



Spett.le
Società cooperativa a r.l.
Ascensore Via Marco Polo
Via Marco Polo s.n.c.
16136 – Genova (GE)
c.a. dott. Benedetto Montanari

Oggetto: Perizia statica su tunnel pedonale di collegamento all'ascensore di Via Marco Polo

Il sottoscritto ing. Daniele Canale, con studio in Genova Via Corsica 2/1 – iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Genova con numero 7970A – ha ricevuto incarico da codesta spett.le Società di svolgere gli accertamenti necessari alla valutazione delle condizioni statiche di conservazione del tunnel pedonale in oggetto.

Il tunnel mette in collegamento Via Fossato di San Nicolò (adiacente a Piazzetta Giulio Marchi) con la sovrastante Via Marco Polo: su Via Fossato di San Nicolò è infatti presente l'imboccatura del tunnel che con andamento rettilineo e con lieve pendenza a salire giunge fino alla canna ascensore che salendo verticalmente consente lo sbarco dei pedoni sulla sovrastante Via Marco Polo.

Si riporta di seguito una fotografia satellitare tratta da *Google Maps* con l'indicazione dell'asse del tunnel in oggetto (linea bianca in foto).



Foto 1 – Foto satellitare tratta da Google Maps con l'indicazione del tracciato del tunnel in oggetto.

In ottemperanza all'incarico ricevuto lo scrivente ha provveduto a svolgere diversi sopralluoghi in sito.

Un primo sopralluogo è stato svolto in data 19/06/2020; a questo era presente il dott. Montanari in rappresentanza della Committenza e sono state scattate alcune fotografie che sono riportate in *Allegato 1*. Dalle fotografie si può osservare un tunnel pedonale con piedritti verticali e soprastante arco semi-circolare entrambi finiti con intonaco stollato e pavimentazione formata da classiche piastrelle rosse lisce di dimensioni 7.5x15 cm (a meno di una zona cementata ove non sono presenti piastrelle); l'intero tunnel presenta sezione sostanzialmente costante con pavimentazione in lieve pendenza a salire dall'imbocco su Via Fossato di San Nicolò verso la canna ascensore presente sul fondo, luce (distanza tra i piedritti al finito) di circa 2.3 m ed altezza pari a circa 3.00 m. Si riporta di seguito la sezione tipo del tunnel in oggetto.

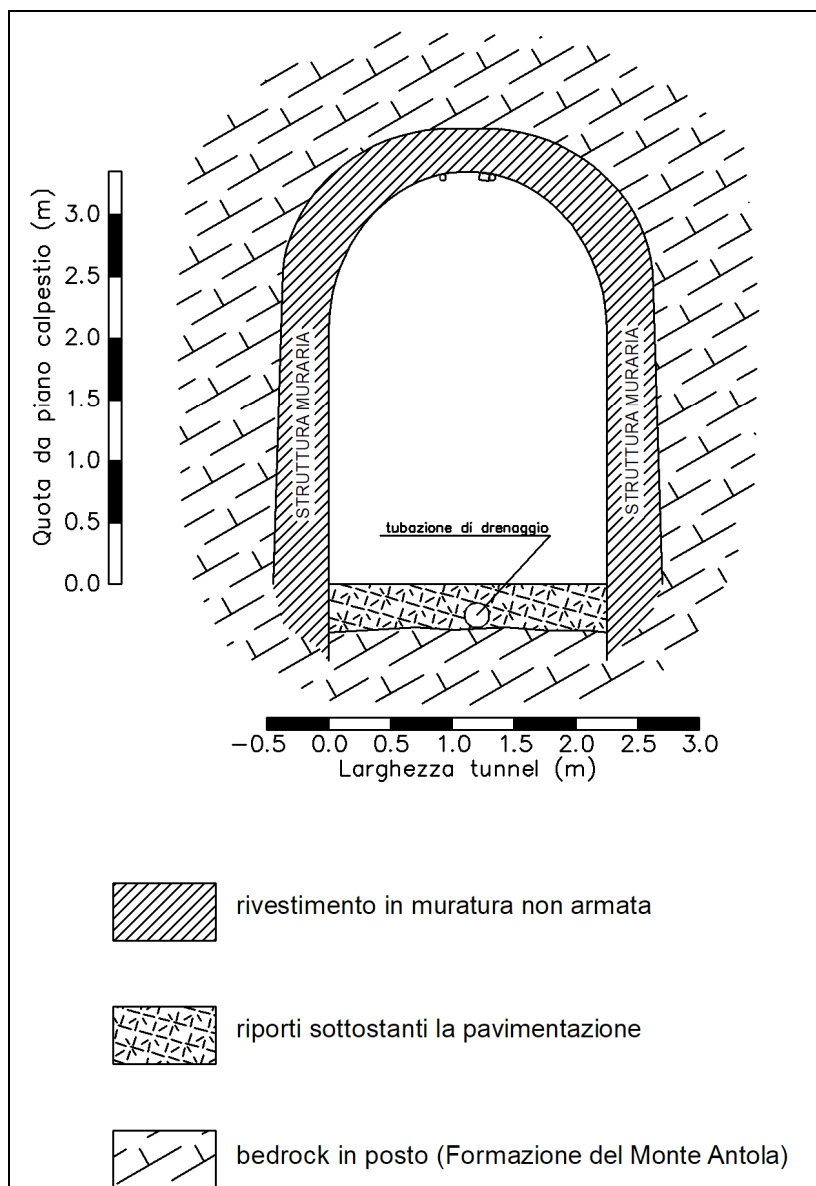


Figura 1 – Sezione tipo del tunnel pedonale in oggetto.

Il tunnel si sviluppa per circa 49 m dall'imboccatura (porta vetrata) fino alla canna ascensore: per la descrizione che seguirà dell'opera si precisa quanto segue:

- si chiamerà lato sinistro il piedritto/parete del tunnel che chi percorre il tunnel dall'imboccatura all'ascensore ha alla propria sinistra;
- si chiamerà lato destro il piedritto/parete opposta;
- lo zero delle progressive è posto in corrispondenza della porta vetrata mentre la progressiva 49 m è in corrispondenza della porta dell'ascensore.

Il tunnel è rettilineo dalla progressiva +0m alla progressiva +42m circa; in corrispondenza di questa esso curva leggermente e progressivamente a destra di circa 10° in pianta.

Nel primo tratto di tunnel, tra le progressive +0m e +5m, dietro al piedritto sinistro è presente un locale ad uso magazzino (vedere Foto 3). Come visibile dalle Foto 2, 3 e 4 in tale tratto iniziale di tunnel sono presenti percolazioni in corrispondenza dei piedritti sinistro e destro del tunnel e della volta, probabilmente dovute all'acqua che filtra dalla sovrastante scalinata che conduce alla stazione della funicolare e dal terreno più superficiale del versante maggiormente permeabile rispetto a quello roccioso presente alle progressive maggiori del tunnel.

Si nota anche (vedere Foto 2) la presenza di una lamiera ad intradosso della volta con due gronde di raccolta dell'acqua percolante dall'alto: dette gronde sono prolungate verso l'interno del tunnel e presentano alla progressiva +4m due pluviali che consentono di indirizzare le acque raccolte nelle due canalette di raccolta acque presenti ai lati del tunnel stesso. Per tutta la lunghezza del tunnel sono infatti presenti due cunette di raccolta acque che, grazie alla pendenza di costruzione del tunnel stesso, consentono la fuoriuscita dell'acqua verso l'esterno.

Proseguendo verso l'interno del tunnel si sono incontrati alcuni punti con percolazioni di acqua dalle pareti maggiormente evidenti: un primo punto in cui erano presenti percolazioni sia sulla parete sinistra che sulla parete destra era posto circa alla progressiva +20m (vedere Foto 5, 6, 7 e 8) mentre un secondo punto era presente alla progressiva +40m sulla parete di sinistra (vedere Foto 9). Dato lo stato di degrado e marcescenza molto avanzato in questo punto lo scrivente ha richiesto alla Committenza che provvedesse a rimuovere l'intonaco ammalorato per poter ispezionare meglio la zona.

Il secondo sopralluogo è stato svolto in data 13/07/2020 dopo che alla progressiva +40m è stato rimosso l'intonaco ammalorato sulla parete di sinistra. Le relative fotografie sono riportate in *Allegato 2*. La rimozione dell'intonaco ha portato alla luce uno **scolo verticale** (indicato nella planimetria in *Allegato 5* come "Tubazione") che è stato probabilmente realizzato al momento della costruzione del tunnel. Esso infatti risulta inciso nella roccia ed era occultato dall'intonaco e da una muratura di tamponamento (vedere Foto 10, 11 e 12); detto scolo raccoglie l'acqua che fuoriesce da una fessura nell'ammasso roccioso, la porta a terra e ne consente l'ingresso in una tubazione che probabilmente corre al piede del tunnel, sotto alla pavimentazione dello stesso. In Foto 13 si nota il pozzetto di raccolta direttamente scavato in roccia e presente al piede dello scolo verticale.

Al fine di poter valutare lo spessore della calotta di calcestruzzo (conglomerato cementizio) rinvenuta durante l'assaggio alla progressiva +40m e probabilmente costituente l'unico elemento strutturale del tunnel, l'eventuale presenza di porzioni di calotta di spessore ridotto e/o di cavità nell'ammasso roccioso o nel terreno retrostante nonché la presenza dell'arco rovescio sotto la pavimentazione del tunnel lo scrivente ha suggerito a codesta spett.le Committenza di provvedere a dare incarico per l'esecuzione di un'indagine Georadar (nel seguito anche *Ground Penetrating Radar* o *GPR*).

