

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD

1° LOTTO

Piovene Rocchette - Valle dell'Astico

PROGETTO DEFINITIVO

CUP	G21B1 30006 60005
WBS	B25.A31N.L1
COMMESSA	J16L1

COMMITTENTE



S.p.A. AUTOSTRADA BRESCIA VERONA VICENZA PADOVA
Area Costruzioni Autostradali

CAPO COMMESSA
PER LA PROGETTAZIONE
Dott. Ing. Gabriella Costantini

PRESTATORE DI SERVIZI:
CONSORZIO RAETIA



RAPPRESENTANTE: Dott. Ing. Alberto Scotti

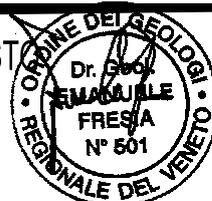
PROGETTAZIONE:



RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE
TRA LE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:
Technital S.p.A. - Dott. Ing. Andrea Renzo



ELABORATO: STUDI PER LA CONOSCENZA DEL CONTESTO
INDAGINI GEOGNOSTICHE
INDAGINI GEOFISICHE PREGRESSE



Progressivo Rev.
03 05 01 010 02

Rev.	Data	Descrizione	Redazione	Controllo	Approvazione	SCALA:	SCALA
00	MARZO 2017	PRIMA EMISSIONE	TECHNITAL - E.FRESIA	E.FRESIA	A.RENSO	NOME FILE:	J16L1_03_05_01_010_0101_OPD_02pdf
01	GIUGNO 2017	REVISIONE PER ADEGUAMENTO CARTIGLIO	TECHNITAL - E.FRESIA	E.FRESIA	A.RENSO	CM.	PROGR. FG. LIV. REV.
02	LUGLIO 2017	RECEPIMENTO OSSERVAZIONI	TECHNITAL - E.FRESIA	E.FRESIA	A.RENSO	J16L1_03_05_01_010_0101_OPD_02	

AUTOSTRADA VALDASTICO

INDAGINI GEOFISICHE PREGRESSE

AUTOSTRADA VALDASTICO

SISMICA A RIFRAZIONE

INDICE

1	Premessa	4
2	Metodologia di indagine	5
2.1	<i>Indagini sismiche</i>	5
2.2	<i>Inversione tomografica del dato sismico.....</i>	6
2.2.1	<i>Sismica a rifrazione.....</i>	9
2.2.2	<i>Metodo reciproco generalizzato (GRM).....</i>	10
3	Strumentazione utilizzata	13
3.1	<i>Acquisizione dati</i>	13
3.2	<i>Sorgenti</i>	13
3.3	<i>Ricevitori</i>	14
4	Descrizione del rilievo eseguito.....	15
5	Elaborazione dati.....	17
6	Risultati del rilievo e conclusioni.....	19
6.1	<i>Indagini sismiche</i>	19
6.1.1	<i>Sismica a rifrazione.....</i>	19
7	Documentazione fotografica	21

1 Premessa

Indagini in tomografia sismica a rifrazione sono state realizzate al fine di indagare il sottosuolo in corrispondenza del tracciato di progetto preliminare della Valdastico Nord.

Nella presente relazione sono stati riportati la metodologia di indagine, le specifiche tecniche del rilievo, la strumentazione utilizzata e la descrizione dei risultati del rilievo geofisico stesso.

Le indagini sono state eseguite nel periodo compreso tra giugno e luglio 2011 ed hanno previsto l'esecuzione di 19 linee di rilievo.

Di queste soltanto 3 interessano il tracciato selezionato in fase di progettazione definitiva.

2 Metodologia di indagine

2.1 Indagini sismiche

I metodi sismici sono le tecniche geofisiche più comunemente utilizzate in ambito ingegneristico. Le varie metodologie di indagine si basano sulla propagazione delle onde sismiche da una sorgente di energia artificiale a una serie di ricevitori. Il passaggio delle onde attraverso il mezzo indagato e le variazioni che esse ne subiscono permettono di ricostruire le caratteristiche meccaniche e geometriche del sottosuolo.

