



**REGIONE TOSCANA Giunta Regionale**  
Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile  
Settore Genio Civile Valdarno Superiore

# INTERVENTI DI MANTENIMENTO E ADEGUAMENTO STABILITA' DELL'ARGINGROSSO A FIRENZE

CIG: 9800756FB1 CUP: D14D23000540002

## - STUDIO DI FATTIBILITA' / PROGETTO PRELIMINARE -



**A4 INGEGNERIA**  
Società Tra Professionisti a Responsabilità Limitata

VIA ROMA 26 - 59100 - PRATO  
TEL/FAX: 0574442523  
P.IVA e C.F.: 01973140971  
MAIL: info@a4ingegneria.it  
PEC: a4ingegneria@legalmail.it  
WEB: www.a4ingegneria.it

Il Responsabile del Progetto:  
**DOTT. ING. CRISTIANO CAPPELLI**  
Ord. Ingg. Pistoia n. 693  
  
Collaboratore:  
**DOTT. ING. STEFANO TAITI**  
Ord. Ingg. Prato n. 925

Consulenza per aspetti geotecnici:  
**DOTT. GEOL. DARIA DURANTI**  
Ord. Geologi della Toscana n. 1187



Dirigente responsabile del contratto:  
**DOTT. ING. GENNARINO COSTABILE**

Responsabile Unico Procedimento:  
**DOTT. ING. FRANCESCO PIANI**

ELABORATO:

## RELAZIONE GEOTECNICA

RIFERIMENTO PROGETTO			RIFERIMENTO ELABORATO					SCALA	DATA
Codice Commessa		Fase	Capitolo	Paragrafo	Tipo	Progressivo	Revisione	-	OTTOBRE 2023
FI	620-1	PP	DG	GEO	R	001	0		
REVISIONE									
N.	DATA		VERIFICATO						

Questo disegno è protetto dalle vigenti leggi di autore e pertanto non può essere riprodotto, in tutto o in parte, né essere ceduto a terzi senza la nostra autorizzazione scritta.

## SOMMARIO

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>DOCUMENTI, NORMATIVA E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>3</b>
2.1	DOCUMENTI .....	3
2.2	NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI .....	3
<b>3</b>	<b>INDIVIDUAZIONE DELLE SEZIONI DI VERIFICA .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>VERIFICHE GEOTECNICHE.....</b>	<b>5</b>
4.1	GENERALITÀ .....	5
4.2	ANALISI DI FILTRAZIONE .....	5
4.2.1	Richiami teorici .....	5
4.2.2	Definizione del modello di calcolo .....	9
4.2.3	Schematizzazione dei rilevati arginali e caratteristiche dei materiali.....	9
4.2.4	Condizioni iniziali .....	10
4.2.5	Condizioni al contorno .....	10
4.2.6	Definizione del modello e metodo di calcolo utilizzato.....	10
4.2.7	Dati di input del modello di calcolo .....	11
4.2.8	Risultati.....	13
4.3	VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE .....	14
4.3.1	Richiami teorici .....	14
4.3.2	Definizione del modello e metodo di calcolo utilizzato.....	18
4.3.3	Considerazioni in merito alle verifiche geotecniche condotte .....	20
4.3.4	Sezione tipo lungo l'Argingrosso.....	21
4.3.5	Sezione tipo lungo argine sinistro del fiume Greve immediatamente a monte della confluenza con il fiume Arno .....	25

## ALLEGATO 1 – RISULTATI E INTERPRETAZIONE INDAGINI GEOGNOSTICHE

## **1 PREMESSA**

La presente relazione è stata redatta a supporto dello “Studio Fattibilità/Progetto Preliminare degli Interventi di mantenimento e adeguamento stabilità dell’ArginGrosso a Firenze” (CIG 9800756FB1) su incarico della Regione Toscana settore Difesa del Suolo e Protezione Civile Genio Civile Valdarno Superiore e riporta le verifiche geotecniche eseguite a supporto della progettazione preliminare, sulla base dei risultati delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite (vedi Allegato 1), per cui lo scrivente si è avvalso dell’ausilio del dott. geol. Daria Duranti.

Nello specifico le verifiche geotecniche condotte e qui riportate riguardano:

- tratto dell’Argingrosso lungo la sponda sinistra del fiume Arno in località Isolotto;
- tratto dell’argine sinistro del fiume Greve nel tratto immediatamente a monte della confluenza con il fiume Arno.

## **2 DOCUMENTI, NORMATIVA E BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO**

### **2.1 DOCUMENTI**

Segue la documentazione cui è stato fatto riferimento nella stesura della presente relazione:

1. Rilievo topografico appositamente eseguiti nell'ambito del presente incarico;
2. Risultati delle indagini geotecniche in sito e prove di laboratorio riportate in Allegato 1.

### **2.2 NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI**

1. AGI (1977) Raccomandazioni sulla Programmazione ed Esecuzione delle Indagini Geotecniche.
2. Decreto Ministeriale n. 47 (11/3/1988). "Norme Tecniche riguardanti le indagini terreni e sulle rocce; i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione".
3. Istruzioni relative alle "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione" - Cir. Dir. Cen. Tecn. n° 97/81.
4. O.P.C.M. 3274/2003, "Primi Elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica<sup>2</sup> e successive modifiche ed integrazioni.
5. CEN (2004) Eurocode 7, Geotechnical design – Part 1: General Rules. Final draft, EN 1997-1: 2004, November 2004, European Committee for Standardization, Brussels.
6. Gruppo di Lavoro MPS 2004, Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza 3274. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV Milano-Roma.
7. AGI 2005, linee Guida "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica".
8. DM. LL.PP. 14 gennaio 2008, Norme Tecniche per le costruzioni (NTC 2008).
9. Circolare n. 617. 2 febbraio 2009. Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
10. DM. LL.PP. 17 gennaio 2018, Norme Tecniche per le costruzioni (NTC 2018).
11. Circolare n. 7. 21 gennaio 2019. Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018.

### 3 INDIVIDUAZIONE DELLE SEZIONI DI VERIFICA

Nell'ambito del presente progetto sono state individuate n.2 sezioni su cui sono state effettuate le verifiche geotecniche.

Le sezioni sono così ubicate:

- tratto dell'Argingrosso lungo la sponda sinistra del fiume Arno in località Isolotto;
- tratto dell'argine sinistro del fiume Greve nel tratto immediatamente a monte della confluenza con il fiume Arno.

Nella seguente figura 1 sono riportate le tracce delle sezioni sopra indicate.

Si precisa che per il tratto di Argingrosso di sviluppo pari a circa 2 km, la verifica è stata condotta per una sezione con riferimento ad una geometria "tipo" nel tratto in cui l'argine presenta l'altezza maggiore.

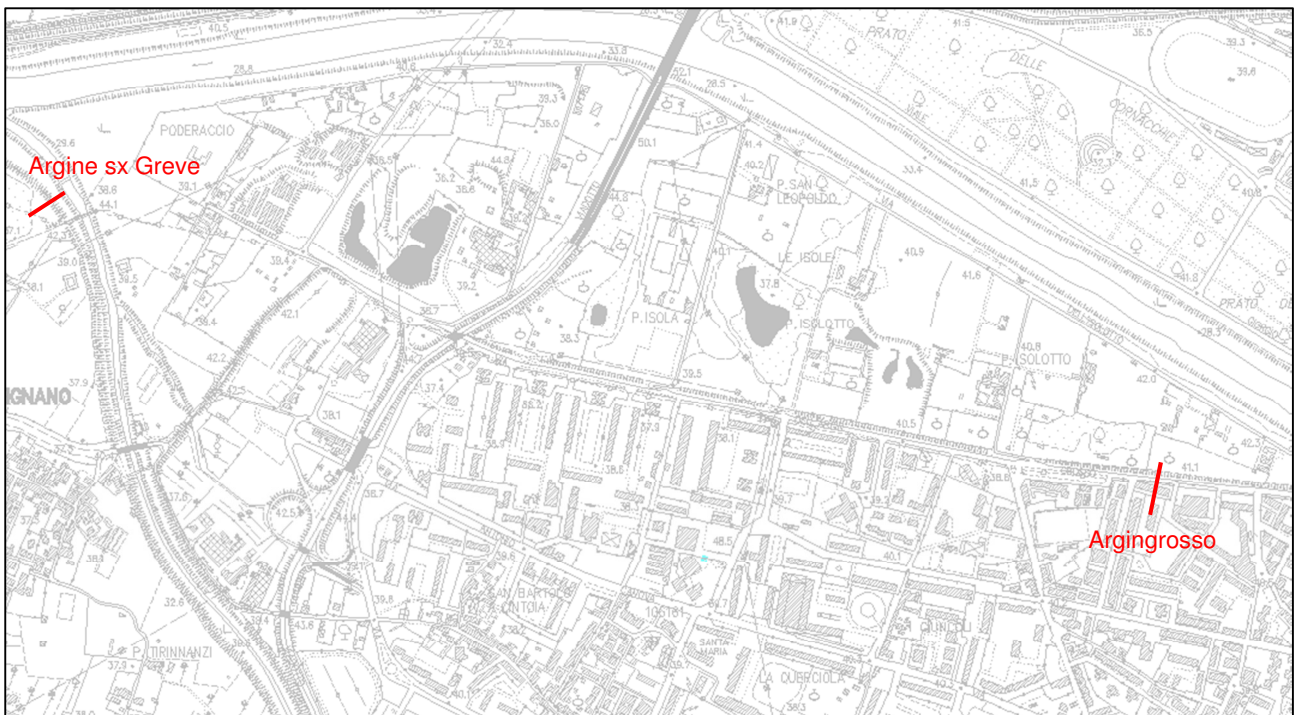


FIGURA 1. UBICAZIONE DELLE SEZIONI OGGETTO DI VERIFICA

## 4 VERIFICHE GEOTECNICHE

### 4.1 GENERALITÀ

La verifica/dimensionamento di un manufatto di materiali sciolti deve tenere conto dei requisiti prestazionali richiesti e delle caratteristiche dei terreni di fondazione.

Le verifiche SLU tengono conto dei valori dei coefficienti parziali per le azioni e per i parametri geotecnici previsti dalla NTC 2018 seguendo le specifiche indicate ai paragrafi seguenti.

Di seguito si prendono in rassegna le analisi geotecniche eseguite, i richiami teorici, i programmi utilizzati e la scelte effettuate nell'impostazione delle verifiche.

### 4.2 ANALISI DI FILTRAZIONE

#### 4.2.1 Richiami teorici

La legge fondamentale, cui fanno riferimento tutte le teorie sulla filtrazione, è la legge di Darcy, formulata nel 1856 dall'omonimo ingegnere francese.

Durante studi sulla potabilizzazione delle acque, osservando il flusso attraverso letti di sabbia filtranti, Darcy notò la dipendenza del flusso d'acqua dalla granulometria della sabbia, dallo spessore di sabbia attraversata e dall'altezza d'acqua nelle vasche. I risultati ottenuti portarono alla seguente relazione:

$$Q = k S \frac{H}{l}$$

Dove:

Q = portata in mc/sec

S = sezione della vasca in mq

H = carico idrico in m

l = spessore dello strato sabbioso

Il coefficiente di proporzionalità k, detto Coefficiente di permeabilità, dipende dalle caratteristiche granulometriche della sabbia, e dimensionalmente è una velocità. Il rapporto H/l, detto Gradiente idraulico ed indicato con la lettera i, è la perdita di carico idraulico per unità di percorso compiuto. La formulazione comune della legge è la seguente:

$$v = K i$$

Il rapporto  $Q/S = v$ , dimensionalmente una velocità, non ha alcun significato fisico ed è detto velocità apparente; la sezione interessata dal flusso, infatti, non è l'intera sezione di superficie S, ma la somma di tutte le sezioni dei canalicoli che formano la rete di flusso.

Le ipotesi alla base della legge di Darcy sono:

- Mezzo poroso omogeneo e isotropo. L'omogeneità e l'isotropia, raramente riscontrabili in terreni naturali, possono essere assunte considerando volumi di terreno sufficientemente grandi che presentino granulometrie uniformemente distribuite.
- Moto laminare. La legge ha validità se il moto è caratterizzato da filetti fluidi che scorrono paralleli senza mescolarsi. È dimostrato sperimentalmente che all'interno di mezzi porosi si ha con buona approssimazione un moto di tipo laminare.
- Mezzo poroso saturo

I processi di filtrazione (saturo) ed infiltrazione (non saturo) sono influenzati e determinati dalle cosiddette "proprietà idriche del terreno", che sono:

- Stato energetico dell'acqua.
- Contenuto d'acqua.
- Coefficiente di filtrazione.

### Stato energetico dell'acqua

Consideriamo ora lo stato energetico di un fluido in un mezzo poroso nei casi di terreno saturo. La formulazione generalizzata della legge di Darcy-Ritter è la seguente:

$$\mathbf{V} = -k \nabla h$$

con  $h$  carico piezometrico, definito come:

$$h = P/\gamma + z$$

dove:

$P$  = pressione idrostatica del fluido;

$\gamma$  = peso specifico dell'acqua;

$z$  = Quota d'elevazione rispetto ad uno zero di riferimento.

da cui

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = k \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}$$

ipotizzando un fluido incompressibile, l'equazione di continuità  $\text{div } \mathbf{V} = 0$  dà:

$$\nabla^2 h = 0$$

Nel caso di flusso unidirezionale, si ricava la formulazione comune della legge di filtrazione in un mezzo poroso in termini di carico piezometrico:

$$V_x = -k \frac{\partial h}{\partial x} = ki$$

Il gradiente idraulico rappresenta quindi il coefficiente angolare della curva  $h(x)$ , vale a dire il tasso di variazione del carico piezometrico. La perdita energetica che si registra nel moto in un mezzo poroso è di tipo meccanico, dipendendo sostanzialmente dagli attriti che si generano fra il fluido e la matrice solida e fra gli stessi filetti fluidi. Il movimento dell'acqua avviene da punti a potenziale energetico maggiore a punti a potenziale minore. Non sempre però questo coincide con flusso da punti a pressione maggiore a punti a pressione minore. Nel caso infatti in cui la perdita di quota supera l'acquisto di pressione, il moto avviene in senso inverso al gradiente di pressione.

La grandezza caratterizzante il flusso è quindi il gradiente idraulico formato dal gradiente di pressione sommato al gradiente gravitazionale.

### Contenuto d'acqua

Espresso come percentuale di volume totale, è dato dal rapporto fra volume d'acqua  $V_w$  e volume totale del mezzo poroso  $V_T$ :

$$w = V_w / V_T$$

Di fondamentale importanza per la formulazione di un'analisi generale della filtrazione, è la comprensione della relazione esistente fra contenuto d'acqua e pressione nei pori. La rappresentazione grafica che riporta in ascissa la pressione nei pori ed in ordinata il contenuto d'acqua, è detta Curva caratteristica del terreno o Funzione del contenuto d'acqua volumetrico (Fredlund & Rahadjo, 1993, pp.136-140). Tale curva è detta "caratteristica" per il fatto che in ogni terreno la quantità d'acqua stoccata dipende oltre che dalle pressioni neutre, dalle caratteristiche strutturali del terreno stesso (granulometria, indice dei pori, ecc.).

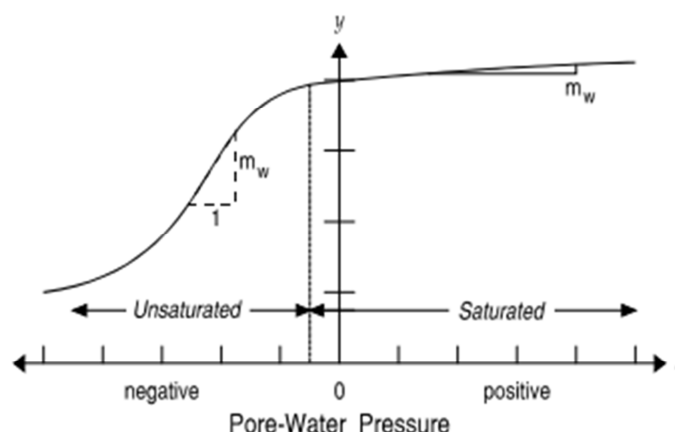


FIGURA 2. FORMA GENERALE DELLA FUNZIONE CARATTERISTICA DEL TERRENO

La pendenza della curva, chiamata  $m_w$ , rappresenta la velocità di variazione del contenuto d'acqua; in condizioni di saturazione con pressione dei pori uguale a zero si ha che  $m_w = m_v$  coefficiente di compressibilità in un'analisi di consolidazione monodimensionale. Osservando la curva si nota che anche nel range delle pressioni positive si registra una variazione del contenuto d'acqua; se ipotizziamo infatti che un terreno si trovi in condizioni di saturazione, con pressioni nei pori uguale a zero e con carico esterno costante, nel momento in cui le pressioni interstiziali diventano positive si ha una diminuzione delle tensioni efficaci sulla matrice solida (principio delle tensioni efficaci di Terzaghi). Questa variazione di tensione genera un rigonfiamento del terreno che si traduce in un aumento del contenuto d'acqua.

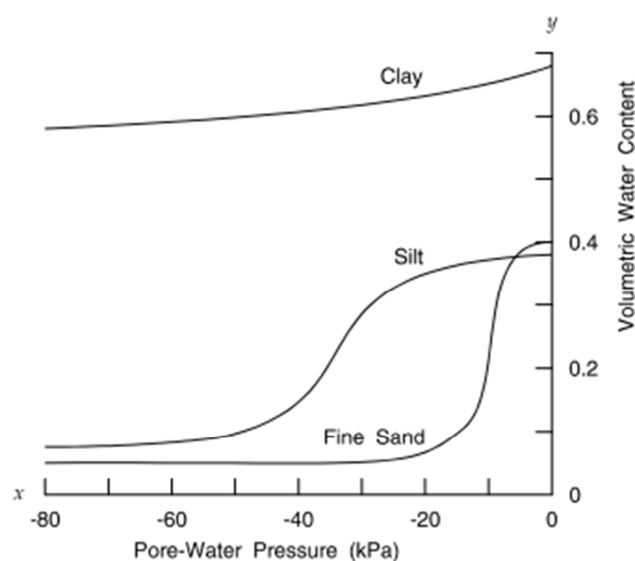


FIGURA 3. FUNZIONE DEL CONTENUTO D'ACQUA PER SABBIA FINE, LIMO E ARGILLA

Si può notare come per terreni a grana grossa si ha una desaturazione per suzioni relativamente basse, in accordo con quanto detto sull'interazione fra fase liquida e solida. Per terreni a grana fini o finissima il processo di desaturazione avviene in modo graduale, con valori di  $m_w$  relativamente bassi.

### Coefficiente di filtrazione o di permeabilità

Il parametro  $K$  della legge di Darcy, chiamato coefficiente di permeabilità o di filtrazione, è l'altro parametro caratteristico di un'analisi completa dei moti di filtrazione. Nella sua accezione comune il parametro ha un valore costante pari alla permeabilità a saturazione. Interpretando il coefficiente come indice della capacità conduttiva del terreno, è necessario considerare la sua variabilità secondo lo schema dei canali di flusso precedentemente indicato. Si può quindi pensare di costruire una funzione che rappresenti la capacità conduttiva del suolo in funzione del contenuto d'acqua. Essendo il contenuto d'acqua funzione delle pressioni interstiziali, anche la conducibilità idraulica sarà quindi funzione delle pressioni nei pori. In figura seguente è rappresentata la tipica relazione fra conducibilità idraulica e pressioni interstiziali.

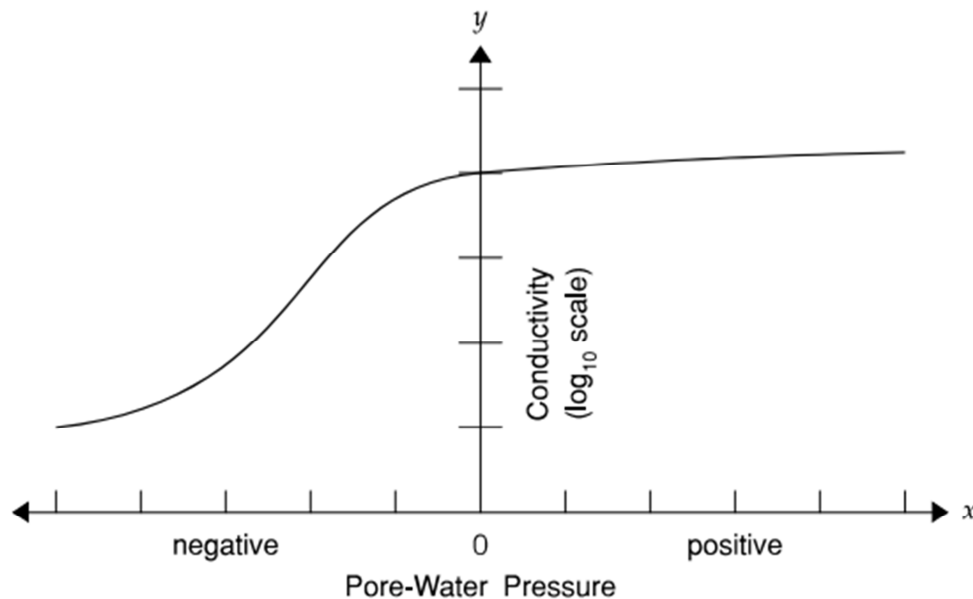


FIGURA 4. RELAZIONE TRA CONDUCIBILITÀ IDRAULICA E PRESSIONI INTERSTIZIALI

Il valore a pressione nulla corrisponde al valore a saturazione  $K_s$ . Spostandosi verso valori positivi di suzione si ha una progressiva diminuzione della conducibilità idraulica fino ad arrivare a valori prossimi allo zero, in cui il moto è generato soltanto da forze di superficie di natura chimica. Nel campo delle pressioni positive si può avere un incremento del coefficiente  $K$ , dovuto sostanzialmente all'aumento del contenuto d'acqua generato dal rigonfiamento del terreno. Per terreni con funzioni del contenuto d'acqua piuttosto ripide, si ha generalmente una funzione  $K$  altrettanto ripida per la veloce perdita di sezioni di flusso. Per terreni a grana fine si ha invece una funzione piuttosto piatta con andamento quasi lineare.

#### 4.2.2 Definizione del modello di calcolo

La costruzione del modello si articola nei seguenti passi:

- Caratterizzazione geometrica delle sezioni
- Individuazione e assegnazione delle caratteristiche idrauliche dei materiali
- Condizioni iniziali
- Condizioni al contorno

#### 4.2.3 Schematizzazione dei rilevati arginali e caratteristiche dei materiali

Sono state analizzate le sezioni oggetto di verifica, corrispondenti alle situazioni di progetto ritenute più sfavorevoli, ovvero instaurarsi di ridotti percorsi di filtrazione o dislivelli elevati tra la quota di massimo invaso/massima piena a monte e la posizione della falda a valle.

#### 4.2.4 Condizioni iniziali

E' necessario conoscere il carico piezometrico in tutti i punti rappresentativi del problema all'istante iniziale. Tale informazione si ottiene conoscendo la quota della falda o il livello idrometrico dei corsi d'acqua nelle sezioni di interesse, all'istante iniziale dell'analisi. In questo modo si assegna in ogni punto un carico piezometrico iniziale in proporzione alla distanza dalla tavola d'acqua, secondo una distribuzione idrostatica delle pressioni.

#### 4.2.5 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno necessarie a simulare la risposta idraulica nel tempo all'innalzamento e abbassamento dei livelli in alveo sono funzioni del carico piezometrico sui nodi del paramento del corpo arginale lato fiume.

L'evento di piena di progetto è modellato associando ai nodi del paramento una funzione del tipo  $f(H,t)$  dove  $H$  è il carico totale e  $t$  il tempo. Il carico sul paramento arginale corrisponde alla somma della quota di pressione e della quota di posizione. Ipotizzando che il livello idrometrico generi una pressione di tipo idrostatico sui nodi al contorno, la funzione del carico totale coincide con la funzione che descrive l'andamento nel tempo del livello idrometrico nel fiume. Pertanto le condizioni al contorno sono rappresentate dai risultati dell'analisi idraulica.

#### 4.2.6 Definizione del modello e metodo di calcolo utilizzato

Le verifiche alla filtrazione sono state eseguite mediante il software Aztec FEM GT sviluppato dalla Aztec Informatica srl che usa il Metodo degli Elementi Finiti (FEM). Sviluppato nell'ipotesi di Deformazione Piana consente la modellazione dei problemi più frequenti nella progettazione geotecnica.

Tra essi annoveriamo: calcoli di cedimenti e di portanze, verifiche di stabilità di pendii, verifiche di opere di sostegno, realizzazione di scavi e riporti, processi di consolidazione, moti di filtrazione sia in condizioni stazionarie che variabili.

#### 4.2.7 Dati di input del modello di calcolo

I calcoli relativi all'analisi di filtrazione sono stati eseguiti con riferimento alla sola sezione dell'Argingrosso, e non del fiume Greve, in quanto è l'unico tratto per cui sono disponibili i valori di permeabilità del corpo arginale e del terreno di fondazione.

I valori di permeabilità che risultano dalle prove di permeabilità eseguite in sito all'interno del sondaggio sono pari a  $4.5 \cdot 10^{-6}$  m/s per il corpo arginale (vedi livello A in figura 5) e  $9.9 \cdot 10^{-8}$  m/s per il terreno di fondazione (vedi livello B in figura 5). In assenza di un valore misurato, la permeabilità di  $9.9 \cdot 10^{-8}$  m/s è stata assegnata anche allo strato di terreno sottostante (livello C).

La geometria della sezione trapezia "tipo" dell'argine che divide la golenia dell'Arno dall'area urbanizzata dell'Isolotto inserita nel calcolo è di seguito riportata:

- larghezza in sommità 2.5 m;
- altezza paramento lato fiume 3.8 m;
- pendenza paramento lato fiume 1:1;
- altezza paramento lato campagna 2.0÷2.5 m;
- pendenza paramento lato fiume 1:1.7.

Nella seguente tabella sono riassunte le caratteristiche dei tre strati di materiali terrosi inseriti nel modello di calcolo.

Tipo materiale	Terreno
Descrizione	Livello A
Comportamento	Isotropo
Criterio	Mohr-Coulomb Modificato
Comportamento in falda	Non Drenato
Peso Volume $\gamma$ [kN/mc]	1682.5
Peso Volume Saturo $\phi_{sat}$ [kN/mc]	1682.5
Angolo di attrito $\phi^\circ$	29.0
Coesione efficace [kPa]	0.184
Angolo di attrito non drenato $\phi^\circ$	0.00
Coesione non drenata [kPa]	0.408
Angolo di dilatazione $\psi^\circ$	0.00
Modulo Elastico E(Young) [kPa]	50.98
Modulo di Poisson $\nu$	0.35
Rigidezza a taglio G [kPa]	18.88
Rigidezza volumetrica K(Bulk Modulus) [kPa]	56.65
Modulo Elastico Carico-Scarico $E_{UR}$ (Young) [kPa]	50.98
Coefficiente permeabilità $K_x$ (cm/sec)	0.00045000
Coefficiente permeabilità $K_y$ (cm/sec)	0.00045000

Tipo materiale	Terreno
Descrizione	Livello B
Comportamento	Isotropo
Criterio	Mohr-Coulomb Modificato
Comportamento in falda	Non Drenato
Peso Volume $\gamma$ [kN/mc]	1886.4
Peso Volume Saturo $\phi_{sat}$ [kN/mc]	1886.4
Angolo di attrito $\phi^\circ$	28.0
Coesione efficace [kPa]	0.000
Angolo di attrito non drenato $\phi^\circ$	0.00
Coesione non drenata [kPa]	0.000
Angolo di dilatazione $\psi^\circ$	0.00
Modulo Elastico E(Young) [kPa]	91.77
Modulo di Poisson $\nu$	0.35
Rigidezza a taglio G [kPa]	33.99
Rigidezza volumetrica K(Bulk Modulus) [kPa]	101.97
Modulo Elastico Carico-Scarico $E_{UR}$ (Young) [kPa]	91.77
Coefficiente permeabilità $K_x$ (cm/sec)	0.00000990
Coefficiente permeabilità $K_y$ (cm/sec)	0.00000990

Tipo materiale	Terreno
Descrizione	Livello C
Comportamento	Isotropo
Criterio	Mohr-Coulomb Modificato
Comportamento in falda	Non Drenato
Peso Volume $\gamma$ [kN/mc]	1937.4
Peso Volume Saturo $\phi_{sat}$ [kN/mc]	1937.4
Angolo di attrito $\phi^\circ$	36.0
Coesione efficace [kPa]	0.000
Angolo di attrito non drenato $\phi^\circ$	0.00
Coesione non drenata [kPa]	0.000
Angolo di dilatanza $\psi^\circ$	0.00
Modulo Elastico E(Young) [kPa]	254.92
Modulo di Poisson $\nu$	0.35
Rigidezza a taglio G [kPa]	94.42
Rigidezza volumetrica K(Bulk Modulus) [kPa]	283.25
Modulo Elastico Carico-Scarico $E_{UR}$ (Young) [kPa]	254.92
Coefficiente permeabilità $K_x$ (cm/sec)	0.00000990
Coefficiente permeabilità $K_y$ (cm/sec)	0.00000990

Come sollecitazione idraulica applicata sul paramento lato fiume è stata inserito l'andamento nel tempo dei livelli in Arno per eventi con Tr 200 anni in corrispondenza del tratto in cui è ubicata la sezione oggetto di verifica ripresi dagli studi più recenti eseguiti da parte di Hydrogeo srl per conto del Comune di Firenze. Dallo studio risulta che il livello massimo raggiunto è pari a 42.23 m slm, ossia circa 30 cm al di sotto del coronamento arginale. Nella seguente tabella è riportato l'andamento dei livelli nel tempo per un l'evento più gravoso con Tr 200 anni, considerando solo il lasso di tempo (circa 28 ore) in cui i livelli sono al di sopra della quota della golena sinistra (a circa 38.5 m slm).

TABELLA 1. LIVELLI IDROMETRICI

T (ore)	Livelli idrometrici Arno (m slm)
0	38.50
4	40.65
8	41.80
12	42.17
16	42.23
20	42.17
24	41.59
28	40.32
32	38.50

Come condizione iniziale è stata ipotizzata una falda dal lato fiume posizionata alla quota della golena, ossia 38.5 m slm.

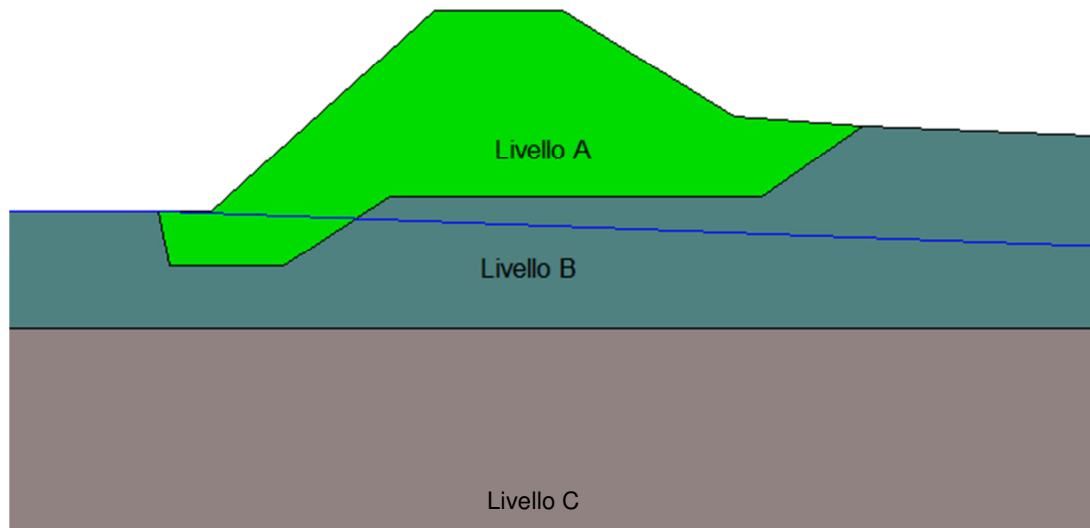


FIGURA 5. GEOMETRIA E STRATIGRAFIA SOTTOSUOLO PER SEZIONE TIPO ARGINGROSSO

#### 4.2.8 Risultati

Dai calcoli svolti risulta che le pressioni  $\sigma_w$ , in corrispondenza delle quali si raggiunge la saturazione all'interno del corpo arginale, si verificano ad una profondità di circa 1.5 m misurata perpendicolarmente al paramento.

Le analisi di filtrazione non evidenziano flussi che interessano il paramento lato campagna (via dell'Argingrosso) del corpo arginale; non risultano pertanto propensioni all'innesco dei fenomeni di piping. Ne consegue pertanto che non vengono effettuate le verifiche a sifonamento.

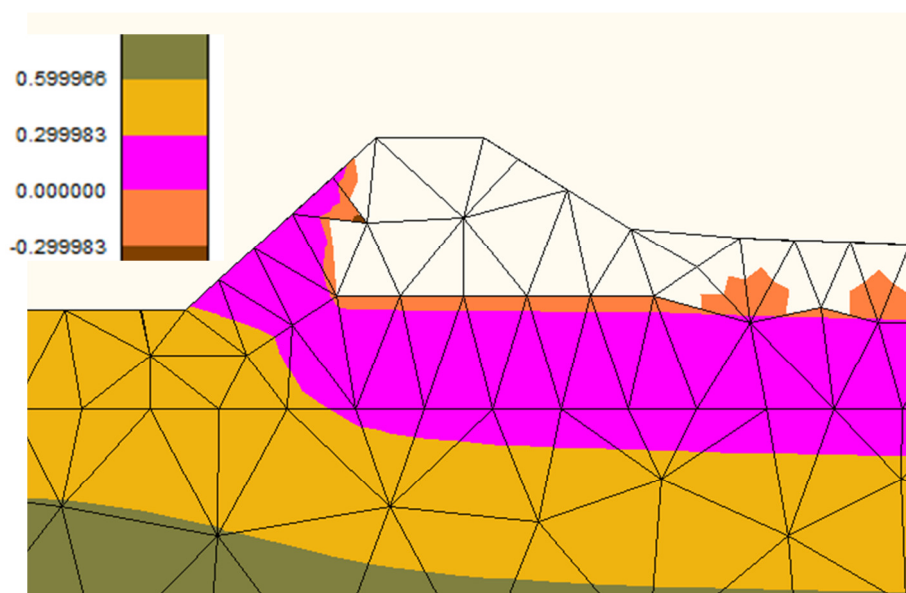


FIGURA 6. ANDAMENTO  $\sigma_w$  IN CORRISPONDENZA DELLA SEZIONE DELL'ARGINGROSSO

## 4.3 VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE

### 4.3.1 Richiami teorici

Le verifiche di stabilità, attraverso la valutazione dell'equilibrio limite, consistono nella stima di un coefficiente di sicurezza alla traslazione e alla rotazione del volume di terra compreso tra la superficie del versante analizzato ed una superficie di taglio potenziale imposta. La scelta della superficie di scivolamento è fatta in funzione della geometria del problema e delle caratteristiche del terreno. Generalmente si utilizzano superfici circolari, ma può essere necessario utilizzare superfici composite o di forma particolare. Nella seguente figura sono rappresentate tutte le forze agenti nel caso di superficie circolare, dove i simboli hanno il significato indicato di seguito:

$W$  = Peso totale di un concio di larghezza  $b$  e altezza  $h$

$N$  = Forza totale normale alla base del concio

$S$  = forza di taglio mobilizzata alla base di ogni concio

$E$  = Forza orizzontale di interazione fra i conci. I pedici  $L$  e  $R$  indicano rispettivamente il punto di applicazione a sinistra e a destra del concio.

$X$  = Forza verticale di interazione fra i conci. I pedici  $L$  e  $R$  indicano rispettivamente il punto di applicazione a sinistra e a destra del concio.

$D$  = Carico concentrato esterno

$KW$  = Carico sismico orizzontale applicato al baricentro del concio.

$R$  = Raggio della superficie di scivolamento, o il braccio associato ad ogni forza di taglio mobilizzata  $S_m$  per le superfici di scivolamento non circolari.

$f$  = braccio della forza normale alla superficie di scivolamento (non circolare), rispetto al centro di rotazione od al centro dei momenti, considerato positivo se origina momento destabilizzante, positivo viceversa.

$x$  = distanza orizzontale fra il "centro linea" di ogni concio e il centro di rotazione, od il centro dei momenti.

$e$  = distanza verticale fra il baricentro di ogni concio e il centro di rotazione, od il centro dei momenti.

$d$  = braccio del carico puntuale esterno rispetto al centro di rotazione od al centro dei momenti.

$h$  = distanza verticale fra il centro della base di ogni concio e la superficie del pendio

$a$  = braccio della forza risultante esterna dovuta alla spinta idrostatica dell'acqua, rispetto al centro di rotazione od al centro dei momenti. I pedici  $L$  e  $R$  indicano rispettivamente il punto di applicazione a sinistra e a destra del pendio.

$A$  = risultante esterna dovuta alla spinta idrostatica dell'acqua. I pedici  $L$  e  $R$  indicano rispettivamente il punto di applicazione a sinistra e a destra del pendio.

$\omega$  = angolo d'inclinazione del carico esterno puntuale

$\alpha$  = angolo fra la tangente alla superficie di scivolamento al centro della base di ogni concio e l'orizzontale.

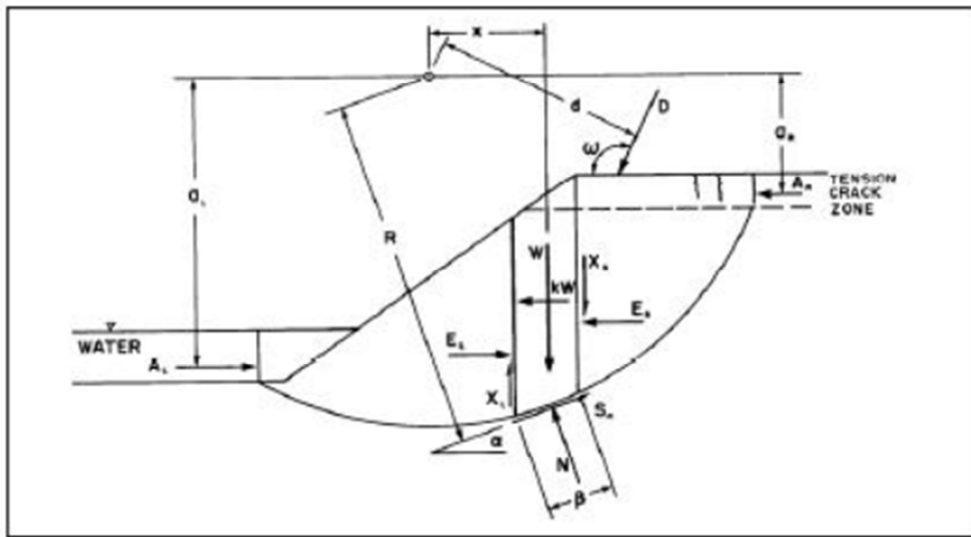


FIGURA 7. SCHEMA DELLE FORZE

Per un'analisi sulle tensioni effettive il criterio di rottura di Mohr-Coulomb è il seguente:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi'$$

dove:

$\tau$  = resistenza al taglio

$c'$  = coesione

$\phi'$  = angolo di resistenza al taglio

$\sigma_n$  = tensione normale

$u$  = pressione nei pori

Il valore della forza di taglio mobilizzata per soddisfare le condizioni d'equilibrio limite è dunque:

$$S_m = \frac{s \beta}{F} = \frac{\beta (c' + (\sigma_n - u) \tan \phi')}{F}$$

\*

dove:

$\sigma_n = N/\beta$  = tensione normale media alla base del concio

$F$  = fattore di sicurezza

$\beta$  = lunghezza della base del concio

Si ricavano ora le due equazioni generali che esprimono il fattore di sicurezza per l'equilibrio dei momenti e per l'equilibrio delle forze. Con riferimento alla figure sopra riportate, si riporta la somma dei momenti e delle forze orizzontali.

$$\Sigma W_x - \Sigma S_m R - \Sigma N_f + \Sigma k W_e \pm D d \pm A a = 0$$

$$\Sigma (E_L - E_R) - \Sigma (N \sin \alpha) + \Sigma (S_m \cos \alpha) - \Sigma (k W)$$

sostituendo l'equazione (\*) nelle precedenti si ha che:

$$F_m = \frac{\Sigma (c' \beta R + (N - u) R \tan \phi')}{\Sigma W_x - \Sigma N_f + \Sigma k W_e \pm D d \pm A a}$$

$$F_f = \frac{\Sigma (c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\Sigma N \sin \alpha + \Sigma k W - [D \cos \omega] \pm A}$$

Il fattore di sicurezza che verifica contemporaneamente le equazioni di  $F_m$  e  $F_f$ , è definito come il fattore di sicurezza del metodo GLE (General Limit Equilibrium). L'altra equazione utilizzata è la somma delle forze verticali che consente di calcolare il valore delle forze normali alla base di ogni concio, N:

$$-W + (X - X) + N \cos \alpha + S \sin \alpha - [D \sin \omega] = 0$$

Sostituendo si ottiene:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha + u \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F} + [D \sin \omega]}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}}$$

Il set di equazioni così ricavato non è comunque sufficiente a rendere il problema determinato. Sono quindi necessarie alcune ipotesi sul comportamento di una o più variabili.

