



**NONAGINTA Srl**

società Unipersonale, soggetta ad attività di direzione e coordinamento del Comune di Nonantola

SEDE LEGALE: Via G. Marconi, 11 - 41015 Nonantola (MO)

Tel. 059 896608 - Fax 059 896590

C.F. - P.IVA 03069300360 REA di Modena 355325

lavori di adeguamento sismico del fabbricato  
I STRALCIO

CUP: G48E18000220004

CIG: 8354703704

## PROGETTO ESECUTIVO

(art. 33 D.Lgs. 18.04.2016 n.50)

**Responsabile Unico del Procedimento:**  
geom. Stefano Pellegrini

**il progettista:**  
arch. Stefano Fascini  
ing. Martina Malagoli



# R.06

## Relazione geologica

emissione	aggiornamento	scala
giugno 2020	_____	_____



**STUDIO DI GEOLOGIA FRANCESCO DETTORI**

iscr. Ordine Geologi Emilia Romagna n. 1002

**GEOLOGIA - GEOTECNICA - AMBIENTE**

Modena - Via Placido Rizzotto, 50

Tel. 059 221587; 347 7407909 - Fax 059 9789636

[dettori@geologodettori.it](mailto:dettori@geologodettori.it)

[www.geologodettori.it](http://www.geologodettori.it)

## COMUNE DI NONANTOLA

PROVINCIA DI MODENA

### ANALISI E VULNERABILITA' SISMICA DELL'EDIFICIO SCOLASTICO ISTITUTO DON BECCARI SITO IN VIA I. CALVINO A NONANTOLA (MO)

- RELAZIONE GEOLOGICA
- RELAZIONE GEOTECNICA SULLE INDAGINI
- RELAZIONE SULLA MODELLAZIONE SISMICA E SULLA RISPOSTA SISMICA  
LOCALE

COMMITTENTE: NONAGINTA S.R.L.

MAGGIO 2019

**Dott. Geol. Francesco Dettori**



*Francesco Dettori*

## INDICE

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>4</b>
<b>3. RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA DI INQUADRAMENTO.....</b>	<b>5</b>
3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	5
3.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO .....	5
3.3 IDROGRAFIA DI SUPERFICIE E IDROLOGIA SOTTERRANEA .....	7
3.4 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DELL'AREA .....	7
3.4.1 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE: SISMICITÀ DEL TERRITORIO .....	7
3.5 PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE E MICROZONAZIONE SISMICA.....	9
3.5.1 MAPPA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA DELL'AREA: 1° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO .....	10
3.5.2 MAPPA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO VS NEI PRIMI 30 METRI DA P.C. - 2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO .....	11
3.5.3 MAPPA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE E DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE DELL'AREA: CARTA DI MICROZONAZIONE SISMICA DI 3° LIVELLO.....	12
<b>4. CARATTERIZZAZIONE DI DETTAGLIO DEL SITO MEDIANTE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE .....</b>	<b>14</b>
4.1 PROVE PENETROMETRICHE: ATTREZZATURA ED ELABORAZIONE.....	15
4.2 PROVA MASW: ATTREZZATURA ED ELABORAZIONE.....	15
4.3 PROVA MICROTREMORE A STAZIONE SINGOLA: ATTREZZATURA ED ELABORAZIONE.....	17
<b>5. RELAZIONE GEOLOGICA SULLE INDAGINI .....</b>	<b>18</b>
5.1 MODELLO IDROGEOLOGICO-LITOSTRATIGRAFICO DEL TERRENO .....	18
5.1.1 MODELLO GEOLOGICO CPT 1 .....	18
<b>6. RELAZIONE GEOTECNICA SULLE INDAGINI.....</b>	<b>20</b>
6.1 MODELLO GEOTECNICO E PARAMETRI GEOTECNICI DEL TERRENO .....	20
6.1.1 MODELLO GEOTECNICO CPT 1.....	20
<b>7. CARATTERIZZAZIONE SISMOSTRATIGRAFICA DEL SITO .....</b>	<b>21</b>
7.1 RISULTATI INDAGINE GEOFISICA CON TECNICA MASW .....	21
7.2 RISULTATI INDAGINE GEOFISICA CON TECNICA HVSR .....	23
7.3 MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO DEL TERRENO E CATEGORIA SISMICA DI SOTTOSUOLO AI SENSI DELLE NTC 2018 .....	24
<b>8. PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE - ANALISI DEL TERZO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO.....</b>	<b>25</b>
8.1 CALCOLO DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE .....	25
8.2 VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE E CALCOLO DEI CEDIMENTI POST SISMICI .....	32
<b>9. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....</b>	<b>36</b>
<b>ALLEGATI.....</b>	<b>37</b>



## 1. PREMESSA

Su incarico della Committenza e in accordo con i Tecnici Progettisti si è eseguita la caratterizzazione geologica, geotecnica e geofisica di un'area su cui insiste l'istituto scolastico Don Beccari, nell'ambito del progetto di analisi di vulnerabilità sismica degli edifici scolastici.

Supportato da una specifica campagna di indagini geognostiche e geofisiche, il presente documento focalizza l'attenzione su quegli aspetti geologici e di pericolosità sismica del territorio che influenzano la propagazione delle onde sismiche e possono provocare fenomeni di instabilità e liquefazione dei terreni. Su indicazione della Committenza si precisa che le opere strutturali sono verificate in **classe d'uso 4**.

Per determinare le suddette caratteristiche sono stati raccolti tutti i dati e le informazioni precedentemente acquisiti in occasione di indagini di settore o per la predisposizione di strumenti di pianificazione, tra cui cartografie topografiche, geologiche, geomorfologiche, ecc. e i risultati di prove geognostiche e geofisiche effettuate specificamente per l'area di interesse.

Il documento è suddiviso nelle seguenti parti:

- 1) RELAZIONE GEOLOGICA e SISMICA di inquadramento riguardante la caratterizzazione e la modellazione geologica del sito, la caratterizzazione sismica dell'area;
- 2) RELAZIONE GEOTECNICA basata sulle indagini eseguite, la caratterizzazione e la modellazione del volume significativo di terreno interessato;
- 3) Relazione concernente la "RISPOSTA SISMICA DEL SITO" e verifica di possibili fenomeni cosismici di liquefazione e cedimento del terreno.



Figura n.1: vista fotografica della facciata ripresa dall'area cortiliva dell'edificio scolastico Don Beccari di Nonantola.

## **2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

La presente relazione è stata eseguita in ottemperanza alle disposizioni contenute nelle normative di riferimento per il settore geologico e geotecnico e consultando gli strumenti di pianificazione comunale, provinciale e di bacino. Sono di seguito elencate le principali normative di riferimento:

- *Deliberazione della Giunta Regionale (DGR) n.2193/2015, Art.16 c.1, L.R. 20/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica", di cui alla deliberazione dell'Assemblea legislativa 2 maggio 2007, n.112;*
- *Deliberazione della Giunta Regionale (DGR) n. 1919/2013 avente ad oggetto "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione e concessione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 52/2013 a favore degli enti locali".*
- *Ordinanza n. 70 del 13 novembre 2012 del Presidente della Regione Emilia-Romagna in qualità di Commissario Delegato per la ricostruzione a seguito degli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012 "Approvazione Programma per gli studi di microzonazione sismica";*
- *"Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e P.A. nel novembre 2008;*
- *L.R. 30 ottobre 2008, n. 19 "NORME PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO" e ss. mm. e ii.;*
- *Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018, che approva le NTC 2018;*
- *Associazione Geotecnica Italiana: "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica". Linee Guida. Ed. Marzo 2005;*
- *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Autorità di Bacino Po, approvato con D.P.C.M. 24/05/2001;*

### 3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Da un punto di vista topografico la zona si trova all'interno della bassa pianura emiliana. L'area, situata su una zona sub-pianeggiante, è posta alla quota di 25 m s.l.m. Dal punto di vista cartografico l'area in esame è compresa:

### 3.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Questi depositi di origine continentale, di epoca pleistocenica, ne ricoprono di più antichi aventi origine marina (Plio-Pleistocene) a loro volta sovrapposti ad un substrato litoide miocenico (arenarie, flysch, peliti) testimoniante la sedimentazione in un bacino marino antistante la catena appenninica in sollevamento. Queste unità più profonde si rinvencono in affioramento nella catena appenninica.

In generale sia i depositi alluvionali che quelli marini più antichi possiedono spessori arealmente variabili a causa anche di strutture sepolte a pieghe, con assi orientati circa sud-est/ovest, quale ad esempio la piega anticlinale denominata Dorsale Ferrarese.

La cartografia geologica e dei suoli, tratta dal Servizio Sismico e Geologico della Regione Emilia-Romagna (**Figura n.2**), riporta per la zona in studio l'affioramento di depositi quaternari continentali e formazioni appartenenti alla "Successione neogenico - quaternaria":

#### Formazioni geologiche

##### Successione neogenico – quaternaria

**AES8 - Subsistema di Ravenna.** Si tratta di una Formazione Geologica costituita da Limi sabbiosi e limi argillosi negli apparati dei torrenti minori o ghiaie in lenti entro limi, subordinate ghiaie e ghiaie sabbiose in quelli dei torrenti e fiumi principali. A tetto suoli a basso grado di alterazione con fronte di alterazione potente fino a 150 cm e parziale decarbonatazione; orizzonti superficiali di colore giallo-bruno. Nell'alta pianura su AES7b (affiorante solo in cave). Potenza fino a oltre 20 m. Olocene (età radiometrica della base: 11.000 - 8.000 anni).

**AES8a - Unità di Modena:** Si tratta di depositi ghiaiosi e fini. Unità definita dalla presenza di un suolo a bassissimo grado di alterazione, con profilo potente meno di 100 cm, calcareo e grigio-giallastro. Corrisponde al primo ordine dei terrazzi nelle zone intravallive. Nella pianura ricopre resti archeologici di età romana del VI secolo d.C. Potenza massima di alcuni metri (< 10 m). Post-VI secolo d.C.).

I depositi quaternari sono sormontati da più recenti depositi a tessitura fine, perlopiù limosi e limo sabbiosi, legati alle esondazioni dei corsi d'acqua della zona in ambiente di piana alluvionale. Gli spessori possono in alcuni casi superare i 5/10 m di spessore.

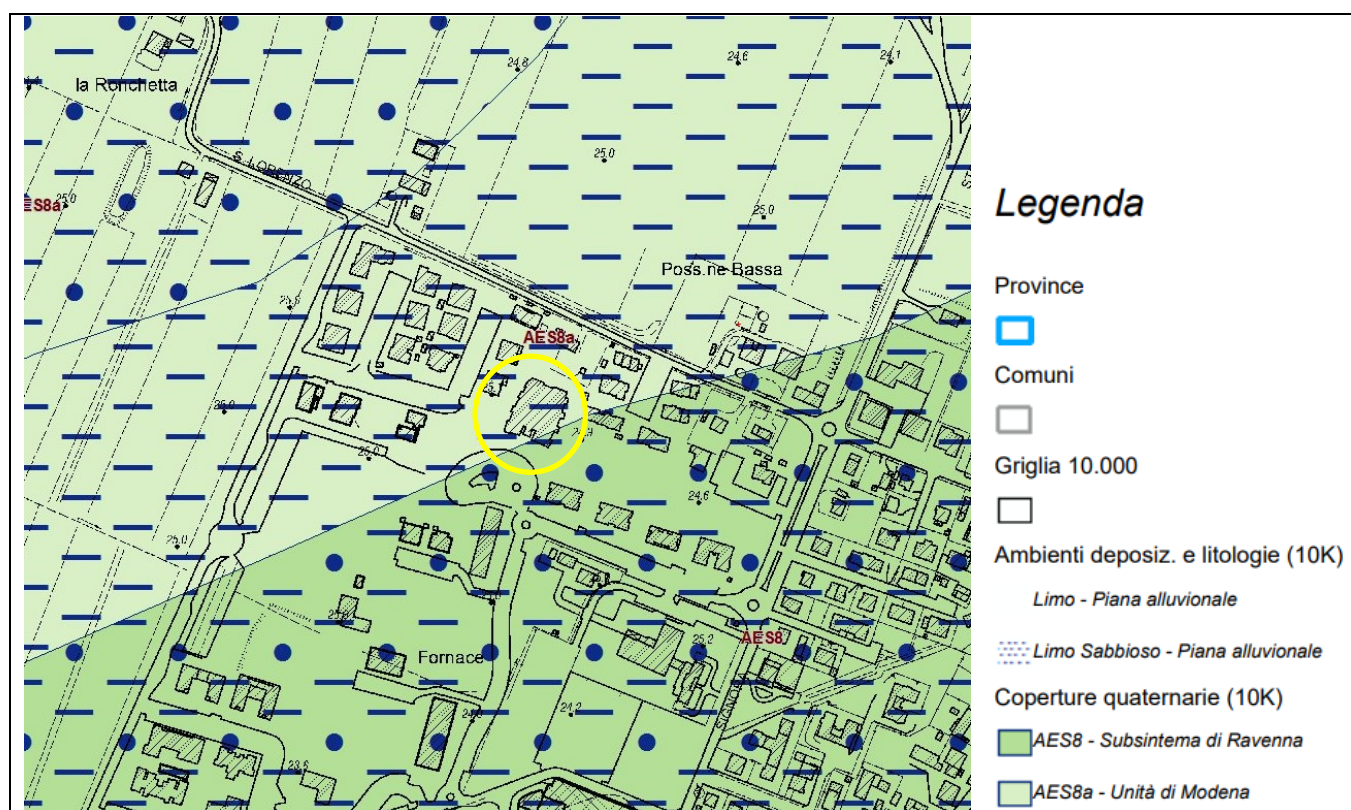


Figura n.3: Carta Geologica tratta da "Servizio Sismico, Geologico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna" – stralcio in scala grafica

La morfologia della zona è caratterizzata dalla presenza di superfici piane o molto debolmente inclinate che si sviluppano uniformemente verso i quadranti nord-orientali. Dall'analisi delle curve di livello si possono riconoscere deboli sovrelevazioni delle quote topografiche con direzione prevalente S-N rappresentanti dossi relitti di piana alluvionale (dossi fossili).

### 3.3 IDROGRAFIA DI SUPERFICIE E IDROLOGIA SOTTERRANEA

Il bacino idrografico principale è quello del Fiume Panaro che scorre pensile rispetto al terreno circostante ad una distanza di circa 1,8 km in direzione est. L'idrografia locale si completa mediante un reticolo di canali di scolo ed irrigazione di modeste portate.

Le caratteristiche idrogeologiche dell'area sono direttamente correlabili con le variazioni litologiche dei depositi alluvionali. Le alluvioni sabbiose dei corsi d'acqua della zona sono spesso sature e ospitano falde confinate, semiconfinite o spesso freatiche, essendo in continuità con la falda idrica superficiale. I livelli da fini a medio grossolani, attribuibili alle esondazioni dei corsi d'acqua, ospitano quindi una falda freatica alimentata principalmente dalle infiltrazioni superficiali e dai canali di bonifica. Le profondità della falda freatica sono spesso modeste (dell'ordine di 0,5-4,0 m dal p.c.) e variano con l'andamento delle stagioni e ovviamente con le variazioni topografiche che si riscontrano tra le valli (falda più vicina alla superficie) e i dossi fluviali (più profonda).

**FALDA DA PROVE CPT:** il monitoraggio del livello piezometrico misurato all'interno dei fori di sondaggio ha consentito di identificare il seguente livello di falda rispetto al piano di campagna:

CPT (prof da p.c.)	1 (-20.0 m)
Profondità falda	<b>-1,6 m</b>

Le misure sono riferibili ad una falda libera, caratterizzata da medi valori di trasmissività e da una variabilità del proprio livello in stretta relazione con gli apporti meteorici, la stagionalità e il reticolo di bonifica presente. Non si esclude che le acque di provenienza meteorica possano risalire, in occasione di forti e/o prolungate precipitazioni, in strati di terreno anche più superficiali.

### 3.4 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DELL'AREA

La componente pericolosità del rischio sismico dipende:

- dalle caratteristiche sismiche dell'area, cioè dalle sorgenti sismiche, dall'energia, dal tipo e dalla frequenza dei terremoti; questi aspetti sono comunemente indicati come "pericolosità sismica di base";
- dalle caratteristiche geologiche e morfologiche del territorio, in quanto alcuni depositi e forme del paesaggio possono modificare le caratteristiche del moto sismico in superficie e costituire aspetti predisponenti al verificarsi di effetti locali quali fenomeni di amplificazione o di instabilità dei terreni (cedimenti, frane, fenomeni di liquefazione); questi aspetti sono comunemente indicati come "pericolosità sismica locale".

#### 3.4.1 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE: SISMICITÀ DEL TERRITORIO

La pericolosità sismica di base, intesa in senso probabilistico, è lo scuotimento del suolo atteso in un dato sito con una certa probabilità di eccedenza in un dato intervallo di tempo, ovvero la probabilità che un certo valore di scuotimento si verifichi in un dato intervallo di tempo.

Questo tipo di stima si basa sulla definizione di una serie di elementi di input (quali catalogo dei terremoti, zone sorgente, relazione di attenuazione del moto del suolo, ecc.) e dei parametri di riferimento (scuotimento in accelerazione o spostamento, tipo di suolo, finestra temporale, ecc.).

La zonazione sismogenetica del territorio nazionale, chiamata ufficialmente ZS9, che identifica le zone sorgente a caratteristiche sismiche omogenee, elaborata da I.N.G.V. (2003), colloca l'area in oggetto nella zona sismogenetica **912**, ovvero in prossimità della zona sismogenetica 913. Le zone 912 e 913 sono quelle con un potenziale sismico tale da generare effetti non trascurabili nel territorio del Comune di **Nonantola**. Altre zone sismogenetiche al contorno vengono considerate poco influenti pur generando terremoti con magnitudo a volte anche elevata (ad es. la zona 915).

Le citate zone sono principalmente collegate a meccanismi focali compressivi e trascorrenti, che si originano nella Dorsale Ferrarese ma risentono anche dell'attività sismica del margine appenninico e, seppur in modo subordinato, della sismicità della zona alpina. Risultano secondari e subordinati i meccanismi focali distensivi.

Gli eventi sismici di maggiore intensità per l'area di interesse si sono verificati nel territorio modenese, la pianura emiliana, il reggiano e il parmense, con ipocentri concentrati prevalentemente nei primi 10/15 km del sottosuolo (attività sismogenetica di tipo superficiale), e più di recente con la crisi sismica che ha colpito la bassa pianura modenese e ferrarese nel maggio-giugno 2012; la distribuzione degli ipocentri focali che si generano tra -10 e -40 km dal piano campagna, è simile a quella più superficiale ma contraddistinta da intensità e frequenza inferiori.

