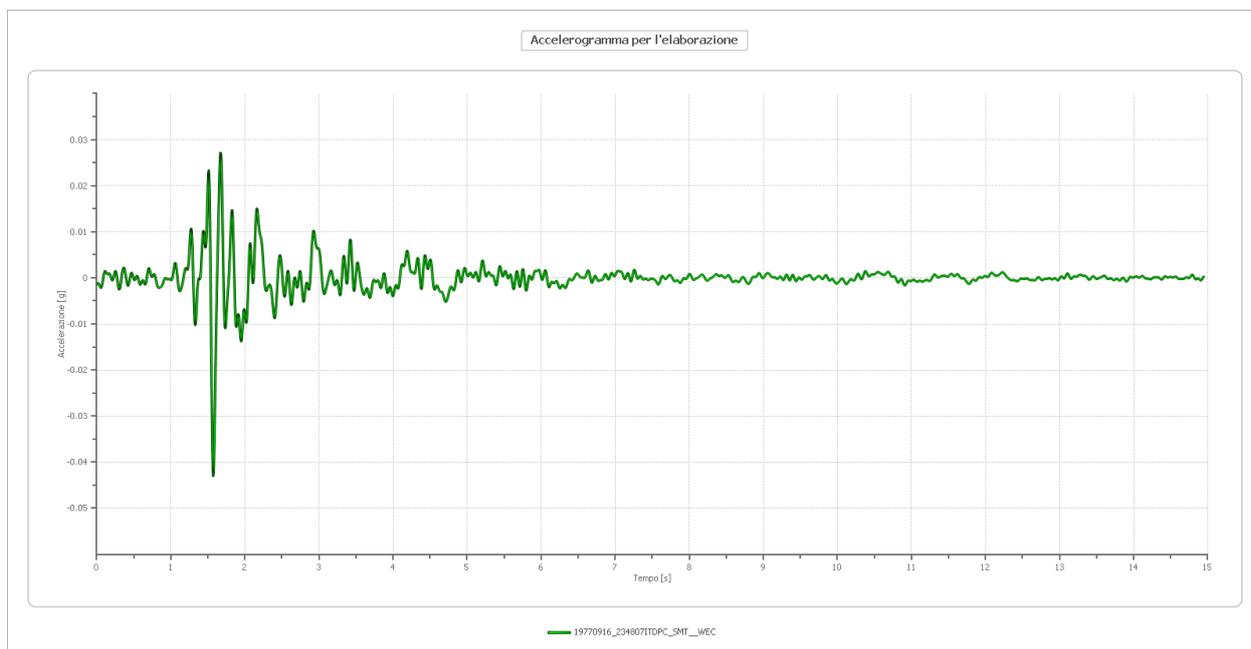
**Fig. 4.11** – Accelerogramma 19760911\_163501ITDPC\_SMT\_\_NSC scalato per l'elaborazione (SLD:  $a_g=0,023$ )



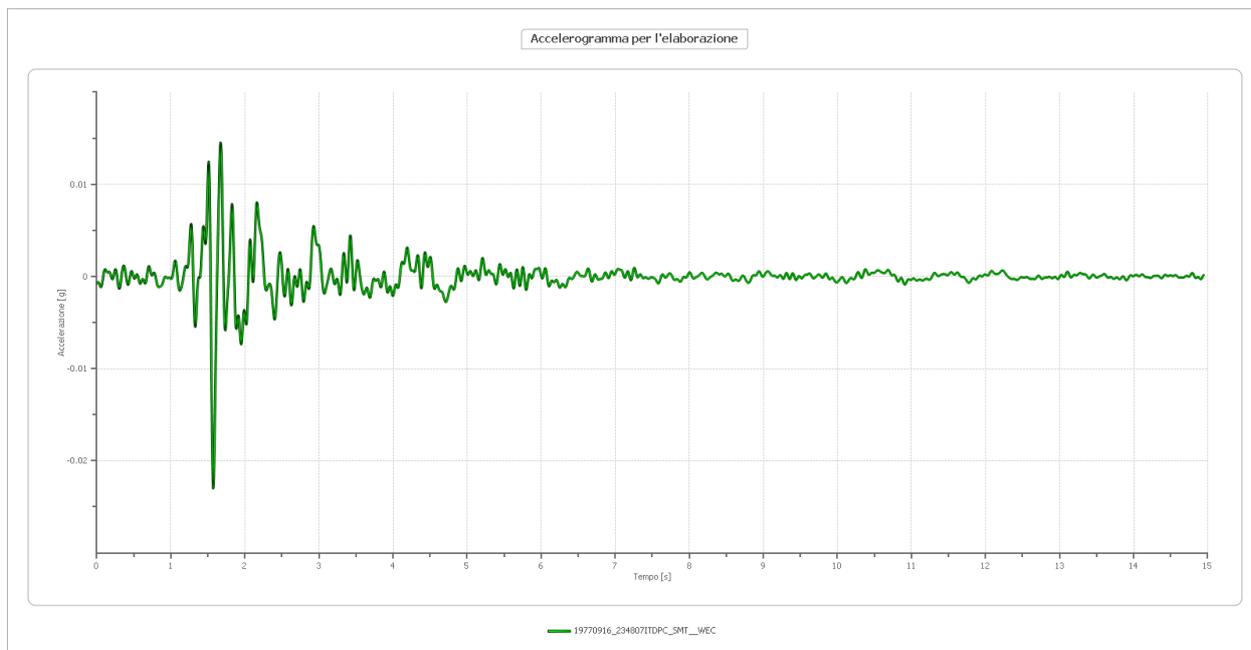
**Fig. 4.12** – Accelerogramma 19760911\_163501ITDPC\_SMT\_\_NSC scalato per l'elaborazione (SLO:  $a_g=0,019$ )



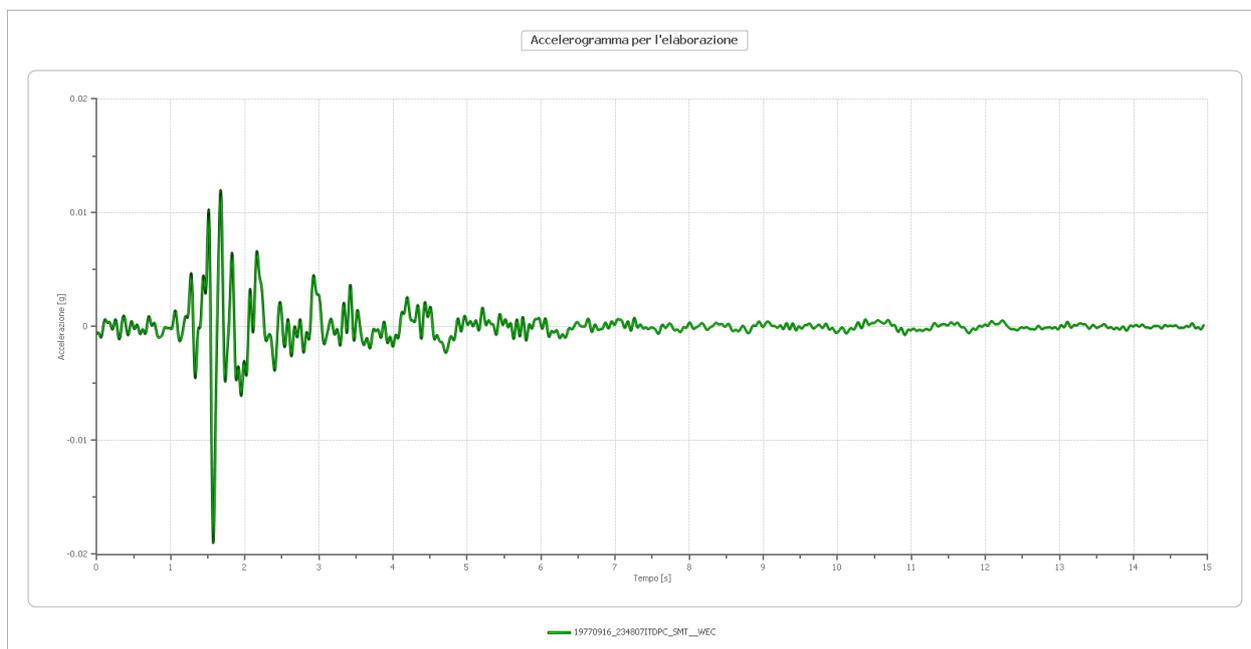
**Fig. 4.13** – Accelerogramma originale 19770916\_234807ITDPC\_SMT\_\_WEC



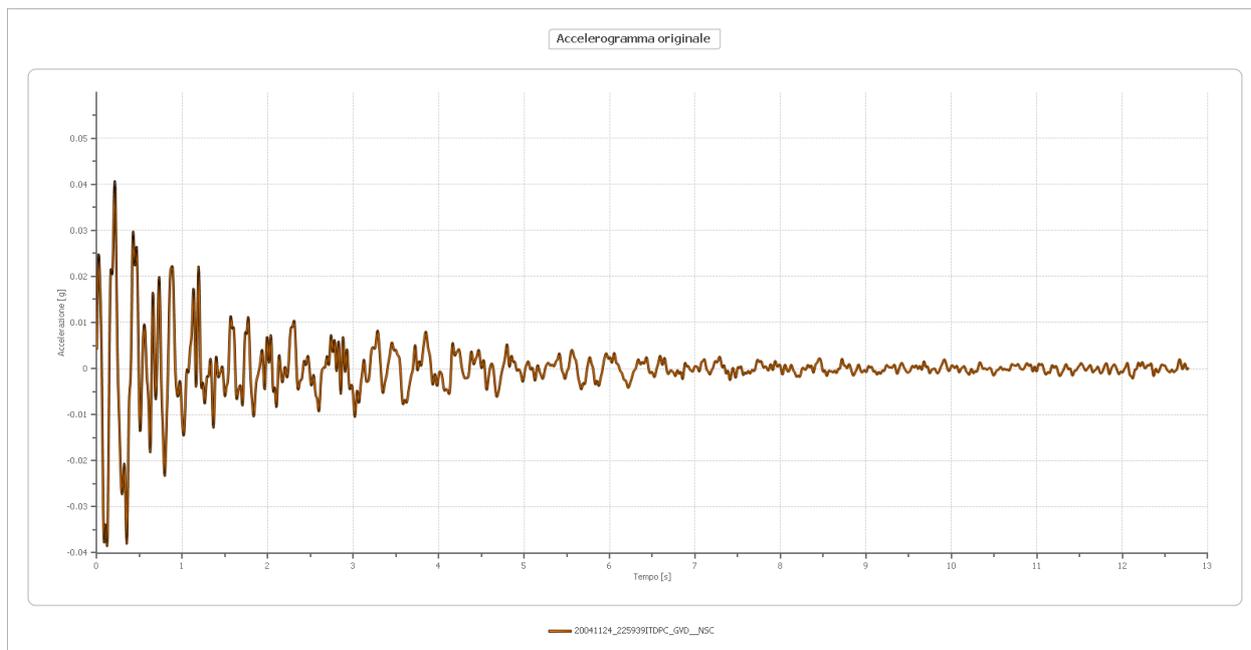
**Fig. 4.14** – Accelerogramma 19770916\_234807ITDPC\_SMT\_\_WEC scalato per l'elaborazione (SLV:  $ag=0,043$ )



