



GIANCARLO CECCANTI
MARCO FOLINI
GIAMPAOLO MARIANNELLI
TOMMASO CANTINI

COMUNE DI FIRENZUOLA

Realizzazione di una tettoia in legno lamellare ad uso ricreativo in
prossimità del campo sportivo A. Adalberti.

=====

RELAZIONE GEOLOGICA

Sommario

1 Premessa	3
2 Normativa di riferimento	3
3 Analisi dei vincoli e delle pericolosità.....	4
4 Inquadramento geologico generale	6
5 Inquadramento geomorfologico	7
6 Caratteristiche idrogeologiche dell'area	8
7 Caratterizzazione sismica	9
7.1 Tipologia dell'opera.....	9
7.2 Macrozonazione.....	10
7.3 Sismicità di base	10
7.4 Risposta sismica locale - approccio semplificato	12
7.5 Potenziale di liquefazione	13
8 Indagini svolte	13
9 Caratterizzazione del terreno di fondazione	18
Modello geologico generale	18
Modello geotecnico: parametri caratteristici	19
10 Conclusioni	20

Allegati:

- Report indagine geognostica
- Report indagine sismica

1 Premessa

Il presente lavoro viene eseguito a supporto della progettazione di una tettoia in legno lamellare per lo svolgimento di attività ricreative in prossimità del campo sportivo Adelmo Adalberti nel comune di Firenzuola. L'area di intervento ricade nel foglio catastale 178 particella 333 e vi si accede da piazza G. Garibaldi.

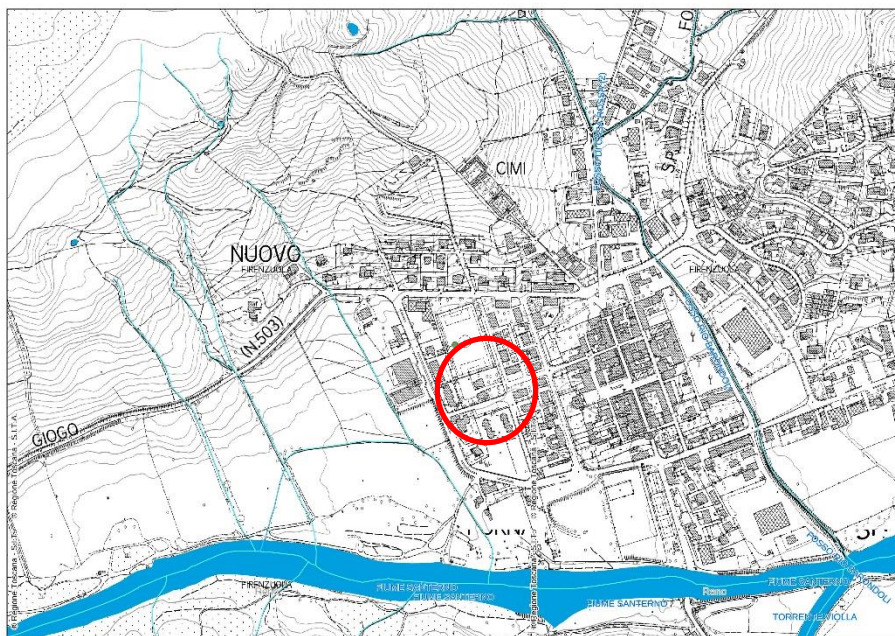


Figura 1 – Ubicazione area di intervento. Scala: 1:5000

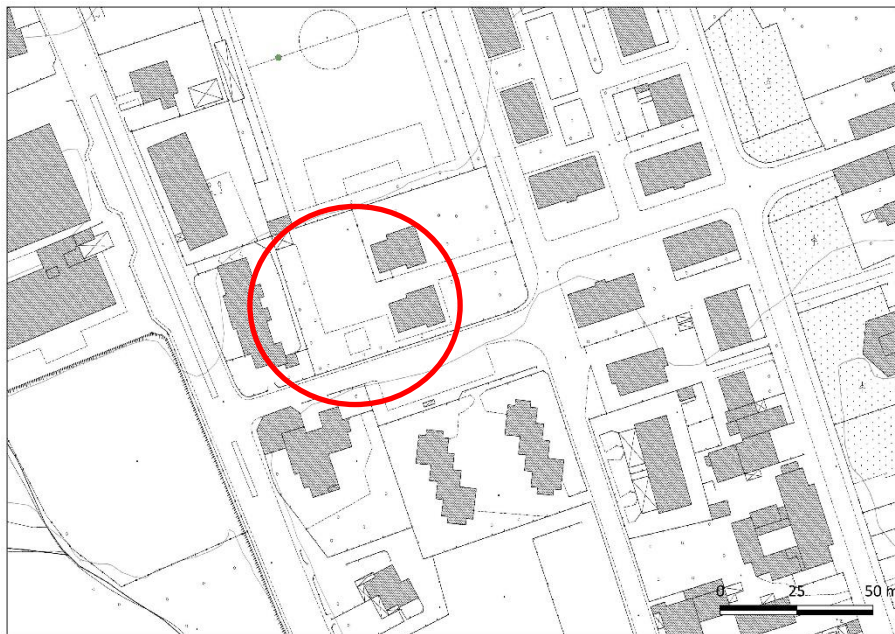


Fig. 2 – Ubicazione zona d'intervento. Scala 1:1000

2 Normativa di riferimento

Il presente lavoro è redatto in ottemperanza alle seguenti normative:

- D.M. 14/1/08 "Norme Tecniche per le Costruzioni";
- D.M. 17/01/2018 "Aggiornamento della Norme Tecniche per le costruzioni"
- Circ. C.S.LL.PP. n. 617/09 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni";

- D.P.G.R 9/07/09 n° 36/R;
- Eurocodice 7.1 1997 “Progettazione Geotecnica – Regole generali”;
- Eurocodice 7.2 2002 “Progettazione Geotecnica – Progettazione assistita da prove di laboratorio”;
- Eurocodice 7.3 2002 “Progettazione Geotecnica – Progettazione assistita con prove in situ”;
- Eurocodice 8 UNI ENV 1998 “Resistenza sismica delle strutture – parte 5”;
- O.P.C.M. 3274/03 e successive modifiche ed integrazioni;
- D.G.R.T. n° 878/12 “Aggiornamento della classificazione sismica regionale in attuazione dell’OPCM 3519/06 ed ai sensi del D.M. 14.01.2008”;
- D.Lgs 49/2010 “Attuazione della direttiva 2007/60/CE”;
- Regolamento Urbanistico Comunale;
- Piano Strutturale Comunale.

3 Analisi dei vincoli e delle pericolosità

Dall’analisi della cartografia tematica della Regione, Autorità di Bacino e Comune, è possibile elencare i seguenti vincoli ed ambiti di salvaguardia:

- ai sensi della L. 3267/23, del RD 1126/26 nonché del Regolamento Regionale 48R/03, l’area non rientra nell’ambito del Vincolo Idrogeologico;
- in riferimento al P.A.I. “Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico” del Bacino Fiume Arno la zona in questione non ricade all’interno dell’aree classificate a pericolosità da frana;
- il Piano di Gestione Rischio Alluvioni inserisce l’area in classe P.2 – *pericolosità media* (alluvioni poco frequenti);

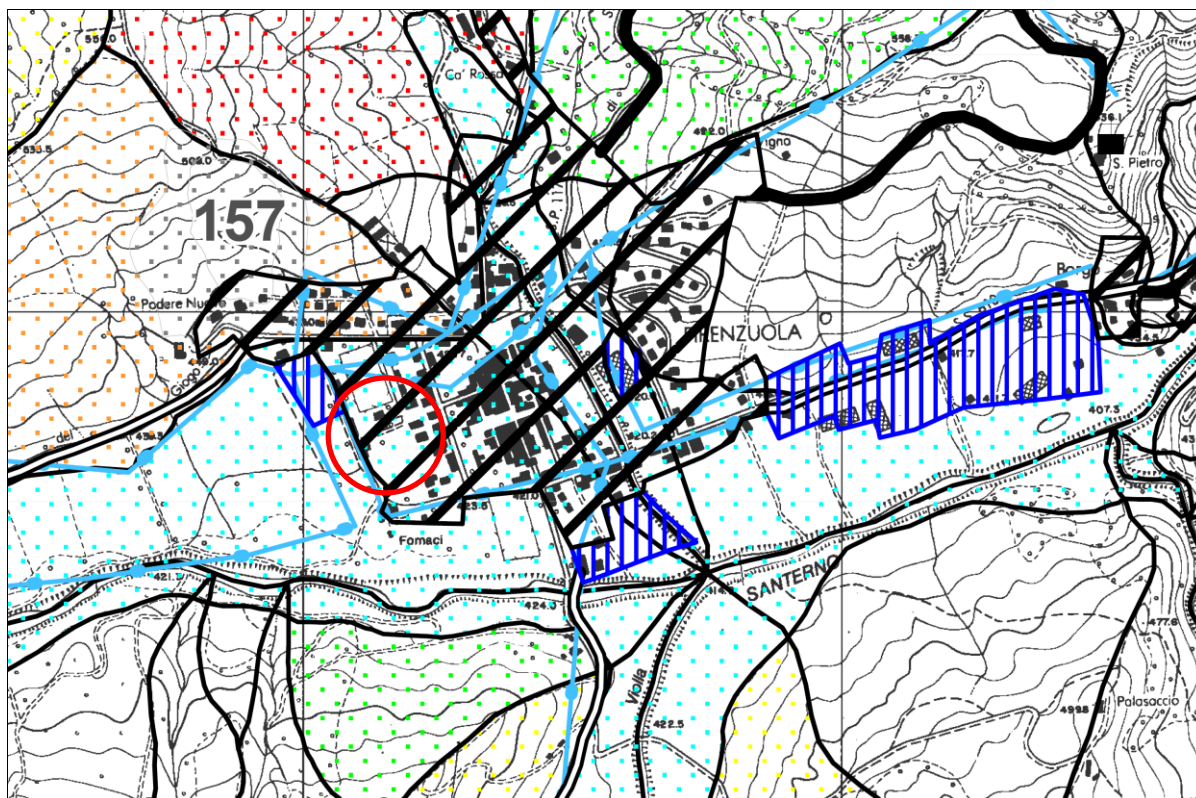
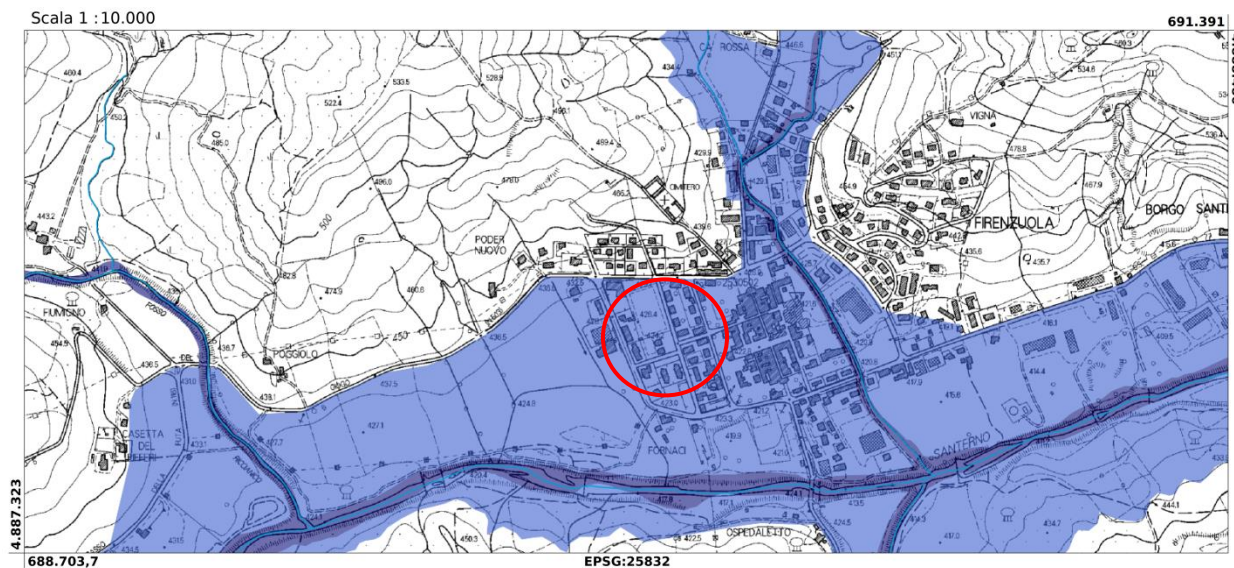


