

# COMUNE DI LAVAGNO

PROVINCIA DI VERONA

***Piano Urbanistico Attuativo P.U.A.  
residenziale sito in Via Castello,  
in Località San Pietro di Lavagno***

***Ditta: Immobiliare Lucia S.n.c.***

**STUDIO DI COMPATIBILITA' GEOLOGICA,  
GEOMORFOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA**

***(integra e sostituisce la precedente versione del 18.11.2023)***

Dott. Geol.  
Davide Dal Degan



Data

11 dicembre 2023

**DAVIDE DAL DEGAN**  
**GEOLOGO**  
GEOLOGIA – GEOTECNICA – AMBIENTE

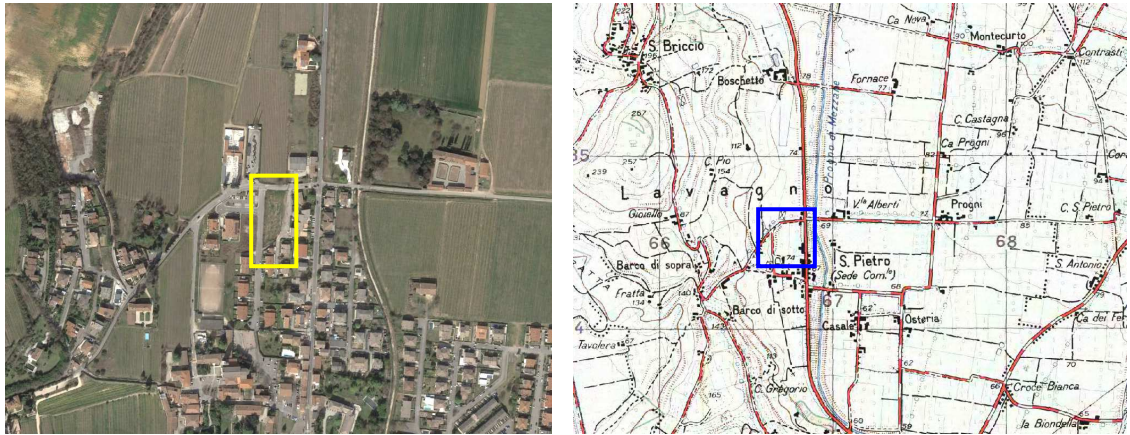
Via Strà n. 116 - 37042 - Caldiero (Verona)  
Tel. Fax. 0457650996 – Cell. 3483680529  
e - mail: [geologo.daldegan@gmail.com](mailto:geologo.daldegan@gmail.com)  
pec: [davidedaldegan@pec.epap.it](mailto:davidedaldegan@pec.epap.it)

## **INDICE**

<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>2</b>
<b>2. RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA .....</b>	<b>3</b>
2.1. LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI, GEOLOGICI ED IDROGEOLOGICI GENERALI.....	3
2.2. DESCRIZIONE DELLE INDAGINI ESEGUITE.....	4
2.3. MODELLO GEOLOGICO LOCALE.....	4
2.4. PERICOLOSITÀ IDRAULICA E GEOLOGICA .....	6
2.5. INTERVENTO IN PROGETTO.....	8
2.6. INTERPRETAZIONE DELLE PROVE .....	8
2.7. PROPOSTA DI MODELLO GEOTECNICO LOCALE.....	9
2.8. CARATTERISTICHE DI PERMEABILITÀ DEI TERRENI LOCALI.....	10
<b>3. RELAZIONE SISMICA.....</b>	<b>11</b>
3.1. CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO DI COSTRUZIONE.....	12
3.2. ANALISI SISMICA LOCALE. LIVELLO 3.....	13
3.2.1. <i>Sismostratigrafia e Frequenza caratteristica di risonanza</i> .....	13
3.2.2. <i>Analisi di Risposta Sismica Locale</i> .....	13
3.2.3. <i>Suscettibilità alla liquefazione</i> .....	16
<b>4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....</b>	<b>17</b>
<b>5. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>19</b>
<b>6. CARTOGRAFIA .....</b>	<b>19</b>
<b>7. ALLEGATI.....</b>	<b>19</b>

## 1. PREMESSA

La presente relazione, redatta per conto della Ditta **Immobiliare Lucia S.n.c.**, riguarda la caratterizzazione geologica dell'area ubicata come nella sottostante Figura 1, posta in Via Castello, a San Pietro di Lavagno (VR).



**Figura 1.** A sinistra, immagine da [Google Maps](#) con ubicazione del lotto in esame e, a destra, corografia fuori scala estratta dalla Carta Topografica d'Italia I.G.M.

Lo scopo del presente rapporto è di riportare i risultati degli studi condotti, in modo da fornire un parere circa la compatibilità geologica, geomorfologica, idrogeologica e sismica dell'area individuata per il P.U.A. in progetto.

Tale elaborato è stato svolto nel rispetto delle seguenti normative:

**D.M. 17 gennaio 2018 “Norme tecniche per le costruzioni”.**

**Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 21 gennaio 2019, n. 7,** contenente le istruzioni per l'applicazione delle NTC.

**Legge regionale 23 aprile 2004, n. 11 “Norme per il governo del territorio”,** lettera d) del comma 2 dell'art. 19.

Lo studio si è, quindi, articolato nei seguenti punti:

- 1) sopralluogo e raccolta organica dei dati bibliografici e delle informazioni desunte da altri studi eseguiti dallo scrivente nello stesso ambito geologico e nei dintorni dello stesso;
- 2) rielaborazione ed analisi di n. 2 prove penetrometriche statiche e di n. 3 trincee esplorative eseguite dallo scrivente nel 2009, all'interno dello stesso sito;
- 3) caratterizzazione sismica del sottosuolo attraverso l'esecuzione di n. 1 stendimento geofisico di sismica passiva Re.Mi. e di n. 1 registrazione di rumore sismico ambientale mediante Tromino®;
- 4) stesura della presente relazione tecnica cui sono allegati:
  - Corografia Scala 1:5.000
  - Carta Geologica Generale Scala 1:20.000
  - Planimetria con ubicazione delle indagini Scala 1:500
  - Restituzione dati delle prove penetrometriche pregresse
  - Stratigrafie delle trincee esplorative pregresse
  - Relazione allegata all'indagine geofisica e Risposta Sismica Locale

## 2. RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

### 2.1. Lineamenti geomorfologici, geologici ed idrogeologici generali

Il Piano Urbanistico Attuativo P.U.A. di via Castello si trova in località San Pietro, nel territorio comunale di Lavagno (cfr. allegato n. 1).

L'area, secondo i dati di progetto (a cura dell'Arch. Francesca Aldegheri), occupa una superficie complessivamente pari a circa 3.000 m<sup>2</sup>.

Considerando la **geomorfologia** in generale, si vede come il paesaggio, caratteristico delle propaggini meridionali dei Monti Lessini, sia caratterizzato da ampie dorsali ad andamento meridiano, separate da profonde valli che si aprono verso la pianura e sui cui fianchi affiorano prevalentemente, con regolarità e debolmente inclinate verso Sud, le stratificazioni delle rocce calcaree. I rilievi collinari confinano forme detritico – alluvionali legate all'attività dei corsi d'acqua principali, che attualmente occupano il fondovalle, al disfacimento dei versanti o all'attività deposizionale delle vallecole laterali. Il raccordo tra le piane torrentizie ed i rilievi è, pertanto, regolato dai rapporti intercorrenti tra le alluvioni che colmano il fondovalle, i depositi detritici che spesso sono presenti alla base dei versanti e le conoidi delle valli laterali.

Dal punto di vista **litologico**, nella zona collinare di Lavagno affiorano, oltre alle rocce calcaree summenzionate, anche litologie di tipo vulcanico rappresentanti del vulcanesimo Paleogenico, che si è maggiormente sviluppato nella vicina Val d'Alpone. Infatti, la porzione di dorsale che, da San Briccio, si sviluppa verso Vago di Lavagno, è costituita da Calcari Eocenici descritti generalmente in bibliografia come CALCARI NUMMULITICI, dai calcari Cretacici della SCAGLIA ROSSA e dai litotipi vulcanici Paleogenici rappresentati da BASALTI DEI CAMINI VULCANICI E DEI FILONI e da PIROCLASTITI ED EPICLASTITI BASALTICHE. Sul fondovalle, sono presenti depositi alluvionali legati alle varie fasi erosivo - deposizionali che si sono succedute nel Quaternario; talora, il passaggio dai rilievi al fondovalle è rappresentato da depositi derivanti dal disfacimento dei versanti o dalle vallecole tributarie del Mezzane, che fungono da raccordo tra questi ambiti geomorfologici (cfr. allegato n. 2).

Per quanto riguarda la **tettonica**, i principali lineamenti strutturali si presentano all'incirca con direzione Nord – Sud. Particolarmente importante è la Faglia di Castelvero (Nord Nord Ovest – Sud Sud Est) ubicata ad Est, in Val d'Alpone, che divide le aree di affioramento delle rocce prevalentemente calcaree della Lessinia centro – occidentale, da quelle principalmente vulcaniche dei rilievi orientali: anche le strutture tettoniche più importanti dell'area hanno circa questa direzione, tra cui la faglia di caratteristiche non precisate su cui sembra essersi impostata la Val d'Illasi. Inoltre, sono segnalate strutture di direzione associabili alla faglia Schio - Vicenza (Nord Ovest – Sud Est) ed altri lineamenti (ad es. Sud Ovest – Nord Est), che dislocano e condizionano la continuità delle faglie principali.

A questi elementi deve essere aggiunta una presunta fascia di deformazione che delimiterebbe il margine meridionale dei Monti Lessini: alcuni studi segnalerebbero, in tale fascia, la presenza di due lineamenti strutturali distinti, diretti da Torri del Benaco a San Michele Extra (faglia S. Ambrogio Valpolicella), e da Settimo di Pescantina fino a San Bonifacio (Adige Line).

Dal punto di vista **idrografico**, la dorsale collinare posta a ridosso dell'area in esame funge da spartiacque tra la valle del Progno di Mezzane, ad Est, e la valle di Marcellise, ad Ovest.

L'idrografia è caratterizzata da un regime torrentizio, con lunghi e prolungati periodi di secca, alternati a brevi episodi di piena coincidenti con eventi piovosi intensi e duraturi; il Mezzane, il Progno d'Illasi ed il secondario Fosso S. Ambrogio, sono i rappresentanti principali dell'idrografia locale.

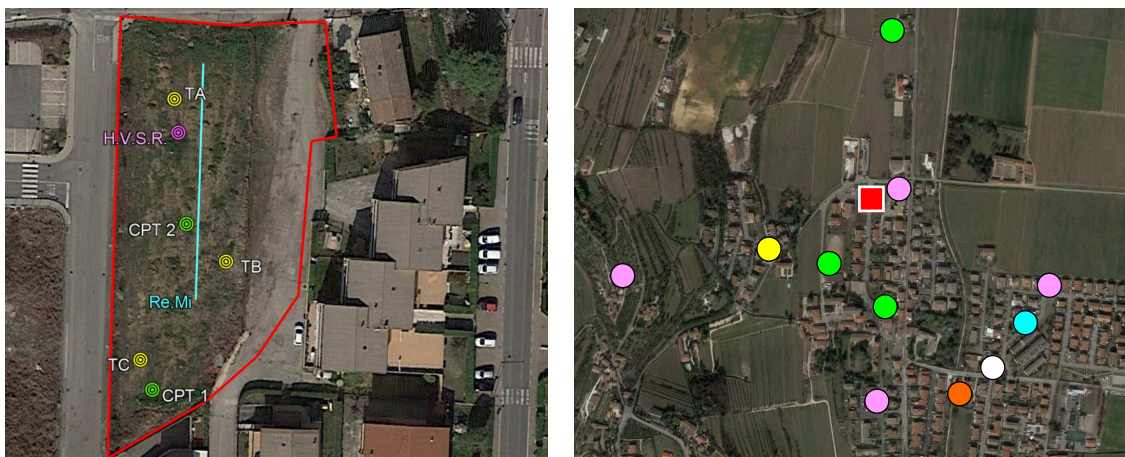
Per quanto riguarda l'**idrogeologia**, il fondovalle risulta condizionato dalla permeabilità per porosità che caratterizza, in generale, i materiali presenti ed a cui consegue la circolazione sotterranea delle acque: l'alimentazione idrica ipogea deriva principalmente dai Lessini, dalle dispersioni dei progni e dei loro tributari e dalle infiltrazioni dirette provenienti dagli afflussi meteorici che, in questo caso, alimentano una prima falda libera sovrastante possibili acquiferi confinati o semiconfinati.

## 2.2. Descrizione delle indagini eseguite

Per la descrizione della stratigrafia locale e per la ricostruzione delle qualità geotecniche dei terreni, sono state rielaborate le **n. 2 prove penetrometriche statiche CPT 1 e CPT 2** eseguite nel 2009, spinte fino al rifiuto strumentale, raggiunto alla quota di 4 m dal p.c. in entrambi i punti (cfr. allegato n. 4) e le **n. 3 trincee esplorative** denominate **TA, TB e TC**, realizzate anch'esse nel 2009 fino alla profondità massima di 4,8 m dal p.c. (cfr. allegato n. 5).

Invece, per la caratterizzazione sismica locale, in questa fase sono stati eseguiti **n. 1 stendimento geofisico di sismica passiva Re.Mi.** e **n. 1 registrazione di rumore sismico ambientale H.V.S.R. mediante Tromino®** (cfr. allegato n. 6).

Le prove realizzate nel sito in studio e quelle consultate, sono ubicabili come riportato nella figura sotto; si rimanda all'allegato n. 3 per prendere visione della posizione di dettaglio delle prove eseguite nell'area in esame.



**Figura 2.** A sinistra, ubicazione delle indagini eseguite nel sito in argomento: in verde, le prove penetrometriche statiche CPT; in giallo, le trincee esplorative; in azzurro, lo stendimento sismico Re.Mi. e, in viola, la registrazione di rumore sismico H.V.S.R. con, in rosso, il perimetro della lottizzazione.

A destra, altre indagini eseguite dallo scrivente nell'intorno dei luoghi: in verde, stendimento sismico Re.Mi. con misura sismica H.V.S.R.; in rosa, registrazioni di rumore sismico H.V.S.R., alcune con trincee esplorative; in bianco, prove penetrometriche statiche CPT con misura H.V.S.R.; in arancio, prove penetrometriche statiche CPT e dinamiche DPSH, trincee esplorative e registrazione H.V.S.R.; in azzurro, prove penetrometriche DPSH; in giallo, trincee esplorative e, in rosso, l'area in studio.

## 2.3. Modello Geologico Locale

La morfologia locale, inserita nel contesto urbanizzato del centro di San Pietro di Lavagno, si sviluppa in un appezzamento (attualmente mantenuto a verde incolto e, in parte, asfaltato) posto ad una quota compresa tra 65 m s.l.m. e 70 m s.l.m.

L'area, subpianeggiante e localmente modificata dall'attività antropica, si trova rivolta verso Est, sulla destra idrografica del Mezzane, alle pendici della dorsale che separa la Val di Mezzane, dalla Val di Marcellise.

In particolare, il P.U.A. in progetto si sviluppa su un terreno confinato ad Ovest da Via Don L. Masconale, a Nord da Via Castello, ad Est e a Sud da una serie di edifici residenziali di varia tipologia (cfr. Figura 3).



**Figura 3.** A sinistra, vista da Sud Ovest dell'area in esame; a destra, vista da Nord Ovest. Riprese fotografiche del 2009

Dal punto di vista litologico, l'esecuzione delle trincee esplorative ha evidenziato che il primo sottosuolo dell'area è costituito, al di sotto del vegetale e di terreni rimaneggiati e/o riportati, da depositi prevalentemente argillosi e argilloso limosi, intercalati in TC, tra le profondità di 3,6 m e 4,8 m, da limi argillosi e limi sabbiosi: più in superficie, si possono riscontrare locali orizzonti ad elevata percentuale di elementi calcarei, intercettati nelle trincee TB e TC ed in entrambe le prove penetrometriche.

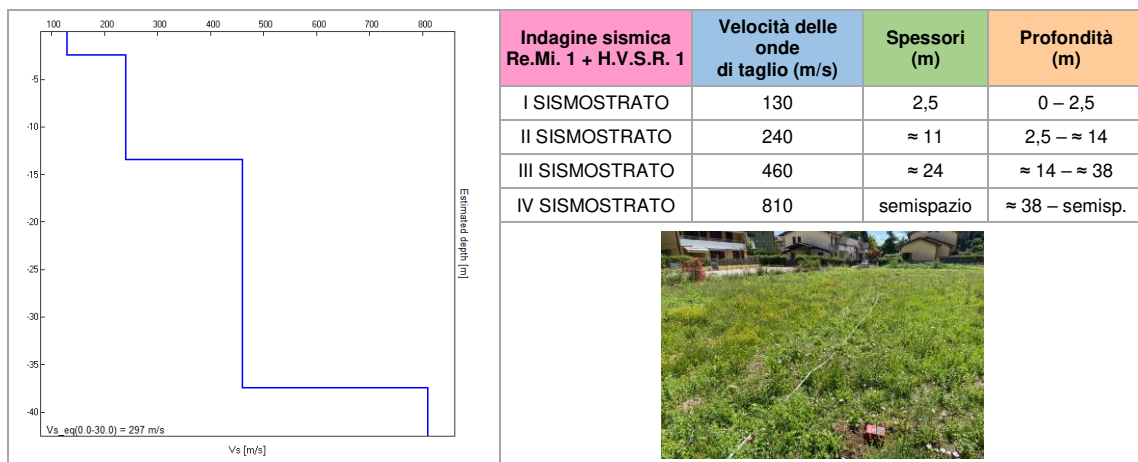
Le prove penetrometriche statiche CPT 1 e CPT 2 sono risultate ben correlabili tra loro, dimostrando la presenza di terreni prevalentemente coesivi, continui fino alla massima profondità raggiunta di 4 m dal piano campagna; esse presentano, in entrambi i punti di indagine, un solo orizzonte a comportamento incoerente tra 0,8 m ed 1,5 m dal p.c. stesso.

La ricostruzione sismostratigrafica di sito ha permesso di ipotizzare lo spessore di tali terreni e di supporre la posizione del substrato roccioso; infatti, le indagini sismiche evidenziano un materiale poco addensato fino a circa 2,5 m dal p.c., caratterizzato da una velocità di propagazione delle onde di taglio S ( $V_s$ ) di circa 130 m/s mentre, per profondità maggiori, il grado di rigidità aumenta, assumendo una  $V_s$  circa 240 m/s.

A circa 14 m dal p.c. incontriamo un sismostrato rigido con valori di  $V_s$  di 460 m/s.

Il substrato di riferimento ( $V_s = 810$  m/s), inteso dalle NTC 2018 come quel materiale con  $V_s > 800$  m/s, è stato riscontrato a circa 38 m dal p.c. (cfr. Figura 4).

Le altre indagini eseguite dallo scrivente nei dintorni dell'area, nello stesso ambito geologico, non escludono che il bedrock possa essere rappresentato dai litotipi individuati alla profondità di 14 m.



**Figura 4.** Profilo sismico delle onde di taglio  $V_s$  con sintesi dei risultati ed ubicazione della prova **Re.Mi. + H.V.S.R.**

Per quanto riguarda le condizioni idrogeologiche dell'area, all'interno delle trincee e dei fori delle prove penetrometriche non si sono verificate venute d'acqua di alcun tipo, confermando le informazioni raccolte dal P.A.T.I. che, nell'ambito di San Pietro, riportano la profondità della falda tra 10 m e 30 m. I dati di alcuni pozzi per acqua situati nel fondovalle, a Sud Est del P.U.A. in progetto, ad una quota altimetrica inferiore, segnalano la falda ad una profondità pari o maggiore di 20 m dal p.c., per cui si ritiene che nell'area in esame essa abbia una soggiacenza superiore a questa e non rilevante ai fini della verifica alla liquefazione.

Tuttavia, non si esclude la locale presenza di falde sospese ospitate nelle intercalazioni superficiali più permeabili e di occasionali fenomeni di dispersione dell'alveo in vicinanza dell'asse del Progno di Mezzane e dei suoi tributari.

Dal punto di vista idrografico, il Mezzane, che scorre arginato artificialmente ad Est, a circa 100 m di distanza, ed il Progno di Illasi, che si trova anch'esso ad oriente, a circa 2 ÷ 2,5 km, sono i rappresentanti principali dell'idrografia locale; inoltre, si segnala la presenza del Fosso S. Ambrogio, che scorre intubato lungo il lato monte della Strada Provinciale n. 16.

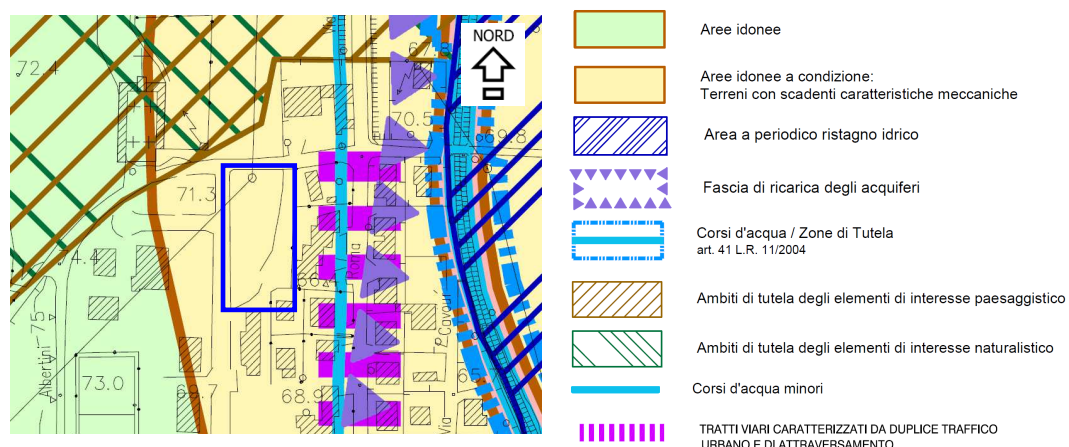
Le prove eseguite e, in particolare le osservazioni condotte all'interno delle trincee esplorative, permettono di schematizzare la stratigrafia locale come indicato in Tab. 1.