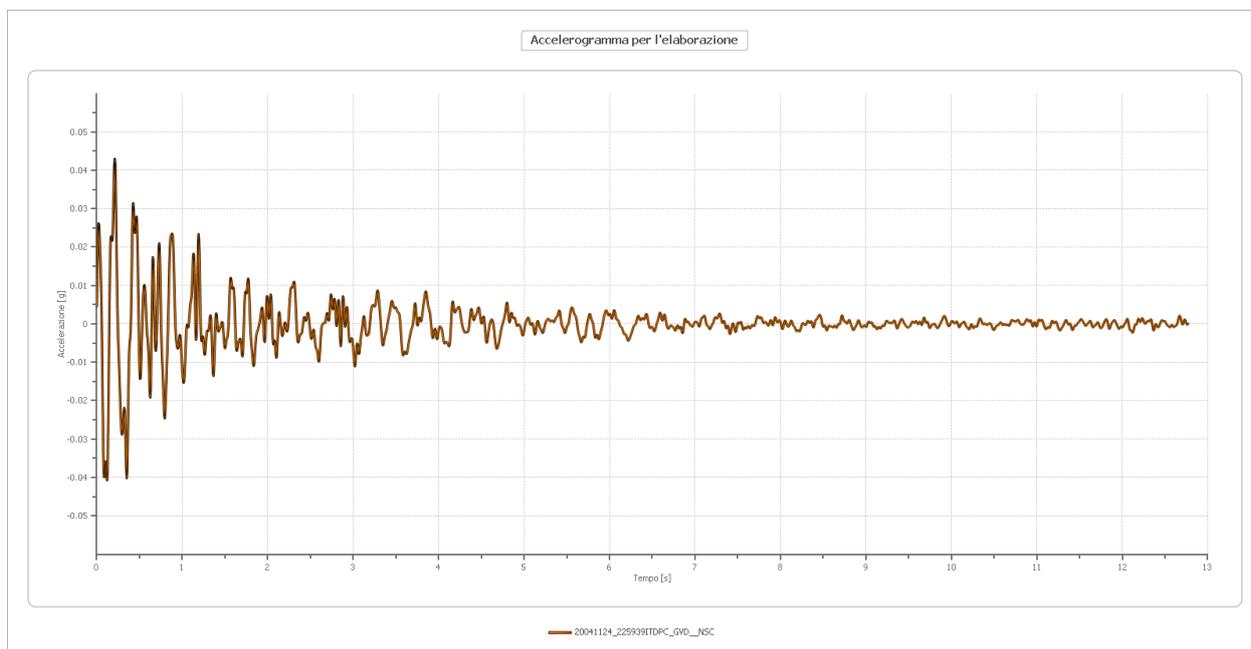
**Fig. 4.15** – Accelerogramma 19770916\_234807ITDPC\_SMT\_\_WEC scalato per l'elaborazione (SLD:  $a_g=0,023$ )



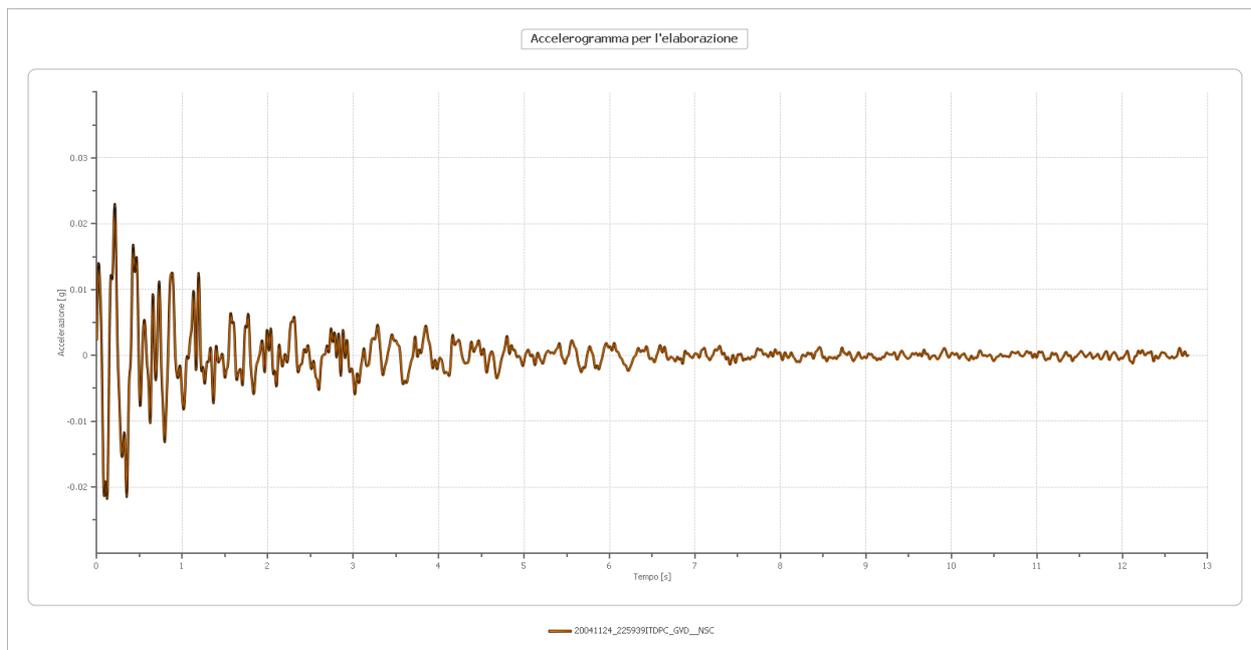
**Fig. 4.16** – Accelerogramma 19770916\_234807ITDPC\_SMT\_\_WEC scalato per l'elaborazione (SLO:  $a_g=0,019$ )



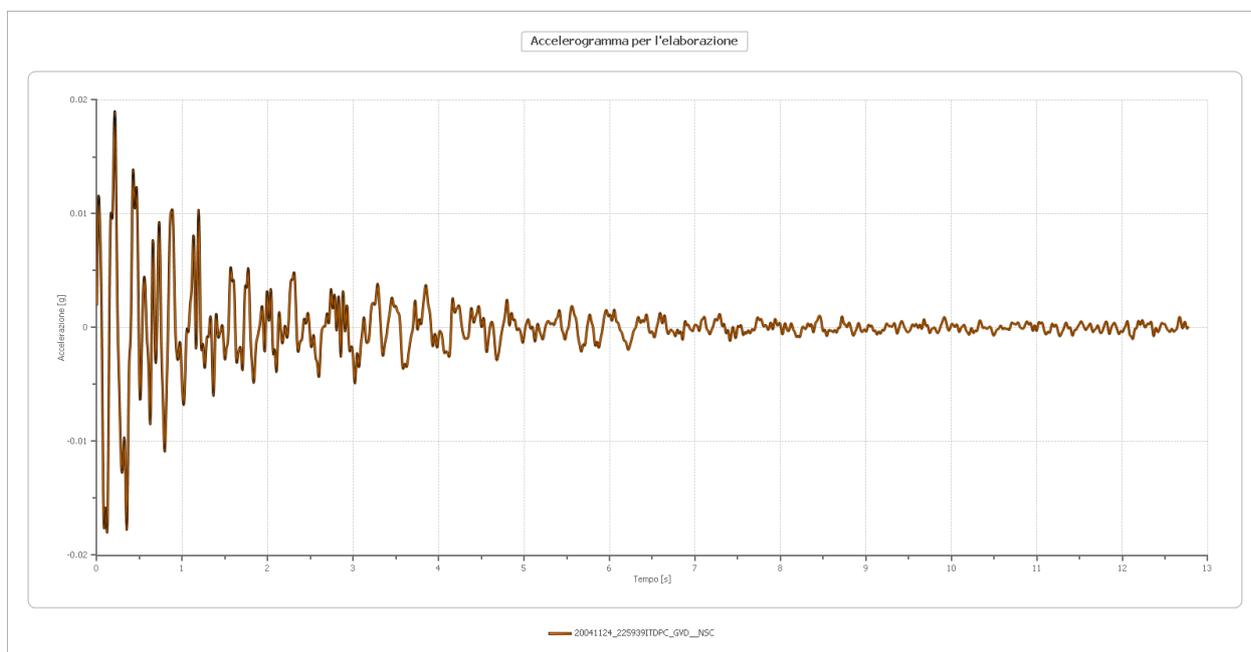
**Fig. 4.17** – Accelerogramma originale 20041124\_225939ITDPC\_GVD\_\_NSC



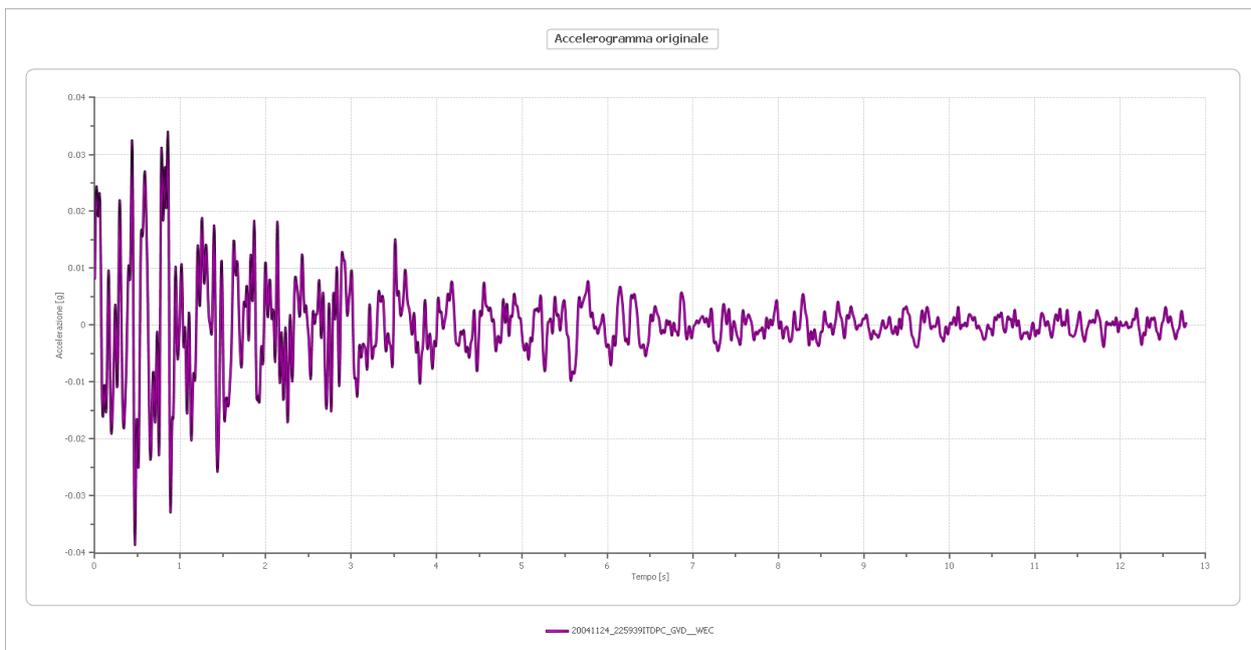
**Fig. 4.18** – Accelerogramma 20041124\_225939ITDPC\_GVD\_\_NSC scalato per l'elaborazione (SLV:  $a_g=0,043$ )