L'incarico è stato assegnato al dott. geol. Giorgio Lombardi che in data 13/10/2020 ha provveduto a svolgere l'indagine in sito secondo modalità concordate con lo scrivente (in *Allegato 3* si riportano alcune foto scattate dallo scrivente durante quella campagna di indagini – terzo sopralluogo in sito). L'esito completo della campagna di indagini è riportato nella Relazione "*Campagna di indagine Ground Penetrating Radar*" in *Allegato 6* alla presente relazione a cui si rimanda. Di seguito sono esposte le principali risultanze desunte da tale indagine e dalle ulteriori osservazioni in sito svolte dallo scrivente durante l'ultimo sopralluogo del 09/04/2021 (per le relative fotografie si rimanda all'*Allegato 4*).

Le indagini Georadar hanno coinvolto i due piedritti (sinistro e destro), la calotta e la pavimentazione, sia in senso longitudinale che in senso trasversale. Per via della pendenza originaria del versante, trasversale rispetto all'asse del tunnel, il lato sinistro del tunnel viene definito anche "di monte" mentre quello destra "di valle".

Le linee di indagine orizzontali sulle pareti destra e sinistra sono state 4, poste a circa 0.6m, 1.5m, 2.0m e 2.7/2.8m da terra; quelle trasversali, compatibilmente con gli ingombri presenti, sono state eseguite con passo pari a circa 5m. Infine a pavimento sono state indagate 3 linee longitudinali (una centrale e due laterali) e 17 linee trasversali ubicate in funzione delle anomalie riscontrate nelle linee longitudinali (vedere *Allegato 6* a pag. 6 per la precisa ubicazione).

Gli aspetti di maggior rilievo desunti dalle indagini Georadar sono i seguenti:

- a) non si sono rinvenute opere di sostegno delle pareti e della volta del tunnel (ad esempio centinature metalliche o ferri d'armatura da cemento armato) il che fa presumere che lo scavo per la costruzione del tunnel sia stato eseguito, almeno per la porzione di tunnel più in profondità, in roccia e che la roccia, durante le operazioni di scavo, si autososteneva consentendo il getto di una calotta in calcestruzzo non ramato a semplice protezione dello scavo ma con scarsa valenza statica generale;
- b) la presenza della scalinata di accesso alla stazione della funicolare immediatamente al di sopra del tunnel nel suo tratto iniziale esterno e la presenza di maggiori venute di acqua lasciano presupporre che il primo tratto di tunnel sia stato realizzato a cielo aperto e poi ricoperto, comunque pare evidente che detto primo tratto di tunnel attraversi un terreno dalle caratteristiche geomeccaniche più scadenti avente una maggior permeabilità rispetto all'ammasso roccioso presente più in profondità;
- c) osservando anche le venute di acqua (vedere foto e descrizioni in *Allegato 4* nonché la Tav.3 allegata alla Relazione in *Allegato 6*) queste sono più evidenti sulla volta e sulla parete sinistra (di monte) del tunnel; l'indagine Georadar ha infatti rinvenuto altre "tubazioni" di scolo, specie sulla parete sinistra di monte, oltre a quella rinvenuta manualmente alla progressiva +40m e descritta prima; tali tubazioni sembrano raccordate al piede ad una tubazione longitudinale di raccolta delle acque che le allontana dal tunnel verso l'esterno;
- d) non si sono rinvenute sostanziali cavità tra il calcestruzzo (conglomerato cementizio) della volta ed il retrostante ammasso roccioso a testimonianza che il calcestruzzo è stato gettato direttamente contro roccia; il suo spessore è stato stimato in circa 50 cm al piede dei piedritti, circa 40 cm alla sommità dei piedritti e via via si rastrema sulla volta; osservando la *Foto 14* in *Allegato 2* si notano i segni delle tavole di legno disposte orizzontalmente che erano state impiegate come cassero per il getto del calcestruzzo;
- e) al di sotto del piano di calpestio non pare presente un arco rovescio a chiusura e collegamento dei piedritti del tunnel.

Alla luce dell'esito delle indagini Georadar e sulla base di quanto osservato direttamente in sito si possono trarre le seguenti conclusioni.

CONCLUSIONI

Il tunnel in oggetto è stato scavato con sostegni o a cielo aperto per il primo tratto mentre per il tratto più profondo è stato realizzato scavando direttamente la roccia che si autososteneva e gettando, via via, il rivestimento in conglomerato cementizio non armato a protezione di pareti e volta.

Durante lo scavo del tunnel sono state rinvenute zone di roccia con frequenti discontinuità entro le quali era probabilmente presente circolazione idrica: nei punti di maggiori venute d'acqua sono state predisposte già dall'origine tubazioni di scolo, direttamente scavate in roccia, ed un sistema di tubazioni per la raccolta e l'allontanamento dell'acqua al di sotto della pavimentazione del tunnel.

La struttura di rivestimento del tunnel pare avere buona continuità e discreta costanza di spessore, pari a circa 50 cm alla base dei piedritti e 40 cm in alto. Si evidenzia che, in base a quanto indagato, non risulta presente alcun arco rovescio alla base.

La stessa struttura di rivestimento, nonostante sia a tratti interessata da fenomeni di umidità che si manifestano sulla faccia interna del tunnel, alla luce dell'indagine Georadar pare non presentare condizioni di degrado preoccupante o di ammaloramento significativo.

Le venute d'acqua attraverso il rivestimento del tunnel sono probabilmente il residuo delle venute d'acqua non intercettate dalle tubazioni e manifestano maggior frequenza sul lato sinistro del tunnel in quanto "lato di monte" rispetto alla pendenza del versante. Il tunnel rappresenta infatti esso stesso una sorta di dreno a grande scala nei confronti del substrato roccioso laddove lo stesso intercetta un sistema di circolazione idrica in frattura, manifestando le percolazioni e le macchie di umidità descritte in didascalia delle foto in *Allegato 4*.

Alla luce di quanto sopra riportato, al fine di mitigare gli effetti negativi della continua presenza di acqua a tergo della volta e delle pareti del tunnel **sarebbe utile provvedere alla realizzazione di dreni supplementari sia lungo lato sinistro "di monte" che lungo il lato destro "di valle"** (vedere *Allegato 5*):
lato sinistro (monte): negli intervalli di progressive metriche +3m / +8m (in volta), +16m / +28m (per l'intero sviluppo verticale) e +35m / +42m (soprattutto nel settore centrale)
lato destro (valle): negli intervalli di progressive metriche +6m / +10m (in volta), +16m / +20m (per l'intero sviluppo verticale) e +35m / +42m (soprattutto nel settore centrale).

Si evidenzia inoltre che la presente Perizia Tecnica si riferisce allo stato di conservazione del manufatto visibile ad oggi e che è assolutamente necessario provvedere con cadenza costante (ad esempio ogni 2/3 anni) a ripetere almeno le indagini visive oggi svolte per poter valutare le eventuali modifiche che dovessero presentarsi alla circolazione idrica ed allo stato di conservazione/ammaloramento del manufatto.

Ritenendo di aver compiutamente relazionato in merito alle indagini svolte ed allo stato di conservazione del del manufatto in oggetto si rimette la presente restando a disposizione per ogni chiarimento.

Cordiali saluti.

Genova, 12/04/2021

dott. ing. Daniele Canale



ALLEGATI:

Allegato 1 – Foto scattate il 19/06/2020

Allegato 2 – Foto scattate il 13/07/2020

Allegato 3 – Foto scattate il 13/10/2020

Allegato 4 – Foto scattate il 09/04/2021

Allegato 5 – Planimetria contenente i risultati dell'indagine GPR e le annotazioni relative allo stato di conservazione del manufatto alla data del 09/04/2021

Allegato 6 – Campagna di indagine Ground Penetrating Radar del 13/10/2020

Allegato 1: foto scattate il 19/06/2020



Foto 1 – Imboccatura del tunnel da Via Fossato di San Nicolò (foto del 19/06/2020).



Foto 2 – Primo tratto di tunnel: foto scattata in corrispondenza della progressiva +5m verso l'imboccatura (foto del 19/06/2020).



Foto 3 – Piedritto sinistro del tunnel in corrispondenza dell'imboccatura: si osserva la presenza di un locale (foto del 19/06/2020).



Foto 4 – Piedritto destro del tunnel in corrispondenza dell'imboccatura (foto del 19/06/2020).



Foto 5 – Vista del tunnel circa dalla progressiva +20m verso l'imboccatura (foto del 19/06/2020).



Foto 6 – Vista del tunnel circa dalla progressiva +20m verso l'interno (foto del 19/06/2020).



Foto 7 – Vista della parete sinistra del tunnel circa dalla progressiva +20m (foto del 19/06/2020).



Foto 8 – Vista del piedritto destro del tunnel circa alla progressiva +20m (foto del 19/06/2020).



Foto 9 – Vista del piedritto sinistro del tunnel circa alla progressiva +40m (in fondo si vede l'ascensore) (foto del 19/06/2020).

Allegato 2: foto scattate il 13/07/2020



Foto 10 – *Porzione di intonaco rimosso alla progressiva +40m e scolo verticale rinvenuto (foto del 13/07/2020).*



Foto 11 – *Altra vista dello scolo verticale (foto del 13/07/2020).*



Foto 12 – Dettaglio dello scolo verticale: in basso si nota il pozzetto di raccolta raccordato alla tubazione di allontanamento delle acque (foto del 13/07/2020).



Foto 13 – Vista del pozzetto scavato in roccia. (foto del 13/07/2020).