Figura 3 – Carta del Piano assetto idrogeologico (PAI): rischio da frana e assetto dei versanti. Tav. 1.8 e Tav. 1.9

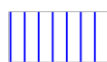
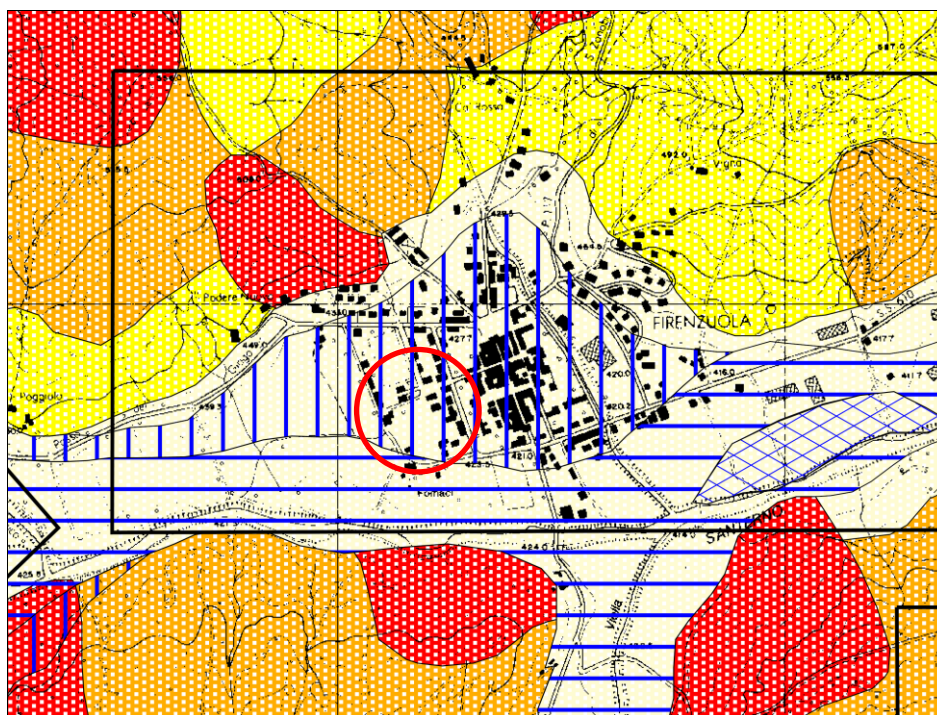


Alveo attivo zonizzato del reticolo idrografico principale e secondario (art. 15)

Per quanto riguarda le pericolosità idraulica, l'area di intervento ricade in pericolosità idraulica media (alluvioni poco frequenti)



- il Piano Strutturale Comunale classifica l'area in esame nelle seguenti classi di pericolosità:



Classe 2 – Pericolosità bassa: In questa area ricadono aree di fondovalle per le quali ricorrono le seguenti condizioni:

- a) non vi sono notizie storiche di precedenti inondazioni.
- b) sono in situazione favorevole di alto morfologico rispetto alla piana alluvionale adiacente, di norma a quote altimetriche superiori di m 2 rispetto al piede esterno dell'argine o al ciglio di sponda.

Fig. 5 – estratto dalle carte di pericolosità idraulica e geomorfologia del Piano Strutturale.

4 Inquadramento geologico generale

Il territorio del comune di Firenzuola ha un'estensione di circa 30.000 ettari e ricade nel Foglio IGM n. 98 (tavolette II NE, NI, SE, SO, III NE, I, SO, SE) e n. 99 (tavolette III, NO, SO, IV, SO).

Il territorio di Firenzuola, a piccola scala, rientra nel contesto geologico strutturale dell'Appennino Settentrionale che è delimitato, in senso geologico, a Nord dall'allineamento Sestri-Voltaggio ed a Sud dall'allineamento Ancona-Anzio; questa catena è costituita da unità tettoniche con vergenza orientale, ovvero senso di movimento da Ovest ad Est.

Le unità strutturali riconosciute si possono dividere schematicamente in tre gruppi:

- le Unità Liguri rappresentate da successioni tipiche di aree a crosta oceanica a loro volta distinguibili in altre unità strutturali;
- le Unità della Serie Toscana (unità metamorfiche, Falda Toscana, Unità Cervarola Falterona) e del Dominio Umbro, appartenenti a successioni tipiche di aree a crosta continentale;
- sulle Unità Liguri, soprattutto nei loro affioramenti esterni (Pedappennino Padano) affiora, in discordanza stratigrafica, la successione "tardogeosinclinale";
- su tutte le successioni fin qui riportate giacciono i terreni post-orogenici (tardo-miocenici e pliocenici) che stanno a testimoniare la fine dei fenomeni orogenici principali.

In Figura 6 si può apprezzare il contesto strutturale nel quale ricade Firenzuola. In particolare, si evidenzia il generale assetto caratterizzato da sovrascorrimenti con vergenza NE. L'unità tettonica oligomocenica Monte Castel Guerrino (di cui in figura si vede la formazione del torrente Carigiola TCG) sovrascorre sull'unità tettonica Sestola-Vidiciatico, che in sezione è rappresentata dalla formazione AVC (Unità argilloso-calcareo) e dalle Breccie argillose poligeniche (BAP). Quest'ultima unità tettonica sovrascorre a sua volta sulla Successione Umbro-Marchigiana Romagnola nei termini della formazione della Marnosa Arenacea.

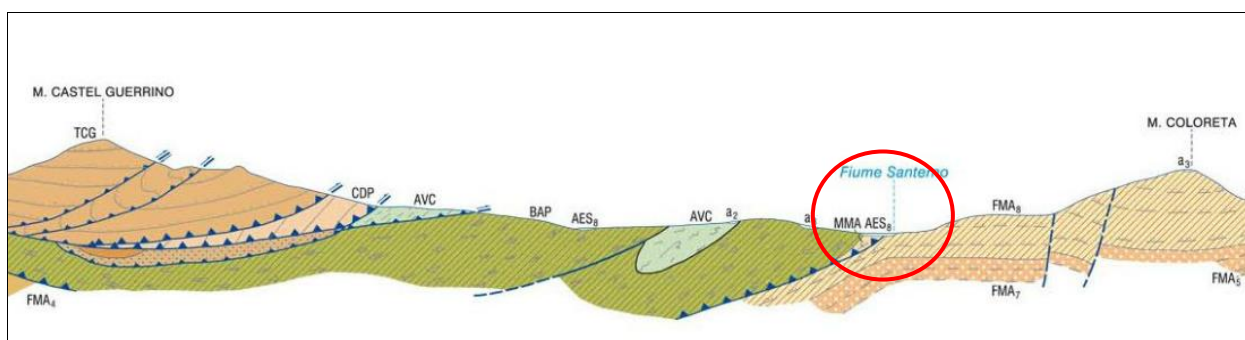


Figura 6 – sezione geologica che mostra la struttura caratterizzata da sovrascorrimenti con vergenza NE. Estratto dalla Carta Geologica D'Italia – scala 1:10000; F. n. 238 Castel San Pietro Terme – F. n.253 Marradi - (ISPRA).

L'unità AVC che costituisce il substrato dell'area di studio è così definita nella carta geologica d'Italia 1:100 000:

Argilliti, talora marnose, in bande verdi, grigie e nerastre al taglio fresco e nocciola in superficie alterata, in strati sottili con intercalate calcilutiti grigie e siltiti e areniti torbiditiche sottili. [...] Sono presenti inclusi cartografabili di successioni arenaceo-pelitiche con starti da sottili a spessi di età incerta, limitati da contatti meccanici. Foliatura estremamente pervasiva nelle argilliti, i livelli più competenti si presentano sotto forma di boudins e cerniere sradicate. Potenza geometrica valutabile in alcune centinaia di metri.

La carta geologica, usufruibile nella banca dati della Regione Toscana, evidenzia i terreni sui quali è posto il centro abitato di Firenzuola, ed è riportata in Figura 7. Come detto in precedenza il substrato è costituito dall'unità argillosa calcarea, AVC o AVR (Figura 7), sulla quale giacciono i depositi fluviali del Santerno.

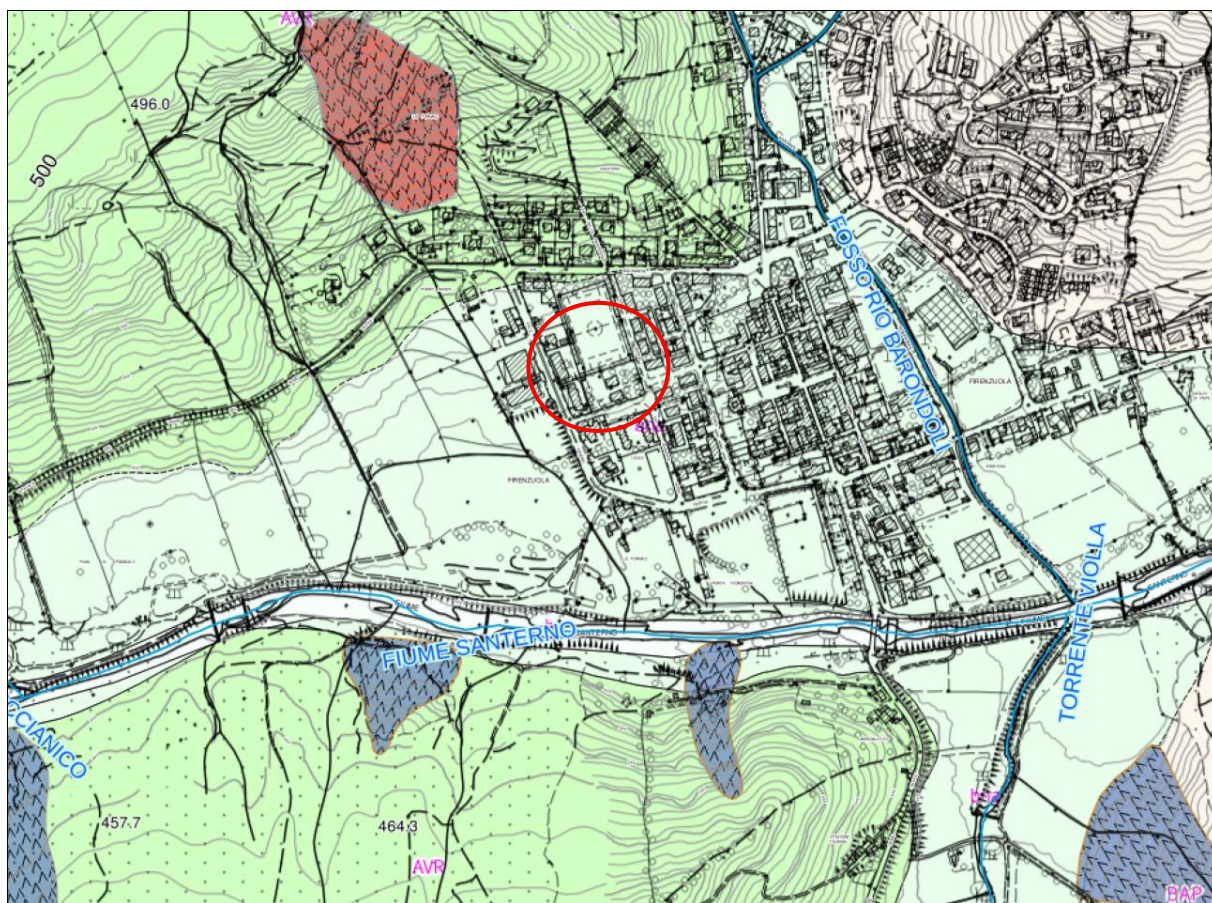


Figura 7 – Carta geologica regionale 1:10000 (estratto da banca dati del portale geologico Regione Toscana)

5 Inquadramento geomorfologico

L'area di intervento ricade nell'ampia conca di Firenzuola costituita in gran parte dai depositi fluviali del fiume Santerno che rappresenta il principale agente nei processi di modellamento dell'area. A settentrione e meridione della conca di Firenzuola affiora il substrato ligure nella formazione delle Argilliti con Calcari (AVC). Spostandosi verso est tale formazione lascia spazio ad altre varietà litologiche come le Brecce Argillose Poligeniche (BAP), le Marne di Marmoreto (MMA) e le Argille di Fiumalbo (FIU). La morfologia è caratterizzata da superfici dolci e leggermente arrotondate che si alternano a quelle calanchive fortemente incise dai processi erosivi in formazioni a componente argillosa. In questi contesti, dove la vegetazione è assai scarsa, sono frequenti movimenti gravitativi, quali soliflusso e colamenti. Nel quadro geomorfologico generale caratterizzato da terreni a granulometria fine spiccano caratteristici rilievi aspri ed isolati costituiti dalle rocce ofiolitiche chiamate comunemente con il termine "rocce verdi".