Nell'ambito territoriale a cui appartiene il **Comune di Nonantola**, il Database Macrosismico Italiano DBMI11 (a cura di M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi), utilizzato per la compilazione del catalogo parametrico CPTI11 (Gruppo di lavoro CPTI, 2011 – INGV, Bologna) sono documentati gli eventi sismici giungenti al 7° grado della scala Mercalli – Cancani Siedberg, con intensità variabile tra  $M = 5.5 \div 5.9$ .

L'OPCM 3519/2006 ha indicato i Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone. A tale ordinanza è allegata la Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento a scala nazionale (progetto DPC-INGV-S1) nella quale è possibile verificare che il territorio del Comune di **Nonantola** è compreso nell'area caratterizzata da valori dell'accelerazione massima al suolo ( $a_{max}$ ), con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita ai suoli molto rigidi ( $Vs_{30} > 800$  m/s; cat. A, All. 2, 3.1), compresi **tra 0,150 e 0,175 g**.

La Regione Emilia-Romagna, in data 02-05-2007, ha approvato la Del. n. 112 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica."; in All. A4 sono riportati i valori di accelerazione max, espressa sempre in frazione dell'accelerazione di gravità g ( $a_{refg}$ ), per ogni comune della Regione. Per il Comune di **Nonantola** risulta  **$a_{refg}=0,160$** .

Con l'aggiornamento apportato dalla DGR n.2193/2015 la Regione Emilia-Romagna ha disposto che la pericolosità sismica sia valutata a partire dai valori di  $a_{refg}$  elaborati da INGV per il territorio nazionale, resi disponibili per il territorio regionale sui punti di una griglia con passo 0,05 gradi, e disponibili nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema "Sismica – Microzonazione Sismica". Il valore di  $a_{refg}$  relativo al sito analizzato si ottiene interpolando i valori di  $a_{refg}$  definiti nei punti della griglia più prossimi al sito oppure utilizzando il valore del punto della griglia più vicino. A tal riguardo, per il sito di interesse si è ottenuto il valore  **$a_{refg}=0,159$**  per edifici in classe d'uso 2.

Le Nuove NTC (2018), col sostegno dei risultati del progetto S1-INGV, consentono di definire la pericolosità sismica di base attraverso le forme spettrali per differenti periodi di ritorno  $T_R$ , a iniziare dai valori dei parametri:

**$a_g$**  accelerazione orizzontale massima;

**$F_0$**  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.

Per la definizione della pericolosità si fa riferimento a 4 stati limite per l'azione sismica (SLO, SLD, SLV, SLC), al cui crescere fanno corrispondere una progressiva crescita del danneggiamento dell'insieme di struttura, elementi non strutturali ed impianti. A seconda delle caratteristiche prestazionali richieste alla generica costruzione si possono ricavare l'accelerazione del suolo  $a_g$  e le forme dello spettro di risposta di progetto per ciascun sito, costruzione, situazione d'uso, stato limite.

A partire dalle coordinate geografiche e caratteristiche prestazionali del manufatto di interesse, facendo riferimento alla media pesata dei valori che si riferiscono a quattro punti del reticolo che comprendono l'area in oggetto (coordinate espresse in ED50):

latitudine: 44,683203

longitudine: 11,038546



**Classe: 4**

Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1	ID: 16060	Lat: 44,6595	Lon: 11,0312	Distanza: 2701,488
Sito 2	ID: 16061	Lat: 44,6609	Lon: 11,1014	Distanza: 5555,279
Sito 3	ID: 15839	Lat: 44,7109	Lon: 11,0994	Distanza: 5712,267
Sito 4	ID: 15838	Lat: 44,7095	Lon: 11,0292	Distanza: 3011,546

si è potuto risalire ai seguenti valori dei parametri e agli spettri di risposta per diversi stati limite:

<b>Operatività (SLO):</b>		<b>Danno (SLD):</b>	
Probabilità di superamento:	81 %	Probabilità di superamento:	63 %
Tr:	60[anni]	Tr:	101[anni]
ag:	0,063 g	ag:	0,081 g
Fo:	2,498	Fo:	2,463
Tc*:	0,272 [s]	Tc*:	0,275 [s]
<b>Salvaguardia della vita (SLV):</b>		<b>Prevenzione dal collasso (SLC):</b>	
Probabilità di superamento:	10 %	Probabilità di superamento:	5 %
Tr:	949[anni]	Tr:	1950[anni]
ag:	0,209 g	ag:	0,273 g
Fo:	2,523	Fo:	2,459
Tc*:	0,280 [s]	Tc*:	0,290 [s]

### 3.5 PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE E MICROZONAZIONE SISMICA

Le azioni sismiche definite in precedenza su scala territoriale possono assumere, anche a distanze di poche decine di metri, caratteristiche differenti in funzione delle diverse condizioni geologiche che caratterizzano un dato ambito locale (morfologia superficiale, morfologia del substrato roccioso sepolto, presenza e profondità della falda freatica, costituzione e proprietà del sottosuolo, presenza di faglie, ecc.). Si possono così avere effetti temporanei, che cessano quando cessa il terremoto (es. amplificazione del moto sismico), e, in caso di forti terremoti, modifiche permanenti del paesaggio (frane, rotture del terreno, cedimenti, ecc.).

La microzonazione sismica si propone di studiare e valutare quantitativamente l'influenza che le condizioni geologiche locali hanno sui movimenti del suolo durante un evento sismico.

L'elemento base della microzonazione sismica è la valutazione della "risposta sismica locale" (RSL). Con tale termine s'intende l'insieme delle modifiche in intensità, ampiezza e frequenza, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (bedrock), posta ad una certa profondità nel sottosuolo, subisce attraverso gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie.

La microzonazione sismica è quindi uno strumento di riduzione del rischio che si attua nel rispetto di specifiche normative nazionali e regionali e che viene applicato fino dalle prime fasi della pianificazione urbanistica.

Gli aspetti e i principi fondamentali degli studi di MS sono:

- 1) definizione degli scenari di pericolosità sismica locale, cioè identificazione delle parti di territorio suscettibili di effetti locali (amplificazione del segnale sismico, cedimenti, instabilità dei versanti, fenomeni di liquefazione, rotture del terreno, ecc.);
- 2) suddivisione del territorio in zone a diversa pericolosità sismica locale e stima quantitativa della risposta sismica locale dei depositi e delle morfologie presenti nelle aree indagate ("Microzonazione Sismica", MS);
- 3) tre livelli di approfondimento a seconda delle finalità e delle condizioni di pericolosità sismica locale;
- 4) gli studi di MS fanno riferimento ad un periodo di ritorno dell'evento atteso di 474 anni (probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni).

Gli studi di Microzonazione Sismica (MS) consentono quindi di caratterizzare il territorio in base alla risposta sismica locale, cioè al comportamento del terreno durante e dopo il terremoto, individuando e delimitando le aree a comportamento omogeneo, distinguendo tra:

- zone stabili,
- zone suscettibili di amplificazione del moto sismico e
- zone soggette a instabilità, quali frane, fratturazioni superficiali e liquefazioni.

La Regione Emilia-Romagna per la programmazione territoriale e di pianificazione territoriale ed urbanistica ha recepito i numerosi studi di microzonazione sismica finora realizzati, tra cui lo Studio di microzonazione sismica del Comune di **Nonantola**.

I risultati dello studio di microzonazione sismica del Comune di **Nonantola** sono stati approvati dalla RER e pubblicati dal Comune in un documento con allegate diverse tavole tra cui le Mappe delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica, le Mappe delle Frequenze Naturali dei terreni e le Mappe dei Fattori di Amplificazione in termini di rapporto di accelerazione massima orizzontale ( $PGA/PGA_0$ ), sia di rapporto di Intensità di Housner ( $SI/SI_0$ ) per prefissati intervalli di periodo.

### 3.5.1 MAPPA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA DELL'AREA: 1° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO

Il Comune di Nonantola ha approvato, con Deliberazione di Consiglio Comunale n. 73 del 27.10.2016, la variante specifica al PRG, ai sensi del combinato disposto dell'art. 15 della l.r. 47/1978 e dell'art. 41 della l.r. 20/2000, riduzione del rischio sismico in adeguamento alla pianificazione sovraordinata (art. 14 PTCP 2009). Il documento di piano ha come riferimento, per definire gli scenari di pericolosità sismica, la DAL della Regione Emilia-Romagna n.112 del 2/5/2007: Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art.16, c.1, della L.R. 20/2000 per *"Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"*, pubblicata sul B.U. della Regione Emilia-Romagna n.64 del 17/5/2007".

Si riporta per l'area di interesse la "Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica" MOPS I° livello di approfondimento, di cui si può osservare un estratto in **Figura n.4**.

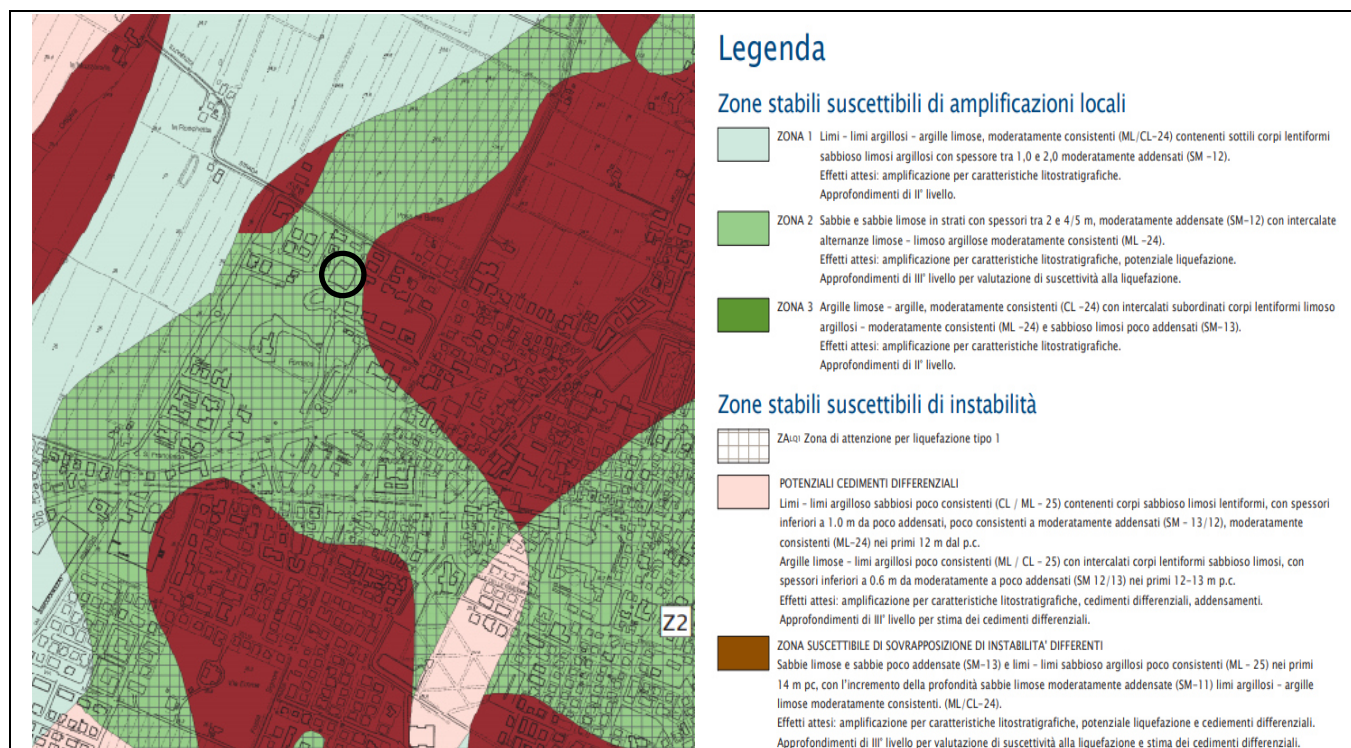


Figura n. 4: Carta delle MOPS, tratta dal Piano di riduzione del Rischio Sismico del Comune di Nonantola (stralcio)

**OSSERVAZIONI:** come si evince dalla “*Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS I° livello*”, vengono individuate delle microzone omogenee, sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche, ovvero a comportamento equivalente in occasione di sollecitazioni sismiche. Tali aree sono state definite in base alle prospezioni geotecniche e geofisiche direttamente effettuate. In particolare, il fabbricato ricade all'interno della **ZONA 2/ZA<sub>LQ1</sub>** definita come: “Aree potenzialmente instabili con presenza di depositi di canale fluviale prevalentemente sabbiosi e sabbioso limosi, in strati con spessori tra 2 e 4/5 m e > 5m, moderatamente addensati (Sm - 12) con intercalate alternanze limose – limoso argillose moderatamente consistenti (ML - 24), con  $V_s < 180$  m/sec nei primi 5 m del sottosuolo”.

**Effetti attesi:** amplificazione per caratteristiche litostratigrafiche, potenziale liquefazione.

**Studi richiesti:** valutazione amplificazione per caratteristiche litostratigrafiche, valutazione della suscettività alla liquefazione.

Sono richiesti **approfondimenti di III° livello** per la stima di suscettività alla liquefazione.

### 3.5.2 MAPPA DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO VS NEI PRIMI 30 METRI DA P.C. - 2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO

All'interno del piano di riduzione del Rischio Sismico, in relazione all'analisi del 2° livello di approfondimento è stata presa in considerazione la “*Carta delle Velocità delle onde di taglio  $V_s$  nei primi 30 m da p.c.*”, di cui si può osservare un estratto in **Figura n.5**.



Figura n. 5: Carta delle Velocità delle onde di taglio  $V_s$  nei primi 30 m da p.c., tratta dal Piano di riduzione del Rischio Sismico del comune di Nonantola (stralcio in scala grafica)

Analizzando la carta di **fig. 5** si osserva che nella zona le velocità delle onde di taglio  $V_{s30}$  sono di poco inferiori a 190 m/s. Tale dato sarà verificato nel dettaglio attraverso le indagini geofisiche realizzate all'interno dell'area dell'edificio scolastico in oggetto.

### 3.5.3 MAPPA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE E DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE DELL'AREA: CARTA DI MICROZONAZIONE SISMICA DI 3° LIVELLO

Il Comune di Nonantola, sulla base di dati geologici e geomorfologici di dettaglio, prove geofisiche e geotecniche in situ, ha poi prodotto una ulteriore approfondimento di microzonazione sismica: la "Carta di microzonazione sismica Livello 3" di cui si riporta un estratto in **Figura n.6-7-8**, dove vengono individuate aree a comportamento sismico equivalente attribuendo alle stesse indici quantitativi che definiscono in base alle condizioni stratigrafiche e topografiche l'amplificazione sismica attesa ( $T_r = 475$  anni;  $\zeta = 5\%$ ).

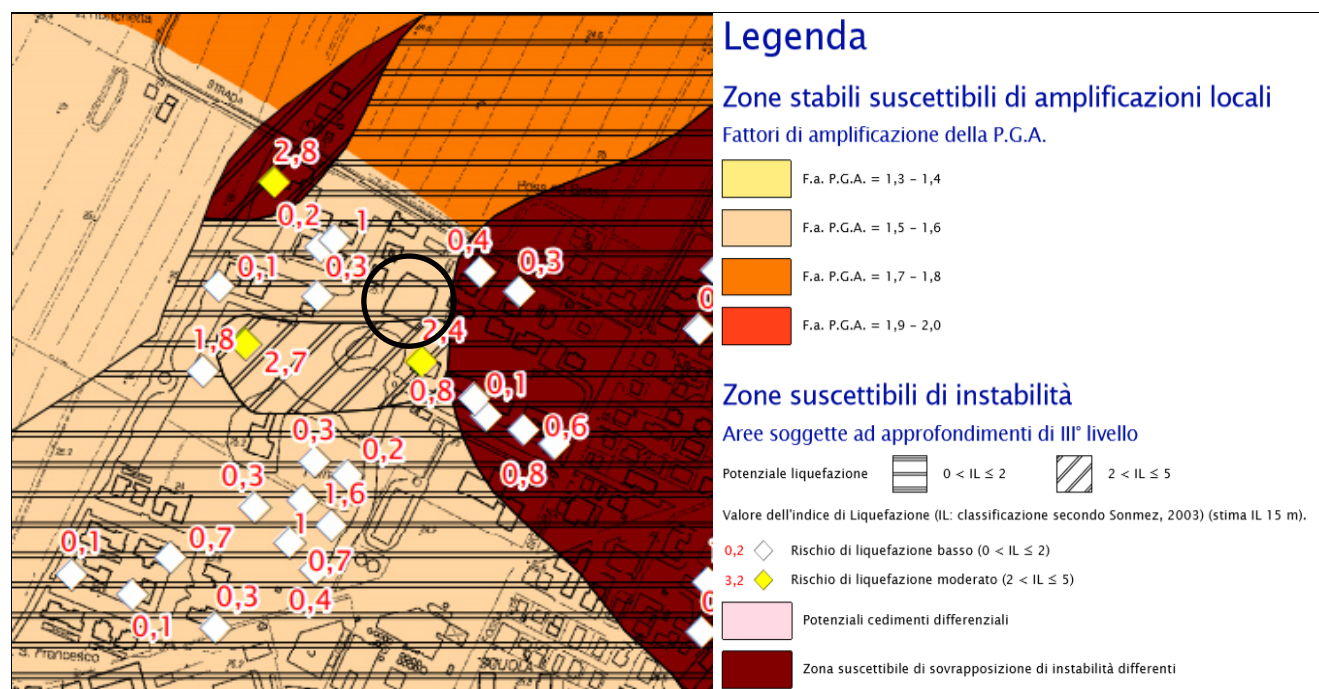


Figura n. 6: Carta dei fattori di amplificazione F.A. – P.G.A.