Foto 14 – Dettaglio della porzione di intonaco rimossa (di spessore decimetrico in alcuni punti): si nota che la parete del tunnel è stata realizzata gettando conglomerato cementizio (non armato) direttamente contro la roccia scavata; si notano nella fotografia i segni orizzontali delle tavole di legno impiegate per il getto del rivestimento (foto del 13/07/2020).

Allegato 3: foto scattate il 13/10/2020



Foto 15 – Foto scattata durante l'esecuzione dell'indagine Ground Penetrating Radar (GPR) in data 13/10/2020.

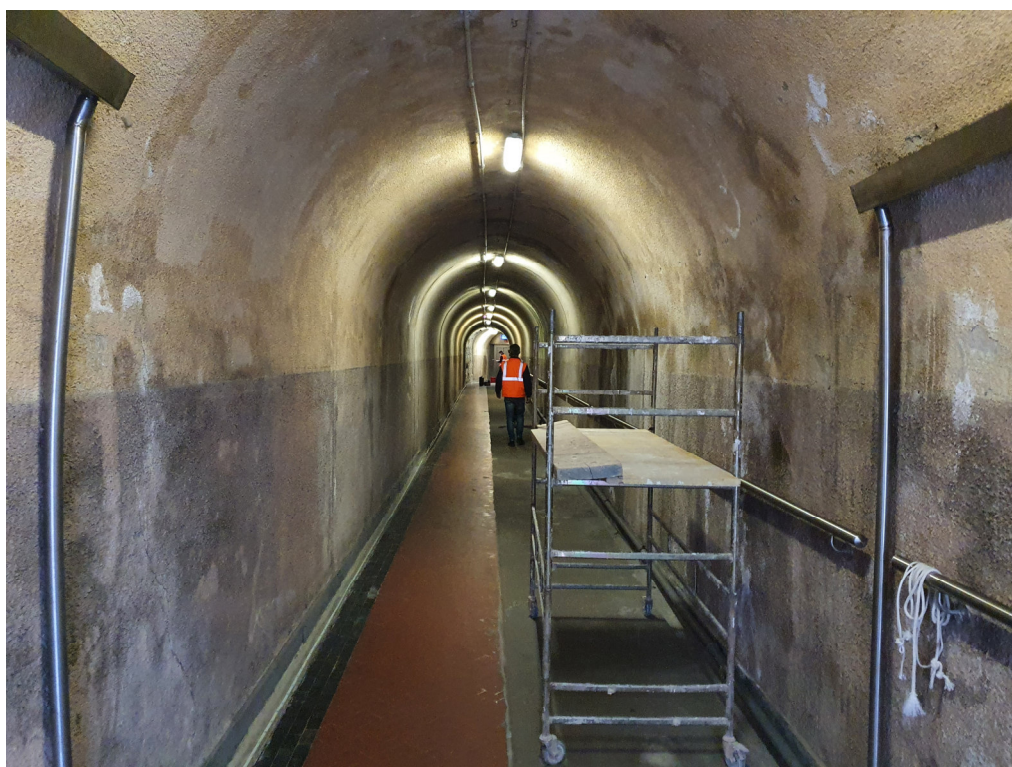


Foto 16 – Altra foto scattata durante l'esecuzione dell'indagine Ground Penetrating Radar (GPR) in data 13/10/2020.

Allegato 4: Foto scattate il 09/04/2021

Nelle didascalie delle foto allegate si rimanda ai punti indicati con le lettere dalla A alla L in *Allegato 5*.



Foto 17 – Lesione orizzontale sulla parete sinistra ad altezza 1.95 m da terra tra le progressive +37m e +45m; specie nel tratto tra +37m e +40m vi è una evidente macchia di umidità (vedere **punto A** in *Allegato 5*).



Foto 18 – Lesione orizzontale sulla parete sinistra ad altezza 1.7 m da terra tra le progressive +31m e +39m; detta lesione si sovrappone parzialmente a quella della foto precedente nelle sezioni tra +37m e +39m; macchie di acqua circa alle progressive +31.5m e +35.5m (vedere **punto B** in *Allegato 5*).



Foto 19 – Macchia di acqua sulla parete sinistra circa alla progressiva +35.5m (vedere **punto B** in Allegato 5).



Foto 20 – Macchia di acqua sulla parete sinistra circa alla progressiva +31.5m (vedere **punto B** in Allegato 5).



Foto 21 – Lesione orizzontale sulla parete destra ad altezza 1.7m tra le progressive +0m e +4m; presenza di molta umidità, efflorescenze saline e muffa (vedere **punto C** in Allegato 5).



Foto 22 – Dettaglio della parete destra di cui alla precedente fotografia (vedere **punto C** in Allegato 5); più avanti, tra le progressive +27m e +32m è presente una lesione orizzontale ad altezza 2.0m da terra senza presenza di venute d'acqua (vedere **punto D** in Allegato 5).



Foto 23 – Macchia di umidità sulla parete sinistra circa tra le progressive +20m e +25m senza la presenza evidente di lesioni.



Foto 24 – Lesione orizzontale sulla parete di destra ad altezza 1.95 m da terra tra le progressive +35m e +45m; la lesione fronteggia quella del punto A e non presenta segni evidenti di venute d'acqua (vedere punto E in Allegato 5).



Foto 25 – Lesione verticale sulla parete destra alla progressiva +9m alta circa 1.7m da terra con macchia di acqua a circa 1m da terra (vedere **punto F** in Allegato 5).



Foto 26 – Lesione verticale ad arco che interessa l'intera sezione della volta; la lesione è presente alla progressiva +15m; in foro si osserva la lesione sulla parete destra (vedere **punto H** in Allegato 5).



Foto 27 – Altra foto della lesione ad arco presente alla progressiva +15m; si notano segni di umidità e efflorescenze saline (vedere **punto H** in Allegato 5).

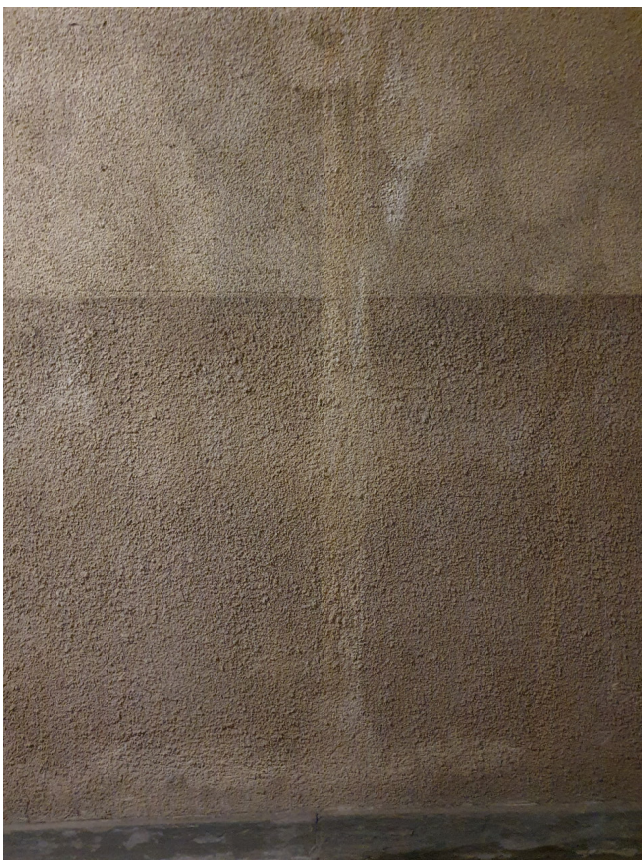


Foto 28 – Altra foto della lesione ad arco presente alla progressiva +15m (vedere **punto H** in Allegato 5).



Foto 29 – Altra foto della lesione ad arco presente alla progressiva +15m; si notano segni di umidità e efflorescenze saline (vedere **punto H** in Allegato 5).



Foto 30 – Lesione sulla volta del tunnel in corrispondenza della progressiva +16m; sono presenti macchie di umidità e efflorescenze saline (vedere **punto I** in Allegato 5).



Foto 31 – Lesione sulla volta del tunnel in corrispondenza della progressiva +19m; è presente una vistosa colatura di acqua, macchie di umidità, efflorescenze saline e muffa generalizzata (vedere **punto L** in Allegato 5).