A più grande scala, Firenzuola è situata sia su depositi quaternari di pianura alluvionale sia su quelli provenienti dallo smantellamento di rilievi posti a nord e a sud del centro abitato. I depositi alluvionali attuali sono caratterizzati da sedimenti ghiaiosi e sabbiosi disposti longitudinalmente lungo il Santerno. Questi, allontanandosi dal corso del fiume, lasciano spazio a depositi più antichi che risultano identificabili grazie ad una scarpata di pochi metri di altezza che costituisce un terrazzo alluvionale.

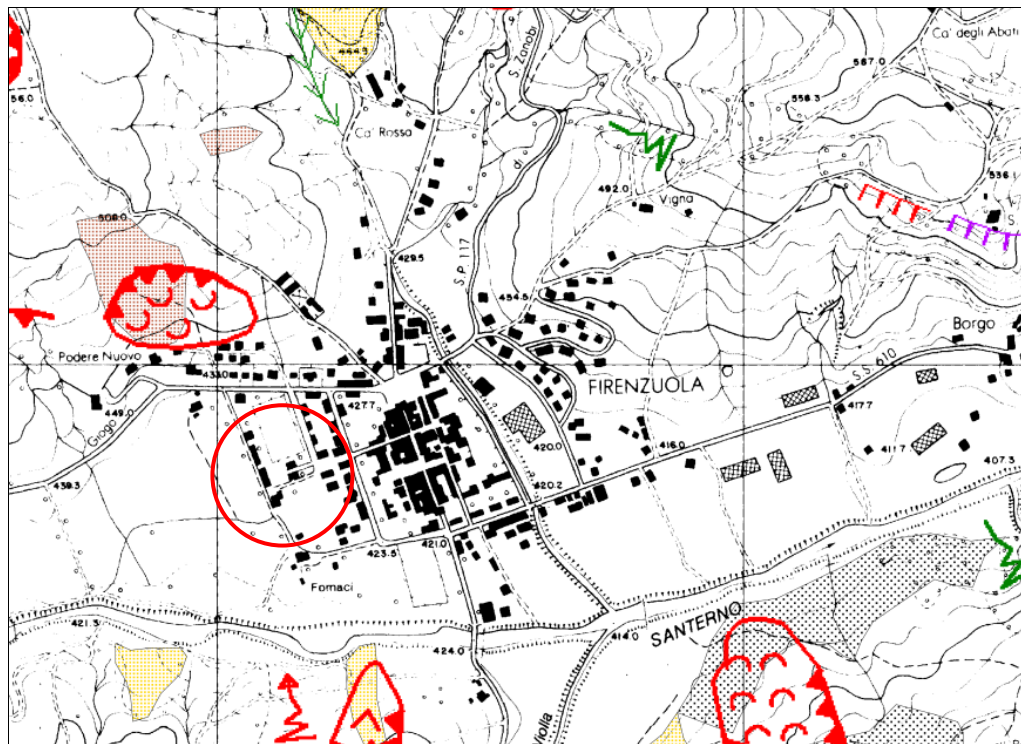


Figura 8 – Estratto da Carta geomorfologica 1:10000 Tav. IV-SO del Piano Strutturale

	Zona di distacco o nicchia di frana attiva
	Corpo di frana per colamento
	Fenomeni gravitativi attivi: scarpata di degradazione dovuta a cause naturali o antropiche
	Fenomeni gravitativi non attivi: scarpata di degradazione dovuta a cause naturali o antropiche
	Zona interessata da movimenti di massa superficiale tipo soliflusso
	Zona soggetta ad erosione superficiale sia diffusa che concentrata
	Impluvio con erosione incanalata e/o diffusa
	Frane in evoluzione; accumuli gravitativi con evidenza di movimenti in atto o recenti
	Frane quiescenti, localmente rielaborati da gravità e/o ruscellamento
	Depositi eluvio-colluviali, detriti e detriti di falda

6 Caratteristiche idrogeologiche dell'area

In termini di idrogeologia, la caratteristica principale di una formazione geologica è rappresentata dalla permeabilità. Si parla di porosità e permeabilità di tipo *primario* o interstiziale se gli spazi tra i

granuli (i pori) si sono formati durante il processo di sedimentazione come nel caso dei cosiddetti *terreni sciolti* quali i limi, le sabbie o le ghiaie; se questi spazi si formano invece a causa della fratturazione della roccia si parla di porosità in grande e di permeabilità *secondaria*.

L'acquifero è il contenitore al cui interno l'acqua si muove da un punto all'altro in maniera più o meno uniforme sotto la spinta di un gradiente di pressione; un flusso le cui velocità e continuità risultano correlate alla classazione granulometrica che determina direttamente questo parametro fisico caratteristico.

La gradazione dei vuoti condiziona quindi il moto dei fluidi nel sottosuolo e la permeabilità varia per questo, anche in rapporto al livello di tettonizzazione della roccia.

Di seguito si riporta una tabella che mostra il grado di variazione del coefficiente di permeabilità K in funzione delle dimensioni dei granuli (da *Castany, 1985*); la permeabilità è rappresentata dal coefficiente K (m/sec) che è stata definita come la quantità d'acqua che, sotto l'azione di un gradiente unitario ed alla temperatura di 20° , attraversa una sezione unitaria del terreno nell'unità di tempo.

$K_{(m/s)}$												
GRANULOMETRIA	omogenea	Ghiaia			Sabbia		Sabbia molto fine		Silt		Argilla	
	varia	Ghiaia grossa e media		Ghiaia e sabbia		Sabbia e argilla — Limi						
GRADI DI PERMEABILITA		ELEVATA					BASSA				NULLA	
TIPI DI FORMAZIONI		PERMEABILI					SEMI-PERMEABILI				IMPER.	

limiti convenzionali

Tabella contenente i valori del coefficiente di permeabilità (*Castany, 1985*)

La permeabilità di un acquifero di solito è superiore a $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Una formazione geologica con una permeabilità inferiore a $1 \cdot 10^{-9}$ m/s viene considerata impermeabile (acquiocludo) perché anche quando è satura d'acqua non ne consente comunque il movimento; una formazione che permette all'acqua di transitare con velocità molto basse viene considerata un acquifero semipermeabile (acquitardo). Il primo acquifero che si trova sotto la superficie del terreno viene chiamato a falda libera (acquifero freatico) perché la quota del livello dell'acqua (livello piezometrico) ha la possibilità di sollevarsi o abbassarsi liberamente; più in profondità se un acquifero è delimitato da due formazioni geologiche impermeabili, la falda - sottoposta a pressioni di tipo geostatico - viene definita di tipo artesiano.

Per quanto riguarda l'area di progetto, è possibile confermare la presenza di una falda libera superficiale la cui profondità è stata determinata consultando le misure relative all'esecuzione dei sondaggi VEL: nel periodo di magra la profondità della falda si attesta intorno ai 6 metri di profondità.

7 Caratterizzazione sismica

7.1 Tipologia dell'opera

In riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/01/08), e al loro aggiornamento avvenuto con il DM 17/01/18, per classificare la tipologia dell'opera oggetto d'intervento vengono riportate le seguenti definizioni:

1. **Vita nominale:** La vita nominale di progetto V_N di un'opera è convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali. In pratica consiste nella durata alla quale deve farsi esplicito riferimento in sede progettuale relativamente alla curabilità, resistenza e funzionalità della costruzione. Riferendosi alla Tab. 2.4.I del DM 14/01/08 che viene confermata nel DM 17/01/18, l'intervento di progetto rientra nelle **costruzioni di tipo 2**, per le quali viene indicata una vita nominale **$V_N \geq 50$ anni: costruzioni con livelli di prestazioni ordinari**.
2. **Classe d'uso:** in presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in 4 classi d'uso e l'intervento

di cui in oggetto ricade in **classe III** così definita: “Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi...”

3. **Periodo di riferimento:** le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso c_u , secondo la seguente relazione: $V_R = V_N \cdot c_u$.

Il valore del coefficiente d'uso c_u varia da 0,7 a 2 al variare della classe d'uso (tab. 2.4.II), e per la classe III corrisponde ad 1.5; si pone quindi il periodo di riferimento per l'intervento di cui in oggetto pari a: $V_R=75$.

7.2 Macrozonazione

La macrozonazione sismica del territorio italiano è stata aggiornata e revisionata nell'ambito dell'O.P.C.M. 3274/2003 prevedendo una suddivisione in 4 zone sulla base di un differente valore dell'accelerazione di picco a_g su terreno a comportamento litoide. Un aggiornamento dello studio di pericolosità di riferimento nazionale (Gruppo di Lavoro, 2004), previsto dall'O.P.C.M. 3274/03, è stato adottato con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006. Il nuovo studio di pericolosità, allegato all'O.P.C.M n. 3519, ha fornito alle Regioni uno strumento aggiornato per la classificazione del proprio territorio, introducendo degli intervalli di accelerazione (a_g), con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni, da attribuire alle 4 zone sismiche.

zona	accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni [a_g]	accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico [a_g]
1	$0,25 < a_g \leq 0,35g$	0,35g
2	$0,15 < a_g \leq 0,25g$	0,25g
3	$0,05 < a_g \leq 0,15g$	0,15g
4	$\leq 0,05g$	0,05g

Il **Comune di Firenzuola** ricade in **zona 2**.

Così come indicato nel DPGR 36/R/2009, in merito alla definizione dei parametri sismici necessari per la determinazione dell'azione sismica di progetto è stata eseguita un'apposita indagine geofisica i cui risultati principali sono presentati di seguito. La relazione sismica completa viene invece allegata alla presente relazione.

7.3 Sismicità di base

Attualmente, con l'entrata in vigore del D.M. 14 gennaio 2008 (di seguito NTC 2008) la stima della pericolosità sismica, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido, viene definita mediante un approccio "sito-dipendente" e non più tramite un criterio "zona-dipendente". In sintesi, non si progetta più stimando l'azione sismica a partire dalla "zona", ma calcolandola ad hoc per il sito di progetto, inserendo la localizzazione nella mappa nazionale di pericolosità (Allegato B delle NTC 2008). Ne consegue che la classificazione sismica del territorio è scollegata dalla determinazione dell'azione sismica di progetto, mentre rimane il riferimento per la trattazione di problematiche tecnico-amministrative connesse con la stima della pericolosità sismica.

Per descrivere la *pericolosità sismica* in un generico sito con precisione sufficiente, sia in termini geografici che in termini temporali, nonché nei modi previsti dalle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni, i risultati dello studio di pericolosità sismica devono essere forniti:

- in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi individuati in termini di latitudine e longitudine, debbono distare di un passo $\leq 0,05^\circ$ (cioè non più di 10 km);
- per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno T_R ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2.475 anni, estremi inclusi;
- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima a_g e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC, nelle condizioni di sottosuolo rigido affiorante (categoria A).

In particolare, i caratteri del moto sismico sul sito di riferimento rigido orizzontale sono descritti dalla distribuzione sul territorio nazionale delle seguenti grandezze:

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

In pratica la pericolosità sismica è stata definita per tutto il territorio nazionale sulla base di un reticolo di punti di riferimento: per un qualunque punto del territorio non ricadente nei nodi del *reticolo di riferimento*, i valori dei parametri di (a_g, F_o, T_c^*) di interesse per la definizione dell'azione sismica di progetto possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia elementare del *reticolo di riferimento* contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici. Nel caso specifico si riportano i nodi del reticolo di riferimento utilizzati per il calcolo dei parametri sismici, più vicini alla zona in questione:

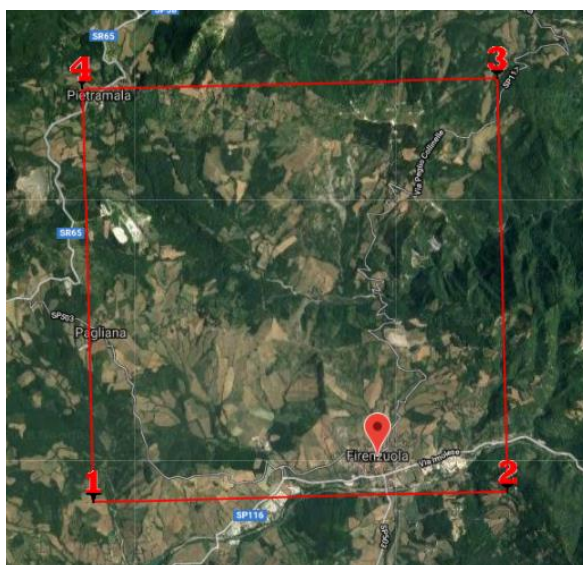


Fig. 9 – nodi del reticolo di riferimento utilizzati per il calcolo dei parametri sismici.