In accordo con la relazione empirica (Morgenstein & Price, 1965), le forze di taglio fra i conci, X, sono calcolate come percentuale delle forze normali fra i conci, E:

$$X = E \lambda f(x)$$

dove:

$\lambda$  = valore percentuale in forma decimale

$f(x)$  = funzione delle forze di interazione, rappresentante la direzione relativa della risultante fra X e E (forza di interazione fra i conci)

In funzione del valore del coefficiente  $\lambda$  si distinguono i vari metodi di calcolo all'analisi limite. Si rappresentano in un grafico i valori del fattore di sicurezza  $F_m$  e  $F_f$  in funzione del parametro  $\lambda$ . Le due curve risultanti s'intersecano al valore del fattore di sicurezza che verifica entrambe le equazioni, definito come il fattore di sicurezza del metodo GLE.

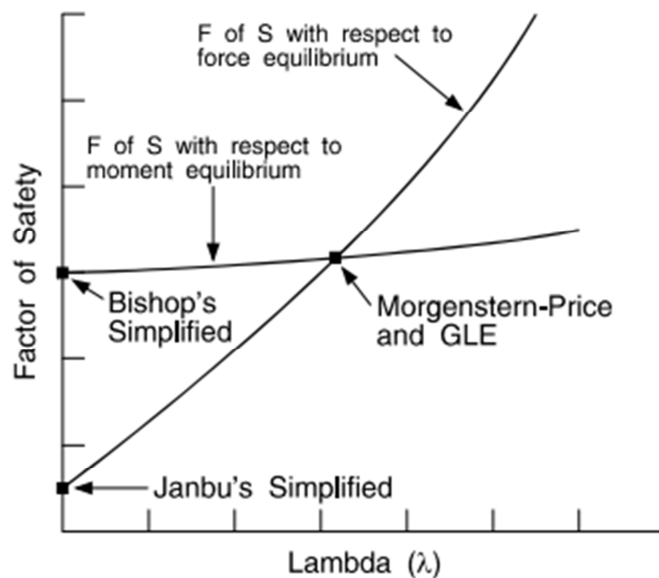


FIGURA 8. FATTORE DI SICUREZZA IN FUNZIONE DI  $\lambda$

Se vengono trascurate le forze di interazione fra i cunei ( $\lambda = 0$ ), si può utilizzare la somma delle forze in direzione normale alla base del concio (Fellenius, 1936):

$$N = W \cos \alpha - kW \sin \alpha + [D \cos(\omega + \alpha - 90)]$$

Trascurando ancora le forze di interazione fra i cunei, ma risolvendo il sistema di equazioni originario si ha che :

$$N = \frac{W - \frac{c'\beta \sin \alpha + u\beta \sin \alpha \tan \phi'}{F} + [D \sin \omega]}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}}$$

\*\*\*

Quando la (\*\*) è usata per il calcolo del fattore di sicurezza, si ottiene il fattore di sicurezza del metodo di Bishop Semplificato ( $\lambda=0$ ,  $F_m$ ).

Nelle presenti verifiche è stato utilizzato il suddetto metodo.

#### 4.3.2 Definizione del modello e metodo di calcolo utilizzato

Le verifiche di stabilità globale sono state eseguite mediante il programma STAP (Stabilità Pendii in Terreni e Rocce) di Aztec Informatica.

Le verifiche di stabilità dei rilevati sono state condotte, in accordo alle prescrizioni normative relative alle opere di materiali sciolti, in riferimento allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita secondo l'Approccio 1 – Combinazione 2 (GEO), come descritto di seguito.

- Approccio 1 – Combinazione 2 – SLV, Verifiche statiche

A2+M2+R2:  $\gamma_{GG} + \gamma_{QQ}$

- Approccio 1 – Combinazione 2 – SLV, Verifiche sismiche

A2+M2+R2:  $G + \psi Q + E$

I coefficienti per la azioni (A2), per i materiali (M2) e le resistenze (R2) sono riportati nelle Tabelle 2, 3 e 4. Il sovraccarico Q è stato assunto pari a 20 kPa. Tutti i parametri di combinazione sono sintetizzati in riportate in Tabella 5.

TABELLA 2. COEFFICIENTI PARZIALI PER LE AZIONI O PER L'EFFETTO DELLE AZIONI

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali <sup>(1)</sup>	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

TABELLA 3. COEFFICIENTI PARZIALI PER I MATERIALI

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE $\gamma_M$	(M1)	(M2)
<i>Tangente dell'angolo di resistenza al taglio</i>	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
<i>Coesione efficace</i>	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
<i>Resistenza non drenata</i>	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
<i>Peso dell'unità di volume</i>	$\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

TABELLA 4. COEFFICIENTI PARZIALI PER LE RESISTENZE

Coefficiente	R2
$\gamma_R$	1.1

TABELLA 5. COMBINAZIONI DI CARICO

COMBINAZIONE	PERMANENTI		VARIABILI		SISMA	
	$\gamma_G$	$\psi$	$\gamma_Q$	$\psi$	$\gamma$	$\psi$
<b>A2+M2+R2</b>	1	1	1.3	1	-	-
<b>Sisma</b>	1	1	1	0.2	1	1

Le verifiche di stabilità statiche e dinamiche sono state condotte solo in condizione di lungo termine (condizioni drenate) in quanto per questo tipo di opere rappresenta la condizione più cautelativa.

Le verifiche sismiche sono state condotte seguendo un metodo pseudostatico. Le componenti verticale ed orizzontale dell'azione sismica sono state valutate come:

$$F_h = k_h \times W$$

$$F_v = k_v \times W$$

dove:

$W$  = peso del volume di terreno potenzialmente instabile;

$k_h = \beta a_{\max}/g$  = coefficiente sismico orizzontale;

$k_v = +0.5k_h$  = coefficiente sismico verticale;

$\beta$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

$a_{\max} = SSSTag$  = accelerazione massima attesa al sito;

$SS$  = coefficiente di amplificazione stratigrafica;

$ST$  = coefficiente di amplificazione topografica;

$a_g$  = dell'accelerazione massima attesa su suolo di riferimento rigido.

I valori di  $\beta$  previsti dalla normativa sono riportati in Tabella 6. Per la cassa di espansione in esame  $0.1 < a_g/g < 0.2$ , quindi  $\beta = 0.24$ .

TABELLA 6. COEFFICIENTI DI RIDUZIONE DELL'ACCELERAZIONE MASSIMA ATTESA AL SITO

	Categoria di sottosuolo	
	<b>A</b>	<b>B, C, D, E</b>
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0.2 < a_g(g) \leq 0.4$	0,30	0,28
$0.1 < a_g(g) \leq 0.2$	0,27	0,24
$a_g(g) \leq 0.1$	0,20	0,20

In tutte le analisi e per tutte le sezioni è stato verificato che il valore di progetto delle azioni fosse inferiore al valore di progetto delle resistenze disponibili, ovvero:

$$E_d < R_d$$

dove:

$$E_d = E \left[ \gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right] \quad \text{ovvero} \quad E_d = \gamma_E \cdot E \left[ F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right] \quad \text{con } \gamma_E = \gamma_F$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left[ \gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

$\gamma_F F_k$  = azioni di progetto;

$X_k/\gamma_M$  = parametri di progetto;

$a_d$  = geometria di progetto.

In definitiva si verifica che il coefficiente di sicurezza sia maggiore di 1:

$FS = R_d/E_d > 1$ , ovvero  $R/E_d > \gamma_R = 1.1$  per le verifiche statiche e  $\gamma_R = 1.2$  per le verifiche sismiche (in riferimento ai valori stabiliti da NTC 2018 per i fronti di scavo, all'interno dei quali rientrano le arginature).

Il calcolo del fattore di sicurezza è stato eseguito utilizzando, come sopra riportato, il metodo di Bishop Semplificato.

In base a quanto riportato in precedenza, le verifiche di stabilità sono state eseguite con riferimento ai valori dei parametri geotecnici ricavati in base alle indagini eseguite (vedi Allegato 1).

Per quanto concerne gli scenari di calcolo, le verifiche sono state eseguite con riferimento alle seguenti condizioni/combinazioni:

- **condizioni statiche:** sovraccarico pari a 2 t/m per una striscia di 2.5 m, corrispondente al peso di un escavatore di grandi dimensioni, posto sulla sommità arginale e falda al di sotto del piano campagna;
- **condizioni sismiche:** nessun sovraccarico e falda al di sotto del piano campagna;
- **condizioni statiche in fase di rapido svaso:** porzione di paramento arginale completamente saturo in base ai risultati delle verifiche di filtrazione (disponibili solo per la sezione in corrispondenza dell'Argingrosso), falda in golena al livello del piano campagna, nessun sovraccarico.

#### 4.3.3 Considerazioni in merito alle verifiche geotecniche condotte

Le verifiche delle arginature sono state condotte per il solo paramento lato fiume in quanto è quello interessato dalla filtrazione delle acque in caso di piena e conseguentemente soggetto al fenomeno del rapido svaso.

Per le caratteristiche geotecniche e idrogeologiche delle arginature oggetto di verifica, è stato fatto riferimento ai risultati delle indagini appositamente eseguite (vedi Allegato 1). Nei casi in cui le prove geotecniche che è stato possibile eseguire con riferimento al budget economico disponibile, non hanno potuto fornire tutti i parametri necessari per poter eseguire con sufficiente approssimazione e correttezza tecnica le verifiche di stabilità, sono state effettuati delle valutazioni

specifiche, facendo riferimento ai valori disponibili ricavati dalle indagini condotte in questa sede e sulla scorta dei dati di letteratura per le tipologie di materiali terrosi riscontrati.

Nei paragrafi seguenti sono riportati i risultati dei calcoli eseguiti per le n.2 sezioni di verifica; per i casi in cui è stato necessario, sono indicate in testa al paragrafo, prima della presentazione dei risultati, le considerazioni geotecniche effettuate relativamente all'assegnazione dei parametri geotecnici utilizzati e degli scenari analizzati.

#### *4.3.4 Sezione tipo lungo l'Argingrosso*

##### *4.3.4.1 Dati di input*

La geometria della sezione trapezia "tipo" dell'argine che divide la golena dell'Arno dall'area urbanizzata dell'Isolotto inserita nel calcolo è di seguito riportata:

- larghezza in sommità 2.5 m;
- altezza paramento lato fiume 3.8 m;
- pendenza paramento lato fiume 1:1.
- altezza paramento lato campagna 2.0÷2.5 m;
- pendenza paramento lato fiume 1:1.7.

Per i valori dei parametri geotecnici dei terreni è stato fatto riferimento alla tabella 7 estratta dall'Allegato 1. Considerando che le verifiche sono state eseguite in condizioni di lungo termine, ossia in condizione di tensioni efficaci, è stato fatto riferimento ai valori di  $\phi'$  e  $c'$ .

Per la schematizzazione del terreno saturo nel caso della verifica in condizioni di rapido svaso, è stato fatto riferimento al valore del peso di volume saturo del Livello A pari a 19 kN/mc. Per questo scenario la falda è stata posizionata alla quota del piano campagna dell'area golenale.

TABELLA 7. PARAMETRI GEOTECNICI ARGINGROSSO

LIVELLI LITOTECNICI	Caratteristiche fisico - meccaniche					
	$\phi'$ (°)	$c_u$ kPa	$c'$ kPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$ saturo kN/m <sup>3</sup>	Modulo di deformazione E kPa
<b>LIVELLO A:</b> limo con sabbia debolmente argilloso (dalla sommità arginale a circa -3,50 m)	29	40	10	16,5	19	5000
<b>LIVELLO B:</b> limo sabbioso debolmente argilloso e sabbia limosa (da -3,50 a -6,00 m da sommità arginale)	28	-	-	18,5	19,5	9000
<b>LIVELLO C:</b> sabbia grossolana con livelli argillosi (da -6,0 a -8,0 m da sommità arginale)	36	-	-	19	20	25000

#### 4.3.4.2 Parametri sismici

##### Identificazione del sito (Argingrosso)

Latitudine 43.784764  
 Longitudine 11.206192  
 Comune Firenze  
 Provincia Firenze  
 Regione Toscana

Punti di interpolazione del reticolo 20058 - 20059 - 19837 - 19836

##### Tipo di opera

Tipo di costruzione Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari  
 Vita nominale 50 anni  
 Classe d'uso II - Normali affollamenti e industrie non pericolose  
 Vita di riferimento 50 anni

	Simbolo	U.M.		SLV	SLD
Accelerazione al suolo	$a_g$	[m/s <sup>2</sup> ]		1.281	0.549
Accelerazione al suolo	$a_g/g$	[%]		0.131	0.056
Massimo fattore amplificazione spettro orizzontale	F0			2.404	2.588
Periodo inizio tratto spettro a velocità costante	Tc*			0.301	0.267
Tipo di sottosuolo - Coefficiente stratigrafico	Ss		C	1.500	1.500
Categoria topografica - Coefficiente amplificazione topografica	St		T1	1.000	1.000
Coefficiente riduzione fronti di scavo	$\gamma_s$			0.380	0.470
Rapporto intensità sismica verticale/orizzontale				0.50	0.50

	Simbolo	SLV	SLD
Coefficiente di intensità sismica orizzontale (per cento)	$k_h=(a_g/g \cdot s \cdot St \cdot S)$	7.44	3.95
Coefficiente di intensità sismica verticale (per cento)	$k_v=0.50 \cdot k_h$	3.72	1.97

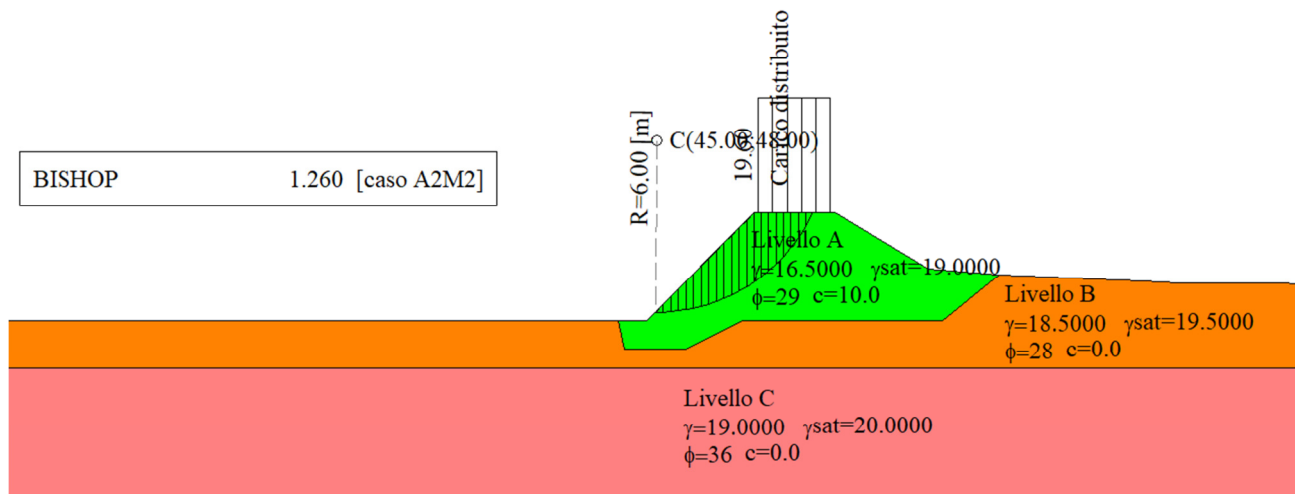
#### 4.3.4.3 Risultati

Nella seguente tabella sono riassunti i risultati delle verifiche di stabilità globale eseguite con le modalità sopra indicate.

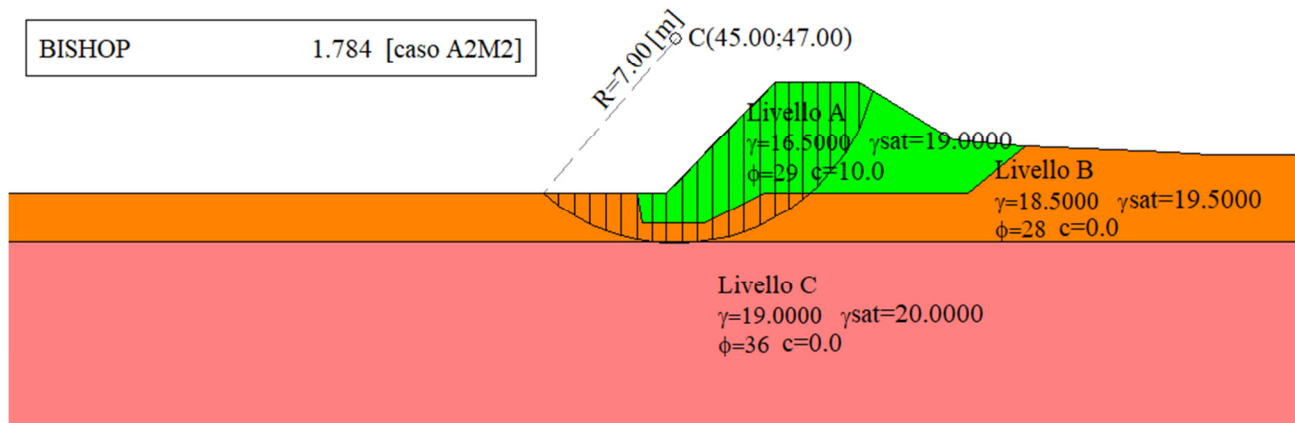
TABELLA 8. RISULTATI DELLE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE PER LE COMBINAZIONI ANALIZZATE IN CONDIZIONI DI LUNGO TERMINE

Descrizione	VERIFICHE IN CONDIZIONI DI LUNGO TERMINE		
	Fattore di sicurezza		
	Statica+sov	Sismica	Statica+rapido svaso
Sez. tipo Argingrosso	1.26	1.78	1.25

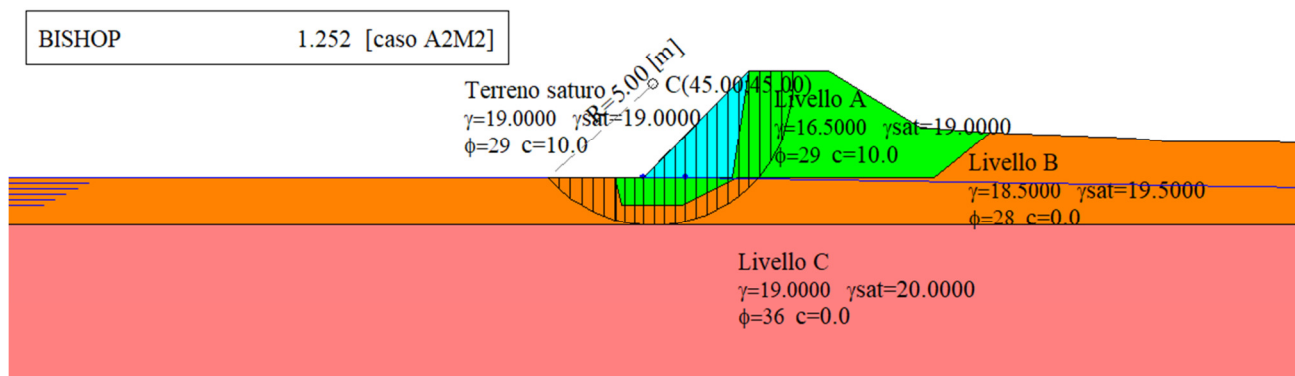
### Statica+sovraccarico LT



### Sismica



### Statica + rapido svasso



#### 4.3.5 Sezione tipo lungo argine sinistro del fiume Greve immediatamente a monte della confluenza con il fiume Arno

##### 4.3.5.1 Dati di input

La geometria della sezione trapezia "tipo" dell'argine sinistro della Greve inserita nel calcolo è di seguito riportata:

- larghezza in sommità 3.0 m;
- altezza paramento lato fiume 3.8 m;
- pendenza paramento lato fiume 1:1.7;
- altezza paramento lato campagna 4.5 m;
- pendenza paramento lato fiume 1:1.8.

Per i valori dei parametri geotecnici dei terreni è stato fatto riferimento alla tabella 9 estratta dall'Allegato 1.

TABELLA 9. PARAMETRI GEOTECNICI ARGINE SINISTRO GREVE

LIVELLI LITOTECNICI	Caratteristiche fisico - meccaniche					
	$\phi$ (°)	$c_u$ kPa	$c'$ kPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$ saturo kN/m <sup>3</sup>	Modulo di deformazione E kPa
<b>LIVELLO A:</b> limo argilloso debolmente sabbioso (da sommità arginale a -2,20 m)	24	50	-	18	19,5	4500
<b>LIVELLO B:</b> limo sabbioso debolmente argilloso e sabbia limosa (da -2,20 a -8 m da sommità arginale)	28	-	-	19	20	12000

Considerando che le verifiche sono state eseguite in condizioni di lungo termine, ossia in condizione di tensioni efficaci, deve essere fatto riferimento ai valori di  $\phi'$  e  $c'$ . Per quanto riportato nella tabella, non avendo a disposizione un valore di  $c'$ , per eseguire le verifiche con un sufficiente grado di approssimazione e correttezza tecnica, è stato necessario assegnare dei valori ai terreni.

In ragione del fatto che:

- il terreno del Livello A, che costituisce il corpo arginale, è un terreno limo argilloso debolmente sabbioso, ossia non siamo in presenza di terreni completamente granulari e che pertanto presentano sempre un valore, seppur minimo, di coesione efficace;

- le caratteristiche granulometriche dei terreni sono simili a quelle dell'Argingrosso per cui è stato stimato dalla prova di taglio un valore di  $c'$  pari a 10 kPa;

in via ragionevolmente cautelativa è stato deciso di assegnare al solo Livello A una coesione efficace  $c'$  pari a 8 kPa, ossia quella misurata per i terreni dell'Argingrosso, ridotta del 20%. Per il Livello B non è stato assegnato alcun valore di coesione efficace.

Per la schematizzazione del terreno saturo nel caso della verifica in condizioni di rapido svasso, non essendo stata eseguita una verifica a filtrazione in quanto non sono disponibili valori di permeabilità dei terreni, è stato considerato in via cautelativa che l'intero corpo arginale sia saturo. Ai terreni dei Livelli A e B è stato quindi assegnato il valore del peso di volume saturo pari rispettivamente a 19.5 kN/mc e 20 kN/mc. Per questo scenario la falda è stata posizionata alla quota del piano campagna dell'area golenale.

#### 4.3.5.2 Parametri sismici

Identificazione del sito (argine sinistro Greve)

Latitudine 43.783035  
 Longitudine 11.181450  
 Comune Firenze  
 Provincia Firenze  
 Regione Toscana

Punti di interpolazione del reticolo 20058 - 19836 - 19835 - 20057

#### Tipo di opera

Tipo di costruzione Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari  
 Vita nominale 50 anni  
 Classe d'uso II - Normali affollamenti e industrie non pericolose  
 Vita di riferimento 50 anni

	Simbolo	U.M.		SLV	SLD
Accelerazione al suolo	$a_g$	[m/s <sup>2</sup> ]		1.269	0.542
Accelerazione al suolo	$a_g/g$	[%]		0.129	0.055
Massimo fattore amplificazione spettro orizzontale	F0			2.393	2.591
Periodo inizio tratto spettro a velocità costante	Tc*			0.299	0.265
Tipo di sottosuolo - Coefficiente stratigrafico	Ss		C	1.500	1.500
Categoria topografica - Coefficiente amplificazione topografica	St		T1	1.000	1.000
Coefficiente riduzione fronti di scavo	$\beta_s$			0.380	0.470
Rapporto intensità sismica verticale/orizzontale				0.50	0.50

	Simbolo	SLV	SLD
Coefficiente di intensità sismica orizzontale (percento)	$k_h = (a_g/g * \beta_s * St * S)$	7.37	3.89
Coefficiente di intensità sismica verticale (percento)	$k_v = 0.50 * k_h$	3.69	1.95

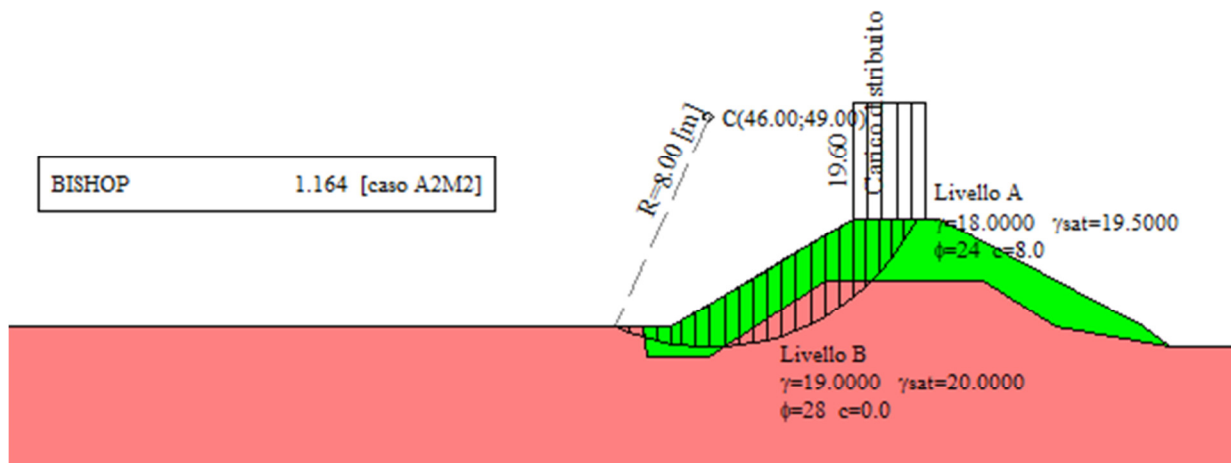
#### 4.3.5.3 Risultati

Nella seguente tabella sono riassunti i risultati delle verifiche di stabilità globale eseguite con le modalità sopra indicate.

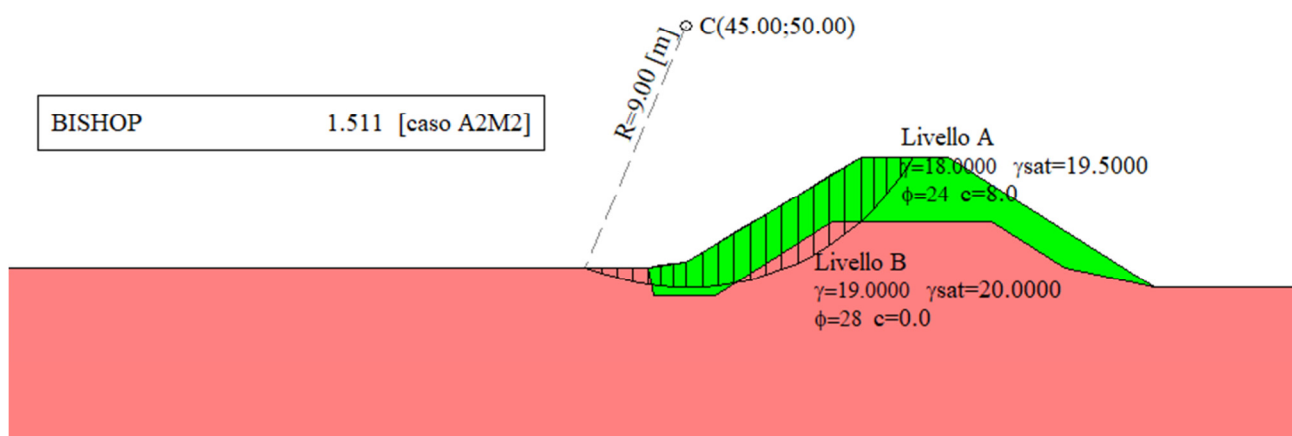
TABELLA 10. RISULTATI DELLE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE PER LE COMBINAZIONI ANALIZZATE IN CONDIZIONI DI LUNGO TERMINE

Descrizione	VERIFICHE IN CONDIZIONI DI LUNGO TERMINE		
	Fattore di sicurezza		
	Statica+sov	Sismica	Statica+rapido svaso
Sez. tipo argine sx Greve	1.16	1.51	1.22

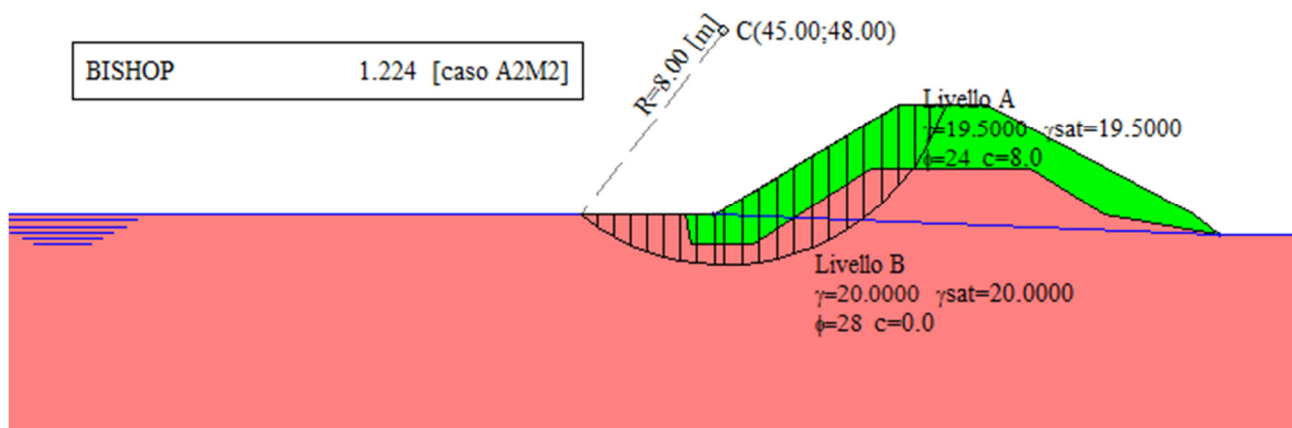
### Statica+sovraccarico LT



### Sismica



### Statica + rapido svaso



**COMUNE DI FIRENZE**

**STUDIO FATTIBILITÀ/PROGETTO  
PRELIMINARE DEGLI INTERVENTI DI  
MANTENIMENTO E ADEGUAMENTO  
STABILITÀ DELL'ARGINGROSSO A FIRENZE**

**Progettisti: A4 Ingegneria S.T.P. a R.L. – con sede in Prato**

**Committente: Regione Toscana**

(Difesa del Suolo e Protezione Civile - Genio Civile Valdarno Superiore)

**ALLEGATO 1**

**RISULTATI E INTERPRETAZIONI  
INDAGINI GEOGNOSTICHE**

**Studio:** Duranti & Focardi Geologi Associati

Dott.ssa Geol. Daria Duranti

Viale della Cristallina n. 48

50019 - Sesto Fiorentino (FI)

Tel.: 3472684010

Cod. Fisc. e P. IVA : 07260600486

e-mail: [daria@durantifocardigeologi.it](mailto:daria@durantifocardigeologi.it)

pec: [durantifocardi@pec.it](mailto:durantifocardi@pec.it)



**INDICE**

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'AREA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Geologia - Geomorfologia .....	3
2.2 Idrogeologia .....	4
<b>3. INDAGINI GEOGNOSTICHE.....</b>	<b>4</b>
3.1 Sondaggi a carotaggio continuo.....	5
3.2 Prove geotecniche di laboratorio.....	6
3.3 Prove di permeabilità in situ Lefranc.....	7
3.4 Indagine georadar.....	9
3.5 Saggi con escavatore meccanico.....	10
3.6 Prove penetrometriche statiche CPT/dinamiche DPSH.....	14
3.7 Indagine sismica.....	15
<b>4. CONSIDERAZIONI GEOTECNICHE .....</b>	<b>16</b>
<b>5. POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE .....</b>	<b>18</b>

**ALLEGATI**

- ORTOFOTO CON UBICAZIONE INDAGINI GEOGNOSTICHE

- INDAGINI GEONOSTICHE ESEGUITE IN SITU

- ✓ SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO CON PROVE SPT IN FORO
- ✓ PROVE DI PERMEABILITÀ IN FORO
- ✓ PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO
- ✓ PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CPT/DINAMICHE DPSH
- ✓ GEORADAR
- ✓ INDAGINI GEOFISICHE (MASW)

## **1. PREMESSA**

Su incarico dei progettisti è stata redatta la presente relazione di interpretazione delle indagini geognostiche a supporto dello **“Studio Fattibilità/Progetto Preliminare degli Interventi di mantenimento e adeguamento stabilità dell’Argingrosso a Firenze”**, nel Comune di Firenze.

La metodologia d’indagine che è stata articolata nelle seguenti fasi:

- rilievo geologico, geomorfologico ed idrogeologico di superficie.
- Analisi della letteratura riferita all’area indagata.
- N. 4 prove penetrometriche statiche CPT/dinamiche DPSH profonde 8-10 metri dl p.c.
- N. 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo con prove SPT in foro, prelievo di campione indisturbato.
- Analisi geotecniche di laboratorio su campione indisturbato.
- Indagine geofisica di superficie (MASW).
- Indagine georadar.
- Saggi geognostici con escavatore meccanico.
- N. 2 prove di permeabilità in foro.

## **2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL’AREA**

### **2.1 Geologia - Geomorfologia**

L’area in studio è ubicata in sinistra idrografica del fiume Arno, denominata Argingrosso; la quota topografica di riferimento della strada è di circa 40 m s.l.m., mentre la testa dell’argine è di circa 43 m s.l.m.

Dal punto di vista geomorfologico sono assenti specifiche manifestazioni attive di natura franosa per posizione morfologica pianeggiante: a causa dell’assenza di acclività non possono attivarsi condizioni dinamiche e/o cinematiche al dissesto.

Secondo quanto individuato dalla cartografia geologica di supporto agli strumenti urbanistici, l’area di intervento è posta all’interno della seguente formazione geologica:

**bna** - Depositi alluvionali recenti, terrazzati e non terrazzati - Ghiaie, sabbie e limi dei terrazzi fluviali.

Le indagini effettuate in situ confermano la presenza in superficie di terreni prevalentemente sabbioso limosi debolmente argillosi.

Nella carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica l'area in studio rientra nelle zone suscettibili di amplificazioni locali n. 31-32, caratterizzata da alternanza di terreni fini e ghiaie in matrice fino a circa 30 metri e poi prevalgono i terreni fini con minime lenti di ghiaia e sabbia intercalate; il substrato è a profondità di oltre 200/300 metri.

## **2.2 Idrogeologia**

La zona in studio rientra nei depositi alluvionali recenti dell'Arno con falda libera, contenuto in uno spessore di ghiaie e sabbie variabile da pochi metri a m 15-20 in corrispondenza di un presumibile paleo alveo principale. All'interno della generica denominazione di "alluvioni" nella piana di Firenze, sotto la sottile copertura recente, si possono quindi utilmente differenziare i depositi clastici fluviali dell'Arno, che attraversano la valle da est a ovest ("acquifero principale", presente nell'area oggetto del presente studio), da quelli argilloso limosi che occupano i terreni a nord fino ai piedi della zona collinare nella fascia da Peretola a Castello da Novoli a Le Cure-Coverciano ("acquifero secondario").

Nel foro del sondaggio S1 è stato installato un piezometro fino alla profondità di 8 metri, all'interno del quale in un periodo di magra, fine luglio 2023, non è stato rilevato il livello piezometrico, in linea con le misurazioni fatte dal comune di Firenze fino al 2010 che individuavano la falda alle quote di circa 30-31 m s.l.m., quindi a profondità oltre i 10 metri (quota topografica argine circa 43 m s.l.m.).

## **3. INDAGINI GEOGNOSTICHE**

Sulla base di quanto indicato nel paragrafo 6.2.2 del D.M. 17.01.2018 "le indagini geotecniche devono essere programmate in funzione del tipo di opera e/o intervento e devono permettere la definizione del modello geotecnico di sottosuolo necessario alla progettazione".

Per la definizione delle litologie e la determinazione dei parametri geomeccanici è stata realizzata in situ una campagna geognostica costituita da:

- N. 4 prove penetrometriche statiche CPT/dinamiche DPSH profonde 8-10 metri dal p.c./sommità argine
- N. 1 sondaggio geognostico profondo 8 metri a carotaggio continuo, con prove SPT in foro, prelievo di campione indisturbato e installazione piezometro
- Analisi geotecniche di laboratorio su campione indisturbato
- Indagini geofisiche di superficie (MASW)

- Indagine georadar
- Saggi geognostici con escavatore meccanico
- N. 2 prove di permeabilità in foro

### **3.1 Sondaggi a carotaggio continuo**

Per la definizione delle litologie e la determinazione dei parametri geomeccanici è stato realizzato in data 20 luglio 2023, nella specifica area di intervento, n. 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo con prove SPT in foro, prelievo campione indisturbato e prove di permeabilità in foro.

All'interno del foro di sondaggio S1 è stato installato un piezometro dove non è stato riscontrato alcun livello piezometrico.

Il sondaggio è stato realizzato sulla sommità dell'argine, fino alla profondità di 8 metri.

All'interno sono state eseguite le seguenti prove:

#### **Sondaggio S1**

- Prelievo campione indisturbato C1 da -0,5 a -1,0 m da sommità argine
- SPT 1 (-2,0 m da sommità argine)      1-1-1       $N^*_{SPT} 2$
- SPT 2 (-4,0 m da sommità argine)      1-1-1       $N^*_{SPT} 2$
- SPT 3 (-8,0 m da sommità argine)      15-15-15       $N^*_{SPT} 30$

\*(La resistenza alla penetrazione del terreno è caratterizzata dalla somma del numero di colpi per il secondo e terzo avanzamento, cioè  $N=N_2+N_3$ )

I valori degli SPT 1 e 2 si ritengono poco attendibili in quanto risentono della imbibizione del terreno dovuto alle prove di permeabilità eseguite alle rispettive quote superiori.

Si evidenzia che le scelte effettuate in relazione alle profondità delle varie prove eseguite derivano dal criterio di priorità assegnato al prelievo del campione indisturbato e alle prove di permeabilità in situ; si è ritenuto non idoneo fare le prove SPT prima delle prove di permeabilità in quanto i valori di permeabilità non sarebbero risultati cautelativi a causa del costipamento del terreno dovuto alle prove penetrometriche.