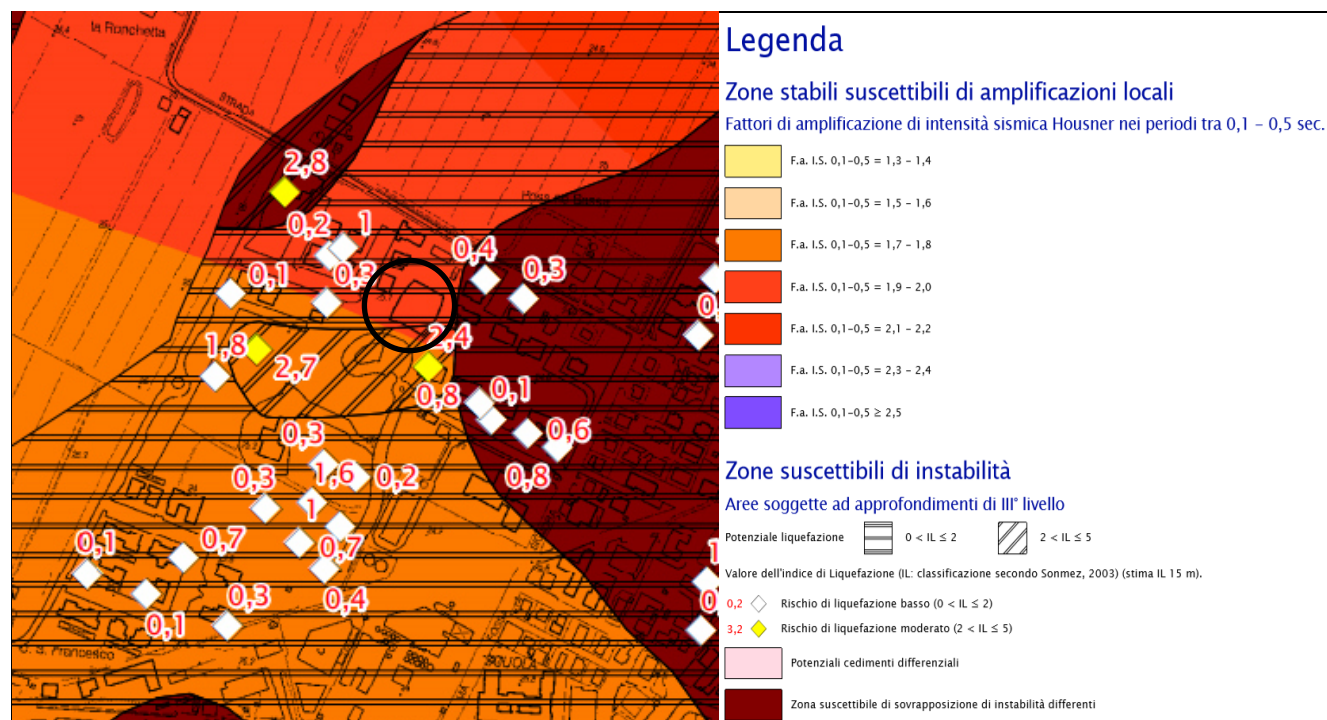


Figura n. 7: Carta dei fattori di amplificazione in intensità spettrale di Housner nei periodi compresi tra 0,1 e 0,5

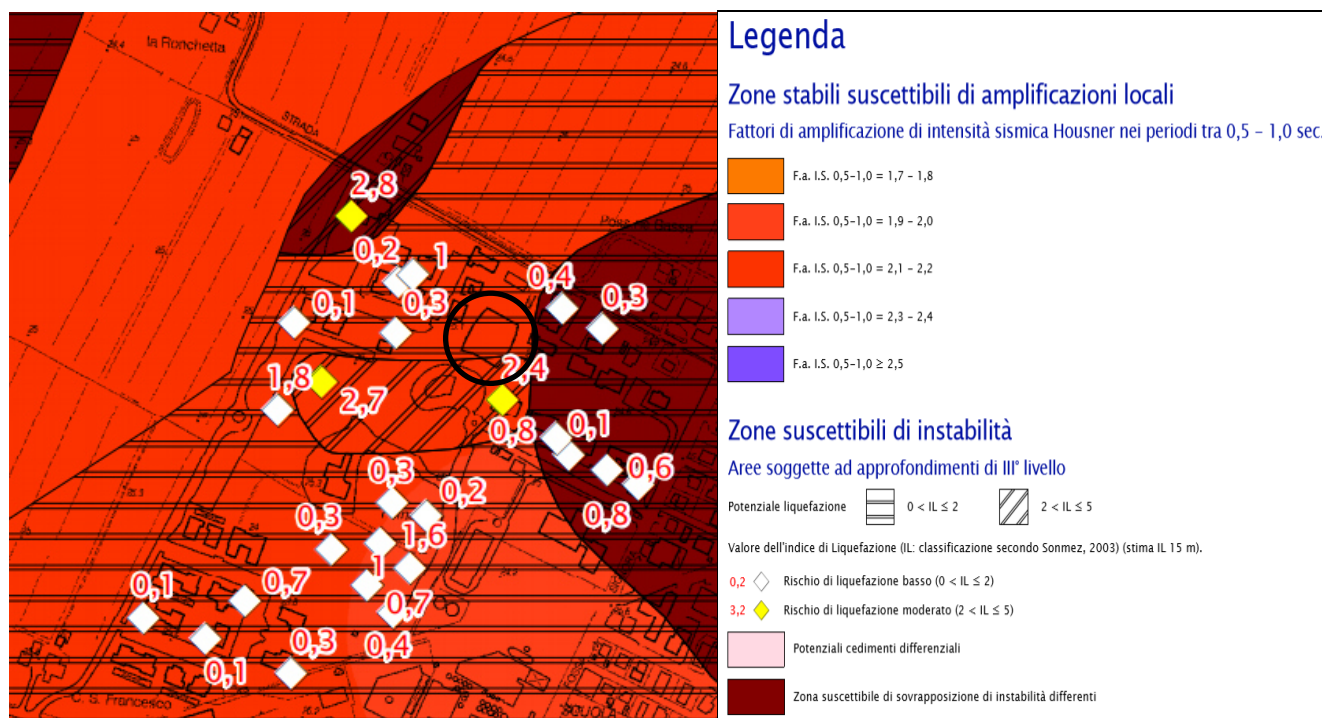


Figura n. 8: Carta dei fattori di amplificazione in intensità spettrale di Housner nei periodi compresi tra 0,5 e 1,0

**OSSERVAZIONI:** le carte riportano l'analisi di risposta sismica locale 1D per il calcolo valori dei fattori di amplificazione FA utilizzando gli abachi regionali (DAL 112/2007) e il valore dell'Indice di Liquefazione secondo la Classificazione di Sonmez (2003).

Le stime dell'amplificazione e del rischio di liquefazione sono state definite per un periodo di ritorno di  $T_r=475$  anni (corrispondente ad una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) e smorzamento =5%. Si riporta quindi il valore del Fattore di Amplificazione FA (PGA) individuato nello studio di microzonazione sismica per l'area di interesse e di intensità spettrale di Housner nei periodi compresi 0.1-0.5s e tra 0.5-1.0s:

- $F_A$  (PGA) = 1.5-1.6;
- $F_A$  IS (0.1 - 0.5s) = 1.9-2.0;
- $F_A$  IS (0.5 - 1.0s) = 2.1-2.2.

Il valore dell'Indice di Liquefazione secondo la Classificazione di Sonmez (2003), calcolato in alcuni punti prossimi all'area di interesse, indica la presenza di terreni suscettibili di liquefazione. Le verifiche dell'Indice di Liquefazione (IL) più prossime riportano valori molto variabili compresi tra 0,2 e 2,4 (stima IL 15 m) quindi con rischio da Basso a Moderato.

Le valutazioni effettuate evidenziano che la netta prevalenza del territorio nell'intorno del manufatto è contraddistinta da pericolosità di liquefazione bassa ( $IL < 2$ ) ed in minor percentuale a pericolosità moderata ( $2 < IL < 5$ ) in accordo con le caratteristiche territoriali dell'area di media pianura.

#### **4. CARATTERIZZAZIONE DI DETTAGLIO DEL SITO MEDIANTE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE**

Una volta valutato l'intervento in progetto, in relazione alle criticità riscontrate nei precedenti paragrafi, si è decisa una campagna di indagini di dettaglio atta a supportare i successivi gradi approfondimento. La campagna di indagini è stata concordata con il Tecnico Progettista e ha previsto una distribuzione tale da essere rappresentativa dell'intera area in esame. A tal fine sull'area di intervento si sono programmate le seguenti indagini:

- N.1 prova penetrometrica statica con punta meccanica CPT, spinta sino a -20 m di profondità;
- n.1 acquisizione di sismica attiva MASW;
- N. 1 acquisizione di sismica passiva con misurazione di microtremore a stazione singola TR.

L'ubicazione generale delle indagini considerate nel presente studio è riportata in **Figura n.9**.

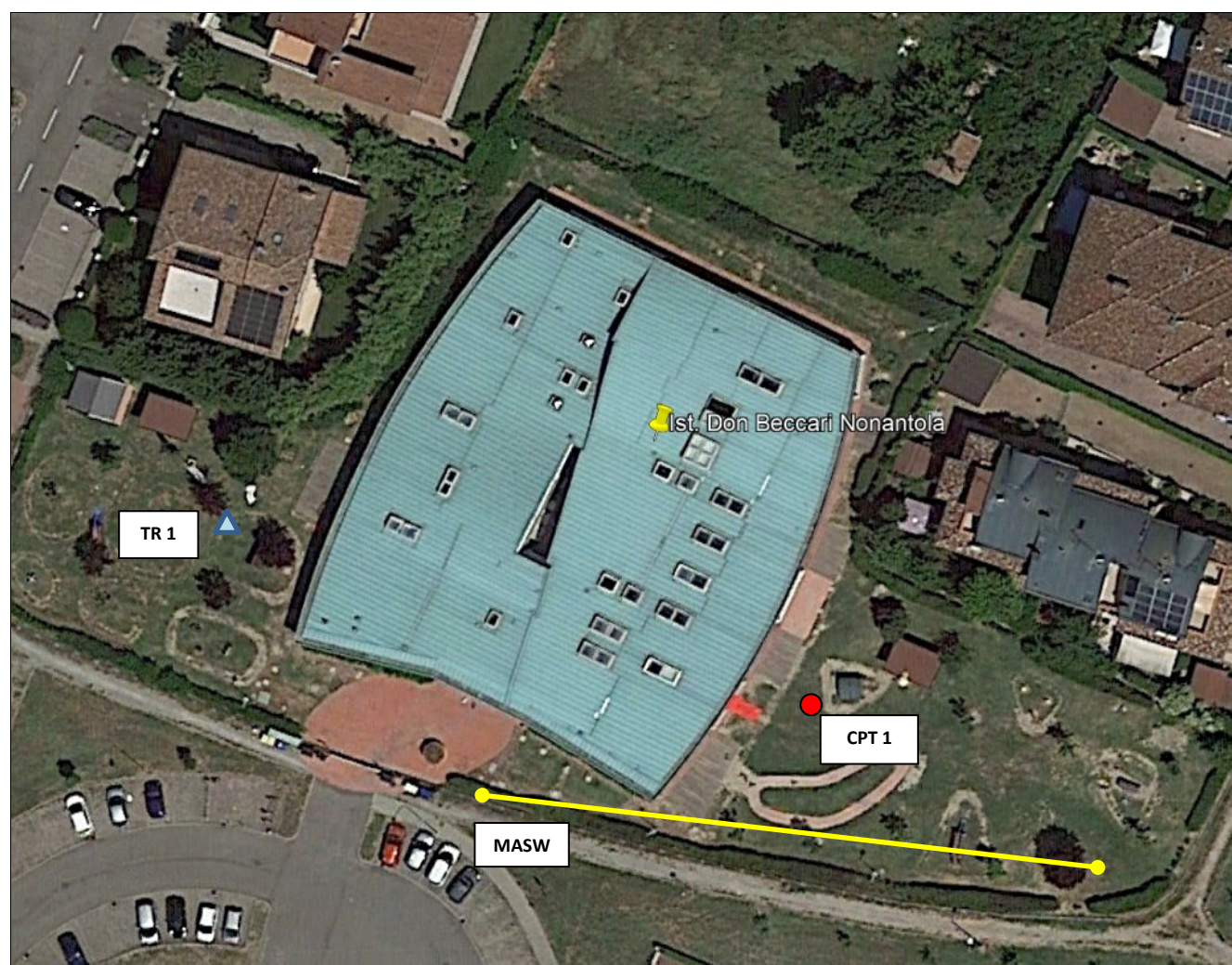


Figura n. 9: ubicazione indagini geognostiche.

#### 4.1 PROVE PENETROMETRICHE: ATTREZZATURA ED ELABORAZIONE

L'attrezzatura utilizzata per la realizzazione della prova penetrometrica CPT si compone di un penetrometro Pagani TG 63-100 montato su carro cingolato, ancorato al terreno mediante eliche. Le caratteristiche dello strumento impiegato per i sondaggi sono le seguenti:

Punta meccanica	Begemann
Spinta	100 kN
Intervalli di misura	20 cm
Parametri registrati	Rp (resistenza punta); Rl (resistenza attrito-laterale)
Area punta	10 cm <sup>2</sup>
Angolo alla punta	60°

**PROVA STATICA:** La prova penetrometrica statica CPT (Cone Penetration Test) viene realizzata infiggendo nel terreno, alla velocità di 2 cm/sec, la punta meccanica Begemann. La punta presenta alla sua estremità inferiore un cono avente un angolo al vertice di 60°, un diametro alla base di 36 mm e quindi un'area di base di 10 cm<sup>2</sup>. Esso supporta lungo il suo stelo un manicotto d'attrito, la cui superficie laterale è di 150 cm<sup>2</sup>.

I parametri geotecnici della prova sono stati ottenuti mediante la lettura di campagna relativa all'infissione della sola punta (Rp), e mediante la lettura dell'infissione della punta e del manicotto (Rl). Si sono ottenuti così i valori di resistenza alla punta ( $q_c$ ) e di resistenza laterale locale ( $f_s$ ), espressi in MPa, per ogni 20 cm di terreno attraversato. Dal rapporto  $q_c / f_s$  si è potuta effettuare una valutazione della litologia.



Figura n.10: immagini della prova penetrometrica CPT

#### 4.2 PROVA MASW: ATTREZZATURA ED ELABORAZIONE

La prova MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) è stata eseguita con un sismografo multicanale della ditta SARA srl, mod. "DOREMI", dotato di 24 geofoni verticali con frequenza propria di 4,5 Hz.

Lo strumento è in grado di rilevare l'istante di energizzazione tramite geofono starter. È inoltre equipaggiato di software proprietario in grado di gestire tutte le operazioni di campagna attraverso le seguenti fasi:

- impostazione numero di canali, frequenza e lunghezza di campionamento;
- selezione entità dell'amplificazione del segnale per ogni canale;
- impostazione filtri delle frequenze indesiderate;
- visualizzazione sismogramma con misura dei tempi di arrivo;

– esecuzione operazioni di somma e sottrazione di ulteriori sismogrammi.

Per l'energizzazione è stata utilizzata una mazza del peso di 8 kg e una piastra di battuta di alluminio. L'indagine sismica di tipo MASW consente la determinazione diretta della velocità delle onde trasversali (Onde di taglio - onde Sh/Sv) dei terreni del sottosuolo in modo da ottenere una corretta caratterizzazione della categoria sismica del sottosuolo dell'area indagata.

L'interpretazione delle tecniche di rilievo sismico MASW è basata sul fatto che la quasi totalità dell'energia sviluppata a seguito di un'energizzazione (circa 2/3) si propaga tramite onde superficiali (onde di Rayleigh).

A tale scopo Park et Alii (1999) hanno sviluppato il metodo MASW con l'utilizzo simultaneo di 24 (o più) geofoni (sismometri polarizzati verticalmente –freq. max 4,5 Hz) per consentire di ricavare numerosi profili di velocità Vs, dallo studio delle velocità di fase dei numerosi treni d'onda di Rayleigh. I geofoni possono essere spazati da 0,5 sino ad un max di circa 8-10 m e forniscono una ridondanza statistica delle misure delle velocità di fase. Le tracce dei sismogrammi permettono di distinguere ed evidenziare le onde di Rayleigh, caratterizzate da elevata ampiezza di segnale.

Dal sismogramma tramite una trasformata nel dominio frequenza (f) – numero d'onda (k) si può così risalire alla curva di dispersione (cioè un grafico ampiezza/frequenza) mediante la relazione:  $VR(f)=f/k$ . Il processo iniziale di individuazione della curva di dispersione caratteristica del sito è seguito da una fase di elaborazione-interpretazione detta "analisi spettrale". Si procede quindi a definire il modello sismo-stratigrafico del terreno seguendo una serie di passaggi, tra cui:

- fase di pre-processing per migliorare la qualità del dato acquisito;
  - passaggio dal sismogramma al dominio spettrale mediante trasformata FK;
  - picking dei punti dello spettro per ottenere la curva di dispersione sperimentale; la procedura consiste nel trovare per ogni frequenza dei massimi assoluti/relativi dello spettro FK, finalizzata alla individuazione del modo fondamentale di propagazione dell'onda (ovvero quello a velocità minore), senza trascurare (analisi multimodale) di ricercare anche eventuali modi superiori;
  - estrazione curva di dispersione sperimentale tramite la procedura sopra indicata dallo spettro FK;
  - inversione: tale procedura è avviata per ottimizzare un modello stratigrafico che sia sovrapponibile alla curva di dispersione sperimentale del sito; il programma utilizza una tecnica di inversione lineare che presenta il vantaggio di minimizzare l'errore quadratico medio tra dati sperimentali e dati teorici;
- Fase di ottimizzazione e di taratura della curva teorica, realizzata contestualmente alla procedura d'inversione, con inserimento (eventuale) di strati, assegnazione di moduli di Poisson e taratura dello spessore degli strati mediante confronto con prove dirette (prove penetrometriche, stratigrafie, ecc.). Alcune fasi delle indagini geofisiche sono riportate in **Figura n.11**.



Figura n11: immagini della prova geofisica MASW

#### 4.3 PROVA MICROTREMORE A STAZIONE SINGOLA: ATTREZZATURA ED ELABORAZIONE

Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva eseguite con tromografo digitale sono finalizzate all'elaborazione degli spettri di base ed analisi HVSR del sottosuolo. Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, oggi considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mulargia et al., 2007).

Il rumore di fondo (microtremore), presente ovunque sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici che all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole ( $10^{-15}$  m/s<sup>2</sup>), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione dette passive.

Tutte le onde elastiche dalla sorgente al sito, subiscono modifiche al loro tragitto ed attenuazioni in relazione alla natura del sottosuolo attraversato. Le informazioni stratigrafiche contenute nei microtremori sono sovrapposte al rumore casuale e possono essere estratte attraverso metodologie come quella di Nakamura dei rapporti spettrali (HVSR – horizontal to vertical spectral ratio). Tale tecnica è utilizzata per la determinazione dell'amplificazione sismica locale e per stimare le frequenze principali di risonanza del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012).