Tipo di elaborazione: Stabilità dei pendii e fondazioni
latitudine: 44,120731
longitudine: 11,37954
Classe: 3
Vita nominale:50

<p>Operatività (SLO):</p> <p>Probabilità di superamento: 81 %</p> <p>Tr: 45[anni]</p> <p>ag: 0,080 g</p> <p>Fo: 2,426</p> <p>Tc*: 0,264s]</p>	<p>Danno (SLD):</p> <p>Probabilità di superamento: 63 %</p> <p>Tr: 75[anni]</p> <p>ag: 0,100 g</p> <p>Fo: 2,19</p> <p>Tc*: 0,273[s]</p>
<p>Salvaguardia della vita (SLV):</p> <p>Probabilità di superamento: 10 %</p> <p>Tr: 712[anni]</p> <p>ag: 0,226g</p> <p>Fo: 2,459</p> <p>Tc*: 0,305[s]</p>	<p>Prevenzione dal collasso (SLC):</p> <p>Probabilità di superamento: 5 %</p> <p>Tr: 1462[anni]</p> <p>ag: 0,280 g</p> <p>Fo: 2,510</p> <p>Tc*: 0,317[s]</p>

7.4 Risposta sismica locale - approccio semplificato

Come spiegano le NTC 2018:

Il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

L'azione sismica è definita in termini di accelerazione per siti di categoria A. Perciò, nel caso in cui l'intervento avvenga su un sito caratterizzato da proprietà litotecniche più scadenti rispetto a quelle conferite alla categoria A, si dovrà valutare le modifiche (chiamate effetti stratigrafici) che il moto sismico subisce attraversando il mezzo in questione. Unitamente agli effetti stratigrafici si dovrà tenere conto anche delle condizioni topografiche, poiché entrambi questi fattori concorrono a modificare l'azione sismica di superficie.

In modo sintetico i due effetti possono essere così descritti.

- *effetti stratigrafici*, legati alla successione stratigrafica, alle proprietà meccaniche dei terreni, alla geometria del contatto tra il substrato rigido e i terreni sovrastanti ed alla geometria dei contatti tra gli strati di terreno;
- *effetti topografici*, legati alla configurazione topografica del piano campagna. La modifica delle caratteristiche del moto sismico per effetto della geometria superficiale del terreno va attribuita alla focalizzazione delle onde sismiche in prossimità della cresta dei rilievi a seguito dei fenomeni di riflessione delle onde sismiche ed all'interazione tra il campo d'onda incidente e quello diffratto. I fenomeni di amplificazione cresta-base aumentano in proporzione al rapporto tra l'altezza del rilievo e la sua larghezza.

Gli effetti della risposta sismica locale possono essere valutati con metodi semplificati oppure eseguendo specifiche analisi. Nel caso specifico, è stata effettuata una campagna di indagini sismiche dalle quali è stato possibile classificare il sito in esame in **categoria di sottosuolo C**, come meglio descritto nei paragrafi successivi.

L'accelerazione sismica è anche influenzata, come detto, dalle condizioni topografiche in cui si trova il sito d'interesse poiché esse vanno a modificare l'azione sismica in ampiezza, durata e contenuto in frequenza, incidendo sullo spettro di risposta elastico. Pertanto, per le caratteristiche morfologiche locali che in questo caso sono relative ad una configurazione geometrica dell'area pianeggiante, si attribuisce alla zona in studio la categoria **T1: pendio con inclinazione media $i \leq 15^\circ$** .

Parametri sismici:

Sito in esame.

latitudine: 44,120731
longitudine: 11,37954
Classe: 3
Vita nominale 50

Siti di riferimento

Sito 1 ID: 18506	Lat: 44,1151	Lon: 11,3318	Distanza: 3864,864
Sito 2 ID: 18507	Lat: 44,1164	Lon: 11,4014	Distanza: 1808,065
Sito 3 ID: 18285	Lat: 44,1664	Lon: 11,3997	Distanza: 5321,316
Sito 4 ID: 18284	Lat: 44,1651	Lon: 11,3300	Distanza: 6322,917

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 75 anni
Coefficiente cu: 1.5

Per le componenti orizzontali del moto e per le varie categorie di sottosuolo la forma spettrale su sottosuolo di categoria A viene modificata attraverso dei coefficienti sismici:

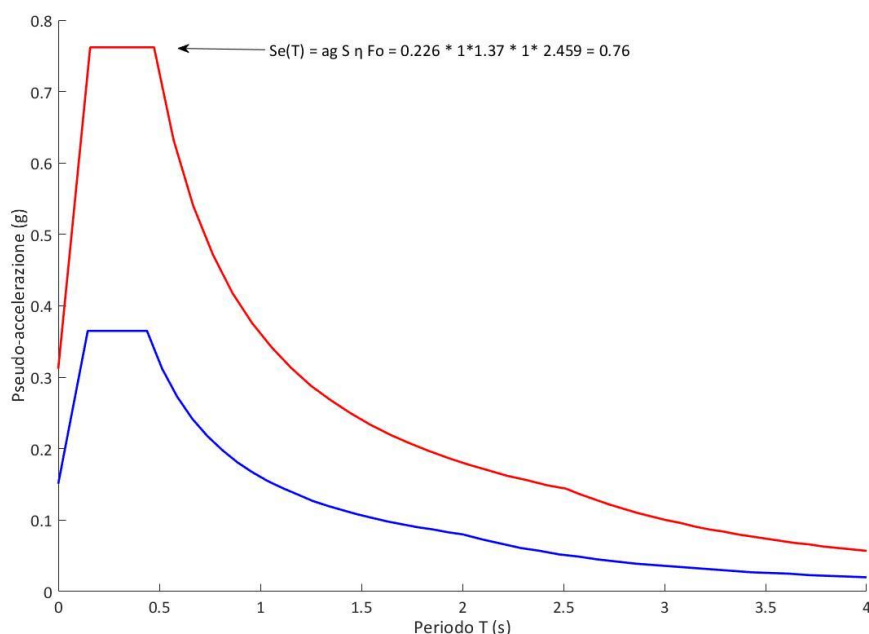
- *coefficiente stratigrafico S_s* (relativo all'amplificazione stratigrafica e definito come il rapporto tra il valore dell'accelerazione massima attesa in superficie e quello su sottosuolo di categoria A);

- *coefficiente topografico* S_T (definito in funzione delle condizioni topografiche, come da Tabella 3.2.VI delle NTC e che, nel caso in questione assume valore unitario);
- *coefficiente* C_c (dipende anch'esso dalla categoria di sottosuolo).

Tali coefficienti sono riportati di seguito insieme ai valori dei coefficienti sismici orizzontale K_h e verticale K_v e del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

Coefficienti Sismici

SLO:	SLD:	SLV:	SLC:
Ss: 1,500	Ss: 1,500	Ss: 1,370	Ss: 1,280
Cc: 1,630	Cc: 1,610	Cc: 1,550	Cc: 1,530
St: 1,000	St: 1,000	St: 1,000	St: 1,000
Kh: 0,024	Kh: 0,030	Kh: 0,087	Kh: 0,100
Kv: 0,012	Kv: 0,015	Kv: 0,043	Kv: 0,050
Amax: 1,178	Amax: 1,471	Amax: 3,035	Amax: 3,514
Beta: 0,200	Beta: 0,200	Beta: 0,280	Beta: 0,280



7.5 Potenziale di liquefazione

Nell'area esaminata è stata presa in considerazione la possibilità che possa verificarsi il fenomeno della liquefazione in concomitanza di un evento sismico.

Si tratta di un evento, peraltro abbastanza raro, che avviene soltanto nelle sabbie pulite a granulometria omogenea e provoca, in presenza di falda, la completa perdita di resistenza in seguito all'azione sismica. I terreni dell'area in studio sono riferibili a depositi fluvio-lacustri la cui composizione è prevalentemente siltoso-argillosa; nonostante la presenza di un livello di falda superficiale, si può quindi escludere il verificarsi del fenomeno della liquefazione.

8 Indagini svolte

Oltre a quanto già disponibile negli immediati intorno dell'area in questione (sondaggi geognostici, sismica VEL, etc.), è stata appositamente realizzata una campagna di indagine articolata in n° 6 prove penetrometriche statico/dinamiche ubicate direttamente nella zona d'interesse e nelle sue immediate

vicinanze per la caratterizzazione stratigrafica e geotecnica del terreno di fondazione ed in un'analisi geofisica mediante tecnica MASW per la definizione dell'azione sismica di progetto.

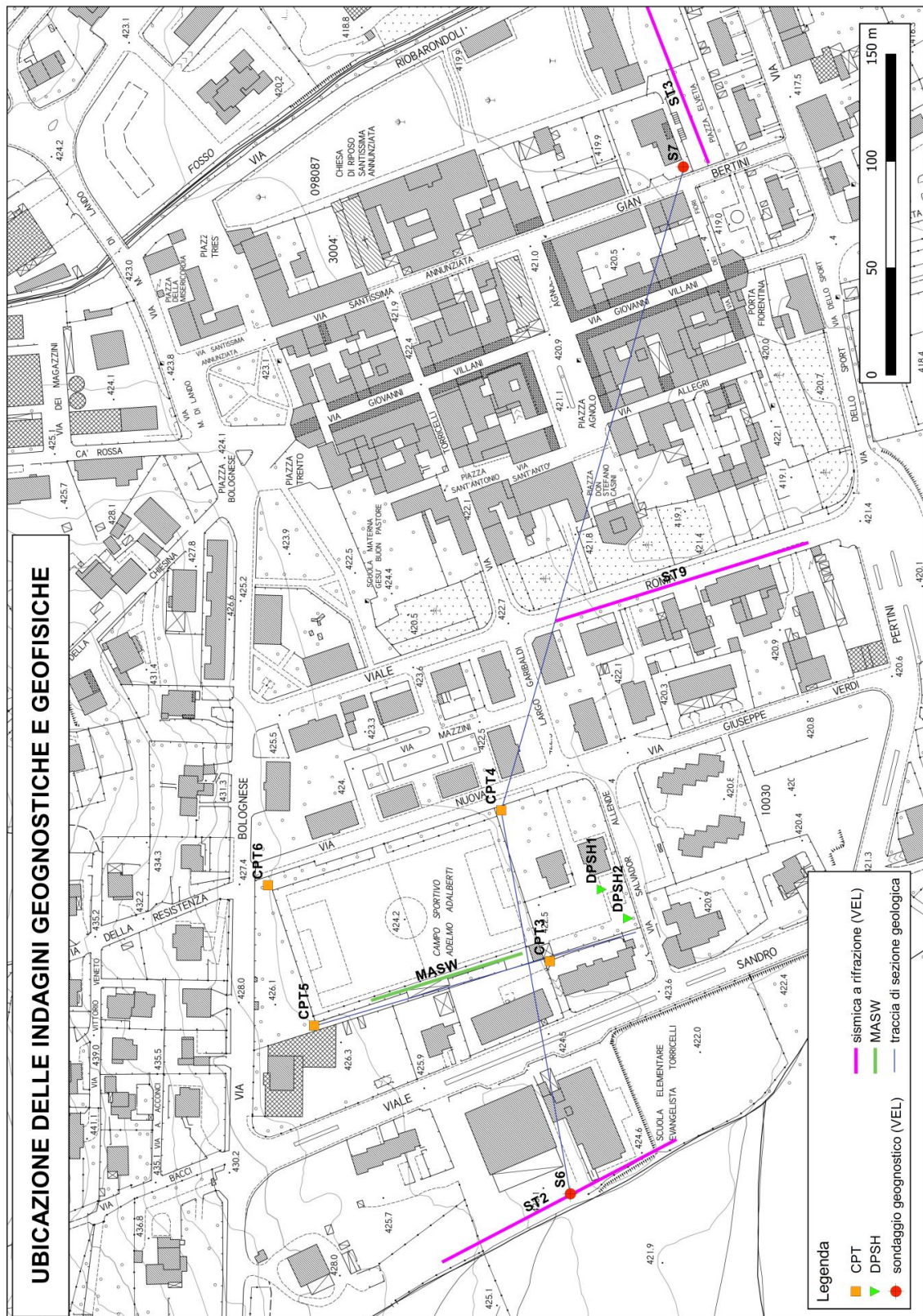


Figura 10 – Ubicazione delle indagini geognostiche e della prova geofisica MASW.