Un qualunque segnale sismico può essere descritto come la sovrapposizione di quattro differenti fasi (fase è il movimento che compie una particella nel mezzo investito dal fronte d'onda sismico):

- onde di volume
 - P: onde primarie o di compressione
 - S: onde secondarie o di taglio
- onde di superficie
 - L: onde di Love (caratterizzate da un movimento longitudinale e trasversale)
 - R: onde di Rayleigh (caratterizzate da un movimento ellittico retrogrado)

Le onde sismiche generate dalla sorgente attraversando il sottosuolo possono incontrare limiti tra materiali con differenti proprietà. Il fronte d'onda potrà essere riflesso, rifratto oppure convertito in una diversa tipologia. Le caratteristiche del mezzo e l'angolo di incidenza dei raggi sismici determineranno la traiettoria dell'onda sismica.

Quando un'onda longitudinale piana incide un'interfaccia tra due materiali con differenti proprietà elastiche, dove il mezzo a profondità maggiore ha una velocità superiore, è possibile applicare i principi dell'ottica e in particolare le leggi di Snell. Il fronte d'onda che incide obliquamente sull'interfaccia genera onde longitudinali e trasversali che si propagano in entrambi i mezzi. Le onde che si propagano nello stesso mezzo del fronte d'onda sono riflesse, mentre quelle che si propagano nel mezzo sottostante sono rifratte.

La presenza di discontinuità o anisotropie nel mezzo modifica ampiezza e periodo delle onde sismiche. La velocità delle onde dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale attraversato, in particolare da: densità (γ), coefficiente di Poisson (ρ), modulo di Young (E) e modulo di taglio (G).

$$\rho = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$

$$E = V_p^2 \cdot \gamma \cdot \frac{(1 + \rho) \cdot (1 - 2\rho)}{1 - \rho}$$

$$G = \frac{\gamma \cdot V_s^2}{g}$$

V_p = velocità delle onde P

V_s = velocità delle onde S

g = accelerazione di gravità

Nella tabella di seguito vengono indicati valori di riferimento della velocità P per i vari materiali:

MATERIALE	Vp (m/s)
Granito	5.000
Calcare	1.500-4.200
Arenaria	1.400-4.000
Sabbie	1.200-1.800
Argilla	1.100-2.500

2.2 Inversione tomografica del dato sismico

La tomografia è una tecnica di ricostruzione per immagini che permette di caratterizzare un'area non accessibile per mezzo di impulsi di energia che attraversano l'area oggetto di indagine. L'esempio più efficace di tecnica tomografica è la TAC (tomografia assiale computerizzata) di largo impiego nel settore medicale.

I metodi di inversione tomografica applicati a metodologie di prospezione sismica attiva trovano numerose applicazioni per indagini di tipo geotecnico:

- ricostruzione stratigrafica;
- caratterizzazione di contrasti di impedenza;
- caratterizzazione delle zone a gradiente di velocità o attenuazione;
- individuazione di faglie e fratture;
- localizzazione di oggetti sepolti, massi erratici.

Gli obiettivi elencati possono essere raggiunti poiché la velocità sismica è un parametro che dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale quali: porosità, resistenza al taglio, compressibilità, quantità di fratture, saturazione e contenuto di argilla.

Misurando i tempi di arrivo o le ampiezze delle onde sismiche è possibile ottenere la distribuzione nel mezzo indagato di velocità sismica (modello di velocità) o attenuazione (modello cinematico); parametri che permettono di definire le caratteristiche meccaniche del sottosuolo.

Esistono differenti geometrie di acquisizione comunemente utilizzate per le elaborazioni tomografiche:

- sismica superficiale a riflessione o rifrazione;
- VSP (Vertical Seismic Profile);
- cross-hole;
- sismica 3D.