Il metodo considera i microtremori come composti in massima parte da onde di superficie (di Rayleigh) nelle componenti orizzontali e verticali, che vengono amplificate per effetto di sito a causa della presenza di discontinuità stratigrafiche nel sottosuolo. È quindi possibile ricostruire la forma spettrale del microtremore, in cui i picchi alle diverse frequenze rappresentano il rapporto tra la componente orizzontale e verticale dei segnali registrati.

Per la campagna di indagine è stato utilizzato uno strumento della SARA Electronic Instruments srl denominato Sara Geobox con sensore Sara SS45PACK, con sensore integrato da 4,5 Hz.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata alla frequenza di 300 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 20 minuti.

Le registrazioni sono state elaborate utilizzando un modulo del software "GeoExplorer HVSR 2.0.0 Alfa version" per la modellazione delle curve H/V nell'intervallo 0,0 – 128 Hz, impostando una larghezza delle finestre di analisi tra 25 e 40 secondi, e lisciamento secondo una finestra triangolare con ampiezza pari al 20%.

Alcune fasi delle indagini geofisiche sono riportate in **Figura n.12**.



Figura n.12: immagini della prova geofisica HVSR 1

## 5. RELAZIONE GEOLOGICA SULLE INDAGINI

La ricostruzione della stratigrafia del sottosuolo, finalizzata alla creazione del modello geologico è stata ottenuta mediante un rilievo geologico-geomorfologico di superficie, la consultazione delle note bibliografiche disponibili e acquisendo i dati di prove penetrometriche.

In relazione alle esigenze progettuali e alle caratteristiche di resistenza del terreno, l'indagine è stata spinta ad una profondità massima di **-20,0 m** da p.c. Durante l'esecuzione delle indagini non si sono riscontrate anomalie di funzionamento delle apparecchiature sia meccaniche che digitali.

### 5.1 MODELLO IDROGEOLOGICO-LITOSTRATIGRAFICO DEL TERRENO

La trattazione statistica dei dati numerici di resistenza permette la suddivisione in strati per la creazione di un modello geologico. I criteri per la suddivisione del volume significativo in strati sono di carattere stratigrafico-litologico, idrogeologico e di resistenza (intesa come resistenza all'infissione).

Le elaborazioni numeriche delle penetrometrie per conseguire informazioni geologiche sono state supportate da un programma di calcolo della GeoStru Software, in licenza allo Scrivente. A partire dalla caratterizzazione litologica delle unità stratigrafiche si sono definiti i parametri di resistenza utilizzando la **Media** ovvero il valore statistico riferito alla media aritmetica dei valori della resistenza alla punta sullo strato considerato.

#### 5.1.1 MODELLO GEOLOGICO CPT 1

Sulla base dei riscontri penetrometrici si può ipotizzare la seguente sequenza stratigrafica:

Unità Litostratigrafica	Prof. base strato (m)	Qc Medio (MPa)	Fs Media (MPa)	Gamma Medio (KN/m <sup>3</sup> )	Comp. Geotecnico	Descrizione
A	1,20	1,749	0,117	19,3	Incoerente-Coesivo	terreno vegetale e terreno di riporto limo-argilloso
B	3,40	1,911	0,116	19,2	Incoerente-Coesivo	argilla limosa a medio-elevata consistenza
C	14,20	1,183	0,052	18,3	Incoerente-Coesivo	argilla limosa a media consistenza
D	16,80	2,743	0,175	19,8	Incoerente-Coesivo	limi argillosi a consistenza elevata
E	20,00	2,201	0,087	19,3	Incoerente-Coesivo	limi argillosi e sabbiosi consistenti /addensati

La verticale d'indagine può essere rappresentata graficamente come segue (**Figura 13**):

**Probe CPT - Cone Penetration Nr.1**  
**Strumento utilizzato PAGANI 100 kN**

**Committente:**  
**Cantiere:**  
**Località:**

**Comune di Nonantola**  
**Ist. Don Beccari**  
**Nonantola**

**Data: 07/05/2019**

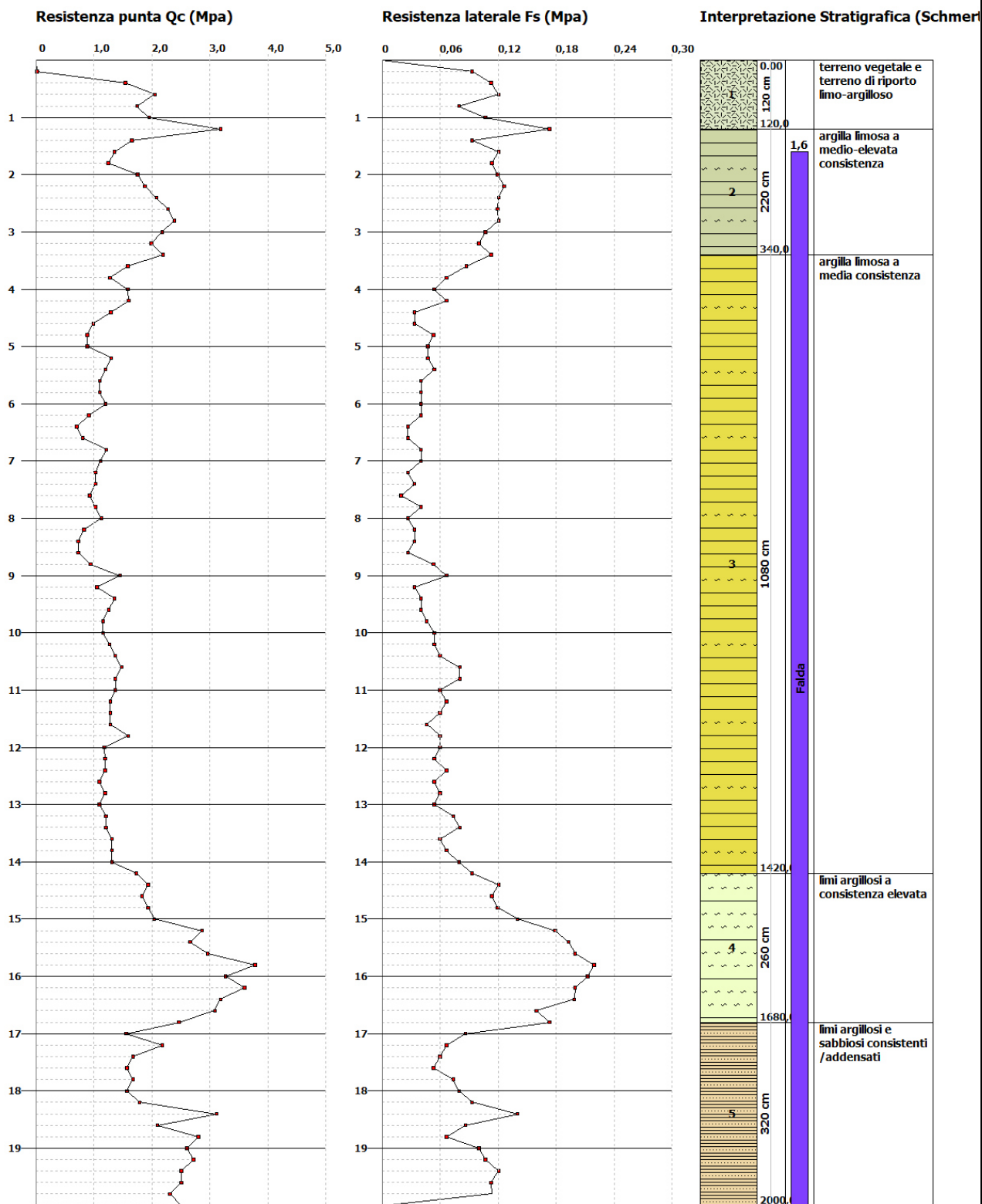


Figura 13: modello stratigrafico interpretativo della prova penetrometrica 1

## 6. RELAZIONE GEOTECNICA SULLE INDAGINI

La relazione geotecnica, intesa come l'insieme delle scelte progettuali, il programma e i risultati delle indagini, la caratterizzazione e la modellazione geotecnica, unitamente ai calcoli per il dimensionamento geotecnico delle opere e alla descrizione delle fasi e modalità costruttive, basa la sua struttura su una serie di indagini geognostiche e geotecniche, in sito ed in laboratorio.

### 6.1 MODELLO GEOTECNICO E PARAMETRI GEOTECNICI DEL TERRENO

I valori di resistenza meccanica del terreno hanno consentito la suddivisione in strati del terreno per la creazione di un **Modello Geotecnico** per singola verticale di indagine. Il modello geotecnico tiene conto dell'insieme delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni coinvolti nell'intervento in progetto, entro un volume reputato significativo. Tutti i parametri e i valori di resistenza al taglio indicati sono stati estrapolati da una "stima ragionata e cautelativa" del dato sperimentale acquisito.

Le elaborazioni numeriche per conseguire informazioni geotecniche sono state effettuate con il supporto di un programma di calcolo della GeoStru Software, in licenza allo Scrivente.

#### 6.1.1 MODELLO GEOTECNICO CPT 1

Si riporta per ogni strato la stima dei parametri geotecnici caratteristici:

Strato	Descrizione	Prof. base	Cu	Eu	Mo	G	Puv	PuvS	Fi	Ey
[1]	terreno vegetale e terreno di riporto limo-argilloso	1,2	58,3	13,1	4,5	16	19,1	19,9	26,1	4,4
[2]	argilla limosa a medio-elevata consistenza	3,4	63,7	14,3	4,2	16,9	19,3	20,1	23,1	4,8
[3]	argilla limosa a media consistenza	14,2	39,4	8,8	4,6	12,6	18,4	19,2	19,7	3
[4]	limi argillosi a consistenza elevata	16,8	91,4	20,6	5,5	21	19,8	20,6	27,7	6,9
[5]	limi argillosi e sabbiosi consistenti /addensati	20	73,4	16,5	4,4	18,4	19,4	20,2	28,7	5,5

Tabella - Modello Geotecnico del Terreno. Legenda:

Nr:	Numero progressivo strato	G:	Modulo di deformazione a taglio (MPa)
Prof:	Profondità strato (m)	Puv:	Peso unità di volume (KN/m <sup>3</sup> )
Cu:	Coesione non drenata (KPa)	PuvS:	Peso unità di volume saturo (KN/m <sup>3</sup> )
Ey:	Modulo di Young (MPa)	Fi:	Angolo di resistenza al taglio (°)
Eu:	Modulo di defomazione non drenato (MPa)	Mo:	Modulo Edometrico (MPa)

## 7. CARATTERIZZAZIONE SISMOSTRATIGRAFICA DEL SITO

Si è eseguita sul terreno oggetto di studio una campagna di indagine geofisica comprensiva di:

- n. 1 indagine sismica con metodo MASW di tipo attivo;
- n. 1 acquisizione di sismica passiva con misurazione di microtremore a stazione singola TR.

L'indagine è stata svolta con l'obiettivo primario di determinare la sismostratigrafia dell'area di intervento, nonché la velocità ponderata delle onde sismiche di taglio a partire da piano campagna  $V_s$ , in riferimento al D.M. 17/01/18 ("Nuove NTC"), e quindi l'analisi di risposta sismica locale del suolo di fondazione.

I dati ottenuti dalla prospezione sismica di superficie sono stati opportunamente tarati con dati stratigrafici e litologici presenti in bibliografia (pozzi, sezioni stratigrafiche ecc.) e delle prove penetrometriche eseguite in sito.

### 7.1 RISULTATI INDAGINE GEOFISICA CON TECNICA MASW

La Base Masw, per le possibilità operative presenti in corrispondenza del sito di intervento, presenta la geometria come sotto indicato:

- Numero geofoni 24
- Spaziatura geofoni 2,0 m
- Lunghezza stendimento geofonico 46,0 m
- Distanza punto di shot da ultimo geofono 4 m
- **Lunghezza complessiva 50 m**

I diagrammi di "dispersione Frequenza (Hz)/Vel. di Fase (m/s) con analisi spettrale (picking)" – e di "inversione" sono riportati in **Figura n.14**.

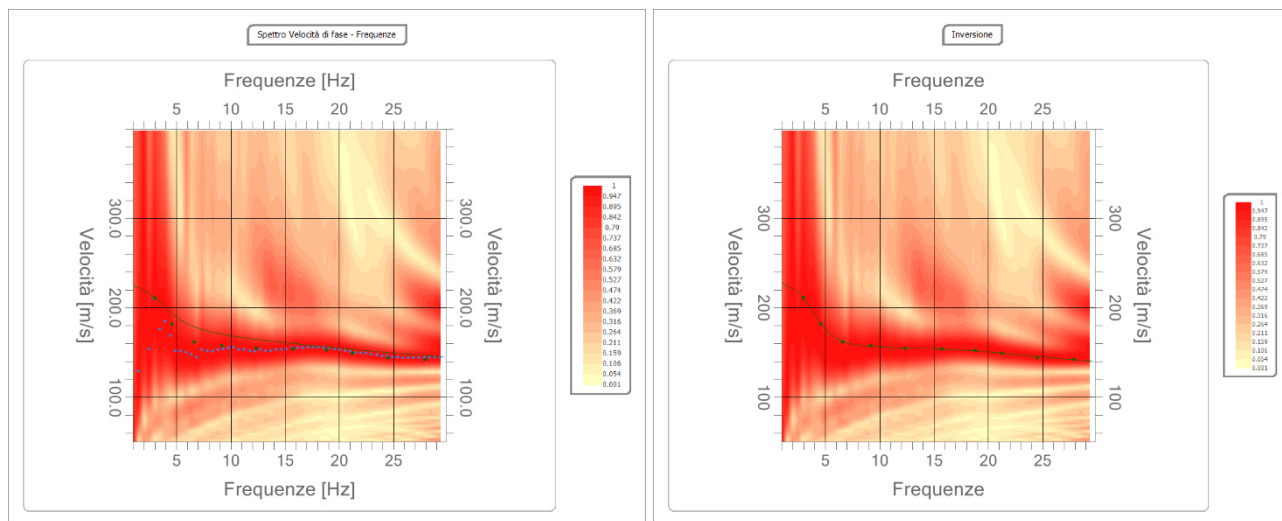


Figura n.14: diagrammi della curva di dispersione e di inversione del sito in oggetto

Di seguito si riporta il modello sismostratigrafico in forma tabellare e l'andamento della curva delle onde S con la profondità (**Figura n.15**). I valori della velocità media delle onde di taglio  $V_s$  risultano:

Profondità da p.c. (m)	Spessore (m)	Velocità onde S (m/sec)
1.58	1.58	131.28
3.44	1.86	160.73
6.96	3.52	178.72
13.77	6.81	157.70
22.18	8.41	221.89
oo	oo	255.46

Ai vari sismo-strati è stato associato il valore della velocità  $V_s$ , consentendo di ottenere il seguente profilo di velocità di propagazione delle onde di taglio (**Figura n.15**).

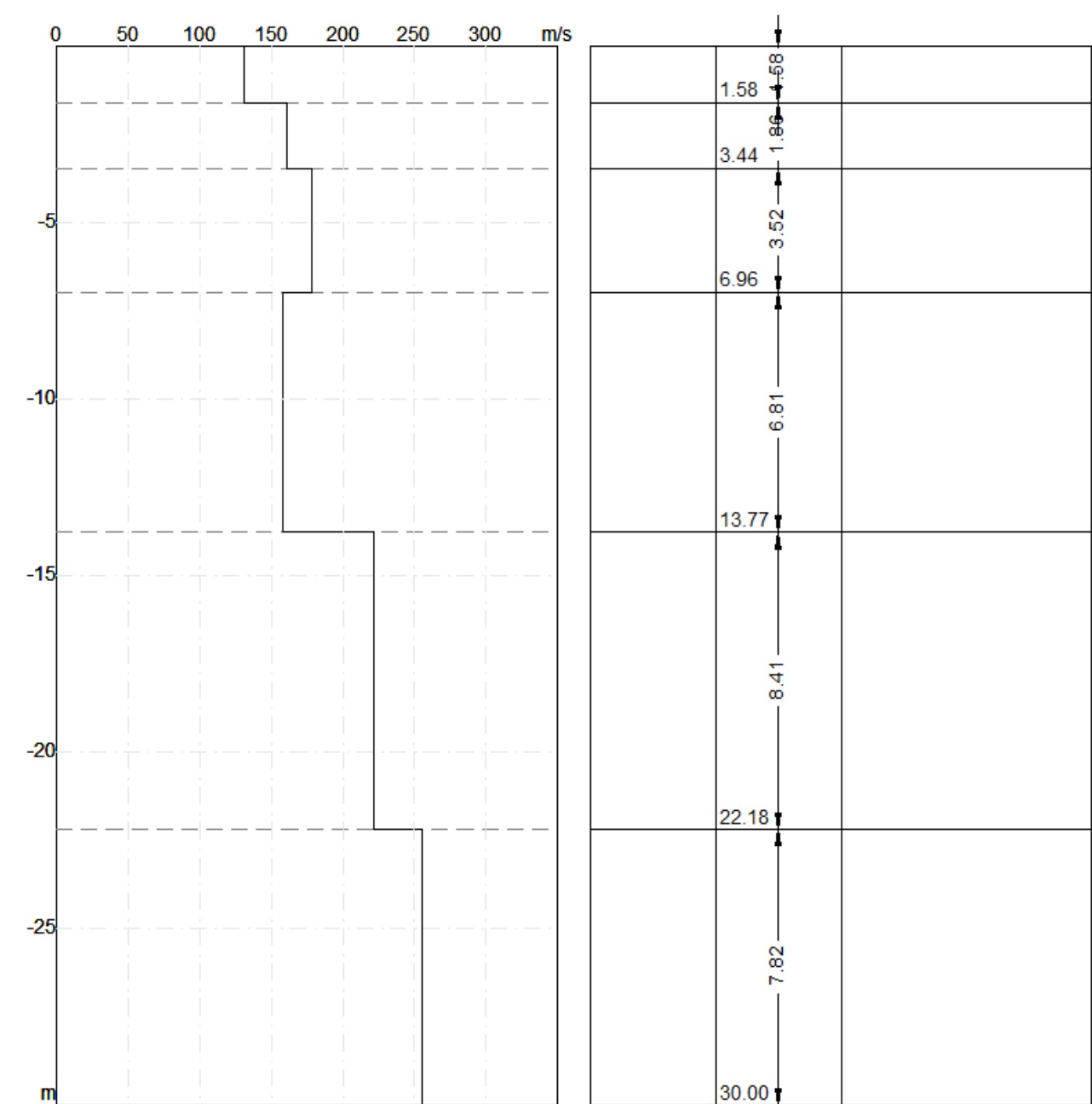


Figura n.15: diagramma velocità  $V_s$ /profondità da prova MASW

## 7.2 RISULTATI INDAGINE GEOFISICA CON TECNICA HVSR

Le misure con tromografo **TR1** hanno restituito i seguenti risultati (diagrammi in **Figura 16**):