Indagini geognostiche

Il giorno 23/10/2017 sono state eseguite le prove penetrometriche DPSH e CPT dalla *Gea s.n.c. – Indagini Geognostiche*, spinte fino ad una profondità di 8-10 m rispetto al piano campagna. Tali indagini sono state ubicate così come riportato in Figura 10.

Nella zona di specifico interesse, dati i materiali esistenti, non è stato possibile “ancorarsi” e quindi sono state realizzate le due prove DPSH, pur confrontabili con le vicine prove CPT effettuate in adiacenza al campo sportivo. I grafici risultanti sono di seguito allegati e, per paragone, si riportano anche i grafici CPT che evidenziano strette analogie:

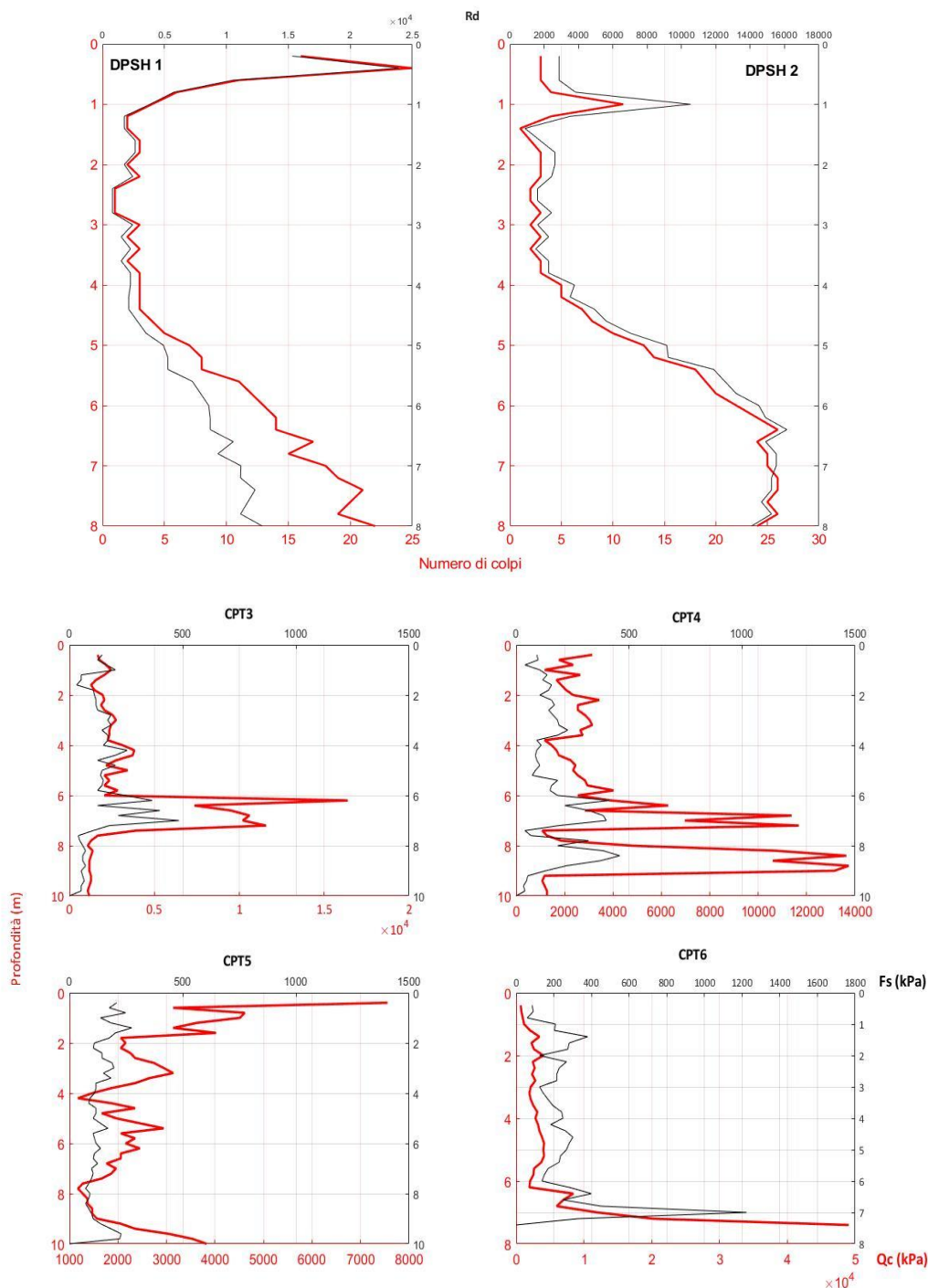


Figura 11 – Risultati indagini penetrometriche dinamiche e statiche

Per maggiore dettaglio sulle varie prove penetrometriche si rimanda all'allegato in cui sono specificate le caratteristiche della sonda utilizzata e le correlazioni utilizzate ma, in prima analisi, appare ben visibile, dopo un primo livello di circa 1 metro di spessore costituito probabilmente da terreno di riporto, la presenza di un materiale prevalentemente fine fino ai 4-5 metri di profondità e quindi un materiale sempre più consistente fino a fondo foro costituito probabilmente da limi sabbiosi, sabbie e ghiaie riferibili a depositi alluvionali del Santerno.

Analogamente per le prove statiche, i risultati appaiono comparabili. Le prove CPT3 e CPT4 (più vicine al sito in questione) mostrano una buona omogeneità in termini di resistenza alla punta fino a circa 6 m dal piano campagna; a tale profondità si assiste invece ad un repentino aumento di resistenza alla punta, accompagnato anche da un moderato incremento nella resistenza all'attrito laterale. Questo fenomeno è stato interpretato come la conseguenza del passaggio in livelli granulari ghiaioso – sabbiosi tipici dei depositi alluvionali. Questi depositi a grana grossolana sarebbero appunto testimoni dei processi di erosione e sedimentazione del fiume Santerno. Tale unità grada verso l'alto, lasciando spazio a livelli di granulometria più fine prevalentemente della classe limosa. La prova penetrometrica statica 3 e 4 si è spinta oltre il letto *stratigrafico* a frazione grossolana registrando una brusca diminuzione della resistenza alla punta, riferibile alla presenza di terreni argillosi plastici. Tali terreni sono stati attribuiti alla fase di sedimentazione lacustre pleistocenica che ha caratterizzato tutta l'area del comune di Firenzuola. Due sondaggi (S6 e S7) eseguiti nel 2011 nell'ambito del progetto VEL confermano questa successione litostratigrafica, raggiungendo anche il substrato litoide a circa 20 metri di profondità rappresentato dalla formazione AVC (*Argilliti, talora marnose, in bande verdi, grigie e nerastre al taglio fresco e nocciola in superficie alterata, in strati sottili con intercalate calcilutiti grigie e siltiti e areniti torbiditiche sottili*). Esso può essere considerato come la base di appoggio di tutti i depositi sedimentari, di ambiente sia lacustre che fluviale, che si sono succeduti nella fase pleistocenica di Firenzuola così come riportato nella sezione Est-Ovest di Figura 14.

Le prove penetrometriche CPT 5 e CPT 6 invece mostrano una buona uniformità nei terreni investigati riferibili complessivamente ai sedimenti della fase lacustre. Non sono stati riscontrati pertanto livelli di grana grossolana originati dalla sedimentazione fluviale del Santerno. La causa dell'assenza può essere imputata a fasi successive di erosione dei depositi terrazzati o a motivi topografici. In questo caso, è possibile ipotizzare che la porzione più settentrionale del sito di interesse non è stato sottoposto alla dinamica fluviale per motivi di distanza e di quota dal paleo alveo. La prova CPT 6 inoltre è andata a rifiuto alla profondità di 7 metri, elemento che potrebbe testimoniare la presenza di una porzione più superficiale della formazione AVC; quest'ultima, infatti, affiora poco più a nord e costituisce l'ossatura dei primi rilievi collinari posti sia a nord che a sud del bacino di Firenzuola, così come visibile nella carta geologica 1:10000 di Figura 7. Dai valori ottenuti è stato possibile ricavare i parametri geotecnici principali delle unità individuate, come descritto più avanti.

Indagine geofisica

È stata anche effettuata una prova MASW con lo scopo di ottenere una caratterizzazione sismostratigrafica del terreno di fondazione e di definire quindi la categoria di sottosuolo.

Il metodo MASW (introdotto da Park et al., 1999) è una tecnica di indagine non invasiva che consente di determinare il profilo di velocità delle onde di taglio nel sottosuolo attraverso la misura delle onde di superficie registrate da un *array* di geofoni disposti in superficie secondo una data geometria. Le onde superficiali sono generate dall'interferenza tra le onde di volume che impattano la superficie libera del terreno dando origine alle onde di *Rayleigh* e alle onde di *Love* accomunate dalla caratteristica che la loro ampiezza diminuisce esponenzialmente con la profondità.

Le velocità di propagazione delle onde superficiali cambiano in funzione della relativa lunghezza d'onda e della frequenza; l'andamento delle velocità di fase in funzione della frequenza è detta curva di dispersione la quale fornisce informazioni sul profilo di velocità nel sottosuolo. Alla base del metodo MASW si assume l'esistenza di un semispazio stratificato secondo strati paralleli e orizzontali, quindi una

limitazione all'applicabilità del metodo potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative (maggiori di 20°) sia della topografia che delle discontinuità litostratigrafiche.

La metodologia consiste in tre fasi:

- calcolo della curva di dispersione sperimentale;
- picking della curva di dispersione;
- individuazione del profilo di velocità di Vs attraverso il processo di inversione.

Le indagini MASW sono prove sismiche *attive*, poiché necessitano di un campo d'onde generato da una sorgente antropica posta superficie

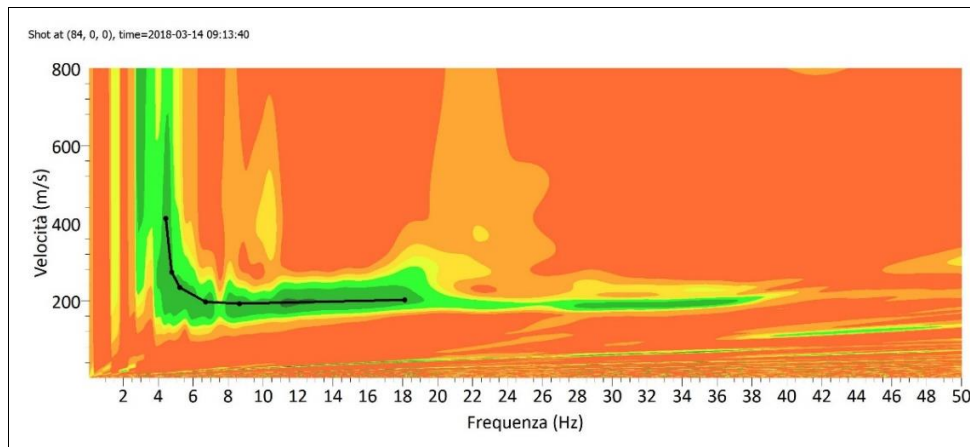


Fig. 12 – curva di dispersione combinata MASW.

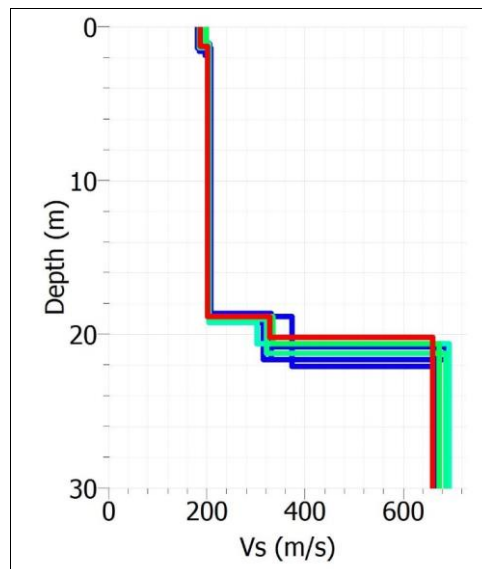


Fig. 13 – profilo delle velocità delle onde S.