Strato	Profondità dal p.c. delle indagini (m)	Litologia	Prof. falda dal p.c.
<b>A</b>	0,0 ÷ (0,3 – 1,5)	Terreno e vegetale e/o di rimaneggiamento / riporto	<b>&gt; 20 m</b> Dato bibliografico
<b>B</b>	(0,3 – 1,5) ÷ 4,8	Argille ed argille limose con inclusi calcarei di piccole dimensioni (ghiaietto / sabbia grossa) in percentuale generalmente bassa, e rari ciottoli calcarei.  Nelle trincee TB e TC e nelle prove CPT, livello a maggior percentuale di elementi calcarei tra 0,8 m ed 1,5 m. In TC, dalla profondità di 3,6 m, limi argillosi e, da 4,6 m, limi sabbiosi	

**Tab. 1.** Stratigrafia schematica dell'area esaminata

## 2.4. Pericolosità idraulica e geologica

La “Carta delle Fragilità” della Variante n. 1 al P.A.T.I., per quanto riguarda l'idoneità edificatoria dei terreni, inserisce il sito tra le “aree idonee a condizione: terreni con scadenti caratteristiche meccaniche” ed in prossimità di “tratti viari caratterizzati da duplice traffico urbano e di attraversamento” (cfr. figura sotto. In blu, l'area in esame).



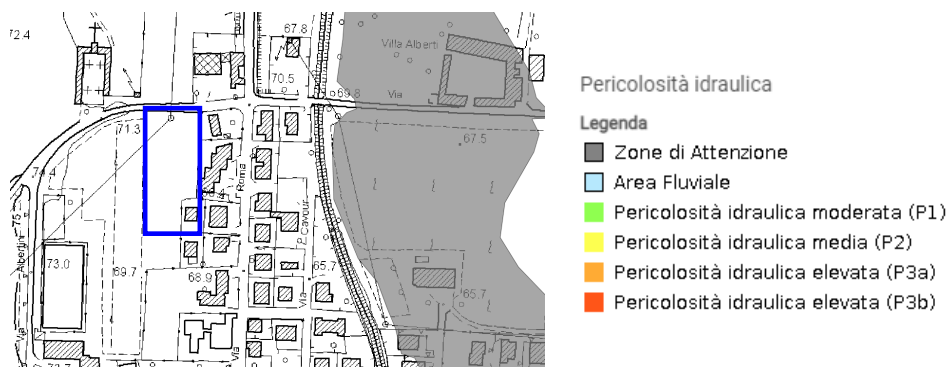
**Figura 5.** Estratto dalla “Carta delle Fragilità” della Variante n. 1 al P.A.T.I. (ottobre 2018)

Le altre tavole consultate (“Carta dei Vincoli e della Pianificazione Territoriale” e “Carta delle Invarianti”) non segnalano vincoli o invarianti **di natura geologica** nell’area in esame.

Dall’analisi delle tavole A.4.37 ed A.5.37 (Individuazione e perimetrazione delle aree a rischio idraulico) del “Piano stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico - Bacino dell’Adige – Regione Veneto”, si evince che l’area interessata dalle modifiche urbanistiche in progetto **non** ricade all’interno delle zone segnalate nella perimetrazione della pericolosità o del rischio idraulico e/o geologico definite dall’Autorità di Bacino Nazionale dell’Adige.

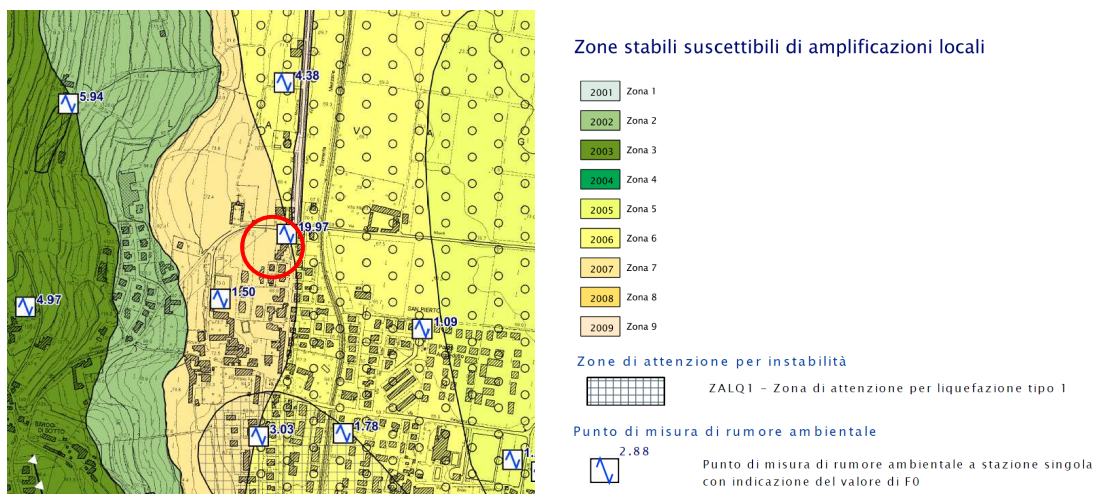
In ogni caso, il sito **non** rientra tra le zone di pericolosità e rischio idraulico del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni dell’Autorità di Bacino distrettuale delle Alpi Orientali.

Infatti, la Tavola AG12\_PI esclude il sito tra le zone pericolose dal punto di vista idraulico, segnalando la presenza di una zona di attenzione più ad Est (cfr. estratto dalla Tavola AG12\_PI del P.G.R.A., in figura sotto - in blu, l’area in esame); **l’immagine sottostante si riferisce alla consultazione del sistema informativo dell’Autorità di Bacino del 18.11.23.**



La “Carta delle Fragilità” allegata al Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale di Verona (P.T.C.P. – Tavola 2a - scala 1:50.000) non indica alcuna fragilità per l’area in argomento segnalando, invece, un “*ambito di attenzione idraulica*” poco ad Est, oltre la S.P. n. 16, in sinistra idrografica del Progno di Mezzane.

Infine, la Carta delle MOPS (Carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica) allegata allo studio di Microzonazione Sismica di Livello 1, eseguito dallo scrivente, inserisce l’area tra le “*zone stabili suscettibili di amplificazioni locali*” (cfr. figura sotto con, in rosso, l’area in studio).





I dati riepilogati in Tab. 2 rappresentano il valore **medio** dei parametri di ciascuno degli strati individuati: talora, alcuni livelli spessi 20 cm caratterizzati da particolari valori di resistenza alla punta, sono stati scartati o interpretati, come comportamento meccanico, in modo differente dai dati di correlazione litotecnica restituiti dalle prove.

Si rimanda all'allegato n. 4 per prendere visione dei grafici e dei risultati completi.

	Profondità (m)	Comportamento prevalente	Rp (kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	c <sub>u</sub> (kPa)	$\phi$ (°)	M (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>CPT 1</b> Falda assente	0,40 – 0,80	coesivo	17,0	17 - 18	70	-	51
	0,80 – 1,40	incoerente	59,3	18 - 19	-	32	178
	1,40 – 1,80	coesivo	16,5	17 - 18	70	-	49
	1,80 – 4,00	coesivo	30,0	18 - 19	105	-	90
<b>CPT 2</b> Falda assente	0,40 – 0,80	coesivo	16,0	17 - 18	70	-	48
	0,80 – 1,60	incoerente	84,5	18 - 19	-	34	253
	1,60 – 2,20	coesivo	16,3	17 - 18	70	-	49
	2,20 – 4,00	coesivo	28,3	18 - 19	100	-	85

**Tab. 2. Parametri geotecnici dalle prove CPT**

*Rp = Resistenza alla punta,  $\gamma_{nat}$  = Peso di volume naturale del terreno, c<sub>u</sub> = Coesione non drenata,  $\phi$  = Angolo di resistenza al taglio, M = Modulo edometrico*

## MISURE SPEDITIVE

Per parametrizzare, indicativamente, i **terreni prevalentemente argillosi, argilloso limosi e limoso argillosi** sono state eseguite, sui fianchi delle trincee TB e TC, anche alcune prove speditive con strumenti tascabili.

La valutazione preliminare della resistenza al taglio in termini di coesione non drenata (c<sub>u</sub>), è stata fatta con la prova vane test mediante scissometro tascabile mentre, per valutare la resistenza alla compressione semplice (q<sub>u</sub>), si è impiegato il pocket penetrometer.

Tali prove hanno restituito valori di c<sub>u</sub> compresi tra 120 kPa e 160 kPa e valori di q<sub>u</sub> compresi tra 200 kPa e 300 kPa (cfr. allegato n. 5).

I test eseguiti col pocket penetrometer sono discretamente correlabili ai vane test: infatti, secondo la letteratura specifica, la resistenza q<sub>u</sub> corrisponde generalmente ad una coesione non drenata c<sub>u</sub> = 0,5 x q<sub>u</sub>.

## 2.7. Proposta di Modello Geotecnico Locale

Le prove penetrometriche statiche CPT sono risultate ben correlabili tra loro ed hanno permesso di interpretare, al di sotto del vegetale e/o di riporto / rimaneggiamento, la presenza di depositi prevalentemente argillosi, argilloso limosi e limoso argillosi, a comportamento meccanico prevalentemente coesivo, di discreta qualità, le cui caratteristiche migliorano a partire dalla profondità di circa 2 m; entrambe le prove presentano un orizzonte a comportamento geotecnico prevalentemente incoerente, tra 0,8 m ed 1,5 m dal piano campagna.

Nella seguente tabella sono state quindi schematizzate le caratteristiche meccaniche del sottosuolo e sono stati riportati i parametri geotecnici x<sub>d</sub> di progetto, ottenuti accorpando strati aventi caratteristiche all'incirca omogenee, secondo le due modellazioni M1 ed M2 previste dalle NTC.

I valori di progetto x<sub>d</sub> derivano dai valori caratteristici x<sub>k</sub> stabiliti sulla base dell'interpretazione delle prove esposte in precedenza; lo **Strato A (vegetale e/o di riporto / rimaneggiamento)**, non è stato considerato nella parametrizzazione, poiché non dovrà costituire il piano di fondazione di alcuna opera in progetto.

	Strato	Profondità dal p.c. (m)	Comportamento geotecnico prevalente	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c_{ud}$ (kPa)	$\phi_d$ (°)
<b>M1</b>	<b>A</b>	0,0 – (0,3 ÷ 1,5)	variabile (vegetale / riporto)	17 - 18	-	-
	<b>B</b>	(0,3 ÷ 1,5) – 0,8	coesivo	17 - 18	70	-
		0,8 – (1,4 ÷ 1,6)	incoerente	18 - 19	-	30 - 32
		(1,4 ÷ 1,6) – (1,8 ÷ 2,2)	coesivo	17 - 18	70	-
		(1,8 ÷ 2,2) – 4,6	coesivo	18 - 19	100	-
		4,6 – 4,8	incoerente	17 - 18	-	28 - 30
<b>M2</b>	<b>A</b>	0,0 – (0,3 ÷ 1,5)	variabile (vegetale / riporto)	17 - 18	-	-
	<b>B</b>	(0,3 ÷ 1,5) – 0,8	coesivo	17 - 18	50,0	-
		0,8 – (1,4 ÷ 1,6)	incoerente	18 - 19	-	24,8 – 26,6
		(1,4 ÷ 1,6) – (1,8 ÷ 2,2)	coesivo	17 - 18	50,0	-
		(1,8 ÷ 2,2) – 4,6	coesivo	18 - 19	71,4	-
		4,6 – 4,8	incoerente	17 - 18	-	23,0 – 24,8

**Tab. 3. Parametri geotecnici di progetto – Modellazione M1 ed M2 delle NTC**

$\gamma_{nat}$  = Peso di volume naturale del terreno,  $c_{ud}$  = Coesione non drenata di progetto,  $\phi_d$  = Angolo di resistenza al taglio di progetto

## 2.8. Caratteristiche di permeabilità dei terreni locali

Il coefficiente di permeabilità  $k$ , o conducibilità idraulica, rappresenta il parametro che caratterizza un deposito dal punto di vista idrogeologico e può essere qualitativamente espresso come l'attitudine propria di un terreno a lasciarsi attraversare da un fluido.

Nell'area, le litologie poste al di sotto della coltre vegetale e del terreno rimaneggiato e/o di riporto, sono generalmente dotate di una permeabilità molto bassa: in assenza di indagini dirette, il loro coefficiente  $k$  può essere valutato indicativamente sulla base delle tabelle esistenti in letteratura, come quella riportata sotto (cfr. Figura 6).

$k$ (cm/s)	$10^2$	10	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$
$k$ (m/s)	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$
Classi di permeabilità	EE	Elevata	Buona	Discreta	Bassa	BB	Impermeabile					
Tipi di terreno	Ghiaie pulite	Sabbie grossolane pulite e miscele di sabbie e ghiaie			Sabbie fini	Miscele di sabbie e limi	Limi argillosi e argille limose, fanghi argillosi	Argille omogenee e compatte				

**Figura 6. Permeabilità dei terreni**

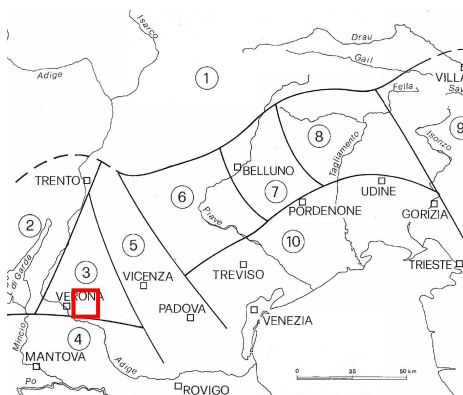
Infatti, il primo sottosuolo dell'area risulta formato generalmente da litologie di scarsa permeabilità: tali terreni possono essere inseriti tra quelli aventi una *Classe di permeabilità* da "Bassa" a "molto bassa BB". Pertanto, facendo riferimento alla Tab. 1 è possibile suddividere indicativamente le litologie locali, dal punto di vista della permeabilità, come esposto nella seguente Tab. 4.

Strato	Litologia	Classe di permeabilità	$k$ (cm/s)
<b>A</b>	Vegetale limoso argilloso, talora rimaneggiato e, solo localmente, riporti di ghiaie e ciottoli	Bassa / Molto bassa	$10^{-5} - 10^{-6}$
<b>B</b>	Argille ed argille limose prevalenti, compatte, solo a tratti con elementi litoidi abbondanti	Molto bassa	$10^{-5} - 10^{-7}$

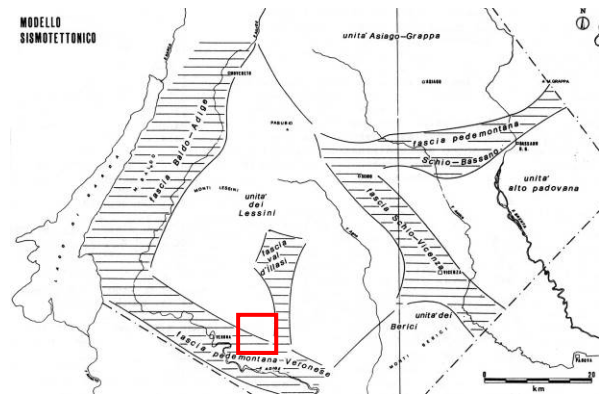
**Tab. 4. Stratigrafia schematica dei terreni con indicazione delle caratteristiche di permeabilità**

### 3. RELAZIONE SISMICA

Secondo il modello di zonazione sismotettonica del C.N.R. del 1987, il sito si colloca nell'“area Lessinea” (Area 3 nella figura sotto a sinistra): suddividendo l'area in sottozone, il territorio in esame si può inserire tra la “fascia Val d'Illasi” e la “fascia pedemontana Veronese” (cfr. figura sotto a destra).



Modello sismotettonico dell'Italia Nord Orientale (Slejko et. al. 1987)



Modello sismotettonico dell'area fra il Lago di Garda e il Monte Grappa (Panizza et. al. 1981)

La fascia Val d'Illasi è caratterizzata da un sistema di faglie con direzione circa Nord – Sud, che si interseca con altri lineamenti nella zona di Badia Calavena: secondo alcuni autori, tale sistema di faglie, a rigetto subverticale, denota un abbassamento del lato Est, in corrispondenza del quale si sarebbe impostata la Val d'Illasi. A queste strutture è legata la forte erosione recente che è stata messa in relazione con l'attività tettonica locale: la presunta faglia della Val d'Illasi, secondo alcune cartografie, si troverebbe all'interno della vallata omonima, più a Nord Est.

Per quanto riguarda la sismicità di tale fascia, degni di nota sono i terremoti del 1891, del 1892, del 1894 e quelli del 1908, quando si verificarono una serie di scosse sismiche, alcune delle quali con intensità fino al VIII - IX grado della scala MCS, che danneggiarono, anche gravemente, molti abitati.

Invece, lo stile tettonico che contraddistingue la fascia pedemontana Veronese, che si trova al bordo meridionale dei Lessini e fa da passaggio alla pianura, è stato descritto in precedenza, nel paragrafo di inquadramento. Le presunte strutture pedemontane, da alcuni autori ritenute responsabili dell'attività neotettonica del settore meridionale dell'area lessinea, si troverebbero a Sud del sito; secondo alcuni studi recenti, tali potenziali disturbi terminerebbero più ad Ovest, con la faglia di Sant'Ambrogio Valpolicella.

La sismicità di questa fascia è caratterizzata soprattutto dai terremoti di localizzazione incerta che hanno interessato in passato la città di Verona, uno dei quali distruttivi (gennaio 1117): la presenza di altra attività sismica di localizzazione, invece, più attendibile, porta a considerare questa fascia come sismicamente attiva, anche se la sismicità più recente, di grado medio – basso, è concentrata particolarmente nel settore Nord dell'area lessinea, allo svincolo con la “fascia Schio – Vicenza”.

Per quanto riguarda le faglie capaci, si è fatto riferimento al Catalogo **ITHACA**, che riporta la faglia non definita “Val d'Illasi” (cod. 79.600), a Nord Est dell'area, e la faglia non definita “Adige Line” (cod. 71.700), a Sud (come detto sopra, alcune pubblicazioni recenti consultate, ad es. Scardia et al., 2014, terminano le strutture pedecollinari lessinee più ad Ovest): **tali lineamenti, peraltro presunti e nascosti dalla coltre alluvionale, non intersecano il sito**, come indicato nella seguente figura a sinistra (in rosso le faglie e, in giallo, l'area in esame).

Inoltre, l'area in esame si trova a Nord di una zona sismogenetica individuata dal **DISS 3.3.0** (Database of Individual Seismogenic Sources), considerato che la sorgente composita ITCS076 "Adige Plain" termina a Sud dei luoghi (indicata in arancio nella figura sotto a destra).

Essa si sviluppa anche all'esterno della sorgente dibattuta ITDS075 "Sant'Ambrogio", ovvero di un'area che, a giudizio degli autori del DISS, non può essere considerata sorgente sismogenetica, perché non sufficientemente documentata o perché, sulla sua esistenza o sul suo potenziale sismogenetico, esistono opinioni fortemente contrastanti (fascia in viola nella figura).



### 3.1. Classificazione sismica del sito di costruzione

Secondo la classificazione dell'O.P.C.M. n. 3519 del 28 aprile 2006, considerata nel D.M. 14 gennaio 2008 e ripresa dal D.M. 17 gennaio 2018, l'area è inseribile nella fascia distinta da un valore di accelerazione sismica orizzontale  $a_g$  riferito a suoli rigidi subpianeggianti con  $V_{s,30} > 800$  m/s compreso tra **0,150g** e **0,175g**, (valori riferiti ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni – mappa 50° percentile).

Infatti, per quanto riguarda la **pericolosità di base**, in riferimento ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni ( $T_r = 475$  anni), il calcolo eseguito con il programma "Spettri di risposta – ver. 1.0.3" del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici mediante interpolazione per superficie rigata, individua la pericolosità sismica del sito di intervento con un valore di  $a_g$  riferito a suoli rigidi subpianeggianti caratterizzati da  $V_{s,30} > 800$  m/s pari a **0,155g** (cfr. figura seguente).

Le coordinate sono state acquisite sul posto con sistema GPS Garmin Geko 301 (Datum WGS 84) e successivamente corrette e convertite nel Datum ED 50, come riporta la figura sotto, per essere inserite nel programma "Spettri di risposta – ver. 1.0.3" per l'individuazione della pericolosità del sito.

$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T_C^*$ [s]
30	0,041	2,500	0,237
50	0,055	2,496	0,250
72	0,067	2,496	0,256
101	0,078	2,472	0,262
140	0,092	2,425	0,266
201	0,109	2,412	0,272
475	0,155	2,430	0,277
975	0,202	2,471	0,280
2475	0,284	2,378	0,291

**Valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_C$  per i periodi di ritorno  $T_R$  di riferimento.**  
Estratti da "Spettri di risposta – ver. 1.0.3" del Consiglio Superiore dei LL. PP.

Coordinate ED 50 del sito.

Longitudine 11,13253

Latitudine 45,44413

I valori base di accelerazione  $a_g$  ed i parametri sismici da utilizzare nei calcoli dovranno essere successivamente stabiliti sulla base della “Strategia di Progettazione” che sarà adottata, una volta assegnate alle opere in progetto la Vita nominale, la Classe d’uso ed il Periodo di riferimento (cfr. NTC).

### 3.2. Analisi sismica locale. Livello 3

#### 3.2.1. Sismostratigrafia e Frequenza caratteristica di risonanza

Per la ricostruzione sismostratigrafica sono stati eseguiti n. 1 stendimento geofisico di sismica passiva Re.Mi. e n. 1 registrazione di rumore sismico ambientale H.V.S.R. mediante Tromino®, ubicati come in Figura 2 ed in allegato n. 3.

Tali misure hanno evidenziato un materiale poco addensato fino a circa 2,5 m dal p.c., con una velocità di propagazione delle onde di taglio S ( $V_s$ ) di circa 130 m/s mentre, per profondità maggiori, il grado di rigidità aumenta, assumendo una  $V_s$  circa 240 m/s. A circa 14 m dal p.c. si rileva un orizzonte con valori di  $V_s$  di 460 m/s, mentre il substrato di riferimento ( $V_s = 810$  m/s), inteso dalle NTC 2018 come quel materiale con  $V_s > 800$  m/s, è stato interpretato a circa 38 m dal p.c. (cfr. Figura 4).

Si rimanda all’allegato n. 6 per la lettura completa degli esiti delle analisi eseguite, dove è indicata anche la **frequenza caratteristica di risonanza di sito** che, nell’intervallo di normale interesse ingegneristico – strutturale (0,1 ÷ 20 Hz), è risultata con un valore di **3,0 ± 0,24 Hz**.

#### 3.2.2. Analisi di Risposta Sismica Locale

Ai fini della definizione dell’azione sismica, si rende necessario valutare l’effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi o in rapporto ad un approccio semplificato che si basa sull’individuazione di Categorie di Sottosuolo di riferimento.