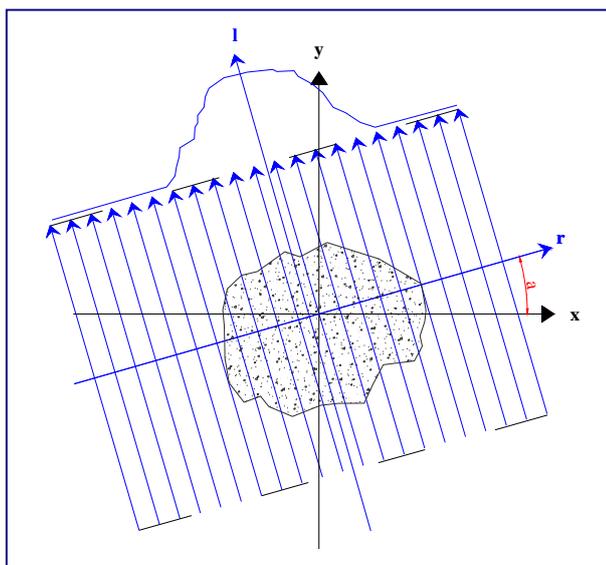
L'obiettivo della tomografia è definire le caratteristiche di un oggetto/sezione mediante la misura delle proiezioni esterne (somma di alcune proprietà interne) di queste caratteristiche.

Le serie di proiezioni utilizzate in tomografia corrispondono a integrali lineari di alcune funzioni del mezzo. Nelle indagini sismiche i parametri misurati sono il tempo di arrivo e l'ampiezza delle onde sismiche, mentre la funzione può essere lo smorzamento (reciproco della velocità) o il fattore di attenuazione. Per un'analisi bidimensionale il problema tomografico è rappresentato dalla seguente equazione:

$$p(r, \alpha) = \int f(x, y) dl$$

(una serie completa di somme di raggi ad un determinato angolo è definita proiezione o profilo)

Dove x , y , r , l e α sono rappresentati nello schema di seguito:



Dal punto di vista teorico $f(x,y)$ è una funzione 2D continua e per essere ricostruita necessita di un numero infinito di proiezioni. Per ovvi motivi di discretizzazione $f(x,y)$ è calcolata per un numero finito di punti attraverso un numero finito di proiezioni.

Il mezzo da ricostruire viene quindi discretizzato in un grid a elementi rettangolari (celle) in ciascuno dei quali il valore di smorzamento si suppone costante. Il tempo di arrivo calcolato per un raggio (impulso sismico - perturbazione ondulatoria) che attraversa le celle del grid può essere espresso dalla formula:

$$t_k^{calc} = \sum_{j=1}^N d_{kj} \cdot s_j$$

t_k^{calc} = tempo di arrivo calcolato per il raggio k_{esimo}

d_{kj} = lunghezza del percorso del raggio k_{esimo} nella cella j_{esima}

s_j = smorzamento della cella j_{esima}

N = numero di elementi del grid

I tempi di arrivo di tutti i raggi possono essere tradotti in forma matriciale:

$$T = D * S$$

T = vettore di lunghezza M (tempi di arrivo)

S = vettore di lunghezza N (celle)

D = vettore (MxN) con lunghezza dei raggi in ogni cella

Ricostruire una funzione attraverso il suo integrale comporta una soluzione non unica poiché un infinito numero di integrali possono essere misurati. Il numero di soluzioni può essere ridotto introducendo dei vincoli nel modello quali: limiti di velocità, limiti di gradiente delle velocità (damping), conoscenza delle strutture geologiche presenti nell'area, dimensioni e tipologia di celle da utilizzare nella ricostruzione.

Esistono differenti approcci alla risoluzione del problema:

- Back Projection (BP);
- matrice di inversione;
- ricostruzione analitica;
- ricostruzioni iterative (ART, SIRT).

I processi di tipo iterativo risultano più appropriati per l'ambito geologico poiché i dati geofisici possono essere distorti dal rumore di fondo, oppure essere campionati irregolarmente e discontinuamente.

I metodi iterativi si basano sulla definizione di un modello iniziale di velocità del sottosuolo (modello a priori) costruito attribuendo un valore di velocità a tutte le celle del grid. Attraverso il modello iniziale è possibile calcolare i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche.