	<b>TR1</b>
<b>Selected <math>f_0</math> frequency</b>	<b>0.800 Hz</b>
<b>A0 amplitude</b>	<b>3.604</b>
<b>Average <math>f_0</math></b>	<b><math>0.774 \pm 0.117</math></b>

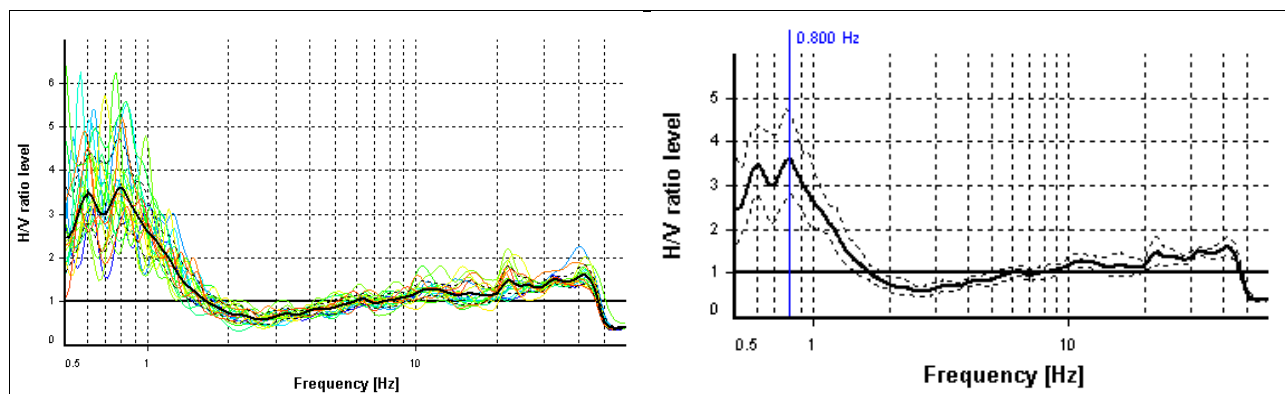


Figura 16: diagrammi delle tre differenti prove HVSR/f delle singole finestre considerate e curve risultanti dalla media delle misure effettuate, con evidenziata la frequenza di picco

I massimi rapporti spettrali H/V individuati indicano una possibile frequenza fondamentale del terreno compresa tra **0.77 Hz <  $f_0$  < 0.82 Hz**, con un valore del rapporto H/V di circa 3.6. Questo picco corrisponde al passaggio fra sequenza alluvionale continentale e possibile bedrock (bedrock-like a differente composizione e rigidità) a profondità H compresa tra -130 m e -140 m. Altri picchi meno evidenti rappresentano superfici di contatto tra terreni alluvionali a differente rigidità a quote inferiori.

Di seguito (**Figure 17 a-b**) si riporta la sovrapposizione tra la curva sperimentale e la curva sintetica HVSR, il modello sismostratigrafico e l'andamento della curva delle onde S con la profondità.

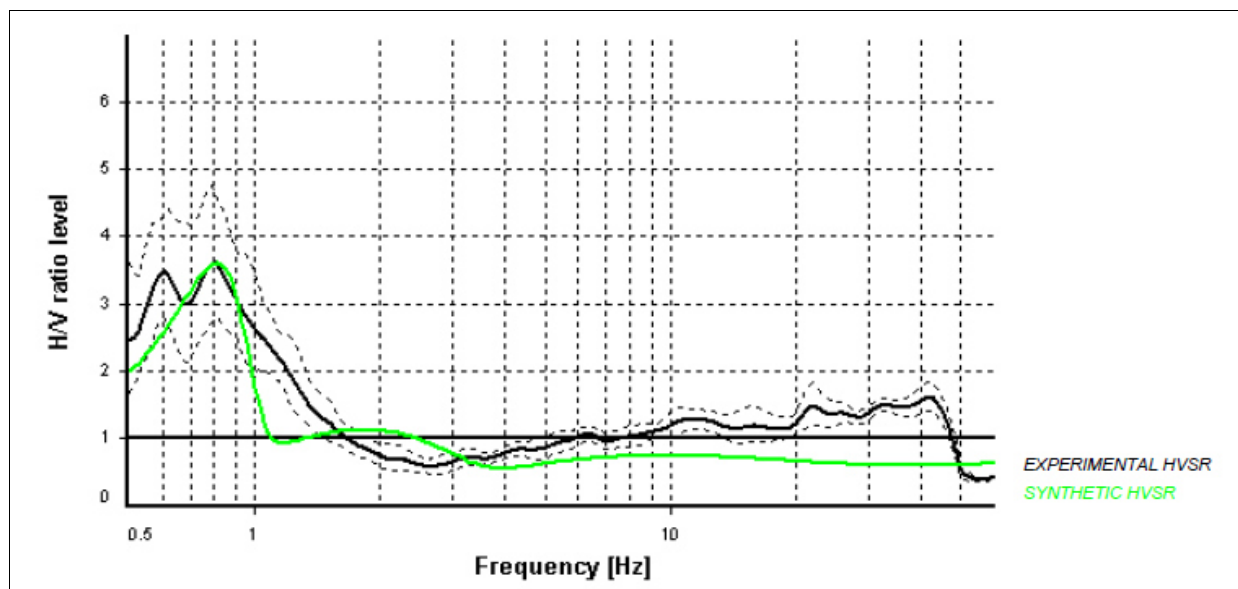


Figura 17a: curva sperimentale e curva sintetica HVSR

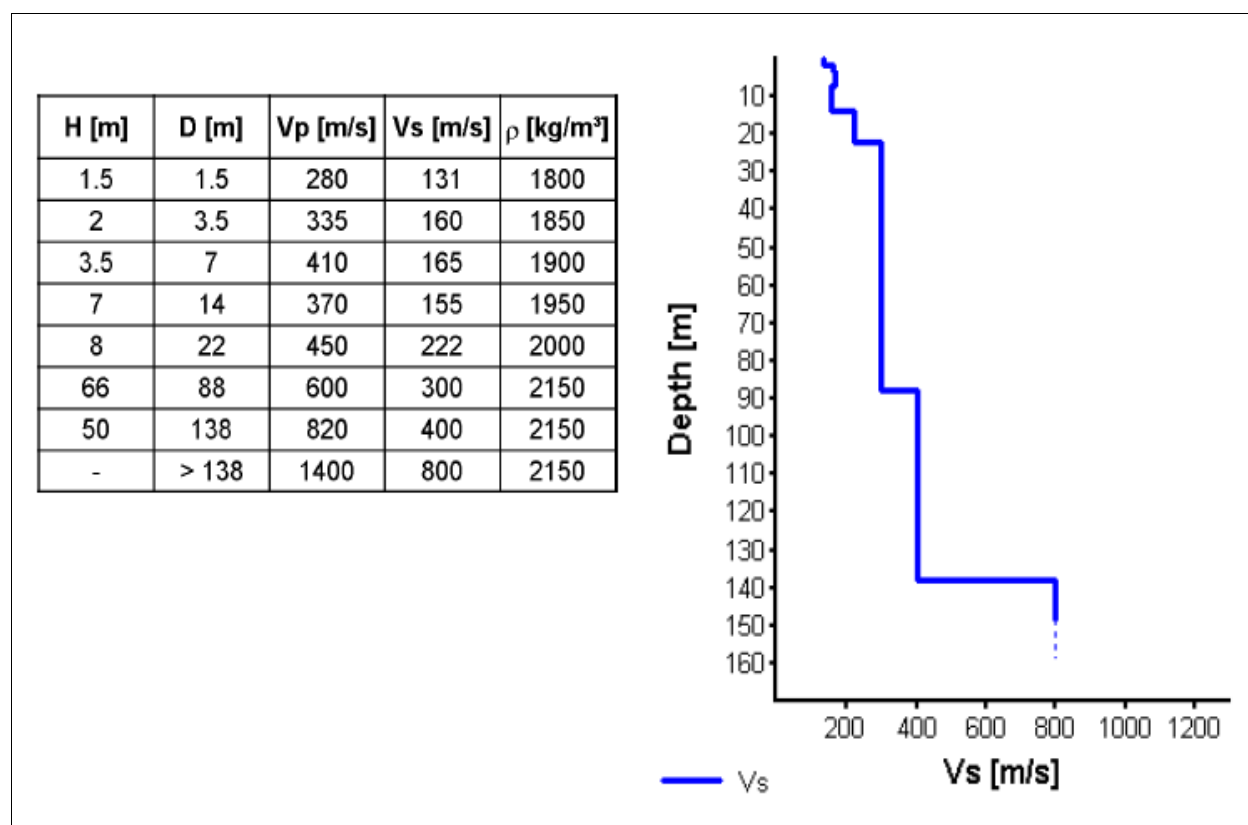


Figura 17b: modello sismostratigrafico del terreno-TR1

### 7.3 MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO DEL TERRENO E CATEGORIA SISMICA DI SOTTOSUOLO AI SENSI DELLE NTC 2018

I risultati delle indagini geofisiche hanno permesso la ricostruzione del modello di sottosuolo per l'analisi di risposta sismica locale. L'area indagata presenta caratteristiche sostanzialmente omogenee dal punto di vista della risposta sismica e, rispetto alle lunghezze d'onda di interesse, il sottosuolo può essere assunto monodimensionale 1D.

Limitatamente all'approccio semplificato, di cui al § 3.2.2 delle NTC 2018, ai vari sismo-strati è stato associato il valore della velocità  $V_s$ , consentendo di ottenere le seguenti  $V_{s30}$  (velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo) derivanti dalle due diverse prove:

**MASW**  $V_{s30} = 194$  m/sec (da p.c. a -30,0 m);  
**TR①**  $V_{s30} = 196$  m/sec (da p.c. a -30,0 m);  
**Valore medio**  $V_{s30} = 195$  m/sec (da p.c. a -30,0 m).

Tenuto conto della descrizione geotecnica, di cui alla Tabella 3.2.II (categorie di sottosuolo), contenuta nelle NTC 2018, si classifica il terreno di fondazione come appartenente alla **categoria C**, corrispondente a *“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.”*.

## **8. PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE - ANALISI DEL TERZO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO**

Sulla base degli scenari individuati si esegue il III livello di approfondimento per valutare il grado di pericolosità sismica locale ai fini della definizione della risposta sismica locale. Il terzo livello di approfondimento si attua per la valutazione dell'azione sismica in superficie e per il successivo calcolo dell'indice potenziale di liquefazione e dei cedimenti post sismici del terreno.

### **8.1 CALCOLO DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE**

Per le analisi di terzo livello di approfondimento e per l'analisi di Risposta Sismica Locale ci si riferisce a quanto specificato nell'Allegato A3 – “*Procedure di riferimento per le analisi di terzo livello di approfondimento*” e ai contenuti presenti nell'Allegato A4 – “*Spettri di risposta rappresentativi e segnali di riferimento per il calcolo della risposta sismica locale nelle analisi di terzo livello di approfondimento*”, della DGR n.2193/2015.

Gli indirizzi di cui all'Allegato A4 della DGR n.2193/2015 dispongono che il calcolo della risposta sismica locale nelle analisi di terzo livello sia eseguito sulla base di accelerogrammi di riferimento ricavabili seguendo la procedura che si basa sui valori di pericolosità sismica elaborati da INGV per il territorio nazionale resi disponibili per il territorio regionale sui punti di una griglia con passo 0,05 gradi nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema “Sismica – Microzonazione Sismica”.

Per il sito analizzato i segnali di riferimento sono stati selezionati attraverso un programma di calcolo denominato SEISM-HOME, messo a punto dalla Fondazione Eucentre (Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Via A. Ferrata, 1 – Pavia, Italy). Tali accelerogrammi possono essere usati direttamente per analisi di sistemi strutturali o geotecnici posti su terreno roccioso, o come input per analisi di risposta sismica locale in caso di terreno non roccioso (Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. [2012] “*Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms*”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 1357-1375). Tramite una procedura ottimizzata (Corigliano et al, 2012) è stato selezionato l'insieme migliore di accelerogrammi spettro-compatibili registrati su suolo di categoria A (roccioso) e disponibili nelle principali banche dati accelerometriche mondiali accreditate. I files con i segnali di riferimento normalizzati, utilizzati nella seguente verifica, sono riportati di seguito:

000764xa.cor

000182xa.cor

000234ya.cor

0455y.txt

1033y.txt

SAG0010503201053.NS

20090406\_013239ITDPC\_ASS\_\_NSC.DAT

Tutti gli accelerogrammi sono stati scalati in modo che la loro accelerazione massima corrisponda al valore di  $a_{refg} = 0,209 \text{ g}$  ( $PGA_0$ ). Tale valore di  $PGA_0$  deriva dai seguenti dati di ingresso per l'edificio e per il sisma di riferimento:

<b>Classe d'uso edificio (ipotesi):</b>	<b>4;</b>
<b>Coefficiente d'uso (<math>C_u</math>)</b>	<b>2,0;</b>
<b>Vita nominale edificio (<math>V_n</math>):</b>	<b>50 anni;</b>
<b>Periodo di riferimento (<math>V_r</math>):</b>	<b>100 anni;</b>
<b>Stato limite:</b>	<b>Salvaguardia della vita (SLV);</b>
<b>Probabilità di superamento:</b>	<b>10%;</b>
<b><math>T_r</math>:</b>	<b>949 [anni];</b>
<b><math>a_g</math>:</b>	<b>0,209g [<math>PGA_0</math>].</b>



Tra i diversi programmi di calcolo per eseguire modellazioni numeriche ai fini della valutazione della risposta sismica locale, si è utilizzato il programma RSL III - Versione: 2019.20.5.651 della Geostru Software, basato sul codice SHAKE 91 (SCHNABEL et al., 1972) per quanto concerne le soluzioni relative alle propagazioni delle onde di taglio. Il programma consente di effettuare analisi lineari e lineari equivalenti nel dominio delle frequenze per un sottosuolo stratificato. Il comportamento visco-elastico di ciascuno strato viene modellato usando un modulo di rigidità complesso [IDRISS e SUN, 1992; KRAMER, 1996]. Il substrato di base (bedrock), cui è applicato il segnale sismico, può essere modellato come rigido o come elastico, assegnandone in tal caso le proprietà.

Per ogni input sismico di riferimento si ottengono le storie temporali di accelerazione, velocità relativa e spostamento al tetto dei sotto-strati selezionati, oltre al fattore di amplificazione (FA).

Il modello numerico di risposta sismica locale è stato elaborato impostando differenti litotipi, a cui sono state associate le caratteristiche che compaiono nella tabella che segue:

n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	Gmax [MPa]	Smorzamento critico [%]	Peso unità vol. [kN/m³]	Vs [m/s]	Tensione verticale [kPa]
1	--	1.5	Lombardia - Limi argillosi	31.49	--	18.0	131.0	13.5
2	1.5	2.0	Lombardia - Argille limose	48.28	--	18.5	160.0	45.5
3	3.5	3.5	Lombardia - Limi argillosi	52.73	--	19.0	165.0	97.3
4	7.0	7.0	Lombardia - Argille limose	47.76	--	19.5	155.0	198.8
5	14.0	8.0	Lombardia - Limi sabbiosi	100.48	--	20.0	222.0	347.0
6	22.0	66.0	Lombardia - Ghiaie	192.66	--	21.0	300.0	796.3
7	88.0	50.0	Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)	350.66	--	21.5	400.0	1457.8
8	∞	--	EPRI Rock (1993) 76,50-152,40 metri	1435.27	--	22.0	800.0	1750.0

Il comportamento meccanico del terreno sotto azioni sismiche è valutato semplificando le litologie coinvolte in categorie che presentano le proprietà nel modulo di taglio  $G/G_0$  e fattore di smorzamento secondo D. Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970), EPRI Rock (1993) 76,50-152,40 metri, Lombardia - Limi argillosi, Lombardia - Argille limose, Lombardia - Limi sabbiosi e Lombardia - Ghiaie. Le leggi di variazione del rapporto  $G/G_{max}$  e del coefficiente di smorzamento in funzione della deformazione a taglio che si sono utilizzate possono essere ritenute rappresentative dei terreni presenti nel sito oggetto di intervento.