A titolo puramente indicativo, si riporta che sulla base della Re.Mi. di cui sopra, il sito rientrerebbe nella Categoria di Sottosuolo di tipo C, mentre la Categoria Topografica proponibile sarebbe la T1, quindi con coefficiente  $S_T = 1$ .

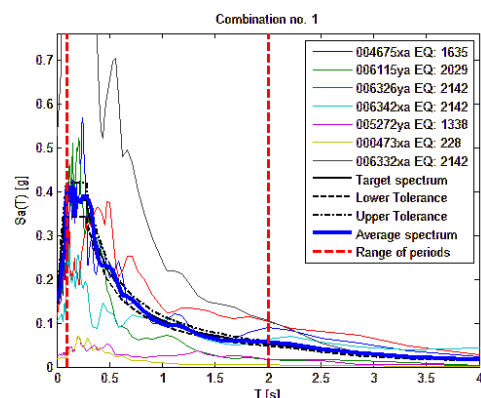
Ad ogni modo, viste le condizioni geologiche dell’area, è stato eseguito uno studio di Risposta Sismica Locale RSL, mediante un approccio al continuo in condizioni di bidimensionalità.

**Lo studio di RSL è stato realizzato in collaborazione con il Dott. Geol. Matteo Collareda, esperto in materia geofisica e sismica (cfr. allegato n. 6).**

Nel rispetto della normativa vigente, è stata effettuata una modellazione numerica assegnando una severità dell’azione sismica con la probabilità di superamento P e con il periodo di ritorno  $T_r$  relativi agli stati limite considerati.

In questa fase preliminare, è stata considerata una vita nominale della costruzione  $V_n$  di 50 anni, una classe d’uso II con il relativo coefficiente  $C_u$  pari ad 1 e, quindi, una vita di riferimento  $V_r$  di 50 anni. A partire da queste indicazioni si è determinato un periodo di ritorno dell’azione sismica di 475 anni corrispondenti allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV).

Gli input sismici utilizzati sono rappresentati da una settupla di storie accelerometriche applicate alla base del modello per lo stato limite considerato e riferite agli spettri di normativa calcolati per il sito, considerando un sottosuolo di roccia affiorante (classe A) con topografia suborizzontale (T1) e correttamente deconvoluto (v. Dynamic Analysis della ITASCA, 2018).



In particolare, gli accelerogrammi sono stati ricavati tramite l'utilizzo del software REXEL - *computer aided record selection for code-based seismic structural analysis*.

Nella modellazione numerica sono stati utilizzati la sismostratigrafia ed i valori di rigidità ricavati dall'indagine geofisica eseguita in questa fase.

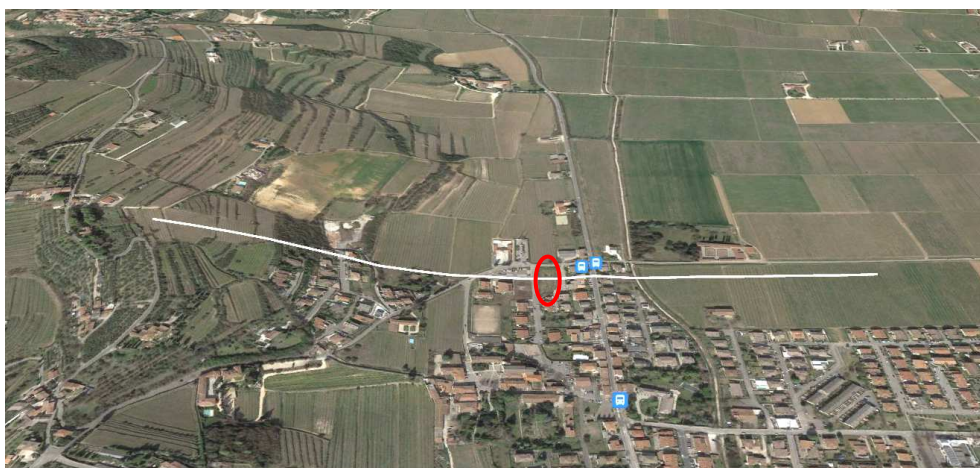
Inoltre, al fine di ricostruire l'assetto sismostratigrafico dell'area, si sono consultate altre indagini sismiche condotte dallo scrivente durante l'esecuzione dello studio di Microzonazione Sismica comunale e che ricadono in prossimità della sezione analizzata, oltre ad ulteriori indagini sismiche pregresse, sempre eseguite dallo scrivente nell'intorno del sito.

Nella foto satellitare sottostante sono state ubicate le altre prove geofisiche consultate (in verde, prove Re.Mi. + H.V.S.R. e, in viola, misure H.V.S.R. con, in rosso, il lotto in studio in cui è stata eseguita l'indagine di cui in precedenza).

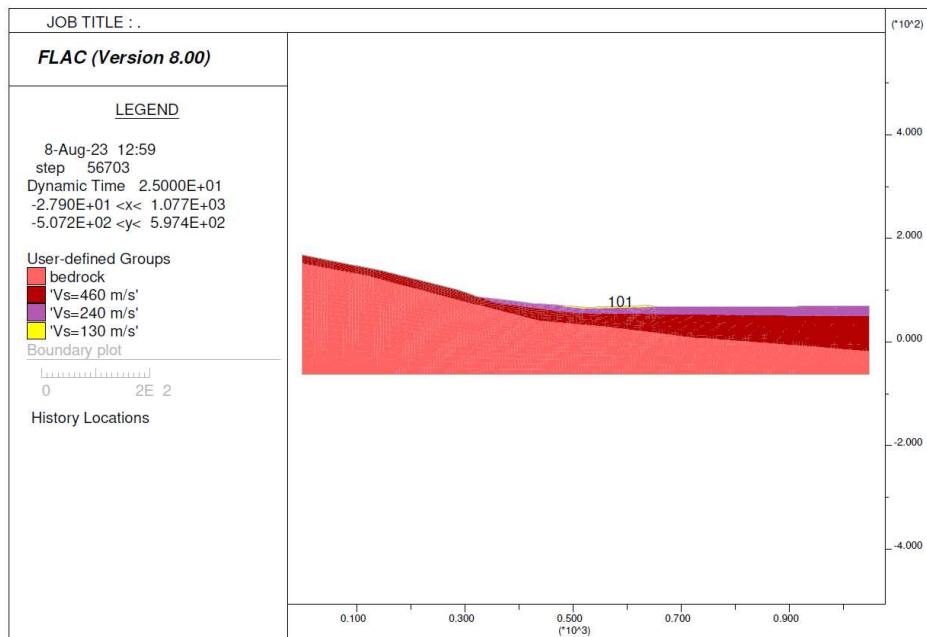


A seguire, si mostra la traccia della sezione, il modello sismostratigrafico impiegato per le simulazioni numeriche e, quindi, lo spettro risultante dalla modellazione per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

Si fa presente che la sismostratigrafia è stata ricostruita sulla scorta delle velocità  $V_s$  ricavate dalle indagini e correlate tra i vari punti di prova, e non coincide necessariamente con la litostratigrafia, che può presentare velocità variabili anche all'interno dello stesso litotipo.

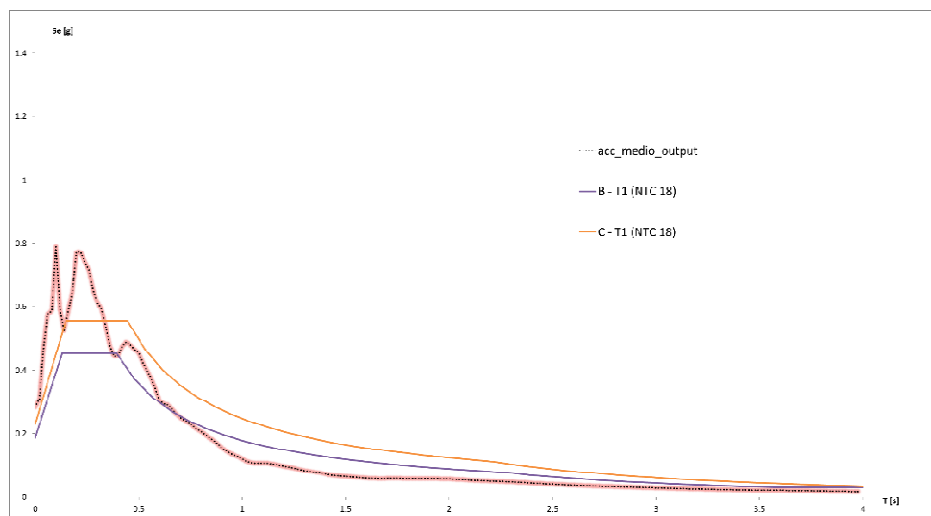


Traccia della sezione sismostratigrafica utilizzata per lo studio di RSL con, in rosso, l'area in esame



Modello sismostratigrafico utilizzato per lo studio di Risposta Sismica Locale RSL

Il grafico seguente sintetizza i risultati dello studio. La linea rosa puntinata in nero, che rappresenta la media degli spettri di risposta elastica calcolati in superficie (tetto del modello) per ogni evento sismico modellizzato, è stata confrontata con gli spettri di normativa (cfr. allegato n. 6).



Lo spettro di risposta elastico ottenuto, presenta valori massimi di  $a_g$  compresi tra  $0,58 a_g/g$  e  $0,79 a_g/g$  nell'intervallo tra  $0,06 s$  e  $0,32 s$ .

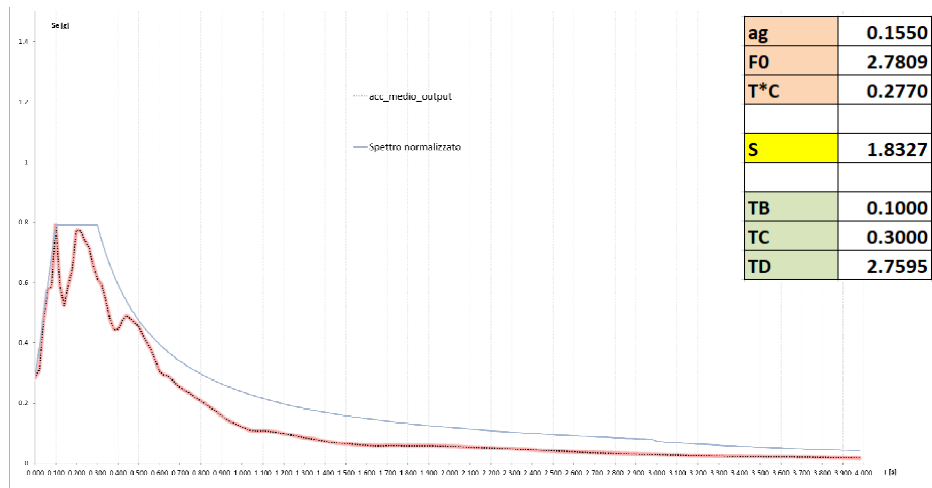
Dal grafico sopra riportato, si può osservare che, la Categoria C unita alla Categoria Topografica T1, in cui rientrerebbe il sito:

- per periodi inferiori a  $0,34 s$ , **risulta inappropriata** per quantificare l'azione sismica attesa al sito, in quanto sottostima i valori massimi di  $a_g$  ottenuti dalla modellazione;
- tale combinazione può essere considerata **generalmente rappresentativa** dell'amplificazione sismica, qualora il periodo di vibrazione della struttura ricada nel range compreso tra  $0,36 s$  e  $0,64 s$ ;
- **risulta nuovamente inappropriata** per periodi superiori a  $0,66 s$ , poiché sovrastima la RSL al punto che, per questo intervallo, potrebbe essere utilizzata la combinazione B - T1.

In via definitiva, si consiglia quindi l'utilizzo dello spettro calcolato tramite la modellazione numerica descritta, poiché rappresentativo delle condizioni di sito locali e dell'effettiva amplificabilità del sito in ogni range di periodo.

Nel caso in cui fosse necessario esprimere lo spettro elastico ottenuto dallo studio di RSL con le equazioni 3.2.3 del DM 2018, di seguito si riportano i parametri  $a_g$ ,  $F_0$  ed  $T_C^*$  del sito, i periodi di vibrazione ( $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$ ) ed il coefficiente di amplificazione  $S$  ( $S_T \cdot S_S$ ) da utilizzare per costruire lo spettro normalizzato che meglio approssima quelli massimi ottenuti dalla modellazione mostrato nell'immagine seguente e riportato nell'allegato "SLV - Spettro normalizzato".

### Normalizzazione totale NTC 2018



Si rimanda all'allegato a fine testo per la lettura integrale dei risultati delle indagini, dove è riportato per esteso l'esito dello studio di Risposta Sismica Locale e gli spettri allo SLV (effettivo e normalizzati) derivanti dalla modellazione numerica eseguita.

*Resta di stretta competenza del Progettista la scelta definitiva dell'input sismico da adottare per i calcoli strutturali, che sarà subordinata all'individuazione dei parametri progettuali definitivi.*

*Si ricorda che qualunque tecnica di geofisica applicata ha un margine di errore intrinseco variabile in funzione del tipo di tecnica usata, di strumentazione utilizzata e di problematiche incontrate durante la fase di acquisizione.*

*Infine, i profili di  $V_s$  ricavati con questa metodologia, come tutti i metodi indiretti, non presentano una soluzione univoca e, quindi, più modelli possono fornire curve sintetiche simili tra loro.*

### 3.2.3. Suscettibilità alla liquefazione

Sulla base di quanto previsto dal paragrafo 7.11.3.4.2 delle NTC, viste le caratteristiche geologiche locali, la verifica della suscettibilità dei terreni nei confronti della liquefazione può essere omessa.

#### 4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La presente relazione è stata redatta sulla base delle indagini eseguite nel sito in studio, che hanno permesso di verificare la compatibilità geologica, geomorfologica ed idrogeologica dell'area in cui è prevista la realizzazione di un P.U.A. residenziale, in Via Castello, a San Pietro di Lavagno.

La morfologia locale, inserita nel contesto urbanizzato del centro di San Pietro di Lavagno, si sviluppa in un appezzamento (attualmente mantenuto a verde incolto e, in parte, asfaltato) posto ad una quota compresa tra 65 m s.l.m. e 70 m s.l.m.

L'area, subpianeggiante e localmente modificata dall'attività antropica, si trova rivolta verso Est, sulla destra idrografica del Mezzane, alle pendici della dorsale che separa la Val di Mezzane, dalla Val di Marcellise.

Dal punto di vista litologico, l'esecuzione delle trincee esplorative ha evidenziato che il sottosuolo dell'area è costituito, al di sotto del vegetale e di terreni rimaneggiati e/o riportati, da depositi prevalentemente argillosi e argilloso limosi, intercalati in TC, tra le profondità di 3,6 m e 4,8 m, da limi argillosi e limi sabbiosi: più in superficie, si possono riscontrare locali orizzonti ad elevata percentuale di elementi calcarei, intercettati nelle trincee TB e TC ed in entrambe le prove penetrometriche.

Le prove penetrometriche statiche CPT 1 e CPT 2 sono risultate ben correlabili tra loro, dimostrando la presenza di terreni prevalentemente coesivi, continui fino alla massima profondità raggiunta di 4 m dal piano campagna; esse presentano, in entrambi i punti di indagine, un solo orizzonte a comportamento incoerente tra 0,8 m ed 1,5 m dal p.c. stesso.

Per quanto riguarda le condizioni idrogeologiche dell'area, all'interno delle trincee e dei fori delle prove penetrometriche non si sono verificate venute d'acqua di alcun tipo, confermando le informazioni raccolte dal P.A.T.I. che, nell'ambito di San Pietro, riportano la profondità della falda tra 10 m e 30 m.

I dati di alcuni pozzi per acqua situati nel fondovalle, a Sud Est del P.U.A. in progetto, ad una quota altimetrica inferiore, segnalano la falda ad una profondità pari o maggiore di 20 m dal p.c., per cui si ritiene che nell'area in esame essa abbia una soggiacenza superiore a questa e non rilevante ai fini della verifica alla liquefazione.

Tuttavia, non si esclude la locale presenza di falde sospese ospitate nelle intercalazioni superficiali più permeabili e di occasionali fenomeni di dispersione dell'alveo in vicinanza dell'asse del Progno di Mezzane.

Per quanto riguarda il rischio geologico locale, gli strumenti pianificatori consultati non segnalano pericolosità di carattere geologico e/o idraulico per l'area in esame.

Per quanto riguarda la pericolosità sismica di base, in riferimento ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni ( $T_r = 475$  anni), il calcolo eseguito con il programma "Spettri di risposta – ver. 1.0.3" del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici mediante interpolazione per media ponderata, individua la pericolosità sismica del sito con un valore di  $a_g$  riferito a suoli rigidi subpianeggianti con  $V_{s,30} > 800$  m/s pari a **0,155g**.

Si ricorda che, per gli aspetti amministrativi legati alla normativa sismica regionale, il Comune di Lavagno rientra in Zona 2, secondo la D.G.R.V. n. 244 del 09.03.21.

Secondo lo Studio di Microzonazione Sismica di Livello 1, il sito rientra tra le "zone stabili suscettibili di amplificazioni locali" e non risulta tra le "zone di attenzione per instabilità".

Vista la geologia locale e la collocazione geomorfologica del P.U.A., per la definizione dell'azione sismica è stato eseguito uno studio di Risposta Sismica Locale, il cui risultato suggerisce l'utilizzo dello spettro calcolato tramite la modellazione numerica, poichè riesce a quantificare correttamente la spinta sismica da utilizzare in fase di progettazione in tutti i range di periodi di interesse; si rimanda all'interno del testo ed in allegato per la lettura completa dello studio di RSL 2D.

In conclusione, si ritiene che, fatto salvo quanto finora esposto ed eventuali vincoli di carattere pianificatorio dei quali non si è a conoscenza, l'area sia compatibile per l'inserimento del nuovo P.U.A.

Ad ogni modo, si ricorda che la presente indagine è stata finalizzata esclusivamente alla verifica della compatibilità geologica, geomorfologica, idrogeologica e sismica dell'area: prima della progettazione delle opere, sarà quindi necessario ricostruire le caratteristiche litotecniche più profonde e verificare i rapporti tra le strutture previste e le condizioni geologiche e geomorfologiche dei luoghi.

Una volta acquisite tali informazioni ed in funzione delle effettive scelte progettuali, si potrà valutare il sistema fondazionale più appropriato per le opere in progetto e le modalità più corrette per la realizzazione delle nuove strutture.

Preventivamente alla progettazione esecutiva delle opere, dovrà essere controllata diffusamente la situazione locale, in modo da verificare le notizie raccolte in questa fase e, quindi, mantenere valide o meno le considerazioni espresse circa le condizioni del sottosuolo e le caratteristiche geologiche del sito.

**Dott. Geol. Davide Dal Degan**



## 5. BIBLIOGRAFIA

- ✚ A.G.I. (1977) – Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche.
- ✚ A.G.I. (2005) – Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Linee guida. Ed. Provvisoria
- ✚ Autorità di Bacino Nazionale dell'Adige – Piano stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico. Bacino dell'Adige. Regione Veneto.
- ✚ Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali – Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni. Direttiva 2007/60/CE – D. Lgs. 23/02/2010 n. 49.
- ✚ Bowles J. E. (1991) – Fondazioni. Progetto e analisi. McGraw – Hill Ed.
- ✚ CERI Centro di ricerca “Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici” (2004) – La microzonazione sismica. Metodi, esperienze e normativa.
- ✚ Cestari F. (1990) – Prove geotecniche in sito. Ed. Geo - graph, Segrate.
- ✚ Cestelli Guidi C. – Geotecnica e tecnica delle fondazioni. Hoepli Ed.
- ✚ Colombo P., Colleselli F. (1974) – Elementi di Geotecnica. Zanichelli Ed.
- ✚ Di Bernardo A, Dal Corso M. (2005) – Formula Geo.
- ✚ Di Girolamo M., Filippucci G. (1996) – Il progetto delle fondazioni. NIS Ed.
- ✚ Fabiani R. (1913) - I bacini dell'Alpone, del Tramigna e del Progno d'Illasi nei Lessini medi: geologia, morfologia, idrografia e carta della permeabilità delle rocce”, Venezia Premiate Officine Grafiche di Carlo Ferrari.
- ✚ Gruppo di lavoro MPS (2004) – Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'OPCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano – Roma.
- ✚ Lambe & Whitman (1969) - Meccanica dei terreni. D. Flaccovio Ed.
- ✚ Lancellotta R. (1987) – Geotecnica. Zanichelli Ed.
- ✚ Lanzo G., Silvestri F. (1999) – Risposta Sismica Locale. Hevelius Ed.
- ✚ Marsan P., Romeo R. (1992) – La relazione geologica e geotecnica. NIS Ed.
- ✚ Panizza M., Slejko D. et al. (1981) – Modello sismotettonico dell'area fra il Lago di Garda e il Monte Grappa.
- ✚ Peli G. (2007) – Geotecnica pratica delle fondazioni dirette. Pitagora Editrice Bologna.
- ✚ Slejko D. et al (1987) – Modello sismotettonico dell'Italia Nord – Orientale. CNR.
- ✚ Viggiani C. – Fondazioni. Hevelius Ed.