In base ai risultati del sondaggio a carotaggio continuo sono stati individuati i seguenti livelli litologici, a partire dalla sommità dell'argine:

- |           |  |
|-----------|--|
| 0.0 – 3,7 | Limo con sabbia debolmente argilloso e sabbia limosa<br>con intercalati livelli maggiormente argillosi |
| 3,7 – 5,9 | Limo sabbioso debolmente argilloso   |
| 5,9 – 8,0 | Sabbia grossolana a tratti debolmente limoso argillosa   |

### **3.2 Prove geotecniche di laboratorio**

Durante l'esecuzione del sondaggio geognostico S1 è stato prelevato il seguente campione indisturbato:

- C1 da -0,5 a -1,0 m da sommità argine (denominato S1C1)

Data la natura prevalentemente sabbiosa del terreno e il rimaneggiamento dovuto alla esecuzione delle prove di permeabilità in situ non è stato possibile prendere ulteriori campioni di terreno da sottoporre a prove geotecniche di laboratorio.

Sul campione S1C1 sono state eseguite le seguenti analisi:

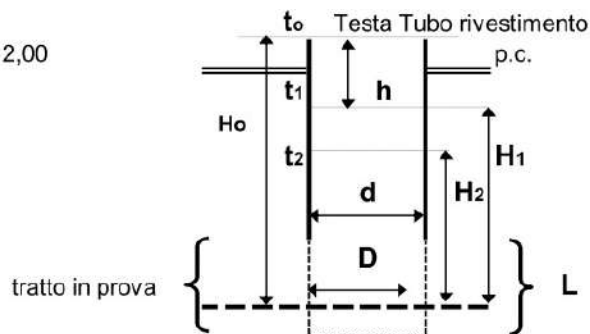
- peso di volume;
- peso specifico dei grani;
- contenuto d'acqua allo stato naturale;
- analisi granulometrica;
- prova di taglio diretto CD (consolidata drenata) che ha permesso l'ottenimento dell'angolo di attrito  $\Phi'$  e la coesione drenata  $c'$ .

Tutti i risultati sono riportati in allegato.

### 3.3 Prove di permeabilità in situ Lefranc

#### Prova 1 da 1,50 a 2,0 m

TRATTO IN PROVA	m da p.c. da	1,50	a	2,00
TEMPO DI PROVA	minuti	30,00		
PROFONDITÀ FONDO FORO	m da p.c.	-2,00		
PROFONDITÀ RIVESTIMENTO	m da p.c.	-1,50		
ALTEZZA T.T. RIVESTIMENTO	m da p.c.	0,10		
LIVELLO DELLA FALDA	m da p.c.	N.D.		
LUNGHEZZA TASCA	L m	0,50		
DIAMETRO TASCA	D m	0,101		
DIAMETRO RIVESTIMENTO	d m	0,127		

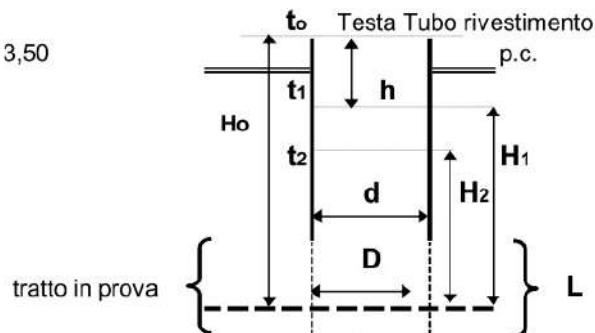


t (sec)	Livello da T.T. (m)	h m da p.c.	H m	K m/sec
0	0,000	0,100	1,850	
30	-0,040	0,060	1,810	6,77E-06
60	-0,08	0,020	1,770	6,92E-06
90	-0,120	-0,020	1,730	7,07E-06
120	-0,160	-0,060	1,690	7,24E-06
150	-0,180	-0,080	1,670	3,68E-06
180	-0,200	-0,100	1,650	3,73E-06
210	-0,230	-0,130	1,620	5,68E-06
240	-0,260	-0,160	1,590	5,79E-06
270	-0,290	-0,190	1,560	5,90E-06
300	-0,310	-0,210	1,540	3,99E-06
360	-0,350	-0,250	1,500	4,07E-06
420	-0,380	-0,280	1,470	3,13E-06
480	-0,420	-0,320	1,430	4,27E-06
540	-0,460	-0,360	1,390	4,39E-06
600	-0,480	-0,380	1,370	2,24E-06
720	-0,520	-0,420	1,330	2,29E-06
840	-0,580	-0,480	1,270	3,57E-06
960	-0,640	-0,540	1,210	3,74E-06
1080	-0,700	-0,600	1,150	3,94E-06
1200	-0,740	-0,640	1,110	2,74E-06
1500	-0,900	-0,800	0,950	4,82E-06
1800	-1,000	-0,900	0,850	3,44E-06

**K = 4,52E-06 m/sec**  
media sull'intero intervallo

### Prova 2 da 3,00 a 3,50 m

TRATTO IN PROVA	m da p.c. da	3,00	a	3,50
TEMPO DI PROVA	minuti	60,00		
PROFONDITÀ FONDO FORO	m da p.c.	-3,50		
PROFONDITÀ RIVESTIMENTO	m da p.c.	-3,00		
ALTEZZA T.T. RIVESTIMENTO	m da p.c.	0,10		
LIVELLO DELLA FALDA	m da p.c.	N.D.		
LUNGHEZZA TASCA	L m	0,50		
DIAMETRO TASCA	D m	0,101		
DIAMETRO RIVESTIMENTO	d m	0,127		



t (sec)	Livello da T.T. (m)	h m da p.c.	H m	K m/sec
0	0,000	0,100	3,350	
30	0,000	0,100	3,350	0,00E+00
60	0,000	0,100	3,350	0,00E+00
90	-0,001	0,099	3,349	9,24E-08
120	-0,001	0,099	3,349	0,00E+00
150	-0,004	0,096	3,346	2,77E-07
180	-0,006	0,094	3,344	1,85E-07
210	-0,010	0,090	3,340	3,70E-07
240	-0,010	0,090	3,340	0,00E+00
270	-0,012	0,088	3,338	1,85E-07
300	-0,015	0,085	3,335	2,78E-07
360	-0,018	0,082	3,332	1,39E-07
420	-0,020	0,080	3,330	9,29E-08
480	-0,025	0,075	3,325	2,33E-07
540	-0,027	0,073	3,323	9,31E-08
600	-0,030	0,070	3,320	1,40E-07
720	-0,030	0,070	3,320	0,00E+00
840	-0,030	0,070	3,320	0,00E+00
960	-0,030	0,070	3,320	0,00E+00
1080	-0,030	0,070	3,320	0,00E+00
1200	-0,030	0,070	3,320	0,00E+00
1500	-0,040	0,060	3,310	9,34E-08
1800	-0,040	0,060	3,310	0,00E+00

$$K = 9,91E-08 \text{ m/sec}$$

media sull'intero intervallo

### 3.4 Indagine georadar

Dopo aver preso visione della zona e delle problematiche ad essa connesse si è programmato un rilievo Georadar di dettaglio sulla sommità dell'argine, al fine di acquisire informazioni sulla presenza di disomogeneità e/o manufatti all'interno dell'argine.

L'indagine è stata eseguita con strumentazioni Stream C (multiantenna) e Opera Duo (Biantenna) e mediante l'utilizzo di un sistema GPS differenziale per la corretta georeferenziazione delle strisciate, quindi delle anomalie rilevate.

In allegato viene descritto lo schema operativo e le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, congiuntamente all'interpretazione scaturita dai dati elaborati.

Lo scopo dell'indagine georadar era quello di indagare il tratto di argine sito in Via dell'Argingrosso nel Comune di Firenze. L'indagine ha individuato una discontinuità continua (in blu) che si estende nella parte est dell'argine.

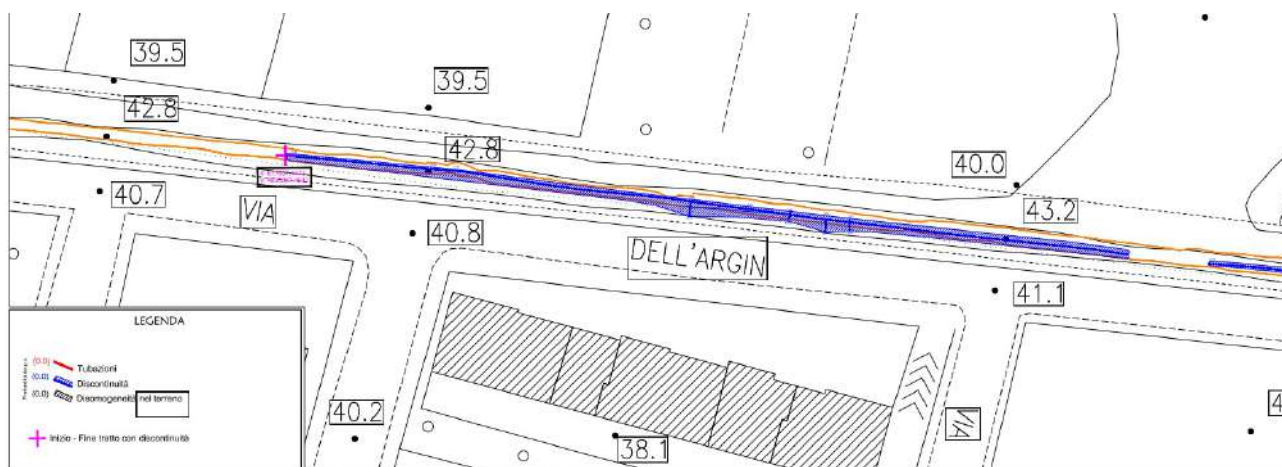
Le coordinate di inizio-fine delle discontinuità vengono riportate di seguito (e nelle tavole allegate):

INIZIO (all'altezza circa di via Ciseri, vedi immagine sottostante)

X: 677607.4472 / y: 4850007.4642

FINE (al termine ad est di via dell'Argingrosso)

X: 678035.9057 / y: 4849959.7712



Lungo l'argine ad ovest di via Ciseri la discontinuità sopra descritta non è stata individuata.



In sintesi il tratto di argine dove è stata individuata la struttura sepolta è di circa 425 metri, a partire dall'inizio orientale di via dell'Argingrosso.

Sono inoltre presenti delle tubazioni trasversali (in rosso) e delle disomogeneità nel terreno (in nero) (Tavole 02-11 in allegato).

Tutti i dettagli sono riportati nelle tavole in allegato.

### **3.5 Saggi con escavatore meccanico**

Al fine di individuare più correttamente la natura della discontinuità lineare riscontrata con il georadar sono stati eseguiti n. 2 saggi con escavatore fino alla profondità di circa -1,50 m da sommità argine.

Il saggio n. 2 ha permesso di identificare la presenza a circa -0,50 m di materiale estremamente consistente costituito da pietre con spigoli vivi, molto probabilmente legate da cemento.





*Saggio 2 con materiale resistente a -0,5 m dalla sommità dell'argine*



*Saggio 1 profondo 1,5 m dalla sommità dell'argine*

### **3.6 Prove penetrometriche statiche CPT/dinamiche DPSH**

Per la definizione delle litologie e la determinazione dei parametri geomeccanici lungo l'argine di via dell'Argingrosso è stata realizzata una campagna geognostica in situ costituita da n. 2 prove penetrometriche statiche CPT 2/3 e n. 1 prova dinamica DIN 4 in data 21.06.2023, con il raggiungimento della profondità di 8 metri.

La prova dinamica DIN 1 è stata invece realizzata a tergo di un muro a retta spondale a Ugnano.

Riepilogando i risultati presenti in allegato, sono stati individuati i seguenti livelli litologici lungo l'argine di via dell'Argingrosso, le cui profondità sono riferite al p.c. o alla sommità dell'argine:

#### **Argingrosso (prove CPT 3 - DIN 4)**

da sommità argine a circa 2,2 m	sabbia con limo/limo con sabbia debolmente argilloso
da 2,20 a 3,4 m	limo argilloso
da 3,4 circa 6,2/6,6 m	limo sabbioso debolmente argilloso e sabbia limosa
da 6,2/6,6 a 8,0 m	sabbia grossolana con livelli argillosi

#### **argine sinistra idrografica F. Greve (prova CPT 2)**

da sommità argine a circa 2,2 m	limo argilloso debolmente sabbioso
da 2,20 a 8,0 m	limo sabbioso debolmente argilloso e sabbia limosa

#### **Ugnano (prova DIN 1)**

Da p.c. a circa 0,40 m	terreno di riporto
da 0,40 a 6,20 m	limo argilloso
da 6,20 a 10 m	sabbia grossolana con livelli argillosi

### 3.7 Indagine sismica

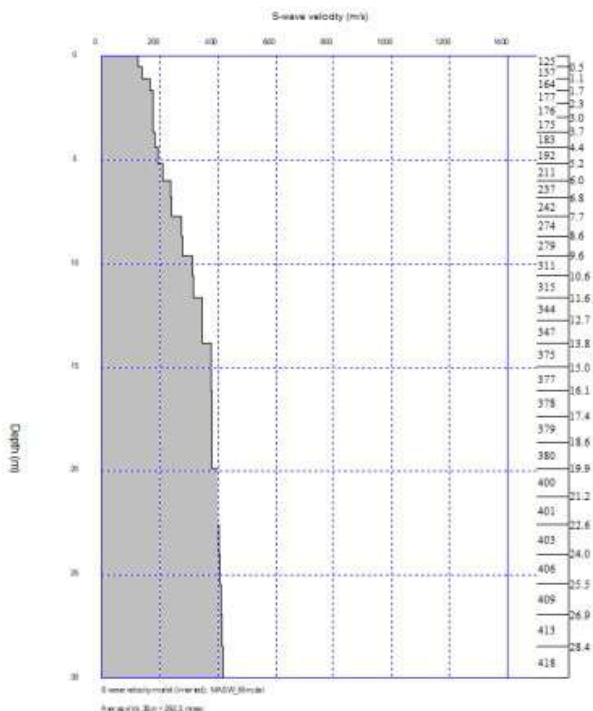
Sulla sommità dell'argine, in corrispondenza del sondaggio S1, è stata eseguita una campagna geofisica con analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves), al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame, ed in particolare i valori di velocità delle onde di taglio, così come previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (vedi allegati).

La classificazione dei terreni è ottenuta sulla base del valore della  $V_{S,eq}$  (velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio), definita dalla relazione:

$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$	$h_i$ spessore dell'i-esimo strato; $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato; $N$ numero di strati; $H$ profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da $V_s$ non inferiore a 800 m/s.
---	---

Nella figura sottostante vengono riportati gli spessori e le relative velocità  $V_s$ , ricordando che, come in tutti i metodi geofisici, può essere ottenuta solo una stima del modello sismostratigrafico a causa del problema della non univocità.

#### Profilo $V_s$ Inversione MASW



L'analisi della dispersione delle onde superficiali nelle componenti di Rayleigh/Love fornisce i valori di velocità delle onde di taglio mediate sui primi 30 m (cosiddetta  $V_s$  equivalente), così come previsto dal D.M. 17/01/2018 Testo Unico - Norme Tecniche per le Costruzioni. Sulla base delle caratteristiche litologiche, ma soprattutto sulla base dei valori di velocità ottenuti, è stato possibile definire il valore di  $V_{SEQ}$  media per l'area in oggetto, considerando come riferimento la sommità dell'argine:

$$V_{SEQ} = V_{s30} = 290 \text{ m/s}$$

Sulla base del profilo sismostratigrafico ottenuto, il sito risulta compatibile con la **CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C** secondo le NTC 2018 - Tabella 3.2.II - *“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.”*

Si evidenzia che nello specifico la carta dei fattori di amplificazione dello studio di microzonazione sismica di III livello allegata agli strumenti urbanistici individuano per la specifica area un fattore di amplificazione sismico di 1.53, in linea con tale risultato.

#### **4. CONSIDERAZIONI GEOTECNICHE**

La presente relazione è redatta ai sensi delle Norme Tecniche (DM 17/01/2018) ed al D.P.G.R. n. 1/R del 2022, tenendo conto inoltre dei criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale (Allegato al voto n. 36 del 27.07.2007) e degli Eurocodici 8 (1998), 7.1 (1997), 7.2 (2002), 7.3 (2002), inerenti la Progettazione geotecnica.

Con riferimento all'Eurocodice 7 riguardo alla Progettazione Geotecnica e come richiesto dalle NTC 2018, sulla base dei dati ricavati dalle indagini in situ, si sono calcolati i valori medi del terreno.

Pur nella consapevolezza che della modellazione geotecnica è responsabile il Progettista si suggeriscono, per un'eventuale comparativa, alcuni dei valori dei principali parametri geotecnici medi che derivano da una stima ragionata e cautelativa dei corrispettivi parametri elaborati nei certificati di prova.

UGNANO (prova DIN 1)

<b>LIVELLI LITOTECNICI</b>	<b>Caratteristiche fisico - meccaniche</b>					
	$\phi$ (°)	$c_u$ kPa	$c'$ kPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$ saturo kN/m <sup>3</sup>	Modulo di deformazione <b>E</b> kPa
<b>LIVELLO A:</b> terreno di riporto (dal p.c. a circa -0,40 m dal p.c.)	18	10	-	17	20	2000
<b>LIVELLO B:</b> limo argilloso (da -0,40 a -6,20 m dal p.c.)	25	20	-	18	19	3000
<b>LIVELLO C:</b> sabbia grossolana con livelli argillosi (da -6,20 a -10 m dal p.c.)	32	-	-	19	20	25000

ARGINE SINISTRO FIUME GREVE, VICINO ALLA CONFLUENZA CON L'ARNO

<b>LIVELLI LITOTECNICI</b>	<b>Caratteristiche fisico - meccaniche</b>					
	$\phi$ (°)	$c_u$ kPa	$c'$ kPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$ saturo kN/m <sup>3</sup>	Modulo di deformazione <b>E</b> kPa
<b>LIVELLO A:</b> limo argilloso debolmente sabbioso (da sommità arginale a -2,20 m)	24	50	-	18	19,5	4500
<b>LIVELLO B:</b> limo sabbioso debolmente argilloso e sabbia limosa (da -2,20 a -8 m da sommità arginale)	28	-	-	19	20	12000

**ARGINE VIA DELL'ARGININGROSSO**

<b>LIVELLI LITOTECNICI</b>	<b>Caratteristiche fisico - meccaniche</b>					
	$\phi'$ (°)	$c_u$ kPa	$c'$ kPa	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$ saturo kN/m <sup>3</sup>	Modulo di deformazione <b>E</b> kPa
<b>LIVELLO A:</b> limo con sabbia debolmente argilloso (dalla sommità arginale a circa -3,50 m)	29	40	10	16,5	19	5000
<b>LIVELLO B:</b> limo sabbioso debolmente argilloso e sabbia limosa (da -3,50 a -6,00 m da sommità arginale)	28	-	-	18,5	19,5	9000
<b>LIVELLO C:</b> sabbia grossolana con livelli argillosi (da -6,0 a -8,0 m da sommità arginale)	36	-	-	19	20	25000

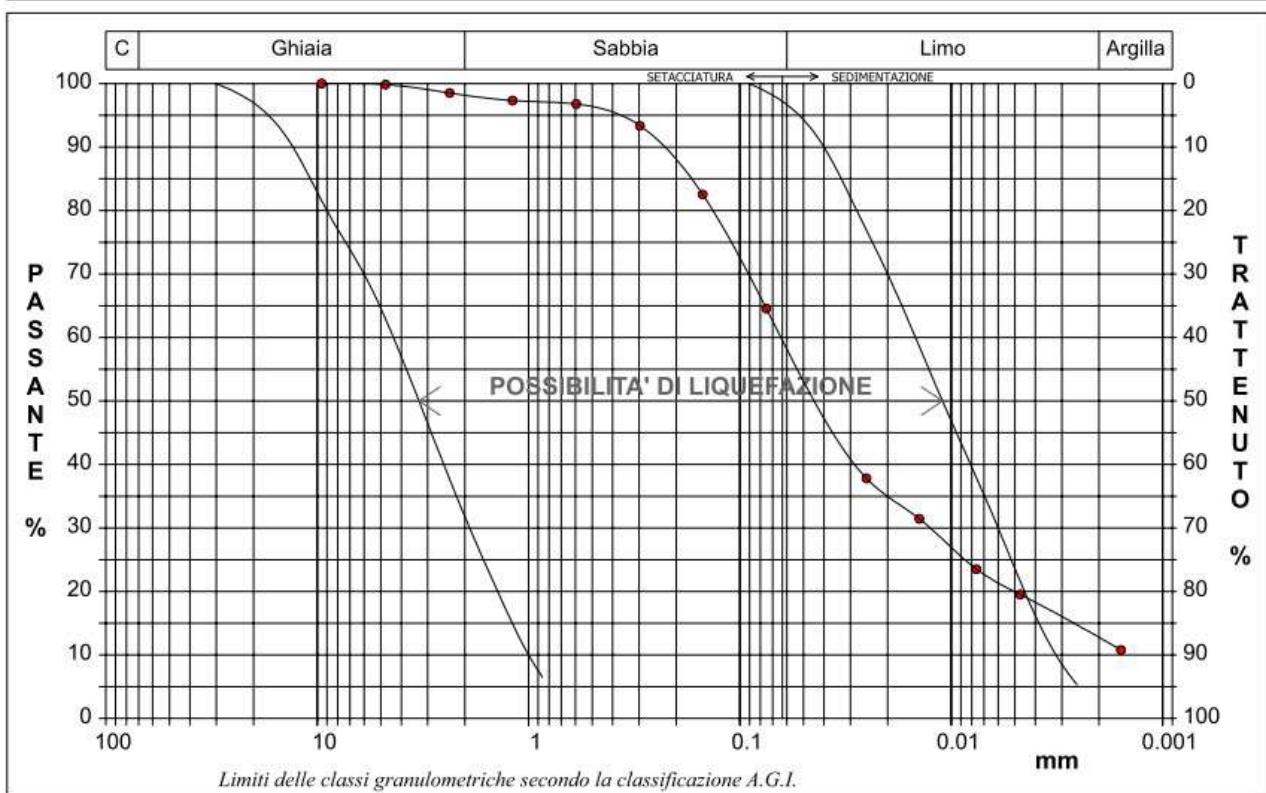
Da un confronto tra i risultati delle prove penetrometriche statica CPT 3 e dinamica DIN 4 eseguite sull'argine di via dell'Argingrosso con quelli del sondaggio a carotaggio continuo e delle prove geotecniche di laboratorio sul campione indisturbato prelevato, si rileva una uniformità sia nella stratigrafia riscontrata che nelle caratteristiche geomeccaniche dei materiali attraversati.

**5. POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE**

Il potenziale di liquefazione prodotto per tensioni cicliche derivanti da un evento tellurico nasce dall'istantaneo incremento di pressioni neutre sottoposte all'accelerazione sismica, che possono comportare il totale annullamento delle pressioni effettive intergranulari, determinando il completo decadimento della resistenza tangenziale di un terreno a comportamento esclusivamente granulare.

Perché ciò possa accadere occorre che il sedimento non sia dotato di coesione e che il drenaggio non sia talmente rapido da avvenire istantaneamente. Per tali motivazioni soltanto i depositi sabbiosi fini monogranulari, saturi e non addensati risultano soggetti a tale tipo di rischio.

Dall'analisi granulometrica sono stati elaborati i grafici della granulometria a confronto con i fusi da normativa per la verifica della potenziale liquefazione Sondaggio S1 campione C1 (0,5-1,0 m).



Dall'analisi del grafico è emerso che la curva granulometrica risulta esterna alla zona di suscettibilità con percentuale di circa il 18%.

Sesto Fiorentino, 14.09.2023



Il Tecnico  
(Dott. Geol. Daria Duranti)

# ALLEGATI

- ORTOFOTO CON UBICAZIONE INDAGINI GEOGNOSTICHE:

✓ SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO CON PROVE SPT IN  
FORO

✓ PROVE DI PERMEABILITÀ IN FORO

✓ PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO

✓ PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CPT/DINAMICHE DPSH

✓ GEORADAR

✓ INDAGINI GEOFISICHE (MASW)



Via Pisroiese

QUARACCHI

LE PIAGGE

Via Francesco Ba

Arno

Prova penetrometrica  
CPT2 (8 m)  
sx idrografica F. Greve

Mantignano

Prova penetrometrica  
CPT3 (8 m)

Via A. Canova

MASW

Sondaggio S1 (8 m)

Prova  
penetrometrica  
DIN4 (8 m)

Via A. Canova

Via A. Canova

Google Earth

Image Landsat / Copernicus

1 km





Committente A4 Ingegneria stp a r.l.			Località Firenze (FI)		Certificato n° / Data 169A del 24/07/2023	
Cantiere Via dell'Argingrosso			Sondaggio n. S1	Inizio / Fine Esecuzione Dal 20/07/2023 al 21/07/2023	Commessa n° / Data 169 del 31/05/2023	
Responsabile di sito Dr. Alessio Costantini	Operatore D'Andrea e Gorini	Tipo Carotaggio continuo		Tipo Sonda T41 Rossa	Diametro perforazione / Diametro rivestimento 101 mm / 127 mm	

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	S.P.T. (n° Colpi)	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cass. Catalog.	Piezometro	P-(1)
1		Sabbia debolmente limoso argillosa con livelletti maggiormente argillosi.			S					
2		Limo sabbioso debolmente argilloso.	3.70	1-1-1 2.00 PC			(RM)			
3							3.00			
4				1-1-1 4.00 PC						
5								# 1		
6			5.90							
7										
8			8.00	15-15-15 8.00 PC		(CS) 8.00		# 2		A 8.00

## PROVA DI PERMEABILITÀ LEFRANC - PROVA PER IMMISSIONE A CARICO VARIABILE

COMMESSA n°: **169** del **31/05/2023** CERTIFICATO n°: **169B** del **25/07/23**

COMMITTENTE: **A4 Ingegneria - Regione Toscana**

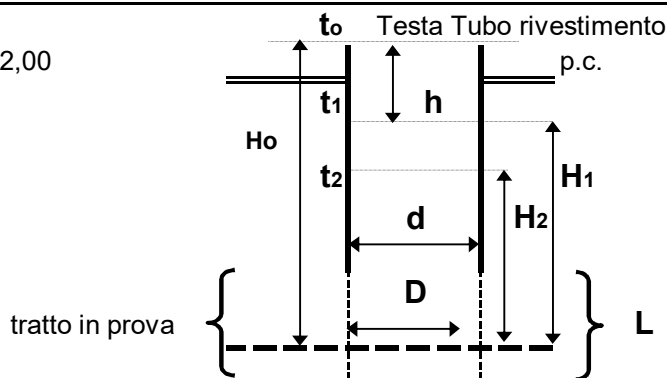
CANTIERE: **Loc. Argingrosso - Firenze (FI)**

SONDAGGIO n°: **S1**

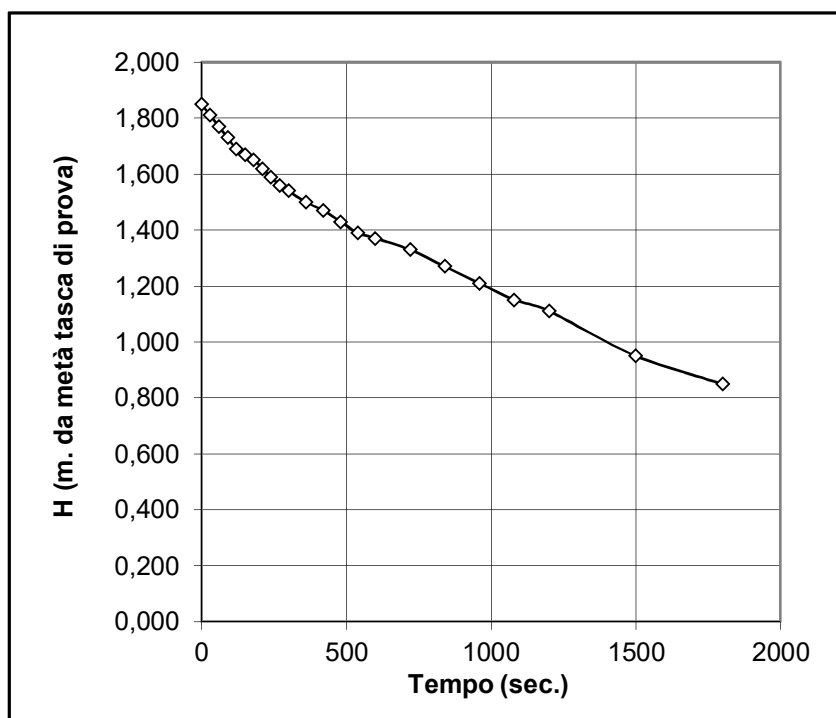
PROVA n°: **1**

DATA: **20/07/23**

TRATTO IN PROVA	m da p.c. da	1,50	a	2,00
TEMPO DI PROVA	minuti	<b>30,00</b>		
PROFONDITÀ FONDO FORO	m da p.c.	<b>-2,00</b>		
PROFONDITÀ RIVESTIMENTO	m da p.c.	<b>-1,50</b>		
ALTEZZA T.T. RIVESTIMENTO	m da p.c.	<b>0,10</b>		
LIVELLO DELLA FALDA	m da p.c.	N.D.		
LUNGHEZZA TASCA	L m	0,50		
DIAMETRO TASCA	D m	<b>0,101</b>		
DIAMETRO RIVESTIMENTO	d m	<b>0,127</b>		



t (sec)	Livello da T.T. (m)	h m da p.c.	H m	K m/sec
0	0,000	0,100	1,850	
30	-0,040	0,060	1,810	6,77E-06
60	-0,08	0,020	1,770	6,92E-06
90	-0,120	-0,020	1,730	7,07E-06
120	-0,160	-0,060	1,690	7,24E-06
150	-0,180	-0,080	1,670	3,68E-06
180	-0,200	-0,100	1,650	3,73E-06
210	-0,230	-0,130	1,620	5,68E-06
240	-0,260	-0,160	1,590	5,79E-06
270	-0,290	-0,190	1,560	5,90E-06
300	-0,310	-0,210	1,540	3,99E-06
360	-0,350	-0,250	1,500	4,07E-06
420	-0,380	-0,280	1,470	3,13E-06
480	-0,420	-0,320	1,430	4,27E-06
540	-0,460	-0,360	1,390	4,39E-06
600	-0,480	-0,380	1,370	2,24E-06
720	-0,520	-0,420	1,330	2,29E-06
840	-0,580	-0,480	1,270	3,57E-06
960	-0,640	-0,540	1,210	3,74E-06
1080	-0,700	-0,600	1,150	3,94E-06
1200	-0,740	-0,640	1,110	2,74E-06
1500	-0,900	-0,800	0,950	4,82E-06
1800	-1,000	-0,900	0,850	3,44E-06



**K = 4,52E-06 m/sec**  
media sull'intero intervallo

LITOLOGIA TRATTO IN PROVA: **Sabbia Limosa**

## PROVA DI PERMEABILITÀ LEFRANC - PROVA PER IMMISSIONE A CARICO VARIABILE

COMMESSA n°: **169** del **31/05/2023** CERTIFICATO n°: **169C** del **25/07/23**

COMMITTENTE: **A4 Ingegneria - Regione Toscana**

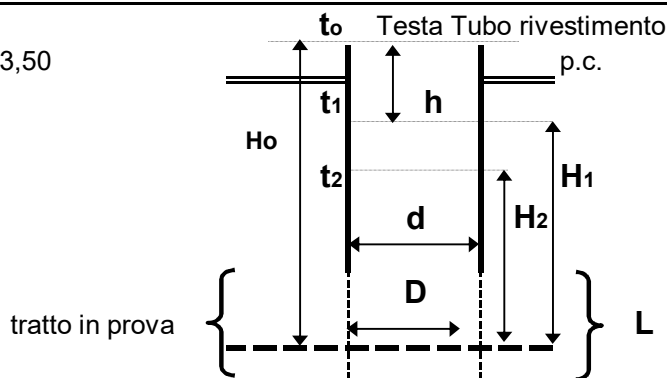
CANTIERE: **Loc. Argingrosso - Firenze (FI)**

SONDAGGIO n°: **S1**

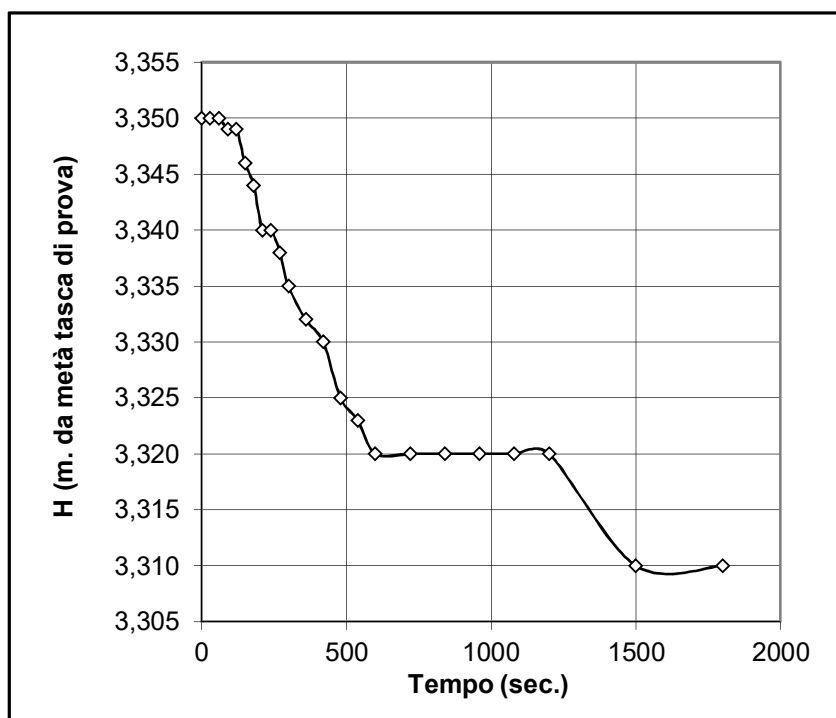
PROVA n°: **2**

DATA: **20/07/23**

TRATTO IN PROVA	m da p.c. da	3,00	a	3,50
TEMPO DI PROVA	minuti	<b>60,00</b>		
PROFONDITÀ FONDO FORO	m da p.c.	<b>-3,50</b>		
PROFONDITÀ RIVESTIMENTO	m da p.c.	<b>-3,00</b>		
ALTEZZA T.T. RIVESTIMENTO	m da p.c.	<b>0,10</b>		
LIVELLO DELLA FALDA	m da p.c.	N.D.		
LUNGHEZZA TASCA	L m	0,50		
DIAMETRO TASCA	D m	<b>0,101</b>		
DIAMETRO RIVESTIMENTO	d m	<b>0,127</b>		



t (sec)	Livello da T.T. (m)	h m da p.c.	H m	K m/sec
0	0,000	0,100	3,350	
30	0,000	0,100	3,350	0,00E+00
60	0,000	0,100	3,350	0,00E+00
90	-0,001	0,099	3,349	9,24E-08
120	-0,001	0,099	3,349	0,00E+00
150	-0,004	0,096	3,346	2,77E-07
180	-0,006	0,094	3,344	1,85E-07
210	-0,010	0,090	3,340	3,70E-07
240	-0,010	0,090	3,340	0,00E+00
270	-0,012	0,088	3,338	1,85E-07
300	-0,015	0,085	3,335	2,78E-07
360	-0,018	0,082	3,332	1,39E-07
420	-0,020	0,080	3,330	9,29E-08
480	-0,025	0,075	3,325	2,33E-07
540	-0,027	0,073	3,323	9,31E-08
600	-0,030	0,070	3,320	1,40E-07
720	-0,030	0,070	3,320	0,00E+00
840	-0,030	0,070	3,320	0,00E+00
960	-0,030	0,070	3,320	0,00E+00
1080	-0,030	0,070	3,320	0,00E+00
1200	-0,030	0,070	3,320	0,00E+00
1500	-0,040	0,060	3,310	9,34E-08
1800	-0,040	0,060	3,310	0,00E+00



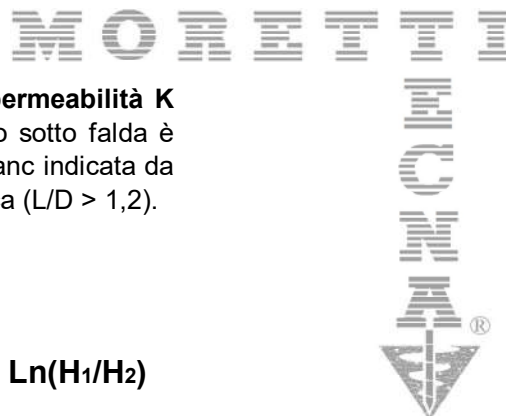
**K = 9,91E-08 m/sec**  
media sull'intero intervallo

LITOLOGIA TRATTO IN PROVA: **Sabbia limo-argillosa**

## PROVA DI PERMEABILITÀ "LEFRANC"

### PROVA PER IMMISSIONE A CARICO VARIABILE

### LEGENDA:



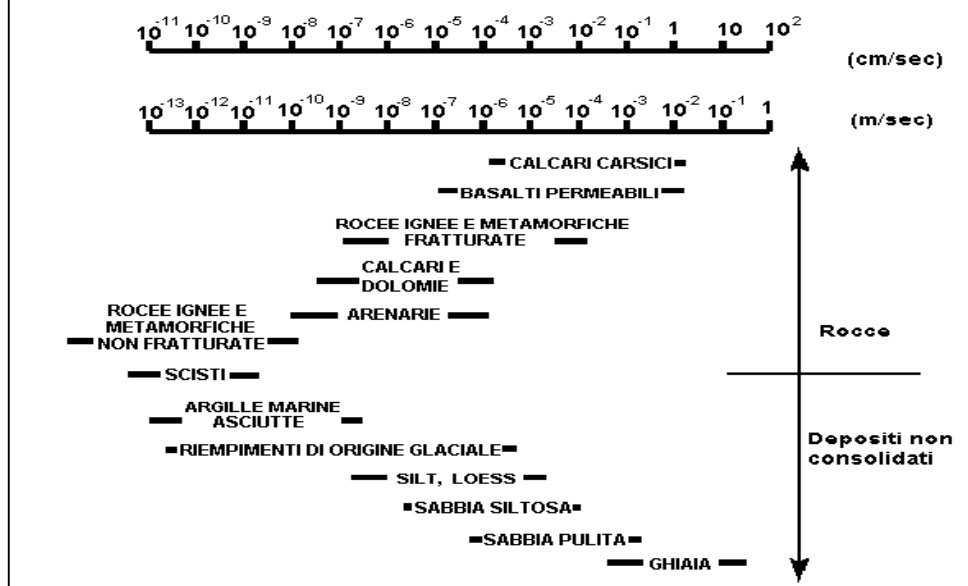
La determinazione in sito del **coefficiente di permeabilità K** del tratto filtrante (tratto in prova) sopra falda o sotto falda è stata determinata utilizzando la formula di Le Franc indicata da Cassan (1980), per cavità di filtrazione ellissoidica ( $L/D > 1,2$ ).