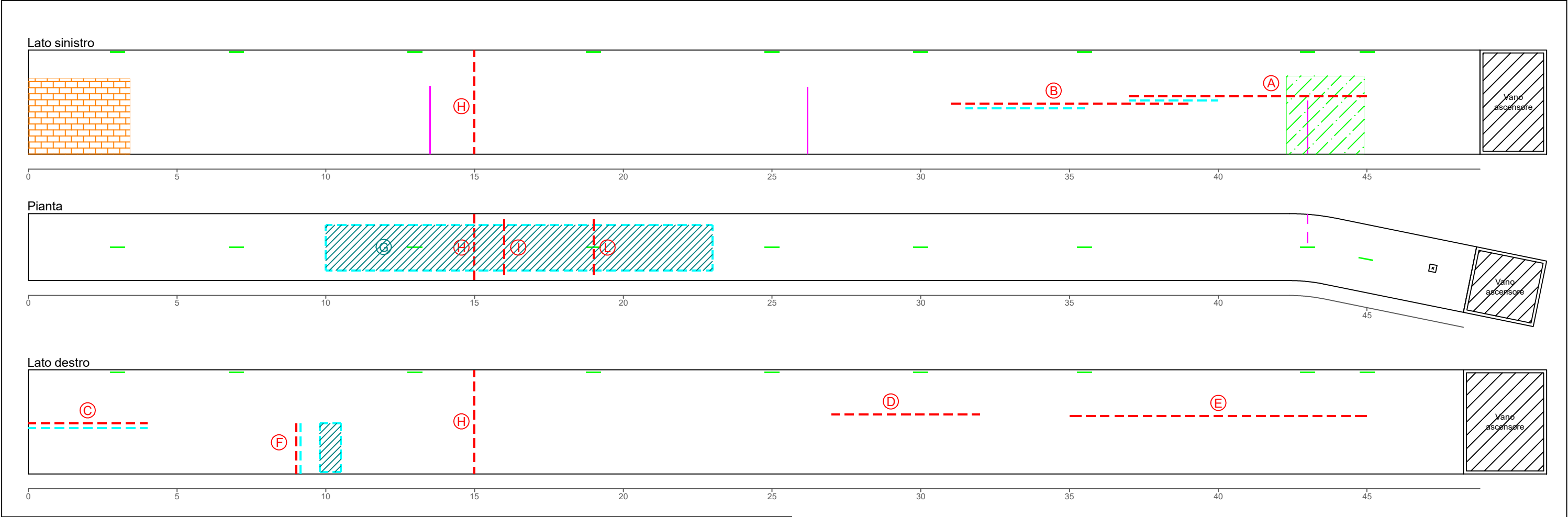
Foto 32 – Macchia di umidità in volta circa alla progressiva +22m con presenza di efflorescenze saline (vedere **punto M** in Allegato 5).



Foto 33 – Presenza di muffa per probabili percolazioni interne di acqua in corrispondenza della crena eseguita per l'installazione del pulsante di chiamata dell'ascensore alla progressiva +24m circa.

Allegato 5: Planimetria contenente i risultati dell'indagine GPR e le annotazioni relative allo stato di conservazione del manufatto alla data del 09/04/2021

ALLEGATO 5: PLANIMETRIA RISULTATI GPR E ANNOTAZIONI STATO CONSERVAZIONE AL 09/04/2021

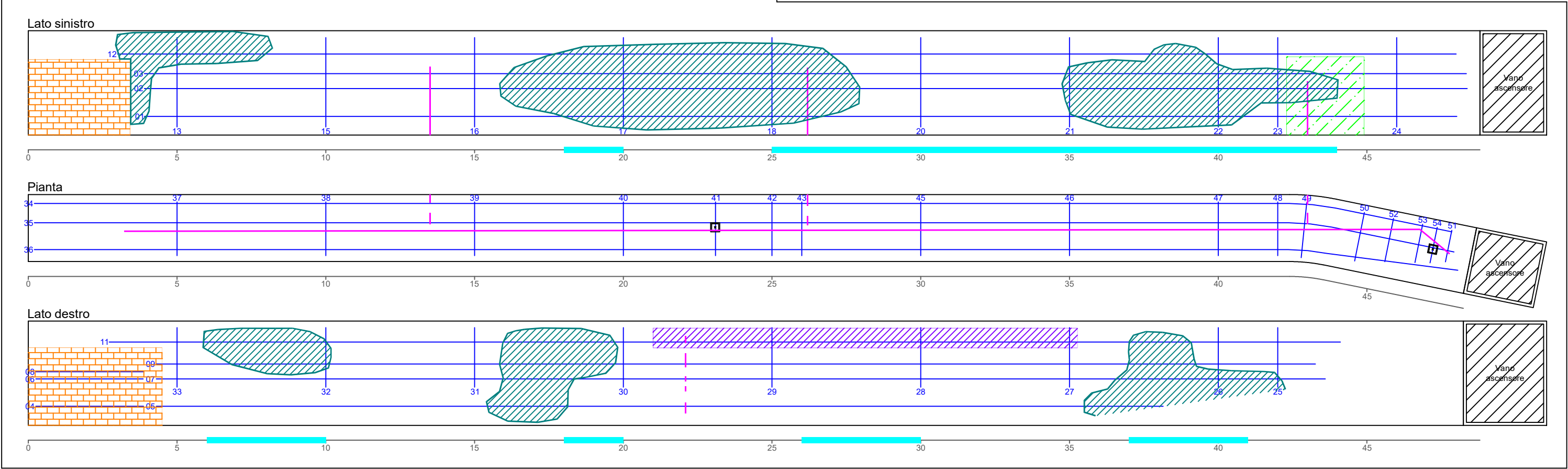


LEGENDA GEORADAR

- Sezioni georadar
- Locali retrostanti
- Assenza di intonaco
- Zone umide - Evidenze superficiali
- Tubazioni
- Tubazioni incerte
- Zone fratturate con probabile circolazione idrica
- Anomalia di incerta attribuzione

LEGENDA STATO CONSERVAZIONE MANUFATTO AL 09-04-2021

- Plafoniere a soffitto
- Locali retrostanti
- Assenza di intonaco
- Tubazioni
- Lesioni
- Manifestazione di acqua dalle lesioni
- Manifestazioni di acqua su intonaco senza lesioni



Allegato 6: Campagna di indagine Ground Penetrating Radar del 13/10/2020

CITTA' METROPOLITANA DI GENOVA

**COMMITTENTE: SOCIETÀ COOPERATIVA A R.L.
"ASCENSORE VIA MARCO POLO "**

**CAMPAGNA DI INDAGINE GROUND PENETRATING RADAR
NELLA GALLERIA PEDONALE DI ACCESSO ALL'ASCENSORE
(PRESSO SAN NICOLA)**



RELAZIONE DI COMMENTO ALLE INDAGINI ESEGUITE ED AI RISULTATI OTTENUTI

Geologo dott. Giorgio Lombardi
Indagini geofisiche - Consulenze geologiche
Via Mongrifone 3/16 – 17100 SAVONA
tel: 338 5086317 e-mail: giorgiolombardi@ymail.com PEC: giorgiolombardi@pec.it
partita IVA: 01584990095

Partner:



INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. TEORIA DELLE INDAGINI GEORADAR.....	3
2.1. RICHIAMI PRELIMINARI SULLE INDAGINI GEORADAR.....	3
2.2. STRUMENTAZIONE GEORADAR.....	5
3. UBICAZIONE DELL'INDAGINE ESEGUITA.....	6
4. GROUND PENETRATING RADAR: STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	7
5. GROUND PENETRATING RADAR: RESTITUZIONE DATI E RISULTATI.....	8

ALLEGATI GRAFICI

Tav. 1: Schema di acquisizione delle linee GPR nel tunnel (punto di osservazione: da sbocco lato valle verso porta ascensore)

Tav. 2: Sezione - tipo del tunnel (punto di osservazione: da sbocco lato valle verso porta ascensore), scala 1:50

Tav. 3: Restituzione grafica dei risultati ottenuti dall'indagine GPR, scala 1:100

Tavv. 4, 5, 6: Radargrammi significativi interpretati

1. INTRODUZIONE

La Società Cooperativa a Responsabilità Limitata "Ascensore Via Marco Polo" con sede in Genova, nella persona dell'attuale Presidente dott. Benedetto Montanari, ha incaricato lo scrivente, partner di Techgea Geophysics srl di Torino, di eseguire una campagna di indagine Ground Penetrating Radar (nel seguito: Georadar o GPR) presso il tunnel pedonale che consente l'accesso all'ascensore con ingresso lato valle in prossimità di San Nicola.

La finalità dell'indagine è duplice: ricostruire in continuo la struttura costruttiva del tunnel ed individuare a tergo l'eventuale presenza di condizioni, a carico dei terreni o dell'ammasso roccioso circostanti, predisponenti fenomeni di richiamo e/o di circolazione idrica che, all'interno del tunnel, si palesano sotto forma di evidenti macchie di umidità.

Lo Strutturista incaricato della progettazione degli interventi di riqualificazione strutturale del tunnel è l'Ing. Daniele Canale, co-titolare dello Studio Montaldo - Canale di Genova.

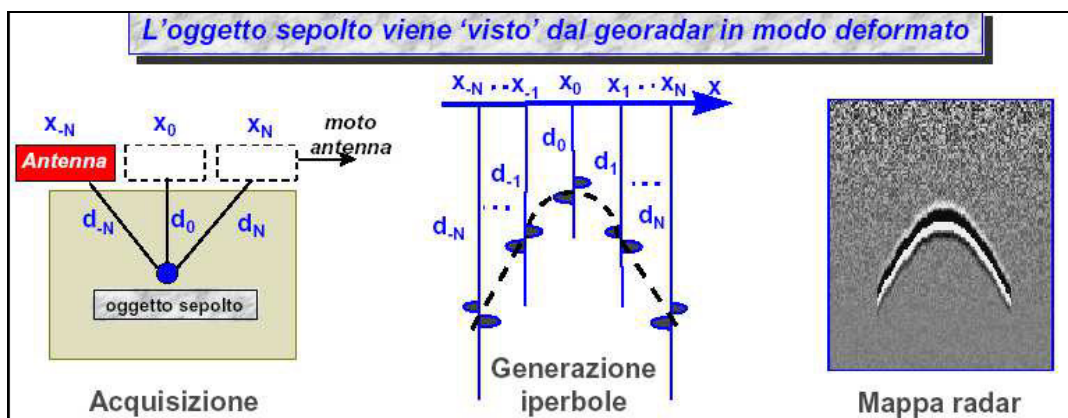
L'indagine è stata condotta in data 13.10.2020.

La metodologia geofisica utilizzata ed i risultati ottenuti sono descritti nelle pagine seguenti.