## 6. CARTOGRAFIA

- ✚ C.T.R. della Regione Veneto alla Scala 1:5.000 - Elemento n. 124141 “Lavagno”
- ✚ Carta Geologica d'Italia alla Scala 1:100.000 – Foglio n. 49 “Verona”
- ✚ Zampieri e Zorzin (1993) – Carta geologica dei Lessini Centro Occidentali tra la Valpantena e la Val d'Illasi (Prealpi venete), Scala 1:40.000

## 7. ALLEGATI

- ✚ Allegato n. 1 – Corografia Scala 1:5.000
- ✚ Allegato n. 2 – Carta Geologica Generale Scala 1:20.000
- ✚ Allegato n. 3 - Planimetria con ubicazione delle indagini Scala 1:500
- ✚ Allegato n. 4 – Restituzione dati delle prove penetrometriche pregresse
- ✚ Allegato n. 5 – Stratigrafia delle trincee esplorative pregresse
- ✚ Allegato n. 6 – Relazione allegata all'indagine geofisica e Risposta Sismica Locale



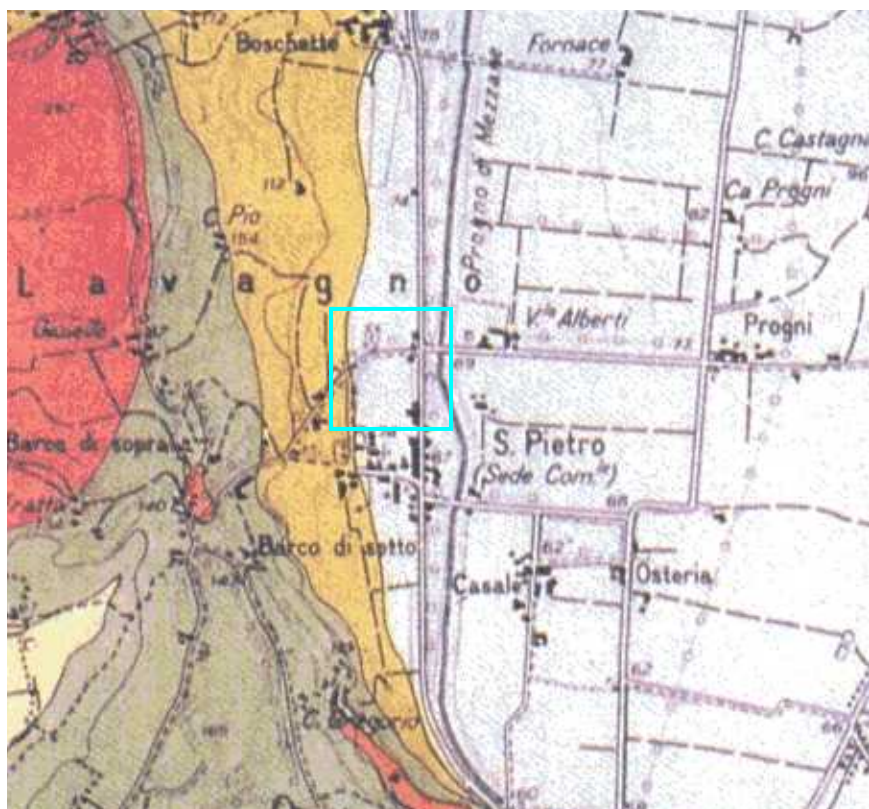
Dott. Geol. Davide Dal Degan  
Via Strà n. 116 - Caldiero (Verona)



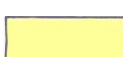
Area in esame


**CARTA GEOLOGICA GENERALE - Scala 1:20.000**


Estratta dalla Carta Geologica dei Lessini Centro Occidentali (Zampieri – Zorzin)  
Scala 1:40.000





 Alluvioni di fondovalle.  
ATTUALE - PLEISTOCENE

 Depositi colluviali delle vallette laterali e delle fasce pedecollinari.  
ATTUALE - PLEISTOCENE

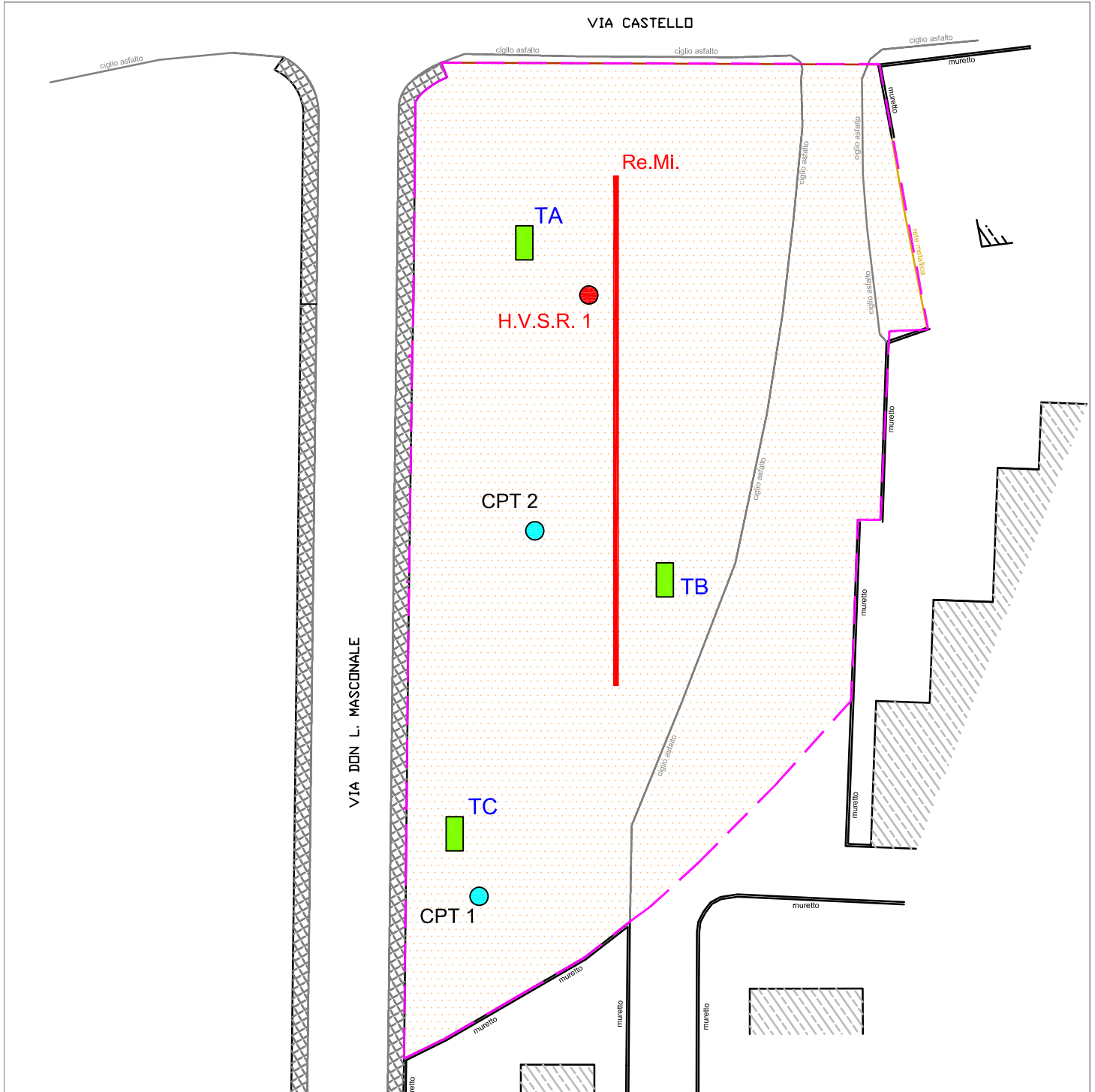
 Calcari Nummulitici, calcareniti ed alghe e molluschi, di colore bianco – giallastro, in genere ben stratificati. Calcari recifali a coralli  
EOCENE MEDIO – EOCENE INFERIORE

 SCAGLIA ROSSA. Calcari argillosi e marne di colore biancastro fogliettati; *hard ground* ad ossidi polimetallici, calcari debolmente argillosi a stratificazione centimetrica piano parallela, di colore rossastro o rosato, con rari noduli di selce.  
EOCENE INFERIORE – CRETACEO SUPERIORE






 Piroclastiti ed epiclastiti basaltiche a grana prevalentemente fine, fittamente stratificate, talora fossilifere.  
PALEOGENE

 Basalti compatti, molto spesso alterati, dei camini vulcanici e dei filoni.  
PALEOGENE

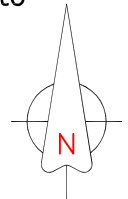
 Area in esame



**Legenda**

-  Area interessata dal nuovo P.U.A. in progetto
-  Trincea esplorativa con sigla identificativa T
-  Prova penetrometrica statica CPT con sigla identificativa
-  Stendimento di sismica passiva Re.Mi.
-  Registrazione di rumore sismico a stazione singola H.V.S.R.

**Orientamento**



**Scala**

**1 : 500**



# PROVA PENETROMETRICA STATICA (CPT)

*Penetrometro statico Deep Drill SP100 Special da 100kN - punta meccanica modello Begemann; diametro del cono di punta 35.7 mm; area della punta conica 10 cmq; angolo di apertura del cono 60°; area laterale del manicotto 150 cmq; velocità di avanzamento della punta 2 cm/s*

## ELENCO DEGLI ELABORATI

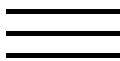
- Stima litologica
- Diagramma profondità / Rp; RI; F - Stratigrafia

## GRANDEZZE

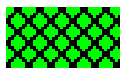
Rp	= Resistenza alla punta	kg/cmq
RI	= Resistenza unitaria di attrito laterale locale	kg/cmq
Rf	= Rapporto delle resistenze RI / Rp (Friction Ratio)	%
L	= Classificazione dei terreni (Schmertmann, 1978; Begemann - A.G.I.)	
F	= Indice granulometrico (rapporto Rp / RI)(Begemann 1965 - Raccomandazioni A.G.I.1977)	

T - Ao	= Torbe ed argille organiche (F<=15)
L - A	= Limi ed argille (15<F<=30)
Ls - Sl	= Limi sabbiosi e sabbie limose (30<F<=60)
S - SG	= Sabbie e sabbie con ghiaia (F>60)

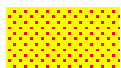
A0	= argille organiche e terreni misti
A1	= argille inorganiche - consistenza molto bassa
A2	= argille inorganiche - consistenza bassa
A3	= argille inorganiche - media
A4	= argille inorganiche - compatte
A5	= argille inorganiche - molto compatte
ASL	= argille sabbiose e limose
SAL	= sabbie argillose e limi
LS	= limi e sabbie
S0	= sabbia sciolta
S1	= sabbia mediamente addensata
S2	= sabbia addensata o cementata
SG	= sabbie fossilifere - sabbie e ghiaie



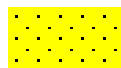
A



ASL



SAL

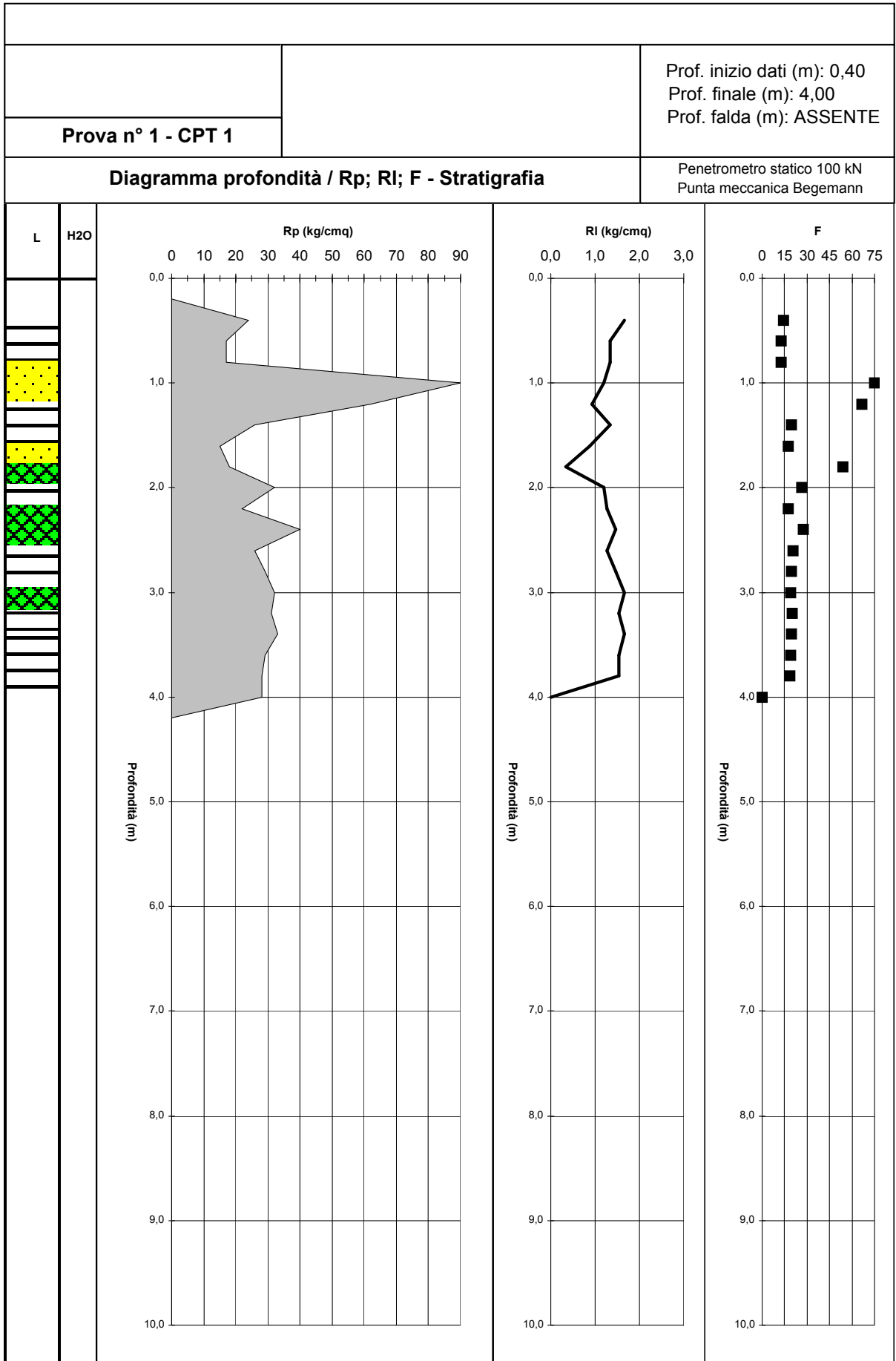


LS - S - SG

*Suddivisioni Litologia L Schmertmann riportata nei grafici*

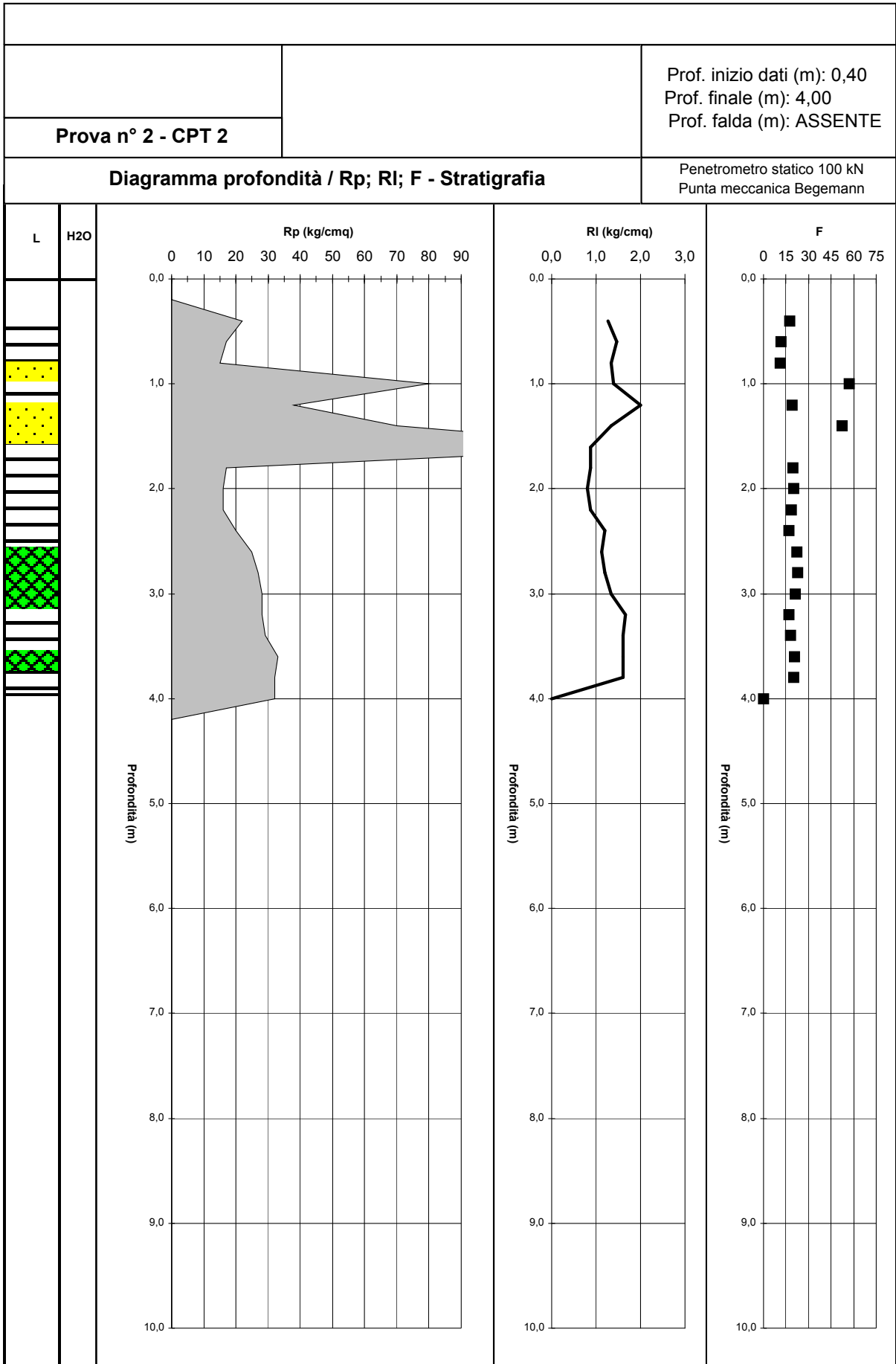
COMMITTENTE: IMMOBILIARE LUCIA S.N.C	LOC.: SAN PIETRO DI LAVAGNO (VR)	Prof. inizio dati (m) : 0,40
INDIRIZZO: P.U.A.VIA CASTELLO	DATA: 09 FEBBRAIO 2009	Prof. finale (m) : 4,00
<b>Prova n° 1 - CPT 1</b>	Penetrometro statico 100 kN	Prof. falda (m): ASSENTE
	Punta meccanica Begemann	
<b>STIMA LITOLOGICA</b>		

Prof. (m)	Rp (kg/cmq)	RI (kg/cmq)	Rf (%)	F	L		Prof. (m)	Rp (kg/cmq)	RI (kg/cmq)	Rf (%)	F	L	
					Schmertmann '78	A.G.I.77						Schmertmann '78	A.G.I.77
0,20							10,20						
0,40	24	1,667	6,9	14			10,40						
0,60	17	1,333	7,8	13	Ao	T - Ao	10,60						
0,80	17	1,333	7,8	13	Ao	T - Ao	10,80						
1,00	90	1,200	1,3	75	S1	S - SG	11,00						
1,20	62	0,933	1,5	66	S1	S - SG	11,20						
1,40	26	1,333	5,1	20	A5	L - A	11,40						
1,60	15	0,867	5,8	17	A4	L - A	11,60						
1,80	18	0,333	1,9	54	S0	LS - SL	11,80						
2,00	32	1,200	3,8	27	ASL	L - A	12,00						
2,20	22	1,267	5,8	17	A5	L - A	12,20						
2,40	40	1,467	3,7	27	ASL	L - A	12,40						
2,60	26	1,267	4,9	21	ASL	L - A	12,60						
2,80	29	1,467	5,1	20	A5	L - A	12,80						
3,00	32	1,667	5,2	19	A5	L - A	13,00						
3,20	31	1,533	4,9	20	ASL	L - A	13,20						
3,40	33	1,667	5,1	20	A5	L - A	13,40						
3,60	29	1,533	5,3	19	A5	L - A	13,60						
3,80	28	1,533	5,5	18	A5	L - A	13,80						
4,00	28	1,533	5,5	18	A5	L - A	14,00						
4,20							14,20						
4,40							14,40						
4,60							14,60						
4,80							14,80						
5,00							15,00						
5,20							15,20						
5,40							15,40						
5,60							15,60						
5,80							15,80						
6,00							16,00						
6,20							16,20						
6,40							16,40						
6,60							16,60						
6,80							16,80						
7,00							17,00						
7,20							17,20						
7,40							17,40						
7,60							17,60						
7,80							17,80						
8,00							18,00						
8,20							18,20						
8,40							18,40						
8,60							18,60						
8,80							18,80						
9,00							19,00						
9,20							19,20						
9,40							19,40						
9,60							19,60						
9,80							19,80						
10,00							20,00						



COMMITTENTE: IMMOBILIARE LUCIA S.N.C	LOC.: SAN PIETRO DI LAVAGNO (VR)	Prof. inizio dati (m) : 0,40
INDIRIZZO: P.U.A.VIA CASTELLO	DATA: 09 FEBBRAIO 2009	Prof. finale (m) : 4,00
<b>Prova n° 2 - CPT 2</b>	Penetrometro statico 100 kN	Prof. falda (m): ASSENTE
	Punta meccanica Begemann	
<b>STIMA LITOLOGICA</b>		

Prof. (m)	Rp (kg/cmq)	RI (kg/cmq)	Rf (%)	F	L		Prof. (m)	Rp (kg/cmq)	RI (kg/cmq)	Rf (%)	F	L	
					Schmertmann '78	A.G.I.77						Schmertmann '78	A.G.I.77
0,20							10,20						
0,40	22	1,267	5,8	17			10,40						
0,60	17	1,467	8,6	12	Ao	T - Ao	10,60						
0,80	15	1,333	8,9	11	Ao	T - Ao	10,80						
1,00	80	1,400	1,8	57	S1	LS - SL	11,00						
1,20	38	2,000	5,3	19	A5	L - A	11,20						
1,40	70	1,333	1,9	53	S1	LS - SL	11,40						
1,60	150	0,867	0,6	173	SG	S - SG	11,60						
1,80	17	0,867	5,1	20	A4	L - A	11,80						
2,00	16	0,800	5,0	20	A4	L - A	12,00						
2,20	16	0,867	5,4	18	A4	L - A	12,20						
2,40	20	1,200	6,0	17	A5	L - A	12,40						
2,60	25	1,133	4,5	22	A5	L - A	12,60						
2,80	27	1,200	4,4	23	ASL	L - A	12,80						
3,00	28	1,333	4,8	21	ASL	L - A	13,00						
3,20	28	1,667	6,0	17	ASL	L - A	13,20						
3,40	29	1,600	5,5	18	A5	L - A	13,40						
3,60	33	1,600	4,8	21	A5	L - A	13,60						
3,80	32	1,600	5,0	20	ASL	L - A	13,80						
4,00	33	1,600	4,8	21	A5	L - A	14,00						
4,20							14,20						
4,40							14,40						
4,60							14,60						
4,80							14,80						
5,00							15,00						
5,20							15,20						
5,40							15,40						
5,60							15,60						
5,80							15,80						
6,00							16,00						
6,20							16,20						
6,40							16,40						
6,60							16,60						
6,80							16,80						
7,00							17,00						
7,20							17,20						
7,40							17,40						
7,60							17,60						
7,80							17,80						
8,00							18,00						
8,20							18,20						
8,40							18,40						
8,60							18,60						
8,80							18,80						
9,00							19,00						
9,20							19,20						
9,40							19,40						
9,60							19,60						
9,80							19,80						
10,00							20,00						