#### Formula a carico variabile:

$$K = \left\{ \frac{d^2 * \ln [L/D + \sqrt{(L^2/D^2 + 1)}]}{8L * (t_2 - t_1)} \right\} * \ln(H_1/H_2)$$

<b>d</b> = diametro interno del rivestimento	(m.)
<b>L</b> = lunghezza del tratto di prova (tasca di prova)	(m.)
<b>D</b> = diametro della tasca di prova	(m.)
<b>h</b> = p.c.	(m.)
<b>t<sub>0</sub></b> = tempo di lettura dell'altezza dell'acqua ad inizio prova	(sec.)
<b>t<sub>1</sub></b> = tempo di lettura dell'altezza dell'acqua h <sub>1</sub>	(sec.)
<b>t<sub>2</sub></b> = tempo di lettura dell'altezza dell'acqua h <sub>2</sub>	(sec.)
<b>H<sub>0</sub></b> = carico idraulico al tempo t <sub>0</sub> (m.)	(m.)
<b>H<sub>1</sub></b> = carico idraulico al tempo t <sub>1</sub> (m.)	(m.)
<b>H<sub>2</sub></b> = carico idraulico al tempo t <sub>2</sub> (m.)	(m.)
<b>K</b> = coefficiente di permeabilità in sito	(m/sec)

### Scala dei valori del coefficiente di permeabilità K





**Autorizzazione del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti**  
Settore A – Prove di laboratorio su terre  
Decreto 2436 del 14/03/2013 – ART. 59 DPR 380/2001 – Circolare 7618/STC 2010

# LABOTER Srl

## Lab. Geotecnico - C.S.LL.PP. Decr. 2436/13

**Committente :** TECNA srl  
**Cantiere :** Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)

**Verbale Accettazione n° :** 393 del 27/07/2023  
**Data Certificazione :** 14/09/2023  
**Campioni n°:** 1  
**Certificati da n° a n° :** 04412 a 04415







<b>CERTIFICATO DI PROVA N°: 04413</b>	Pagina 1/1	DATA DI EMISSIONE: 14/09/23	Inizio analisi: 06/09/23
VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 393 del 27/07/23		Apertura campione: 06/09/23	Fine analisi: 06/09/23

COMMITTENTE: TECNA srl			
RIFERIMENTO: Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)			
SONDAGGIO: 1	CAMPIONE: 1	PROFONDITA': m	0.5-1.0

## PESO DI VOLUME ALLO STATO NATURALE

Modalità di prova: Norma BS 1377 T 15/E

Determinazione eseguita mediante fustella tarata

**Peso di volume allo stato naturale = 16,6 kN/m³**

**LABOTER S.r.l.**

Via Nazario Sauro n.440  
51100 Pistoia  
Tel. 0573 570566  
e-mail: laboter@laboterpt.it

DNV Business Assurance  
Certificato N° 111177-2012-AQ-ITA-ACCREDIA  
UNI EN ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015)  
Prove Geotecniche di Laboratorio su terre (Settore EA: 35)

Autorizzazione del MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI  
Settore A - Prove di Laboratorio su terre  
Decreto 2436 del 14/03/2013 - Art. 59 DPR 380/2001 - Circolare 7618/STC 2010

**CERTIFICATO DI PROVA N°: 04414** Pagina 1/1

VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 393 del 27/07/23

DATA DI EMISSIONE: 14/09/23

Inizio analisi: 07/09/23

Apertura campione: 06/09/23

Fine analisi: 12/09/23

COMMITTENTE: TECNA srl

RIFERIMENTO: Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)

SONDAGGIO: 1

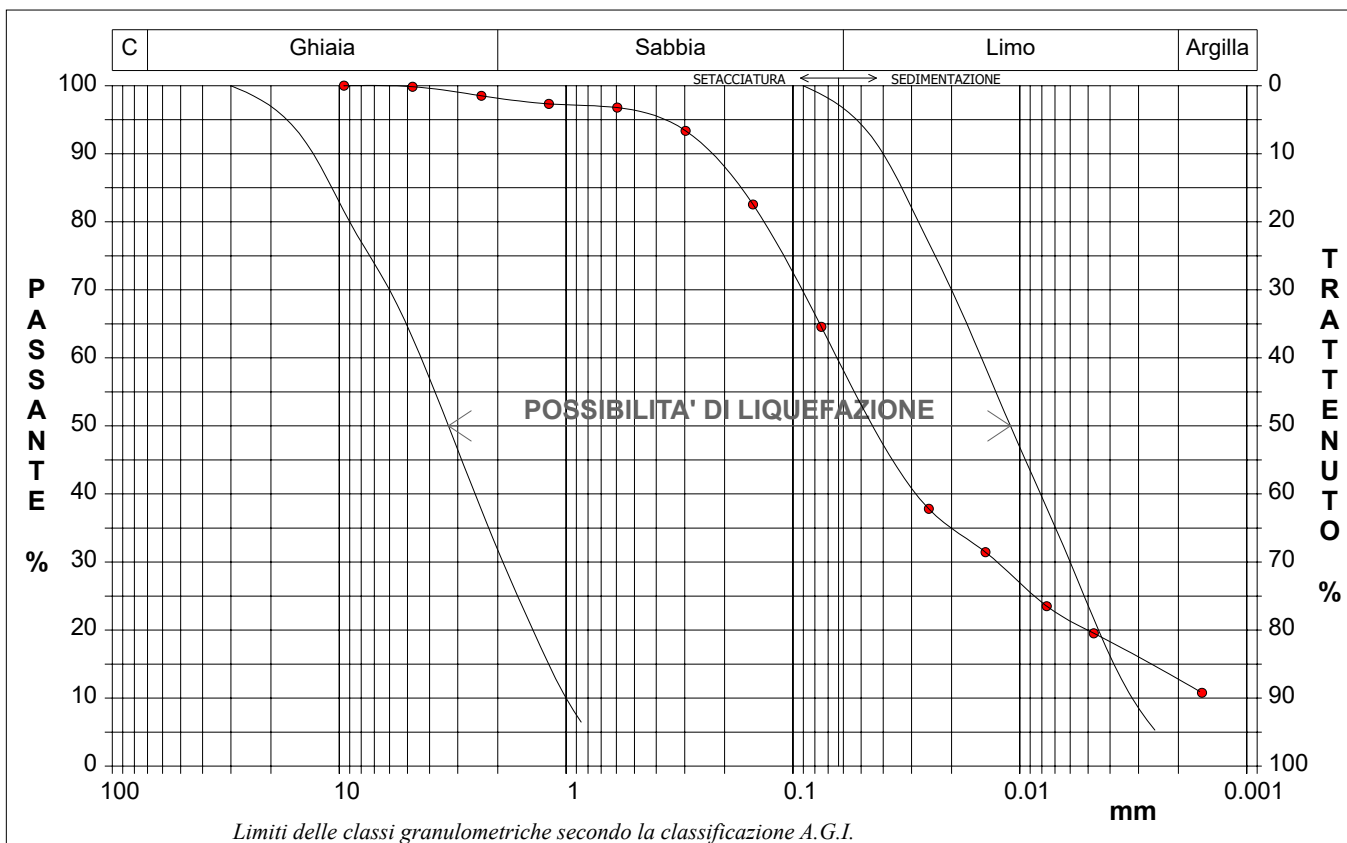
CAMPIONE: 1

PROFONDITA': m 0.5-1.0

**ANALISI GRANULOMETRICA**

Modalità di prova: Norma A.G.I. 1977

Ghiaia	1,8 %	Passante setaccio 10 (2 mm)	98,2 %	D10	0,00142 mm
Sabbia	39,1 %	Passante setaccio 40 (0.42 mm)	95,1 %	D30	0,01265 mm
Limo	46,4 %	Passante setaccio 200 (0.075 mm)	64,6 %	D50	0,04139 mm
Argilla	12,7 %			D60	0,06224 mm
				D90	0,24023 mm
Coefficiente di uniformità		43,68	Coefficiente di curvatura		1,80



Diametro mm	Passante %	Diametro mm	Passante %	Diametro mm	Passante %	Diametro mm	Passante %	Diametro mm	Passante %
9,5200	100,00	0,2970	93,36	0,0076	23,50				
4,7500	99,84	0,1500	82,53	0,0047	19,53				
2,3600	98,52	0,0750	64,57	0,0016	10,79				
1,1900	97,32	0,0252	37,81					Setacci	7
0,5950	96,78	0,0142	31,45					Punti sediment.	5

**LABOTER S.r.l.**

Via Nazario Sauro n.440  
51100 Pistoia  
Tel. 0573 570566  
e-mail: laboter@laboterpt.it

DNV Business Assurance  
Certificato N° 111177-2012-AQ-ITA-ACCREDIA  
UNI EN ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015)  
Prove Geotecniche di Laboratorio su terre (Settore EA: 35)

Autorizzazione del MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI  
Settore A - Prove di Laboratorio su terre  
Decreto 2436 del 14/03/2013 - Art. 59 DPR 380/2001 - Circolare 7618/STC 2010

**CERTIFICATO DI PROVA N°: 04415** Pagina 1/4

VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 393 del 27/07/23

DATA DI EMISSIONE: 14/09/23 Inizio analisi: 06/09/23

Apertura campione: 06/09/23 Fine analisi: 09/09/23

COMMITTENTE: TECNA srl

RIFERIMENTO: Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)

SONDAGGIO: 1

CAMPIONE: 1

PROFONDITA': m 0.5-1.0

**PROVA DI TAGLIO DIRETTO**

Modalità di prova: Norma ASTM D 3080-04

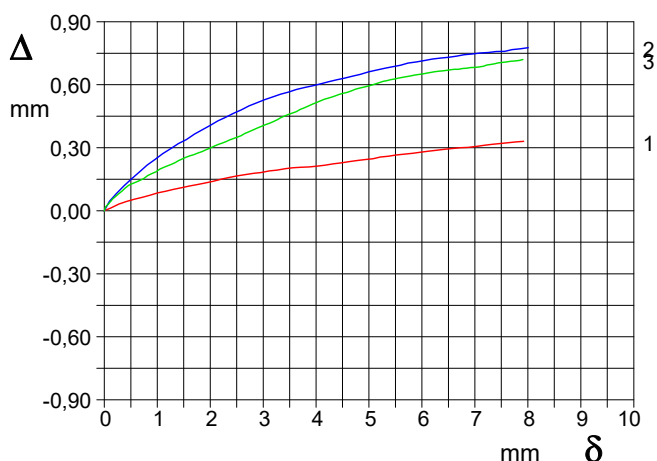
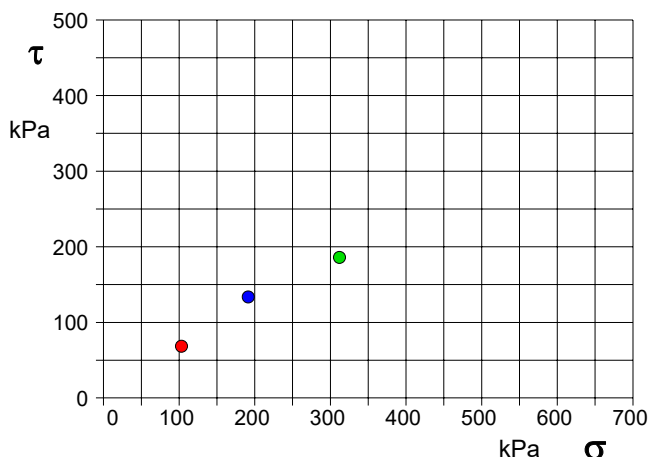
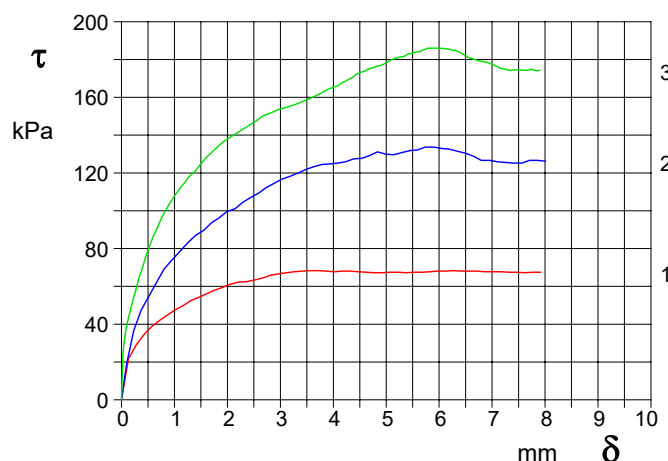
Provino n°:	1	2	3
Condizione del provino:	Indisturbato	Indisturbato	Indisturbato
Pressione verticale (kPa):	103	191	312
Tensione a rottura (kPa):	68	134	186
Deformazione orizzontale a rottura (mm):	3,57	5,74	5,79
Deformazione verticale a rottura (mm):	0,21	0,70	0,64
Umidità iniziale e umidità finale (%):	--- 23,7	--- 27,0	--- 22,8
Peso di volume iniziale e finale (kN/m³):	15,3 20,2	17,9 25,6	16,6 22,7

**DIAGRAMMA**Tensione - Pressione verticale

Tipo di prova: Consolidata - lenta

Velocità di deformazione: 0,030 mm / min

Tempo di consolidazione (ore): 24

DIAGRAMMA Deform. vert. - Deform. orizz.DIAGRAMMA Tensione - Deformaz. orizz.

<b>CERTIFICATO DI PROVA N°: 04415</b>	Pagina 0/4	DATA DI EMISSIONE: 14/09/23	Inizio analisi: 06/09/23
VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 393 del 27/07/23		Apertura campione: 06/09/23	Fine analisi: 09/09/23

COMMITTENTE: TECNA srl			
RIFERIMENTO: Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)			
SONDAGGIO: 1	CAMPIONE: 1	PROFONDITA': m	0.5-1.0

## PROVA DI TAGLIO DIRETTO

Modalità di prova: Norma ASTM D 3080-04

[illegible]

**LABOTER S.r.l.**

Via Nazario Sauro n.440  
51100 Pistoia  
Tel. 0573 570566  
e-mail: laboter@laboterpt.it

DNV Business Assurance  
Certificato N° 111177-2012-AQ-ITA-ACCREDIA  
UNI EN ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015)  
Prove Geotecniche di Laboratorio su terre (Settore EA: 35)

Autorizzazione del MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI  
Settore A - Prove di Laboratorio su terre  
Decreto 2436 del 14/03/2013 - Art. 59 DPR 380/2001 - Circolare 7618/STC 2010

**CERTIFICATO DI PROVA N°: 04415** Pagina 3/4

VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 393 del 27/07/23

DATA DI EMISSIONE: 14/09/23 Inizio analisi: 06/09/23

Apertura campione: 06/09/23 Fine analisi: 09/09/23

COMMITTENTE: TECNA srl

RIFERIMENTO: Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)

SONDAGGIO: 1

CAMPIONE: 1

PROFONDITA': m 0.5-1.0

**PROVA DI TAGLIO DIRETTO - FASE DI CONSOLIDAZIONE**

Modalità di prova: Norma ASTM D 3080-04

Diagramma  
TEMPO - CEDIMENTO

**PROVINO 1**

Pressione (kPa)	103
Altezza iniziale (cm)	2,000
Altezza finale (cm)	1,877
Sezione (cm²):	36,00
T <sub>50</sub> (min)	0,0
Df (mm)	7
Vs (mm/min)	0,000

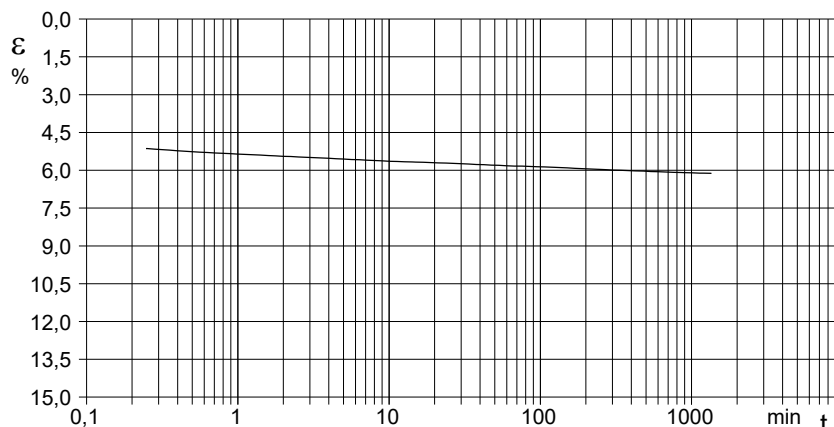


Diagramma  
TEMPO - CEDIMENTO

**PROVINO 2**

Pressione (kPa)	191
Altezza iniziale (cm)	1,970
Altezza finale (cm)	1,753
Sezione (cm²):	36,24
T <sub>50</sub> (min)	0,0
Df (mm)	7
Vs (mm/min)	0,000

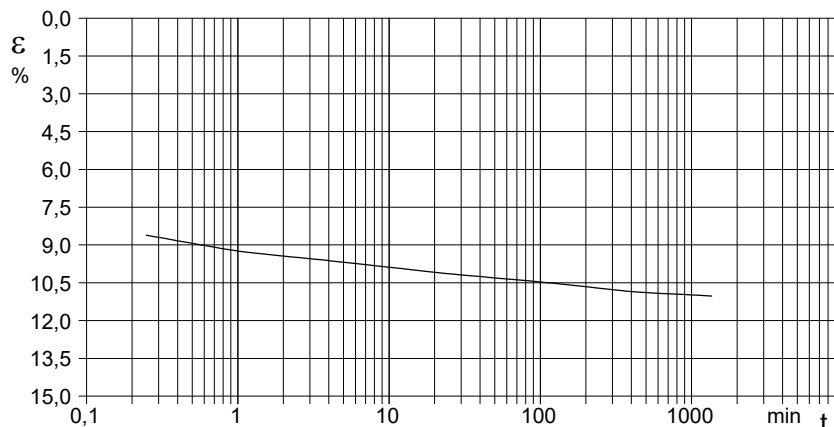
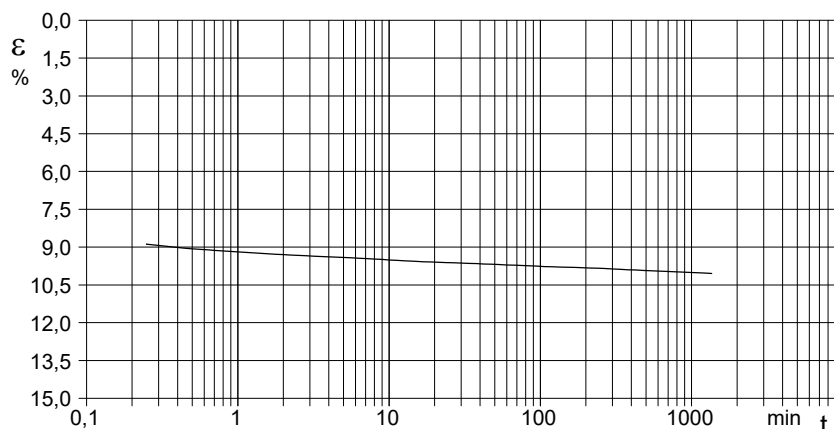


Diagramma  
TEMPO - CEDIMENTO

**PROVINO 3**

Pressione (kPa)	312
Altezza iniziale (cm)	2,000
Altezza finale (cm)	1,799
Sezione (cm²):	36,00
T <sub>50</sub> (min)	0,0
Df (mm)	7
Vs (mm/min)	0,000



Vs = Velocità stimata di prova Df = Deformazione a rottura stimata

tf = 50 x T<sub>50</sub>

Vs = Df / tf

<b>CERTIFICATO DI PROVA N°: 04415</b>	Pagina 4/4	DATA DI EMISSIONE: 14/09/23	Inizio analisi: 06/09/23
VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 393 del 27/07/23		Apertura campione: 06/09/23	Fine analisi: 09/09/23

COMMITTENTE: TECNA srl			
RIFERIMENTO: Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)			
SONDAGGIO: 1	CAMPIONE: 1	PROFONDITA': m	0.5-1.0

### PROVA DI TAGLIO DIRETTO - FASE DI CONSOLIDAZIONE

Modalità di prova: Norma ASTM D 3080-04

[illegible]

COMMITTENTE: TECNA srl			
RIFERIMENTO: Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)			
SONDAGGIO: 1	CAMPIONE: 1	PROFONDITA': m	0.5-1.0

**PROVA DI TAGLIO DIRETTO**

Modalità di prova: Norma ASTM D 3080-04

Provino n°:	1	2	3
Condizione del provino:	Indisturbato	Indisturbato	Indisturbato
Pressione verticale (kPa):	103	191	312
Tensione a rottura (kPa):	68	134	186
Deformazione orizzontale a rottura (mm):	3,57	5,74	5,79
Deformazione verticale a rottura (mm):	0,21	0,70	0,64
Umidità iniziale e umidità finale (%):	--- 23,7	--- 27,0	--- 22,8
Peso di volume iniziale e finale (kN/m³):	15,3 20,2	17,9 25,6	16,6 22,7

**DIAGRAMMA**

Tensione - Pressione verticale

Coesione: 10,2 kPa  
Angolo di attrito interno: 29,4 °

Tipo di prova: Consolidata - lenta  
Velocità di deformazione: 0,030 mm / min  
Tempo di consolidazione (ore): 24

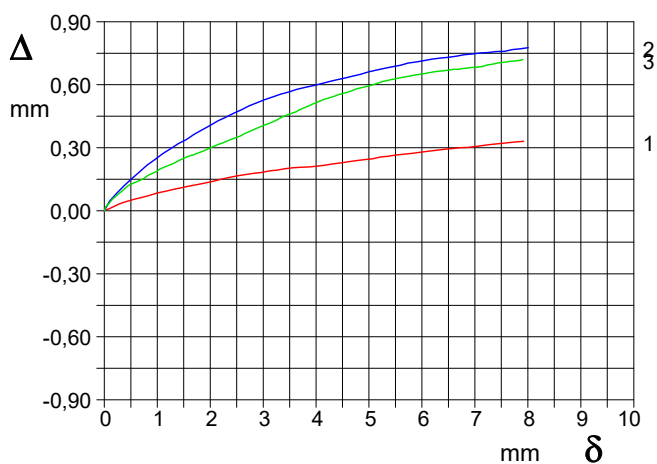
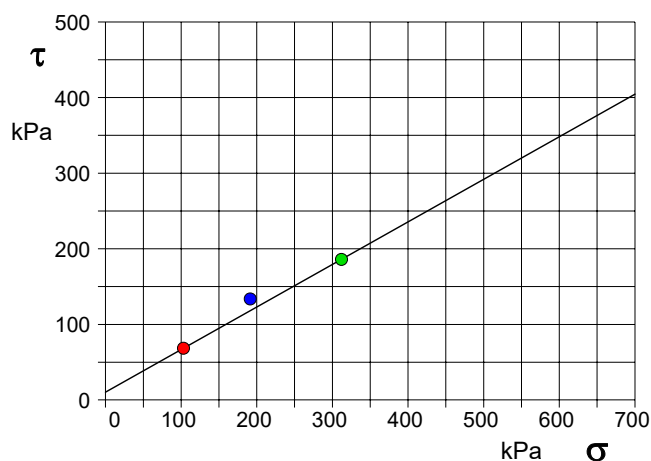


DIAGRAMMA Deform. vert. - Deform. orizz.

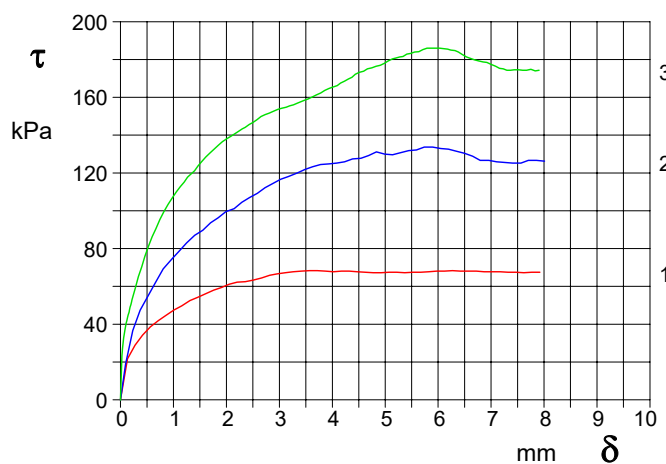


DIAGRAMMA Tensione - Deformaz. orizz.

<b>PROVA PENETROMETRICA DINAMICA</b> <b>LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI</b>	<b>DIN</b>	<b>1</b>
	Riferimento	<b>098-2023</b>
	Certificato	169A/2023
	n verb. acct.	169 del 31/05/23

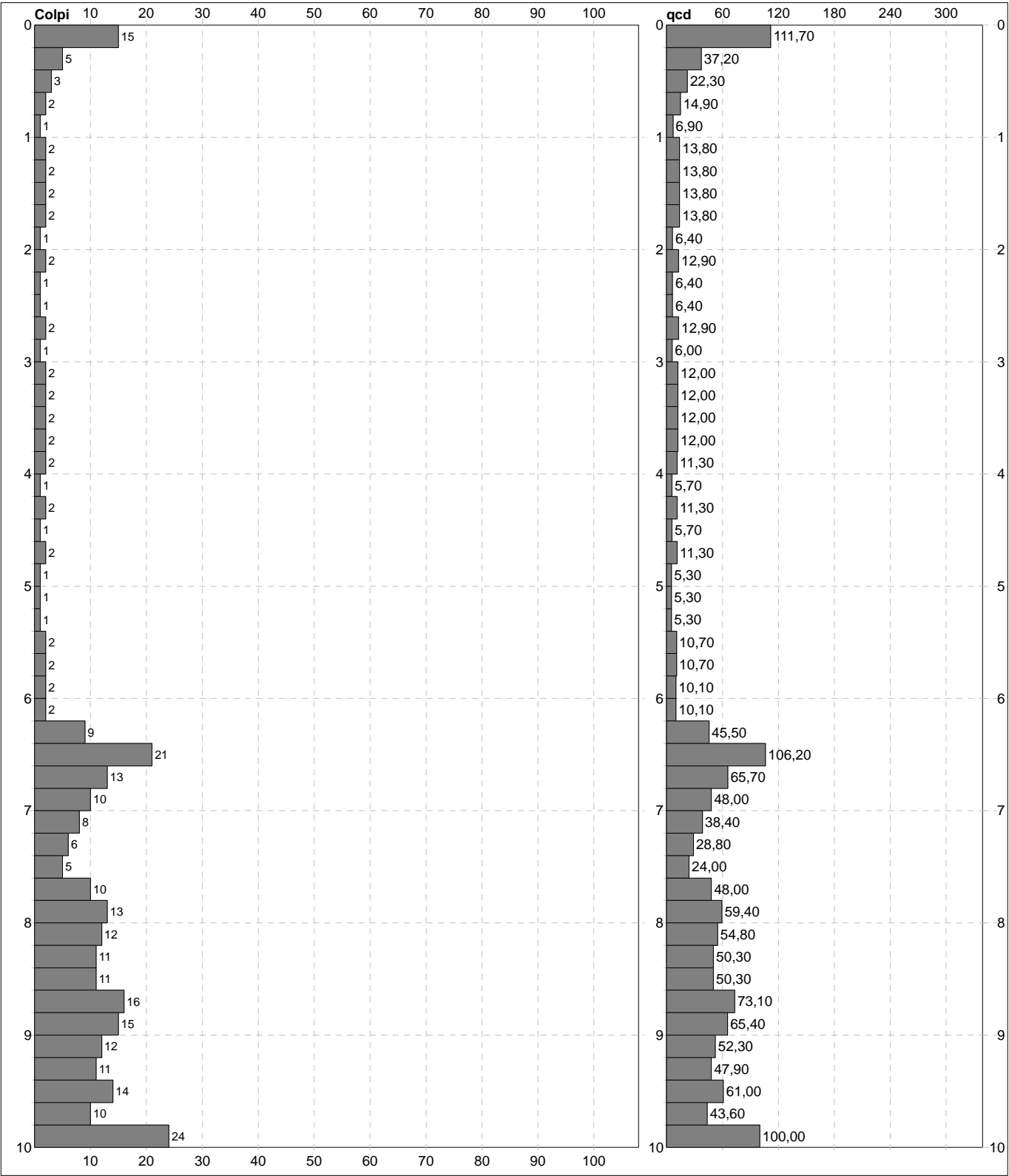
Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.:	kg/cm²	Data eseg.	21/06/2023
Cantiere	Indagine geognostica argine fiume Arno	Pagina	1	Data certificato	21/06/2023
Località	Via di Ugnano - Firenze (FI)	Elaborato		Falda	Non rilevata

H m	L1 n°	L1 n°	L2 n°	qcd kg/cm²	H m	L1 n°	L1 n°	L2 n°	qcd kg/cm²
0,20	1	15		111,7					
0,40	1	5		37,2					
0,60	2	3		22,3					
0,80	2	2		14,9					
1,00	2	1		6,9					
1,20	2	2		13,8					
1,40	2	2		13,8					
1,60	3	2		13,8					
1,80	3	2		13,8					
2,00	3	1		6,4					
2,20	3	2		12,9					
2,40	3	1		6,4					
2,60	4	1		6,4					
2,80	4	2		12,9					
3,00	4	1		6,0					
3,20	4	2		12,0					
3,40	4	2		12,0					
3,60	5	2		12,0					
3,80	5	2		12,0					
4,00	5	2		11,3					
4,20	5	1		5,7					
4,40	5	2		11,3					
4,60	6	1		5,7					
4,80	6	2		11,3					
5,00	6	1		5,3					
5,20	6	1		5,3					
5,40	6	1		5,3					
5,60	7	2		10,7					
5,80	7	2		10,7					
6,00	7	2		10,1					
6,20	7	2		10,1					
6,40	7	9		45,5					
6,60	8	21		106,2					
6,80	8	13		65,7					
7,00	8	10		48,0					
7,20	8	8		38,4					
7,40	8	6		28,8					
7,60	9	5		24,0					
7,80	9	10		48,0					
8,00	9	13		59,4					
8,20	9	12		54,8					
8,40	9	11		50,3					
8,60	10	11		50,3					
8,80	10	16		73,1					
9,00	10	15		65,4					
9,20	10	12		52,3					
9,40	10	11		47,9					
9,60	11	14		61,0					
9,80	11	10		43,6					
10,00	11	24		100,0					

H = profondità	qcd = punta
L1	
L1 = L2	
L2 = asta	

<b>PROVA PENETROMETRICA DINAMICA</b> <b>DIGRAMMI DI RESISTENZA E LITOLOGIA</b>	<b>DIN</b>	<b>1</b>
	Riferimento	<b>098-2023</b>
	Certificato	169A/2023
	n verb. acct.	169 del 31/05/23

Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.: <b>kg/cm²</b>	Data esec.	21/06/2023
Cantiere	Indagine geognostica argine fiume Arno	Scala: 1:50	Data certificato	21/06/2023
Località	Via di Ugnano - Firenze (FI)	Pagina 1	Quota inizio: : Piano Campagna	
		Elaborato	Falda	Non rilevata



<b>Penetrometro:</b> DPSH (S. Heavy) 63,50 kg 0,75 m 0,20 m	<b>Responsabile::</b> <b>Assistente::</b>	<b>preforo</b> m Corr.astine: : kg/ml Cod.ISTAT: 048017
--	--	---

<b>PROVA PENETROMETRICA DINAMICA</b> <b>SUDDIVISIONE GEOTECNICA</b>			<b>DIN</b>	<b>1</b>
			Riferimento	<b>098-2023</b>
			Certificato	169A/2023
			n verb. acct.	169 del 31/05/23
Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore		U.M.: <b>kg/cm²</b>	Data esec. 21/06/2023
Cantiere	Indagine geognostica argine fiume Arno		Pagina 1	Data certificato 21/06/2023
Località	Via di Ugnano - Firenze (FI)		Elaborato	Falda Non rilevata

PARAMETRI GENERALI													
n°	profondità m	statistica	VCA colpi	β -	Nspt colpi	qcd kg/cm²	qc kg/cm²	Vs m/sec	G kg/cm²	Q kg/cm²	natura	descrizione	
1	0,00 : 0,20	Media	15	1,52	23	112	101	82	147	5,59	Coes./Gran.		
2	0,20 : 6,20	Media	2	1,52	3	15	12	113	29	0,73	Coes./Gran.		
3	6,20 : 9,80	Media	12	1,52	17	54	47	182	116	2,67	Coes./Gran.		
4	9,80 : 10,00	Media	24	1,52	36	100	94	236	211	5,00	Coes./Gran.		

			NATURA COESIVA					NATURA GRANULARE						
n°	profondità m	Nspt colpi	Cu kg/cm²	Ysat t/m³	W %	e -	Mo kg/cm²	Dr %	ø °	E' kg/cm²	Ysat t/m³	Yd t/m³	Mo kg/cm²	Liq. -
1	0,00 : 0,20	23	1,44	2,06	22,58	0,61	75	55	34	369	2,01	1,62	318	---
2	0,20 : 6,20	3	0,19	1,78	44,21	1,19	28	11	27	214	1,86	1,38	105	---
3	6,20 : 9,80	17	1,06	1,98	26,99	0,73	63	46	32	322	1,97	1,56	264	---
4	9,80 : 10,00	36	2,25	2,10	20,20	0,55	102	71	38	469	2,08	1,74	429	---

nota: Piezometro 4.00 m

FON049

<b>PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA</b> <b>LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI</b>	<b>CPT</b>	<b>2</b>
	Riferimento	<b>098-2023</b>
	Certificato	169B/2023
	n verb. acct.	169 del 31/05/23

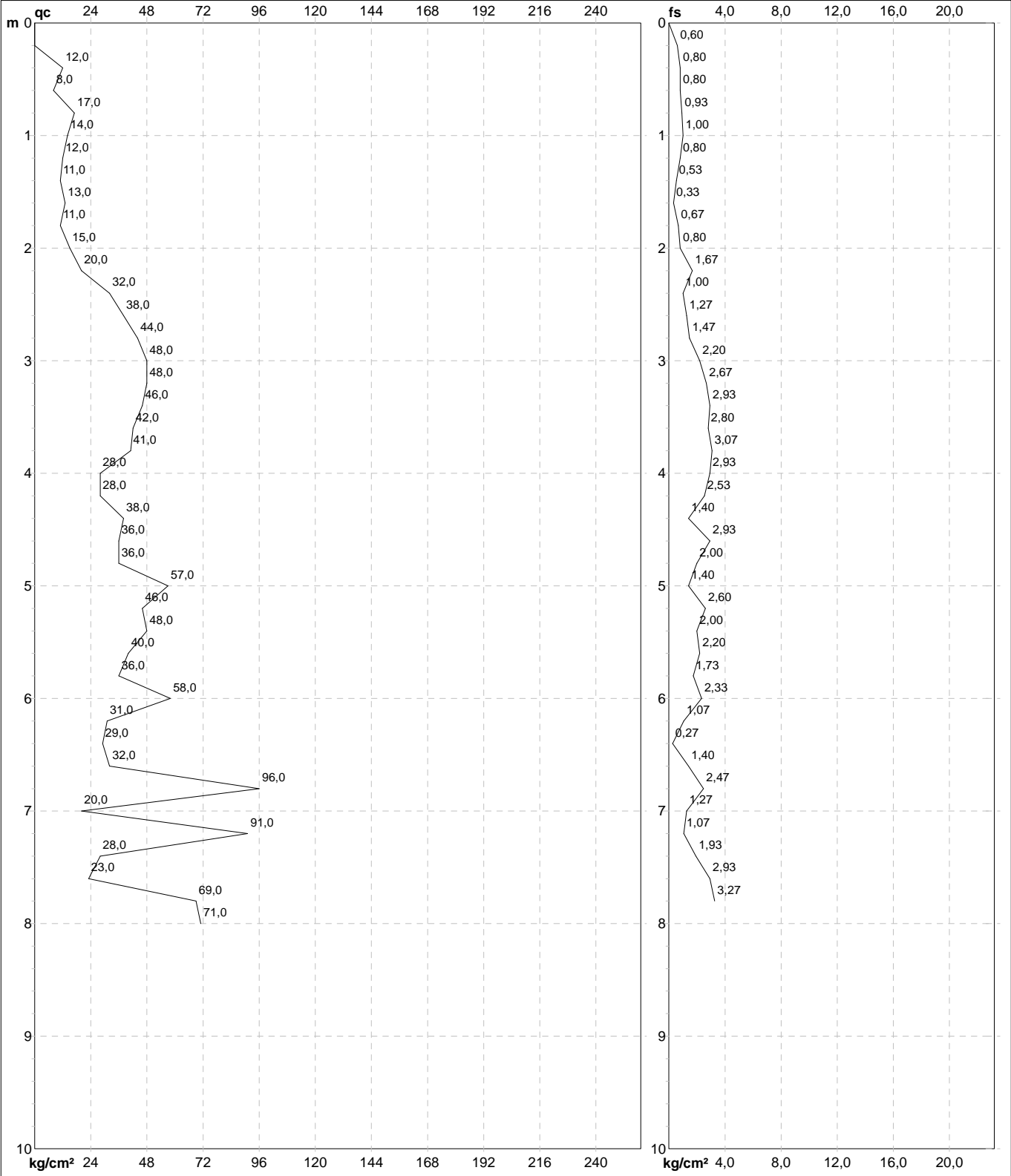
Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.: kg/cm²	Data esec.	21/06/2023
Cantiere	Argine sinistro fiume Greve	Pagina 1	Data certificato	21/06/2023
Località	Firenze (FI)	Elaborato	Falda	Non rilevata

H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc kg/cm²	fs kg/cm²	F -	Rf %	H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc kg/cm²	fs kg/cm²	F -	Rf %
0,20	0,0	0,0		0,0	0,60	0									
0,40	12,0	21,0		12,0	0,80	15	6,7								
0,60	8,0	20,0		8,0	0,80	10	10,0								
0,80	17,0	29,0		17,0	0,93	18	5,5								
1,00	14,0	28,0		14,0	1,00	14	7,1								
1,20	12,0	27,0		12,0	0,80	15	6,7								
1,40	11,0	23,0		11,0	0,53	21	4,8								
1,60	13,0	21,0		13,0	0,33	39	2,5								
1,80	11,0	16,0		11,0	0,67	16	6,1								
2,00	15,0	25,0		15,0	0,80	19	5,3								
2,20	20,0	32,0		20,0	1,67	12	8,4								
2,40	32,0	57,0		32,0	1,00	32	3,1								
2,60	38,0	53,0		38,0	1,27	30	3,3								
2,80	44,0	63,0		44,0	1,47	30	3,3								
3,00	48,0	70,0		48,0	2,20	22	4,6								
3,20	48,0	81,0		48,0	2,67	18	5,6								
3,40	46,0	86,0		46,0	2,93	16	6,4								
3,60	42,0	86,0		42,0	2,80	15	6,7								
3,80	41,0	83,0		41,0	3,07	13	7,5								
4,00	28,0	74,0		28,0	2,93	10	10,5								
4,20	28,0	72,0		28,0	2,53	11	9,0								
4,40	38,0	76,0		38,0	1,40	27	3,7								
4,60	36,0	57,0		36,0	2,93	12	8,1								
4,80	36,0	80,0		36,0	2,00	18	5,6								
5,00	57,0	87,0		57,0	1,40	41	2,5								
5,20	46,0	67,0		46,0	2,60	18	5,7								
5,40	48,0	87,0		48,0	2,00	24	4,2								
5,60	40,0	70,0		40,0	2,20	18	5,5								
5,80	36,0	69,0		36,0	1,73	21	4,8								
6,00	58,0	84,0		58,0	2,33	25	4,0								
6,20	31,0	66,0		31,0	1,07	29	3,5								
6,40	29,0	45,0		29,0	0,27	107	0,9								
6,60	32,0	36,0		32,0	1,40	23	4,4								
6,80	96,0	117,0		96,0	2,47	39	2,6								
7,00	20,0	57,0		20,0	1,27	16	6,4								
7,20	91,0	110,0		91,0	1,07	85	1,2								
7,40	28,0	44,0		28,0	1,93	15	6,9								
7,60	23,0	52,0		23,0	2,93	8	12,7								
7,80	69,0	113,0		69,0	3,27	21	4,7								
8,00	71,0	120,0		71,0											

H = profondità	qc = resistenza punta
L1 = prima lettura (punta)	fs = resistenza laterale
L2 = seconda lettura (punta + laterale)	0.20 m sopra quota qc
Lt = terza lettura (totale)	F = rapporto Begemann (qc / fs)
CT = 10,00 costante di trasformazione	Rf = rapporto Schmertmann (fs / qc)*100