2. TEORIA DELLE INDAGINI GEORADAR

2.1. RICHIAMI PRELIMINARI SULLE INDAGINI GEORADAR

I rilievi georadar o GPR (Ground Penetrating Radar) si basano sulla risposta di un segnale elettromagnetico di carattere impulsivo ad alta frequenza che viene inviato da un'antenna trasmittente. La presenza di discontinuità di proprietà elettromagnetiche del materiale provoca fenomeni di rifrazione, riflessione e diffrazione dell'energia elettromagnetica incidente su tale discontinuità. In generale, si analizza la risposta dell'onda elettromagnetica che viene riflessa in corrispondenza delle discontinuità del mezzo e che ritorna in superficie, dove viene captata da un'antenna ricevente.



Il principio di funzionamento del georadar differisce da quello del radar convenzionale in quanto il mezzo di trasmissione non è più l'aria ma una roccia o un terreno, la risoluzione è in genere decimetrica o centimetrica, e il campo di misura è limitato ad alcuni metri di profondità.

In geofisica ambientale il georadar è utilizzato per l'individuazione di sottoservizi e strutture antropiche sepolte (cisterne interrato, fondazioni, ecc.); le applicazioni principali del georadar interessano anche le indagini archeologiche e la valutazione dell'integrità strutturale di elementi architettonici.

La velocità di propagazione di un'onda piana smorzata si ricava dalla soluzione dell'equazione d'onda e vale:

$$V_m = c / \left\{ (\epsilon_r \mu_r / 2) \left[(1 + P^2) + 1 \right] \right\}^{1/2}$$

dove c'è la velocità dell'impulso radar nel vuoto ($c \cong 0.3 \text{ m/ns}$), ϵ_r è la costante dielettrica relativa e μ_r è la permeabilità magnetica relativa. P è il fattore di perdita (loss factor) che vale:

$$P = \tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon}$$

ed è un indice del grado di dispersività del mezzo.

Si distingue tra dielettrici poco dispersivi ($P \ll 1$) e buoni conduttori ($P \gg 1$). Quando la frequenza dell'oscillazione del campo elettrico è sufficientemente elevata e la conducibilità del mezzo indagato è bassa, come nel caso di rocce e terreni, la corrente di spostamento prevale rispetto a quella di conduzione, la propagazione del segnale è di tipo ondulatorio e il termine P può considerarsi nullo. Se inoltre si è in presenza di materiali non ferromagnetici ($\mu \approx \mu_0$), la relazione della velocità media si semplifica:

$$v_m = c / \sqrt{\epsilon_r} = 0.3 / \sqrt{\epsilon_r}$$

I valori della costante dielettrica e della velocità di propagazione di alcuni materiali sono riportati nella tabella seguente. La lunghezza d'onda inoltre risulta: $\lambda = v/f$.

Materiale	Velocità di propagazione v [m/ns]	Costante dielettrica ϵ_r
Aria	0.3	1
Acqua dolce	0.033	81
Acqua di mare	0.033	81
Argilla	0.047 - 0.134	5-40
Argillite (bagnata)	0.113	7
Arenaria (bagnata)	0.112	6
Asfalto	0.134 - 0.173	3-5
Calcare	0.1-0.113	7-9
Calcestruzzo	0.055 - 0.112	6-30
Dolomia	0.106 - 0.155	6.8-8
Ghiaccio	0.160	4
Granito	0.160 - 0.120	5-8
PVC	0.173	3
Quarzo	0.145	4.3
Sabbia asciutta	0.12-0.16	3-6
Sabbia satura	0.055-0.06	25-30
Silt	0.055 - 0.134	5-30
Suolo argilloso	0.173	3
Suolo "medio"	0.075	16

Velocità di propagazione e costante dielettrica di alcuni materiali (Reynolds, 1997)

Si dimostra che per piccole lunghezze d'onda ($\lambda < 1$ m) e per mezzi elettricamente poco conduttivi (< 100 mS/m), i fenomeni legati alla propagazione di un'onda elettromagnetica possono essere trattati con la teoria dell'ottica geometrica; sono quindi applicabili all'elaborazione dei dati georadar molti algoritmi della sismica a riflessione.

Si osserva che, a causa dell'elevata costante dielettrica dell'acqua, le velocità variano molto con la saturazione in acqua del materiale e che per rocce e terreni sono in genere comprese tra 0.06 e 0.175 m/ns.

2.2. STRUMENTAZIONE GEORADAR

Il georadar è un dispositivo ad ampia banda che può operare nel campo di frequenza compreso tra 10 e 2500 MHz, ed è caratterizzato dall'emissione di segnali che possono essere assimilati a impulsi aventi in dominio di tempo un'ampiezza τ di qualche ns.

L'intervallo di tempo tra l'impulso di emissione e l'arrivo della riflessione da un bersaglio dipende, dalla profondità del bersaglio e dalla velocità di propagazione del mezzo.

Nella schematizzazione più semplice un sistema georadar si compone di:

- una sorgente impulsiva, con impulsi di $1 \div 2$ ns di durata, ampiezza di picco di 100 V e frequenza di ripetizione degli impulsi variabile da 30 a 100 kHz;
- una o più coppie di antenne con funzione di trasmettitore e ricevitore;
- un convertitore analogico/digitale (8 - 16 bit);
- un sistema di memorizzazione su supporto magnetico dei segnali numerici e dispositivi di elaborazione dei segnali e di interfaccia grafica per la rappresentazione su schermo dei segnali.

La rappresentazione dei dati acquisiti avviene normalmente su un diagramma tempi-ampiezze del segnale ricevuto dal georadar.

Spostando l'antenna lungo una direzione prestabilita e accostando i diversi diagrammi tempi-ampiezze per i successivi segnali, si ottengono delle sezioni, dette *radargrammi*, in cui le ampiezze di riflessione sono rappresentate in funzione del tempo di andata e ritorno (twr) e della posizione dell'antenna lungo il profilo di acquisizione.

Durante l'acquisizione gli impulsi sono ripetuti con frequenza compresa tra 30 e 100 kHz. Le tracce rilevate dall'antenna ricevente sono mediate prima di essere registrate: in tal modo, ogni singola traccia registrata è il risultato di una operazione di *stacking*, che ha come effetto l'aumento del rapporto segnale/rumore.

In acquisizione si opera inoltre impiegando dei filtri in dominio di frequenza (filtri passa banda), con banda passante larga abbastanza da non perdere segnale utile. Successivamente, è possibile procedere ad un ulteriore filtraggio digitale sulle tracce acquisite.

Opportune procedure di elaborazione dei dati consentono di passare dalle sezioni radar "grezze" a immagini che meglio localizzano gli oggetti sepolti.

Un oggetto di forma e dimensioni tali da provocare la diffrazione del segnale, presenta nel radargramma una risposta dalla caratteristica forma a iperbole rovesciata, detta iperbole di diffrazione. Corpi che forniscono tipicamente una simile risposta sono, tra gli altri, le condotte sepolte.

Si ottiene una iperbole perché il fenomeno della diffrazione consente di rilevare un segnale, anche quando l'antenna ricevente non è posta sulla verticale dell'oggetto. Tale segnale percorre una distanza pari a

$$2d = 2\sqrt{x^2 + z^2}$$

dove z è la profondità dell'oggetto sepolto e x la distanza, misurata in superficie, tra l'oggetto e l'antenna. Il tempo di andata e ritorno del segnale diffratto è quindi:

$$t = 2 \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{v}$$

Tale equazione rappresenta, nel piano (x, t) , un'iperbole avente vertice nel punto $(0, 2z/v)$ e asintoti $t(x) = \pm 2x/v$.

Se è possibile individuare un'iperbole di diffrazione nei dati sperimentali, è anche possibile, per via grafica, stimare la profondità dell'oggetto che l'ha prodotta e la velocità di propagazione del mezzo. Si osserva che velocità di propagazione decrescenti, corrispondono a iperboli più strette.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla letteratura specialistica ⁽¹⁾.

3. UBICAZIONE DELL'INDAGINE ESEGUITA

In relazione all'obiettivo di indagine e sotto esplicitate richieste della Committenza e del Progettista Ing. Canale sono state sottoposte ad indagini le murature laterali del tunnel pedonale, la calotta e la pavimentazione..

Le scansioni sono state eseguite con un'antenna bistatica con frequenza centrale di 400 Mhz, adeguata sia per ricostruire la geometria della muratura, sia per individuare eventuali sottoservizi, sia per ottenere informazioni sulle caratteristiche dei materiali a tergo del manufatto.