<b>Committente: IMMOBILIARE LUCIA S.N.C.</b>	<b>Data:</b>	<b>Trincea esplorativa</b>	<b>A</b>
<b>Cantiere: P.U.A. VIA CASTELLO – S. PIETRO DI LAVAGNO</b>	<b>21/02/09</b>		

PROF. DAL P.C. (m)	DESCRIZIONE LITOLOGICA	PP	VT	L.S.
0,0 – 0,8	Terreno vegetale limoso argilloso e terreno rimaneggiato	-	-	-
0,8 – 1,2	Riporto di ghiaie e ciottoli con matrice argilloso sabbiosa	-	-	
1,2 – 1,5	Riporto di argille grigiastre con resti vegetali ed elementi calcarei inclusi	-	-	
1,5 – 4,5	Argille e argille limose con inclusi calcarei di piccole dimensioni (ghiaietto / sabbia grossa). Rari ciottoli calcarei. La percentuale di elementi calcarei inclusi aumenta con la profondità	200 - 250	120 – 140	

P.C. piano campagna attuale PP Prova Pocket Penetrometer (kPa) VT Prova con scissometro tascabile (kPa) L.S. Livello statico falda da p.c. (m)

#### NOTE

- Verticalità dello scavo mantenuta a breve termine
- Non si sono verificate venute d'acqua di alcun tipo

#### TRINCEA ESPLORATIVA



#### UBICAZIONE TRINCEA



#### CUMULO DI SCAVO



<b>Committente: IMMOBILIARE LUCIA S.N.C.</b>	<b>Data:</b>	<b>Trincea esplorativa</b>	<b>B</b>
<b>Cantiere: P.U.A. VIA CASTELLO – S. PIETRO DI LAVAGNO</b>	<b>21/02/09</b>		

PROF. DAL P.C. (m)	DESCRIZIONE LITOLOGICA	PP	VT	L.S.
0,0 – 0,4	Terreno vegetale limoso argilloso, terreno rimaneggiato e riporto di ghiaie e ciottoli	-	-	-
0,4 – 0,6	Riporto di argille grigiastre con resti vegetali ed elementi calcarei inclusi	-	-	
0,6 – 4,5	Argille e argille limose con pochi inclusi calcarei di piccole dimensioni (ghiaietto / sabbia grossa). Livello a maggior percentuale di elementi calcarei tra 0,8 m ed 1,5 m	200 - 250	120 – 140	

P.C. piano campagna attuale PP Prova Pocket Penetrometer (kPa) VT Prova con scissometro tascabile (kPa) L.S. Livello statico falda da p.c. (m)

**NOTE**

- Verticalità dello scavo mantenuta a breve termine
- Non si sono verificate venute d'acqua di alcun tipo

**TRINCEA ESPLORATIVA**



**UBICAZIONE TRINCEA**



**CUMULO DI SCAVO**



<b>Committente: IMMOBILIARE LUCIA S.N.C.</b>	<b>Data:</b>	<b>Trincea esplorativa</b>	<b>C</b>
<b>Cantiere: P.U.A. VIA CASTELLO – S. PIETRO DI LAVAGNO</b>	<b>21/02/09</b>		

PROF. DAL P.C. (m)	DESCRIZIONE LITOLOGICA	PP	VT	L.S.
0,0 – 0,3	Terreno vegetale limoso argilloso	-	-	-
0,3 – 1,9	Argille e argille limose con pochi inclusi calcarei di piccole dimensioni (ghiaietto / sabbia grossa) e rari ciottoli calcarei. Livello a maggior percentuale di elementi calcarei tra 0,8 m ed 1,5 m, come in TB	-	-	
1,9 – 3,6	Argille e argille limose con sporadici inclusi calcarei di piccole dimensioni (ghiaietto / sabbia grossa)	300	140 – 160	
3,6 – 4,8	Limi argillosi e, verso fondo scavo (da circa 4,6 m), limi sabbiosi	200 - 250 (fino a 4,6 m)	120 – 140 (fino a 4,6 m)	

P.C. piano campagna attuale PP Prova Pocket Penetrometer (kPa) VT Prova con scissometro tascabile (kPa) L.S. Livello statico falda da p.c. (m)

#### NOTE

- Verticalità dello scavo mantenuta a breve termine
- Non si sono verificate venute d'acqua di alcun tipo

#### TRINCEA ESPLORATIVA



#### UBICAZIONE TRINCEA



#### CUMULI DI SCAVO



da 0,3 m a 3,6 m



da 3,6 m a 4,8 m



REGIONE VENETO

Provincia di Verona

**Studio della Risposta Sismica Locale RSL  
tramite modellazione numerica avanzata in modalità dinamica  
(N.T.C. - D.M. 17 gennaio 2018)**

Via Castello  
Comune di Lavagno (VR)

Committente:  
**Dott. Geol. Davide Dal Degan**

Data: agosto 2023





**STUDIOSISMA SRL**  
SS. PASUBIO 10, COSTABISSARA (VI)  
TEL. 0442/2962/3490567455  
info@studiosisma.com  
CF/P/VA 03797510249 SDI USAL8PW

---

**INDICE**

<b>1.</b>	<b>PREMESSE</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>CENNI TEORICI E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Indagine sismica di tipo passivo in array (Re.Mi.)</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Indagine sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>CENNI TEORICI DI ANALISI DINIMACA AVANZATA (FLAC 2D – ITASCA, 2018)</b>	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>EVOLUZIONE NORMATIVA E CENNI DI INGEGNERIA SISMICA</b>	<b>14</b>
<b>5.</b>	<b>ANALISI SISMICA DI SITO E DEFINIZIONE CATEGORIA DI SOTTOSUOLO</b>	<b>15</b>
<b>5.1</b>	<b>Risultati ottenuti dalle indagini sismiche effettuate</b>	<b>15</b>
<b>5.2</b>	<b>Categoria di Sottosuolo secondo le NTC – D.M. 17 gennaio 2018</b>	<b>18</b>
<b>6.</b>	<b>MODELLIZZAZIONE NUMERICA AVANZATA</b>	<b>19</b>

**ALLEGATI**

-  SLV - Spettro di risposta elastico medio da modellazione numerica con Tr 475 anni e smorzamento 5% (SLV)
-  SLV - Spettro normalizzato

**BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE**

---

<b>Responsabile di Progetto</b>	<b>Autori</b>	<b>Collaboratori</b>
M. Collareda	L. Guerra	

---

## 1. PREMESSE

Su incarico del **Dott. Geol. Davide Dal Degan**, è stata condotta la presente campagna d'indagine geofisica, nel Comune di Lavagno (VR), presso Via Castello.

Al fine di caratterizzare, dal punto di vista sismico, il sottosuolo dell'area in esame e ricostruire l'assetto sismostratigrafico del territorio, il 7 agosto 2023 sono state eseguite:

- **n° 1 prospezione sismica con tecnica passiva Re.Mi. (Refraction Microtremor)**, sviluppata in un *array* lineare con n° 16 geofoni a 4,5 Hz ad asse verticale per la ricostruzione sismostratigrafica dei terreni e assegnazione della categoria di sottosuolo di fondazione tramite la stima della velocità di propagazione delle onde S (metodo semplificato - NTC18);
- **n° 1 registrazione di rumore sismico ambientale a stazione singola con elaborazione H.V.S.R. (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)** per individuare le frequenze di risonanza del terreno e per ricostruire puntualmente l'assetto sismostratigrafico locale fino all'ultimo riflettore in grado di generare amplificazione.

Successivamente, la risposta sismica dei terreni oggetto d'indagine è stata indagata mediante un approccio al continuo in condizioni di bidimensionalità.

La tecnica di risoluzione numerica adoperata è quella alle differenze finite (FDM) implementata nel codice di calcolo **FLAC 8.0 (ITASCA, 2018)**, operante nel dominio del tempo. Il codice effettua un'analisi lagrangiana del continuo risolto mediante uno schema di avanzamento temporale di tipo esplicito.

Nella figura a seguire viene evidenziata l'area in oggetto di studio (*Fig. n° 1 - Estratto da Ortofoto*).



*Fig. n° 1 - Estratto da Google Earth con ubicazione dell'area in esame*

Si riportano sotto le coordinate in gradi decimali secondo lo standard WGS - 84 della prova H.V.S.R. e, nella figura seguente (*Fig. n° 2 - Ubicazione prove in situ*) è invece indicata, in dettaglio, la posizione della misura effettuata.

Latitudine	Longitudine
45.443303° N (WGS - 84)	11.131497° E (WGS - 84)



Fig. n° 2 - Ubicazione prove in sito e, sotto, viste del punto della prova H.V.S.R. (sinistra) e Re.Mi. (destra)



## 2. CENNI TEORICI E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

### 2.1 Indagine sismica di tipo passivo in array (Re.Mi.)

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più un'unica velocità ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda. Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità.

Questo comportamento viene definito *dispersione in frequenza* ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie. Ovviamente le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario, le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie. I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico - matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati con caratteristiche elastiche lineari.

La procedura Re.Mi. è un metodo di prospezione sismica sviluppato presso l'Università di Reno in Nevada (Louie, 2001) e viene classificato come metodo passivo in quanto utilizza il rumore ambientale. I vantaggi promossi da questo metodo sono molteplici: è molto veloce e semplice da usare in fase di acquisizione, raggiunge una buona profondità e risoluzione d'indagine ma soprattutto permette di ottenere migliori risultati in ambienti particolarmente urbanizzati. La fase di acquisizione deve essere effettuata con una serie di accorgimenti e precauzioni da prendere in sito e nella pianificazione della registrazione. Tutto è finalizzato alla registrazione di dati contenenti la miglior informazione possibile riguardo alla propagazione delle onde di Rayleigh con buon rapporto segnale - rumore.

Il rumore incoerente, cioè di tipo casuale, nel caso Re.Mi. rappresenta la fonte del segnale utile che si vuole registrare. I microtremori generati dall'ambiente si propagano nel suolo e di questi si cerca di distinguere il modo fondamentale di vibrazione dell'onda di Rayleigh da quelli superiori e dall'aliasing spaziale. C'è, in questo caso, la necessità di soddisfare la condizione di "omnidirezionalità" delle sorgenti, cioè si suppone che il rumore ambientale provenga sostanzialmente da tutte le direzioni.

I tempi di registrazione dei microtremori sono decisamente più elevati rispetto alle indagini di tipo attivo. La registrazione sarà analizzata in finestre temporali che variano dai 10 ai 30 secondi.

Sono da considerare la lunghezza dello stendimento  $L$  e la distanza intergeofonica  $\Delta x$ . Quest'ultima agisce sul segnale come una specie di filtro in frequenza. Supponendo, infatti, che il segnale arrivi da tutte le direzioni, maggiore è la spaziatura, minore sarà la frequenza del segnale utile campionabile e viceversa. Se la frequenza è più bassa aumenta la profondità d'indagine.

La fase più delicata è quella del *data processing*, che consiste nel trattamento dei dati acquisiti con l'obiettivo di stimare la velocità di fase delle onde di Rayleigh ( $V_r$ ) che sono correlabili con le velocità  $V_s$  di propagazione delle onde S ( $V_s \approx 1,1 V_r$ ).

Le varie tecniche di processing trasformano l'informazione registrata nel dominio  $x - t$  (spazio tempo), in un dominio dove l'energia associata all'evento è funzione della frequenza e di altre variabili. Tutto questo allo scopo, attraverso lo spettro, di localizzare la densità di energia maggiore, alla quale sono di solito associate le onde di Rayleigh. Con procedura manuale vengono selezionati dei punti sullo spettro, che andranno a formare la curva di dispersione sperimentale. La scelta di questi valori, denominata *picking*, è condizionata da alcune indicazioni ma è imprescindibile dall'abilità e dall'esperienza dell'interprete anche in base ad altre conoscenze in merito al sito in esame.

Il *sampling rate* utilizzato è stato di 512 Hz in modo da ottenere un elevato dettaglio del segnale. La durata (lunghezza temporale) del segnale registrato è stato di circa 6 minuti. Il software utilizzato per l'analisi spettrale è [Grilla v.9.7 beta release 2021](#).

Data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 10 Hz), sono stati utilizzati n° 16 geofoni verticali a 4,5 Hz uniti in un *array* lineare totalmente digitale (*SoilSpy Rosina*). Ogni geofono è munito di un digitalizzatore che converte il segnale e lo trasmette al sismografo tramite un'interfaccia USB.

Tale sistema permette di avere elevati rapporti di rumore, un perfetto sincronismo e una estrema leggerezza. La spaziatura utilizzata tra i geofoni è stata di 3 m quindi la lunghezza complessiva del profilo è risultata essere di 45 m.



Non sono presenti sostanziali variazioni di quota e quindi il sito può essere considerato orizzontale.

Per una corretta ricostruzione sismica del sottosuolo e una buona stima delle onde Vs è necessario adottare una modellizzazione numerica che può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$\hat{v}_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad [2.1]$$

Vs = valore di velocità delle onde di taglio [m/s];

H = profondità alla quale si desidera stimare Vs [m] (30 m in caso di Vs30);

hi = spessore dello strato i - esimo [m];

vi = velocità delle onde Vs all'interno dello strato i - esimo [m/s].

In via puramente indicativa, al fine di correlare le velocità delle onde di taglio ad un tipo di suolo, si riportano i valori tabulati da Borchardt (1992; 1994) assieme a quelli ottenuti sperimentalmente in diversi ambienti sedimentari da altri autori (Budny, 1984; Ibs von Seht e Wohlenberg, 1999; Delgado et al., 2000 a, b; Parolai et al., 2002; Scherbaum et al., 2003; D'Amico et al., 2004, 2006; Hinzen et al., 2004).

TIPO DI SUOLO	Vs min [m/s]	Vs media [m/s]	Vs max [m/s]
<b>ROCCE MOLTO DURE</b> (es. rocce metamorfiche molto - poco fratturate)	1400	1620	-
<b>ROCCE DURE</b> (es. graniti, rocce ignee, conglomerati, arenarie e argilliti, da mediamente a poco fratturate)	700	1050	1400
<b>SUOLI GHIAIOSI e ROCCE DA TENERE A DURE</b> (es. rocce sedimentarie ignee tenere, arenarie, argilliti, ghiaie e suoli con > 20% di ghiaia)	375	540	700
<b>ARGILLE COMPATTE e SUOLI SABBIOSI - GHIAIOSI</b> (es. ghiaie e suoli con < 20% di ghiaia, sabbie da sciolte a molto compatte, limi e argille sabbiose, argille da medie a compatte e argille limose)	200	290	375
<b>TERRENI TENERI</b> (es. terreni di riempimento sotto falda, argille da tenere a molto tenere)	100	150	200

## 2.2 Indagine sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)

La tecnica sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali o H.V.S.R., Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non richiede nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Si dovranno adottare adeguate precauzioni nel costruire edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito (free field) e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la velocità media delle onde di taglio  $V_s$  calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. Sarà quindi possibile calcolare la  $V_{s,eq}$  e la relativa categoria di sottosuolo come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 17 gennaio 2018;
- la stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0,5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostante per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Le basi teoriche della tecnica H.V.S.R. si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremiti. La forma di un'onda registrata in un sito  $x$  da uno strumento dipende:

- dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente  $s$ ;
- dal percorso dell'onda dalla sorgente  $s$  al sito  $x$  (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
- dalla risposta dello strumento.

Possiamo scrivere questo come:

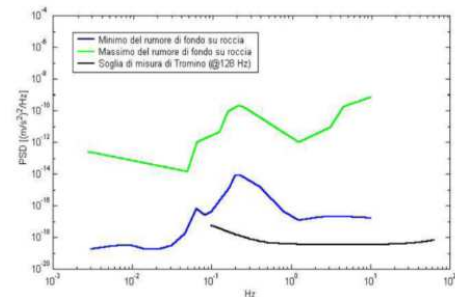
$$\text{segnale registrazione al sito } x = \text{sorgente} * \text{effetti di percorso} * \text{funzione trasferimento strumento}$$

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi poiché il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nel tragitto dalla sorgente  $s$  al sito  $x$  le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato.

Questo significa che se da un lato l'informazione riguardante la sorgente è persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni concernenti il percorso del segnale e, in particolare, relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni.

Questa informazione è però "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune. Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, H.V.S.R. che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali del sottosuolo; informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale della ditta Moho S.r.l. modello "Tromino - ENGY PLUS" che rappresenta la nuova generazione di strumenti ultra - leggeri e ultra - compatti in alta risoluzione adatti a tali misurazioni. Lo strumento racchiude al suo interno tre terne velocimetriche con i sensori ortogonali tra loro e con intervallo di frequenza compreso tra 0.1 e 256 Hz. Nella figura a fianco si riporta la curva di rumore di "Tromino" a confronto con i modelli standard di rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra.



Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.

### 3. CENNI TEORICI DI ANALISI DINIMACA AVANZATA (FLAC 2D - ITASCA, 2018)

Il codice di calcolo FLAC 2D v.8.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua) della Itasca (2018) è basato sul metodo delle differenze finite con un procedimento di tipo esplicito. La flessibilità nella modellazione della geometria del problema, la disponibilità di elementi strutturali, l'elevato numero di modelli costitutivi implementati e la possibilità di svilupparne nuovi, rendono FLAC idoneo allo studio di praticamente tutti i problemi riguardanti il comportamento meccanico di mezzi continui (terreni, rocce, ecc.) e di strutture interagenti.

Sviluppato inizialmente per le applicazioni di ingegneria geotecnica e ingegneria mineraria in campo statico ha trovato successivamente, con l'introduzione del modulo dinamico, largo impiego anche per la soluzione di problemi di risposta sismica locale. Il codice di calcolo FLAC, anche per i problemi in campo statico, risolve le equazioni di equilibrio dinamico di un mezzo continuo:

$$\rho \cdot \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} = \sum_j \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \rho g_i \tag{3.10}$$

dove:

- ρ è la densità
- xi la componente i-esima del vettore posizione
- ũi la componente i-esima del vettore velocità
- gi la componente dell'accelerazione di gravità (forze di volume) lungo la direzione i
- τji la generica componente del tensore degli sforzi.

Il comportamento meccanico dei materiali è espresso dalla legge costitutiva:

$$\tau_{ji} = M(\tau_{ji}; \dot{\epsilon}_{ij}; k) \tag{3.11}$$

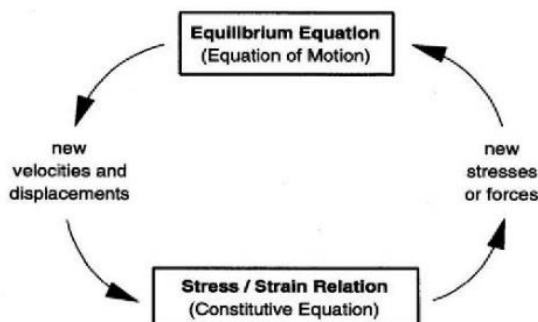
dove  $k$  è un parametro che tiene conto della storia di carico,  $M$  un funzionale e  $\dot{\epsilon}_{ij}$  il tensore velocità di deformazione espresso dalla:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \tag{3.12}$$

I materiali vengono rappresentati da elementi quadrilateri, o zone, che formano una griglia (mesh) che può essere configurata dall'utente in modo da modellare contatti stratigrafici e morfologie superficiali anche complesse e irregolari. A ciascuna zona si assegnano le proprietà fisiche e meccaniche che ne caratterizzano il comportamento nell'analisi. I vertici di ogni zona costituiscono i nodi della griglia.

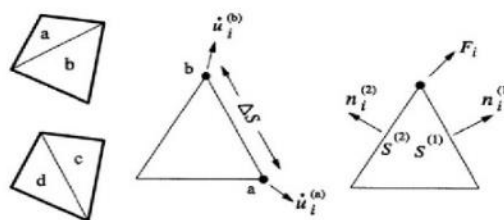
I metodi alle differenze finite come quelli agli elementi finiti traducono un sistema di equazioni differenziali come le (3.10) in un sistema di equazioni algebriche. Se i metodi agli elementi finiti hanno come punto centrale la definizione delle funzioni di forma che descrivono la variazione delle grandezze che interessano il problema (tensioni, deformazioni) attraverso ciascun elemento, nei metodi alle differenze finite si prescinde da questa definizione della funzioni di forma, e le equazioni algebriche vengono scritte direttamente in termini di variabili di campo (tensioni, spostamenti) definite nei nodi della mesh.

In sintesi, l'algoritmo risolutivo dell'approccio esplicito si articola secondo il ciclo indicato nella seguente figura.



Ad ogni nuovo passo di calcolo (step), vengono risolte le equazioni di equilibrio dinamico, per cui dalle tensioni e dalle forze si ottengono i valori corrispondenti delle velocità di deformazione e degli spostamenti; successivamente dalle velocità di deformazione, attraverso le equazioni dei legami costitutivi, si giunge a valori aggiornati delle tensioni.

L'ipotesi base dell'approccio esplicito consiste nel fatto che, durante ciascuna fase, le grandezze vengono ricavate da altre grandezze i cui valori sono assunti costanti durante l'operazione. Ad esempio, i valori delle velocità di deformazione sono considerati fissi durante l'operazione di calcolo delle tensioni mediante le leggi costitutive; in altre parole, i nuovi valori calcolati delle tensioni non influenzano le velocità. Questo può apparire poco accettabile dal punto di vista fisico poiché se c'è una variazione di tensione in un punto, questa necessariamente influenza i punti vicini alterandone le velocità di deformazione. Tuttavia se l'intervallo di tempo  $\Delta t$  (timestep) corrispondente al singolo ciclo di calcolo è sufficientemente piccolo, tale alterazione non può propagarsi da un elemento all'altro in tale intervallo.



Tale approccio si è dimostrato particolarmente efficiente nella modellazione di problemi non lineari in presenza di grandi deformazioni. Per contro, essendo il  $\Delta t$  richiesto generalmente molto piccolo, sono necessari un gran numero di passi di integrazione cui corrispondono tempi di calcolo molto elevati.

Gli elementi quadrangolari della griglia vengono automaticamente suddivisi dal programma in due set sovrapposti di triangoli a deformazioni costanti. Le equazioni alle differenze finite per ogni triangolo si ottengono dalla forma generalizzata del teorema della divergenza di Gauss:

$$\int_S \mathbf{f} \cdot \hat{\mathbf{n}} \cdot d\mathbf{s} = \int_A \text{div } \mathbf{f} \cdot dA \quad (3.13)$$

in cui:

$\mathbf{n}$  è il versore normale al contorno  $S$  del dominio triangolare

$f$  la funzione generica (scalare, vettore o tensore)

$A$  la superficie del dominio triangolare di contorno  $S$

$ds$  la lunghezza incrementale lungo il contorno  $S$ .