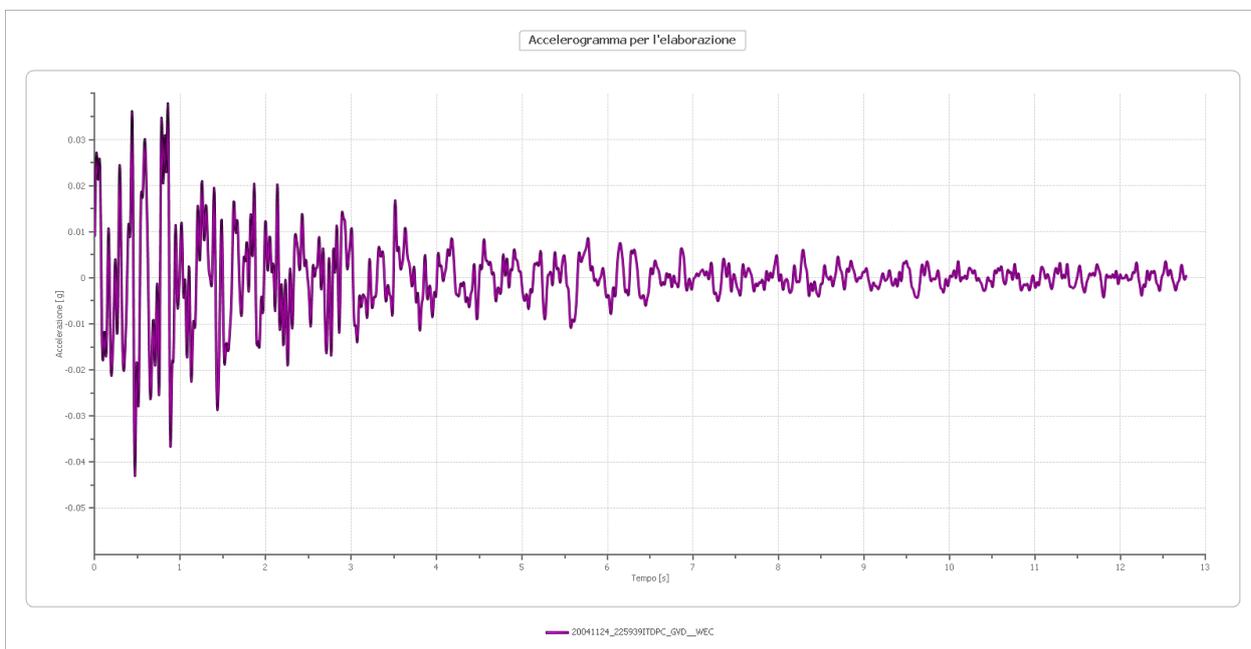
**Fig. 4.19** – Accelerogramma 20041124\_225939ITDPC\_GVD\_\_NSC scalato per l'elaborazione (SLD:  $a_g=0,023$ )



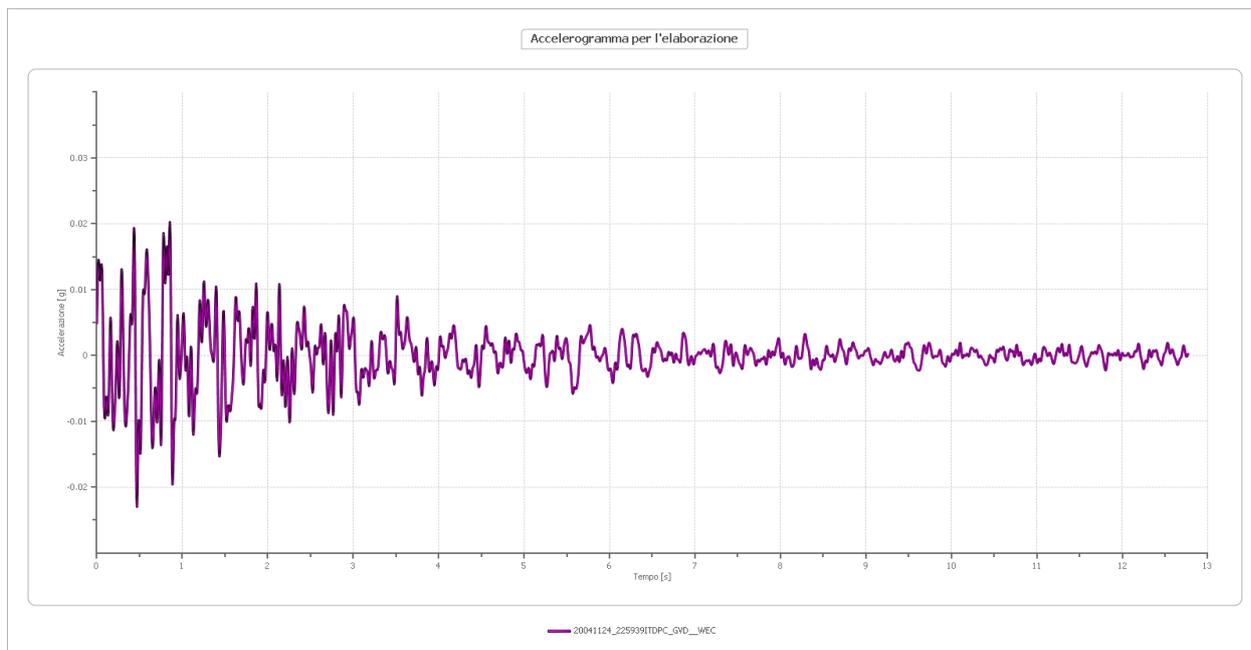
**Fig. 4.20** – Accelerogramma 20041124\_225939ITDPC\_GVD\_\_NSC scalato per l'elaborazione (SLO:  $a_g=0,019$ )



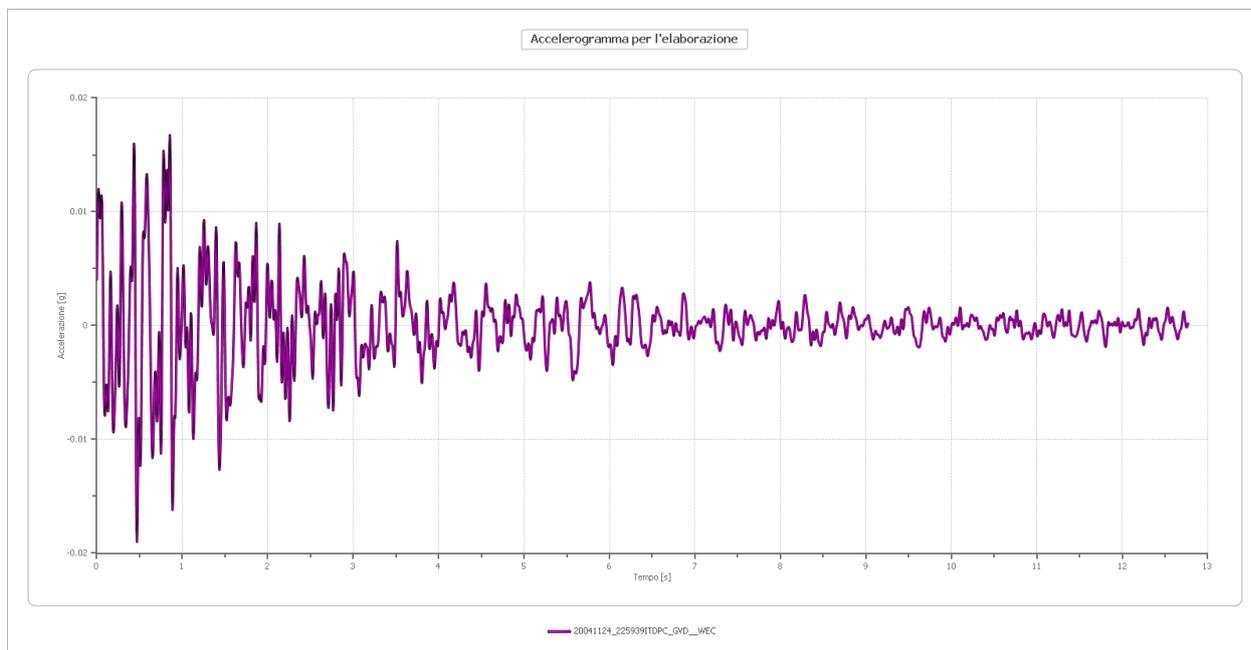
**Fig. 4.21** – Accelerogramma originale 20041124\_225939ITDPC\_GVD\_WEC



**Fig. 4.22** – Accelerogramma 20041124\_225939ITDPC\_GVD\_WEC scalato per l'elaborazione (SLV:  $a_g=0,043$ )



**Fig. 4.23** – Accelerogramma 20041124\_225939ITDPC\_GVD\_\_WEC scalato per l'elaborazione (SLD:  $a_g=0,023$ )



**Fig. 4.24** – Accelerogramma 20041124\_225939ITDPC\_GVD\_\_WEC scalato per l'elaborazione (SLO:  $a_g=0,019$ )

## 4.2. Modello sismostratigrafico di input

Definito l'input in termini di eventi sismici da sottoporre a simulazione, sono state determinate, con riferimento ai risultati delle analisi geofisiche, le caratteristiche sismostratigrafiche del volume di terreno d'indagine ed oggetto della probabile amplificazione.

Il modello fisico consiste in **N** strati piani e paralleli, di estensione orizzontale infinita, su un semispazio (bedrock). Ogni strato considerato omogeneo e isotropo, è caratterizzato dallo spessore **h**, dal peso di volume, dalla velocità delle onde di taglio **V<sub>s</sub>** e da curve deformazione-**G/G<sub>0</sub>**-smorzamento **ξ**.

Sismostrato	Prof. (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	Peso di volume (KN/Mc)
1	0,0-4,0	200,33	19,61
2	4,0-14,0	323,72	19,79
3	14,0-30,0	577,3	21,13

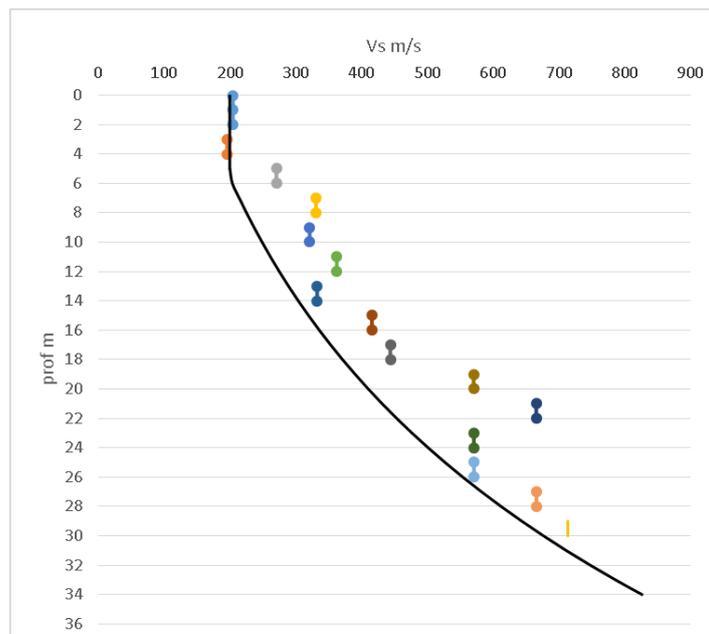
L'indagine sismica non ha raggiunto velocità comparabili con quelle del substrato sismico ( $V_s > 800$  m/s), pertanto è stato elaborato un opportuno gradiente di  $V_s$  e Peso di Volume con la profondità sulla base dei dati ottenuti dall'indagine (cfr tabella par. 3.1.5), tale da permettere il raggiungimento di 800 m/s.