Presso entrambi i fianchi del tunnel sono state acquisite linee GPR parallele all'asse di sviluppo a differenti altezze dalla pavimentazione. L'acquisizione ha seguito i criteri sintetizzati nei punti seguenti:

- **lato sinistro (monte):** n° 4 linee orizzontali ad altezza dal piano di calpestio del tunnel pari a circa 0.6 m, 1.5 m, 2.0 m, 2.7 m, distribuite in funzione della presenza (in prossimità dello sbocco lato San Nicola) di ostacoli presenti in parete. N° 10 linee verticali sviluppate per l'intera altezza del fianco e della calotta (fino alla linea di illuminazione in sommità), equispaziate 5.0 m (eccetto tra le linee 22 e 23) distribuite in funzione della presenza di ingombri ed ostacoli;
- **lato destro (valle):** n° 4 linee orizzontali ad altezza dal piano di calpestio del tunnel pari a circa 0.6 m, 1.5 m, 2.0 m, 2.8 m, distribuite in funzione della presenza (specie in prossimità dello sbocco lato San Nicola) di ostacoli presenti in parete e del corrimano. N° 9 linee verticali sviluppate per l'intera altezza del fianco (a partire dal corrimano) e della calotta (fino alla linea di alimentazione dei neon in sommità), equispaziate 5.0 m (eccetto tra le linee 25 e 26) distribuite in funzione della presenza di ingombri ed ostacoli;
- **pavimento:** n° 3 linee longitudinali, per l'intero sviluppo del tunnel, centrate ad una distanza della parete sinistra (lato monte) di circa 0.3 m, 0.95 m, 1.85 m. N° 17 linee ortogonali all'asse del tunnel, ubicate in funzione delle anomalie riscontrate dalle linee longitudinali

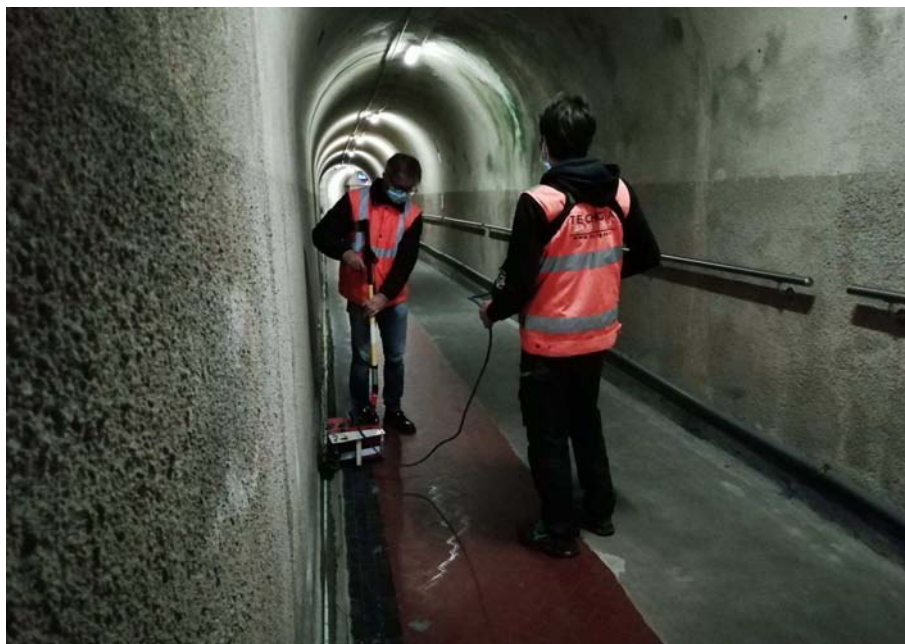
¹() J. L. Davis e A. P. Annan, 1989 : "Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy", Geophysical prospecting 37, pp. 531÷551.

4. GROUND PENETRATING RADAR: STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

E' stata utilizzata l'unità di controllo e acquisizione di segnali radar GSSI SIR 4000 corredata da antenna bistatica da 400 Mhz dotata di survey - wheel (odometro).



Utilizzo dell'antenna a parete



Utilizzo dell'antenna a pavimento

5. GROUND PENETRATING RADAR: RESTITUZIONE DATI E RISULTATI

Negli allegati grafici al presente report tecnico (Tav. 1, 2, 3) si riassumono lo schema di acquisizione ed i risultati ottenuti.

I dati salienti emersi dall'indagine sono qui sintetizzati:

- non sono mai risultate presenti opere di sostegno delle pareti e della volta (centine, armature o simili), il che lascia dedurre che lo scavo sia stato realizzato completamente (salvo, forse, il primissimo tratto allo sbocco verso San Nicola, in cui potrebbe essere stato condotto a cielo aperto) in roccia, e che lo scavo confinato abbia dimostrato nel corso di avanzamento dello scavo capacità di autosostegno;
- la struttura muraria (fianchi e volte - calotta) è in calcestruzzo non armato, e il fatto che non si riesca a seguire in maniera continua l'intradosso della struttura stessa dimostra che l'intradosso stesso è stato realizzato a contatto diretto con l'ammasso roccioso retrostante, che il coefficiente dielettrico della muratura e del bedrock non differiscono sensibilmente e che quindi, spesso, non si generano segnali riflessi sufficientemente potenti per tale ragione;
- è stato comunque possibile apprezzare lo spessore della struttura muraria: esso appare prossimo a 50 cm alla base e si rastrema lievemente verso la volta riducendosi a circa 40 cm (si consideri il possibile errore dovuto al valore non precisamente noto, ma solo ipotizzato, del coefficiente dielettrico dei materiali);
- sono state individuate delle tubazioni verticali aventi molto probabilmente funzione di captazione ed allontanamento dei deflussi provenienti dall'ammasso roccioso. Quest'ultimo, a tratti, appare pervaso da frequenti discontinuità (che generano fitte riflessioni radar), entro le quali è certamente presente circolazione idrica: tali dreni, verosimilmente, sono stati messi in opera nel corso delle varie fasi di avanzamento dello scavo del tunnel, allorché si verificava la presenza di venute idriche significative. Il numero di queste probabili tubazioni di drenaggio è pari a tre sul lato sinistro (lato monte), mentre presso il destro (lato valle) ne risulta probabilmente presente una sola (e non chiaramente visibile al radar): il tunnel svolge funzione di "dreno" a grande scala ed intercetta, evidentemente, un sistema di circolazione idrica in frattura che segue la direzione di immersione del versante. Di conseguenza l'entità delle venute idriche risulta inevitabilmente più ingente presso il lato di monte dello scavo;
- tutti i drenaggi verticali individuati sul lato sinistro (monte) sono molto probabilmente raccordati, al di sotto della pavimentazione del tunnel, ad una tubazione longitudinale di raccolta che risulta inequivocabilmente presente circa al centro del tunnel per l'intero sviluppo dello stesso. Non risulta presente la medesima situazione di collegamento in corrispondenza dell'unico probabile dreno verticale individuato presso la parete di destra (valle), sebbene non si possa escludere che la tubazione di raccordo sia presente ma non visibile al radar;
- le venute idriche sono certamente localizzate in settori di ammasso roccioso caratterizzati da presenza di discontinuità maggiormente fitte e pervasive, probabilmente conseguenti a disturbi tettonici a piccola - media scala;
- la muratura di confinamento della sezione del tunnel, per quanto a tratti interessata da fenomeni di umidità che si evidenziano all'estradosso, non presenta all'analisi GPR condizioni di preoccupante degrado o ammaloramento. Si delegano in ogni caso allo Strutturista incaricato i dovuti approfondimenti in merito;

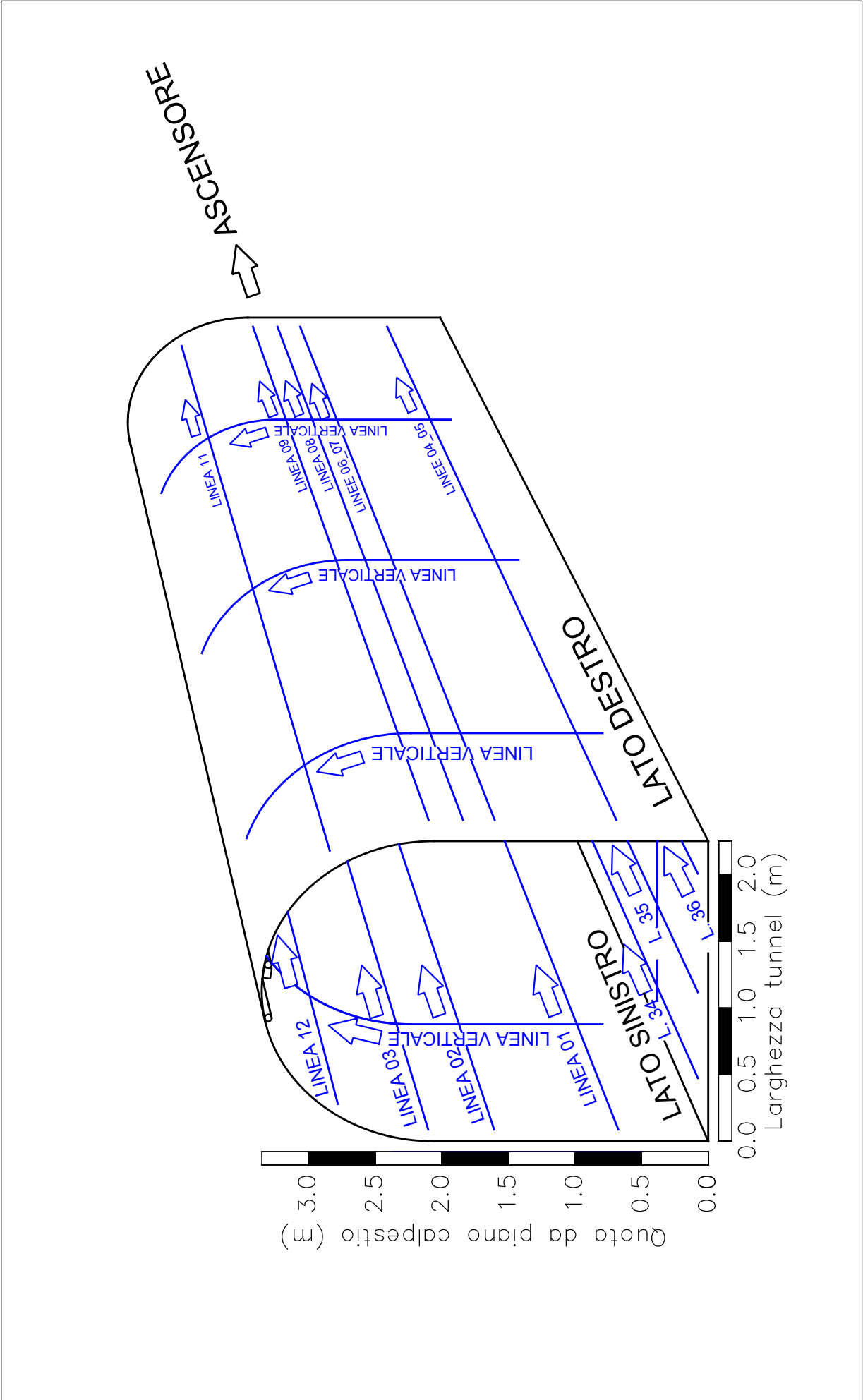
- al di sotto del piano di calpestio interno al tunnel non si evidenzia la presenza di arco rovescio: immediatamente al di sotto della quota di posa della tubazione di raccolta delle acque assiale al tunnel si evidenziano i tipici segnali di riflessione a carico dell'ammasso roccioso (fratture, discontinuità...) presenti anche a tergo delle pareti;
- sarebbe sicuramente utile provvedere alla realizzazione di dreni supplementari, sul lato sinistro (monte) negli intervalli di progressive metriche (si rimanda agli allegati grafici) 3.0 - 8.0 (in volta), 16.0 - 28.0 (per l'intero sviluppo verticale), 35.0 - 42.0 (soprattutto nel settore centrale), e sul lato destro (valle) negli intervalli di progressive metriche 6.0 - 10.0 (in volta), 16.0 - 20.0 (per l'intero sviluppo verticale), 35.0 - 42.0 (soprattutto nel settore centrale).