Sostituendo ad  $f$  un valore medio del vettore velocità la relazione precedente consente di scrivere:

$$\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_i} \cong \frac{1}{2A} \sum_s \left( \dot{u}_i^{(a)} + \dot{u}_i^{(b)} \right) n_i \Delta s \quad (3.14)$$

dove (a) e (b) sono due nodi consecutivi sul generico lato del triangolo. Attraverso la (3.12) e la (3.14) è quindi possibile calcolare tutte le componenti del tensore velocità di deformazione. La legge costitutiva è poi utilizzata per calcolare un nuovo valore del tensore delle tensioni. Calcolate le tensioni vengono calcolate le forze equivalenti applicate ai nodi. Le tensioni agiscono in ciascun triangolo come trazioni sui lati del triangolo stesso; ogni trazione è considerata equivalente a due forze agenti sui due nodi all'estremità del lato. Su ogni nodo del triangolo quindi agiscono due forze relative ai due lati convergenti nel nodo stesso:

$$\mathbf{F}_i = \frac{1}{2} \tau_{ij} \left( n_i^{(1)} S^{(1)} + n_i^{(2)} S^{(2)} \right) \quad (3.15)$$

Infine per ciascun nodo vengono sommate tutte le forze dovute ai triangoli convergenti nel nodo, le forze dovute a eventuali carichi esterni applicati e le forze di volume dovute alla gravità. In tal modo viene determinata la forza nodale netta  $\Sigma F_i$ ; se  $\Sigma F_i = 0$  il nodo è in equilibrio altrimenti subirà un'accelerazione espressa dalla seconda legge di Newton, nient'altro che la (3.10) espressa in termini incrementali:

$$\dot{u}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \left[ \sum F_i^{(t)} \right] \frac{\Delta t}{m} \quad (3.16)$$

dove l'apice indica il tempo in corrispondenza del quale è valutata la variabile e  $m$  è la massa associata a ciascun nodo pari alla somma di un terzo delle masse dei triangoli convergenti nel nodo.

Dalla relazione precedente si determinano nuovi valori della velocità e quindi del tensore velocità di deformazione per un nuovo ciclo.

Come detto, condizione essenziale dell’algoritmo descritto, è che il time step  $\Delta t$  corrispondente al singolo ciclo di calcolo sia sufficientemente piccolo da rendere accettabile l’approssimazione di tensioni e velocità costanti sul singolo step di calcolo. In particolare  $\Delta t$  deve essere inferiore ad un time step critico  $\Delta t_{crit}$  definito dalla:

$$\Delta t_{cr} = \min \left\{ \frac{A}{V_p \Delta x_{max}} \right\} \tag{3.17}$$

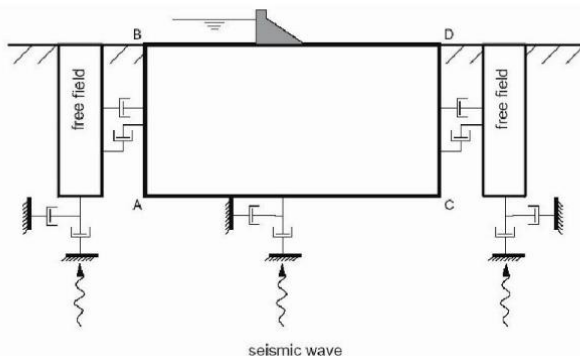
dove A è la superficie del sub - elemento triangolare,  $\Delta x_{max}$  la dimensione massima della zona (in genere la diagonale) e  $V_p$  la velocità delle onde di compressione. La funzione minimo è presa su tutte le zone. Il timestep critico è tanto più piccolo (e i tempi di calcolo quindi tanto più elevati) quanto più la rigidità del materiale è elevata e quanto più piccolo è l’elemento. Il  $\Delta t$  di calcolo viene determinato internamente da FLAC applicando un coefficiente di sicurezza due al valore fornito dalla (3.17).

Particolare attenzione va posta nella scelta delle dimensioni degli elementi della mesh in quanto queste condizionano in maniera fondamentale l’accuratezza numerica della trasmissione delle onde. In particolare, per un’accurata modellazione viene consigliato di scegliere una altezza degli elementi h almeno pari ad un valore compreso tra un decimo ed un ottavo della minima lunghezza d’onda di interesse  $\lambda_{min}$ :

$$h \leq \frac{\lambda_{min}}{10} \tag{3.18}$$

La  $\lambda_{min}$  è la lunghezza d’onda che corrisponde alla massima frequenza di interesse ed è legata ad essa dalla velocità di propagazione delle onde di taglio. I metodi alle differenze finite, così come quelli agli elementi finiti, si basano sulla discretizzazione, tramite una mesh di nodi, di una porzione finita dello spazio per cui appropriate condizioni al contorno vanno imposte ai confini artificiali di tale regione. In ogni problema di propagazione di onde sismiche, parte dell’energia si allontana indefinitamente dalla regione di interesse verso il semispazio circostante per fenomeni di diffrazione e riflessione dando luogo ad una “perdita” di energia indicata come smorzamento di radiazione. Al fine di modellare correttamente questo fenomeno, FLAC consente di minimizzare la riflessione delle onde sui contorni della mesh imponendo su questi condizioni di campo libero (free field boundaries) o viscosi (quiet boundaries). La definizione delle condizioni al contorno è strettamente correlata all’applicazione della sollecitazione dinamica, come discusso in seguito.

I contorni free - field consistono sostanzialmente in colonne monodimensionali di larghezza unitaria, situate ai lati del modello, che simulano il comportamento di un mezzo infinitamente esteso (figura seguente).



In pratica, essi riproducono il moto libero del terreno che si avrebbe in assenza della configurazione bidimensionale ed allo stesso tempo impediscono la riflessione ai bordi della mesh delle onde diffratte verso l’esterno.

Come illustrato, i singoli nodi dei contorni laterali della griglia principale vengono accoppiati alla griglia free - field attraverso smorzatori viscosi che materialmente assorbono l'energia delle onde incidenti sui contorni, applicando delle forze viscosi proporzionali alla differenza tra il campo di velocità esistente al bordo e quello in condizioni free - field. Prima dell'applicazione delle condizioni free - field durante l'analisi dinamica il modello deve essere in condizioni di equilibrio statico, per cui è necessario eseguire una analisi statica preliminare per determinare lo stato tensionale e deformativo all'interno del modello. All'atto dell'applicazione delle condizioni free - field quindi tutte le variabili di stato determinate dall'equilibrio statico vengono applicate alle colonne monodimensionali ai bordi del modello.

I contorni free - field sono di notevole utilità in quanto consentono di evitare l'allontanamento dei confini laterali altrimenti necessario, in assenza di confini assorbenti, per la minimizzazione delle onde riflesse dai contorni.

I contorni quiet sono invece costituiti, secondo la formulazione di Lysmer e Kuhlemeyer (1969), da smorzatori viscosi attaccati alla griglia ed agenti in direzione normale e tangenziale al contorno stesso; essi consentono un pressoché completo assorbimento delle onde di volume che incidono sul contorno. I contorni quiet possono essere applicati su contorni verticali, orizzontali o inclinati. Essi vanno applicati al confine inferiore della mesh per simulare la base elastica mentre ai bordi del modello, come detto, è preferibile l'utilizzo dei contorni free - field.

Le sollecitazioni dinamiche possono essere applicate sia ai bordi della mesh sia ai suoi nodi interni in una delle seguenti forme:

- ✓ storia temporale di accelerazioni
- ✓ storia temporale di velocità
- ✓ storia temporale di tensioni
- ✓ storia temporale di forze.

Nell'applicare la sollecitazione dinamica, bisogna però tenere conto di alcune limitazioni che derivano da particolari incompatibilità tra forme di applicazione dell'input e delle condizioni al contorno. Se, ad esempio, queste sono rappresentate da quiet boundaries (come avviene solitamente per il bordo inferiore della mesh) il loro effetto viene annullato se si applica un accelerogramma o una storia di velocità. In questo caso quindi la base è modellata come rigida cioè perfettamente riflettente dando luogo a irrealistiche sovrastime del moto sismico. Per simulare correttamente una base elastica occorre applicare ai quiet boundaries alla base della mesh una storia temporale di tensioni. A tal fine, un accelerogramma di input deve essere integrato per ottenere una storia temporale di velocità e questa viene infine convertita in tensioni tramite le seguenti relazioni:

$$\sigma_n = 2(\rho V_p) v_n \quad \sigma_s = 2(\rho V_s) v_s \quad (3.19)$$

dove:

$\rho$  è la densità

$\sigma_n$ ,  $\sigma_s$  rispettivamente tensione applicata in direzione normale e tangenziale al contorno

$V_p$ ,  $V_s$  rispettivamente velocità delle onde di compressione e di taglio del materiale che viene simulato al di sotto del contorno inferiore (costituente la base elastica)

$v_n$ ,  $v_s$  rispettivamente la velocità di input normale e tangente al contorno.

In definitiva quindi un input costituito da onde SV sarà applicato come una storia temporale di tensioni tangenziali mentre le onde P tramite una storia temporale di tensioni normali al contorno. Entrambe le sollecitazioni sono applicate con incidenza verticale.

La non linearità e le proprietà dissipative dei terreni possono essere modellate in FLAC secondo differenti modalità: attraverso l'adozione di un legame costitutivo propriamente non lineare o tramite semplici modelli di smorzamento isteretico. Le proprietà dissipative possono altresì essere modellate attraverso la formulazione di Rayleigh.

L'adozione di una legge sforzi - deformazione non lineare rappresenta, teoricamente, il modo più efficace per tenere conto della degradazione di rigidità al procedere della deformazione e della dissipazione di energia per isteresi. Questi modelli possono essere accoppiati con modelli di filtrazione per simulare la generazione e dissipazione di eccessi di pressioni neutre e/o fenomeni di liquefazione e consentono inoltre la valutazione delle deformazioni permanenti. Dal punto di vista pratico però spesso i modelli non lineari sono complessi e richiedono la definizione di molti parametri e lunghi processi di calibrazione.

La complessità dei modelli non lineari e la comodità di un utilizzo diretto delle curve  $G/G_0 - \gamma$  e  $D - \gamma$  generalmente fornite dalle prove di laboratorio e dalle correlazioni empiriche ha portato all'introduzione di semplici modelli di smorzamento isteretico (hysteretic damping) nella recente versione 5.0 del codice. Durante ciascun step di calcolo, in funzione del valore medio del tensore di velocità di deformazione, viene restituito un fattore moltiplicativo da usarsi nel legame costitutivo in modo da correggere il valore del modulo tangente di taglio associato a ciascun elemento.

Il modello isteretico implementato utilizza solo curve continue che esprimono la variazione del modulo di taglio con la deformazione tangenziale, quindi i parametri da fornire in input, che definiscono la forma di tali curve, vanno ricavati attraverso regressione dei dati sperimentali. Analisi di calibrazione dello smorzamento isteretico sono necessarie prima di un suo uso nella pratica corrente.

Nel caso di analisi lineari, o per modellare comunque lo smorzamento a basse deformazioni che spesso i legami costitutivi non lineari non riescono a cogliere, si può utilizzare la formulazione di Rayleigh. Essa conduce ad uno smorzamento dipendente dalla frequenza in contrasto con le evidenze sperimentali sul comportamento dei terreni. Il suo impiego richiede pertanto una oculata scelta dei parametri che lo definiscono per limitare la variazione dello smorzamento con la frequenza (Lanzo et al., 2003 e 2004).

Lo smorzamento di Rayleigh è stato originariamente formulato per le analisi strutturali ed è espresso in forma matriciale attraverso la definizione di una matrice di smorzamento  $C$  proporzionale alla matrice di massa  $M$  e a quella di rigidità  $K$ :

$$C = \alpha_R M + \beta_R K \quad (3.20)$$

dove  $\alpha_R$  e  $\beta_R$  sono i coefficienti di Rayleigh che hanno dimensione rispettivamente di  $s^{-1}$  e  $s$ . E' possibile dimostrare (Chopra, 1995) che lo smorzamento  $\xi_j$  associato al  $j$ -esimo modo di vibrazione del deposito è espresso dalla:

$$\xi_j = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_R}{\omega_j} + \beta_R \omega_j \right) \quad (3.21)$$

dove  $\omega_j$  è la frequenza circolare relativa al modo  $j$ .

I coefficienti di Rayleigh vengono comunemente determinati attraverso due procedure, a seconda che si fissi il valore dello smorzamento modale in corrispondenza di una o due frequenze naturali opportunamente selezionate (dette frequenze di controllo).

Il codice FLAC adotta la prima procedura in accordo alla quale i coefficienti di Rayleigh sono espressi dalle:

$$\alpha_R = \xi^* \omega^* \quad , \quad \beta_R = \frac{\xi^*}{\omega^*} \tag{3.22}$$

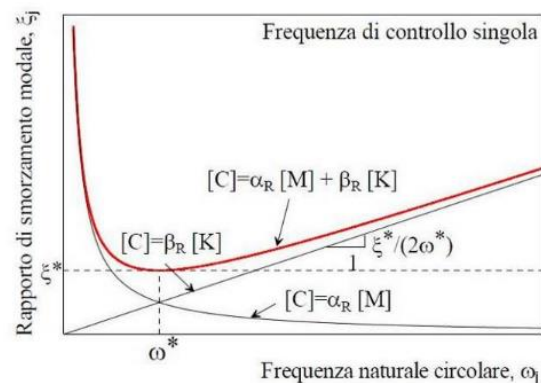
avendo fissato lo smorzamento modale al valore  $\xi$  in corrispondenza della singola frequenza  $\omega$ .

Per ciascun elemento della mesh occorre specificare il rapporto di smorzamento  $\xi^*$  del materiale e la frequenza  $\omega^*$ . A titolo di esempio, nel caso di smorzamento  $\xi^*$  e frequenza  $\omega^*$  costante per tutto il deposito, è possibile dimostrare che un'analisi lineare eseguita con FLAC fornisce gli stessi risultati di un'analisi modale con rapporto di smorzamento modale dell'intero sistema variabile con la frequenza circolare naturale  $\omega_j$  secondo la:

$$\xi_j = \frac{\xi^*}{2} \left( \frac{\omega^*}{\omega_j} + \frac{\omega_j}{\omega^*} \right) \tag{3.23}$$

riportata nella figura seguente, nella quale si nota come  $\xi_j$  assuma un minimo (pari al valore imposto  $\xi^*$ ) in corrispondenza della frequenza di controllo  $\omega^*$  mentre sia sovrastimato nel campo dei valori maggiori e minori di  $\omega^*$ .

La formulazione di Rayleigh viene applicata a livello del singolo elemento della mesh per cui, tra i dati di input, occorre specificare per ciascun elemento il valore del rapporto di smorzamento del materiale che lo costituisce  $\xi^*$  e la frequenza di controllo  $\omega^*$  (o meglio il valore  $f^*$ ). La scelta di  $f^*$  è cruciale per fissare il campo di frequenza in corrispondenza del quale lo smorzamento mostra variazioni contenute rispetto a  $\hat{\xi}^*$ . In generale,  $f^*$  deve essere scelta nel campo di frequenza significativo per il problema in esame sia in termini di frequenze naturali del sistema che di frequenze predominanti dell'input. In prima approssimazione si può collocare  $f^*$  tra la frequenza fondamentale del sistema e la frequenza predominante dell'input (frequenza corrispondente al massimo dello spettro di Fourier o di risposta). Se questi valori sono distanti è comunque opportuno esaminare con analisi parametriche l'influenza sui risultati delle diverse scelte di  $f^*$ .



In definitiva occorre quindi fornire in input, per ciascun materiale, i seguenti parametri:

- peso dell'unità di volume;
- nel caso di analisi lineari modulo di taglio (G0) e di elasticità volumetrico (k) o, in alternativa, modulo di Young (E) e coefficiente di Poisson (ν);
- nel caso di analisi non lineari occorre fornire i parametri caratteristici del modello adottato;
- rapporto di smorzamento ( $\xi^*$ ) e frequenza di controllo ( $f^*$ ) se si adotta la formulazione di Rayleigh.

In uscita il codice offre notevoli potenzialità potendo restituire la storia temporale di tutte le grandezze di interesse: spostamenti, velocità, accelerazioni, deformazioni e tensioni. L'interfaccia grafica consente inoltre di costruire ed esportare grafici delle sopra citate grandezze in funzione della profondità o lungo un generico profilo.

#### 4. EVOLUZIONE NORMATIVA E CENNI DI INGEGNERIA SISMICA

La storia della classificazione sismica Italiana comincia dopo il terribile terremoto di Reggio Calabria e Messina del 1908 (XI grado MCS) che provocò la morte di circa 80.000 persone. In seguito a questo evento ci fu un deciso impegno dello Stato a tradurre in legge le conoscenze scientifiche e tecniche sulle costruzioni sino ad allora maturate. Fu così emanato il Regio decreto n°193 [1909] nel quale è contenuta la prima classificazione sismica del territorio Italiano.

Negli anni a seguire si continuò ad aggiornare la normativa tecnica ampliando la classificazione in base alle zone colpite da eventi sismici. Nel 1962 fu pubblicata la Legge n°1684, in seguito ai terremoti di Carnia (1956), Valle del Velino (1961) e Irpinia (1962) dove, per la prima volta, si prescrisse l'applicazione delle norme sismiche ai comuni "soggetti a intensi movimenti sismici" e non solo a quelli colpiti dal terremoto.

In seguito ai terremoti dei Monti Nebroli (1967), della Valle del Belice (1968) e di Toscana (1971), fu emanata la Legge n°64 [1974], che costituisce una pietra miliare nel panorama della normativa sismica poiché stabilì che la classificazione sismica dovesse procedere sulla base di comprovate motivazioni tecniche scientifiche.

La promulgazione dell'Ordinanza P.C.M. n°3274 del 20/3/2003 e successive modifiche ed integrazioni ha determinato sul panorama nazionale un grande rinnovamento sul fronte della normativa tecnica in zona sismica, rappresentata fino ad allora dai contenuti del D.M. 16 gennaio 1996.

La principale novità introdotta dall'O.P.C.M. n°3274 è l'abbandono del carattere puramente prescrittivo e convenzionale che caratterizzava le norme tecniche di vecchia concezione, come il D.M. 16/01/1996, per abbracciare un'impostazione puramente prestazionale, in cui gli obiettivi della progettazione e quindi il livello di sicurezza sono esplicitamente dichiarati, a seconda della risposta sismica attesa per la struttura e il sito di costruzione, per un prefissato livello di severità dell'azione sismica.

Le attuali norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. D.M. - 17 gennaio 2018) ereditano gran parte dei contenuti dell'O.P.C.M. n°3274 in merito alla progettazione in zone sismiche; tuttavia rispetto a quest'ultimo documento sono anche stati apportati importanti cambiamenti, di cui forse il più rilevante riguarda la definizione dell'azione sismica.

Per comprendere pienamente il significato della nuova normativa è necessario rifarsi al concetto di risposta sismica locale. Dal punto di vista strettamente fisico, per effetto di sito (risposta sismica locale) s'intende l'insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base (R), subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie (S).

Il moto sismico è amplificato in corrispondenza di determinate frequenze che corrispondono alle frequenze naturali  $f_n$  di vibrazione del deposito:

$$f_n = 1 / T_n = (V_s * (2n - 1)) / (4 * H) \text{ con } n = 1, 2, \dots, \quad [4.1]$$

mentre risulta ridotto di amplificazione alle frequenze elevate a causa dello smorzamento del terreno.

Di particolare importanza è la prima frequenza naturale di vibrazione del deposito denominata frequenza fondamentale di risonanza:

$$f_1 = 1 / T_1 = V_s / 4H \quad [4.2]$$

E' quindi necessario porre estrema attenzione a fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei manufatti ivi edificati in quanto le azioni sismiche su di essi sarebbero gravose.

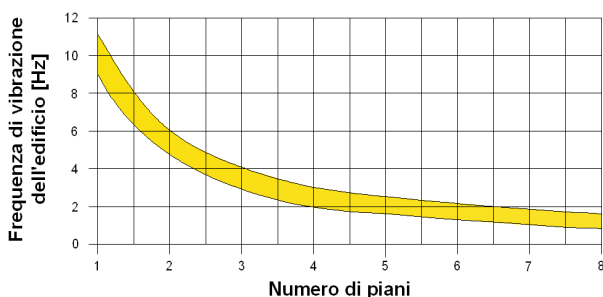
Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani.} \quad [4.3]$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{freq. naturale edificio} \approx \text{freq. fondamentale di risonanza del sito} \quad [4.4]$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché da luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.



*Figura - Frequenza di vibrazione degli edifici rapportata al numero di piani.*

## 5. ANALISI SISMICA DI SITO E DEFINIZIONE CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

### 5.1 Risultati ottenuti dalle indagini sismiche effettuate

L'utilizzo delle due tecniche sismiche ha permesso di ottenere un modello sismostratigrafico del sottosuolo robusto e affidabile in corrispondenza della zona d'interesse.

L'indagine Re.Mi. ha individuato le discontinuità sismiche superficiali e stimato le velocità di propagazione delle onde S, mentre la prospezione passiva a stazione singola (H.V.S.R.) ha stimato il grado di rigidità del substrato di riferimento.

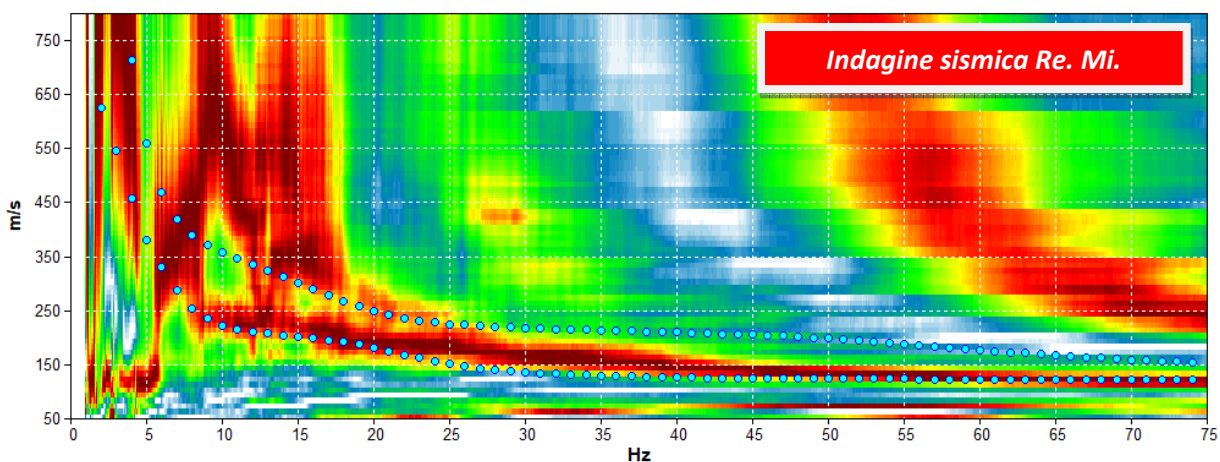
Inoltre, si è cercato di correlare i valori di picco, dello spettro di risposta H.V.S.R., con le frequenze fondamentali di risonanza di sito.