## ELABORAZIONE

Numero di iterazioni 8

Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.5

Tipo di modulo elastico Shake 91

Massimo errore percentuale di convergenza 2.57 E-04

## FATTORI DI AMPLIFICAZIONE ICMS 2018

Tai	0.170 [s]
Tvi	0.940 [s]
Tao	0.170 [s]
Tvo	0.500 [s]
Sami	0.531 [m/s²]
Svmi	0.028 [m/s]
Samo	0.839 [m/s²]
Svmo	0.063 [m/s]
<b>Fa</b>	<b>1.581 [-]</b>
Fv	2.247 [-]



TB	0.158 [s]
TC	0.474 [s]
TD	1.743 [s]
SA(0)	0.350 [m/s <sup>2</sup> ]
SA(TB)	0.839 [m/s <sup>2</sup> ]

#### FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SU INTENSITÀ SPETTRALE

Periodo minino [s]	Periodo massimo [s]	Int. Housner input [m]	Int. Housner output [m]	Int. Housner input/output [m]	FA
0.100	0.500	0.008	0.017	0.200	<b>2.015</b>
0.500	1.000	0.014	0.028	0.500	<b>2.022</b>
0.500	1.500	0.027	0.056	0.333	<b>2.033</b>

#### SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA ELASTICO

Periodo [s]	Accelerazione [m/s <sup>2</sup> ]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s <sup>2</sup> ]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s <sup>2</sup> ]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s <sup>2</sup> ]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s <sup>2</sup> ]
0.00	0.3807	0.26	0.8715	0.52	0.7663	0.98	0.2901	2.25	0.1164
0.01	0.3807	0.27	0.9223	0.53	0.7376	1.00	0.2840	2.30	0.1138
0.02	0.3816	0.28	0.9627	0.54	0.7205	1.05	0.2655	2.35	0.1107
0.03	0.3875	0.29	1.0130	0.55	0.7135	1.10	0.2677	2.40	0.1068
0.04	0.4007	0.30	0.9835	0.56	0.6912	1.15	0.2640	2.50	0.0999
0.05	0.4716	0.31	0.9925	0.57	0.6591	1.20	0.2620	2.60	0.0908
0.06	0.5007	0.32	1.0128	0.58	0.6462	1.25	0.2569	2.70	0.0797
0.07	0.6262	0.33	1.0157	0.60	0.6163	1.30	0.2582	2.80	0.0698
0.08	0.6142	0.34	1.0044	0.62	0.5828	1.35	0.2623	2.90	0.0644
0.09	0.6062	0.35	0.9891	0.64	0.5531	1.40	0.2535	3.00	0.0628
0.10	0.6351	0.36	0.9959	0.66	0.5251	1.45	0.2396	3.10	0.0624
0.11	0.6888	0.37	1.0184	0.68	0.5007	1.50	0.2396	3.20	0.0592
0.12	0.7632	0.38	1.0188	0.70	0.4712	1.55	0.2352	3.30	0.0567
0.13	0.8228	0.39	1.0176	0.72	0.4462	1.60	0.2317	3.40	0.0521
0.14	0.8588	0.40	1.0065	0.74	0.4164	1.65	0.2254	3.50	0.0472
0.15	0.8386	0.41	0.9918	0.76	0.3844	1.70	0.2127	3.60	0.0426
0.16	0.9987	0.42	0.9555	0.78	0.3617	1.75	0.1958	3.70	0.0392
0.17	1.0197	0.43	0.9223	0.80	0.3508	1.80	0.1828	3.80	0.0360
0.18	0.9906	0.44	0.9078	0.82	0.3372	1.85	0.1780	3.90	0.0349
0.19	0.9417	0.45	0.9021	0.84	0.3221	1.90	0.1719	4.00	0.0328
0.20	0.9279	0.46	0.8941	0.86	0.3100	1.95	0.1626		
0.21	0.8717	0.47	0.8756	0.88	0.3046	2.00	0.1505		
0.22	0.8495	0.48	0.8599	0.90	0.3054	2.05	0.1386		
0.23	0.8177	0.49	0.8483	0.92	0.3027	2.10	0.1333		
0.24	0.8094	0.50	0.8305	0.94	0.3016	2.15	0.1253		
0.25	0.8189	0.51	0.7955	0.96	0.2980	2.20	0.1194		

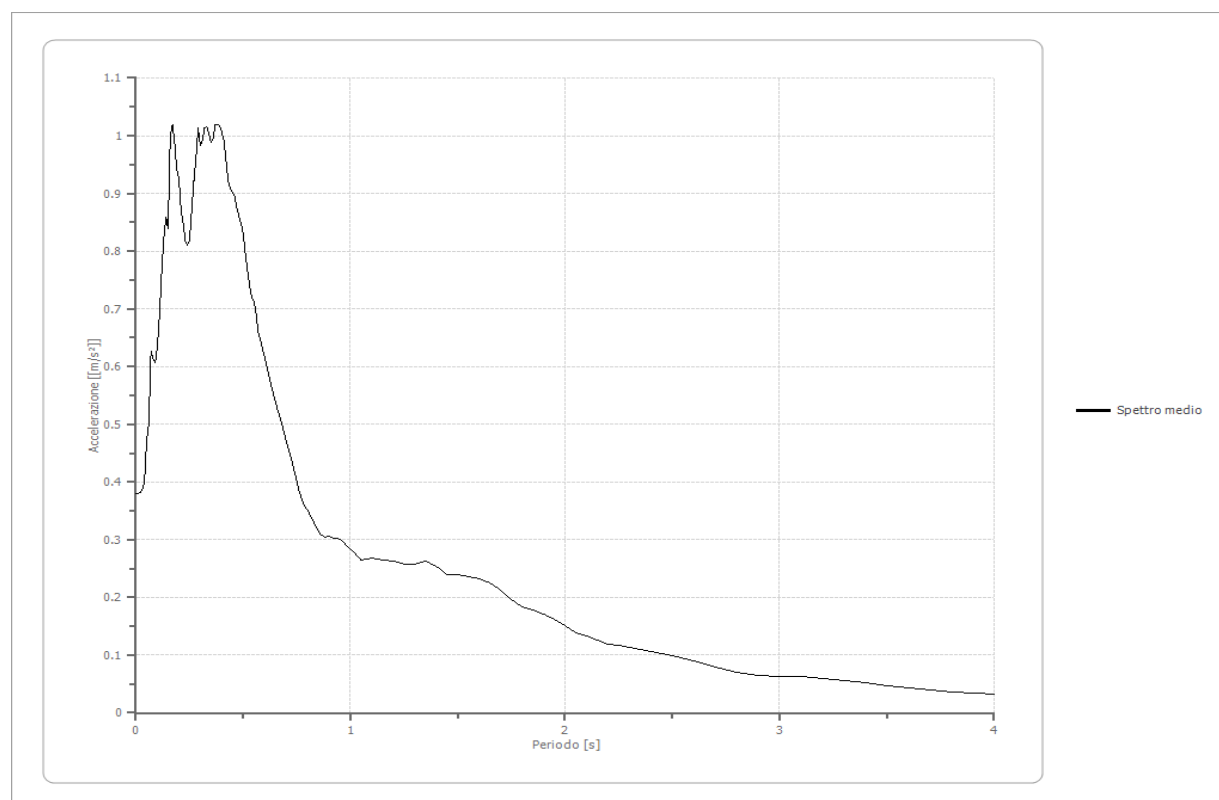


Figura n.18: spettro medio di risposta elastico

#### SPETTRO NORMALIZZATO DI RISPOSTA ELASTICO

Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]	Periodo [s]	Accelerazione [m/s²]
0.00	0.3497	0.26	0.8392	0.52	0.7642	0.98	0.4055	2.25	0.1766
0.01	0.3807	0.27	0.8392	0.53	0.7498	1.00	0.3974	2.30	0.1728
0.02	0.4117	0.28	0.8392	0.54	0.7359	1.05	0.3785	2.35	0.1691
0.03	0.4427	0.29	0.8392	0.55	0.7225	1.10	0.3613	2.40	0.1656
0.04	0.4737	0.30	0.8392	0.56	0.7096	1.15	0.3456	2.50	0.1590
0.05	0.5047	0.31	0.8392	0.57	0.6972	1.20	0.3312	2.60	0.1528
0.06	0.5358	0.32	0.8392	0.58	0.6852	1.25	0.3179	2.70	0.1472
0.07	0.5668	0.33	0.8392	0.60	0.6623	1.30	0.3057	2.80	0.1419
0.08	0.5978	0.34	0.8392	0.62	0.6410	1.35	0.2944	2.90	0.1370
0.09	0.6288	0.35	0.8392	0.64	0.6209	1.40	0.2839	3.00	0.1325
0.10	0.6598	0.36	0.8392	0.66	0.6021	1.45	0.2741	3.10	0.1282
0.11	0.6908	0.37	0.8392	0.68	0.5844	1.50	0.2649	3.20	0.1242
0.12	0.7218	0.38	0.8392	0.70	0.5677	1.55	0.2564	3.30	0.1204
0.13	0.7528	0.39	0.8392	0.72	0.5519	1.60	0.2484	3.40	0.1169
0.14	0.7839	0.40	0.8392	0.74	0.5370	1.65	0.2408	3.50	0.1135
0.15	0.8149	0.41	0.8392	0.76	0.5229	1.70	0.2338	3.60	0.1104
0.16	0.8392	0.42	0.8392	0.78	0.5095	1.75	0.2271	3.70	0.1074
0.17	0.8392	0.43	0.8392	0.80	0.4967	1.80	0.2208	3.80	0.1046
0.18	0.8392	0.44	0.8392	0.82	0.4846	1.85	0.2148	3.90	0.1019
0.19	0.8392	0.45	0.8392	0.84	0.4731	1.90	0.2092	4.00	0.0993
0.20	0.8392	0.46	0.8392	0.86	0.4621	1.95	0.2038		
0.21	0.8392	0.47	0.8392	0.88	0.4516	2.00	0.1987		
0.22	0.8392	0.48	0.8279	0.90	0.4415	2.05	0.1938		
0.23	0.8392	0.49	0.8110	0.92	0.4319	2.10	0.1892		
0.24	0.8392	0.50	0.7948	0.94	0.4228	2.15	0.1848		
0.25	0.8392	0.51	0.7792	0.96	0.4139	2.20	0.1806		

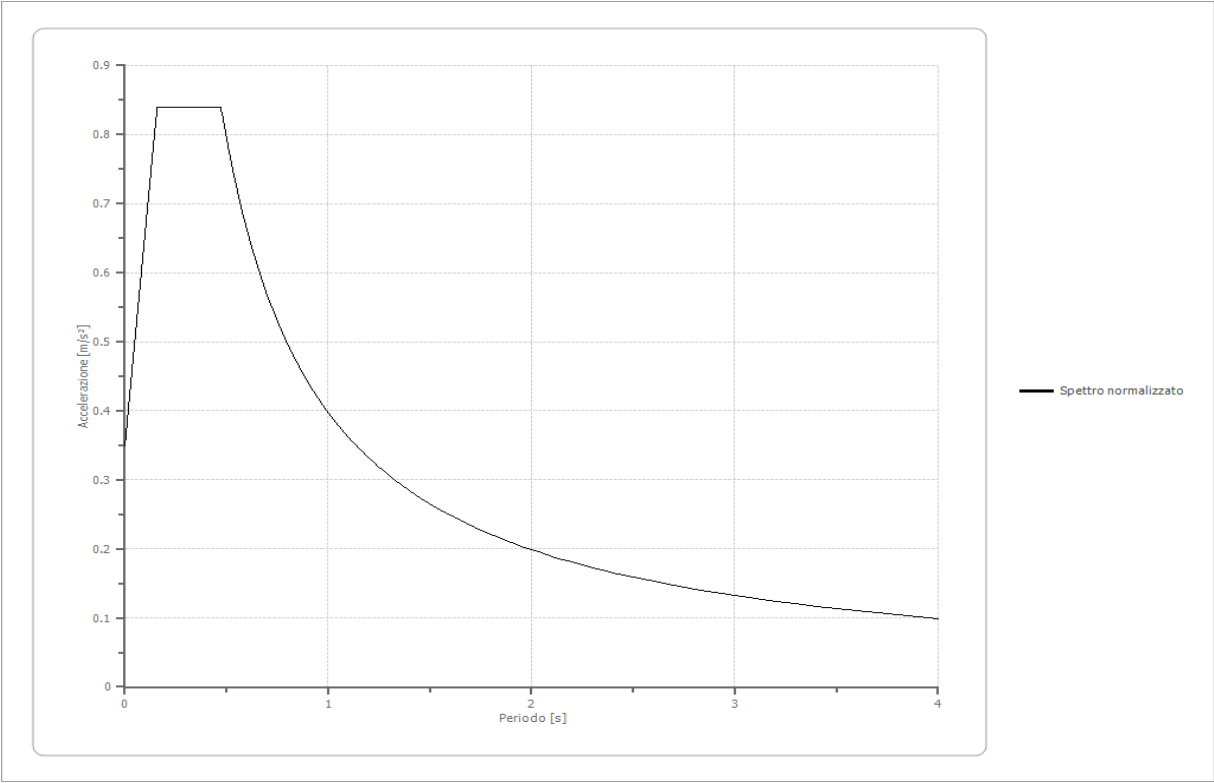


Figura n.19: spettro normalizzato di risposta elastico

PARAMETRI SPETTRO NORMALIZZATO

Ag [m/s²]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [m/s²]	Se(TB) [m/s²]	S
0.350	2.399897	--	0.158	0.474	1.743	0.350	0.839	1.706

CONFRONTO TRA GLI SPETTRI

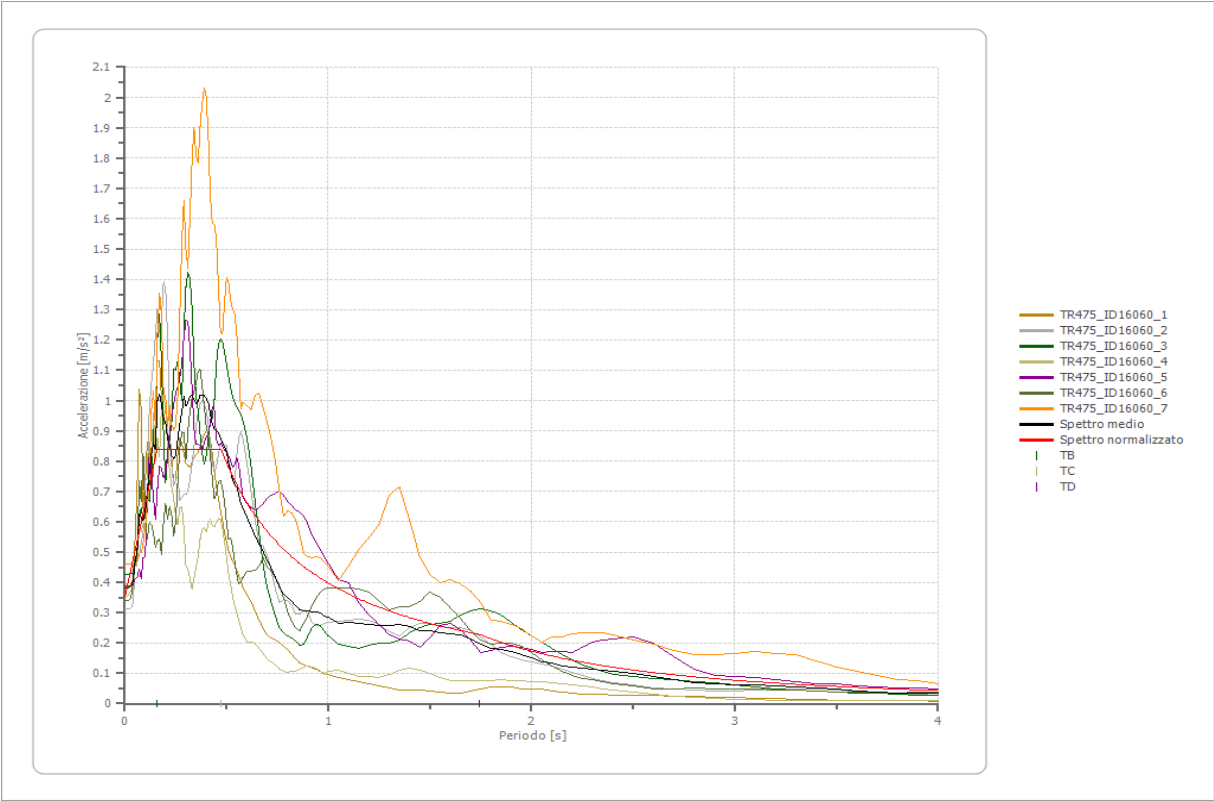


Figura n.20: tracce degli spettri analizzati, spettro medio e spettro normalizzato



## CONFRONTO SPETTRO NORMATIVA

Tipo di spettro: Spettro di risposta elastico

	Operatività SLO Cat. C	Danno SLD Cat. C	Salvaguardia vita SLV Cat. C	Prev. collasso SLC Cat. C	Operatività SLO Cat. D	Danno SLD Cat. D	Salvaguardia vita SLV Cat. D	Prev. collasso SLC Cat. D
Tr [anni]	60	101	949	1950	60	101	949	1950
ag [m/s <sup>2</sup> ]	0.062	0.080	0.205	0.268	0.062	0.080	0.205	0.268
Fo	2.498	2.463	2.523	2.459	2.498	2.463	2.523	2.459
Tc* [s]	0.272	0.275	0.28	0.29	0.272	0.275	0.28	0.29
Ss	1.50	1.50	1.50	1.50	1.80	1.80	1.80	1.80
St	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cc	1.61	1.61	1.60	1.58	2.40	2.38	2.36	2.32
TB [s]	0.146	0.147	0.149	0.153	0.217	0.219	0.220	0.224
TC [s]	0.439	0.442	0.447	0.458	0.652	0.656	0.661	0.673
TD [s]	1.625	1.632	1.684	1.709	1.625	1.632	1.684	1.709
Se(0) [m/s <sup>2</sup> ]	0.093	0.119	0.308	0.402	0.111	0.143	0.369	0.482
Se(TB)[m/s <sup>2</sup> ]	0.232	0.294	0.776	0.988	0.278	0.352	0.931	1.185

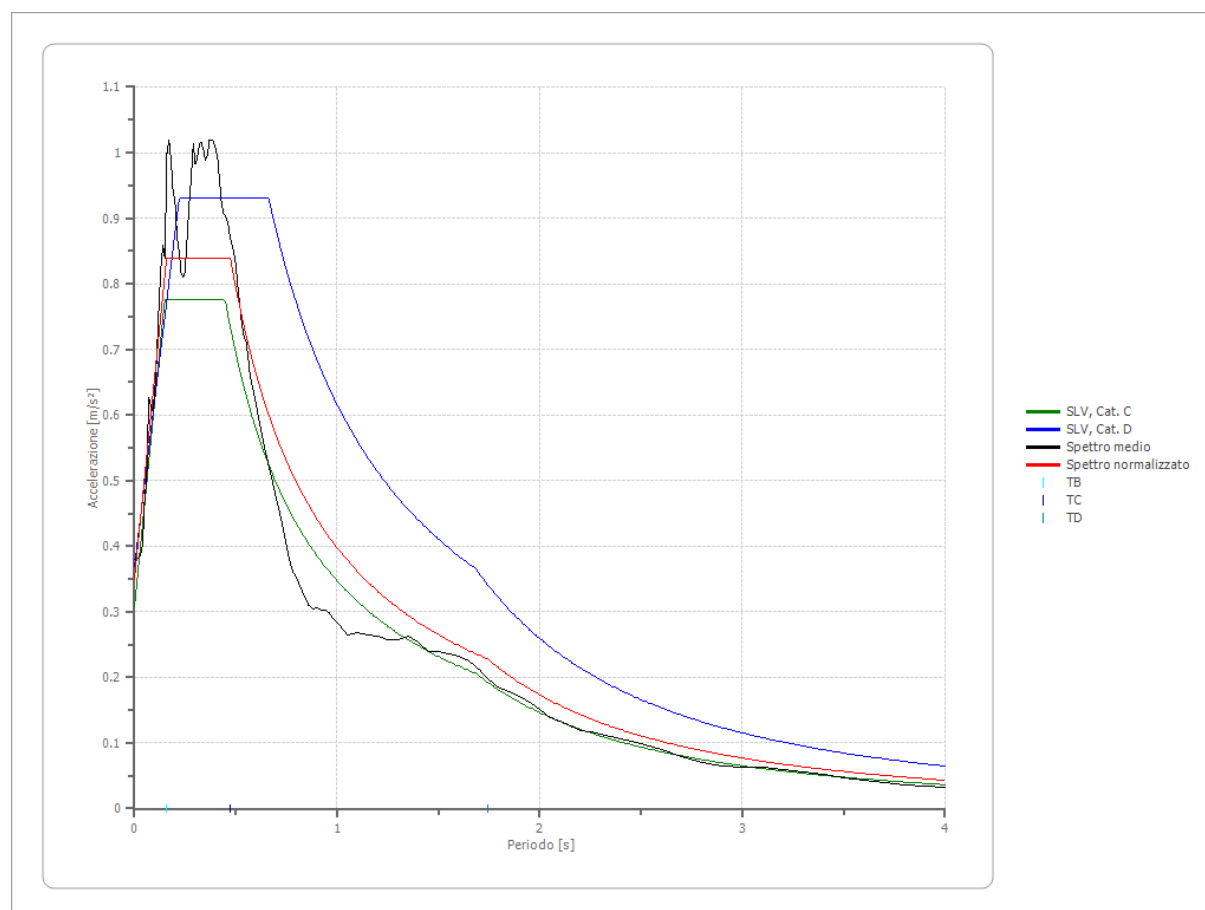


Figura n.21: confronto tra lo spettro in accelerazione calcolato per il sito di riferimento e lo spettro di risposta relativo alla categoria di sottosuolo C e D