Savona, 27.10.2020

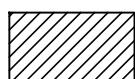
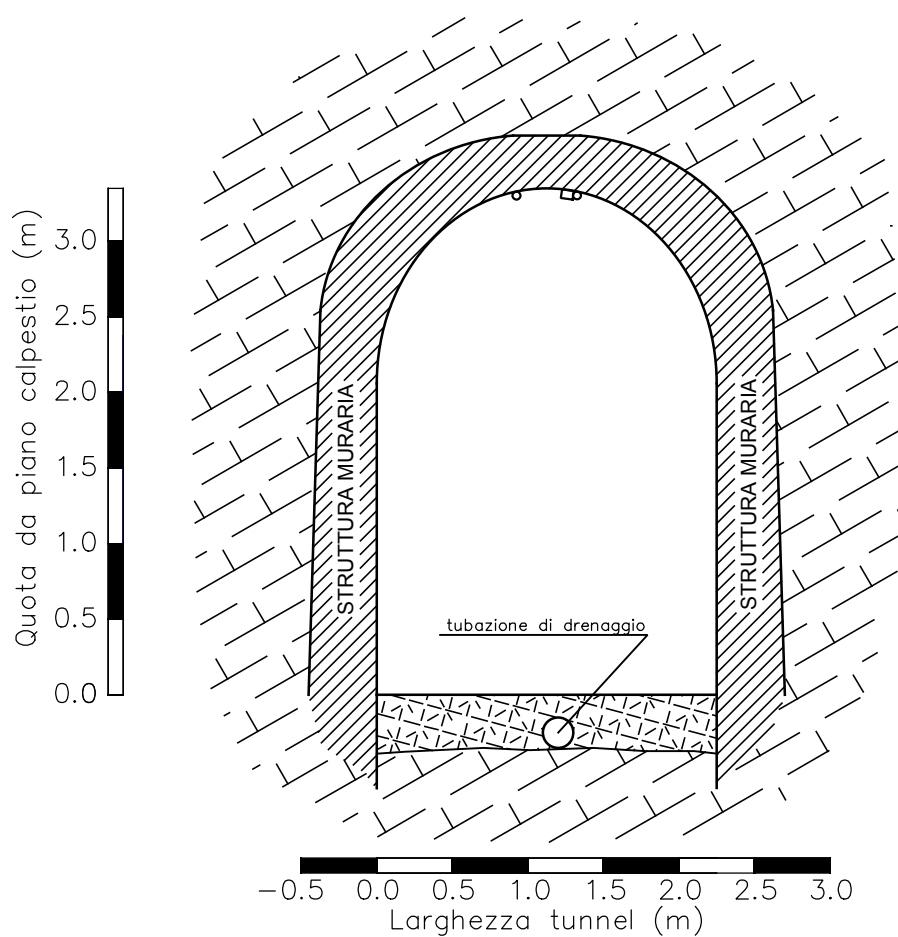
Geologo dott. Giorgio Lombardi, partner Techgea Geophysics



SCHEMA DI ACQUISIZIONE DELLE LINEE GPR NEL TUNNEL (PUNTO DI OSSERVAZIONE: DA
SBOCCO LATO VALLE VERSO PORTA ASCENSORE)



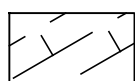
SEZIONE-TIPO DEL TUNNEL (PUNTO DI OSSERVAZIONE: DA SBOCCO LATO VALLE VERSO PORTA ASCENSORE), SCALA 1:50



rivestimento in muratura non armata



riporti sottostanti la pavimentazione



bedrock in posto (Formazione del Monte Antola)

RESTITUZIONE GRAFICA DEI RISULTATI OTTENUTI DALL'INDAGINE GPR, SCALA 1:100

Legenda

- Sezioni georadar

Locali retrostanti

Assenza di intonaco

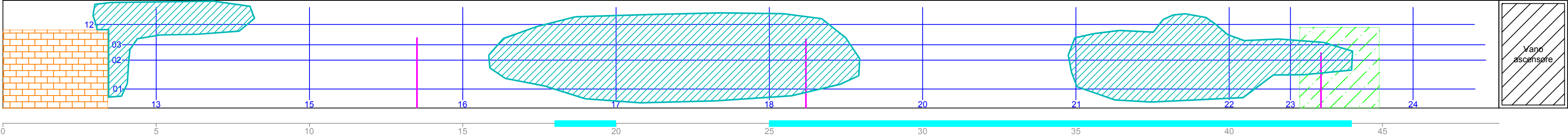
Zone umide - Evidenze superficiali
- Tubazioni

Tubazioni incerte

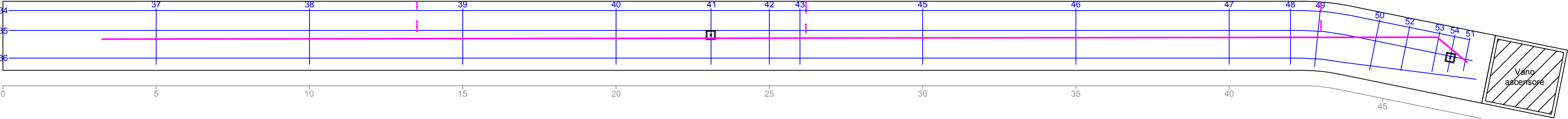
Zone fratturate con probabile circolazione idrica