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, è possibile ricavare le frequenze relative ad ogni discontinuità sismica.

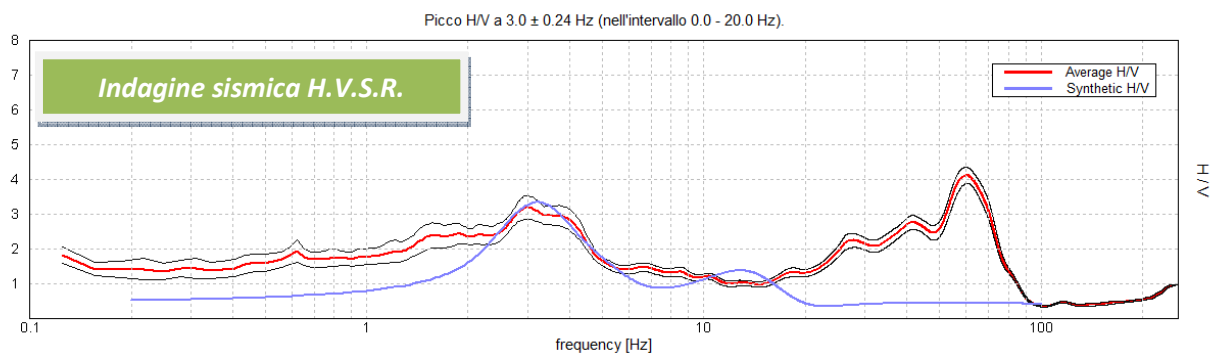
È ormai consolidata, sia a livello accademico sia professionale, l'ipotesi che le strutture subiscono le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale del terreno investito da un'onda sismica e quella naturale dell'edificio.

**L'attendibilità del modello sismostratigrafico desunto è da considerarsi elevata**, poiché la coerenza dei segnali è buona e gli spettri di velocità sono ben definiti nel modo fondamentale per quasi tutte le frequenze campionate. Il programma di elaborazione utilizzato permette di considerare non solo il modo fondamentale ma, una volta individuati, anche i modi superiori, per vincolare con maggior attendibilità la ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo.

**Re. Mi + H.V.S.R. – interpretazione congiunta**



*Spettro di velocità: il modo fondamentale è presente in quasi tutte le frequenze campionate. Il segnale si presenta con una buona coerenza. In blu le curve sintetiche create da una modellizzazione diretta delle onde S.*

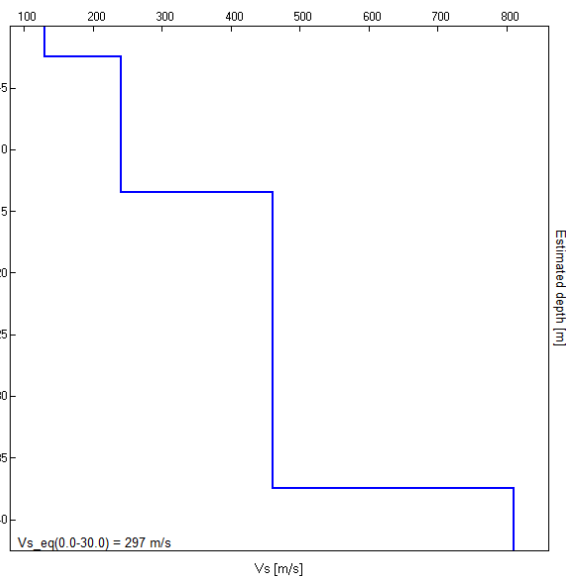


*La curva spettrale rossa rappresenta l'andamento sismico registrato in campagna mentre quella blu è la curva sintetica generata dal codice di calcolo*

La ricostruzione sismostratigrafica di sito ha evidenziato la presenza di un materiale poco addensato fino a circa 2,5 m dal p.c. locale, caratterizzato da una velocità Vs di circa 130 m/s mentre, per valori di profondità maggiori, il grado di rigidità aumenta, assumendo valori di Vs circa 240 m/s.

A circa 14 m dal p.c. locale incontriamo un sismostrato molto addensato con valori di Vs di 460 m/s.

Il substrato di riferimento (Vs = 810 m/s), inteso come quel materiale con Vs > 800 m/s, è stato riscontrato a circa 38 m dal p.c. locale.



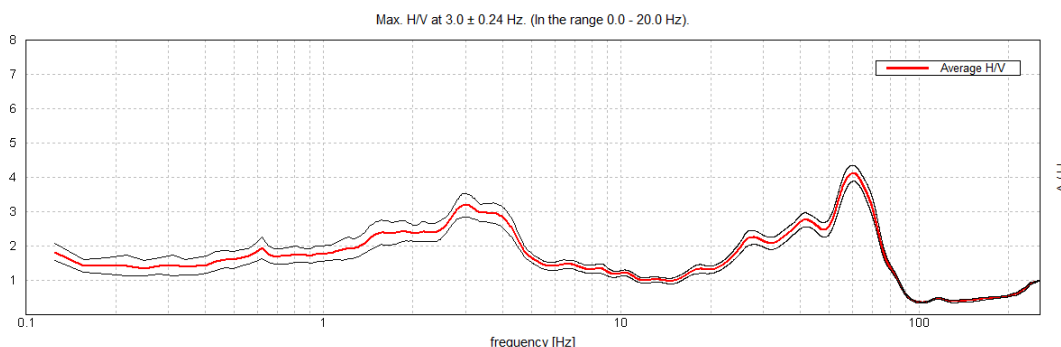
Il rilievo nello specifico ha fornito i seguenti dati sismici (*modello sismostratigrafico interpretativo*):

Indagine sismica Re.Mi. con inversione congiunta H.V.S.R.	Velocità onde di taglio [m/s]	Spessori [m]	Profondità [m]
I SISMOSTRATO	130	2,5	0,0 - 2,5
II SISMOSTRATO	240	11	2,5 - ≈14
III SISMOSTRATO	460	24	≈14 - ≈38
IV SISMOSTRATO	810	Semisp.	≈38 - Semisp.

La frequenza caratteristica di risonanza di sito, generata dalla discontinuità sismica a più elevato rapporto spettrale ( $H/V \approx 3$ ) nell'intervallo di interesse ingegneristico-strutturale (0,0 - 20,0 Hz), è risultata di circa 3 Hz.

Frequenza caratteristica di risonanza
<b>3.0 ± 0.24 Hz</b>

Si dovrà quindi porre estrema attenzione nell'edificare strutture aventi lo stesso periodo di vibrazione naturale del terreno, poiché il rapporto H/V calcolato è tale da ipotizzare un rilevante fattore di amplificazione del moto sismico in superficie.



Rapporto spettrale H/V misurato. In rosso è indicato l'HV medio mentre in nero l'intervallo di confidenza al 95%.

Nella tabella sotto, s'illustra la qualità del segnale acquisito in base al progetto **SESAME** (Linee guida 2005). Per l'affidabilità della curva H.V.S.R. devono essere positivi i primi tre parametri mentre, per avere un chiaro e pulito segnale del picco massimo, devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi.

Picco H/V a 3.0 ± 0.24 Hz (nell'intervallo 0.0 - 20.0 Hz).			
Criteri per una curva H/V affidabile			
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10 / L_w$	3.00 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	2640.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 145	OK	
Criteri per un picco H/V chiaro			
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	6.7327	OK	
Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	5.156 Hz	OK	
$A_0 > 2$	3.20 > 2	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.03964  < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.23892 < 0.15$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3414 < 1.58$	OK	

## 5.2 Categoria di Sottosuolo secondo le NTC - D.M. 17 gennaio 2018

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi o in rapporto ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di Categorie di Sottosuolo di riferimento.

Per definire le Categorie, il D.M. 17 gennaio 2018 prevede il calcolo del parametro  $V_{s,eq}$ , ovvero della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  dei terreni posti al di sopra del substrato di riferimento ( $V_{s,30}$  per depositi con profondità del substrato superiore a 30 m).

La profondità del substrato è riferita al piano di posa delle fondazioni superficiali, alla testa dei pali per fondazioni indirette, al piano di imposta delle fondazioni per muri di sostegno di terrapieni o alla testa delle opere di sostegno di terreni naturali.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositati 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.
D	Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente 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 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Dall'assetto sismostratigrafico desunto dalle indagini sismiche effettuate, è possibile constatare, nel sito di riferimento, la presenza del substrato di riferimento a profondità superiori a 30 m dal p.c. locale.

Pertanto, come espressamente richiesto dalla normativa vigente (*Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 17/01/2018*), si è calcolata la velocità media di propagazione delle onde di taglio fino a 30 m dal piano di posa delle fondazioni ( $V_{s,30}$ ), a partire da varie profondità dal piano campagna:

Profondità piano di posa delle fondazioni	$V_{s,30}$
0 m dal p.c.	$V_s (0 - 30) \approx 297 \text{ m/s}$
1 m dal p.c.	$V_s (1 - 31) \approx 314 \text{ m/s}$
2 m dal p.c.	$V_s (2 - 31) \approx 334 \text{ m/s}$
3 m dal p.c.	$V_s (3 - 33) \approx 348 \text{ m/s}$

Dalla ricostruzione del quadro geofisico emerso dal presente studio e dalle indicazioni normative si prevede l'inserimento del sito di indagine nella **Categoria di Sottosuolo denominata C.**

### CATEGORIA TOPOGRAFICA E COEFFICIENTE DI AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA ST

L'area è modellabile nella **Categoria T1** (Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$  - cfr. Tabella 3.2.IV del par. 3.2.2 delle NTC); il coefficiente di amplificazione topografica ST si può quindi assumere pari ad **1,0** come indicato nella Tabella 3.2.VI del paragrafo 3.2.3.2.1 delle NTC.

In virtù della geologia locale, si è condotto uno studio approfondito di Risposta Sismica Locale (RSL 2D), i cui contenuti e risultati sono riportati nel capitolo successivo.

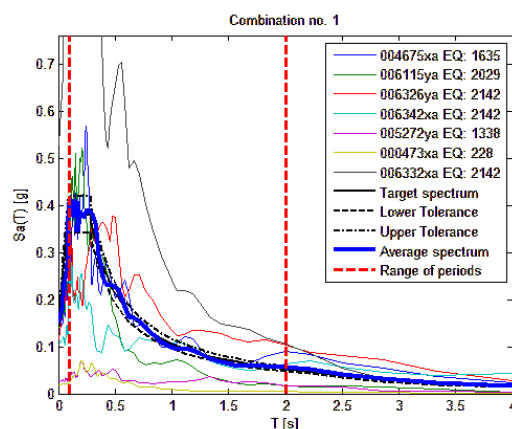
## 6. MODELLIZZAZIONE NUMERICA AVANZATA

Come anticipato nelle premesse, è stato effettuato uno studio di risposta sismica locale tramite una modellazione numerica monodimensionale avanzata in modalità dinamica. Nel rispetto della normativa vigente è stata effettuata una modellazione numerica assegnando una severità dell'azione sismica con la probabilità di superamento,  $P$ , e con il periodo di ritorno,  $T_r$ , relativi agli stati limite considerati.

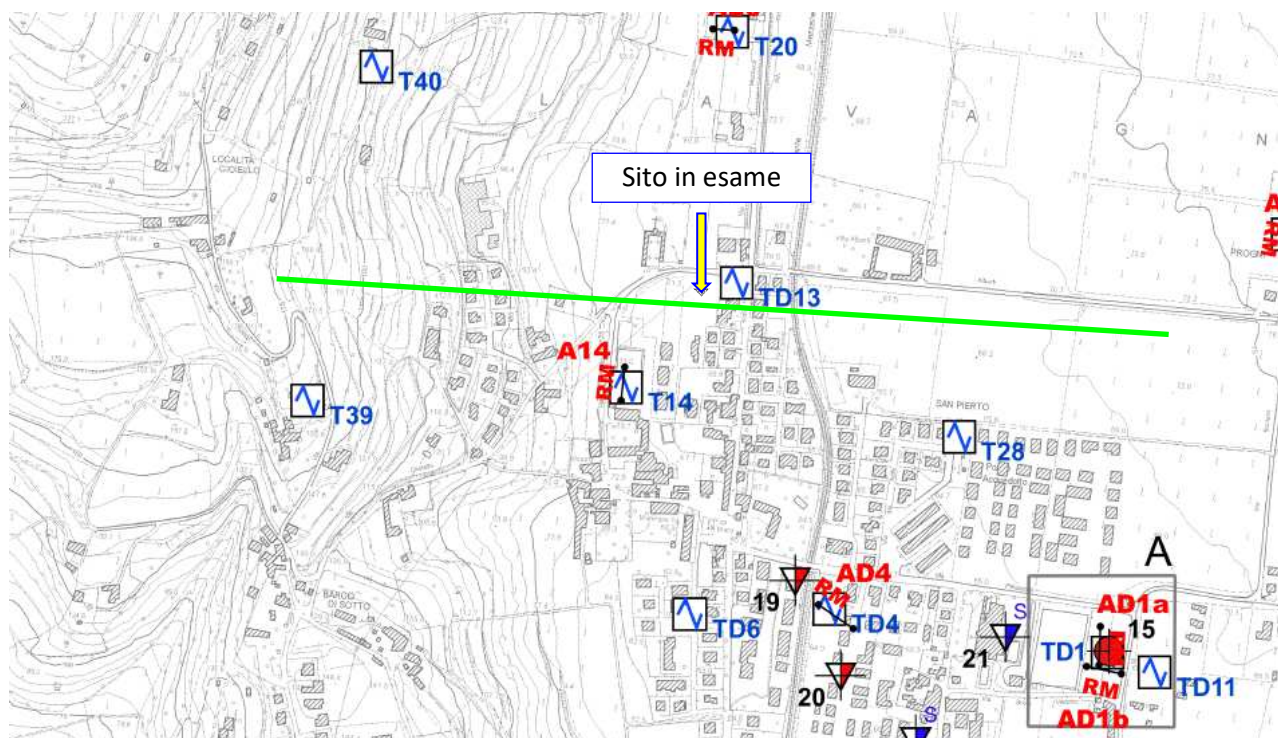
In particolare, è stata considerata una vita nominale della costruzione ( $V_n$ ) di 50 anni, una classe d'uso II con il relativo coefficiente  $C_u$  pari ad 1,0 e, quindi, una vita di riferimento  $V_r = 50$  anni. A partire da queste indicazioni si è determinato un periodo di ritorno dell'azione sismica di **475 anni** corrispondenti allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV).

Gli *input* sismici utilizzati sono rappresentati da una settupla di storie accelerometriche applicate alla base del modello per ogni stato limite considerato e riferite agli spettri di normativa calcolati per il sito in esame, considerando un sottosuolo di roccia affiorante (classe A) con topografia suborizzontale (T1) e correttamente deconvoluto (v. Dynamic Analysis della ITASCA, 2018).

In particolare, gli accelerogrammi sono stati ricavati tramite l'utilizzo del software REXEL - *computer aided record selection for code - based seismic structural analysis*.



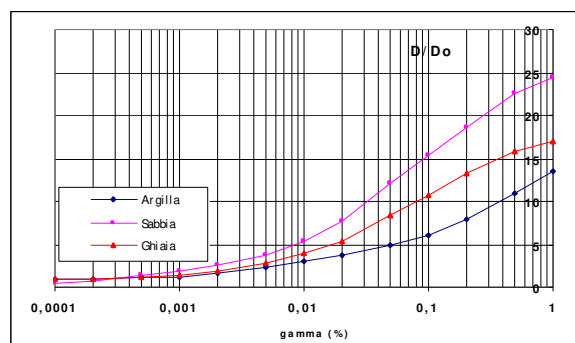
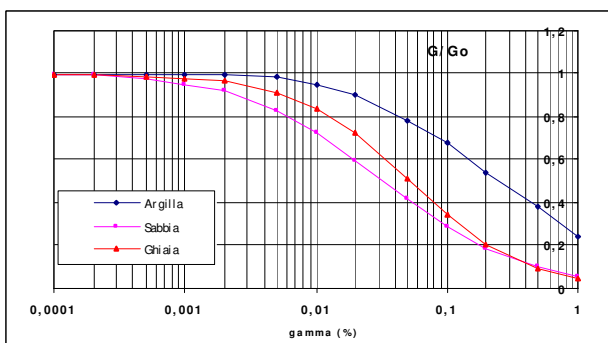
Nella modellazione numerica è stata utilizzata la sismostratigrafia ed i valori di rigidità ricavati dalle indagini geofisiche eseguite e precedentemente illustrate. Inoltre, al fine di ricostruire l'assetto sismostratigrafico dell'area, si sono consultate altre indagini sismiche condotte durante l'esecuzione dello studio di Microzonazione Sismica nel 2016 e che ricadono in prossimità della sezione analizzata (come è possibile osservare dall'estratto della "Carta delle Indagini" riportato sotto).



Il modello geometrico, è stato discretizzato con una maglia ad elementi quadrangolari, le dimensioni dei quali sono state stabilite in funzione delle lunghezze d'onda minime caratterizzanti il fenomeno di propagazione sismica, determinabili con la relazione di Kuhlemeyer & Lysmer ( $h_{max} < V_s / 10 * f_{max}$ ) in funzione delle velocità delle onde di taglio nei diversi terreni del modello e della frequenza massima di interesse dei segnali accelerometrici selezionati ( $f_{max}=10$  Hz).

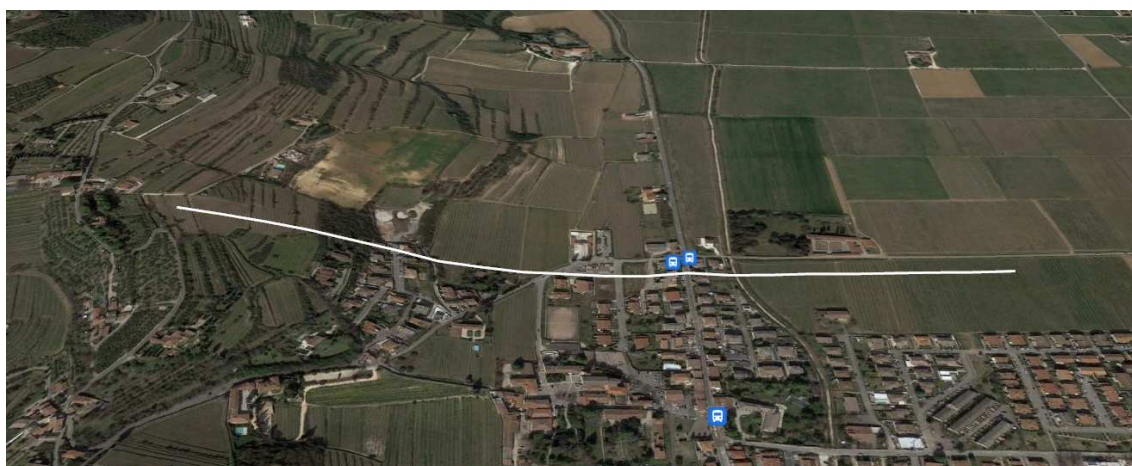
Lungo le frontiere laterali sono stati introdotti particolari elementi assorbenti (*free - field boundaries*), che, oltre ad evitare la riflessione delle onde in maniera analoga agli smorzatori viscosi introdotti da Lysmer & Kuhlemeyer (1969), forzano i nodi delle frontiere laterali a riprodurre il moto di *free - field*, essenziali per le analisi di risposta sismica locale 2D.

Per limitare la riflessione delle onde in corrispondenza della frontiera inferiore del modello sono stati utilizzati degli smorzatori viscosi (*quiet boundaries*) mentre le proprietà dissipative dei materiali sono state ottenute attraverso lo smorzamento isteretico per i materiali più superficiali tramite le curve di degrado G/G0 e D/D0 indicate negli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" del 2008 e sotto riportate.

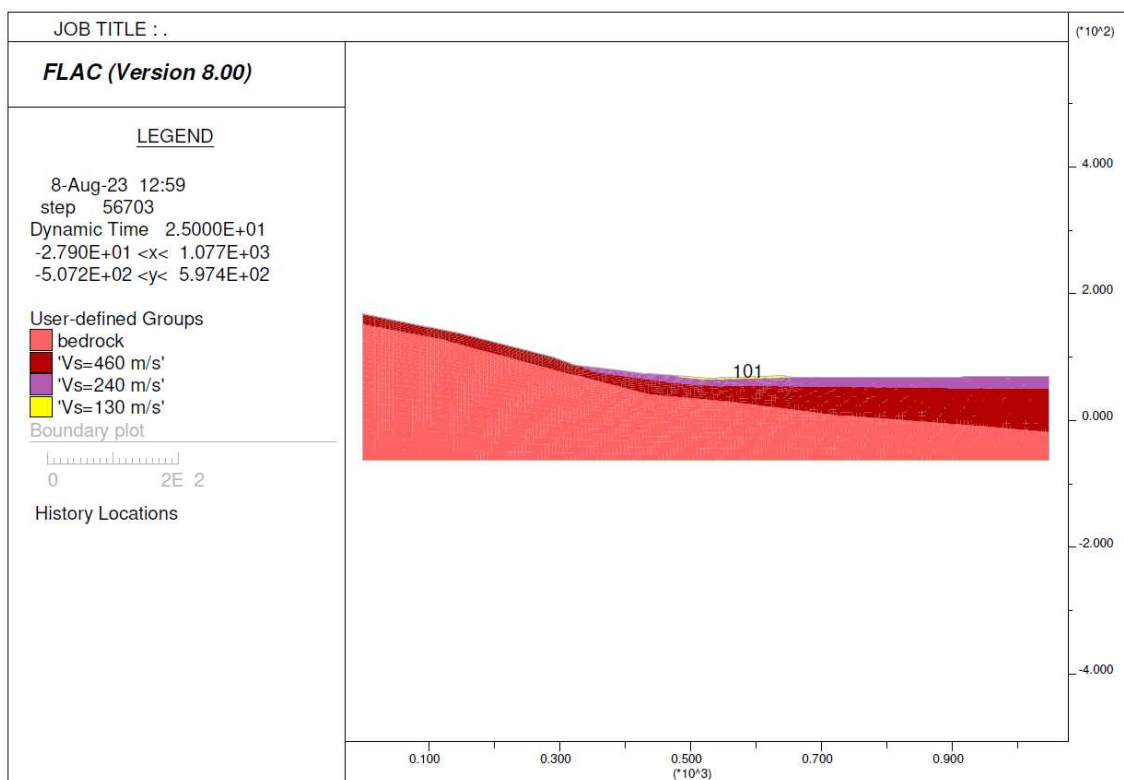


Le *history* (storie temporali) ricavate al tetto del modello rappresentano le storie accelerometriche orizzontali attese nel sito d'indagine. Le n°7 *history* ottenute sono state successivamente plottate in uno spettro di risposta elastico e mediate in una curva rappresentativa (*Step n° 1*), confrontabile con gli spettri di normativa provenienti dall'approccio semplificato (*Step n° 2*).