Pertanto la sismostratigrafia utilizzata per l'analisi di Risposta Sismica Locale è riportata nella tabella seguente:

Sismostrato	Prof. (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	Peso di volume (KN/Mc)
1	0,0-4,0	200,33	19,61
2	4,0-14,0	323,72	19,79
3	14,0-34,0	615,43	21,31
4	>34,0	>800	>22

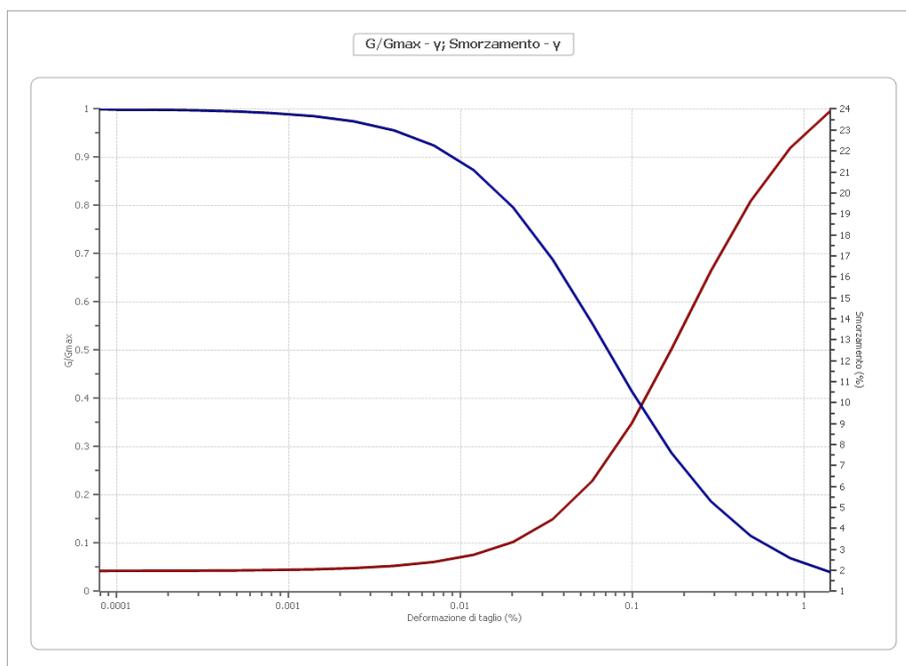
Per l'attribuzione delle curve deformazione-**G/G<sub>0</sub>**-smorzamento **ξ** ci si è avvalsi delle indicazioni proposte da Regione Lombardia (database curve\_lomb.xls).

Interpolando i dati sismici rilevati con le curve di valutazione previste per l'analisi di II livello, si ricava che i materiali in sito rientrano nel campo di validità della scheda limo argillosa 2, come evidente nella figura seguente.



**Fig. 4.25** – Scheda limo argillosa 2 con riportati i dati rilevati dall'analisi sismica Down-Hole

Pertanto si è deciso di attribuire ai materiali in sito, per l'analisi di Risposta Sismica Locale, le relative schede Deformazione-G/G0-Smorzamento  $\xi$ , anche se dalla stratigrafia dei terreni emersa dai sondaggi geognostici risultano depositi sabbioso ghiaiosi.



**Fig. 4.26** – Grafico Deformazione%, G/G0, Smorzamento (materiali limo argillosi; Regione Lombardia curve\_lomb.xls)

## 4.3. Risultati – Stato Limite SLV

### 4.3.1. Elaborazione

Numero di iterazioni 50  
 Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.45  
 Tipo di modulo elastico Shake  
 Massimo errore percentuale di convergenza --

### 4.3.2. Fattori di amplificazione

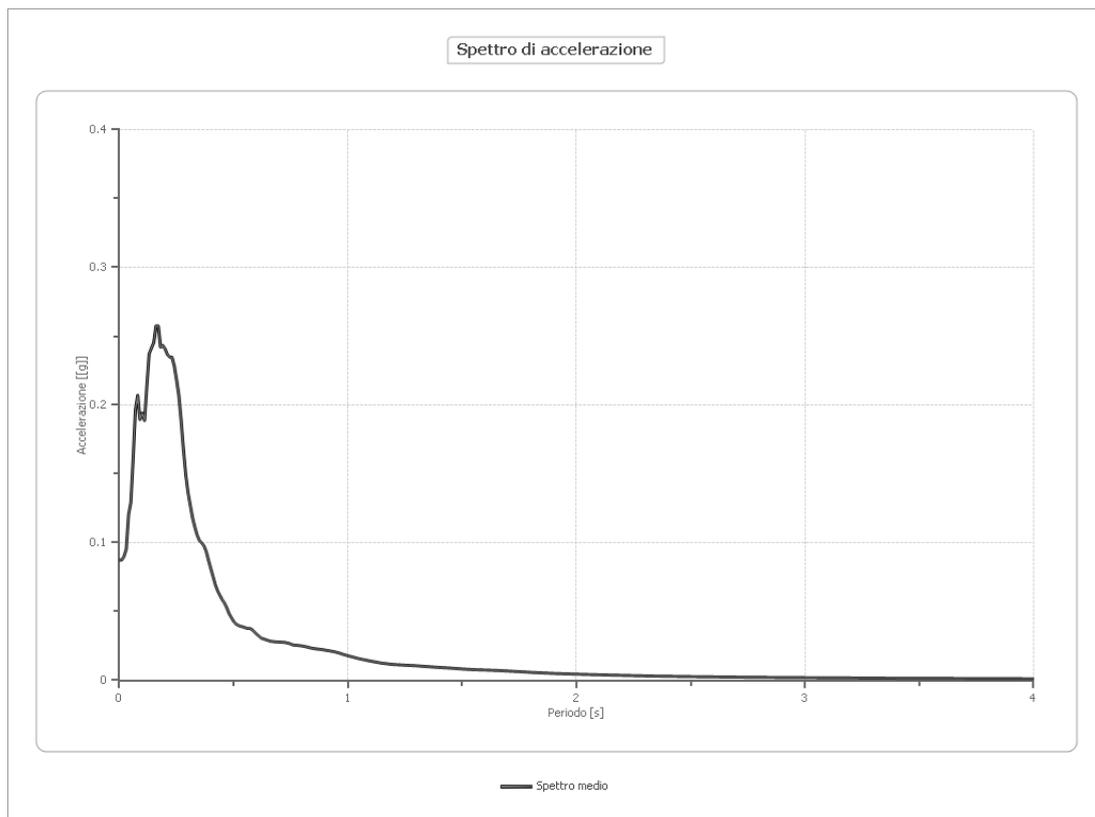
Tai	0.160 [s]
Tvi	0.260 [s]
Tao	0.170 [s]
Tvo	0.260 [s]
Sami	1.077 [m/s <sup>2</sup> ]
Svmi	0.038 [m/s]
Samo	2.253 [m/s <sup>2</sup> ]
Svmo	0.080 [m/s]
<b>Fa</b>	<b>2.093 [-]</b>
<b>Fv</b>	<b>2.111 [-]</b>
TB	0.094 [s]
TC	0.223 [s]
TD	1.772 [s]
SA(0)	0.096 [g]
SA(TB)	0.257 [g]

**Fa**: fattore di amplificazione relativo ai corti periodi, determinato intorno al periodo per cui si ha il massimo della risposta in accelerazione; **Fv**: fattore di amplificazione relativo ai periodi lunghi, determinato intorno al periodo per cui si ha la massima risposta in pseudovelocità.

### 4.3.3. Spettro medio di risposta elastico

Periodo [s]	Accelerazione [g]								
0.00	0.0874	0.26	0.2071	0.52	0.0399	0.98	0.0188	2.25	0.0035
0.01	0.0874	0.27	0.1889	0.53	0.0393	1.00	0.0179	2.30	0.0033
0.02	0.0900	0.28	0.1681	0.54	0.0389	1.05	0.0157	2.35	0.0031
0.03	0.0954	0.29	0.1497	0.55	0.0383	1.10	0.0139	2.40	0.0030
0.04	0.1204	0.30	0.1366	0.56	0.0377	1.15	0.0124	2.50	0.0027
0.05	0.1292	0.31	0.1273	0.57	0.0377	1.20	0.0115	2.60	0.0025
0.06	0.1610	0.32	0.1180	0.58	0.0369	1.25	0.0110	2.70	0.0023
0.07	0.1966	0.33	0.1114	0.60	0.0336	1.30	0.0106	2.80	0.0022
0.08	0.2070	0.34	0.1055	0.62	0.0307	1.35	0.0099	2.90	0.0021
0.09	0.1895	0.35	0.1016	0.64	0.0296	1.40	0.0094	3.00	0.0020
0.10	0.1943	0.36	0.0999	0.66	0.0284	1.45	0.0089	3.10	0.0019
0.11	0.1887	0.37	0.0977	0.68	0.0280	1.50	0.0083	3.20	0.0018
0.12	0.2139	0.38	0.0936	0.70	0.0278	1.55	0.0078	3.30	0.0017
0.13	0.2371	0.39	0.0871	0.72	0.0277	1.60	0.0075	3.40	0.0015
0.14	0.2414	0.40	0.0811	0.74	0.0270	1.65	0.0072	3.50	0.0015

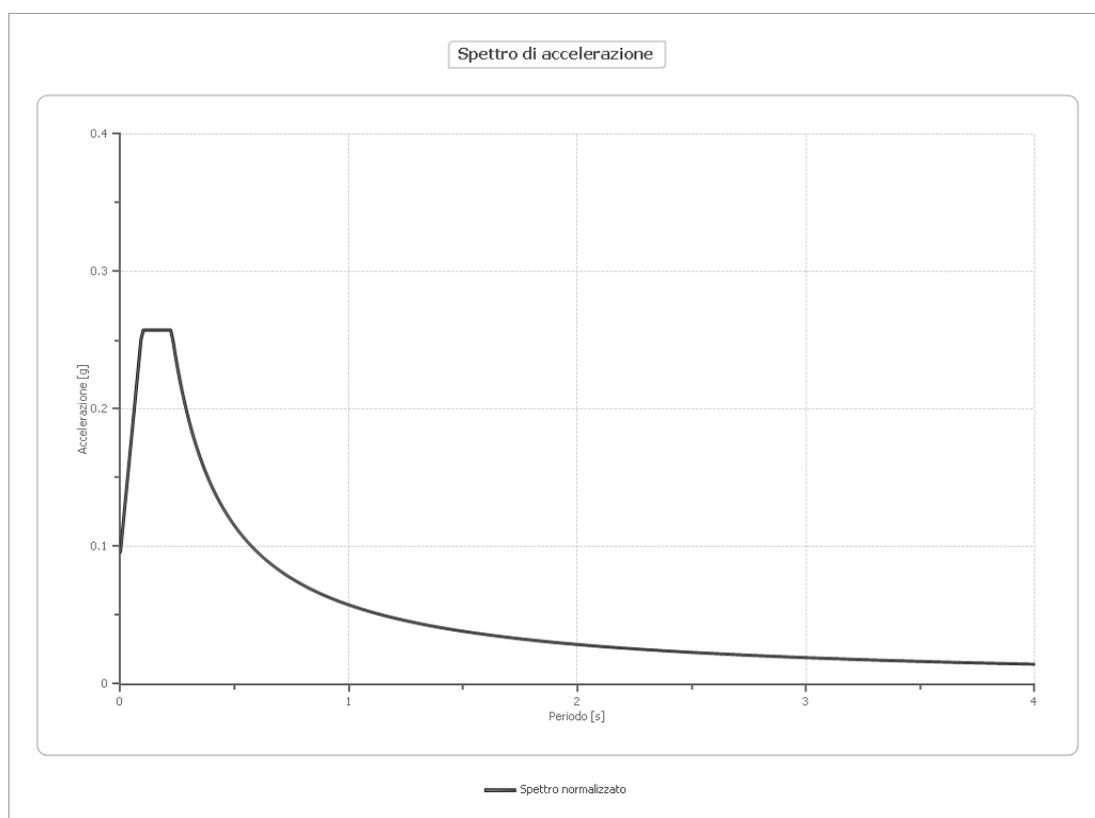
0.15	0.2454	0.41	0.0751	0.76	0.0257	1.70	0.0068	3.60	0.0014
0.16	0.2574	0.42	0.0692	0.78	0.0254	1.75	0.0063	3.70	0.0014
0.17	0.2574	0.43	0.0649	0.80	0.0250	1.80	0.0058	3.80	0.0013
0.18	0.2421	0.44	0.0616	0.82	0.0243	1.85	0.0054	3.90	0.0012
0.19	0.2433	0.45	0.0585	0.84	0.0234	1.90	0.0051	4.00	0.0012
0.20	0.2407	0.46	0.0561	0.86	0.0229	1.95	0.0048		
0.21	0.2366	0.47	0.0526	0.88	0.0225	2.00	0.0045		
0.22	0.2349	0.48	0.0484	0.90	0.0220	2.05	0.0043		
0.23	0.2348	0.49	0.0455	0.92	0.0214	2.10	0.0041		
0.24	0.2285	0.50	0.0428	0.94	0.0208	2.15	0.0039		
0.25	0.2183	0.51	0.0410	0.96	0.0199	2.20	0.0037		