### ACCELERAZIONE MASSIMA ATTESA (PGA)

Rispetto ai terremoti precedentemente analizzati si riportano i diagrammi (**Figura n.22**) e i valori numerici di accelerazione  $A_{max}$  dal bedrock fino al piano campagna:

	0.0	1.5	3.5	7.0	14.0	22.0	88.0	138.0
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
TR475_ID16060_1 [m/s <sup>2</sup> ]	0.385	0.366	0.323	0.222	0.214	0.180	0.173	0.209
TR475_ID16060_2 [m/s <sup>2</sup> ]	0.312	0.299	0.270	0.213	0.276	0.179	0.173	0.209
TR475_ID16060_3 [m/s <sup>2</sup> ]	0.425	0.402	0.345	0.294	0.245	0.152	0.182	0.209
TR475_ID16060_4 [m/s <sup>2</sup> ]	0.354	0.320	0.243	0.152	0.187	0.154	0.165	0.209
TR475_ID16060_5 [m/s <sup>2</sup> ]	0.388	0.384	0.370	0.331	0.283	0.206	0.179	0.209
TR475_ID16060_6 [m/s <sup>2</sup> ]	0.341	0.310	0.264	0.275	0.184	0.160	0.173	0.209
TR475_ID16060_7 [m/s <sup>2</sup> ]	0.459	0.450	0.428	0.382	0.228	0.208	0.187	0.209
media [m/s <sup>2</sup> ]	<b>0.381</b>	<b>0.362</b>	<b>0.320</b>	<b>0.267</b>	<b>0.231</b>	<b>0.177</b>	<b>0.176</b>	<b>0.209</b>
Dev. St. [m/s <sup>2</sup> ]	0.050	0.055	0.066	0.078	0.040	0.023	0.007	0.000

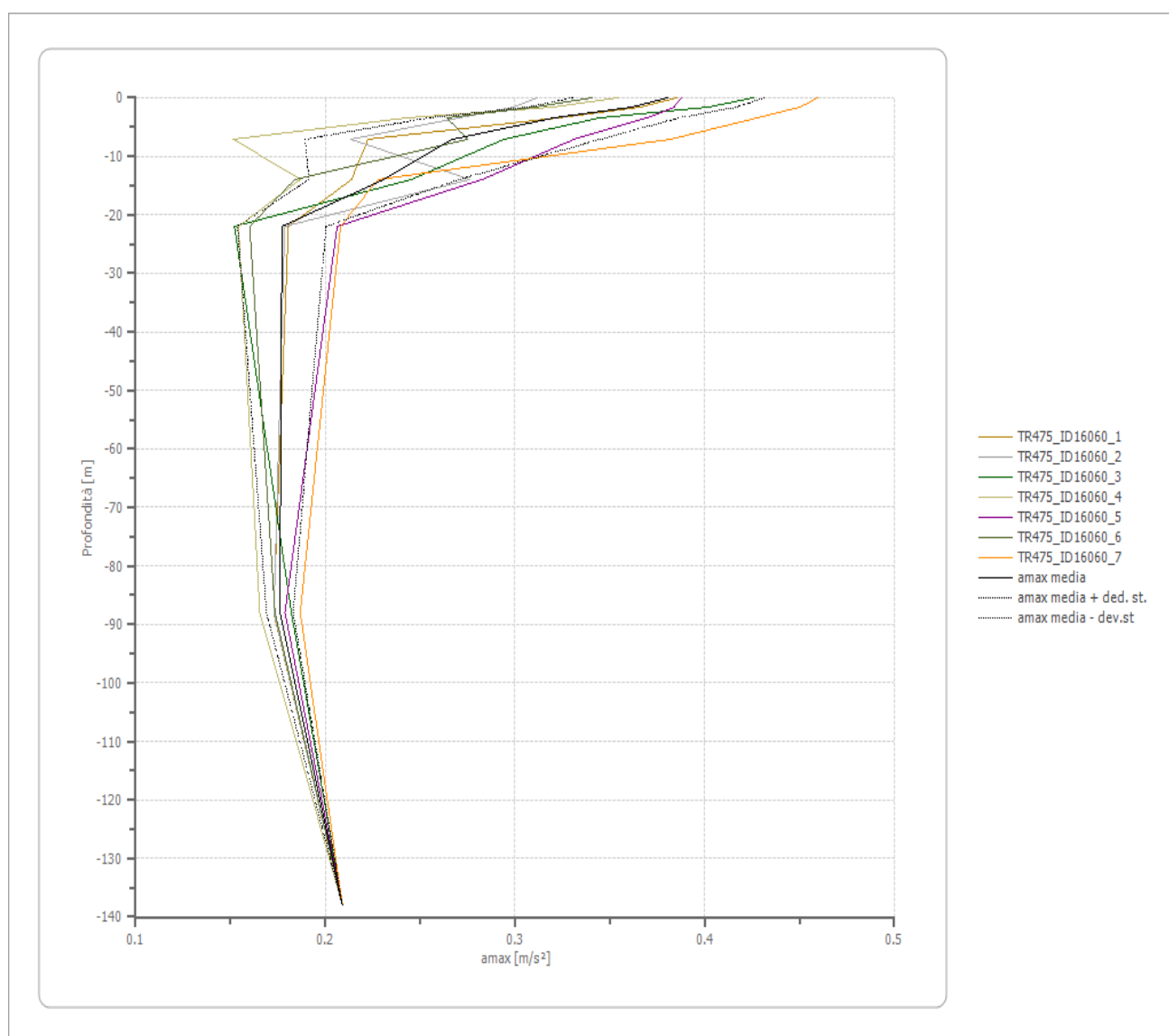


Figura n.22: andamento dell'accelerazione di picco da -138 m al piano di campagna ( $A_{max}$ )

## 8.2 VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE E CALCOLO DEI CEDIMENTI POST SISMICI

**DESCRIZIONE PROCEDIMENTO:** il termine liquefazione denota la circostanza, causata dall'aumento di pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo durante lo scuotimento sismico, caratterizzata da deformazioni permanenti significative o dall'annullamento degli sforzi efficaci nel terreno. Il rischio di liquefazione deve essere valutato per tutti i terreni suscettibili di tale comportamento.

Nel sito in oggetto i terreni posizionati nei primi 20,0 m dal piano di campagna corrispondono a depositi alluvionali coesivi da poco a mediamente consistenti intercalati a lenti granulari con un grado di addensamento variabile. A parte le coperture più superficiali, tutti i livelli non prettamente coesivi sono sede di un acquifero, definito multistrato e multicompartimentato, e presentano, in linea di principio, le condizioni predisponenti il fenomeno di liquefazione in caso di sisma.

Il rischio di liquefazione può essere stimato con metodi semplificati dai risultati di prove SPT (Standard Penetration Test), CPT (Cone Penetration Test), DMT (Dilatometer Test) e da misure della velocità delle onde di taglio (VS), ottenute da prove sismiche in foro (di tipo down-hole o cross-hole), mediante il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione IL di Iwasaki et al. (1982).

Nel presente elaborato la verifica alla liquefazione è stata eseguita secondo il metodo che permette di correlare la resistenza al taglio mobilitata nel terreno con i risultati delle prove penetrometriche.

L'indice IL è un parametro che quantifica i possibili effetti della liquefazione in superficie, tenendo conto della severità dell'azione sismica, della profondità, spessore e valore del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione. L'uso dell'indice IL consente la stesura delle carte di rischio di liquefazione, in cui un territorio è suddiviso in zone di differente classe di potenziale di liquefazione. Le classi di potenziale di liquefazione, proposte da **Sonmez (2003)**, sulla base della tipologia e dell'intensità dei fenomeni di liquefazione osservati durante i terremoti storici, sono le seguenti:

IL (LPI)	Potenziale di liquefazione	Pericolosità di liquefazione
0	Non liquefacibile ( $FSL \geq 1.2$ )	Nulla
$0 < IL \leq 2$	Basso	Bassa
$2 < IL \leq 5$	Moderato	Moderata
$5 < IL \leq 15$	Alto	Alta
$IL > 15$	Molto alto	Molto alta

L'indice IL è definito nel modo seguente:

$$I_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

in cui  $z_{crit}$  indica la profondità massima (assunta pari a 20 m) alla quale strati liquefatti producono effetti in superficie,  $F(z)$  è una variabile con valori compresi tra 0 e 1, definita ad ogni profondità  $0 \leq z \leq z_{crit}$  in funzione del valore che, a quella profondità, assume il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione FSL, e che assume il valore zero qualora lo strato sia giudicato non liquefacibile.  $w(z)$  è un fattore di peso della profondità.

Il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione è definito nel modo seguente:

$$FSL = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

con

$CRR_{7.5}$  = Rapporto di Resistenza Ciclica per  $M = 7.5$  (Cyclic Resistance Ratio)

$MSF$  = Fattore di Scala della Magnitudo (Magnitude Scale Factor)

$K_\sigma$  = Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor)

$$CSR = 0.65 \cdot \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot r_d = \text{Rapporto di Tensione Ciclica (Cyclic Stress Ratio)}$$



in cui  $a_{max}$  è l'accelerazione massima in superficie,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $\sigma_{v0}$  e  $\sigma'_{v0}$ , le tensioni geostatiche verticali rispettivamente totali ed efficaci, e  $r_d$  un coefficiente di riduzione delle tensioni che tiene conto della deformabilità del terreno.

Per la stima di FSL è stato utilizzato il metodo di **Idriss & Boulanger (2008)**. Tale metodo è risultato quello che fornisce valori di IL più compatibili con gli effetti osservati a seguito degli eventi sismici del maggio 2012 in Emilia, così come riportato in vari documenti tecnici dal gruppo di lavoro liquefazione (costituito con prot. PG/2012/0134978 del 31 maggio 2012), coordinato dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e dal Dipartimento della Protezione Civile.

Il metodo di **Idriss & Boulanger (2008)** utilizza l'indice di comportamento per il tipo di suolo IC che viene calcolato mediante l'utilizzo della seguente formula:

$$I_c = \sqrt{(\log F + 1.22)^2 + (\log Q_n - 3.47)^2}$$

in cui i parametri  $F$  e  $Q_n$  valgono:

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \cdot 100$$

$$Q_n = \left( \frac{q_c - \sigma_{v0}}{p_a} \right) \cdot \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

con  $p_a$  pressione atmosferica.

dove  $q_c$  è la resistenza alla punta,  $f_s$  è l'attrito laterale.

Se  $IC > 2,6$  il suolo è ritenuto di tipo argilloso e l'analisi si ferma dato che il suolo non è liquefacibile.

Se  $IC \leq 2,6$ , vuol dire che l'ipotesi assunta è errata e IC deve essere ricalcolato nuovamente con le seguenti formule:

$$q_{cIN,cs} = q_{cIN} + \Delta q_{cIN}$$

$$\Delta q_{cIN} = \left( 5.4 + \frac{q_{cIN}}{16} \right) \cdot \exp \left[ 1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left( \frac{15.7}{FC + 0.01} \right)^2 \right]$$

La resistenza di punta normalizzata è calcolata nel modo seguente:

$$q_{cIN} = C_Q \cdot \left( \frac{q_c}{p_a} \right)$$

$$C_Q = \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \leq 1.7$$

in cui l'esponente  $n$  vale:

$$n = 1.338 - 0.249 \cdot q_{cIN}^{0.264}$$

pertanto  $q_{cIN}$  è calcolato con procedimento iterativo.

La frazione fine FC (%) può essere stimata con l'equazione:

$$FC = 1.75 \cdot I_c^{3.25} - 3.7$$

Il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione, FSL, è calcolato con la formula vista in precedenza in cui:

$$CRR_{7.5} = \exp \left[ \frac{q_{cIN,cs}}{540} + \left( \frac{q_{cIN,cs}}{67} \right)^2 - \left( \frac{q_{cIN,cs}}{80} \right)^3 + \left( \frac{q_{cIN,cs}}{114} \right)^4 - 3 \right]$$

**DATI VERIFICA:** i dati di input utilizzati per la stima dell'indice del potenziale di liquefazione in corrispondenza di ciascuna prova penetrometrica, applicando il metodo di **Idriss e Boulanger (2008)**, sono:

- accelerazione sismica di progetto  $A_{MAX}(g)$  pari a **0,38g**;
- magnitudo di riferimento  $M_w$  pari a **6,14** (da ZS9);
- profondità della falda in condizioni statiche e sismiche: **-1,0 m**.

**RISULTATI LPI:** nei grafici che seguono (**Figura n.23**) si riporta l'andamento con la profondità dei parametri  $Q_t$ ,  $R_f$ ,  $I_c$ ,  $CRR/CSR$  e  $F_s$  delle verticali di indagine:

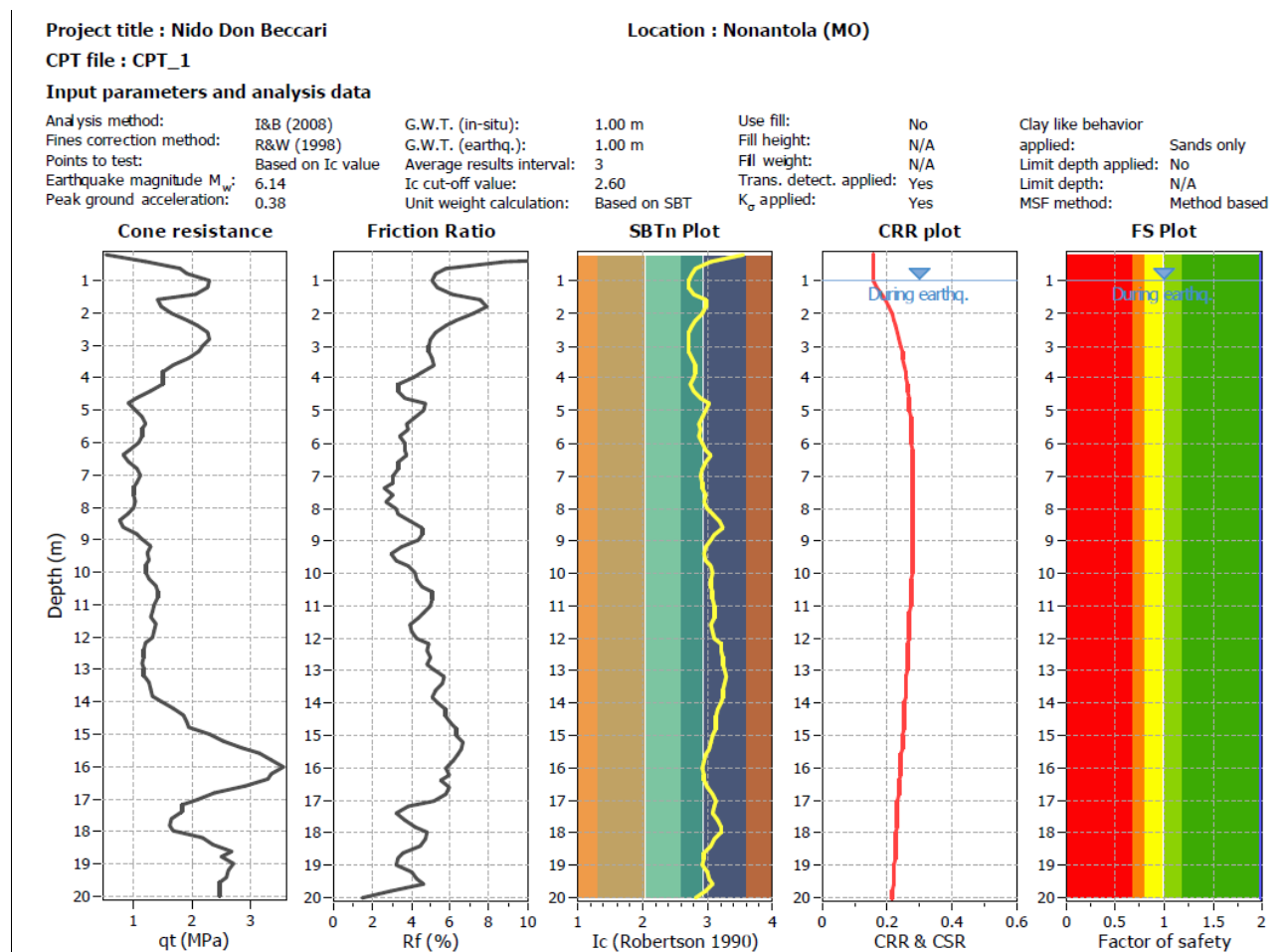


Figura n.23: andamento con la profondità dei parametri  $Q_t$ ,  $R_f$ ,  $I_c$ ,  $CRR/CSR$  e  $F_s$

Dai diagrammi e dai valori numerici di ciascun parametro si denota che nel terreno di fondazione non sono presenti dei livelli sabbioso limosi significativi che possano innescare il fenomeno di liquefazione. Il calcolo del valore **Indice Potenziale di Liquefazione (IL)** ha restituito il seguente risultato: **IL=0.0**; potenziale di liquefazione **Nullo**