<b>PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA</b> <b>DIGRAMMI DI RESISTENZA E LITOLOGIA</b>	<b>CPT</b>	<b>2</b>
	Riferimento	<b>098-2023</b>
	Certificato	169B/2023
	n verb. acct.	169 del 31/05/23

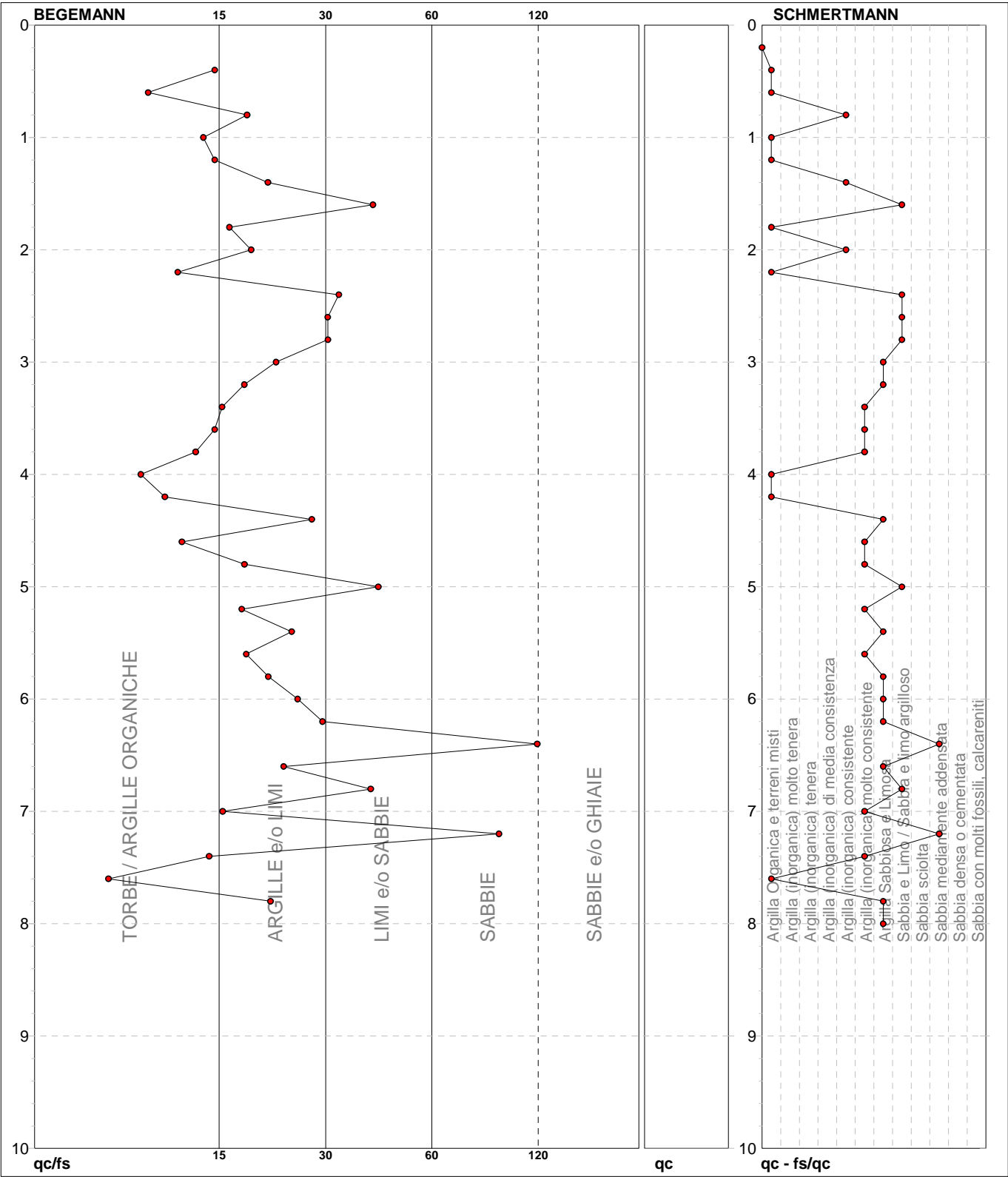
Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.: <b>kg/cm²</b>	Data esec.	21/06/2023
Cantiere	Argine sinistro fiume Greve	Scala: 1:50	Data certificato	21/06/2023
Località	Firenze (FI)	Pagina 1	Quota inizio: Piano Campagna	
		Elaborato	Falda	Non rilevata



	Penetrometro: TG63-200	preforo m
	Responsabile:	Corr.astine: kg/ml
	Assistente:	Cod.ISTAT: 048017
		Cod. tip:

note: FON049

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA			CPT	2
DIAGRAMMI LITOLOGIA			Riferimento	098-2023
			Certificato	169B/2023
			n verb. acct.	169 del 31/05/23
Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.: kg/cm <sup>2</sup>	Data eseg.	21/06/2023
Cantiere	Argine sinistro fiume Greve	Scala: 1:50	Data certificato	21/06/2023
Località	Firenze (FI)	Pagina 1	Falda	Non rilevata
		Elaborato		



note:	FON049
-------	--------

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA PARAMETRI GEOTECNICI						CPT	2
						Riferimento	098-2023
						Certificato	169B/2023
						n verb. acct.	169 del 31/05/23

Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.: kg/cm²	Data eseg.	21/06/2023
Cantiere	Argine sinistro fiume Greve	Pagina 1	Data certificato	21/06/2023
Località	Firenze (FI)	Elaborato	Falda	Non rilevata

							NATURA COESIVA					NATURA GRANULARE											
H	qc	qc/fs	zone	$\gamma'$	$\sigma'_{vo}$	Vs	Cu	OCR	Eu50	Eu25	Mo	Dr	Sc	Ca	Ko	DB	DM	Me	E'50	E'25	Mo	FL1	FL2
m	U.M.			t/m³	U.M.	m/s	U.M.	%	U.M.	U.M.	U.M.	%	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	U.M.	U.M.	U.M.		
0,20	--	--	?	1,85	0,04	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
0,40	12,0	15,0	2	1,85	0,07	141	0,57	80,8	97,1	145,7	44,6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
0,60	8,0	10,0	2	1,85	0,11	121	0,40	31,2	68,0	102,0	35,2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
0,80	17,0	18,3	2	1,85	0,15	161	0,72	45,6	123,0	184,5	54,1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1,00	14,0	14,0	2	1,85	0,19	150	0,64	29,4	108,2	162,3	48,2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1,20	12,0	15,0	2	1,85	0,22	141	0,57	20,5	97,1	145,7	44,6	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1,40	11,0	20,8	2	1,85	0,26	137	0,54	15,6	91,2	136,8	42,5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
1,60	13,0	39,4	4	1,85	0,30	145	0,60	15,3	102,8	154,2	46,5	32	35	29	25	24	32	26	21,7	32,5	39,0	--	--
1,80	11,0	16,4	2	1,85	0,33	137	0,54	11,4	91,2	136,8	42,5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,00	15,0	18,8	2	1,85	0,37	154	0,67	13,1	113,3	170,0	49,5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,20	20,0	12,0	4	1,85	0,41	171	0,80	14,6	136,0	204,0	60,0	39	36	29	26	24	33	27	33,3	50,0	60,0	--	--
2,40	32,0	32,0	3	1,85	0,44	204	--	--	--	--	--	53	38	31	28	26	35	29	53,3	80,0	96,0	--	--
2,60	38,0	29,9	4	1,85	0,48	218	1,27	21,1	215,3	323,0	114,0	57	38	31	29	27	36	30	63,3	95,0	114,0	--	--
2,80	44,0	29,9	4	1,85	0,52	230	1,47	23,1	249,3	374,0	132,0	60	38	32	29	27	36	31	73,3	110,0	132,0	--	--
3,00	48,0	21,8	4	1,85	0,56	238	1,60	23,6	272,0	408,0	144,0	61	39	32	29	27	36	31	80,0	120,0	144,0	--	--
3,20	48,0	18,0	4	1,85	0,59	238	1,60	21,8	272,0	408,0	144,0	60	38	32	29	27	36	31	80,0	120,0	144,0	--	--
3,40	46,0	15,7	4	1,85	0,63	234	1,53	19,1	260,7	391,0	138,0	57	38	31	28	26	35	31	76,7	115,0	138,0	--	--
3,60	42,0	15,0	4	1,85	0,67	226	1,40	15,9	238,0	357,0	126,0	52	38	30	27	26	34	30	70,0	105,0	126,0	--	--
3,80	41,0	13,4	4	1,85	0,70	224	1,37	14,4	232,3	348,5	123,0	50	37	30	27	25	34	30	68,3	102,5	123,0	--	--
4,00	28,0	9,6	4	1,85	0,74	194	0,97	8,8	175,3	262,9	84,0	36	36	28	25	23	32	28	46,7	70,0	84,0	--	--
4,20	28,0	11,1	4	1,85	0,78	194	0,97	8,2	185,3	278,0	84,0	34	35	28	24	23	31	28	46,7	70,0	84,0	--	--
4,40	38,0	27,1	4	1,85	0,81	218	1,27	10,9	215,3	323,0	114,0	44	37	29	26	24	33	30	63,3	95,0	114,0	--	--
4,60	36,0	12,3	4	1,85	0,85	214	1,20	9,6	205,6	308,4	108,0	41	36	28	25	24	32	30	60,0	90,0	108,0	--	--
4,80	36,0	18,0	4	1,85	0,89	214	1,20	9,1	211,0	316,6	108,0	40	36	28	25	24	32	30	60,0	90,0	108,0	--	--
5,00	57,0	40,7	3	1,85	0,93	254	--	--	--	--	--	55	38	30	27	26	34	31	95,0	142,5	171,0	--	--
5,20	46,0	17,7	4	1,85	0,96	234	1,53	11,2	260,7	391,0	138,0	46	37	29	26	24	33	31	76,7	115,0	138,0	--	--
5,40	48,0	24,0	4	1,85	1,00	238	1,60	11,3	272,0	408,0	144,0	47	37	29	26	24	33	31	80,0	120,0	144,0	--	--
5,60	40,0	18,2	4	1,85	1,04	222	1,33	8,6	245,6	368,4	120,0	40	36	28	25	23	32	30	66,7	100,0	120,0	--	--
5,80	36,0	20,8	4	1,85	1,07	214	1,20	7,2	266,2	399,3	108,0	35	35	27	24	23	31	30	60,0	90,0	108,0	--	--
6,00	58,0	24,9	4	1,85	1,11	256	1,93	12,6	328,7	493,0	174,0	51	37	29	26	25	33	31	96,7	145,0	174,0	--	--
6,20	31,0	29,0	4	1,85	1,15	202	1,03	5,5	310,7	466,0	93,0	28	35	26	23	22	30	29	51,7	77,5	93,0	--	--
6,40	29,0	107,4	3	1,85	1,18	197	--	--	--	--	--	25	34	26	22	21	29	29	48,3	72,5	87,0	--	--
6,60	32,0	22,9	4	1,85	1,22	204	1,07	5,3	333,5	500,3	96,0	28	35	26	23	21	29	29	53,3	80,0	96,0	--	--
6,80	96,0	38,9	3	1,85	1,26	309	--	--	--	--	--	65	39	31	28	27	35	34	160,0	240,0	288,0	--	--
7,00	20,0	15,7	4	1,85	1,30	171	0,80	3,4	364,6	546,8	60,0	10	32	23	20	19	27	27	33,3	50,0	60,0	--	--
7,20	91,0	85,0	3	1,85	1,33	303	--	--	--	--	--	62	39	31	28	26	35	33	151,7	227,5	273,0	--	--
7,40	28,0	14,5	4	1,85	1,37	194	0,97	4,1	382,0	573,1	84,0	21	34	25	21	20	28	28	46,7	70,0	84,0	--	--
7,60	23,0	7,8	4	1,85	1,41	180	0,87	3,4	395,8	593,6	69,0	13	33	24	20	19	27	28	38,3	57,5	69,0	--	--
7,80	69,0	21,1	4	1,85	1,44	273	2,30	11,2	391,0	586,5	207,0	50	37	29	26	24	33	32	115,0	172,5	207,0	--	--
8,00	71,0	--	3	1,85	1,48	276	--	--	--	--	--	51	37	29	26	24	33	32	118,3	177,5	213,0	--	--

<b>PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA</b> <b>LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI</b>	<b>CPT</b>	<b>3</b>
	Riferimento	<b>098-2023</b>
	Certificato	169C/2023
	n verb. acct.	169 del 31/05/23

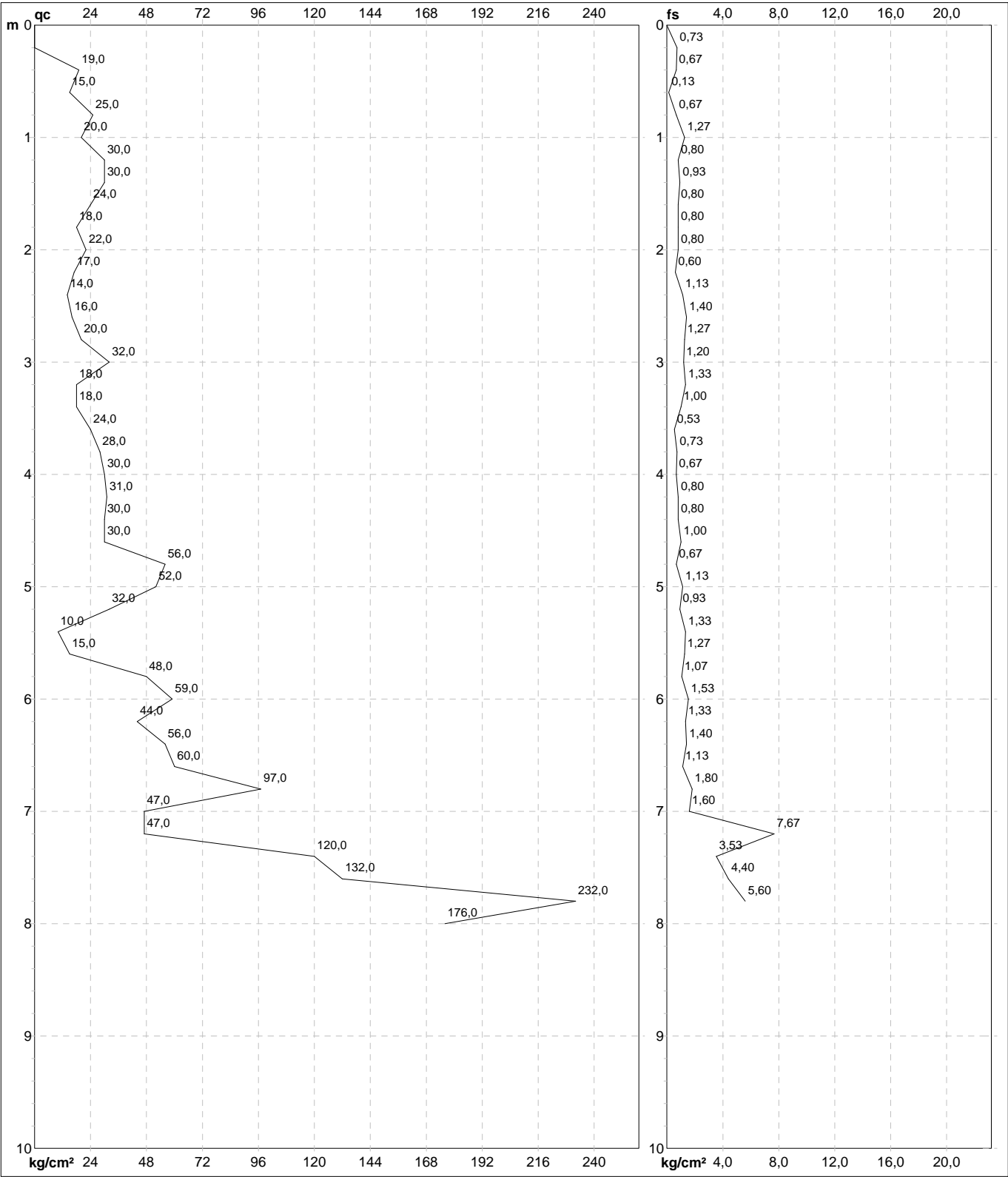
Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.: <b>kg/cm²</b>	Data esec.	21/06/2023
Cantiere	Indagine geognostica	Pagina 1	Data certificato	21/06/2023
Località	Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)	Elaborato	Falda	Non rilevata

H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc kg/cm²	fs kg/cm²	F -	Rf %	H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc kg/cm²	fs kg/cm²	F -	Rf %
0,20	0,0	0,0		0,0	0,73	0									
0,40	19,0	30,0		19,0	0,67	28	3,5								
0,60	15,0	25,0		15,0	0,13	115	0,9								
0,80	25,0	27,0		25,0	0,67	37	2,7								
1,00	20,0	30,0		20,0	1,27	16	6,4								
1,20	30,0	49,0		30,0	0,80	38	2,7								
1,40	30,0	42,0		30,0	0,93	32	3,1								
1,60	24,0	38,0		24,0	0,80	30	3,3								
1,80	18,0	30,0		18,0	0,80	23	4,4								
2,00	22,0	34,0		22,0	0,80	28	3,6								
2,20	17,0	29,0		17,0	0,60	28	3,5								
2,40	14,0	23,0		14,0	1,13	12	8,1								
2,60	16,0	33,0		16,0	1,40	11	8,8								
2,80	20,0	41,0		20,0	1,27	16	6,4								
3,00	32,0	51,0		32,0	1,20	27	3,8								
3,20	18,0	36,0		18,0	1,33	14	7,4								
3,40	18,0	38,0		18,0	1,00	18	5,6								
3,60	24,0	39,0		24,0	0,53	45	2,2								
3,80	28,0	36,0		28,0	0,73	38	2,6								
4,00	30,0	41,0		30,0	0,67	45	2,2								
4,20	31,0	41,0		31,0	0,80	39	2,6								
4,40	30,0	42,0		30,0	0,80	38	2,7								
4,60	30,0	42,0		30,0	1,00	30	3,3								
4,80	56,0	71,0		56,0	0,67	84	1,2								
5,00	52,0	62,0		52,0	1,13	46	2,2								
5,20	32,0	49,0		32,0	0,93	34	2,9								
5,40	10,0	24,0		10,0	1,33	8	13,3								
5,60	15,0	35,0		15,0	1,27	12	8,5								
5,80	48,0	67,0		48,0	1,07	45	2,2								
6,00	59,0	75,0		59,0	1,53	39	2,6								
6,20	44,0	67,0		44,0	1,33	33	3,0								
6,40	56,0	76,0		56,0	1,40	40	2,5								
6,60	60,0	81,0		60,0	1,13	53	1,9								
6,80	97,0	114,0		97,0	1,80	54	1,9								
7,00	47,0	74,0		47,0	1,60	29	3,4								
7,20	47,0	71,0		47,0	7,67	6	16,3								
7,40	120,0	235,0		120,0	3,53	34	2,9								
7,60	132,0	185,0		132,0	4,40	30	3,3								
7,80	232,0	298,0		232,0	5,60	41	2,4								
8,00	176,0	260,0		176,0											

H = profondità	qc = resistenza punta
L1 = prima lettura (punta)	fs = resistenza laterale
L2 = seconda lettura (punta + laterale)	0.20 m sopra quota qc
Lt = terza lettura (totale)	F = rapporto Begemann (qc / fs)
CT = 10,00 costante di trasformazione	Rf = rapporto Schmertmann (fs / qc)*100

<b>PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA</b> <b>DIGRAMMI DI RESISTENZA E LITOLOGIA</b>	<b>CPT</b>	<b>3</b>
	Riferimento	<b>098-2023</b>
	Certificato	169C/2023
	n verb. acct.	169 del 31/05/23

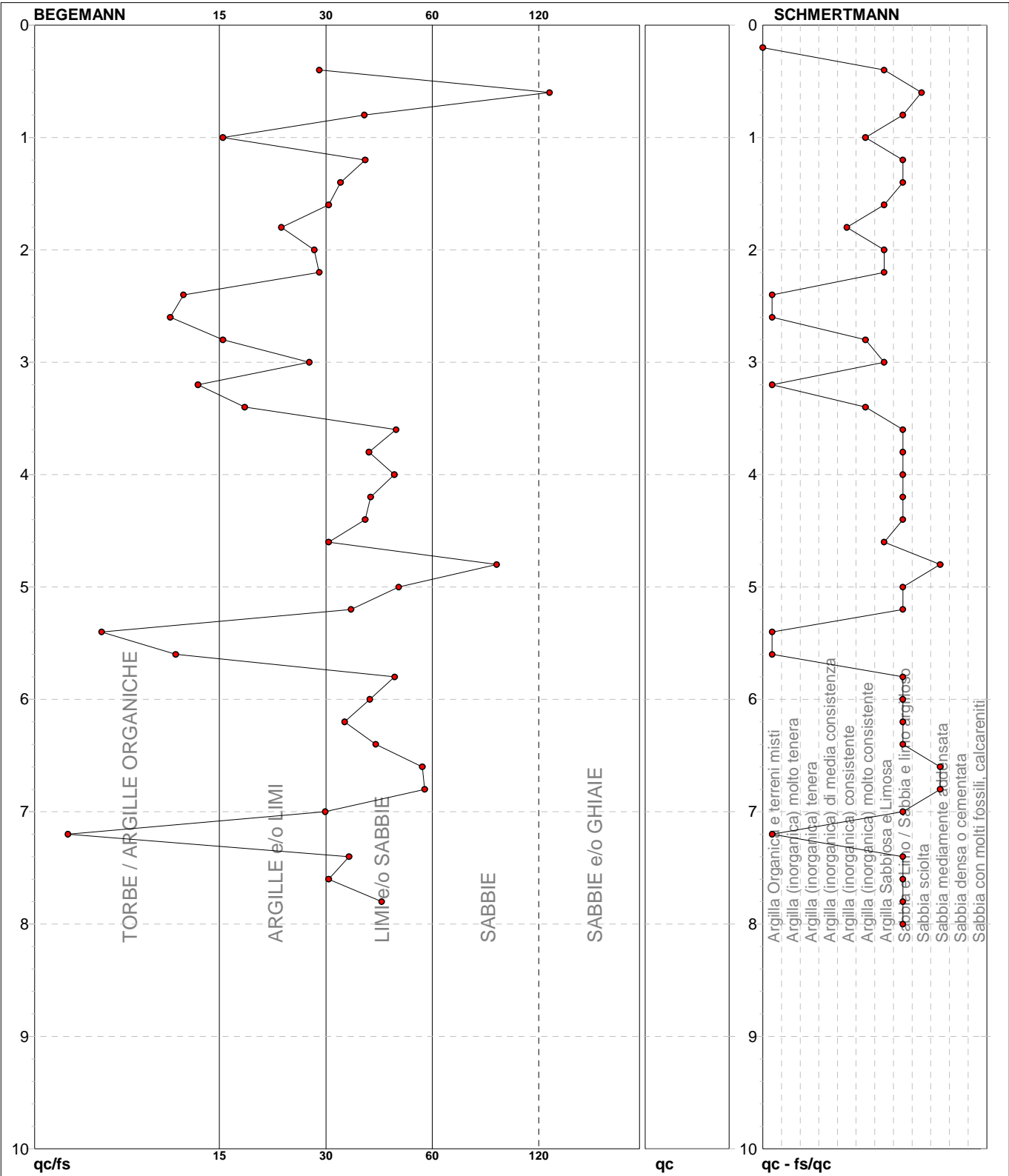
Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.: <b>kg/cm²</b>	Data esec.	21/06/2023
Cantiere	Indagine geognostica	Scala: 1:50	Data certificato	21/06/2023
Località	Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)	Pagina 1	Quota inizio: Piano Campagna	
		Elaborato	Falda	Non rilevata



Penetrometro: TG63-200	preforo m
Responsabile:	Corr.astine: kg/ml
Assistente:	Cod.ISTAT: 048017
	Cod. tip:

note: F0N049

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA			CPT	3
DIAGRAMMI LITOLOGIA			Riferimento	098-2023
			Certificato	169C/2023
			n verb. acct.	169 del 31/05/23
Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.: kg/cm <sup>2</sup>	Data eseg.	21/06/2023
Cantiere	Indagine geognostica	Scala: 1:50	Data certificato	21/06/2023
Località	Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)	Pagina 1	Falda	Non rilevata
		Elaborato		



● 098-2023 [3] : 8,00 m

note:

FON049

Software by dott. Geol. Diego Merlin +39 0425-840820

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA PARAMETRI GEOTECNICI						CPT	3
						Riferimento	098-2023
						Certificato	169C/2023
						n verb. acct.	169 del 31/05/23

Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.:	kg/cm <sup>2</sup>	Data esec.	21/06/2023
Cantiere	Indagine geognostica	Pagina	1	Data certificato	21/06/2023
Località	Via dell'Argingrosso - Firenze (FI)	Elaborato		Falda	Non rilevata

							NATURA COESIVA					NATURA GRANULARE											
H	qc	qc/fs	zone	$\gamma'$	$\sigma'_{vo}$	Vs	Cu	OCR	Eu50	Eu25	Mo	Dr	Sc	Ca	Ko	DB	DM	Me	E'50	E'25	Mo	FL1	FL2
m	U.M.			t/m³	U.M.	m/s	U.M.	%	U.M.	U.M.	U.M.	%	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	U.M.	U.M.	U.M.		
0,20	--	--	?	1,85	0,04	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
0,40	19,0	28,4	2	1,85	0,07	168	0,78	99,9	131,8	197,8	58,1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
0,60	15,0	115,4	4	1,85	0,11	154	0,67	59,0	113,3	170,0	49,5	60	39	34	31	29	38	27	25,0	37,5	45,0	--	--
0,80	25,0	37,3	3	1,85	0,15	186	--	--	--	--	--	71	40	35	32	30	39	28	41,7	62,5	75,0	--	--
1,00	20,0	15,7	4	1,85	0,19	171	0,80	39,2	136,0	204,0	60,0	58	38	33	30	28	37	27	33,3	50,0	60,0	--	--
1,20	30,0	37,5	3	1,85	0,22	199	--	--	--	--	--	67	39	34	31	29	38	29	50,0	75,0	90,0	--	--
1,40	30,0	32,3	3	1,85	0,26	199	--	--	--	--	--	64	39	33	31	29	38	29	50,0	75,0	90,0	--	--
1,60	24,0	30,0	4	1,85	0,30	183	0,89	24,8	151,1	226,7	72,0	53	38	32	29	27	36	28	40,0	60,0	72,0	--	--
1,80	18,0	22,5	2	1,85	0,33	164	0,75	17,3	127,5	191,3	56,2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,00	22,0	27,5	4	1,85	0,37	177	0,85	17,7	143,8	215,8	66,0	44	37	30	27	25	34	28	36,7	55,0	66,0	--	--
2,20	17,0	28,3	2	1,85	0,41	161	0,72	12,9	123,0	184,5	54,1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,40	14,0	12,4	2	1,85	0,44	150	0,64	9,8	108,4	162,7	48,2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,60	16,0	11,4	2	1,85	0,48	157	0,70	10,0	118,3	177,5	51,8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2,80	20,0	15,7	4	1,85	0,52	171	0,80	10,8	136,0	204,0	60,0	33	35	28	25	23	32	27	33,3	50,0	60,0	--	--
3,00	32,0	26,7	4	1,85	0,56	204	1,07	14,2	181,3	272,0	96,0	47	37	30	27	25	34	29	53,3	80,0	96,0	--	--
3,20	18,0	13,5	2	1,85	0,59	164	0,75	8,4	140,6	210,9	56,2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3,40	18,0	18,0	2	1,85	0,63	164	0,75	7,8	152,0	227,9	56,2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3,60	24,0	45,3	3	1,85	0,67	183	--	--	--	--	--	33	35	28	24	23	31	28	40,0	60,0	72,0	--	--
3,80	28,0	38,4	3	1,85	0,70	194	--	--	--	--	--	37	36	28	25	23	32	28	46,7	70,0	84,0	--	--
4,00	30,0	44,8	3	1,85	0,74	199	--	--	--	--	--	38	36	28	25	24	32	29	50,0	75,0	90,0	--	--
4,20	31,0	38,8	3	1,85	0,78	202	--	--	--	--	--	38	36	28	25	23	32	29	51,7	77,5	93,0	--	--
4,40	30,0	37,5	3	1,85	0,81	199	--	--	--	--	--	36	36	28	25	23	31	29	50,0	75,0	90,0	--	--
4,60	30,0	30,0	4	1,85	0,85	199	1,00	7,7	206,7	310,1	90,0	35	35	27	24	23	31	29	50,0	75,0	90,0	--	--
4,80	56,0	83,6	3	1,85	0,89	252	--	--	--	--	--	55	38	30	27	26	34	31	93,3	140,0	168,0	--	--
5,00	52,0	46,0	3	1,85	0,93	245	--	--	--	--	--	51	37	30	27	25	34	31	86,7	130,0	156,0	--	--
5,20	32,0	34,4	3	1,85	0,96	204	--	--	--	--	--	34	35	27	24	23	31	29	53,3	80,0	96,0	--	--
5,40	10,0	7,5	2	1,85	1,00	132	0,50	2,6	260,1	390,1	40,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5,60	15,0	11,8	2	1,85	1,04	154	0,67	3,6	292,5	438,8	49,5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5,80	48,0	44,9	3	1,85	1,07	238	--	--	--	--	--	45	37	29	26	24	32	31	80,0	120,0	144,0	--	--
6,00	59,0	38,6	3	1,85	1,11	257	--	--	--	--	--	51	37	30	26	25	33	32	98,3	147,5	177,0	--	--
6,20	44,0	33,1	3	1,85	1,15	230	--	--	--	--	--	40	36	28	25	23	32	31	73,3	110,0	132,0	--	--
6,40	56,0	40,0	3	1,85	1,18	252	--	--	--	--	--	48	37	29	26	24	33	31	93,3	140,0	168,0	--	--
6,60	60,0	53,1	3	1,85	1,22	259	--	--	--	--	--	50	37	29	26	24	33	32	100,0	150,0	180,0	--	--
6,80	97,0	53,9	3	1,85	1,26	310	--	--	--	--	--	65	39	31	28	27	36	34	161,7	242,5	291,0	--	--
7,00	47,0	29,4	4	1,85	1,30	236	1,57	8,0	311,3	466,9	141,0	40	36	28	24	23	31	31	78,3	117,5	141,0	--	--
7,20	47,0	6,1	4	1,85	1,33	236	1,57	7,7	323,4	485,2	141,0	39	36	27	24	23	31	31	78,3	117,5	141,0	--	--
7,40	120,0	34,0	3	1,85	1,37	336	--	--	--	--	--	71	40	32	29	27	36	35	200,0	300,0	360,0	--	--
7,60	132,0	30,0	4	1,85	1,41	348	4,40	26,1	748,0	1122,0	396,0	73	40	32	29	28	37	35	220,0	330,0	396,0	--	--
7,80	232,0	41,4	3	1,85	1,44	431	--	--	--	--	--	92	42	35	32	30	39	39	386,7	580,0	696,0	--	--
8,00	176,0	--	3	1,85	1,48	388	--	--	--	--	--	82	41	34	31	29	38	37	293,3	440,0	528,0	--	--

<b>PROVA PENETROMETRICA DINAMICA</b> <b>LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI</b>	<b>DIN</b>	<b>4</b>
	Riferimento	<b>098-2023</b>
	Certificato	169D/2023
	n verb. acct.	169 del 31/05/23

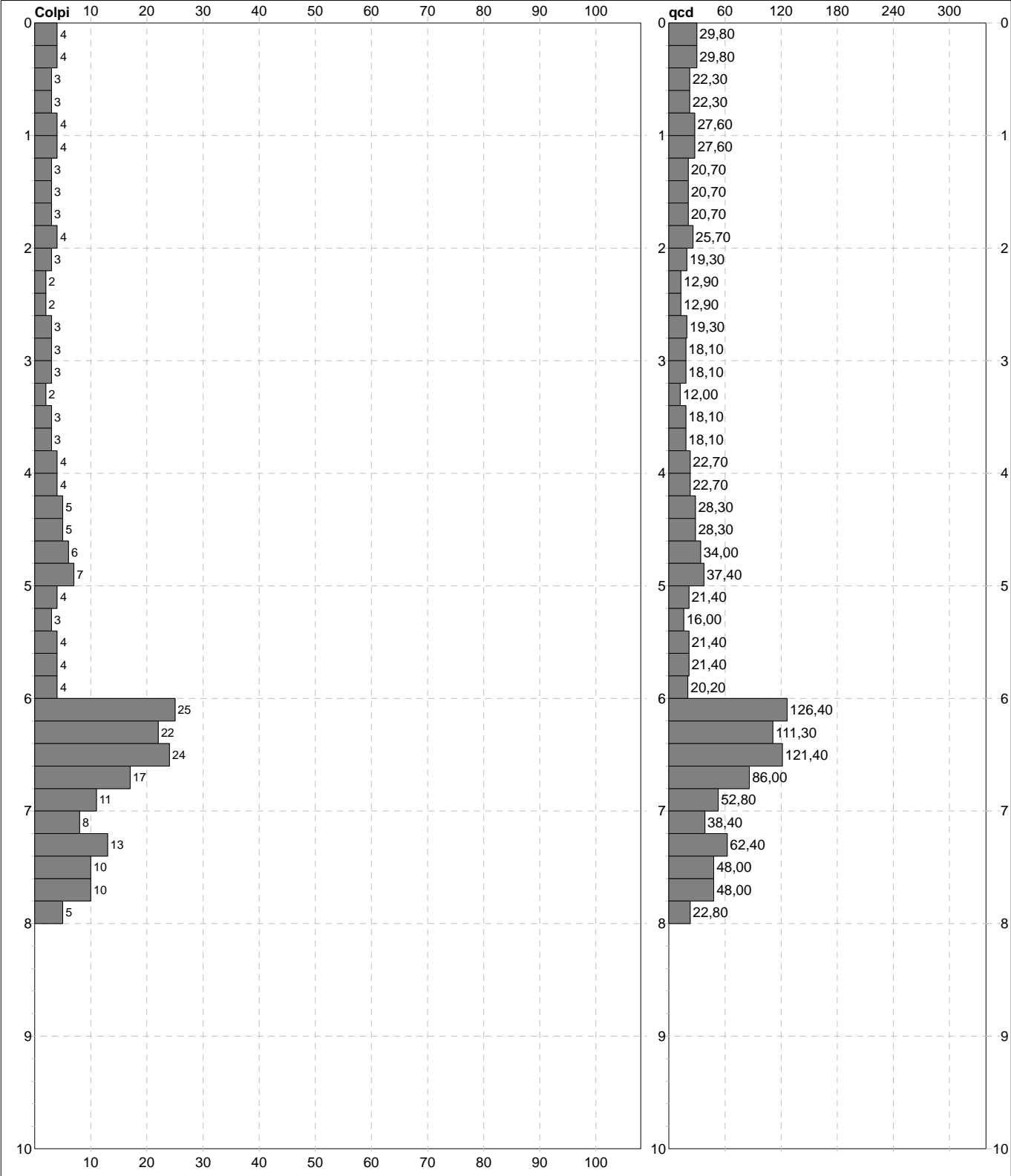
Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.: <b>kg/cm²</b>	Data esec.	21/06/2023
Cantiere	Indagine geognostica	Pagina 1	Data certificato	21/06/2023
Località	Via dell' Argingrosso - Firenze (FI)	Elaborato	Falda	Non rilevata

H m	L1 n°	L1 n°	L2 n°	qcd kg/cm²	H m	L1 n°	L1 n°	L2 n°	qcd kg/cm²
0,20	1	4		29,8					
0,40	1	4		29,8					
0,60	2	3		22,3					
0,80	2	3		22,3					
1,00	2	4		27,6					
1,20	2	4		27,6					
1,40	2	3		20,7					
1,60	3	3		20,7					
1,80	3	3		20,7					
2,00	3	4		25,7					
2,20	3	3		19,3					
2,40	3	2		12,9					
2,60	4	2		12,9					
2,80	4	3		19,3					
3,00	4	3		18,1					
3,20	4	3		18,1					
3,40	4	2		12,0					
3,60	5	3		18,1					
3,80	5	3		18,1					
4,00	5	4		22,7					
4,20	5	4		22,7					
4,40	5	5		28,3					
4,60	6	5		28,3					
4,80	6	6		34,0					
5,00	6	7		37,4					
5,20	6	4		21,4					
5,40	6	3		16,0					
5,60	7	4		21,4					
5,80	7	4		21,4					
6,00	7	4		20,2					
6,20	7	25		126,4					
6,40	7	22		111,3					
6,60	8	24		121,4					
6,80	8	17		86,0					
7,00	8	11		52,8					
7,20	8	8		38,4					
7,40	8	13		62,4					
7,60	9	10		48,0					
7,80	9	10		48,0					
8,00	9	5		22,8					

H = profondità	qcd = punta
L1	
L1 = L2	
L2 = asta	

<b>PROVA PENETROMETRICA DINAMICA</b> <b>DIGRAMMI DI RESISTENZA E LITOLOGIA</b>	<b>DIN</b>	<b>4</b>
	Riferimento	<b>098-2023</b>
	Certificato	169D/2023
	n verb. acct.	169 del 31/05/23

Committente	Regione Toscana Genio Civile Valdarno Superiore	U.M.: <b>kg/cm²</b>	Data esec.	21/06/2023
Cantiere	Indagine geognostica	Scala: 1:50	Data certificato	21/06/2023
Località	Via dell' Argingrosso - Firenze (FI)	Pagina 1	Quota inizio: : Piano Campagna	
		Elaborato	Falda	Non rilevata



<b>Penetrometro:</b> DPSH (S. Heavy) 63,50 kg 0,75 m 0,20 m	<b>Responsabile::</b> <b>Assistente::</b>	<b>preforo</b> m <b>Corr.astine:</b> : kg/ml <b>Cod.ISTAT:</b> 048017
--	--	---

## 169 del 31/05/23

Falda	Non rilevata
-------	--------------

n°	profondità m	Nspt colpi	Cu kg/cm²	Ysat t/m³	W %	e -	Mo kg/cm²	Dr %	ø °	E' kg/cm²	Ysat t/m³	Yd t/m³	Mo kg/cm²	Liq. -
1	0,00 : 6,00	6	0,38	1,85	37,04	1,00	36	22	28	238	1,89	1,43	139	---
2	6,00 : 6,80	33	2,06	2,10	20,20	0,55	96	68	37	446	2,07	1,71	403	---
3	6,80 : 7,80	16	1,00	1,97	27,79	0,75	61	44	32	315	1,97	1,55	252	---
4	7,80 : 8,00	8	0,50	1,87	34,98	0,94	41	28	29	253	1,91	1,46	161	---

Software by dott. Geol. Diego Merlin +39 0425-840820

### TRIGEO snc

di Andrea Nencetti e Benedetto Burchini  
Via Mazzini, 18  
52011 Soci (AR)  
P.IVA 02024110518  
info@trigeo.it

### FIRENZE

Via Nino Bixio, 9  
50131 Firenze  
firenze@trigeo.it  
T/F 055 400619  
M 328 7213928

### AREZZO

Via Trasimeno, 7  
52100 Arezzo  
arezzo@trigeo.it  
T/F 0575 294500  
M 339 2288117

## RELAZIONE TECNICA

**“INDAGINE GEOFISICA DI SUPERFICIE  
MEDIANTE GEORADAR STREAM C  
MULTIARRAY DA 600 MHZ E GEORADAR  
OPERA DUO MULTI-FREQUENZA 200-  
600MHZ, DOTATI DI ANTENNA GPS, PER  
LO STUDIO DI UN TRATTO DI ARGINE IN  
VIA DELL'ARGINGROSSO - COMUNE DI  
FIRENZE”**

## COMMITTENTE:



Regione Toscana

DIREZIONE DIFESA DEL SUOLO PROTEZIONE CIVILE – SETTORE GENIO CIVILE TOSCANA SUD

29 GIUGNO - 2023



CERTIFICATO  
ISO N°14PA00028P06

ADDETTO ALLE PROVE  
NON DISTRUTTIVE E  
SEMIDISTRUTTIVE  
NEL SETTORE CIVILE

TRIGEO s.n.c.  
di Nencetti Andrea e Burchini Benedetto  
Via Mazzini n°18 - 52011 - SOCI (AR)  
P.IVA 02024110518  
Tel/Fax 0575 294500 - 056 9902212  
Cell. 339 3048117 - 328 7213928  
www.trigeo.it - info@trigeo.it



WWW.TRIGEO.IT

## INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
<b>1.0 SCHEMA OPERATIVO</b>	<b>4</b>
<b>2.0 METODOLOGIA GEORADAR – CENNI TEORICI</b>	<b>6</b>
<b>3.0 ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI</b>	<b>8</b>
<b>4.0 SCHEMA OPERATIVO</b>	<b>9</b>
<b>5.0 CONSIDERAZIONI GENERALI - INTERPRETAZIONE SEZIONI</b>	<b>10</b>
<b>6.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEORADAR</b>	<b>10</b>
<b>ALLEGATI</b>	<b>12</b>

## INTRODUZIONE

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati dell'indagine geofisica eseguita mediante tecnica Georadar 3D, nel mese di **GIUGNO 2023** per conto della committenza lungo un tratto di argine in **VIA DELL'ARGINROSSO – COMUNE DI FIRENZE** (Figura 1), al fine di studiarne le caratteristiche.