#### 4.3.4. Spettro normalizzato di risposta elastico

Periodo [s]	Accelerazione [g]								
0.00	0.0960	0.26	0.2211	0.52	0.1105	0.98	0.0587	2.25	0.0255
0.01	0.1132	0.27	0.2129	0.53	0.1085	1.00	0.0575	2.30	0.0250
0.02	0.1303	0.28	0.2053	0.54	0.1064	1.05	0.0547	2.35	0.0245
0.03	0.1475	0.29	0.1982	0.55	0.1045	1.10	0.0523	2.40	0.0240
0.04	0.1647	0.30	0.1916	0.56	0.1026	1.15	0.0500	2.50	0.0230
0.05	0.1819	0.31	0.1854	0.57	0.1008	1.20	0.0479	2.60	0.0221
0.06	0.1990	0.32	0.1796	0.58	0.0991	1.25	0.0460	2.70	0.0213
0.07	0.2162	0.33	0.1742	0.60	0.0958	1.30	0.0442	2.80	0.0205

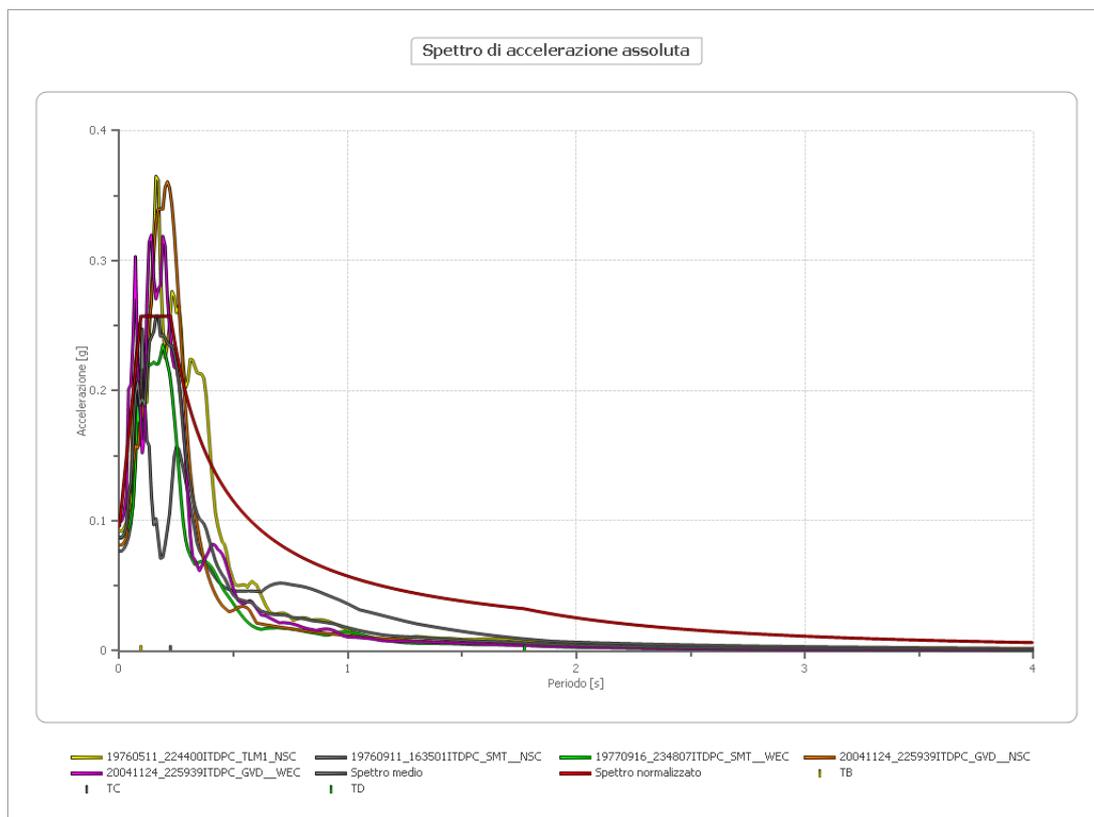
0.08	0.2334	0.34	0.1691	0.62	0.0927	1.35	0.0426	2.90	0.0198
0.09	0.2506	0.35	0.1642	0.64	0.0898	1.40	0.0411	3.00	0.0192
0.10	0.2574	0.36	0.1597	0.66	0.0871	1.45	0.0396	3.10	0.0185
0.11	0.2574	0.37	0.1554	0.68	0.0845	1.50	0.0383	3.20	0.0180
0.12	0.2574	0.38	0.1513	0.70	0.0821	1.55	0.0371	3.30	0.0174
0.13	0.2574	0.39	0.1474	0.72	0.0798	1.60	0.0359	3.40	0.0169
0.14	0.2574	0.40	0.1437	0.74	0.0777	1.65	0.0348	3.50	0.0164
0.15	0.2574	0.41	0.1402	0.76	0.0756	1.70	0.0338	3.60	0.0160
0.16	0.2574	0.42	0.1369	0.78	0.0737	1.75	0.0328	3.70	0.0155
0.17	0.2574	0.43	0.1337	0.80	0.0719	1.80	0.0319	3.80	0.0151
0.18	0.2574	0.44	0.1306	0.82	0.0701	1.85	0.0311	3.90	0.0147
0.19	0.2574	0.45	0.1277	0.84	0.0684	1.90	0.0303	4.00	0.0144
0.20	0.2574	0.46	0.1250	0.86	0.0668	1.95	0.0295		
0.21	0.2574	0.47	0.1223	0.88	0.0653	2.00	0.0287		
0.22	0.2574	0.48	0.1198	0.90	0.0639	2.05	0.0280		
0.23	0.2499	0.49	0.1173	0.92	0.0625	2.10	0.0274		
0.24	0.2395	0.50	0.1150	0.94	0.0612	2.15	0.0267		
0.25	0.2299	0.51	0.1127	0.96	0.0599	2.20	0.0261		



#### 4.3.5. Parametri spettro normalizzato

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
0.096	2.682	--	0.094	0.223	1.772	0.096	0.257

#### 4.3.6. Confronto tra gli spettri



#### 4.3.7. Confronto spettro normativa

	Operatività SLO Cat. B	Danno SLD Cat. B	Salvaguardi a vita SLV Cat. B	Prev. collasso SLC Cat. B	Operatività SLO Cat. C	Danno SLD Cat. C	Salvaguardi a vita SLV Cat. C	Prev. collasso SLC Cat. C
Tr [anni]	45	75	712	1462	45	75	712	1462
ag [g]	0.018	0.023	0.043	0.051	0.018	0.023	0.043	0.051
Fo	2.523	2.499	2.682	2.748	2.523	2.499	2.682	2.748
Tc* [s]	0.166	0.2	0.299	0.319	0.166	0.2	0.299	0.319
Ss	1.20	1.20	1.20	1.20	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	1.58	1.52	1.40	1.38	1.90	1.79	1.56	1.53
TB [s]	0.087	0.101	0.140	0.147	0.105	0.119	0.156	0.163
TC [s]	0.262	0.304	0.419	0.441	0.315	0.357	0.468	0.488
TD [s]	1.672	1.692	1.772	1.804	1.672	1.692	1.772	1.804
Se(0) [g]	0.022	0.028	0.052	0.061	0.027	0.035	0.065	0.077
Se(TB) [g]	0.054	0.069	0.138	0.168	0.068	0.086	0.173	0.210

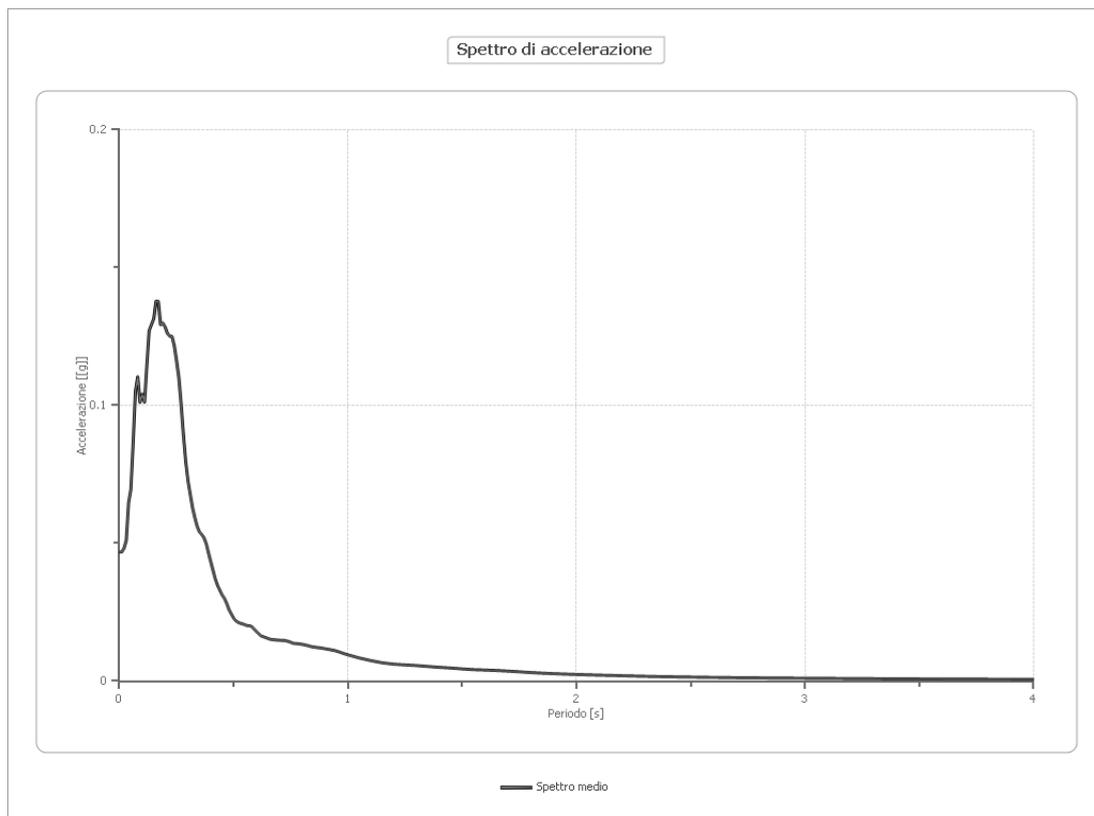


TD	1.692 [s]
SA(0)	0.055 [g]
SA(TB)	0.138 [g]

**Fa:** fattore di amplificazione relativo ai corti periodi, determinato intorno al periodo per cui si ha il massimo della risposta in accelerazione; **Fv:** fattore di amplificazione relativo ai periodi lunghi, determinato intorno al periodo per cui si ha la massima risposta in pseudovelocità.