Anomalia di incerta attribuzione

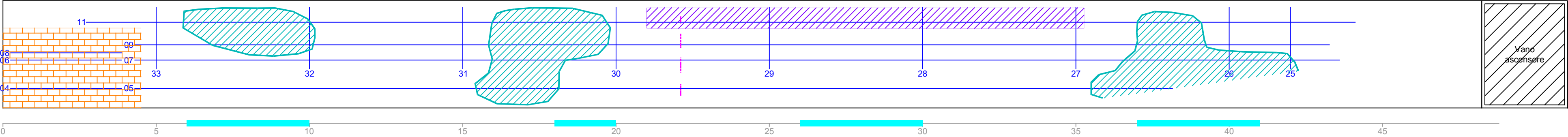
Lato sinistro



Pianta

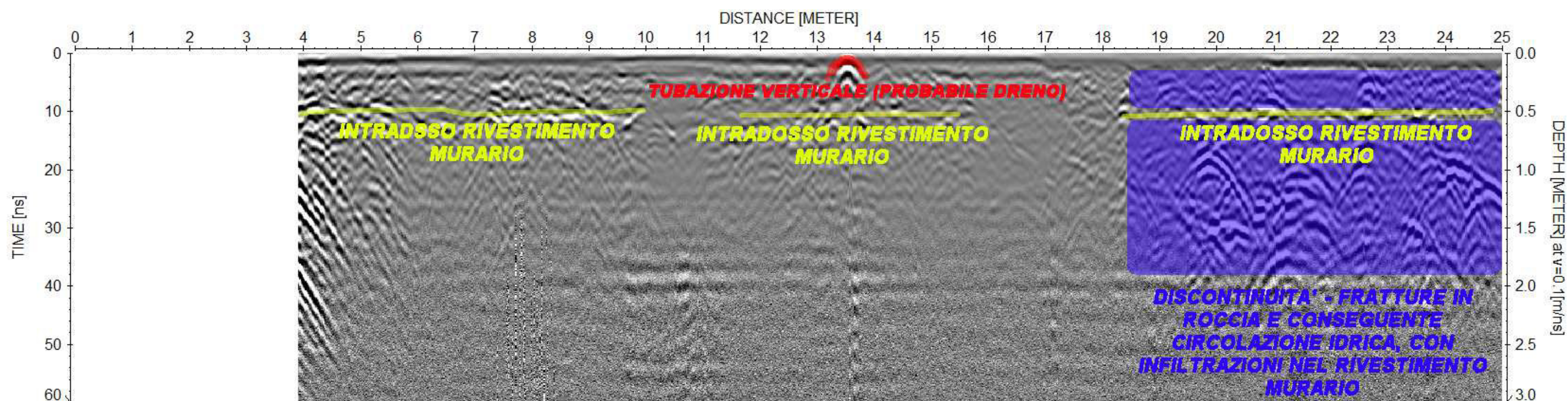


Lato destro

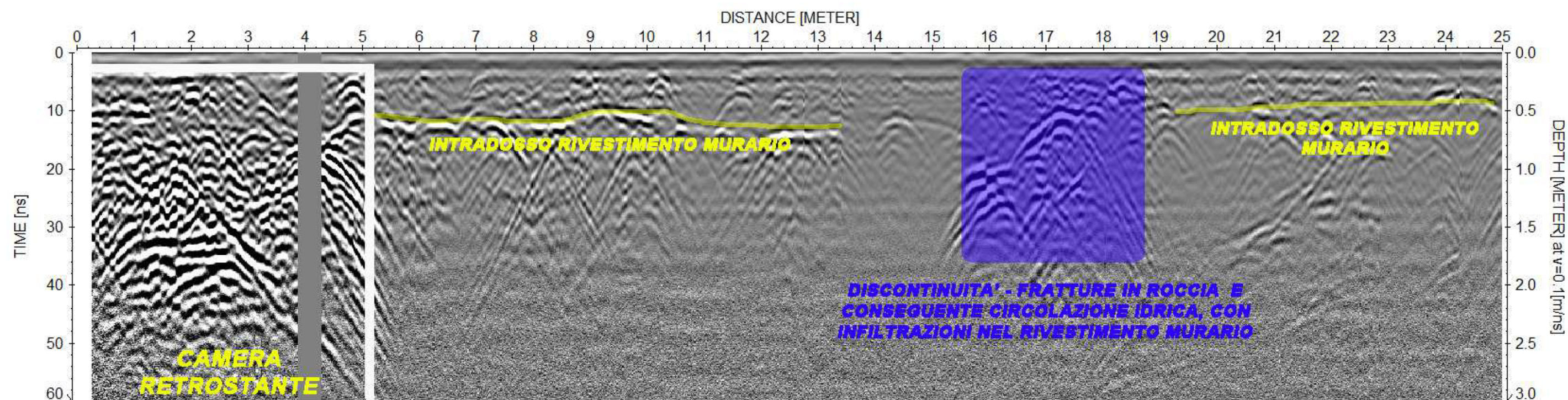


RADARGRAMMI SIGNIFICATIVI INTERPRETATI

LINEA 01, PROGRESSIVE METRICHE 0.0 - 25.0

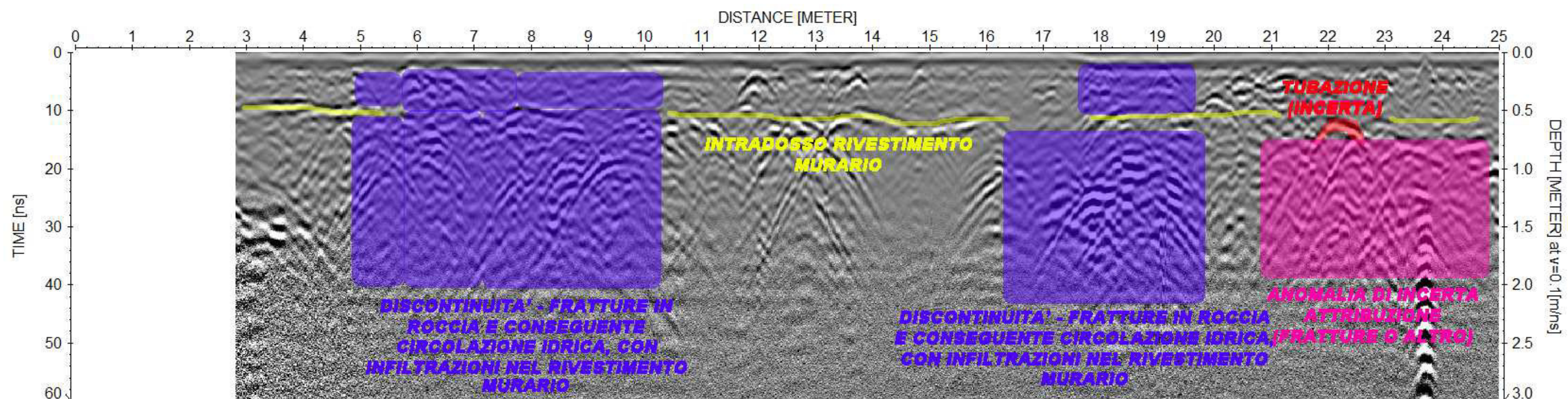


LINEE 04 E 05, PROGRESSIVE METRICHE 0.0 - 25.0

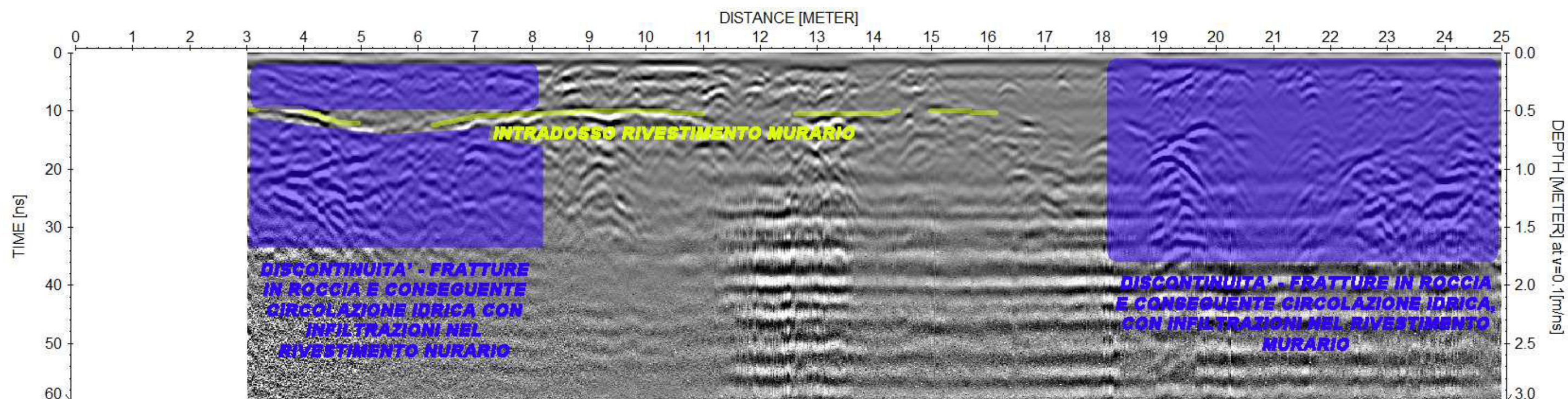


RADARGRAMMI SIGNIFICATIVI INTERPRETATI

LINEA 11, PROGRESSIVE METRICHE 0.0 - 25.0

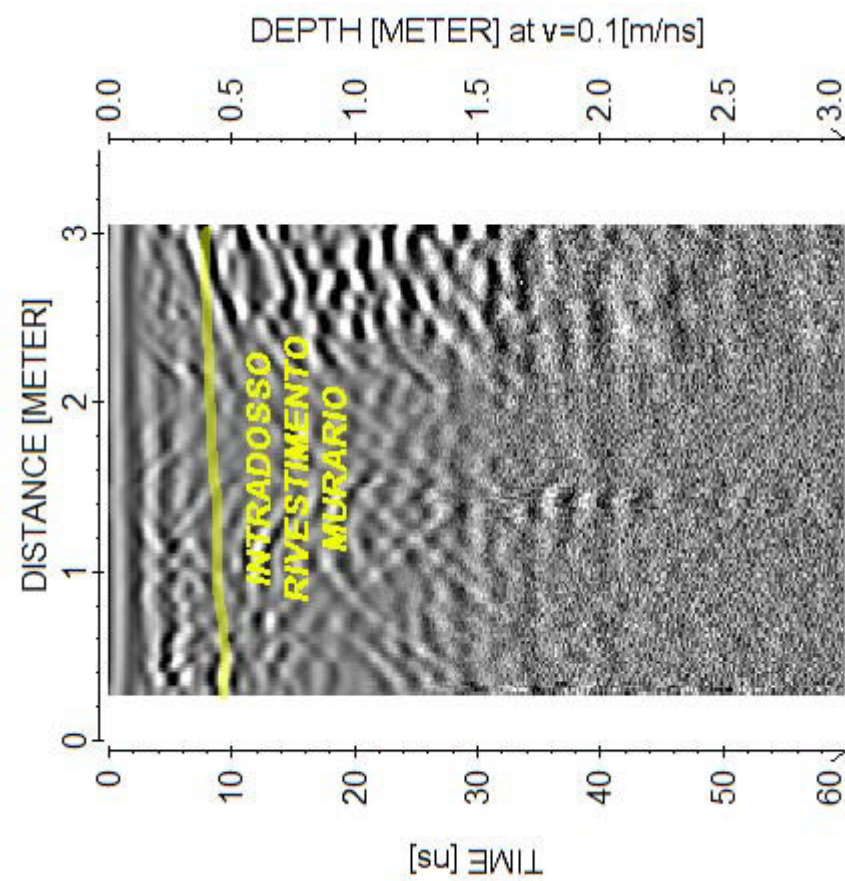


LINEA 12, PROGRESSIVE METRICHE 0.0 - 25.0



RADARGRAMMI SIGNIFICATIVI INTERPRETATI

LINEA 24 (VERTICALE)



LINEA 42 (A PAVIMENTO, TRASVERSALE ALL'ASSE DEL TUNNEL)