Successivamente è possibile calcolare i tempi residui, ossia la differenza tra tempo osservato e tempo calcolato, e pertanto definire l'approssimazione del modello teorico al modello sperimentale/reale:

$$D_i = t_{obs_i} - t_{calc_i} \text{ dove } i = 1, 2 \dots N$$

Lo step successivo è dato dalla costruzione di un sistema di equazioni lineari che stabilisce la relazione tra i residui e la variazione che deve essere apportata al modello iniziale di velocità per ottenere un modello quanto più possibile attendibile. La soluzione del sistema di equazioni, che risulta sovradeterminato poiché ha un numero di equazioni superiore al numero di incognite, definisce la variazione da applicare al modello iniziale (matrice di risoluzione).

L'iterazione del calcolo prosegue fino a quando la differenza tra tempi calcolati e tempi osservati risulta compresa in un range di errore accettabile.

La risoluzione delle sezioni tomografiche è proporzionale al numero e alla dimensione delle celle del grid ed è limitata dalla media della lunghezza d'onda del segnale che determina la dimensione minima della cella. Una anomalia può essere individuata solamente se l'effetto prodotto sul tempo di arrivo è maggiore della precisione della lettura del tempo di arrivo stesso.

La dimensione minima (Δt) che un'anomalia dovrebbe avere per generare una variazione misurabile nei tempi di arrivo dei raggi che vi passano attraverso può essere calcolata con la seguente equazione:

$$\Delta l = \frac{\Delta t}{\Delta v} \cdot (v_a \cdot v_m)$$

v_a = velocità dell’anomalia

v_m = velocità media nel mezzo

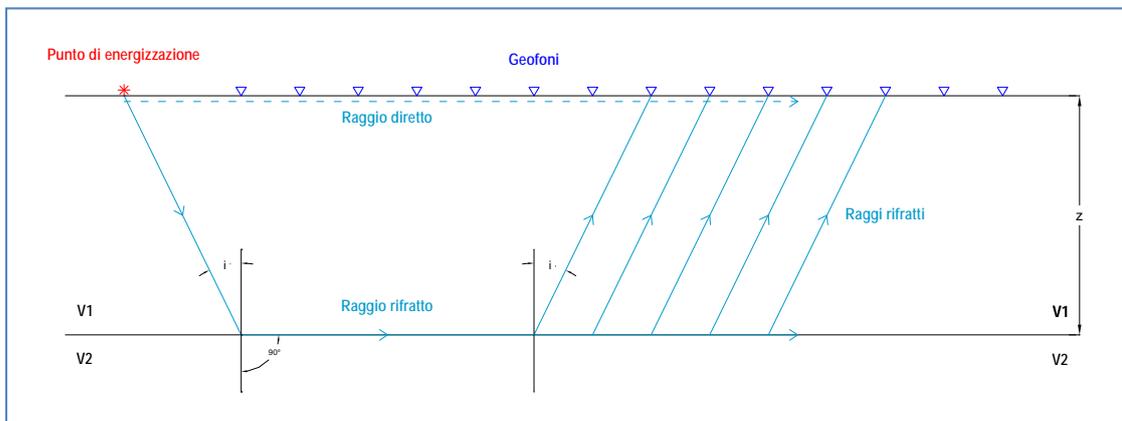
$$\Delta v = |v_a - v_m|$$

Δt = errore nella lettura dei primi arrivi

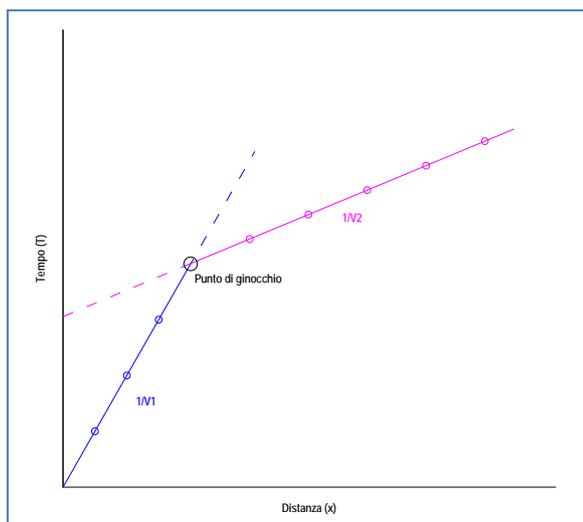
Al fine di evitare artefatti matematici senza corrispondenza fisica e geologica, le dimensioni della cella devono risultare inferiori alle dimensioni dell’anomalia, inoltre occorre tenere in considerazione il numero di raggi che attraversano le celle, i quali a loro volta dipendono dalla distanza sorgente-ricevitore, dal numero di sorgenti e ricevitori e dalla loro distribuzione.