#### 4.4.3. Spettro medio di risposta elastico

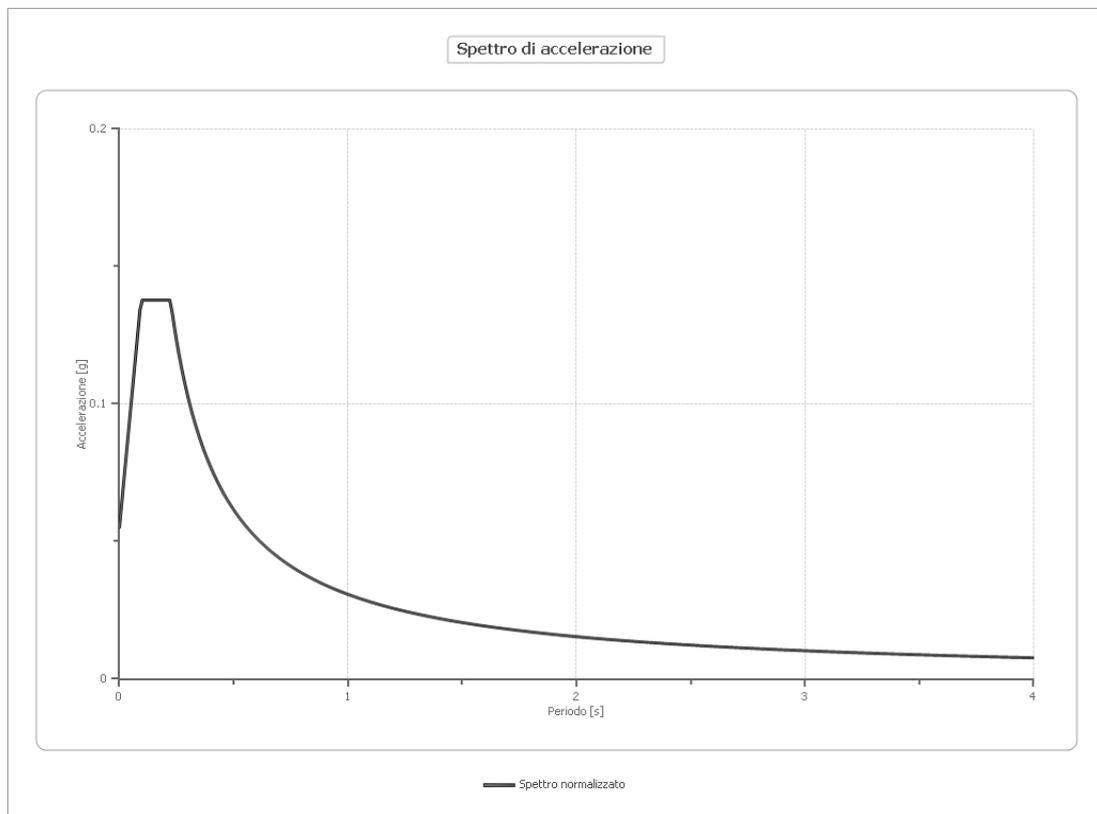
Periodo [s]	Accelerazione [g]								
0.00	0.0468	0.26	0.1101	0.52	0.0213	0.98	0.0100	2.25	0.0019
0.01	0.0468	0.27	0.1005	0.53	0.0209	1.00	0.0095	2.30	0.0018
0.02	0.0482	0.28	0.0894	0.54	0.0207	1.05	0.0084	2.35	0.0017
0.03	0.0510	0.29	0.0797	0.55	0.0204	1.10	0.0074	2.40	0.0016
0.04	0.0646	0.30	0.0727	0.56	0.0201	1.15	0.0066	2.50	0.0015
0.05	0.0695	0.31	0.0677	0.57	0.0201	1.20	0.0061	2.60	0.0014
0.06	0.0865	0.32	0.0628	0.58	0.0197	1.25	0.0059	2.70	0.0013
0.07	0.1052	0.33	0.0593	0.60	0.0179	1.30	0.0057	2.80	0.0012
0.08	0.1104	0.34	0.0562	0.62	0.0164	1.35	0.0053	2.90	0.0011
0.09	0.1011	0.35	0.0541	0.64	0.0158	1.40	0.0050	3.00	0.0011
0.10	0.1042	0.36	0.0532	0.66	0.0152	1.45	0.0047	3.10	0.0010
0.11	0.1012	0.37	0.0520	0.68	0.0149	1.50	0.0044	3.20	0.0009
0.12	0.1146	0.38	0.0498	0.70	0.0148	1.55	0.0042	3.30	0.0009
0.13	0.1271	0.39	0.0464	0.72	0.0148	1.60	0.0040	3.40	0.0008
0.14	0.1293	0.40	0.0432	0.74	0.0144	1.65	0.0038	3.50	0.0008
0.15	0.1315	0.41	0.0400	0.76	0.0137	1.70	0.0036	3.60	0.0008
0.16	0.1378	0.42	0.0369	0.78	0.0136	1.75	0.0034	3.70	0.0007
0.17	0.1377	0.43	0.0346	0.80	0.0133	1.80	0.0031	3.80	0.0007
0.18	0.1293	0.44	0.0328	0.82	0.0130	1.85	0.0029	3.90	0.0007
0.19	0.1299	0.45	0.0312	0.84	0.0125	1.90	0.0027	4.00	0.0006
0.20	0.1285	0.46	0.0299	0.86	0.0122	1.95	0.0025		
0.21	0.1262	0.47	0.0281	0.88	0.0120	2.00	0.0024		
0.22	0.1252	0.48	0.0258	0.90	0.0117	2.05	0.0023		
0.23	0.1251	0.49	0.0243	0.92	0.0114	2.10	0.0022		
0.24	0.1217	0.50	0.0228	0.94	0.0111	2.15	0.0021		
0.25	0.1162	0.51	0.0218	0.96	0.0106	2.20	0.0020		



#### 4.4.4. Spettro normalizzato di risposta elastico

Periodo [s]	Accelerazione [g]								
0.00	0.0551	0.26	0.1183	0.52	0.0592	0.98	0.0314	2.25	0.0137
0.01	0.0639	0.27	0.1139	0.53	0.0580	1.00	0.0308	2.30	0.0134
0.02	0.0727	0.28	0.1099	0.54	0.0570	1.05	0.0293	2.35	0.0131
0.03	0.0815	0.29	0.1061	0.55	0.0559	1.10	0.0280	2.40	0.0128
0.04	0.0903	0.30	0.1025	0.56	0.0549	1.15	0.0268	2.50	0.0123
0.05	0.0991	0.31	0.0992	0.57	0.0540	1.20	0.0256	2.60	0.0118
0.06	0.1079	0.32	0.0961	0.58	0.0530	1.25	0.0246	2.70	0.0114
0.07	0.1167	0.33	0.0932	0.60	0.0513	1.30	0.0237	2.80	0.0110
0.08	0.1255	0.34	0.0905	0.62	0.0496	1.35	0.0228	2.90	0.0106
0.09	0.1343	0.35	0.0879	0.64	0.0481	1.40	0.0220	3.00	0.0103
0.10	0.1378	0.36	0.0855	0.66	0.0466	1.45	0.0212	3.10	0.0099
0.11	0.1378	0.37	0.0831	0.68	0.0452	1.50	0.0205	3.20	0.0096
0.12	0.1378	0.38	0.0810	0.70	0.0439	1.55	0.0198	3.30	0.0093
0.13	0.1378	0.39	0.0789	0.72	0.0427	1.60	0.0192	3.40	0.0090
0.14	0.1378	0.40	0.0769	0.74	0.0416	1.65	0.0186	3.50	0.0088
0.15	0.1378	0.41	0.0750	0.76	0.0405	1.70	0.0181	3.60	0.0085
0.16	0.1378	0.42	0.0732	0.78	0.0394	1.75	0.0176	3.70	0.0083
0.17	0.1378	0.43	0.0715	0.80	0.0385	1.80	0.0171	3.80	0.0081
0.18	0.1378	0.44	0.0699	0.82	0.0375	1.85	0.0166	3.90	0.0079
0.19	0.1378	0.45	0.0684	0.84	0.0366	1.90	0.0162	4.00	0.0077
0.20	0.1378	0.46	0.0669	0.86	0.0358	1.95	0.0158		

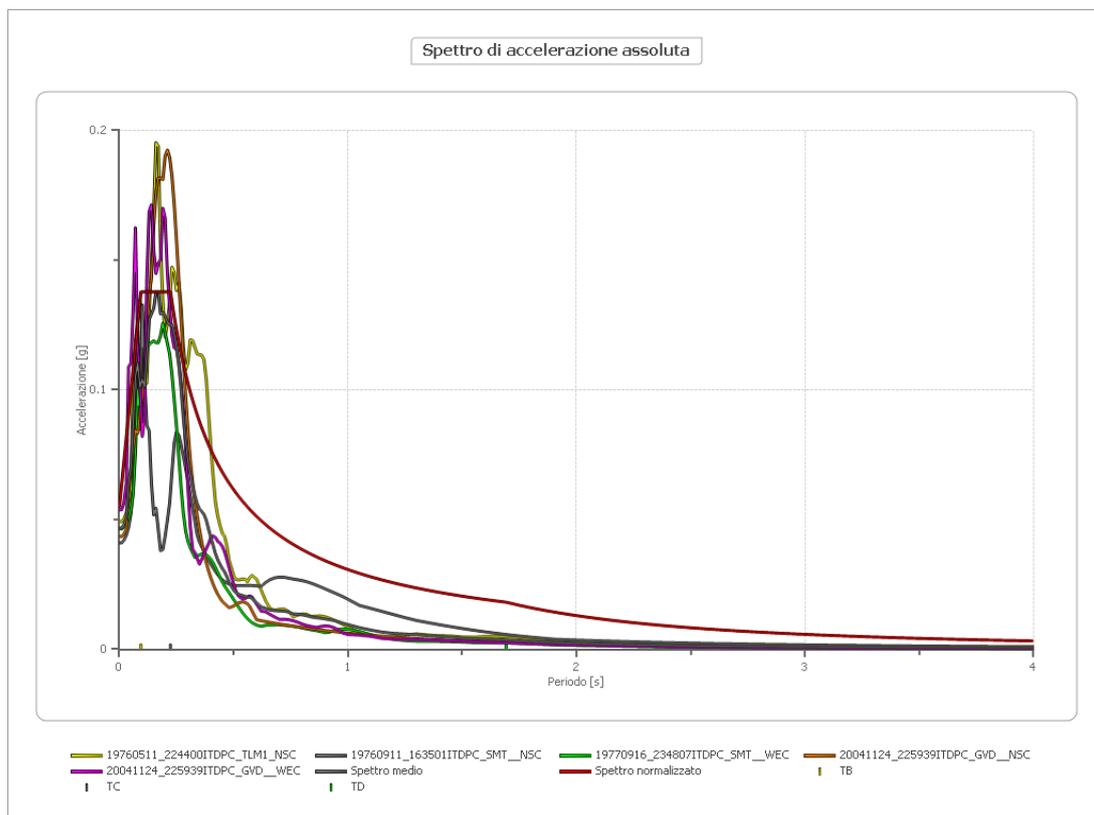
0.21	0.1378	0.47	0.0655	0.88	0.0350	2.00	0.0154		
0.22	0.1378	0.48	0.0641	0.90	0.0342	2.05	0.0150		
0.23	0.1338	0.49	0.0628	0.92	0.0334	2.10	0.0146		
0.24	0.1282	0.50	0.0615	0.94	0.0327	2.15	0.0143		
0.25	0.1231	0.51	0.0603	0.96	0.0320	2.20	0.0140		