**Figura 1:** Tracciato di intervento (in rosso): Via dell'Argingrosso – Comune Firenze.

Dopo aver preso visione della zona e delle problematiche ad essa connesse si è programmato un rilievo Georadar di dettaglio, in prossimità delle aree indicate dalla committenza, al fine di acquisire informazioni sulla presenza di disomogeneità e/o manufatti.

L'indagine è stata eseguita con strumentazioni Stream C (multiantenna) e Opera Duo (Biantenna) e mediante l'utilizzo di un sistema GPS differenziale per la corretta georeferenziazione delle strisciate, quindi delle anomalie rilevate.

Di seguito viene descritto lo schema operativo e le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, congiuntamente all'interpretazione scaturita dai dati elaborati.

## 1.0 SCHEMA OPERATIVO

Nella **Tavola 01** allegata, in scala 1:5.000, viene indicata l'area oggetto di indagine su base CTR 2K e le strisciate eseguite con entrambe le strumentazioni (Stream C ed Opera Duo).

Nelle **Tavole 02-11**, vengono riportate le planimetrie di dettaglio in scala 1:500, con riportate le anomalie rilevate all'interno dell'area d'indagine.

### STRUMENTAZIONI UTILIZZATE:

- **Stream C della IDS**, dotato di sistema multi array con 32 antenne da 600 MHz: l'indagine è stata eseguita con l'impiego di una strumentazione radar innovativa che opera secondo un concetto tomografico consistente nell'acquisizione simultanea di multipli radargrammi paralleli, intervallati da distanze estremamente ridotte, variabili da 4 a 12 cm in funzione dei limiti imposti dal teorema di Nyquist-Shannon per un campionamento tridimensionale di segnali elettromagnetici che sia privo di *aliasing* spazio-temporale. Il *post-processing* dei dati è stato condotto combinando metodi d'analisi e filtraggio del segnale elettromagnetico con algoritmi di correlazione spaziale pesata sull'inverso della distanza e funzioni software di equalizzazione e bilanciamento delle immagini. Lo stesso ha portato all'elaborazione di una sequenza di mappe radar riferite a intervalli di profondità progressivamente crescente dette *GPR-time slices*, le quali mostrano l'organizzazione spaziale dei segnali e riproducono l'ubicazione e la geometria delle strutture/anomalie rilevate.



## SPECIFICHE TECNICHE

MAX ACQUISITION SPEED:	6 km/h (3.7 mph)
RADAR POWER CONSUMPTION:	80 W
POSITIONING:	Integrated encoder and/or GPS / Total station
RADAR POWER SUPPLY:	SLA Battery 12VDC 24Ah
ENVIRONMENTAL:	IP65
ANTENNA FOOTPRINT:	120x57 cm
NUMBER OF CHANNELS:	32 (23VV+9HH)
ANTENNA CENTRAL FREQUENCY:	600 MHz
ANTENNA POLARIZATION:	HH and VV
SCAN WIDTH:	96 cm
CERTIFICATION:	CE, FCC, IC

L'utilizzo dello *Stream C* permette vantaggi in termini di produttività dell'indagine e di qualità dei risultati forniti. Gestendo 32 antenne con doppia polarizzazione (23VV+9HH) permette di "coprire", con un solo passaggio sul terreno, una porzione di sottosuolo di circa 1.0 m, acquisendo scansioni adiacenti è possibile ottenere una copertura totale (GPR 3D) dell'area.



- **Opera Duo della IDS**, dotato di un array di antenne Dual Frequency da 200 e 600 MHz: Il georadar *Opera Duo* possiede un'antenna a doppia frequenza che permette la localizzazione simultanea di target profondi e superficiali. L'ampia larghezza di banda offre la massima risoluzione e il sensore a doppia testa integra antenne a banda ultra larga (200 MHz e 600 MHz). Ha una velocità di scansione pari a 381 scansioni/sec con un intervallo di 42 scansioni/min.



L'impronta dell'antenna è pari a 40 x 50 cm ed ha una frequenza di 400 KHz. Grazie alla sua progettazione permette di effettuare rilievi GPR su ogni tipo di suolo.

## **SPECIFICHE TECNICHE**

MAX. ACQUISITION SPEED	More than 10 kph (6 mph)
POWER CONSUMPTION	13.5 W
POSITIONING	2 integrated encoders and/or GPS - Total station
SCAN RATE PER CHANNEL (@512 SAMPLES/SCAN)	381 scans/sec
SCAN INTERVAL	42 scans/m
POWER SUPPLY	3LA Battery 12 VDC 12 AH
ENVIRONMENTAL	IP65
ANTENNA FOOTPRINT	40 x 50 cm [15.75 x 19.7 in]
NUMBER OF HARDWARE CHANNELS	2
ANTENNA CENTRAL FREQUENCIES	250 MHz and 700 MHz
ANTENNA ORIENTATION	Perpendicular, broadside
SAMPLING FREQUENCY	400 kHz

## **2.0 METODOLOGIA GEORADAR – CENNI TEORICI**

Un'indagine georadar sfrutta l'interazione che viene a scaturire tra un'onda elettromagnetica e un oggetto (in senso lato) ubicato all'interno del mezzo indagato. Nella pratica, viene inviato un impulso EM nel semispazio esplorato tramite un'antenna trasmittente

(TX); la presenza di discontinuità e strutture all'interno del mezzo aventi differenti caratteristiche elettromagnetiche (permittività dielettrica, conducibilità elettrica ecc.), e la loro interazione con l'onda incidente favorirà fenomeni di riflessione determinando il ritorno in superficie di parte dell'energia inviata, captata successivamente dall'antenna di ricezione (RX). Con lo svolgimento dell'indagine lungo una determinata direzione di acquisizione, vengono a essere registrati diversi arrivi di onde riflesse dando luogo a un profilo georadar (radargramma) in cui, lungo la coordinata X (o Easting) è rappresentata la linea di scansione mentre in Y (o Northing) viene definito il tempo di percorso dell'onda (andata e ritorno, TWT) opportunamente convertibile in asse di profondità, una volta stimata la velocità di propagazione del segnale nel mezzo indagato.

I parametri misurati dal georadar comprendono l'ampiezza del segnale (A) ricevuto in superficie e il *tempo di ritardo* ( $\delta t$ ) che intercorre tra trasmissione e ricezione dello stesso. Il primo è una misura del contrasto rilevato all'interfaccia tra due materiali che in quanto a valore di costante dielettrica ( $\mu_0$ , permeabilità magnetica  $m$ ) e conduttività elettrica ( $s$ ). Il secondo è funzione della velocità di propagazione del segnale elettromagnetico all'interno dei materiali investigati e della profondità a cui è ubicata la discontinuità. La costante dielettrica è il parametro che più condiziona la capacità del segnale radar di propagarsi del sottosuolo e rappresenta la capacità di un materiale di immagazzinare carica quando sottoposto a un campo elettromagnetico. Essa è data dal rapporto  $C^2/V^2$ , dove  $C$  è la velocità dell'onda elettromagnetica nel vuoto e  $V$  quella all'interno del mezzo esplorato. Valori elevati di costante dielettrica implicano una ridotta velocità di propagazione del segnale. Il fattore di attenuazione è espresso in dB/m, descrive la perdita di energia che il segnale subisce mentre si propaga in profondità essendo direttamente proporzionale alla conducibilità elettrica del mezzo attraversato. Nella pratica, esiste una relazione diretta tra la granulometria del materiale investigato e la capacità di penetrazione del segnale, la quale è favorita lavorando con sedimenti grossolani quali sabbie e ghiaie mentre risulta fortemente limitata in presenza di limi argillosi e argille. In funzione della profondità e delle dimensioni degli obiettivi che s'intende rilevare, i georadar impiegano antenne che operano a frequenze comprese tra 100 e 2000 MHz, idonee a esplorare alla massima risoluzione profondità e spessori compresi tra 4-5 m e pochi decimetri. La relazione tra profondità d'indagine e frequenza impiegata è di proporzionalità inversa, mentre quella tra frequenza e risoluzione spaziale è di relazione diretta. Tipicamente, operando a 600 MHz in

contesti granulometrici medio-grossolani la profondità d'indagine si attesta attorno a 1.5/2.0 m da p.c.

I sistemi radar tradizionali impiegano antenne monocanale e forniscono un singolo profilo (radargramma) per ogni strisciata effettuata sulla superficie d'interesse. Quelli più avanzati (come lo *Stream C* IDS utilizzato nel presente lavoro) utilizzano schiere di dipoli affiancati e realizzano una scansione tomografica del sottosuolo a “copertura” totale, ovvero basata sull'acquisizione simultanea di più profili paralleli intervallati da distanze centimetriche.

### 3.0 ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI

I rilievi georadar sono stati condotti con i seguenti sistemi georadar:

- IDS *Opera Duo*: Il sistema è dotato di un array di antenne Dual Frequency da 200 e 600 MHz, unità di controllo (computer portatile), carrello manuale di trasporto;
- IDS *Stream-C* 600 MHz (*Subsurface Tomographic Radar Equipment for Asset Mapping*)

Le posizioni d'acquisizione delle strisciate georadar sono state acquisite con antenna GPS differenziale Leica Geosystems. Compatibilmente con le specifiche condizioni d'accessibilità dei settori investigati, i rilievi sono stati eseguiti realizzando strisciate giustapposte in modo tale da “coprire” integralmente le aree d'interesse. L'acquisizione dei dati è stata effettuata mediante il programma OneVision (stream C) e uNext (Opera Duo) di IDS adottando i seguenti parametri strumentali:

- passo di campionamento nella direzione d'acquisizione (*in-line resolution*): 2 cm
- finestra temporale di campionamento (*Time-window*): 128 ns
- numero di campioni per traccia (*Samples/scan*): 512.

I dati così acquisiti sono stati sottoposti ad un *post-processing* avanzato il cui scopo è stato quello di filtrare le interferenze prodotte da sorgenti esterne, amplificare i segnali d'interesse, ed eseguirne la correlazione spaziale. Nella pratica, i radargrammi sono stati filtrati attraverso il seguente flusso di lavoro: rettificazione del segnale (*dewow*) → correzione statica del primo arrivo → amplificazione (*gain*) → filtro passa banda (*band pass*) → rimozione del fondo (*background removal*) → trasformata di Hilbert (*Hilbert transform*). La velocità di propagazione del segnale elettromagnetico all'interno del mezzo, stimata sulla base dell'apertura dei riflettori iperbolici generati da sorgenti puntiformi (*hyperbola fitting method*), è

risultata pari 0.97 m/ns. Successivamente al filtraggio, i radargrammi sono stati ricampionati e correlati spazialmente attraverso un algoritmo d'interpolazione spaziale pesata sull'inverso della distanza, in modo da colmare le lacune esistenti tra profili contigui. Il risultato del *post-processing* è stato l'elaborazione, per ciascuno dei settori investigati, di una sequenza di mappe radar riferite a profondità progressivamente crescenti (*GPR Time/depth slices – o Time slices*) le quali illustrano l'organizzazione spaziale dei segnali al variare della profondità d'indagine. Il trattamento dei dati è stato eseguito con il software **GRED(HD)** di IDS.

#### 4.0 SCHEMA OPERATIVO

L'indagine georadar è stata effettuata presso un tratto di argine indicato dalla committenza. Complessivamente i materiali hanno presentato una discreta attitudine alla propagazione delle onde elettromagnetiche, permettendo di spingere le indagini fino alle profondità di 1.5-2.0 m. Il lavoro si è svolto in più fasi; in primo luogo, oltre alle opportune tarature strumentali, è stato eseguito un primo rilievo di alcune parti dell'area con settaggi differenti; ciò ha permesso, dopo una prima analisi sommaria delle sezioni raccolte, di stabilire le amplificazioni più appropriate all'intervento e la miglior scala di profondità (in tempi) da usare nel corso del rilievo vero e proprio.

Con tali caratteristiche di rilievo si ha la garanzia di aver colto, con ottimo potere risolutivo, grazie anche ad una mirata ubicazione dei profili georadar, le discontinuità elettromagneticamente anomale presenti.

Complessivamente sono stati acquisiti **ca. 8.610 m<sup>2</sup>**.



**Figura 3:** Fase di acquisizione durante rilievo Via dell'Argingrosso - Comune di Firenze

## 5.0 CONSIDERAZIONI GENERALI - INTERPRETAZIONE SEZIONI

Prima di descrivere i risultati ottenuti è necessario richiamare l'attenzione su alcuni aspetti inerenti la lettura delle sezioni stesse.

In generale è necessario notare che le sezioni georadar ottenute sono sempre delle sezioni con scala verticale in tempi. Per convertire i tempi in profondità bisogna moltiplicare questi per la velocità caratteristica del mezzo attraversato; vi sono vari metodi che permettono di ricavare tale velocità in modo indiretto, così come si hanno numerosi valori tabulati di velocità per i vari mezzi.

Nel caso, è stata utilizzata una costante dielettrica tabulata media caratteristica per i materiali presenti.

Per quanto riguarda quindi il rilievo, le informazioni qualitative sulla natura e lo stato dei materiali attraversati sono costituite e messe in evidenza dall'intensità degli eventi riflessi, dalla loro quantità, diffusione od assenza. L'intensità degli eventi riflessi è direttamente legata al contrasto di impedenza fra i diversi materiali incontrati. I livelli di riflessione marcati, nelle sezioni interpretate allegate, corrispondono a forti contrasti, mentre le riflessioni diffuse sono più caratteristiche di materiali fessurati o bagnati. L'assenza, o meglio la scarsità di echi, indica invece delle zone costituite da materiale omogeneo.

## 6.0 RISULTATI DELL'INDAGINE GEORADAR

Nel presente lavoro, come detto, lo scopo dell'indagine georadar era quello di indagare un tratto di argine sito in Via dell'Argingrosso nel Comune di Firenze.

L'indagine ha individuato una discontinuità continua (in blu) che si estende nella parte est dell'argine. Le coordinate di inizio-fine discontinuità vengono riportate di seguito (e nelle tavole allegate):

### INIZIO

X: 677607.4472

y: 4850007.4642

### FINE

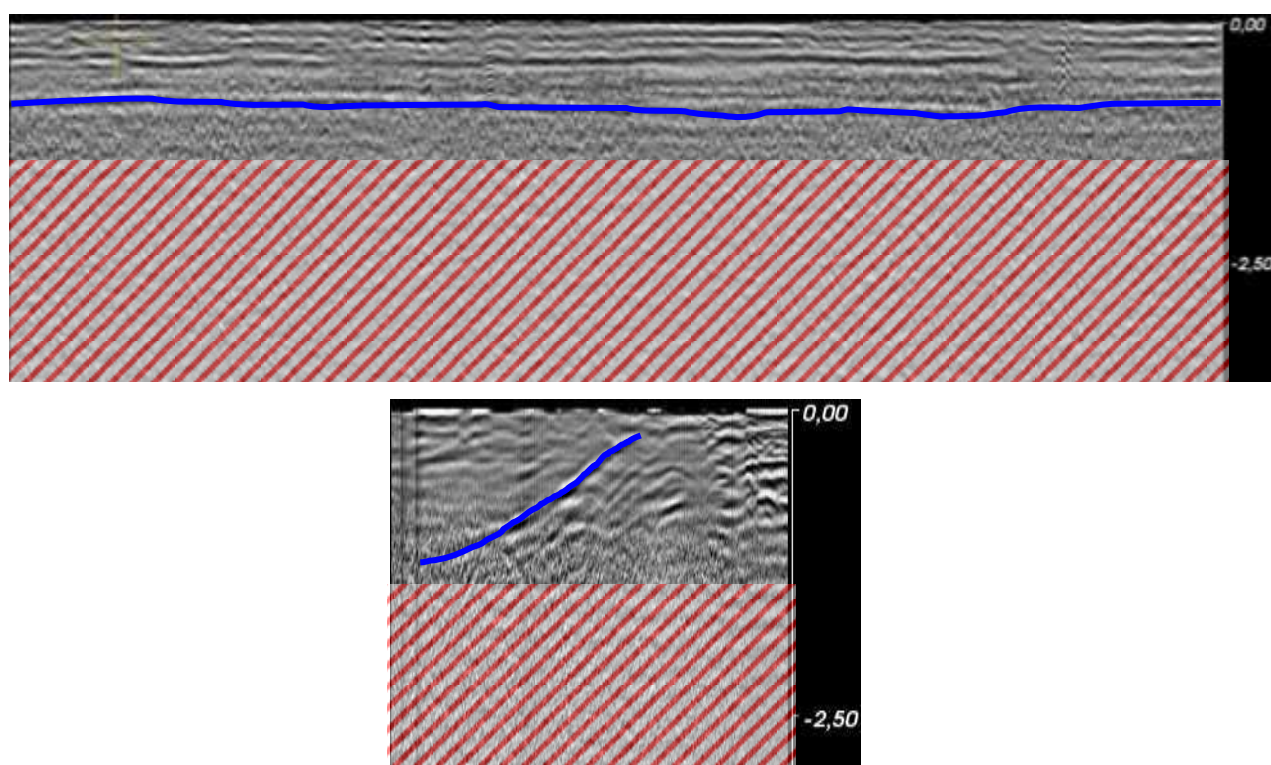
X: 678035.9057

y: 4849959.7712

Sono inoltre presenti delle tubazioni trasversali (in rosso) e delle disomogeneità nel terreno (in nero) (**Tavole 02-11**).

Nella parte più ad ovest la discontinuità sopra descritta non è stata individuata; non è da escludere che in questa porzione di argine la discontinuità si possa trovare a profondità superiori a 1.5/2.0 m, limite sotto il quale la strumentazione non è riuscita ad arrivare.

Di seguito vengono riportati due radargrammi esplicativi che mostrano come oltre 1.50 m di profondità il segnale georadar mostra una forte attenuazione (figura 5).



**Figura 5:** radargrammi esplicativi. In alto il radargramma longitudinale: in blu la discontinuità ed in rosso il segnale disturbato. In basso il radargramma trasversale: in blu la discontinuità ed in rosso il segnale disturbato.

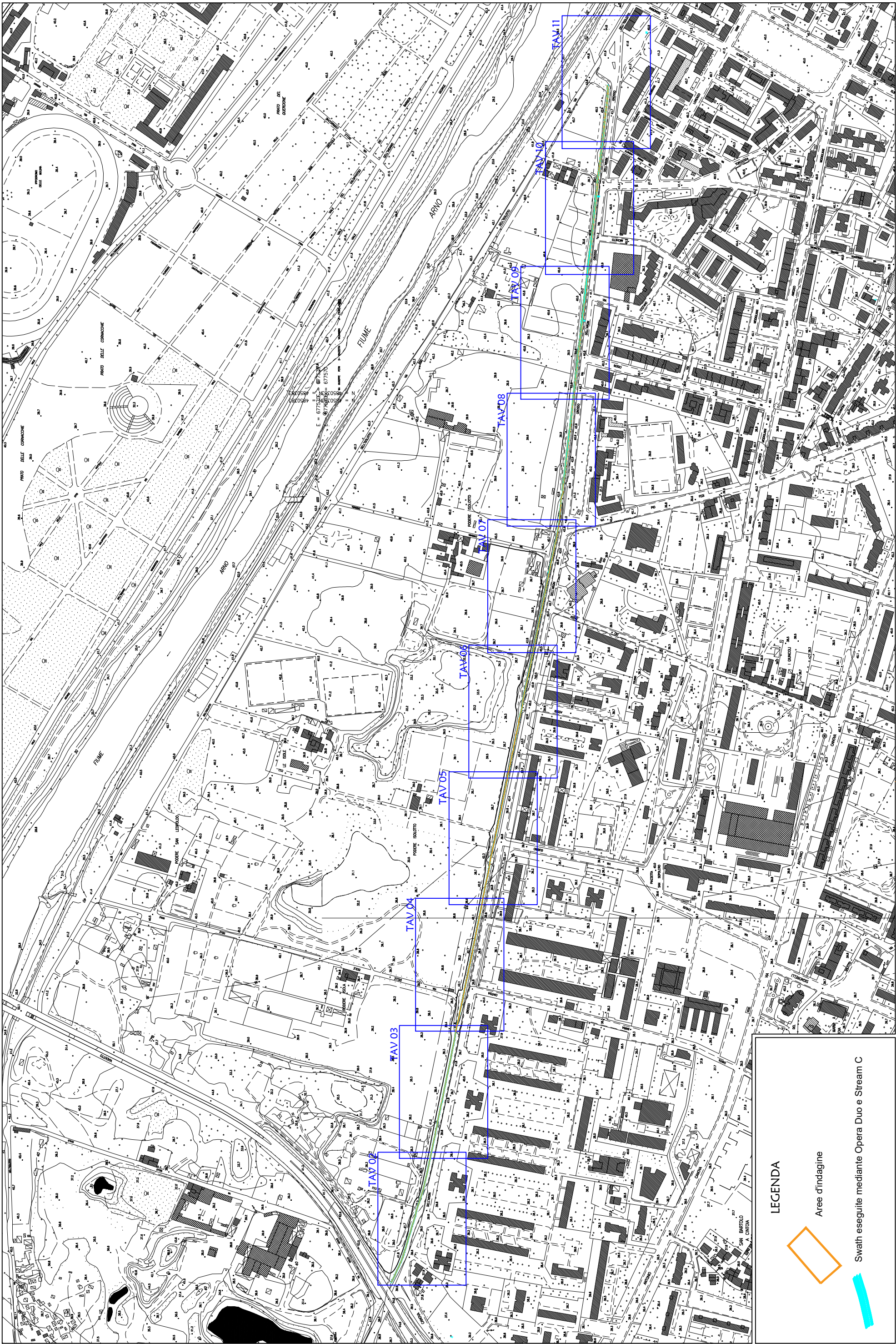
Dai radargrammi di Figura 5 è ben visibile la discontinuità sia nella sezione longitudinale che in quella trasversale. La campitura rossa, identifica la porzione di radargramma oltre il quale il segnale subisce una forte attenuazione.

Arezzo, lì 29 Giugno 2023

TRI+GEO S.r.l.  
di Nencetti Andrea & Bonifazi Benedetta  
Via Mazzini n°10 - 50011 - SOGI (AR)  
P.IVA 02028110516  
Tel/Fax 0573 25480 - 056 999212  
Cell. 339 9266117 - 339 7813923  
www.trigeo.it

Trigeo snc

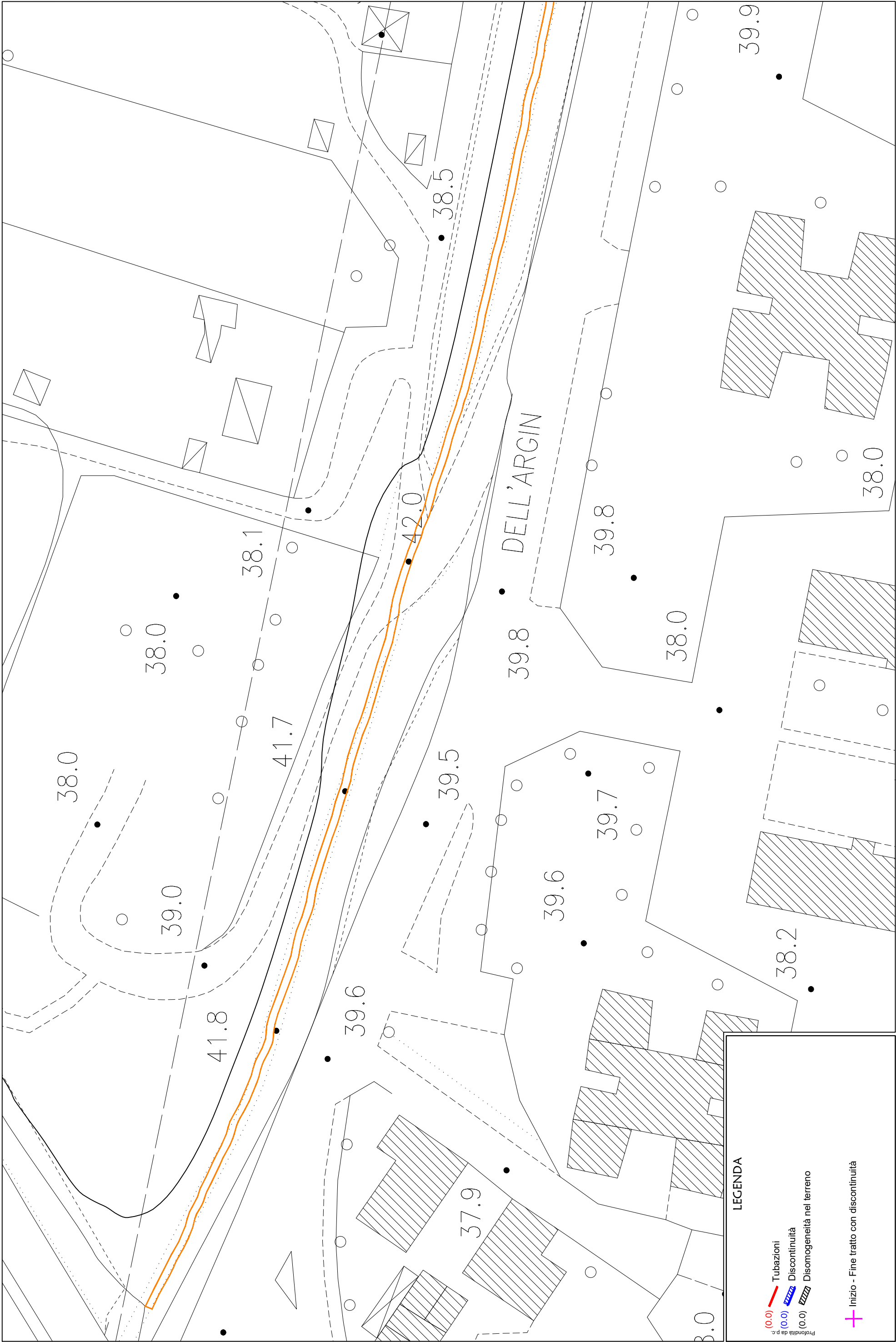
## ALLEGATI



LEGENDA

Aree d'indagine

Swath eseguite mediante Opera Duo e Stream C



LEGENDA

(0.0)

Tubazioni

(0.0)

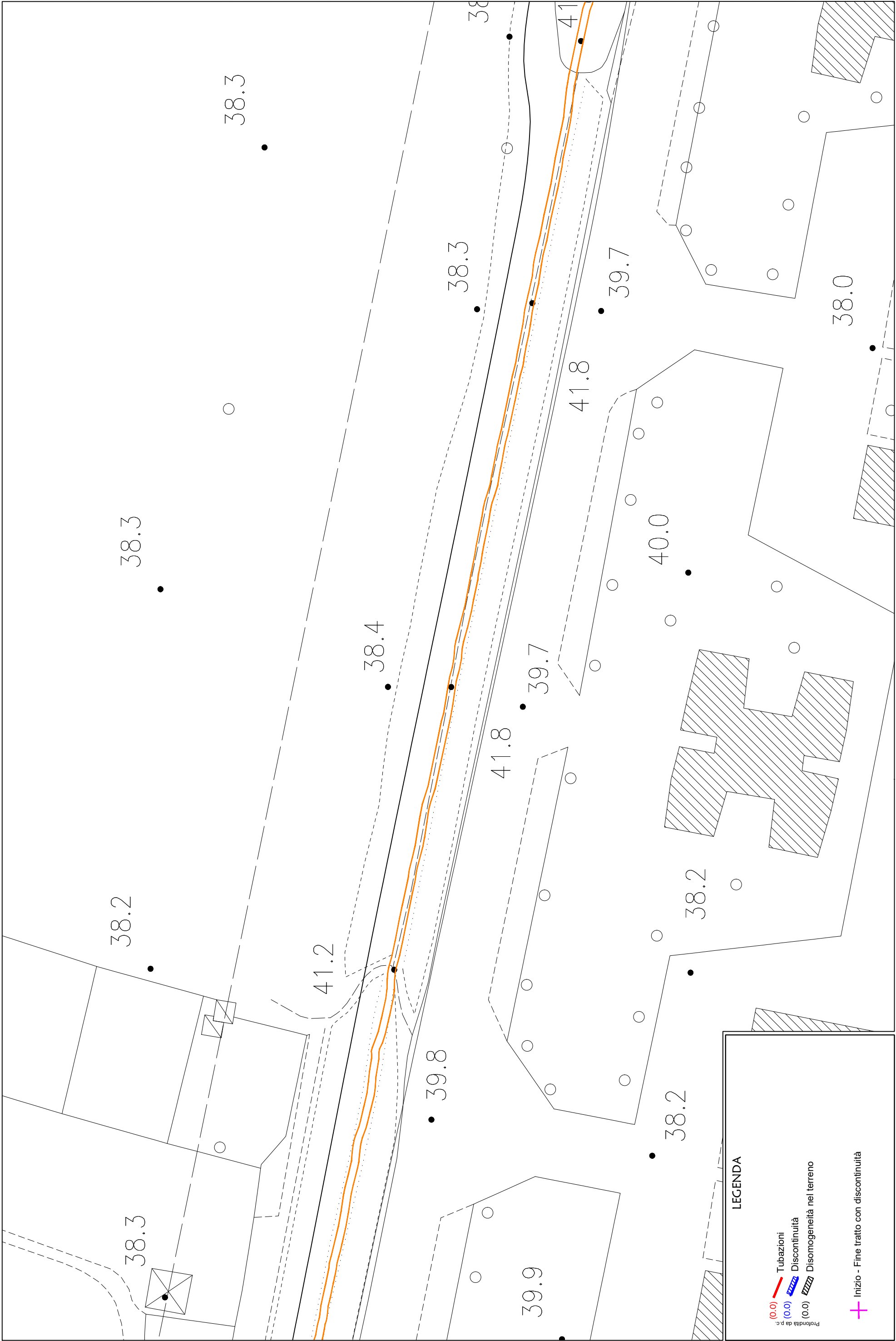
Discontinuità

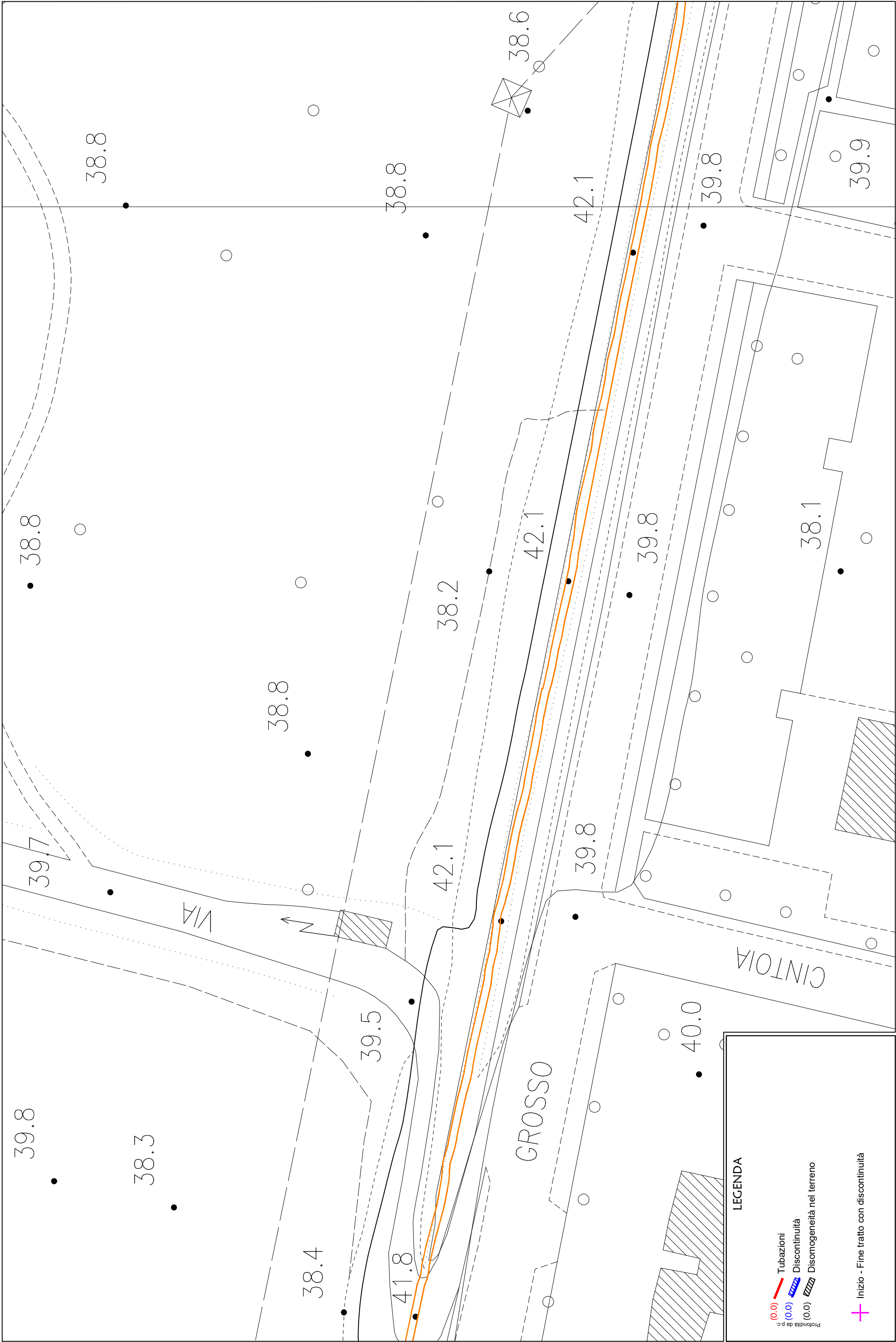
(0.0)