2.2.1 Sismica a rifrazione

Il metodo sismico a rifrazione utilizza le onde sismiche che vengono rifratte dalle discontinuità presenti nel sottosuolo ad es. l’interfaccia tra due mezzi a differente velocità (si ipotizza che la velocità aumenti con la profondità).



Misurando i tempi di primo arrivo (FBP First Break Point) degli impulsi ai geofoni e le distanze tra gli stessi viene costruito un diagramma (dromocrona) nel quale in ascisse vengono rappresentate le distanze e in ordinate i tempi.



Le onde dirette viaggiano dalla sorgente al ricevitore con velocità V_1 (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea che dall'origine ha una pendenza pari a $1/V_1$) e raggiungono i ricevitori in un tempo:

$$t = \frac{x}{V_1}$$

Le onde rifratte viaggiano lungo l'interfaccia a una profondità z (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea retta con pendenza $1/V_2$ che intercetta l'asse dei tempi a $x=0$) e raggiungono i ricevitori in un tempo (tempo di intercetta):

$$T_i = \frac{x}{V_2} + \frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2 * V_1}$$

Il punto di intersezione tra le due rette, definito come punto di ginocchio, permette di calcolare la profondità del rifratte.

2.2.2 Metodo reciproco generalizzato (GRM)

I metodi di interpretazione della sismica a rifrazione di superficie variano in funzione della situazione d'interesse. La tabella di seguito riportata rappresenta una sintesi che illustra i casi d'applicazione per ogni metodologia d'indagine:

Metodi di interpretazione	Caso d'applicazione
----------------------------------	----------------------------

Metodi di interpretazione	Caso d'applicazione
Delle intercette (o convenzionale)	Strati paralleli e sub-orizzontali
Reciproco generalizzato (GRM)	Morfologie degli strati articolate e con inclinazioni > 20°
Reciproco di Hawkins o Delay time	Morfologie degli strati articolate e con inclinazioni < 20°
Tomografico	Morfologie complesse

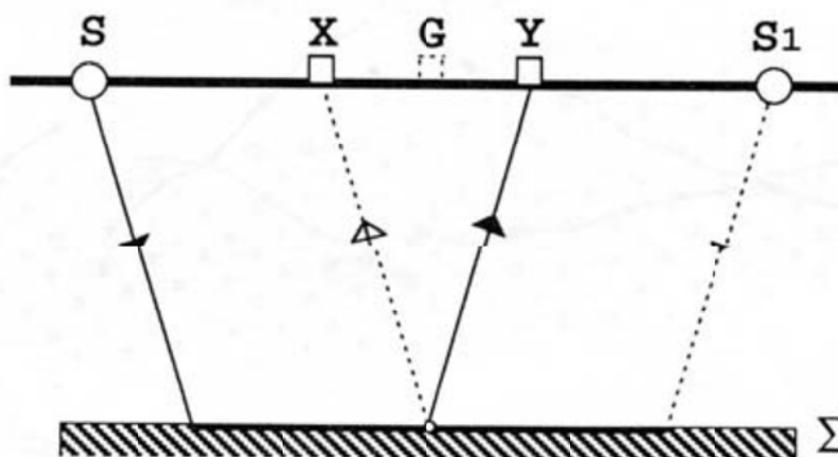
Il G.R.M. è un metodo interpretativo che si basa su tempi d'arrivo da energizzazioni coniugate, effettuate cioè da parti opposte del profilo sismico: tramite la determinazione di due funzioni:

- ✓ analisi-velocità, che corrisponde al tempo necessario al raggio sismico a percorrere un tratto di lunghezza nota sul rifrattore (distanza intergeofonica). La determinazione di tale funzione permette di ottenere una precisa stima della velocità delle onde sismiche e dunque del rifrattore stesso.