#### 4.4.5. Parametri spettro normalizzato

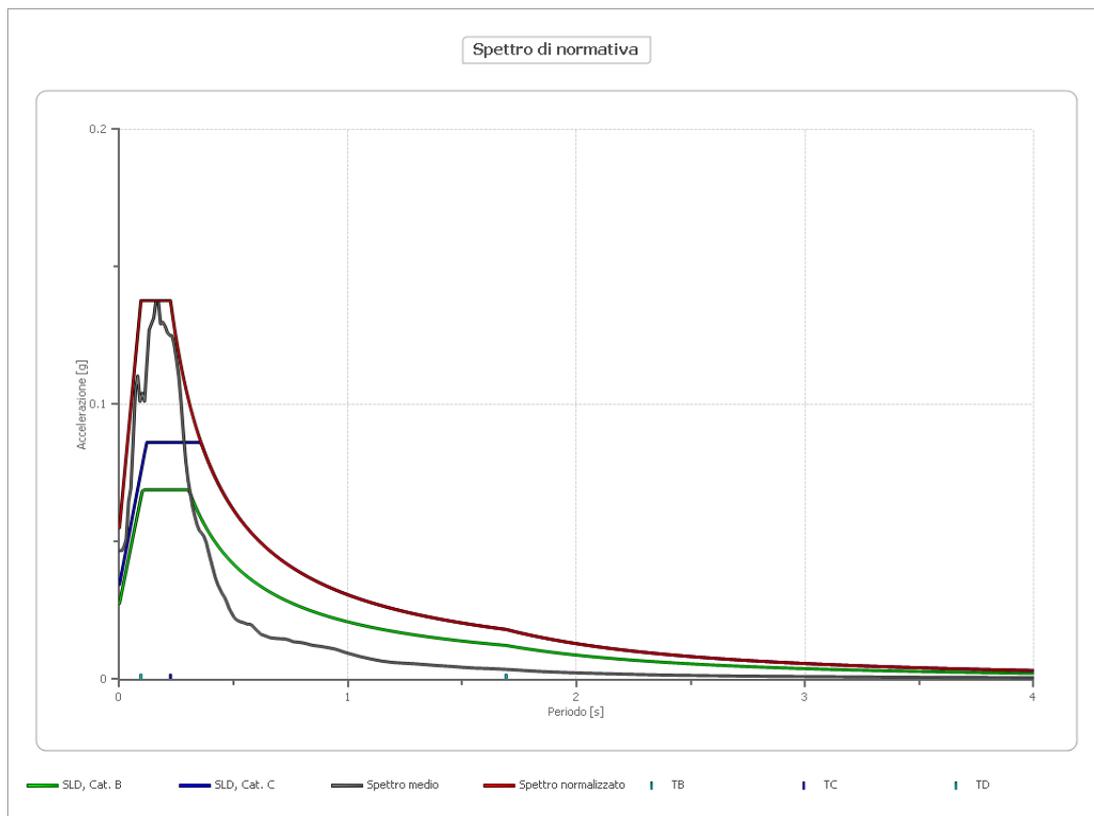
Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
0.055	2.499	--	0.094	0.223	1.692	0.055	0.138

#### 4.4.6. Confronto tra gli spettri



#### 4.4.7. Confronto spettro normativa

	Operatività SLO Cat. B	Danno SLD Cat. B	Salvaguardi a vita SLV Cat. B	Prev. collasso SLC Cat. B	Operatività SLO Cat. C	Danno SLD Cat. C	Salvaguardi a vita SLV Cat. C	Prev. collasso SLC Cat. C
Tr [anni]	45	75	712	1462	45	75	712	1462
ag [g]	0.018	0.023	0.043	0.051	0.018	0.023	0.043	0.051
Fo	2.523	2.499	2.682	2.748	2.523	2.499	2.682	2.748
Tc* [s]	0.166	0.2	0.299	0.319	0.166	0.2	0.299	0.319
Ss	1.20	1.20	1.20	1.20	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	1.58	1.52	1.40	1.38	1.90	1.79	1.56	1.53
TB [s]	0.087	0.101	0.140	0.147	0.105	0.119	0.156	0.163
TC [s]	0.262	0.304	0.419	0.441	0.315	0.357	0.468	0.488
TD [s]	1.672	1.692	1.772	1.804	1.672	1.692	1.772	1.804
Se(0) [g]	0.022	0.028	0.052	0.061	0.027	0.035	0.065	0.077
Se(TB) [g]	0.054	0.069	0.138	0.168	0.068	0.086	0.173	0.210



## 4.5. Risultati – Stato Limite SLO

### 4.5.1. Elaborazione

Numero di iterazioni 50  
 Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.45  
 Tipo di modulo elastico Shake  
 Massimo errore percentuale di convergenza --

### 4.5.2. Fattori di amplificazione

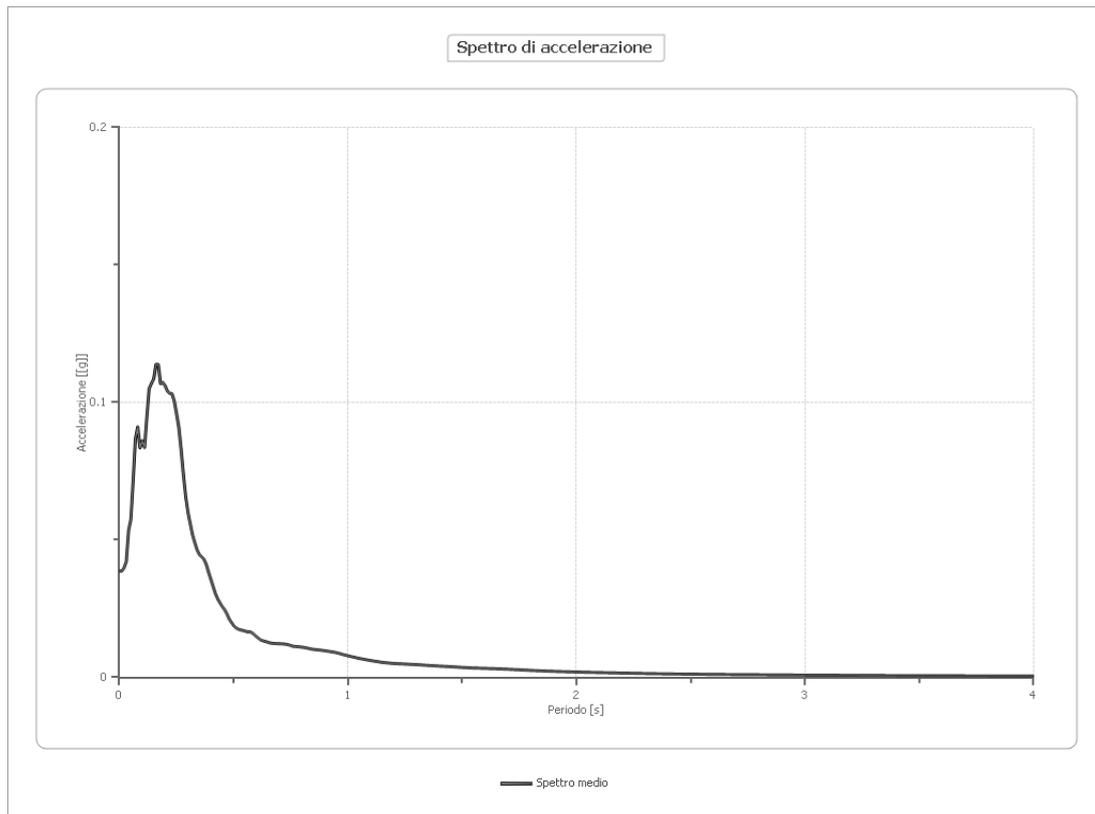
Tai	0.160 [s]
Tvi	0.260 [s]
Tao	0.160 [s]
Tvo	0.260 [s]
Sami	0.476 [m/s <sup>2</sup> ]
Svmi	0.017 [m/s]
Samo	0.995 [m/s <sup>2</sup> ]
Svmo	0.035 [m/s]
<b>Fa</b>	<b>2.091 [-]</b>
<b>Fv</b>	<b>2.100 [-]</b>
TB	0.094 [s]

TC	0.223 [s]
TD	1.672 [s]
SA(0)	0.045 [g]
SA(TB)	0.114 [g]

**Fa:** fattore di amplificazione relativo ai corti periodi, determinato intorno al periodo per cui si ha il massimo della risposta in accelerazione; **Fv:** fattore di amplificazione relativo ai periodi lunghi, determinato intorno al periodo per cui si ha la massima risposta in pseudovelocità.