Riguardo alla identificazione della categoria di sottosuolo di riferimento secondo le *nuove* NTC 2018 leggiamo che:

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m [...] e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Dunque, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità $V_{s,30}$ di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità, definita dalla seguente:

Equazione 1

$$v_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}}$$

Nell'area in esame la velocità equivalente $V_{s,30}$ di propagazione delle onde di taglio calcolata, a partire da p.c., è pari a **270 m/s** circa (Fig. 13). Il sito può essere associato, secondo le nuove NTC 2018, alla **categoria C**, a cui per normativa sono associati:

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

9 Caratterizzazione del terreno di fondazione

Modello geologico generale

Primo passo nella progettazione geotecnica riguarda la definizione di un modello stratigrafico sulla base delle indagini effettuate in sito e quelle pregresse, così come specificato nella NTC 2018 nel paragrafo 6.2.1: *il modello geologico di riferimento è la ricostruzione concettuale della storia evolutiva dell'area di studio, attraverso la descrizione delle peculiarità genetiche dei diversi terreni presenti, delle dinamiche dei diversi termini litologici, dei rapporti di giustapposizione reciproca, delle vicende tettoniche subite e dell'azione dei diversi agenti morfogenetici.*

Nel nostro caso, come già evidenziato, abbiamo eseguito n° 2 prove dinamiche DPSH nell'area parcheggio limitrofa al campo sportivo e n° 4 prove statiche CPT, in corrispondenza degli angoli del campo da calcio. A queste informazioni si aggiungono quelle provenienti dalla banca dati VEL della Regione Toscana che hanno fornito i risultati i due sondaggi (S6 e S7 in Figura 14) e quelle provenienti dalla cartografia e letteratura geologica.

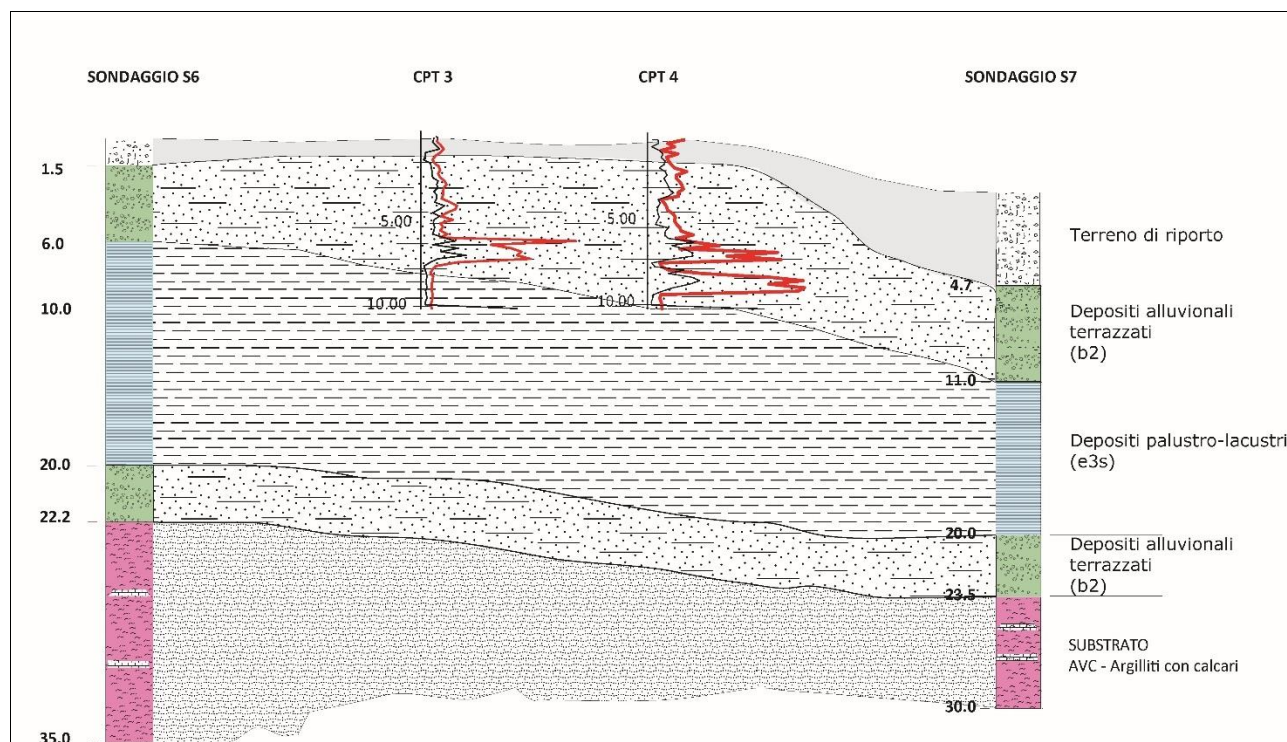


Figura 14 – Modello geologico generale dell'area di intervento ottenuto integrando le informazioni provenienti dalla banca dati di VEL e quelle ottenute dalle indagini geognostiche eseguite in sito a supporto della presente relazione. In allegato la tavola della sezione in formato A3.

L'insieme delle informazioni ha permesso di costruire un modello del sottosuolo a supporto della progettazione geotecnica, il cui risultato è riportato in Figura 14 e in allegato alla seguente relazione.

Dal modello si evince che la stratigrafia presente nell'area di studio è caratterizzata da un deposito sedimentario, con spessore di circa 20 m, posto al tetto della formazione caotica (argille e calcari) AVC che nell'area costituisce il bedrock geotecnico.

Il cuneo sedimentario è caratterizzato prevalentemente da un deposito argilloso di ambiente palustre-lacustre, denominata in figura dalla sigla *e3s*, la quale presenta depositi alluvionali al tetto ed alla base, identificati dalla sigla *b2*.

Il passaggio dai depositi alluvionali a quello palustro-lacustre è stato riconosciuto sia dalle prove CPT, sia dalla MASW che evidenzia un repentino aumento della velocità delle onde di taglio Vs a profondità di 20m circa.

Modello geotecnico: parametri caratteristici

Il modello geotecnico che segue, è stato ottenuto partendo da quello presentato nel paragrafo precedente che ne costituisce la base concettuale di partenza. È stato quindi arricchito da tutte le informazioni geotecniche provenienti dalle prove geognostiche eseguite in corrispondenza del piano di posa delle fondazioni, dalle prove di laboratorio dei campioni appartenenti ai due sondaggi S6 e S7, dalle varie prove sismiche e dalla prova geofisica MASW effettuata appositamente.

Il risultato è espresso in termini di unità litotecniche alle quali sono state associate i parametri geotecnici caratteristici e di progetto, di seguito riportati e relativi alla zona d'intervento.

In riferimento alle NTC2018, al paragrafo 6.2.2, il concetto di parametro caratteristico viene così presentato:

Per valore caratteristico di un parametro geotecnico deve intendersi una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro per ogni stato limite considerato. I valori caratteristici delle proprietà fisiche e meccaniche da attribuire ai terreni devono essere dedotti dall'interpretazione dei risultati di specifiche prove di laboratorio su campioni rappresentativi di terreno e di prove e misure in sito.

La Circolare 02.02.2009 (Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni) al paragrafo C6.2.2 riprende la definizione di parametro caratteristico facendo esplicito riferimento agli Eurocodici:

"nella progettazione geotecnica, in coerenza con gli Eurocodici, la scelta dei valori caratteristici dei parametri deriva da una stima cautelativa, effettuata dal progettista, del valore del parametro appropriato per lo stato limite considerato."

I valori caratteristici dei parametri dovranno essere in grado di rappresentare adeguatamente e con ragionevole cautela il comportamento meccanico del terreno per quanto concerne lo stato limite da analizzare. Sulla base di quanto stabilito dal Testo Unico, viene definito valore caratteristico *"quel valore che ha il 95% di probabilità di essere superato (cioè il 5% di probabilità di essere superato verso il basso"*: tale definizione implica quindi già un fattore di sicurezza, in quanto risulta assai inferiore ai valori medi utilizzati con le metodologie di calcolo precedenti. Nei casi in cui è coinvolto un elevato volume di terreno, ovvero per la caratterizzazione del sedime di fondazioni superficiali o per verifiche di stabilità, dove il volume interessato dalla superficie di rottura è grande, è perciò consigliabile utilizzare i valori caratteristici prossimi ai valori medi.

Lo scopo degli strumenti matematici della statistica, applicata alla stima dei valori caratteristici delle proprietà del terreno, è di consentire di estrapolare i dati misurati all'interno del volume indagato, procedendo in modo razionale quindi riducendo al minimo l'incertezza insita in questa operazione. Tale incertezza potrebbe infatti portare ad una sottostima o ad una sovrastima dei parametri geotecnici da utilizzare successivamente nelle prove di stabilità. Nello specifico è stato utilizzato la *distribuzione di Student* che risulta indispensabile per la determinazione del valore caratteristico di una determinata

variabile geotecnica, fissata una certa probabilità di non superamento, in presenza di un numero ridotto di dati. Perciò per calcolare un valore cautelativo della media dei valori abbiamo utilizzato la seguente equazione:

$$x_m[5\%] = \mu(x) + t \frac{s(x)}{\sqrt{n}}$$

dove:

x_m indica il valore medio cautelativo che ha probabilità di non superamento del 5% all'interno dell'intera popolazione

$\mu(x)$ è la media della popolazione che viene approssimata alla media campionaria

$s(x)$ è la deviazione standard campionaria

n corrisponde al numero di campioni

t è la variabile *t Student* che viene generalmente tabellata in funzione del grado di libertà $v=n-1$, dove n è il numero di campioni. Per esempio, con una probabilità di non superamento del 5% (di un certo valore da parte di una certa variabile geotecnica), t varia da -6,314 per campioni con 2 individui a -1,658 per campioni con 121 individui.

Per ogni livello di terreno individuato, quindi, si forniscono di seguito i relativi parametri caratteristici:

Prof. (m)	Unità geotecniche	parametri caratteristici				
		γ [KN/m ³]	ϕ [°]	C [kPa]	Cu [kPa]	E [kPa]
0.0 – 1.0	unità 1 – livello di riporto	18.5	23			6200
1.0 – 4.6	unità 2 – livello argilloso limoso	19.5	21	12	40	7000
4.6 – 8.0	unità 3 – livello sabbioso limoso	18.5	27			13000

Volume significativo

Per la corretta definizione del modello geotecnico, è necessario definire in via prioritaria il volume di terreno sotto le fondazioni che verrà interessato dai bulbi di pressione e dalle variazioni tensionali indotte dall'intervento di progetto, cioè il *volume significativo* definito nelle NTC 2018 paragrafo 6.2.2 come

Per volume significativo di terreno si intende la parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso. Le indagini devono permettere la definizione dei modelli geotecnici di sottosuolo necessari alla progettazione.

Tale volume, in pratica, può essere ricondotto alla porzione di sottosuolo in cui l'incremento di pressione indotto dall'intervento risulta maggiore del 10% rispetto alla pressione litostatica efficace. Generalmente, secondo quanto indicato nelle Raccomandazione A.G.I. (1977) e nell'Eurocodice 7 il volume di terreno *D* interessato dalle variazioni tensionali avrà una profondità di valore compreso fra 1 e 2 la larghezza della fondazione *B*.

10 Conclusioni

Per quanto sopra esposto il progetto esaminato risulta compatibile con le caratteristiche geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche dell'area presa in considerazione ed in via preliminare anche con le caratteristiche fisico meccaniche del terreno di fondazione.

Effettiva compatibilità e verifiche più specifiche dal punto di vista geomeccanico dovranno esser prese in considerazione in un'apposita Relazione Geotecnica.

Si consiglia fin da adesso, in tutti i casi, di porre adeguata attenzione allo studio di un adeguato sistema di smaltimento delle acque meteoriche superficiali, al fine di non farle interferire più di tanto con il sistema di fondazione adottato.