A seguire, si mostra il modello sismostratigrafico impiegato per le simulazioni numeriche, la traccia della sezione e gli spettri risultati dalla modellazione per lo stato limite analizzato. Si fa presente che la sismostratigrafia è stata ricostruita sulla scorta delle velocità  $V_s$  ricavate dalle indagini e correlate tra i vari punti di prova, e non coincide necessariamente con la litostratigrafia, che può presentare velocità variabili anche all'interno dello stesso litotipo.



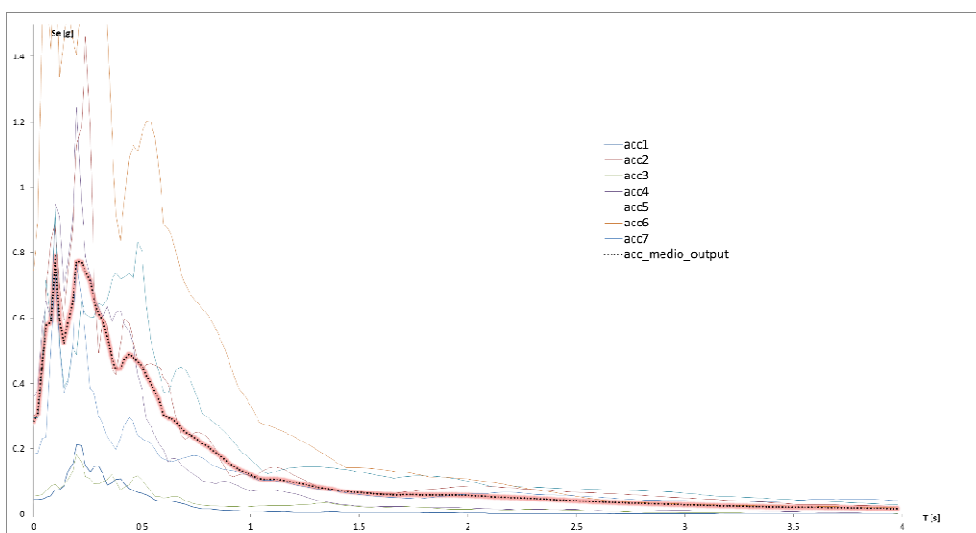
Traccia della sezione sismostratigrafica utilizzato per lo studio di RSL



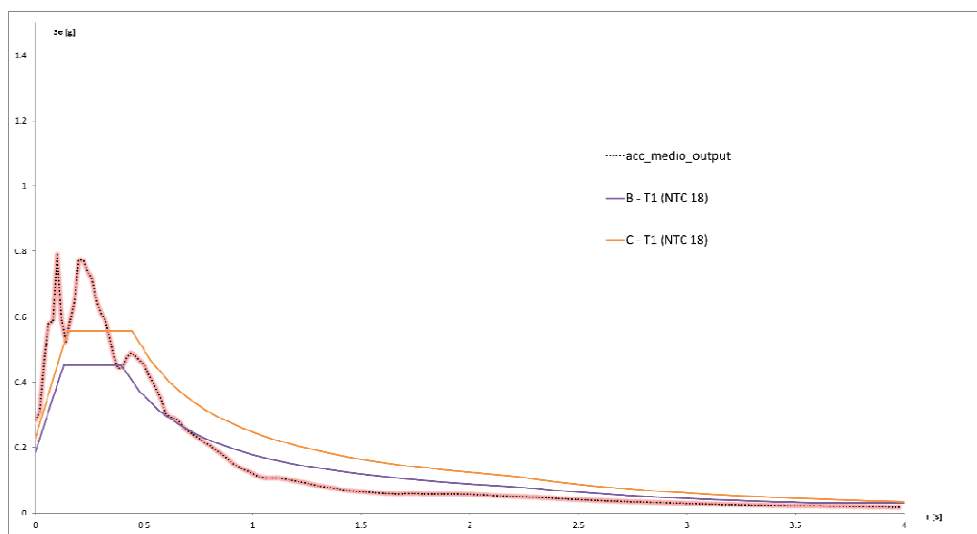
Modello sismostratigrafico utilizzato per lo studio di RSL

### ANALISI ALLO STATO LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA (SLV)

**Step n° 1:** le linee acc1, acc2, acc3, acc4, acc5, acc6 e acc7 rappresentano gli spettri di risposta elastica calcolati in superficie (tetto del modello) per ogni evento sismico modellizzato. La media di questi è rappresentata dalla linea rosa puntinata in nero (acc\_medio; v. Tabella in allegato a fine testo).



**Step n° 2:** lo spettro di risposta medio viene confrontato con quelli derivanti dalla procedura semplificata di risposta sismica locale e identificabile nelle Categorie di Sottosuolo con associate le Categorie Topografiche.



#### SINTESI DEI RISULTATI DELLO STUDIO DI RSL

Dalla ricostruzione del quadro sismico - stratigrafico emerso dal presente studio e dalle indicazioni normative si dovrebbe prevedere l'inserimento del sito d'indagine nella Categoria di Sottosuolo C.

In virtù dell'importanza della struttura in esame, si è ritenuto opportuno condurre uno studio di risposta sismica locale (RSL 2D) con un periodo di ritorno dell'azione sismica di 475 anni corrispondenti allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV).

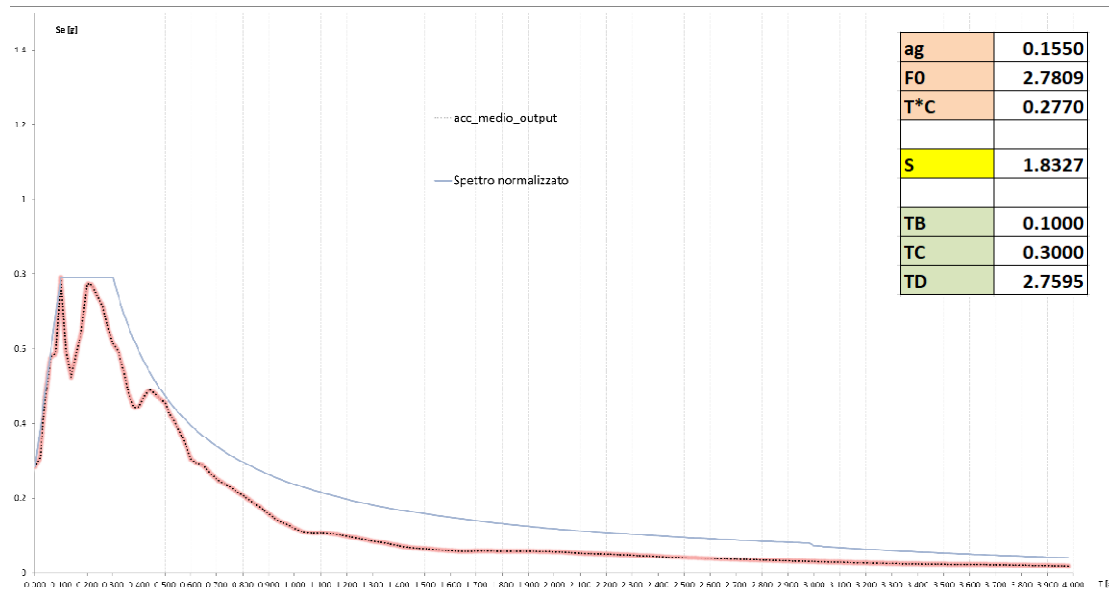
Lo spettro di risposta elastico ottenuto, presenta valori massimi di  $a_g$  compresi tra 0,58  $ag/g$  e 0,79  $ag/g$  nell'intervallo tra 0,06 s e 0,32 s.

Dal grafico sopra riportato, si può osservare che la Categoria C unita alla Categoria Topografica T1, in cui rientrerebbe il sito:

- per periodi inferiori a 0,34s, risulta inappropriata per quantificare l'azione sismica attesa al sito in quanto sottostima i valori massimi di  $a_g$  ottenuti dalla modellazione;
- può essere considerata generalmente rappresentativa dell'amplificazione sismica qualora il periodo di vibrazione della struttura ricada nel range 0,36 - 0,64s;
- risulta nuovamente inappropriata per periodi superiori a 0,66s, poiché sovrastima la RSL al punto che, per questo intervallo, potrebbe essere utilizzata la combinazione B - T1.

Pertanto, si consiglia l'utilizzo dello spettro calcolato tramite la modellazione numerica descritta, poiché rappresentativo delle condizioni di sito locali e dell'effettiva amplificabilità del sito in ogni range di periodo.

Nel caso in cui fosse necessario esprimere lo spettro elastico ottenuto dallo studio di RSL con le equazioni 3.2.3 del DM 2018, di seguito si riportano i parametri  $a_g$ ,  $F_0$  ed  $T_c^*$  del sito, i periodi di vibrazione ( $T_B, T_C, T_D$ ) ed il coefficiente di amplificazione  $S$  ( $S_T^*S_S$ ) da utilizzare per costruire lo spettro normalizzato che meglio approssima quelli massimi ottenuti dalla modellazione mostrato nell'immagine seguente e riportato nell'allegato "SLV - Spettro normalizzato".



*Resta di stretta competenza del Sig. Progettista la scelta definitiva dell'input sismico da adottare per i calcoli strutturali, che sarà subordinata all'individuazione dei parametri progettuali definitivi.*

*Si ricorda che qualunque tecnica di geofisica applicata ha un margine di errore intrinseco variabile in funzione del tipo di tecnica usata, di strumentazione utilizzata e di problematiche incontrate durante la fase di acquisizione. Infine, i profili di Vs ricavati con questa metodologia, come tutti i metodi indiretti, non presentano una soluzione univoca e quindi più modelli possono fornire curve sintetiche simili tra loro.*

Costabissara, agosto 2023

## ALLEGATI

- 📊 SLV - Spettro di risposta elastico medio da modellazione numerica con Tr 475 anni e smorzamento 5% (SLV)
- 📊 SLV - Spettro normalizzato

## BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- ✓ Aki K., 1964. A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust, *Geophysics*, 29, p. 665 - 666.
  - ✓ Arai H. e Tokimatsu K., 2004. S - Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94, p. 53 - 63.
  - ✓ Castellaro S., Mulargia F. Bianconi L., 2005. Stratigrafia sismica passiva: una nuova tecnica accurata, rapida ed economica, *Geologia Tecnica Regionale*, vol. 3.
  - ✓ D'Amico V., Picozzi M., Albarello D., Naso G. e Tropenscovino S., 2004. Quick estimates of soft sediments thicknesses from ambient noise horizontal to vertical spectral ratios: a case study in southern Italy, *J. Eartq. Eng.*, 8, p. 895 - 908.
  - ✓ Dal Moro G., 2008b, Rapporto sulla campagna Vs30 in Friuli Venezia Giulia, Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine, Università di Trieste.
  - ✓ Dal Moro G & Pipan M., 2007, Joint Inversion of Surface Wave Dispersion Curve and Reflection Travel Times via Multi-Objective Evolutionary Algorithms, *J. Appl. Geophysics*, 61, 56 - 81.
  - ✓ Gallipoli R., La Penna V., Lorenzo P. et al., 2000. Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy, *European J. Environm. and Eng. Geophys.*, 4, p. 117 - 128.
  - ✓ Ibs - von Seht M. e Wohlenberg J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, *Bull. Seismol. Soc. America*, 89, p. 250 - 290.
  - ✓ Ivanov, J., Miller, R.D., Xia, J., Steeples, D., and Parck, C.B., 2006, Joint Analysis of Refractions with Surface Waves. An Inverse Refraction - Traveltime Solution: *Geophysics*, 71, R131 - R138.
  - ✓ ITASCA (2018) - FLAC 2D - Fast Lagrangian Analysis of Continua - Version 8.0. User's Guide, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
  - ✓ Mucciarelli M. e Gallipoli M.R., 2001. A critical review of 10 Years of microtremor H.V.S.R. technique, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42, P. 255 - 266.
  - ✓ Mucciarelli M. e Gallipoli M.R., 2006. Comparison between Vs30 and other estimates of site amplification in Italy, *Conf. Eartq. Eng. And Seismol.*, Ginevra, 3 - 8 Sept. no 270.
  - ✓ Mulargia F., Castellaro S., Rossi P.L., 2007. Effetti di sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica", *Il geologo - Ordine dei Geologi Regione Emilia Romagna*.
  - ✓ Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface, *QR of RTRI*, 30, p. 25 - 30.
  - ✓ Roth M. & Holliger K - 1999. Inversion of Sourcegenerated noise in high - resolution seismic data. *The Leading Edge*, 18, 1402 - 1406.
- [SESAME Project](#): "Site Effects Assessment Using Ambient Excitations", 2005.

<i>SLV - Spettro di risposta elastico medio da modellazione numerica            con Tr 475 anni e smorzamento 5% (SLV)</i>							
T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]
0.00	0.2840762	1.04	0.10869	2.08	0.0540368	3.12	0.0271991
0.02	0.3093976	1.06	0.1074027	2.10	0.0533057	3.14	0.026874
0.04	0.4690682	1.08	0.1071439	2.12	0.0525544	3.16	0.0266004
0.06	0.5776933	1.10	0.1073773	2.14	0.052133	3.18	0.0263204
0.08	0.5858468	1.12	0.1067484	2.16	0.0515978	3.20	0.0260352
0.10	0.7902912	1.14	0.1053326	2.18	0.0510617	3.22	0.0257438
0.12	0.591562	1.16	0.1031021	2.20	0.0505893	3.24	0.0254493
0.14	0.5231592	1.18	0.1005612	2.22	0.050073	3.26	0.0251682
0.16	0.5892691	1.20	0.0978857	2.24	0.0494702	3.28	0.0249007
0.18	0.6476042	1.22	0.0954766	2.26	0.0489099	3.30	0.024632
0.20	0.7751628	1.24	0.0929423	2.28	0.048371	3.32	0.0243611
0.22	0.7724293	1.26	0.0902211	2.30	0.0477437	3.34	0.024088
0.24	0.7393093	1.28	0.0873807	2.32	0.0470601	3.36	0.0238105
0.26	0.7161943	1.30	0.0845356	2.34	0.0464504	3.38	0.0235293
0.28	0.6542197	1.32	0.0824351	2.36	0.0458156	3.40	0.0232442
0.30	0.6128024	1.34	0.0803794	2.38	0.045112	3.42	0.0229556
0.32	0.5928488	1.36	0.0780928	2.40	0.044346	3.44	0.0228095
0.34	0.5417157	1.38	0.0756306	2.42	0.0436416	3.46	0.022691
0.36	0.4784539	1.40	0.0729981	2.44	0.0429069	3.48	0.0225596
0.38	0.4433872	1.42	0.0704337	2.46	0.0421997	3.50	0.0224178
0.40	0.4454099	1.44	0.0683307	2.48	0.0416546	3.52	0.0222697
0.42	0.4731015	1.46	0.0672767	2.50	0.0410802	3.54	0.0221286
0.44	0.4907106	1.48	0.0662042	2.52	0.0404755	3.56	0.0220666
0.46	0.4797931	1.50	0.0651673	2.54	0.0398659	3.58	0.0219889
0.48	0.4664785	1.52	0.0639984	2.56	0.0392454	3.60	0.0219035
0.50	0.4550313	1.54	0.0629116	2.58	0.0386061	3.62	0.0218037
0.52	0.4233488	1.56	0.0618101	2.60	0.0380099	3.64	0.0216852
0.54	0.400337	1.58	0.0607622	2.62	0.0374905	3.66	0.0215468
0.56	0.3749179	1.60	0.0599198	2.64	0.0370245	3.68	0.0213906
0.58	0.3412473	1.62	0.0593297	2.66	0.036551	3.70	0.0212165
0.60	0.3047147	1.64	0.0587039	2.68	0.0360702	3.72	0.0210287
0.62	0.2939997	1.66	0.0581838	2.70	0.0355746	3.74	0.0208283
0.64	0.2904092	1.68	0.0584411	2.72	0.0350724	3.76	0.0206298
0.66	0.2784718	1.70	0.0587817	2.74	0.0346221	3.78	0.020416
0.68	0.26231	1.72	0.0588841	2.76	0.0341953	3.80	0.0201883
0.70	0.2513409	1.74	0.058894	2.78	0.0337824	3.82	0.019948
0.72	0.2427682	1.76	0.0587418	2.80	0.0333831	3.84	0.0197013
0.74	0.2346314	1.78	0.0584401	2.82	0.0330151	3.86	0.019458
0.76	0.2256933	1.80	0.0583249	2.84	0.0326399	3.88	0.0192109
0.78	0.2150719	1.82	0.0582819	2.86	0.0322642	3.90	0.0189755
0.80	0.2071839	1.84	0.0582563	2.88	0.0318614	3.92	0.0187283
0.82	0.1980999	1.86	0.0583157	2.90	0.0314351	3.94	0.0184749
0.84	0.1882224	1.88	0.0582251	2.92	0.031005	3.96	0.0182136
0.86	0.1793261	1.90	0.0581991	2.94	0.0306399	3.98	0.0179685
0.88	0.1687667	1.92	0.0580872	2.96	0.0302924		
0.90	0.1572633	1.94	0.0578276	2.98	0.0299441		
0.92	0.1471137	1.96	0.0575777	3.00	0.0295713		
0.94	0.1381911	1.98	0.0572039	3.02	0.029183		
0.96	0.1324322	2.00	0.0567328	3.04	0.028787		
0.98	0.1266463	2.02	0.0561796	3.06	0.0283735		
1.00	0.1196043	2.04	0.0554989	3.08	0.0279589		
1.02	0.1132589	2.06	0.0548113	3.10	0.0275825		

*SLV - Spettro normalizzato*

T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]
0.00	0.284	1.04	0.228	2.08	0.114	3.12	0.067
0.02	0.385	1.06	0.224	2.10	0.113	3.14	0.066
0.04	0.486	1.08	0.219	2.12	0.112	3.16	0.065
0.06	0.588	1.10	0.215	2.14	0.111	3.18	0.065
0.08	0.689	1.12	0.212	2.16	0.110	3.20	0.064
0.10	0.790	1.14	0.208	2.18	0.109	3.22	0.063
0.12	0.790	1.16	0.204	2.20	0.108	3.24	0.062
0.14	0.790	1.18	0.201	2.22	0.107	3.26	0.062
0.16	0.790	1.20	0.198	2.24	0.106	3.28	0.061
0.18	0.790	1.22	0.194	2.26	0.105	3.30	0.060
0.20	0.790	1.24	0.191	2.28	0.104	3.32	0.059
0.22	0.790	1.26	0.188	2.30	0.103	3.34	0.059
0.24	0.790	1.28	0.185	2.32	0.102	3.36	0.058
0.26	0.790	1.30	0.182	2.34	0.101	3.38	0.057
0.28	0.790	1.32	0.180	2.36	0.100	3.40	0.057
0.30	0.790	1.34	0.177	2.38	0.100	3.42	0.056
0.32	0.741	1.36	0.174	2.40	0.099	3.44	0.055
0.34	0.697	1.38	0.172	2.42	0.098	3.46	0.055
0.36	0.658	1.40	0.169	2.44	0.097	3.48	0.054
0.38	0.624	1.42	0.167	2.46	0.096	3.50	0.053
0.40	0.593	1.44	0.165	2.48	0.096	3.52	0.053
0.42	0.564	1.46	0.162	2.50	0.095	3.54	0.052
0.44	0.539	1.48	0.160	2.52	0.094	3.56	0.052
0.46	0.515	1.50	0.158	2.54	0.093	3.58	0.051
0.48	0.494	1.52	0.156	2.56	0.093	3.60	0.050
0.50	0.474	1.54	0.154	2.58	0.092	3.62	0.050
0.52	0.456	1.56	0.152	2.60	0.091	3.64	0.049
0.54	0.439	1.58	0.150	2.62	0.090	3.66	0.049
0.56	0.423	1.60	0.148	2.64	0.090	3.68	0.048
0.58	0.409	1.62	0.146	2.66	0.089	3.70	0.048
0.60	0.395	1.64	0.145	2.68	0.088	3.72	0.047
0.62	0.382	1.66	0.143	2.70	0.088	3.74	0.047
0.64	0.370	1.68	0.141	2.72	0.087	3.76	0.046
0.66	0.359	1.70	0.139	2.74	0.086	3.78	0.046
0.68	0.349	1.72	0.138	2.76	0.086	3.80	0.045
0.70	0.339	1.74	0.136	2.78	0.085	3.82	0.045
0.72	0.329	1.76	0.135	2.80	0.085	3.84	0.044
0.74	0.320	1.78	0.133	2.82	0.084	3.86	0.044
0.76	0.312	1.80	0.132	2.84	0.083	3.88	0.043
0.78	0.304	1.82	0.130	2.86	0.083	3.90	0.043
0.80	0.296	1.84	0.129	2.88	0.082	3.92	0.043
0.82	0.289	1.86	0.127	2.90	0.082	3.94	0.042
0.84	0.282	1.88	0.126	2.92	0.081	3.96	0.042
0.86	0.276	1.90	0.125	2.94	0.081	3.98	0.041
0.88	0.269	1.92	0.123	2.96	0.080		
0.90	0.263	1.94	0.122	2.98	0.080		
0.92	0.258	1.96	0.121	3.00	0.073		
0.94	0.252	1.98	0.120	3.02	0.072		
0.96	0.247	2.00	0.119	3.04	0.071		
0.98	0.242	2.02	0.117	3.06	0.070		
1.00	0.237	2.04	0.116	3.08	0.069		
1.02	0.232	2.06	0.115	3.10	0.068		