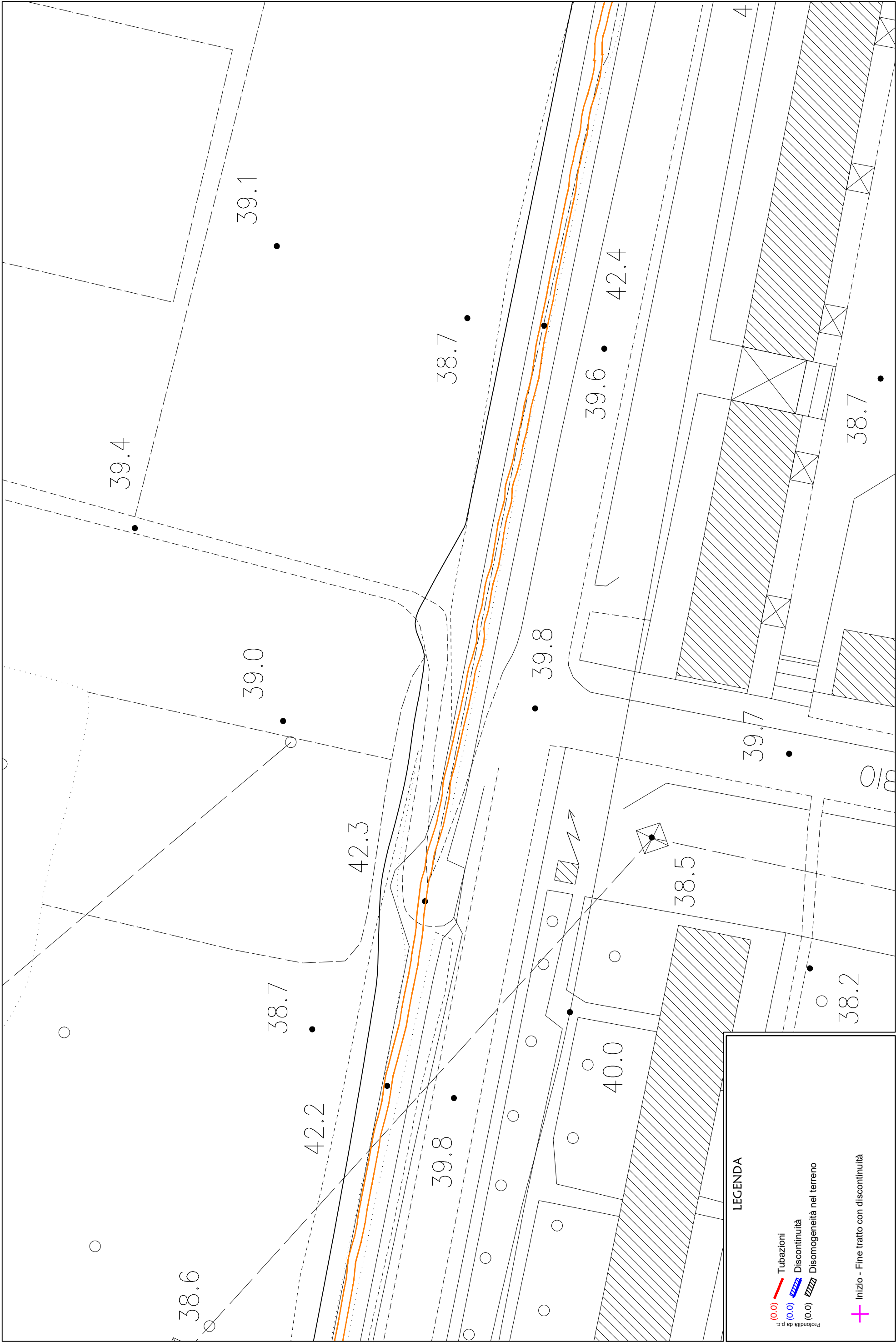
Disomogeneità nel terreno

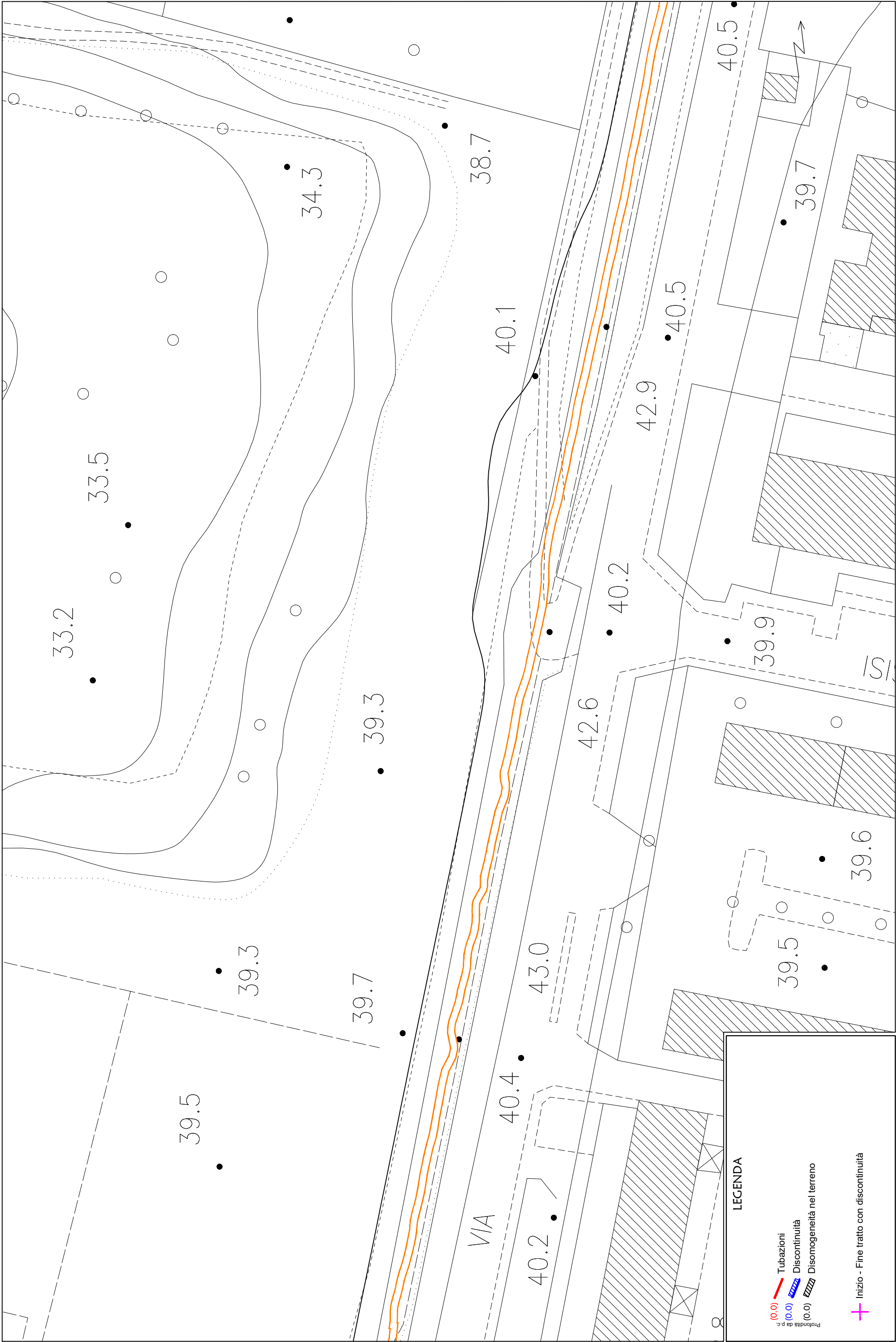
+

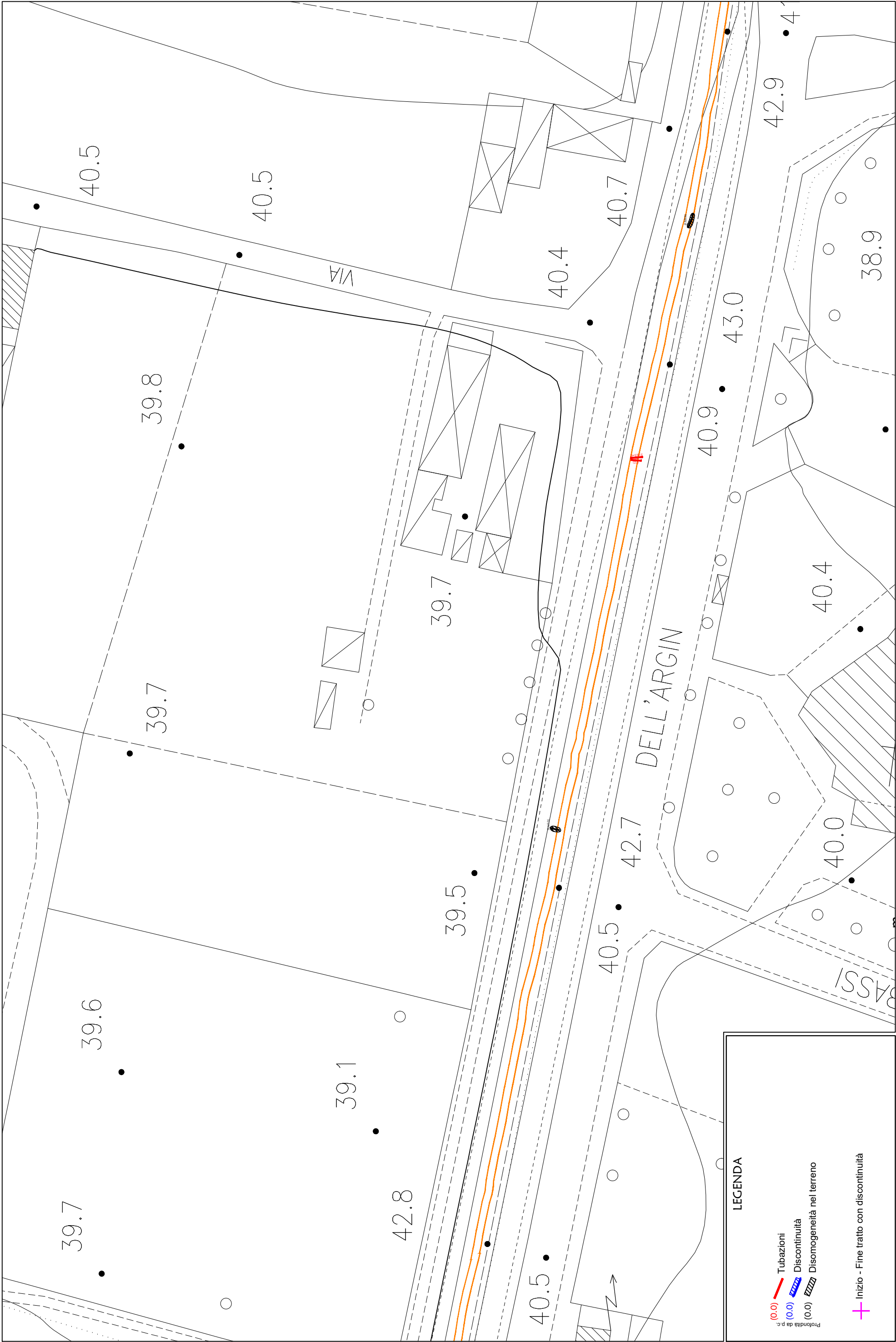
Inizio - Fine tratto con discontinuità

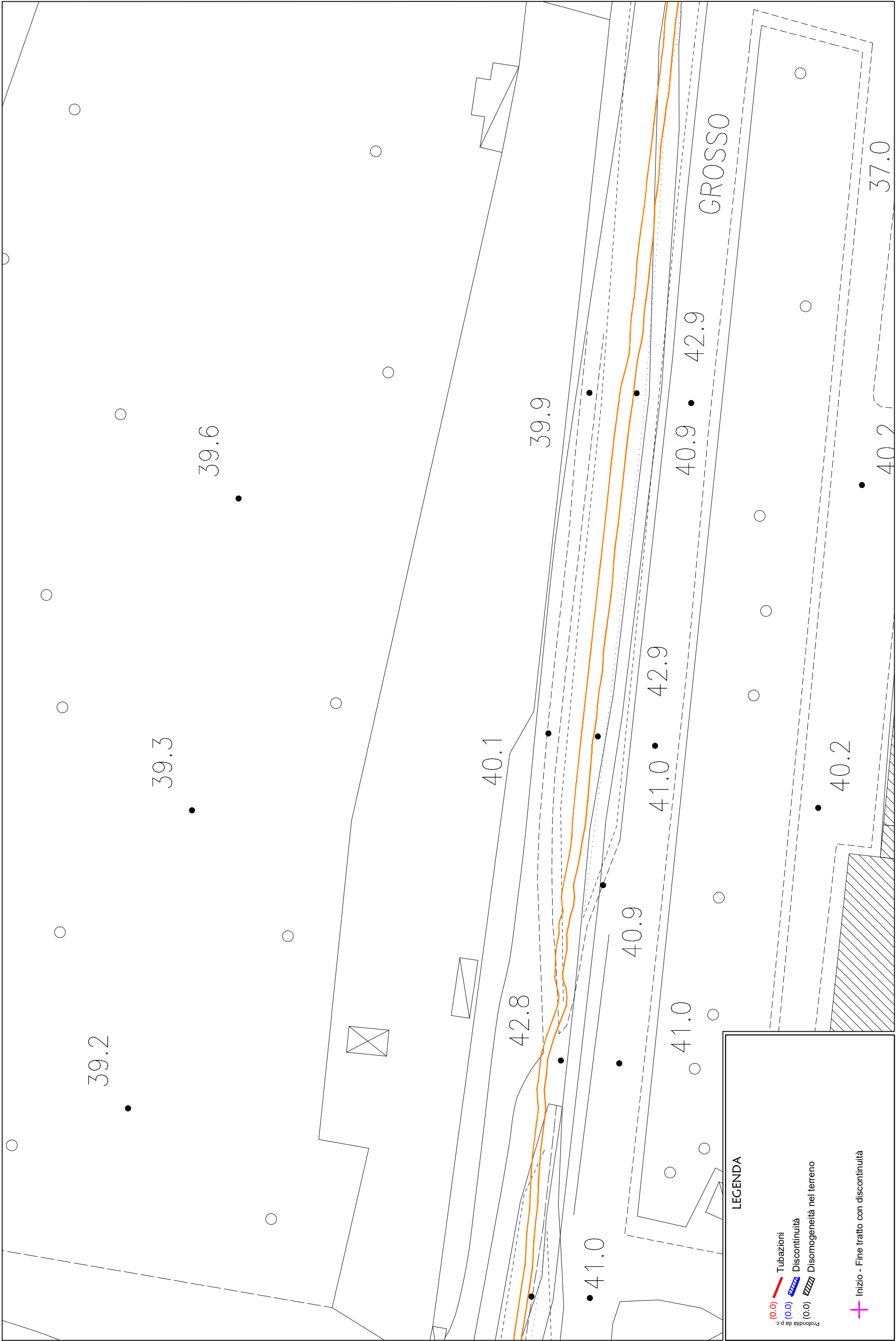


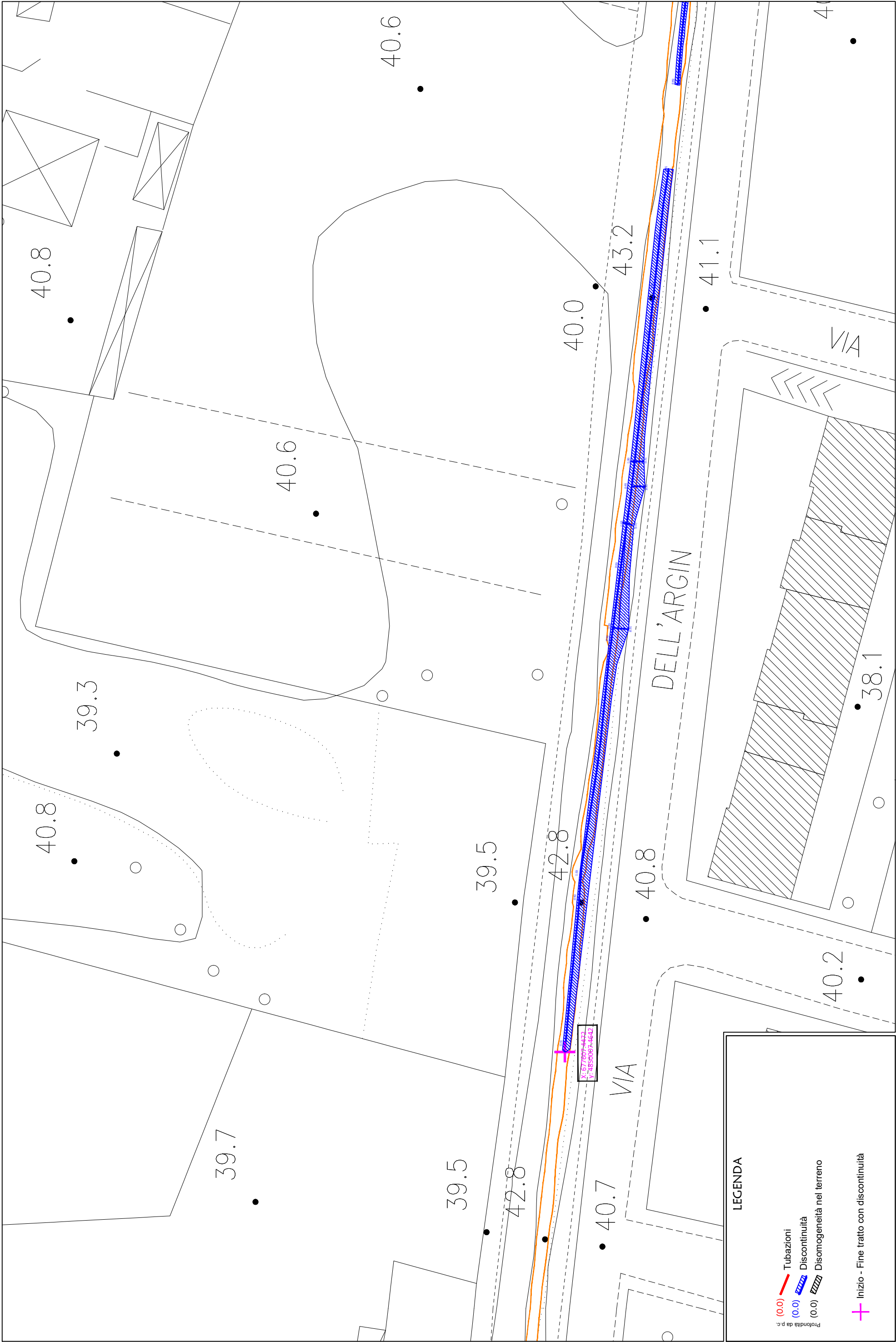


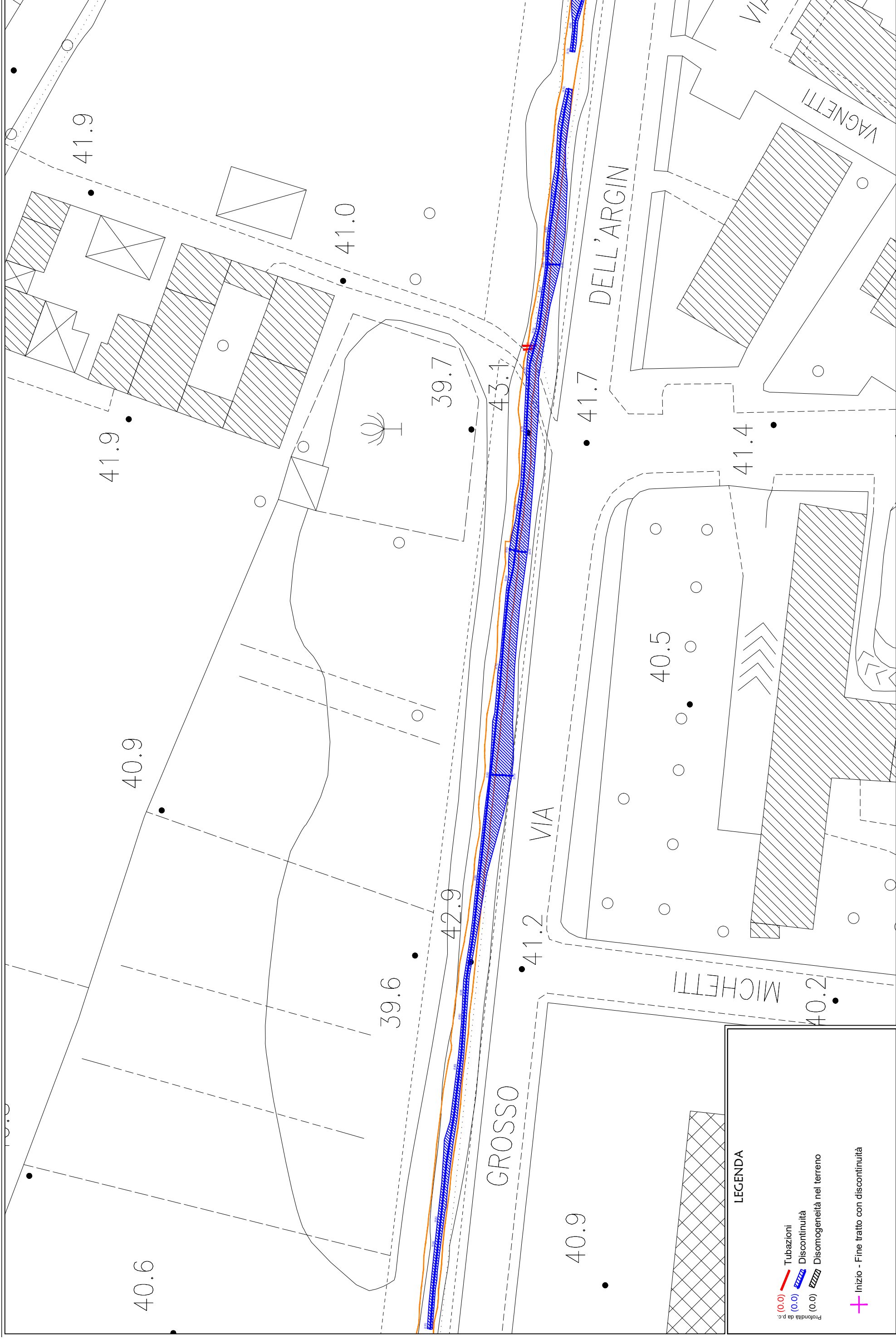


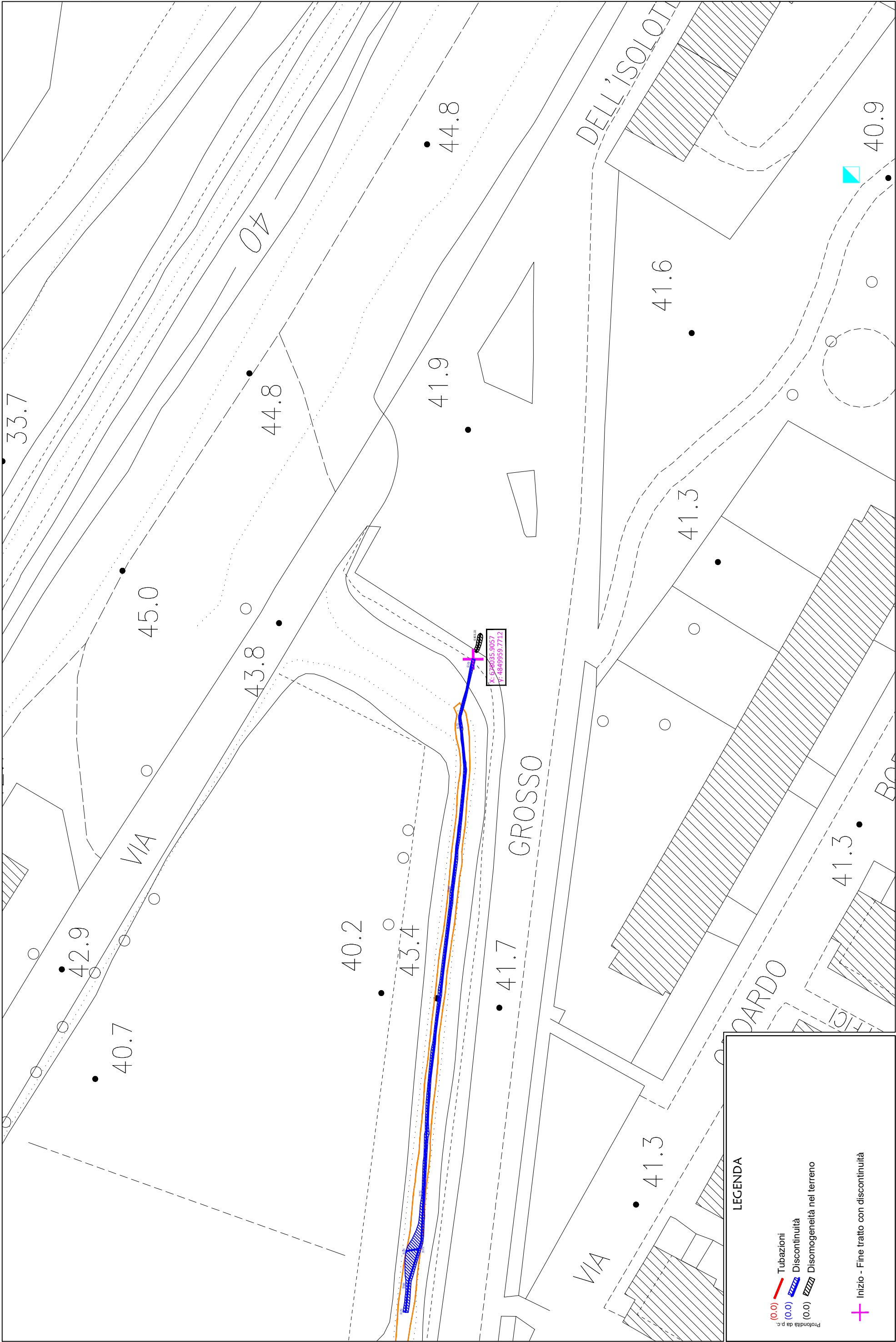












**CITTA' METROPOLITANA DI FIRENZE**  
**COMUNE DI FIRENZE**



**Indagine Geofisica attiva (MASW) svolta lungo argine in Via Carrara a Firenze.**

Data esecuzione indagini: 21 Luglio 2023  
Data stesura relazione tecnica: 31 Luglio 2023

**EngeoProgetti Srl**  
via Pontevecchio 18 Barga  
55051 - Lucca  
Pec : [engeoprogettisrl@pec.it](mailto:engeoprogettisrl@pec.it)  
Mobile Phone: 3496608449 / 3476146353



---

## **INDICE RELAZIONE**

<b>1 – PREMESSA</b>	<b>2</b>
1.1 UBICAZIONE AREA DI STUDIO	2
1.2 INDAGINI GEOGNOSTICHE ESEGUITE	2
1.3 STRUTTURA DELLA RELAZIONE	2
<b>2 – LE ONDE DI SUPERFICIE</b>	<b>3</b>
2.1 DESCRIZIONE DELLE ONDE DI SUPERFICIE	3
2.2 CENNI TEORICI	4
2.3 PROPRIETA' RIASSUNTIVE DELLE ONDE SUPERFICIALI	7
<b>3 – INDAGINE SISMICA MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)</b>	<b>9</b>
3.1 ACQUISIZIONE DEI DATI MASW	11
3.1.1 PARAMETRI DI ACQUISIZIONE TEORICI ED UTILIZZATI	12
3.1.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	15
3.1.3 ESECUZIONE INDAGINE MASW	15
3.2 ELABORAZIONE (PROCESSING) ED INVERSIONE DEI DATI MASW	17
<b>4 – COMMENTO AI RISULTATI DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE SVOLTE</b>	<b>20</b>
<b>5 – BIBLIOGRAFIA</b>	<b>21</b>

## **ALLEGATI**

- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONE INDAGINI SISMICHE ATTIVE MASW
- ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI

---

## **1 – PREMESSA**

Il presente documento riguarda la descrizione, l'elaborazione e i risultati delle indagini geognostiche, di tipo geofisico, condotte lungo un argine in Via Carrara a Firenze.

### **1.1 – UBICAZIONE AREA DI STUDIO**

Per la visualizzazione dell'ubicazione di ciascuna indagine geognostica svolta si rimanda alla cartografia tematica realizzata.

### **1.2 – INDAGINI GEOGNOSTICHE ESEGUITE**

La caratterizzazione dal punto vista sismico del terreno è stata condotta mediante la realizzazione delle seguenti tipologie di prove geofisiche sia attive che passive:

**n. 1 indagine sismica attiva MASW**, per la determinazione del profilo delle onde di taglio.

### **1.3 – STRUTTURA DELLA RELAZIONE**

La presente relazione descriverà i metodi di indagine utilizzati, illustrerà la metodologia di acquisizione, la strumentazione utilizzata, le tecniche e modalità di inversione/interpretazione, e verranno mostrati, in allegato, i risultati ottenuti dalla campagna geognostica svolta a supporto della caratterizzazione sismica del sottosuolo relativamente all'area di indagine.

Verranno quindi in un primo momento illustrate e descritte le varie tecniche di acquisizione dei dati, successivamente verranno riportate le modalità di elaborazione e infine mostrati i risultati ottenuti.

---

## **2 – LE ONDE DI SUPERFICIE**

### **2.1 – DESCRIZIONE DELLE ONDE DI SUPERFICIE**

Le onde superficiali si generano ogni qual volta esiste una superficie libera.

Vengono a crearsi quindi a causa dell'interazione delle onde di corpo con una superficie di discontinuità fisica, la più studiata delle quali è la superficie libera della Terra.

Queste onde si propagano solo lungo la superficie o nell'interfaccia tra due strati con proprietà fisiche diverse.

La velocità delle onde di superficie è inferiore alla velocità delle onde di volume, per cui il loro arrivo è successivo all'arrivo delle Onde P ed S.

Esistono due tipi di onde di superficie, chiamate coi nomi dei due fisici che per primi le studiarono: Onde di Rayleigh e Onde di Love.

#### **- Onde di Rayleigh**

Quando un'onda S (componente SV) assieme ad un'onda P incide sulla superficie libera dalla componente vettoriale delle due si generano onde superficiali che si propagano lungo la superficie stessa.

Queste onde esistono sia in semispazi omogenei (in questo caso la loro velocità è circa 0,92 volte la velocità delle onde S) che disomogenei (in cui risulta essere un'onda dispersa, ossia la sua velocità è anche funzione della sua frequenza).

Il loro moto è vincolato in uno spazio verticale contenente la direzione di propagazione dell'onda.

Si dimostra che una particella investita da questo tipo di onda vicina alla superficie, percorre un moto ellittico retrogrado lungo la direzione di propagazione (Fig. 1).

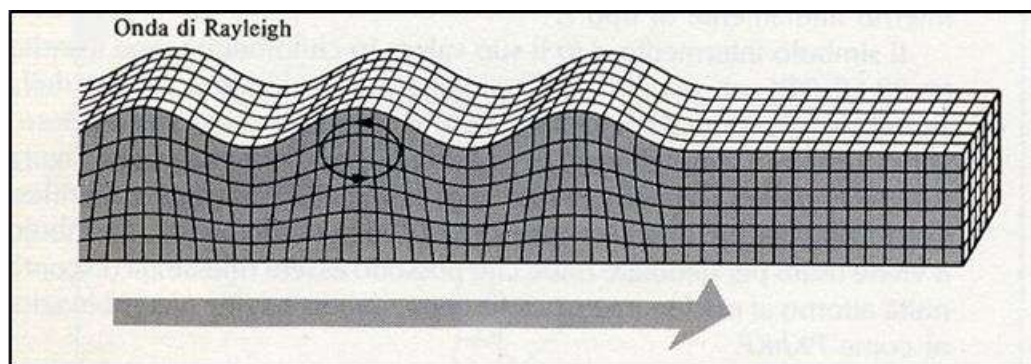


Fig. 1 - Schema di propagazione delle Onde di Rayleigh (fonte immagine [www.ingv.it](http://www.ingv.it))

---

- Onde di Love

Le onde di Love sono onde superficiali, anch'esse generate dall'incontro delle Onde S (componente SH) con la superficie libera del terreno, ma vengono generate solo nei mezzi in cui la velocità delle Onde S aumenta con la profondità (un mezzo quindi disomogeneo) di conseguenza sono onde sempre disperse.

Le Onde di Love fanno vibrare il terreno sul piano orizzontale in direzione ortogonale rispetto alla direzione di propagazione dell'onda (Fig. 2).

La velocità delle onde di Love è maggiore di quella delle onde S negli strati più superficiali della crosta, ma minore della stessa negli strati più bassi.

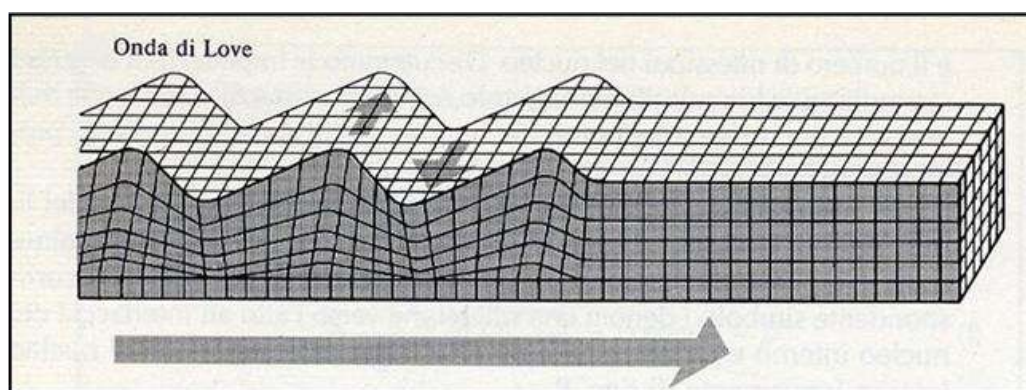


Fig. 2 - Schema di propagazione delle onde di Love (fonte immagine [www.ingv.it](http://www.ingv.it))

## **2.2 – CENNI TEORICI**

Nella maggior parte delle indagini sismiche di superficie, quando viene utilizzata una sorgente di onde di compressione, oltre due terzi del totale di energia sismica complessivamente generata è trasmessa mediante onde di Rayleigh.

Se consideriamo la variazione di velocità verticale in mezzi eterogenei noteremo che le onde di Rayleigh hanno un comportamento dispersivo, vale a dire che la velocità di gruppo non coincide con la velocità di fase di ciascuna frequenza.

Detto questo all'aumentare della lunghezza d'onda  $\lambda$  aumenta la profondità della parte interessata dalla perturbazione.

Sapendo che la lunghezza d'onda è legata al periodo  $T$  dell'onda mediante la relazione:

$$\lambda = V \cdot T$$

se ne deduce che, a parità di velocità ( $V$ ), la profondità cresce all'aumentare del periodo e al diminuire della frequenza (si ricorda che  $T = 1/f$  dove  $f$  è la frequenza).

In pratica, al crescere del periodo, aumenta la sensibilità dell'onda a caratteristiche del terreno sempre più profonde.

Il terreno inoltre agisce da filtro passa basso quindi le frequenze più alte possono essere indicative soltanto per gli strati più superficiali.

Nel caso delle onde Rayleigh, lo strato coinvolto nella perturbazione ha uno spessore dell'ordine di circa  $0.5 \lambda$  (Choon B.Park et al, 1997).

L'immagine sottostante (Fig. 3) riassume il concetto per cui considerando due componenti una ad alta frequenza e corta lunghezza d'onda (a sinistra) e una a bassa frequenza e quindi grande lunghezza d'onda (a destra), la velocità di propagazione della prima dipende dal materiale più superficiale (quindi dalle caratteristiche ad esempio del primo strato) mentre la seconda viaggerà ad una velocità che dipende da tutto il materiale fino in profondità (quindi dalle caratteristiche di tutti gli strati che compongono questo ipotetico modello).

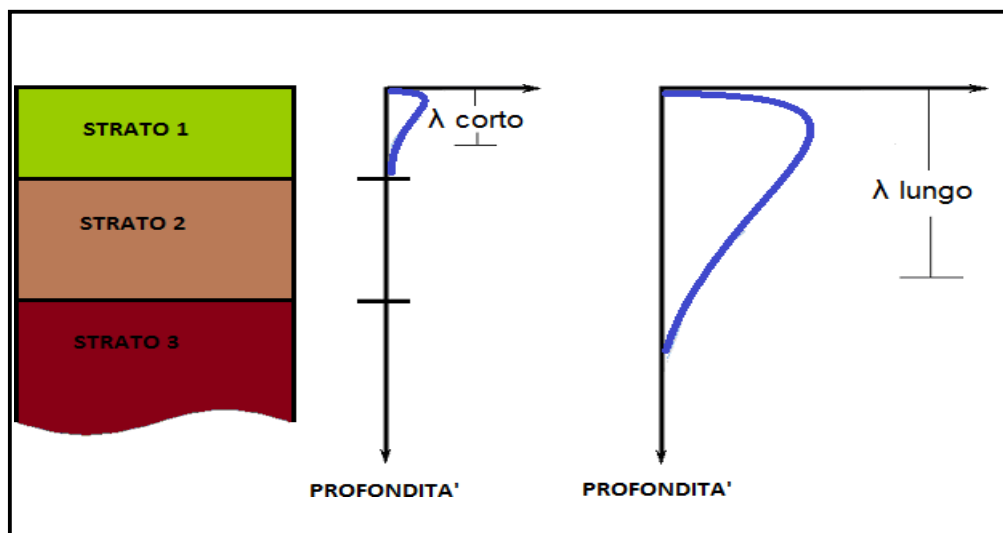


Fig. 3 - Corrispondenza tra lunghezza d'onda e profondità investigata

La distribuzione della velocità di fase in funzione della frequenza prende il nome di curva di dispersione.

E' chiaro quindi che più un modello di terreno è eterogeneo e maggiore sarà il grado di dispersione delle onde superficiali (Fig. 4).

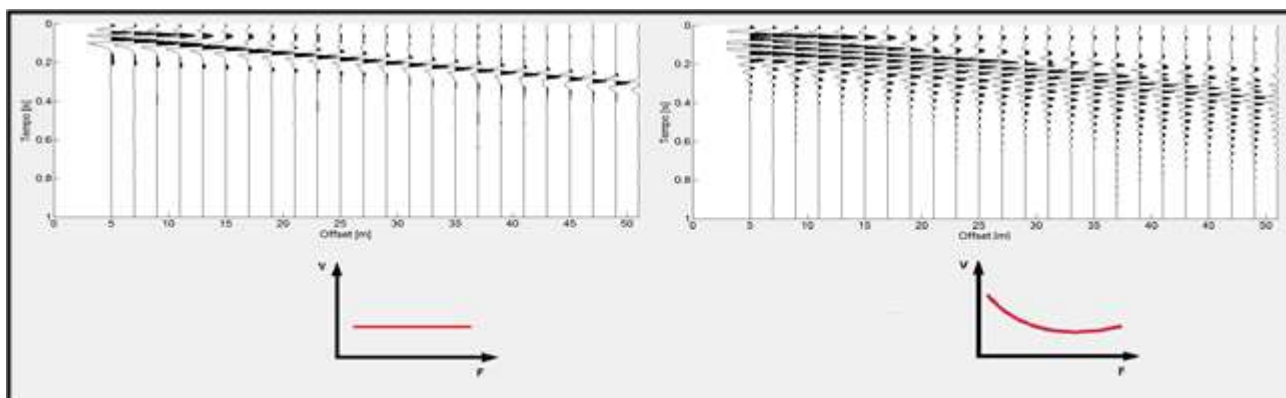


Fig. 4 - A sinistra, sismogramma risultante su terreno non dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione. A destra, sismogramma risultante su terreno dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione.

Un altro importante aspetto è connesso con la possibilità che questo tipo di onde, in presenza di eterogeneità verticali, manifestino anche una natura multimodale, vale a dire che la loro propagazione può avvenire, per una data frequenza, solo a determinate velocità (modi di propagazione).

Il modo che presenta la velocità di propagazione più bassa è detto modo fondamentale, mentre i restanti costituiscono i modi superiori.

In caso di strati eterogenei e con velocità crescenti il modo fondamentale è quello più energetico.

E' stato osservato che i modi superiori hanno origine in presenza di inversioni di velocità (Fig. 5) o di contrasti di velocità molto forti tra due strati (Cercato, 2008).

In questo caso i modi superiori sono caratterizzati da energia superiore rispetto al modo fondamentale.

Molto spesso può accadere che ci siano dei “salti di modo” tra il fondamentale e i superiori e viceversa quindi il solo basarsi sul modo fondamentale implica in alcuni casi una scorretta inversione dei dati.

I modi superiori vengono sempre più usati infatti il loro utilizzo nelle elaborazioni unitamente al modo fondamentale, può aiutare a vincolare meglio il modello Vs del sottosuolo, soprattutto in profondità. I più comuni software in commercio ne prevedono l'uso.

La dispersione delle onde superficiali quindi, elemento di disturbo negli altri tipi di indagini (sismica a rifrazione e a riflessione), risulta invece, grazie a questa sua proprietà, estremamente utile per calcolare le proprietà elastiche dei mezzi presenti in superficie.

Dalla curva di dispersione, in particolare dallo studio del modo fondamentale, infatti si può ricavare, attraverso l'operazione di inversione dei dati, il profilo di Velocità Vs e gli spessori degli strati indagati, parametri fondamentali sia in ingegneria sia in geofisica di esplorazione.

La stessa curva di dispersione inoltre può essere calcolata a partire dal sismogramma iniziale  $x-t$  (offset-tempi) sia in forma generale in un diagramma  $F-V$  (frequenze-velocità), sia in un diagramma  $F-L$  (frequenze-lentezze dal momento che  $L = 1/V$ ), sia in un diagramma  $F-K$  (frequenze-numeri d'onda dal momento che  $f=1/T$  quindi  $V = \lambda f = 2\pi f / K$ ) sia in un diagramma  $T-V$  o  $T-L$  (tempi-velocità o tempi-lentezze).

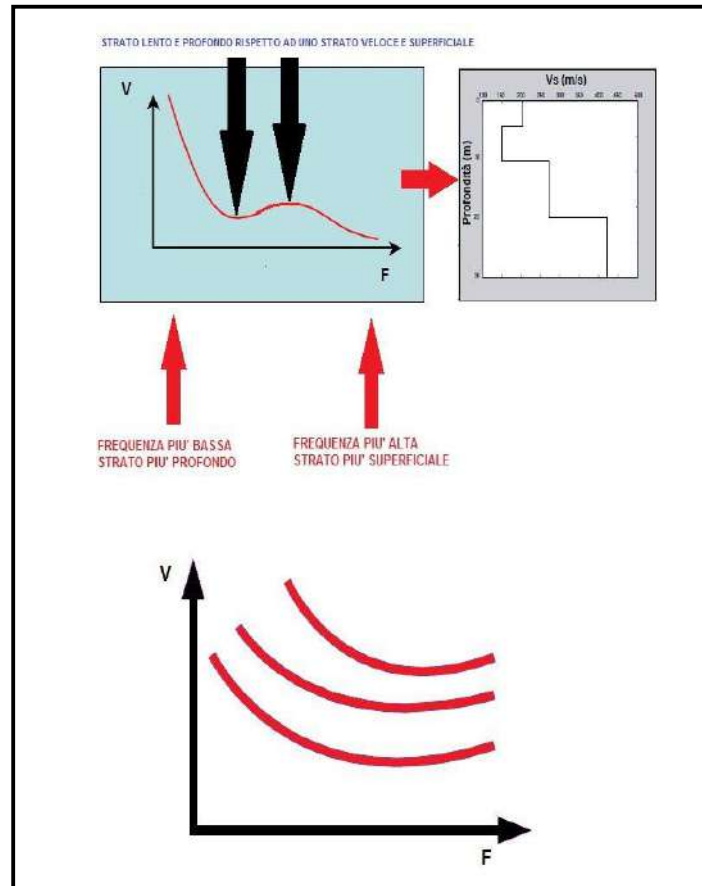


Fig. 5 - In alto, curva di dispersione con la presenza di inversione di velocità. In basso, andamento tipico della curva di dispersione (Modo Fondamentale e Modi Superiori); all'aumentare della frequenza diminuisce la velocità.