Firenze, maggio 2018

Marco Folini



**COMUNE DI FIRENZUOLA**

STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA E INGEGNERIA AMBIENTALE
50129 FIRENZE – Viale Don Minzoni, 40 – www.stgassociati.it – studio@stgassociati.it
Tel. 055.217479 – P.IVA 03740890482

Sommario

Premessa	3
Metodologia utilizzata e strumentazione impiegata.....	3
Indagini sismiche MASW: Multichannel Analysis of Surface Waves	4
Le onde di Rayleigh e la dispersione	4
L'indagine MASW	5
Risultati.....	6
Curva di dispersione	6
Processo di inversione	7
Profilo di velocità delle onde S	7



Premessa

La presente relazione tecnica riporta i risultati dell'indagine sismica ad onde di superficie MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) eseguita in data 14/03/2018, su del comune di Firenzuola, presso il campo sportivo in piazza G. Garibaldi nel centro abitato del comune. Lo scopo dell'indagine è stato quello di definire la categoria di sottosuolo a supporto della progettazione di quattro torri faro ai quattro angoli del campo da calcio.

La disposizione dello stendimento a 24 geofoni è riportata in Figura 1.

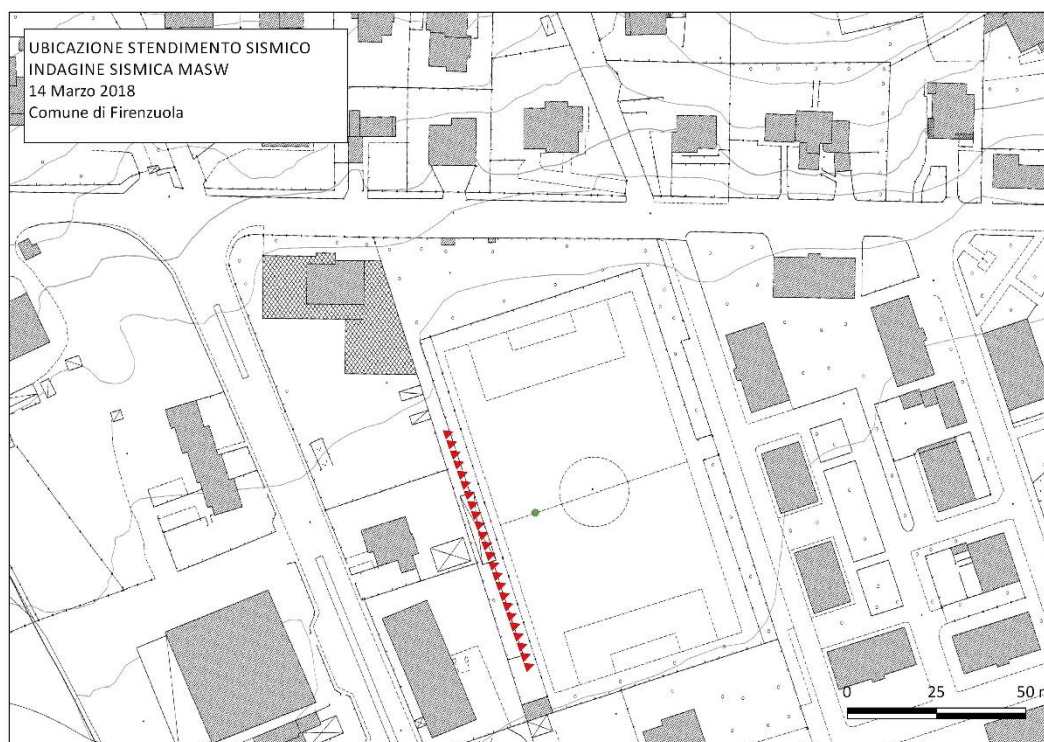


Figura 1 – Ubicazione dello stendimento sismico a 24 canali da 10 Hz.

Metodologia utilizzata e strumentazione impiegata

Le registrazioni sono state eseguite utilizzando un sismografo Pasi 16S-U a 24 canali con 24 bit di risoluzione. La spaziatura intergeofonica è stata pari a 3 m, mentre la battuta è stata effettuata ad una distanza di 6 m dall'ultimo geofono.

Il sistema di acquisizione in particolare presenta le seguenti caratteristiche tecniche:

Risoluzione	24 bit con algoritmo proprietario
Sampling time	da 125 μ s a 2 ms su 24 canali
Lunghezza registrazione	da 32 ms a 65536 ms
Filtri	digitali: in post-acquisizione (50-60 Notch, 250LP) antialiasing: attivi, LPF, 8°ordine Butterworth; attenuazione -48dB/oct (-160dB/dec); $f_0=5/8f_{nyq}$; accuratezza $\pm 1\%$ freq.di taglio
Enhancement	con/senza preview totale/parziale
Delay	0-8000ms (step di 1ms)

Per quel che riguarda i sensori, per le indagini sismiche sono stati utilizzati 24 geofoni "PASI" verticali, del tipo elettromagnetico a bobina mobile con frequenza caratteristica di 10Hz, 70 % di smorzamento. Il cavo di connessione tra geofoni e sismografo è uno standard NK-27-21C. Generalmente come sorgente di

energia sismica, nel caso di rilievi a piccola profondità si fa uso di una mazza da 10 kg che nel nostro caso ha consentito di ottenere risultati ottimali.

Indagini sismiche MASW: Multichannel Analysis of Surface Waves

Le onde di Rayleigh e la dispersione

Le onde di superficie presentano peculiarità che le rendono adatte alla caratterizzazione del sottosuolo. Si originano dalla condizione di annullamento dello sforzo di taglio al bordo di un dominio, come ad esempio si verifica in corrispondenza del piano campagna, all'interfaccia tra il terreno e l'atmosfera. La propagazione di tali perturbazioni è essenzialmente bidimensionale, in quanto avviene principalmente in superficie, caratteristica che consente loro di essere meno affette dall'attenuazione geometrica rispetto alle onde di volume (P, S). La propagazione di queste ultime infatti coinvolge tutto il mezzo sia in orizzontale che in verticale; le onde di superficie invece subiscono un decadimento esponenziale nella direzione verticale. È stato verificato che la maggior parte della energia di deformazione associata alla loro propagazione è confinata tra $\lambda/2$ e $\lambda/3$ di profondità. Onde di Rayleigh con maggiore lunghezza d'onda penetrano più in profondità. Inoltre, poiché la lunghezza d'onda è proporzionale al reciproco della frequenza, secondo la relazione $v = \lambda f$, è possibile affermare che onde ad alta frequenza sono confinate in superficie, mentre le componenti a bassa frequenza coinvolgono il mezzo anche a profondità maggiori (**Figura 2**).

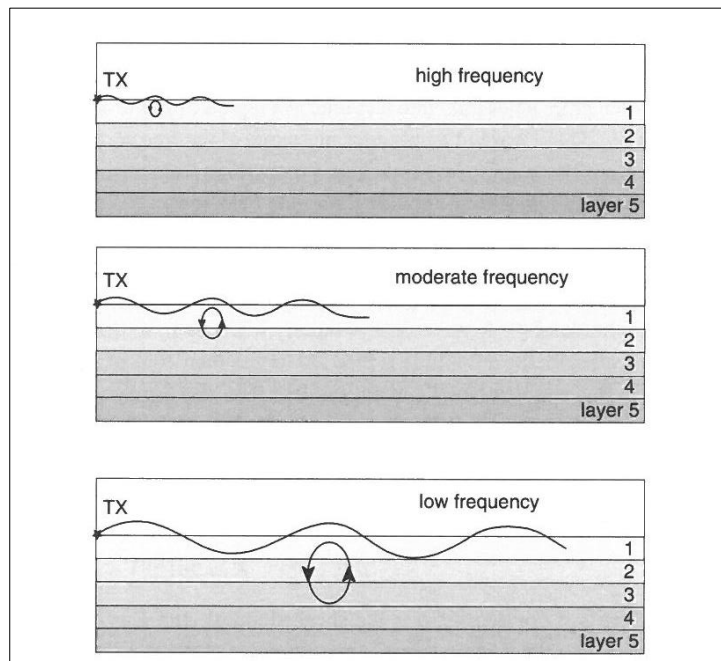


Figura 2 - La profondità di penetrazione delle onde di Rayleigh dipende dalla lunghezza d'onda. Nel terzo caso (in basso) l'armonica a bassa frequenza (cioè lunghezza d'onda maggiore) riesce a raggiungere lo strato n. 3, a differenza delle due armoniche precedenti (in mezzo e in alto) a più alta frequenza (Everett, 2013).

L'onda di Rayleigh in un semispazio elastico isotropo e omogeneo non è dispersiva, cioè la sua velocità di propagazione è una funzione delle sole proprietà meccaniche del mezzo (parametri elastici di rigidità e densità) ma non è funzione della frequenza. Nei mezzi stratificati invece si assiste alla nascita del fenomeno della dispersione che comporta la dipendenza della velocità di propagazione dalla frequenza: in un mezzo normalmente dispersivo, onde a frequenza minore penetrano più in profondità (**Figura 2**), propagandosi in mezzi più rigidi a velocità maggiore rispetto alle armoniche presenti in zone più superficiali. Da questo è possibile comprendere come ad ogni armonica sia possibile associare una propria velocità di propagazione (chiamata velocità di fase). Il grafico che associa a ciascuna frequenza la velocità di fase è chiamato **curva di dispersione** o **grafico di spettri di velocità di fase di onde di Rayleigh**. La curva di dispersione è costruita

mediante un procedimento di correlazione tra le singole armoniche contenute nel segnale, al termine del quale è possibile associare a ciascuna frequenza una velocità di fase. Poiché velocità di fase e frequenza sono legate dall'equazione $V_R(f) = \lambda(f) * f$, è possibile stimare per ciascuna coppia $[V_R(f), f]$ il valore di $\lambda(f)$, e da quest'ultimo stimare la profondità alla quale la particolare armonica ha indagato. Quindi si ricavano le coppie velocità di fase di Rayleigh – profondità Z $[V_R(f), Z]$. Successivamente, grazie alla seguente

Equazione 1

$$V_s \sim 1.1 V_{Rayleigh} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

che lega la velocità di fase delle onde di Rayleigh con le onde di S, si può associare a ciascuna velocità delle onde di taglio S un profondità.

L'indagine MASW

Il metodo MASW (introdotto da Park et al., 1999) è una tecnica di indagine non invasiva che consente di determinare il profilo di velocità delle onde di taglio nel sottosuolo attraverso la misura delle onde di superficie registrate da un array di geofoni disposti in superficie secondo una data geometria. Le onde superficiali sono generate dall'interferenza tra le onde di volume che impattano la superficie libera del terreno dando origine alle onde di Rayleigh e alle onde di Love, accomunate dalla caratteristica che la loro ampiezza diminuisce esponenzialmente con la profondità.

La procedura standard prevede:

1. L'acquisizione dei dati sperimentali (serie nel dominio dei tempi)
2. Elaborazione dei segnali per ottenere la curva di dispersione sperimentale
3. Inversione per ricavare dalla curva di dispersione un possibile profilo di velocità delle onde taglio (che corrisponde alla variazione della rigidità del mezzo con la profondità), la cui curva teorica sintetica riproduca bene quella sperimentale osservata.

Nella **Figura 3** è schematizzata la disposizione della strumentazione utilizzata per le indagini sismiche attive.