### 4.5.3. Spettro medio di risposta elastico

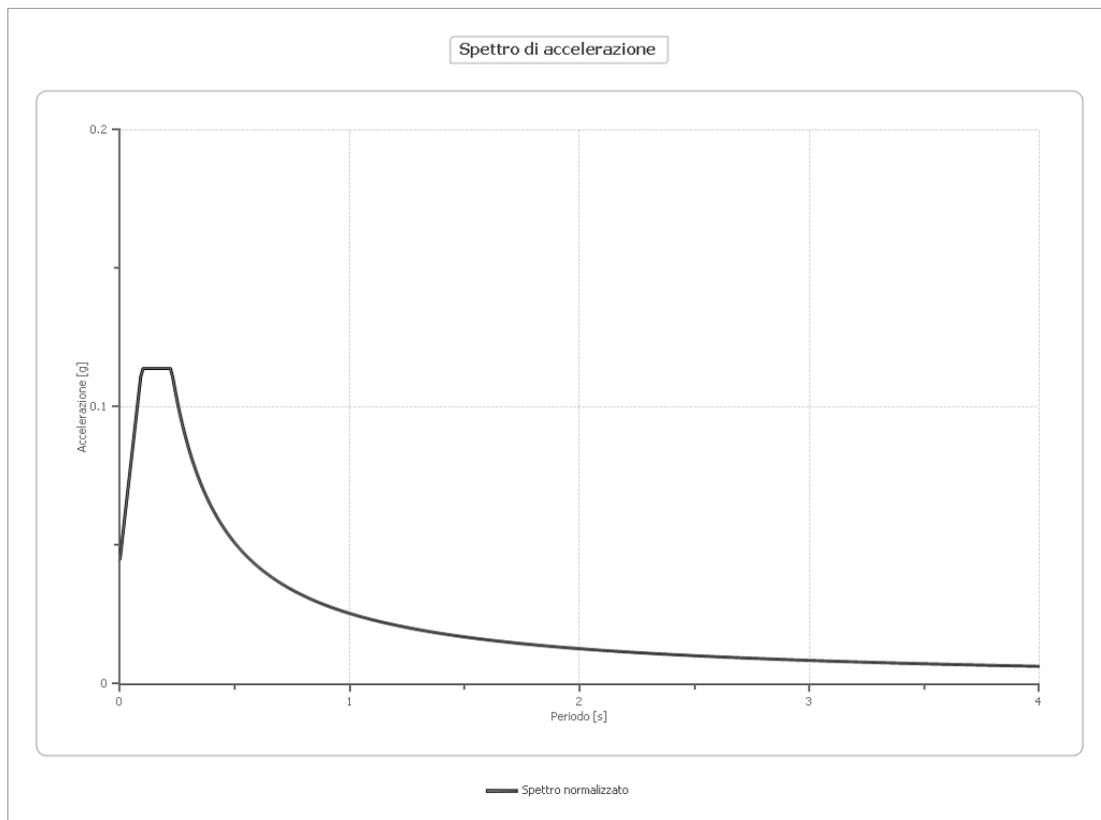
Periodo [s]	Accelerazione [g]								
0.00	0.0387	0.26	0.0909	0.52	0.0176	0.98	0.0083	2.25	0.0015
0.01	0.0387	0.27	0.0829	0.53	0.0173	1.00	0.0079	2.30	0.0014
0.02	0.0398	0.28	0.0738	0.54	0.0171	1.05	0.0069	2.35	0.0014
0.03	0.0422	0.29	0.0657	0.55	0.0169	1.10	0.0061	2.40	0.0013
0.04	0.0534	0.30	0.0600	0.56	0.0166	1.15	0.0055	2.50	0.0012
0.05	0.0574	0.31	0.0559	0.57	0.0166	1.20	0.0051	2.60	0.0011
0.06	0.0715	0.32	0.0519	0.58	0.0163	1.25	0.0049	2.70	0.0010
0.07	0.0869	0.33	0.0490	0.60	0.0148	1.30	0.0047	2.80	0.0010
0.08	0.0911	0.34	0.0464	0.62	0.0135	1.35	0.0044	2.90	0.0009
0.09	0.0835	0.35	0.0447	0.64	0.0130	1.40	0.0041	3.00	0.0009
0.10	0.0861	0.36	0.0439	0.66	0.0125	1.45	0.0039	3.10	0.0008
0.11	0.0836	0.37	0.0429	0.68	0.0123	1.50	0.0037	3.20	0.0008
0.12	0.0947	0.38	0.0411	0.70	0.0123	1.55	0.0034	3.30	0.0007
0.13	0.1050	0.39	0.0383	0.72	0.0122	1.60	0.0033	3.40	0.0007
0.14	0.1069	0.40	0.0357	0.74	0.0119	1.65	0.0032	3.50	0.0007
0.15	0.1086	0.41	0.0330	0.76	0.0113	1.70	0.0030	3.60	0.0006
0.16	0.1138	0.42	0.0304	0.78	0.0112	1.75	0.0028	3.70	0.0006
0.17	0.1138	0.43	0.0286	0.80	0.0110	1.80	0.0026	3.80	0.0006
0.18	0.1068	0.44	0.0271	0.82	0.0107	1.85	0.0024	3.90	0.0005
0.19	0.1073	0.45	0.0258	0.84	0.0103	1.90	0.0022	4.00	0.0005
0.20	0.1061	0.46	0.0247	0.86	0.0101	1.95	0.0021		
0.21	0.1042	0.47	0.0232	0.88	0.0099	2.00	0.0020		
0.22	0.1033	0.48	0.0213	0.90	0.0097	2.05	0.0019		
0.23	0.1032	0.49	0.0201	0.92	0.0094	2.10	0.0018		
0.24	0.1005	0.50	0.0188	0.94	0.0092	2.15	0.0017		
0.25	0.0959	0.51	0.0180	0.96	0.0088	2.20	0.0016		



#### 4.5.4. Spettro normalizzato di risposta elastico

Periodo [s]	Accelerazione [g]								
0.00	0.0451	0.26	0.0978	0.52	0.0489	0.98	0.0259	2.25	0.0113
0.01	0.0524	0.27	0.0941	0.53	0.0480	1.00	0.0254	2.30	0.0111
0.02	0.0597	0.28	0.0908	0.54	0.0471	1.05	0.0242	2.35	0.0108
0.03	0.0671	0.29	0.0877	0.55	0.0462	1.10	0.0231	2.40	0.0106
0.04	0.0744	0.30	0.0847	0.56	0.0454	1.15	0.0221	2.50	0.0102
0.05	0.0817	0.31	0.0820	0.57	0.0446	1.20	0.0212	2.60	0.0098
0.06	0.0890	0.32	0.0794	0.58	0.0438	1.25	0.0203	2.70	0.0094
0.07	0.0963	0.33	0.0770	0.60	0.0424	1.30	0.0196	2.80	0.0091
0.08	0.1036	0.34	0.0748	0.62	0.0410	1.35	0.0188	2.90	0.0088
0.09	0.1109	0.35	0.0726	0.64	0.0397	1.40	0.0182	3.00	0.0085
0.10	0.1138	0.36	0.0706	0.66	0.0385	1.45	0.0175	3.10	0.0082
0.11	0.1138	0.37	0.0687	0.68	0.0374	1.50	0.0169	3.20	0.0079
0.12	0.1138	0.38	0.0669	0.70	0.0363	1.55	0.0164	3.30	0.0077
0.13	0.1138	0.39	0.0652	0.72	0.0353	1.60	0.0159	3.40	0.0075
0.14	0.1138	0.40	0.0635	0.74	0.0344	1.65	0.0154	3.50	0.0073
0.15	0.1138	0.41	0.0620	0.76	0.0334	1.70	0.0150	3.60	0.0071
0.16	0.1138	0.42	0.0605	0.78	0.0326	1.75	0.0145	3.70	0.0069
0.17	0.1138	0.43	0.0591	0.80	0.0318	1.80	0.0141	3.80	0.0067
0.18	0.1138	0.44	0.0578	0.82	0.0310	1.85	0.0137	3.90	0.0065
0.19	0.1138	0.45	0.0565	0.84	0.0303	1.90	0.0134	4.00	0.0064
0.20	0.1138	0.46	0.0553	0.86	0.0296	1.95	0.0130		

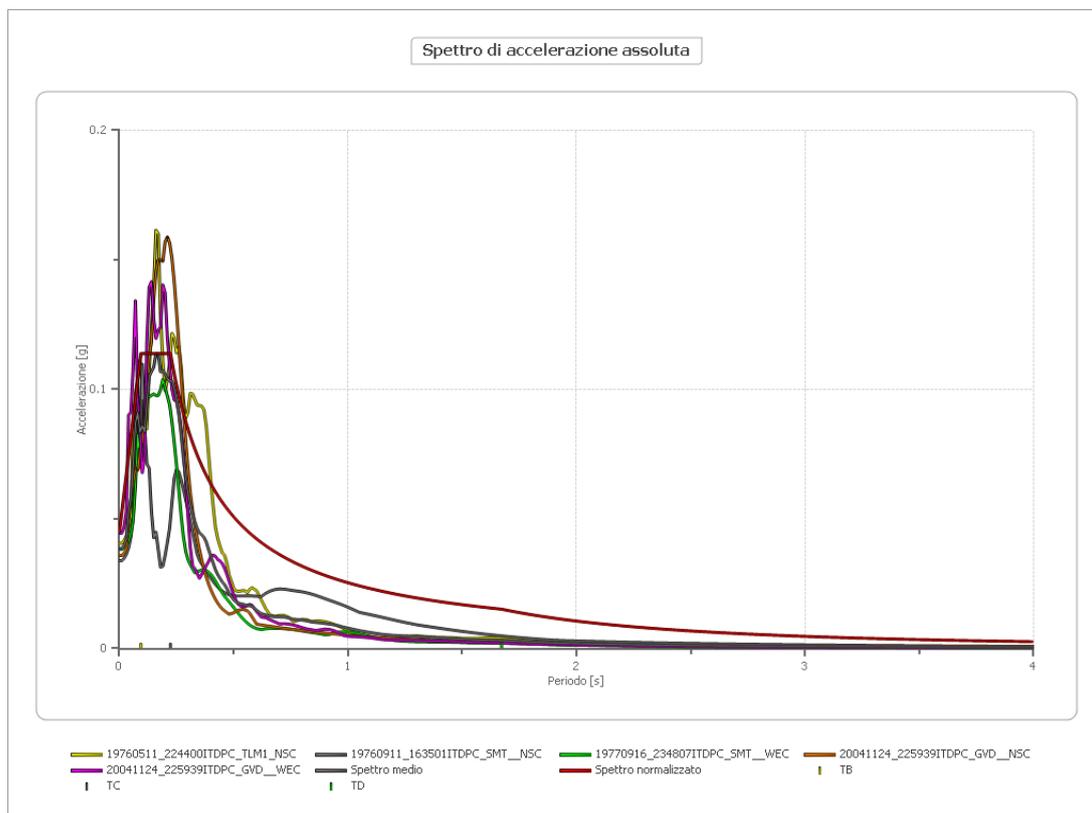
0.21	0.1138	0.47	0.0541	0.88	0.0289	2.00	0.0127		
0.22	0.1138	0.48	0.0530	0.90	0.0282	2.05	0.0124		
0.23	0.1105	0.49	0.0519	0.92	0.0276	2.10	0.0121		
0.24	0.1059	0.50	0.0508	0.94	0.0270	2.15	0.0118		
0.25	0.1017	0.51	0.0498	0.96	0.0265	2.20	0.0116		



#### 4.5.5. Parametri spettro normalizzato

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
0.045	2.523	--	0.094	0.223	1.672	0.045	0.114

#### 4.5.6. Confronto tra gli spettri



#### 4.5.7. Confronto spettro normativa

	Operatività SLO Cat. B	Danno SLD Cat. B	Salvaguardi a vita SLV Cat. B	Prev. collasso SLC Cat. B	Operatività SLO Cat. C	Danno SLD Cat. C	Salvaguardi a vita SLV Cat. C	Prev. collasso SLC Cat. C
Tr [anni]	45	75	712	1462	45	75	712	1462
ag [g]	0.018	0.023	0.043	0.051	0.018	0.023	0.043	0.051
Fo	2.523	2.499	2.682	2.748	2.523	2.499	2.682	2.748
Tc* [s]	0.166	0.2	0.299	0.319	0.166	0.2	0.299	0.319
Ss	1.20	1.20	1.20	1.20	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	1.58	1.52	1.40	1.38	1.90	1.79	1.56	1.53
TB [s]	0.087	0.101	0.140	0.147	0.105	0.119	0.156	0.163
TC [s]	0.262	0.304	0.419	0.441	0.315	0.357	0.468	0.488
TD [s]	1.672	1.692	1.772	1.804	1.672	1.692	1.772	1.804
Se(0) [g]	0.022	0.028	0.052	0.061	0.027	0.035	0.065	0.077
Se(TB) [g]	0.054	0.069	0.138	0.168	0.068	0.086	0.173	0.210