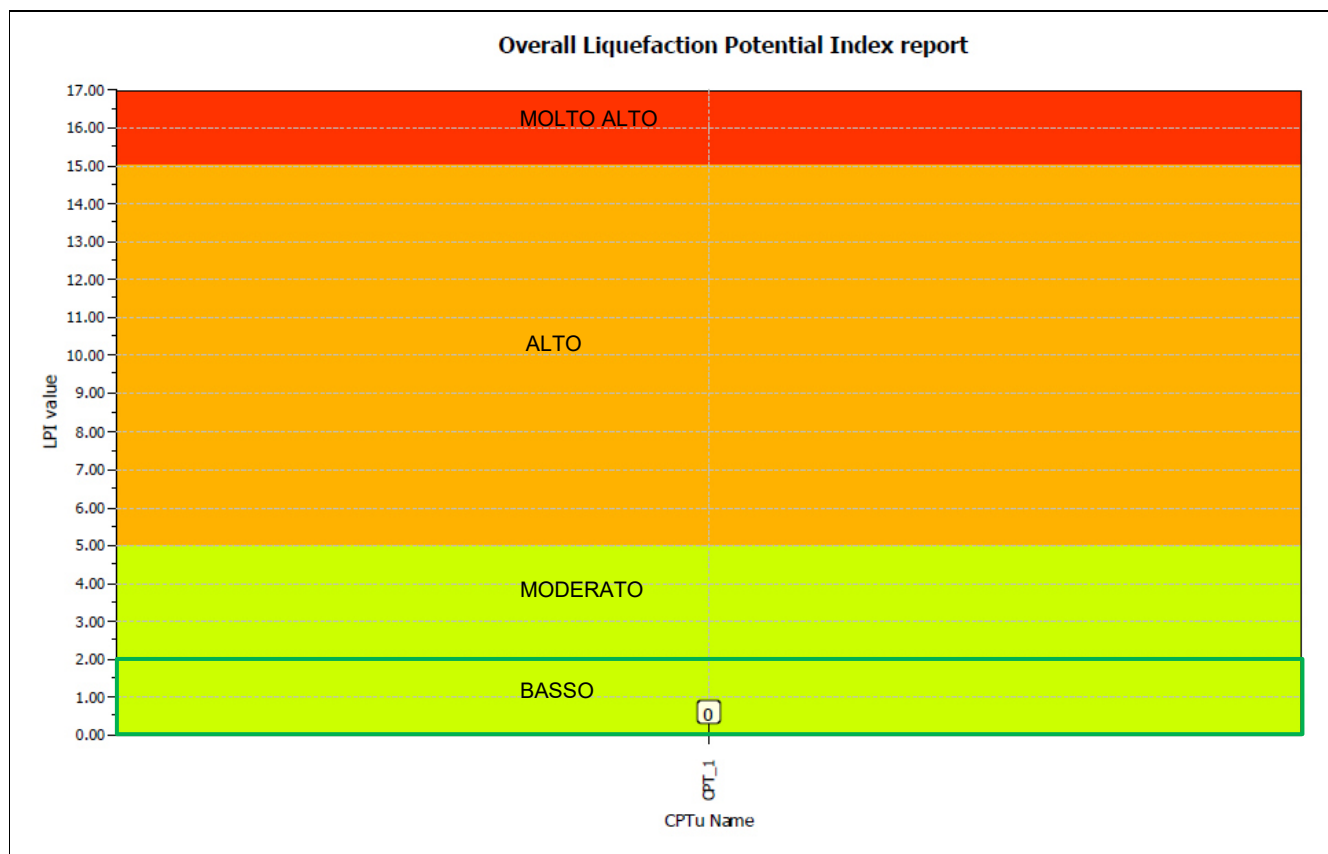


Figura n.19: Indice del Potenziale di Liquefazione. La suddivisione in categorie è quella proposta da **Sonmez (2003)**.

**CONSIDERAZIONI.** La verifica riporta per il sito di interesse:

- Indice Potenziale di Liquefazione IL (classificazione Sonmez, 2003): 0,0 "Non liquefacibile".
- Pericolosità di liquefazione: "Nulla".
- Massimo cedimento post sismico atteso del terreno: 0,0 cm.

## 9. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I sopralluoghi e i rilevamenti effettuati hanno permesso di definire le condizioni geologiche, idrogeologiche, sismiche e di stabilità generale del terreno utili alla progettazione delle opere in oggetto.

La **modellazione geologica e idrogeologica** del sito ha evidenziato la presenza di litologie sedimentarie fini argilloso limose, quindi prevalentemente coesive fino a -17 m di profondità, medio-fini coesive e granulari a maggiore profondità. Ciò risulta in concordanza con le caratteristiche dei depositi alluvionali in cui risiede l'area di interesse. Il livello di **falda** rilevato durante la campagna d'indagine ha riportato la misura minima di -1,6 m dalla quota di inizio prove.

I valori di resistenza meccanica del terreno hanno consentito la creazione di un **Modello Geotecnico** basato su una verticale di indagine.

Per quel che riguarda la caratterizzazione sismica del sito, l'elaborazione delle indagini eseguite ha consentito di ottenere un modello sismostratigrafico utile all'**Analisi di Risposta Sismica Locale**, eseguita con il terzo livello di approfondimento, conformemente a quanto specificato dalla Deliberazione della Giunta Regionale (DGR) n.2193/2015 ed alle NTC 2018. Si è quindi stimata l'amplificazione del moto in superficie rispetto al bedrock, in funzione della frequenza, e si è definito lo spettro di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%.

Il terzo livello di approfondimento è stato espletato anche con la finalità di valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale delle aree potenzialmente instabili e liquefacibili presenti nell'area oggetto di intervento. Le verifiche dell'indice potenziale di liquefazione e dei cedimenti post sismici del terreno hanno dato i seguenti risultati:

- Indice Potenziale di Liquefazione IL (classificazione Sonmez, 2003): 0,0 "Non liquefacibile".
- Pericolosità di liquefazione: "Nulla".
- Massimo cedimento post sismico atteso del terreno: 0,0 cm.

01/06/2019

Dott. Geol. Francesco Dettori



## **ALLEGATI**

- **Tavole**

**TAVOLA 1    Carta topografica    scala 1:25000**

- **Tabelle prove Penetrometriche**

TAVOLA n.1

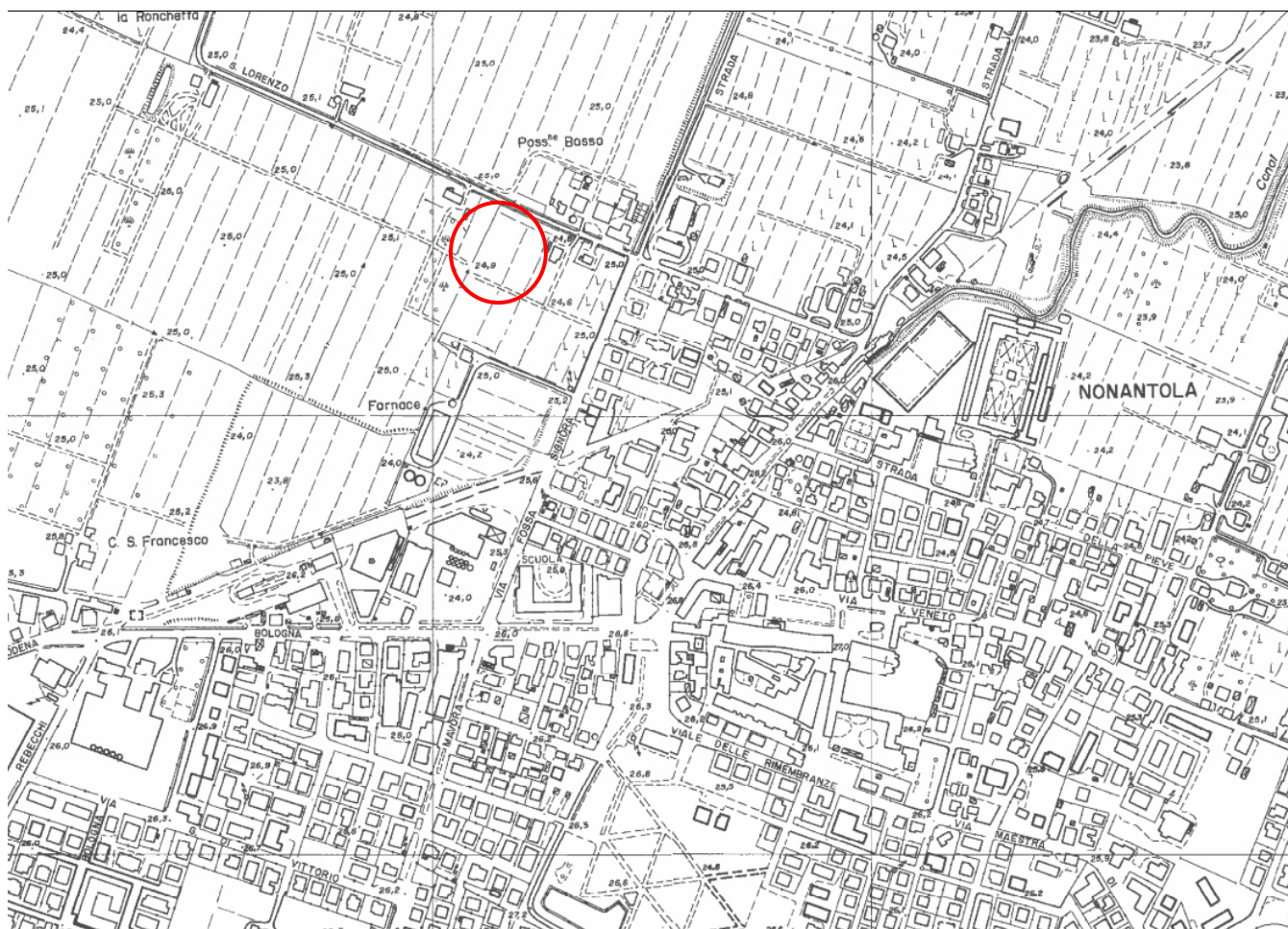
# COROGRAFIA

ESTRATTO DALLA SEZIONE C.T.R. 202090 - "Nonantola"

Scala 1:10.000



Ubicazione area in esame



## **ALLEGATO:** certificati penetrometrici

# Tabulati penetrometrie PROVE CPT

Committente: Nonaginta  
Cantiere: Ist. Don Beccari  
Località: Nonantola (MO)

### **Caratteristiche Strumentali PROVE CPT: PAGANI 100 kN**

Rif. Norme	ASTM D3441-86
Diametro Punta conica meccanica	35,7
Angolo di apertura punta	60
Area punta	10
Superficie manicotto	150
Passo letture (cm)	20
Costante di trasformazione Ct	10

**PROVA CPT Nr. 1**

Profondità (m)	Lettura punta (Mpa)	Lettura laterale (Mpa)	qc (Mpa)	fs (Mpa)	qc/fs Begemann	Profondità (m)	Lettura punta (Mpa)	Lettura laterale (Mpa)	qc (Mpa)	fs (Mpa)	qc/fs Begemann
<b>0.20</b>	0,00	0,1	0,014	0,095	0,147	<b>10.20</b>	1,12	1,9	1,269	0,055	23,073
<b>0.40</b>	1,53	3,0	1,544	0,115	13,426	<b>10.40</b>	1,22	2,0	1,369	0,061	22,443
<b>0.60</b>	2,04	3,8	2,054	0,123	16,699	<b>10.60</b>	1,33	2,2	1,479	0,082	18,037
<b>0.80</b>	1,73	3,6	1,744	0,081	21,531	<b>10.80</b>	1,22	2,5	1,369	0,082	16,695
<b>1.00</b>	1,94	3,2	1,954	0,109	17,927	<b>11.00</b>	1,22	2,5	1,369	0,061	22,443
<b>1.20</b>	3,16	4,8	3,187	0,177	18,006	<b>11.20</b>	1,12	2,0	1,282	0,068	18,853
<b>1.40</b>	1,63	4,3	1,657	0,095	17,442	<b>11.40</b>	1,12	2,1	1,282	0,061	21,016
<b>1.60</b>	1,33	2,8	1,357	0,123	11,033	<b>11.60</b>	1,12	2,0	1,282	0,047	27,277
<b>1.80</b>	1,22	3,1	1,247	0,116	10,75	<b>11.80</b>	1,43	2,1	1,592	0,061	26,098
<b>2.00</b>	1,73	3,5	1,757	0,122	14,402	<b>12.00</b>	1,02	1,9	1,182	0,061	19,377
<b>2.20</b>	1,84	3,7	1,881	0,129	14,581	<b>12.20</b>	1,02	1,9	1,196	0,055	21,745
<b>2.40</b>	2,04	4,0	2,081	0,123	16,919	<b>12.40</b>	1,02	1,8	1,196	0,068	17,588
<b>2.60</b>	2,24	4,1	2,281	0,122	18,697	<b>12.60</b>	0,92	1,9	1,096	0,055	19,927
<b>2.80</b>	2,35	4,2	2,391	0,123	19,439	<b>12.80</b>	1,02	1,8	1,196	0,061	19,607
<b>3.00</b>	2,14	4,0	2,181	0,109	20,009	<b>13.00</b>	0,92	1,8	1,096	0,055	19,927
<b>3.20</b>	1,94	3,6	1,994	0,102	19,549	<b>13.20</b>	1,02	1,8	1,209	0,075	16,12
<b>3.40</b>	2,14	3,7	2,194	0,115	19,078	<b>13.40</b>	1,02	2,1	1,209	0,082	14,744
<b>3.60</b>	1,53	3,3	1,584	0,089	17,798	<b>13.60</b>	1,12	2,4	1,309	0,061	21,459
<b>3.80</b>	1,22	2,6	1,274	0,068	18,735	<b>13.80</b>	1,12	2,0	1,309	0,068	19,25
<b>4.00</b>	1,53	2,6	1,584	0,055	28,8	<b>14.00</b>	1,12	2,1	1,309	0,081	16,16
<b>4.20</b>	1,53	2,4	1,598	0,068	23,5	<b>14.20</b>	1,53	2,8	1,733	0,095	18,242
<b>4.40</b>	1,22	2,2	1,288	0,034	37,882	<b>14.40</b>	1,73	3,2	1,933	0,123	15,715
<b>4.60</b>	0,92	1,4	0,988	0,034	29,059	<b>14.60</b>	1,63	3,5	1,833	0,116	15,802
<b>4.80</b>	0,82	1,3	0,888	0,054	16,444	<b>14.80</b>	1,73	3,5	1,933	0,122	15,844
<b>5.00</b>	0,82	1,6	0,888	0,048	18,5	<b>15.00</b>	1,84	3,7	2,043	0,143	14,287
<b>5.20</b>	1,22	1,9	1,301	0,048	27,104	<b>15.20</b>	2,65	4,8	2,867	0,183	15,667
<b>5.40</b>	1,12	1,8	1,201	0,055	21,836	<b>15.40</b>	2,45	5,2	2,667	0,197	13,538
<b>5.60</b>	1,02	1,8	1,101	0,041	26,854	<b>15.60</b>	2,75	5,7	2,967	0,204	14,544
<b>5.80</b>	1,02	1,6	1,101	0,041	26,854	<b>15.80</b>	3,57	6,6	3,787	0,224	16,906
<b>6.00</b>	1,12	1,7	1,201	0,041	29,293	<b>16.00</b>	3,06	6,4	3,277	0,217	15,101
<b>6.20</b>	0,82	1,4	0,915	0,041	22,317	<b>16.20</b>	3,37	6,6	3,6	0,204	17,647
<b>6.40</b>	0,61	1,2	0,705	0,027	26,111	<b>16.40</b>	2,96	6,0	3,19	0,203	15,714
<b>6.60</b>	0,71	1,1	0,805	0,027	29,815	<b>16.60</b>	2,86	5,9	3,09	0,163	18,957
<b>6.80</b>	1,12	1,5	1,215	0,041	29,634	<b>16.80</b>	2,24	4,7	2,47	0,177	13,955
<b>7.00</b>	1,02	1,6	1,115	0,041	27,195	<b>17.00</b>	1,33	4,0	1,56	0,088	17,727
<b>7.20</b>	0,92	1,5	1,028	0,027	38,074	<b>17.20</b>	1,94	3,3	2,184	0,068	32,118
<b>7.40</b>	0,92	1,3	1,028	0,034	30,235	<b>17.40</b>	1,43	2,5	1,674	0,061	27,443
<b>7.60</b>	0,82	1,3	0,928	0,02	46,4	<b>17.60</b>	1,33	2,2	1,574	0,054	29,148
<b>7.80</b>	0,92	1,2	1,028	0,041	25,073	<b>17.80</b>	1,43	2,2	1,674	0,075	22,32
<b>8.00</b>	1,02	1,6	1,128	0,027	41,778	<b>18.00</b>	1,33	2,5	1,574	0,081	19,432
<b>8.20</b>	0,71	1,1	0,832	0,034	24,471	<b>18.20</b>	1,53	2,8	1,787	0,095	18,811
<b>8.40</b>	0,61	1,1	0,732	0,034	21,529	<b>18.40</b>	2,86	4,3	3,117	0,143	21,797
<b>8.60</b>	0,61	1,1	0,732	0,027	27,111	<b>18.60</b>	1,84	4,0	2,097	0,088	23,83
<b>8.80</b>	0,82	1,2	0,942	0,054	17,444	<b>18.80</b>	2,55	3,9	2,807	0,068	41,279
<b>9.00</b>	1,33	2,1	1,452	0,068	21,353	<b>19.00</b>	2,35	3,4	2,607	0,102	25,559
<b>9.20</b>	0,92	1,9	1,055	0,034	31,029	<b>19.20</b>	2,45	4,0	2,721	0,109	24,963
<b>9.40</b>	1,22	1,7	1,355	0,041	33,049	<b>19.40</b>	2,24	3,9	2,511	0,123	20,415
<b>9.60</b>	1,12	1,7	1,255	0,041	30,61	<b>19.60</b>	2,24	4,1	2,511	0,115	21,835
<b>9.80</b>	1,02	1,6	1,155	0,047	24,574	<b>19.80</b>	2,04	3,8	2,311	0,116	19,922
<b>10.00</b>	1,02	1,7	1,155	0,055	21,0	<b>20.00</b>	2,24	4,0	2,511	0,0	