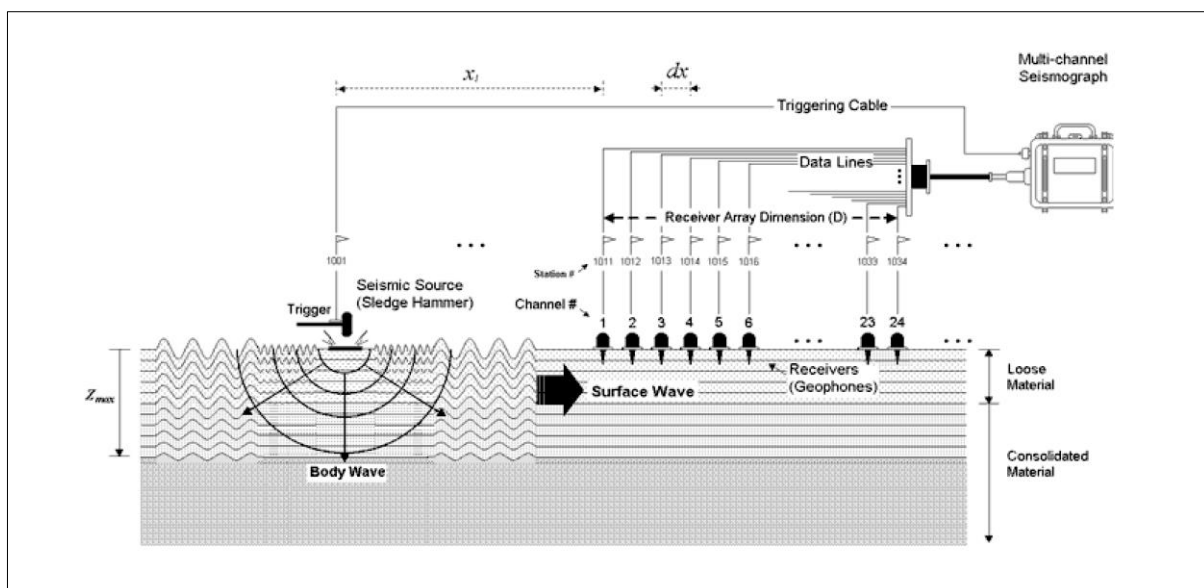


Figura 3 - Modello schematico utilizzato per l'acquisizione delle onde di Rayleigh durante una prova sismica attiva MASW. La sorgente è rappresentata dalla battuta con il martello; i ricevitori da geofoni numerati in nero. Il sistema trigger permette di dare l'avvio all'acquisizione del segnale non appena è stata eseguita la battuta.

Risultati

Curva di dispersione

Dopo la fase di acquisizione si è proceduto con il *pre-processing* che prevede l'analisi di tutte le tracce velocimetriche al fine di valutare la loro corretta acquisizione. Tutte le 24 registrazioni acquisite sono state considerate idonee per la prova MASW in quanto poco disturbate dal rumore antropico circostante. L'elaborazione delle tracce temporali tramite il programma *Geopsy* ha permesso di ottenere la curva di dispersione riportata in **Figura 4**.

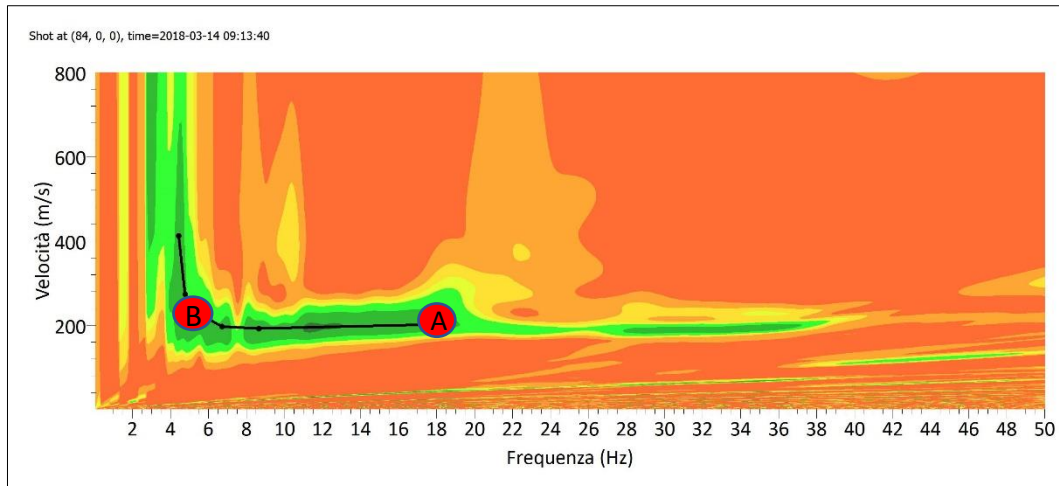


Figura 4 - Grafico di spettri di velocità di fase in cui i punti di maggior correlazione definiscono la curva di dispersione sperimentale delle onde di Rayleigh (del modo fondamentale). Il picking della curva è rappresentato in nero. Il colore verde rappresenta la velocità di massima correlazione associata a ciascuna armonica.

Prima di procedere con il processo di inversione, è necessario comprendere le informazioni (in termini di profondità di indagine massima e minima e velocità ad esse associate) che possiamo dedurre dalla curva di dispersione, così da poter calibrare al meglio il modello del sottosuolo. Il primo passo consiste di derivare tutte le coppie composte dalla frequenza e dalla velocità spettrale ad essa associata. Perciò, là dove la curva di massima correlazione (in verde) presenta variazioni elevate per una determinata frequenza, ad essa non potrà essere associata nessuna velocità spettrale.

Nel nostro caso, la curva di dispersione del modo fondamentale è definita tra le frequenze di 18 Hz e 5 Hz. Perciò, all'interno di questo intervallo, per ciascuna frequenza è possibile associare una precisa velocità di fase, o comunque un intervallo ristretto di velocità. Per frequenze minori di 5 Hz invece l'assegnazione diventa problematica poiché molte velocità presentano lo stesso grado di correlazione, per ciascuna frequenza.

A titolo di esempio sulla procedura su cui si fonda il processo di interpretazione della curva di dispersione, analizziamo il punto B di Figura 4. Questo punto è definito dalla coppia (5 Hz, 200 m/s). Ricordando che $v(f) = \lambda \cdot f$, possiamo conoscere la lunghezza d'onda massima che questa indagine ha potuto utilizzare, pari cioè a $\lambda = v / f = 200 / 5 = 40$ m. La lunghezza d'onda massima di indagine non corrisponde alla profondità massima a cui possiamo avere informazioni sulla velocità da un'onda di Rayleigh. Quest'ultima infatti causa il maggior spostamento nel terreno ad una profondità compresa tra 1/3 e 1/2 della sua lunghezza d'onda. In questo caso perciò $40/2 = 20$ m è la stima della profondità massima d'indagine raggiunta dalla prova MASW. Pertanto, il nostro modello del sottosuolo, derivato unicamente da questa prova, non potrà superare tale profondità. Ciononostante, le altre indagini geofisiche e geognostiche eseguite nella vicinanza del campo sportivo, a supporto della redazione del piano strutturale del comune di Firenzuola, ci consentono di conoscere i valori di velocità delle onde S successivi ai 20 m di

profondità, permettendo di integrare il nostro modello stratigrafico, a fini di un più accurato processo di inversione.

Processo di inversione

Il processo di inversione ha lo scopo di generare una sismo-stratigrafia (da qui in poi semplicemente *stratigrafia*) attendibile, in termini della distribuzione di velocità delle onde S con la profondità. In generale, si parte raccogliendo tutti i dati geognostici e geofisici disponibili cercando di costruire la stratigrafia più attendibile. La stratigrafia è definita da un certo numero di parametri geometrici e fisici, variabili in un certo intervallo di valori in base alla precisione con cui questi sono conosciuti. Successivamente, con un programma di inversione, si simula un campo diffuso di onde di Rayleigh nella stratigrafia *variabile* generando un numero prefissato di curve di dispersione sintetiche, ciascuna corrispondente ad un modello stratigrafico differente. Le curve di dispersione che meglio si sovrappongono con quella misurata con l'indagine sismica validano i modelli stratigrafici dai quali esse sono generate.

Nel nostro caso la curva di dispersione misurata, con relativo *picking*, è riportata in Figura 4, mentre le curve di dispersione sintetiche sono rappresentate in Figura 5. In rosso sono rappresentate quelle curve sintetiche che meglio approssimano la curva sperimentale (in nero), mentre in blu quelle che se ne distaccano maggiormente. Il parametro che quantifica la somiglianza tra curve è chiamato *misfit value*.

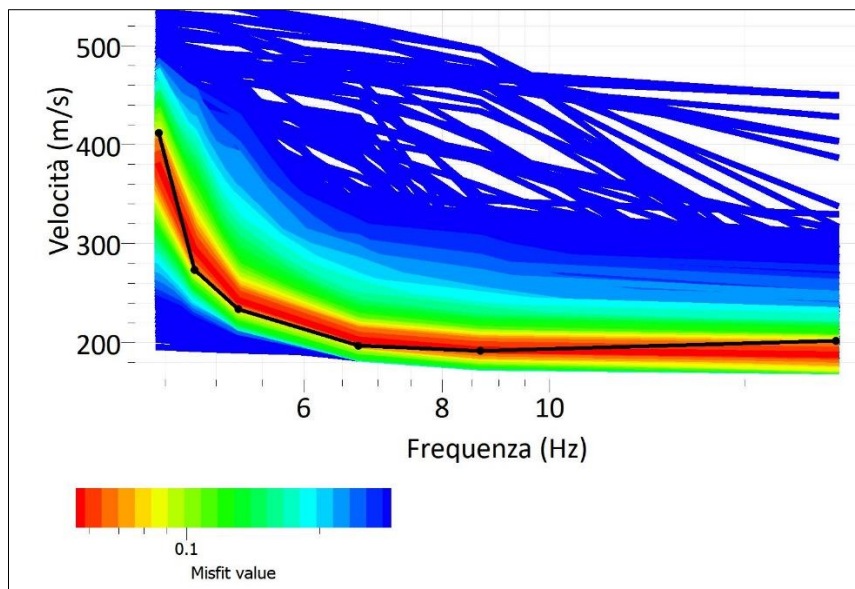


Figura 5 - Curve di dispersione sintetiche. Quelle di colore rosso presentano uno scarto dalla curva di dispersione empirica (in nero) minore.

Profilo di velocità delle onde S

A ciascun modello generato è associata una stratigrafia, in termini di distribuzione con la profondità della velocità delle onde id volume P ed S.

Dalla curva di dispersione si ricava il profilo di velocità delle onde di taglio mediante il processo di inversione. Il risultato è riportato in **Figura 6**.

Riguardo alla identificazione della categoria di sottosuolo di riferimento secondo le *nuove* NTC 2018 leggiamo che

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m [...] e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Dunque, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità $V_{s,30}$ di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità, definita dalla seguente:

Equazione 2

$$v_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}}$$

Nell'area in esame la velocità equivalente $V_{s,30}$ di propagazione delle onde di taglio calcolata, a partire da p.c., è pari a **270 m/s** circa (**Tabella 1**). Il sito può essere associato, secondo le nuove NTC 2018, alla **categoria C**, a cui per normativa sono associati:

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

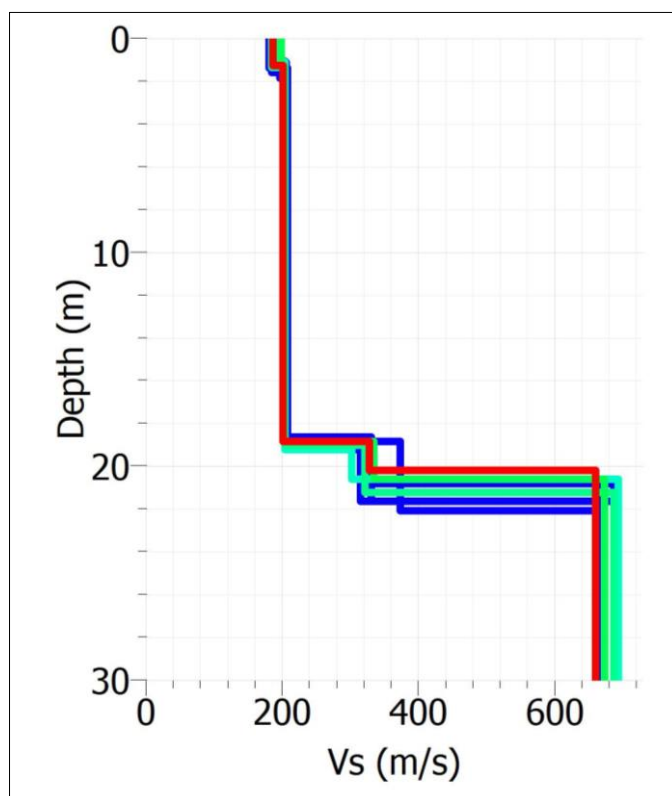


Figura 6 - Profilo di velocità delle onde di taglio S con la profondità nei primi 30 m da piano campagna.

velocità (m/s)	progressiva (m)	spessori (m)
190	1	1
206	19	18
330	20	1
660	30	10
	CATEGORIA	
271	C	30

Tabella 1 - Velocità delle onde di taglio S associata ai 4 sismografi individuati durante la fase di inversione.

Firenze, Marzo 2018

Giampaolo Mariannelli
Vincenzo Fiorino