### **2.3 – PROPRIETÀ RIASSUNTIVE DELLE ONDE SUPERFICIALI**

1. Circa il 67% dell'energia rilasciata da un qualsiasi tipo di sorgente genera onde di superficie.
2. L'ampiezza delle onde superficiali caratterizzate da un fronte d'onda cilindrico, la cui area risulta  $2\pi xz$ , è notevolmente maggiore rispetto alle onde di corpo che invece presentano fronte d'onda sferico.

Questo significa che per conservare l'energia (dal momento che l'energia è proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda) l'ampiezza dell'onda di superficie alla distanza  $X$  deve essere proporzionale a  $1/X$ . Il fronte d'onda delle onde di corpo invece è sferico (area relativa  $4\pi x^2$ ) quindi

---

l'ampiezza alla distanza  $X$  è proporzionale a  $X^{-2}$  il che significa che decade molto più velocemente delle onde superficiali.

3. Lo studio delle onde superficiali non è limitato, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità.

4. La propagazione delle onde di Rayleigh è influenzata prevalentemente da  $V_s$  e dallo spessore  $h$  degli strati mentre le velocità  $V_p$  e la densità possono essere trascurate. La velocità delle onde di Rayleigh è circa il 90 % della velocità delle  $V_s$ .

5. La proprietà della dispersività permette il calcolo della curva di dispersione dalla quale è possibile ricavare i parametri fondamentali del modello di terreno in superficie. Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente relazione sono state svolte utilizzando un sismografo DOREMI prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

---

### **3 – INDAGINE SISMICA MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)**

Per le proprietà descritte precedentemente può risultare quindi conveniente l'utilizzo delle onde superficiali per la caratterizzazione di un determinato sito di indagine per stimare il profilo di  $V_s$  dalla velocità delle onde superficiali.

E' stato dimostrato ampiamente che la curva di dispersione delle onde superficiali è influenzata soprattutto dalla velocità delle onde S ma anche dallo spessore di ciascuno strato mentre risultano poco influenti le velocità delle onde P (totalmente nel caso delle onde di Love) e la densità di ciascuno strato.

E' quindi possibile stimare oltre al profilo di velocità delle onde S anche i diversi spessori degli strati.

La registrazione di tali forme d'onda viene effettuata mediante la tecnica MASW, l'acronimo sta per Multichannel Analysis of Surface Waves.

Bisogna precisare subito che la tecnica MASW non si basa solo ed esclusivamente sullo studio delle onde di Rayleigh in quanto anche le onde di Love sono onde superficiali anch'esse soggette al fenomeno della dispersione.

In questa specifica tecnica verranno però prese in considerazione solo le onde di Rayleigh.

Come è stato descritto in precedenza le onde di Rayleigh sono caratterizzate da una polarizzazione sul piano verticale e sono quindi registrabili lungo le due componenti verticale e radiale quindi possono essere registrate sia tramite geofoni verticali (per quanto riguarda la componente verticale) sia tramite geofoni orizzontali posti parallelamente allo stendimento (per quanto riguarda la registrazione della componente radiale).

Il tipo di sorgente dovrà comunque essere di tipo verticale per entrambe le componenti.

Questa precisazione è stata fatta perché molto spesso il solo utilizzo della componente verticale e/o orizzontale delle onde di Rayleigh, come unica tecnica MASW, senza avere dati geologici di base su un determinato sito, può non essere sufficiente per una corretta interpretazione dei diversi modi e la successiva inversione dei dati potrebbe dare qualche problematica.

#### **LIMITAZIONI DEL METODO MASW**

In generale è bene precisare che il metodo MASW presenta alcune limitazioni tra le quali:

1. Il modello di terreno deve essere a strati piani e paralleli viceversa la prova MASW perderebbe di attendibilità.
2. In riferimento a quanto previsto al precedente punto 1, non ci devono essere significative variazioni laterali del terreno.
3. La quota topografica dello stendimento dei geofoni non deve avere variazioni consistenti.

---

4. Le caratteristiche elastiche del terreno possono in alcuni casi attenuare completamente le onde superficiali rendendo quindi il metodo MASW inutilizzabile.

5. La profondità di investigazione è dipendente anche dalla lunghezza dello stendimento.

6. Poiché il profilo  $V_s$  finale viene calcolato mediante un processo di inversione, è possibile pervenire ad una curva di dispersione non univoca, ovvero quest'ultima soddisfa più modelli differenti di terreno (vedere seguito).

I metodi di prospezione sismica **MASW** (Multichannel Analysis of Surface Waves) quindi, consentono di ottenere un modello verticale delle VS a partire dalle modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare le onde di Rayleigh, e non attraverso quelle di volume come invece accade per i metodi propri della sismica più tradizionale.

In particolare osservando le caratteristiche dispersive del sito e applicando opportune tecniche di inversione è possibile stimare alcune proprietà meccaniche del sottosuolo in condizioni di sollecitazione sismica.

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più una 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 sovrapposti con caratteristiche elastiche lineari.

Per ogni strato si devono definire quattro parametri: lo spessore  $H$  dello strato, ad esclusione dell'ultimo considerato infinito; la densità  $\rho$  dello strato; la velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  all'interno dello strato; il coefficiente di Poisson.

A partire dai parametri del sottosuolo è quindi possibile ricavare le proprietà dispersive delle onde di Rayleigh, per il sito in esame.

Quanto detto rappresenta il problema diretto: quello cioè che a partire dalla conoscenza delle caratteristiche del terreno permette di descrivere la dispersione delle onde di Rayleigh.

Nella prospezione occorre invece affrontare il problema inverso: a partire dalla curva di dispersione rilevata, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri meccanici e sismici.

La procedura utilizzata può essere suddivisa in tre fasi di seguito descritte in maniera semplificata:

**Acquisizione:** registrazione e osservazione dei dati sismici “grezzi” contenenti le onde di Rayleigh per un intervallo sufficientemente ampio di frequenze;

**Processing:** trattamento dei dati attraverso filtraggio e altre tecniche finalizzate all'estrazione delle caratteristiche di dispersione, in particolare espresse come velocità di fase in funzione della frequenza (Spettro FP) e operazione di *Picking* della Curva di dispersione ottenuta;

**Inversione:** uso di un modello del terreno che permette di ricavare un profilo monodimensionale della velocità delle onde S ed altri parametri in funzione della profondità riconducibile col minor scarto di errore possibile al *Picking* della Curva di dispersione sperimentale ottenuta.

### 3.1 – ACQUISIZIONE DEI DATI MASW

Le analisi della dispersione delle onde superficiali partono dall'acquisizione dei dati con una geometria di tipo off-end ovvero lo stendimento dei geofoni si trova allineato da una stessa parte rispetto alla sorgente (Fig. 6) oppure split-spread quando invece la sorgente è posta all'interno dello stendimento di geofoni.

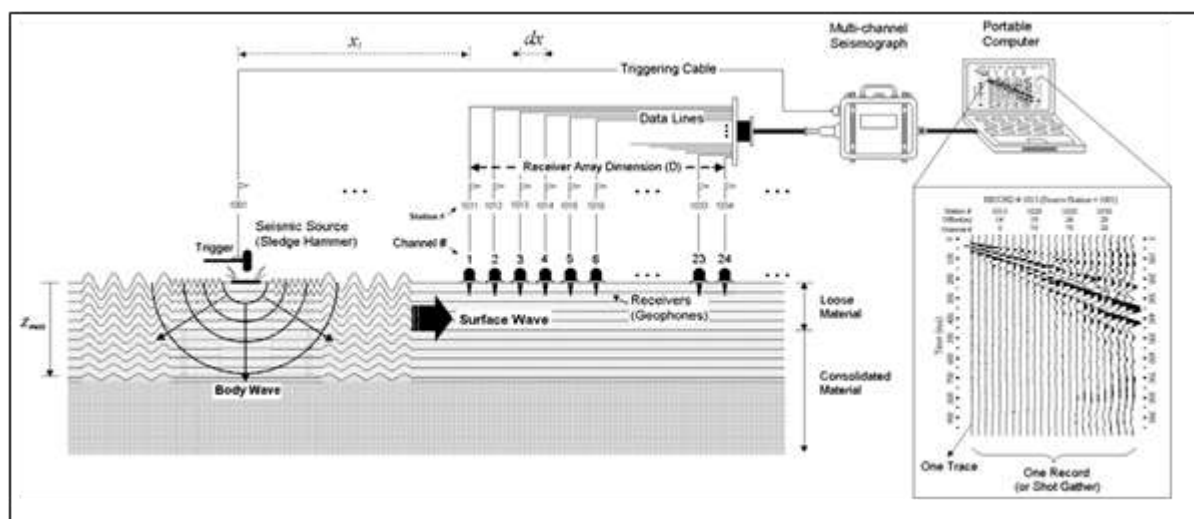


Fig. 6 - Schema di acquisizione delle Onde Superficiali (Fonte immagine [www.kgs.ku.edu](http://www.kgs.ku.edu)).

---

La strumentazione necessaria deve comprendere:

- Sismografo e suoi componenti (Cavi, Trigger, Sistema di acquisizione dati e inversione)
- Geofoni verticali e orizzontali
- Sorgente: martello, grave in caduta libera o fucile sismico
- Piastra per la battuta o traversina
- Appositi supporti per ciascun geofono in caso di presenza di asfalto o roccia

### **3.1.1 – PARAMETRI DI ACQUISIZIONE TEORICI ED UTILIZZATI**

Ecco nel dettaglio i vari parametri necessari per un'acquisizione dati MASW:

#### **1- Sorgente**

Il tipo di sorgente utilizzata è stato di tipo verticale (martellata).

Qualora la registrazione fosse risultata problematica a causa della distanza e/o dell'attenuazione intrinseca del terreno è stato aumentato il numero di stack (ovvero il numero di colpi per registrazione). Ciò in generale tende a migliorare il rapporto segnale/rumore, la qualità delle registrazioni e quindi degli spettri di velocità su cui si andrà a fare il picking.

#### **2 - Lunghezza dello stendimento Array Dimension (D)**

Lo stendimento, in teoria, deve avere la lunghezza (D) maggiore possibile (in base alla disponibilità di spazio e di geofoni) in quanto dalla sua lunghezza derivano le frequenze più basse registrabili ( $\lambda_{\max}$ ) e quindi di conseguenza, come descritto in precedenza, una maggiore profondità di investigazione (Z).

La sua lunghezza non deve comunque essere superiore a 46 m (la distanza tra geofoni deve essere pari a 2 m per un array di 24 geofoni). In caso di utilizzo di più geofoni possono essere comunque possibili anche lunghezze superiori.

Dalla lunghezza dello stendimento dipende inoltre la risoluzione dei vari spettri, maggiore è la lunghezza e maggiore è la risoluzione. Di conseguenza sarà più facile effettuare l'operazione di picking.

In prima approssimazione quindi, sempre in via teorica,  $D \approx Z \approx \lambda_{\max}$  dove  $\lambda_{\max}$  è la lunghezza d'onda massima misurata (corrispondente alla minima frequenza).

#### **3 – Distanza tra i geofoni (dx)**

Dipende molto dal numero di geofoni (in questo caso 24), dalla lunghezza dello stendimento e quindi dalla disponibilità di spazio. Utilizzando 24 geofoni la dx deve essere massimo di 2 m.

A maggior ragione se venisse utilizzato lo spettro f-k per l'individuazione dei modi delle onde superficiali deve essere comunque sempre utilizzata una dx piccola (2 m massimo).

---

Questo a causa del problema dell'*aliasing spaziale* ovvero la non sufficientemente ridotta distanza tra geofoni non consente di campionare a sufficienza i segnali a più alta frequenza.

Tale problema si presenta qualsiasi spettro si utilizzi, ma nel caso  $f - v$  è più facilmente individuabile e non compromette l'interpretazione del dato rispetto allo spettro  $f - k$ .

Dalla distanza tra i geofoni dipendono inoltre le frequenze più alte registrabili quindi le informazioni inerenti gli strati più superficiali.

Una  $dx$  troppo grande inoltre (utilizzando 24 geofoni) ridurrebbe la “ridondanza”, cioè quel fenomeno che permette di registrare la stessa frequenza da più stazioni e consente di avere un migliore rapporto segnale/rumore e quindi una migliore definizione della curva di dispersione ottimale.

In prima approssimazione quindi, in questo caso, la profondità minima di esplorazione  $z \approx dx \approx \lambda_{\min}$ , dove  $\lambda_{\min}$  è la lunghezza d'onda minima (massima frequenza).

#### 4 - Distanza sorgente-primo ricevitore (offset minimo $X_1$ )

Per quanto riguarda l'offset minimo bisogna tenere in considerazione il fatto che una sorgente troppo vicina causa problemi di *near offset* e non si rispetta la condizione di onda piana in quanto l'onda generata ha un fronte sferico.

La teoria prevede che un'onda può considerarsi piana ad una distanza circa la metà della massima lunghezza d'onda desiderata (se vogliamo ad esempio avere un profilo che interessa i primi 30 metri di profondità si deve considerare una lunghezza d'onda di circa 60-70 metri, quindi un offset minimo di 30-40 m).

In pratica molto spesso ciò non è possibile, ma buoni risultati si possono ottenere anche ad offset minimi inferiori.

E' necessario quindi effettuare registrazioni con diversi offset in modo da poter valutare, nella fase di elaborazione dati, diversi spettri di velocità derivanti da diverse configurazioni sorgente-ricevitori ed ottenere dal loro confronto un quadro più completo che agevoli il riconoscimento dei modi delle onde di Rayleigh effettivamente presenti, non essendo possibile stabilire a priori, in campagna, quale sia la migliore configurazione.

In questo modo si può avere inoltre un riscontro sulla conformazione 1D del sottosuolo (presenza o meno di variazioni laterali) ma anche risultati che interessino porzioni di terreno sempre più profonde.

#### 5 - Tipo di geofoni

E' raccomandato per questo tipo di registrazioni l'utilizzo di geofoni in grado di registrare basse frequenze (4.5 Hz o inferiore).

---

I geofoni verticali vengono utilizzati per la misura della componente verticale delle onde di Rayleigh mentre quelli orizzontali, eventualmente, per la componente radiale delle onde di Rayleigh.

I geofoni vengono posizionati in maniera ben solidale al terreno; in presenza di roccia o di asfalto si utilizzano gli appositi supporti. Il numero di geofoni utilizzati in questa campagna è di 24.

#### 6 – Intervallo di campionamento (dt)

Per quanto riguarda le onde superficiali si parla di onde che hanno un range di frequenze teoricamente <100 Hz per questo motivo è sufficiente utilizzare un passo di campionamento molto ampio (anche 4 ms).

#### 7 – Tempo di registrazione

Il tempo di registrazione dipende molto dal tipo di terreno. Se omogeneo o quasi il fenomeno della dispersione non è molto accentuato, se invece è molto eterogeneo il “ventaglio” della dispersione è molto ampio.

Pertanto la lunghezza della registrazione deve essere di almeno 1-2 secondi.

Nella tabella successiva vengono riassunti i parametri indicativi appena descritti:

SORGENTE	Onde di Rayleigh: verticale (martellata)
LUNGHEZZA DELLO STENDIMENTO (D)	46 metri
DISTANZA TRA GEOFONI (dx)	2 m
OFFSET MINIMO (X <sub>1</sub> )	≈ dx e ≈ D/2
NUMERO DI SCOPPI	2
TIPO DI GEOFONI	4.5 Hz (verticali per la componente verticale delle onde di Rayleigh)
NUMERO DI GEOFONI	24
TEMPO DI REGISTRAZIONE	1-2 secondi
INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO (dt)	0.5 – 2 ms
NOTE	Le tracce non sono state filtrate e è stato aggiunto AGC (Automatic Gain Control)

---

### **3.1.2 – STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**

Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente campagna geofisica sono state svolte utilizzando un sismografo *DOREMI* prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

Classe strumentale: sismografo multicanale per geofisica

Topologia: rete differenziale RS485 half-duplex multipunto

Lunghezza max rete: virtualmente illimitata con l'uso di ripetitori

N. max canali per tratta: 255

Dimensioni elemento: 80x55x18 mm

Peso: 250 g (per elemento con cavo di 5 metri)

Cavo: per geofisica 1x2x0.5 + 1x2x0.25 twisted pair schermato

Memoria: 60 kBytes (30000 campioni)

Frequenze selezionabili: da 500 a 20000 Hz (passi di campionamento da 2 a 0.05 ms)

Convertitore: tipo SAR a 16 bit (96 dB)

Amplificatore: ultra-low noise con ingresso differenziale

Banda passante: 2Hz - 200Hz

Reiezione modo comune: >80dB

Diafonia (crosstalk): zero, la trasmissione è digitale

Dinamica del sistema Risoluzione: 7.6  $\mu$ V @ 27dB; 0.076  $\mu$ V @ 60dB

Dinamica di base: 96dB (16 bit) S/N ratio fra 0.5 e 30Hz: >94dB (> 150dB con l'uso del PGA)

Alimentazione: batteria ricaricabile interna operativa 10-15Vdc

Consumo di energia: Interfaccia 80 mA, canale 30mA per una stringa da 12 canali: < 500mA

### **3.1.3 – ESECUZIONE INDAGINE MASW**

La geometria di acquisizione utilizzata è indicata nello schema sottostante.

E' bene precisare che una geometria di acquisizione "fissa" non esiste, poiché questa dipende dalle singole caratteristiche fisiche di ciascun sito indagato.

La geometria proposta, compatibilmente con le condizioni logistico-morfologiche, rappresenta il giusto compromesso tra pratica e teoria.

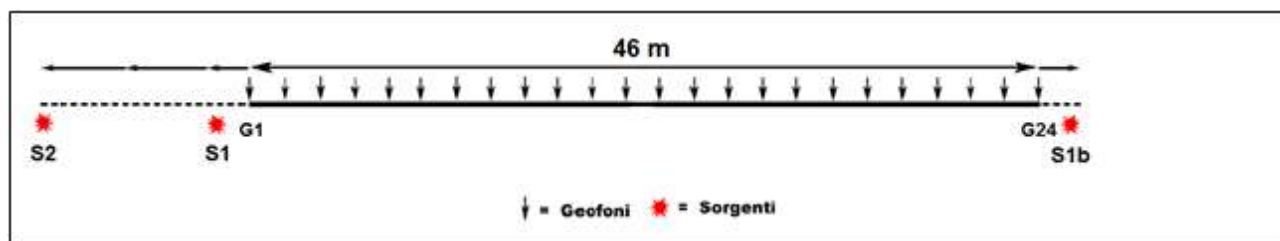


Fig. 7 - Geometria di acquisizione massima per le onde superficiali utilizzando 24 geofoni e  $dx=2$ .

S1: a distanza adeguata da G1.

S2: a distanza  $D/2$  da G1 pari alla semi lunghezza dell'array di geofoni (D).

S1b: a distanza da G24 speculare rispetto a S1

La scelta di utilizzare due scoppi S1 e S2 di cui quest'ultimo a distanza, ove possibile, pari a  $D/2$  è stata fatta per i seguenti motivi:

- Scoppi posti a distanza considerevole permettono di mettere in evidenza tutto il range di frequenze ottenibile dalla sorgente utilizzata, dalle più alte (S1) a quelle più basse (S2);
- I modi superiori, se presenti, sono maggiormente individuabili e discriminabili da quello fondamentale, il che in caso contrario porterebbe ad una interpretazione errata a seguito della fase di inversione dei dati;
- La similarità tra i due spettri F-V ricavabili dai due scoppi permette di stabilire se siamo in condizione di piani paralleli e/o assenza di variazioni laterali significative;
- In aggiunta al punto precedente, per verificare il parallelismo e l'omogeneità degli strati, in caso non ci sia lo spazio necessario per lo scoppio S2, eventualmente, ove possibile, è buona norma ricorrere ad uno scoppio (S1b) posto nella parte opposta dello stendimento in posizione geometricamente speculare allo scoppio S1.

Una volta stabilita la geometria di acquisizione si passa alla fase di montaggio della strumentazione in campagna.

I cavi sismici vengono stesi lungo la zona di interesse e ad essi vengono collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite.

L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche di tipo P è stata effettuata mediante massa battente da 8 Kg: l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro posto in prossimità della piastra di battuta (trigger), il sistema di acquisizione dati, permettendo così la registrazione ai geofoni della forma d'onda rappresentativa della velocità di spostamento del suolo.

La profondità di investigazione è, in linea teorica come descritto precedentemente, direttamente correlata alla lunghezza del profilo, alla distanza dei punti di energizzazione esterni e soprattutto al contrasto di velocità dei mezzi attraversati.

---

I tempi di arrivo delle onde sismiche nel terreno sono funzione della distanza tra i geofoni, delle caratteristiche meccaniche dei litotipi attraversati e della loro profondità.

### **3.2 – ELABORAZIONE (PROCESSING) E INVERSIONE DEI DATI MASW**

L'analisi della dispersione delle onde superficiali (qualsiasi tipo esse siano) al fine di determinare il profilo delle Vs di un determinato sito è composta da due fasi fondamentali:

- 1 – Determinazione dello spettro di velocità (generalmente nel dominio  $f - v$ ) dal quale vengono determinate le caratteristiche delle onde superficiali quindi le curve di dispersione.
- 2 – l'inversione, ovvero il passaggio dalle curve di inversioni al modello di terreno, dei diversi modi precedentemente individuati (in particolare il modo fondamentale). Una volta registrate le tracce seguendo la metodologia precedentemente descritta si ottiene il dataset dei dati nel dominio  $x - t$  ovvero spazio – tempo. E' chiaramente impossibile lavorare in questo dominio quindi si deve passare al dominio  $f - k$  (frequenze – numeri d'onda) oppure al dominio  $f - v$  (frequenze – velocità) (Fig. 8).

Alcuni punti chiave da tenere in considerazione per il controllo di qualità dei dati sono:

- 1 – La registrazione corretta ben visibile in tutte le tracce.
- 2 – Spettro di velocità chiaro ed interpretabile.
- 3 – Attenzione ai modi superiori se presenti.
- 4 – Utilizzare come modello iniziale i dati geologici e/o i dati forniti dalla sismica a rifrazione. Trattandosi infatti di un problema inverso, la parametrizzazione del modello di riferimento deve essere adeguata rispetto all'informazione effettivamente disponibile (Foti, 2008).
- 5 – La corrispondenza tra curva di dispersione sperimentale e curva di dispersione numerica relativa all'ultima iterazione del processo di inversione, minimizzando gli scarti, deve essere adeguata per tutto il campo di frequenza per il quale sono disponibili informazioni sperimentali (Foti, 2008).
- 6 – In caso di incertezze legate alla NON UNIVOCITA' DELLA SOLUZIONE è necessaria quindi una taratura mediante dati diretti di esplorazione del sottosuolo.

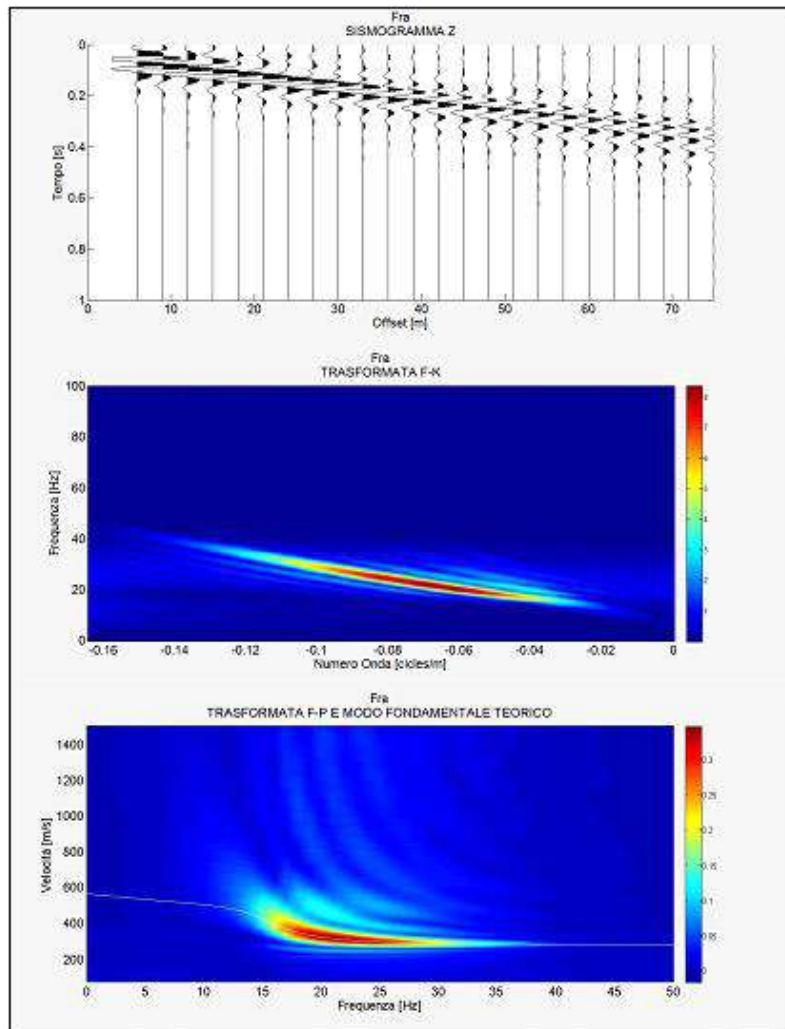


Fig. 8 - Semplice modello preso dalla letteratura composto da due strati a velocità crescente ( $V_p = 650$  e  $1400$  m/s,  $V_s = 300$  e  $600$  m/s, spessore  $h$  fino al semispazio di  $8$  m). Dall'alto al basso si può vedere il sismogramma sintetico (componente verticale), lo spettro f-k e lo spettro f-v (con modo fondamentale teorico).

Una volta calcolato lo spettro  $f-v$  è buona norma verificare la profondità massima raggiunta dall'indagine (Fig. 9) in modo da meglio vincolare il modello da utilizzare nella fase di inversione, dopo di che si entra nella parte più delicata, ovvero il picking, l'individuazione cioè dei diversi modi.

La loro individuazione è quindi soggettiva (di contro all'oggettività dello spettro calcolato) e le scelte che si fanno devono essere ponderate con cura per non inficiare in maniera determinante il processo di inversione.

E' di uso comune interpretare il modo fondamentale come quello a più alta energia.

Questo non è sempre vero. In base infatti alla complessità del sito geologico i modi superiori potrebbero essere molto più energetici o addirittura talmente energetici che nello spettro il modo fondamentale non è visibile.

Non bisogna in maniera categorica basarsi sul picking e inversione automatica che molti software consentono di fare.

E' necessario quindi fare riferimento a prove invasive presenti nelle vicinanze (penetrometrie, carotaggi ecc.). Più dati si hanno a disposizione e maggiore è la probabilità di ricostruire, dalla curva di dispersione, il modello di terreno più veritiero che l'ha determinata, riducendo al minimo così i problemi di non univocità.

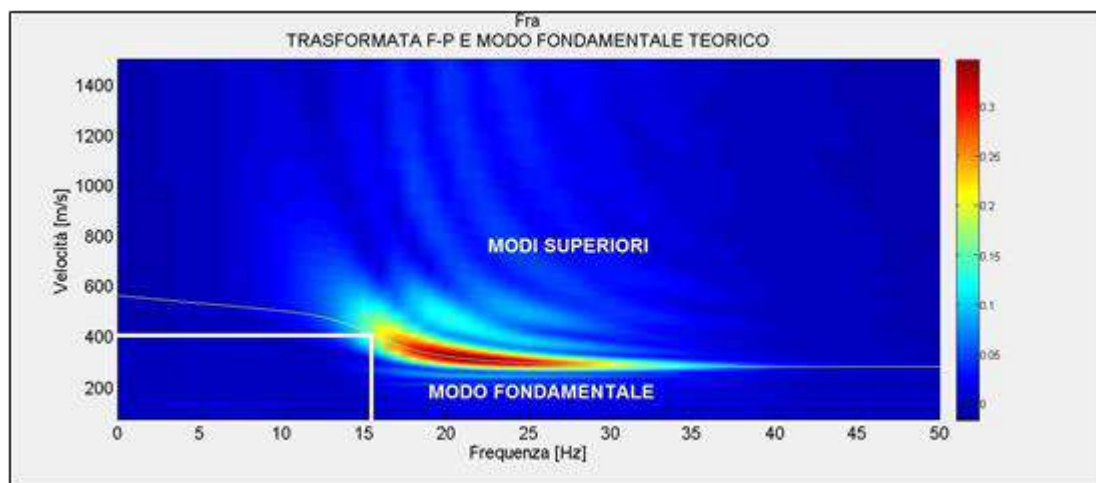


Fig. 9 - Calcolato lo spettro f-v per determinare in maniera approssimata la profondità massima raggiunta dalla prova si prendono le coordinate f-v dell'ultimo punto chiaramente visibile del modo fondamentale e si esegue la seguente formula:  $Z = v / 2f$ . In questo caso  $v = 400$  m/s,  $f = 15.5$  Hz quindi  $Z = 400 / 31 = 12.9$  m

La geometria dello stendimento **MASW** utilizzata è stata di **12 geofoni** intervallati da una distanza di **5 m** (Lunghezza stendimento pari quindi a **55 m**) mentre i parametri di acquisizione sono stati settati in maniera consona a questo tipo di indagine (tempo di registrazione più lungo e bassa frequenza di campionamento).

In base alle indagini sismiche effettuata quindi, è stato possibile ricavare più sequenze sismo-stratigrafiche relativamente all'area d'indagine, con suddivisione in strati aventi analoghe caratteristiche della velocità di propagazione delle onde sismiche trasversali, nei primi 30 metri di profondità ed oltre (**Vs30/Vseq**).

---

#### **4 – COMMENTO AI RISULTATI DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE SVOLTE**

Dalle indagini svolte nell'ambito del presente studio (*vedi Tavola Ubicazione Indagini*) sono emersi i seguenti risultati:

L'indagine **MASW** mostra un andamento crescente delle velocità delle onde di taglio fino alla profondità significativa di 30 m da piano campagna.

La media delle Vs30 è risultata pari a circa **290 m/sec**.

Secondo la recente normativa sismica (**OPCM n.3274** del 20/03/03, **D.M.14/09/05** e succ. **D.M. 22/03/18**) il suolo di fondazione da considerare è di tipo **C**.

In allegato vengono mostrati gli elaborati finali completi.

---

## **5 – BIBLIOGRAFIA**

C. Park, R. Miller, J. Xia. Multichannel Analysis of Surface Waves, *Geophysics*, 64(3), 800-808, 1999.

C. Park, R. Miller, J. Xia and J. Ivanov. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) – active and passive methods, *The Leading Edge* (January 2007).

M. Cercato. Addressing non-uniqueness in linearized multichannel surface wave inversion, *Geophysical Prospecting*, 00, 1-21, 2008.

S. Foti, F. Santucci de Magistris, F. Silvestri, C. Eva. Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva, 2008.

D. Albarello, S. Castellaro. Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola *Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n. 2 – 2011*.

M. Bour\*, D. Fouissac, P. Dominique & C. Martin. On the use of microtremor recordings in seismic microzonation (1998).

SESAME European research project. Guidelines for implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, measurements, processing and interpretation (2004).

## **ALLEGATI**

- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONE INDAGINE SISMICA ATTIVA MASW**
- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI**

- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONE INDAGINE SISMICA ATTIVA MASW**

## **INDAGINE SISMICA ATTIVA MASW**

---

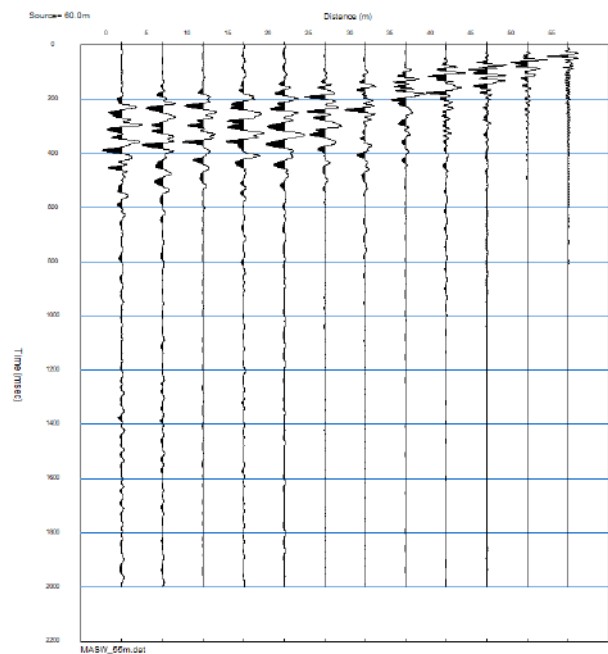
## **Geometria dello stendimento MASW**

Numero Geofoni: 12

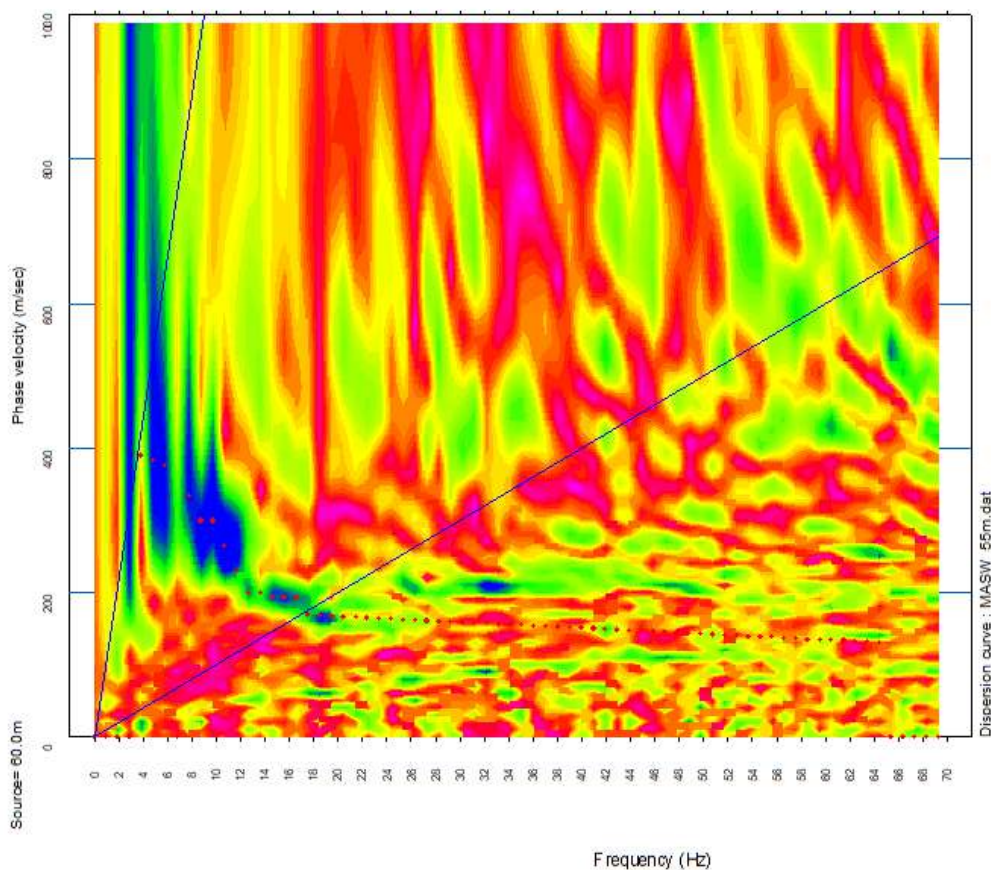
Intervallo (m): 5 m

Lunghezza Stendimento (m): 55 m

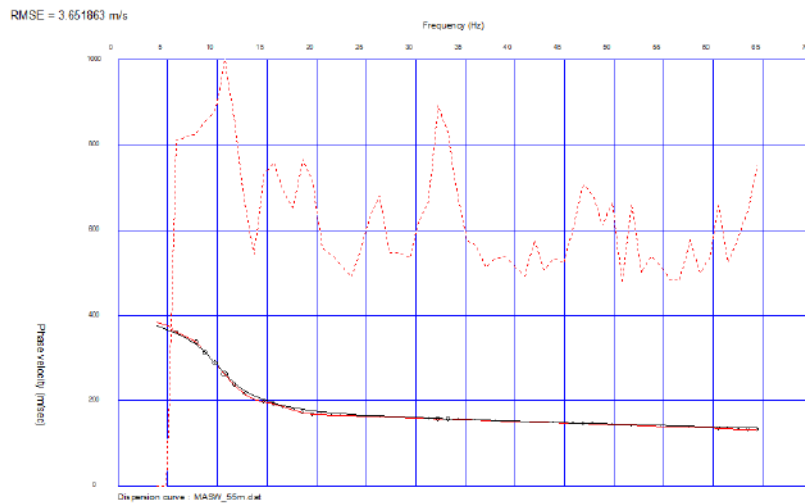
**Sismogramma MASW**



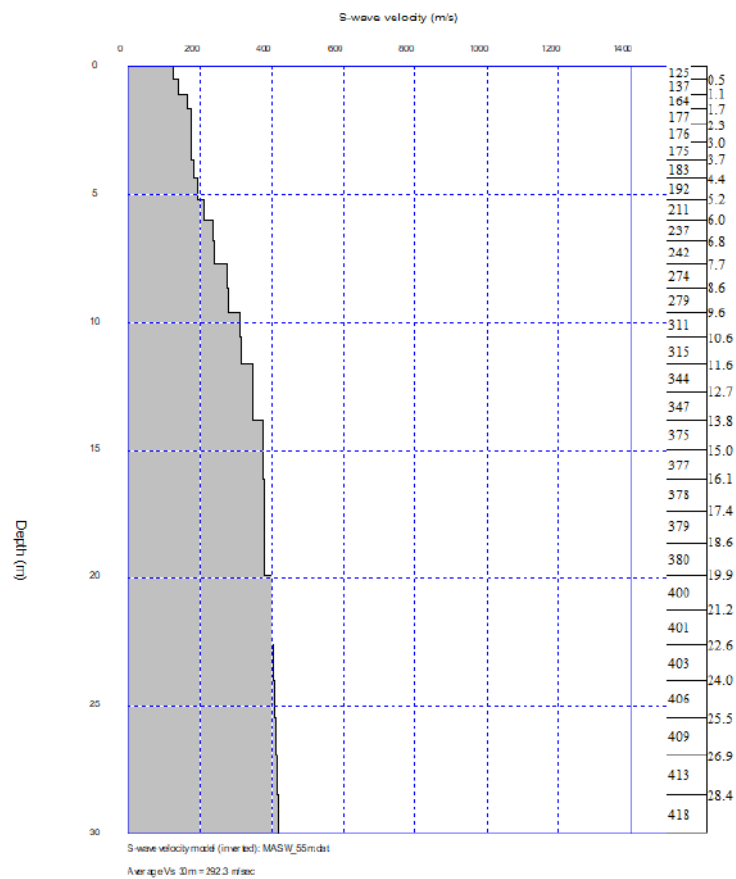
**Curva Dispersione MASW**



## Curva Teorica e Sperimentale MASW



## Profilo Vs Inversione MASW



La media delle Vs30 ricavata dall'inversione MASW è pari a circa **290 m/sec**.

Secondo la recente normativa sismica (**OPCM n.3274** del 20/03/03, **D.M.14/09/05** e succ. **D.M. 22/03/18**), il suolo di fondazione da considerare è di tipo **C**.

---

## **Documentazione Fotografica**



Foto – Indagine sismica attiva MASW

---

- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI**

Scala 1:2.000



**MW** — Prova sismica attiva MASW

Esecutori indagini geofisiche:

Dott. Geol. Cristian Pieroni

Dott. Geol. Francesco Puccetti