$$T_v = \frac{(T_{SY} - T_{S1X} + T_{SS1})}{2} \quad \text{FUNZIONE TEMPO - VELOCITA'}$$

- ✓ tempo-profondità, che è una misura della profondità del rifrattore, espressa in unità di tempo.

$$T_G = \frac{\left[T_{SY} + T_{S1X} - \left(T_{SS1} + \frac{XY}{V_n} \right) \right]}{2} \quad \text{FUNZIONE TEMPO - PROFONDITA'}$$



L'analisi sismica si basa sulla determinazione del tempo di tragitto delle onde sismiche tra due geofoni separati da una distanza variabile XY che entra nel calcolo della velocità di propagazione delle onde nel rifrattore e della sezione tempo – profondità.

Il problema consiste nel calcolare con precisione la distanza XY ottimale per la quale i segmenti dei raggi che viaggiano verso l'alto e arrivano a ciascun geofono, emergano quasi dallo stesso punto del riflettore. Ciò permette di valutare tutte le eventuali variazioni laterali di velocità del rifrattore, e quindi di ricostruire anche morfologie complesse.

La sismica a rifrazione con il metodo del reciproco di Hawkins rappresenta un caso particolare del GRM in cui viene posto $XY = 0$. Tale semplificazione comporta delle significative limitazioni:

- ✓ La morfologia dell'orizzonte fisico può avere un andamento irregolare, ma i tratti singoli non devono avere variazioni laterali eccessive ($<20^\circ$).
- ✓ Non si possono intercettare variazioni laterali di velocità.

Il metodo ha comunque il vantaggio di essere più speditivo e di semplice applicazione, visto che non è necessaria la determinazione del valore ottimale XY .

3 Strumentazione utilizzata

Le prove sono state effettuate con la seguente strumentazione:

3.1 Acquisizione dati

I dati sono stati acquisiti con il sismografo GEODE della Geometrics dotato di 24 canali a 24 bit, possibilità di stacking, filtri analogici e digitali. Nella tabella si riportano le caratteristiche tecniche del sismografo.

<i>A/D Conversion</i>	24 bit result using Crystal Semiconductor sigma-delta converters and Geometrics proprietary oversampling
<i>Dynamic Range</i>	144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2ms, 24dB
<i>Sample Interval</i>	0.02, 0.3125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms
<i>Record Length</i>	16,000 samples
<i>Maximum Input Signal</i>	2.8 VPP
<i>Distortion</i>	0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz
<i>Bandwidth</i>	1.75 Hz to 20 kHz
<i>Common Mode Rejection</i>	>-100 dB at <=100 Hz, 36 dB
<i>Crosstalk</i>	-125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms
<i>Noise Floor</i>	0.2uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz
<i>Stacking Trigger Accuracy</i>	1/32 of sample interval
<i>Input Impedance</i>	20 kOhm, 0.02 uf
<i>Anti-alias Filters</i>	-3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB
<i>Delay</i>	0 to 9999 ms in 1 ms steps
<i>Acquisition and DisplayFilters</i>	<ul style="list-style-type: none">⊣ LowCut: OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 or 48 dB/octave, Butterworth.⊣ Notch: 50, 60, 150, 180 Hz and OUT, with the 50 dB rejection bandwidth 2% of center frequency.⊣ HighCut: OUT, 250, 500 or 1000 Hz, 24 or 48 dB/octave.
<i>Triggering</i>	Positive, negative or contact closure, software adjustable threshold
<i>Power</i>	12V external battery

3.2 Sorgenti

Per le indagini sismiche a rifrazione è stata utilizzata come sorgente di energia la massa battente, costituita da un martello avente massa da 10 kg utilizzato da un operatore.

L'impulso viene generato attraverso il colpo del martello su una piastra in teflon appoggiata al terreno.

L'istante di trigger è fornito da un geofono posizionato in prossimità del punto di battuta.

3.3 Ricevitori

Geofoni

Per le indagini sismiche a rifrazione sono stati utilizzati geofoni con asse verticale con frequenza pari a 14 Hz agganciati in parallelo tramite take-out a geofoni orizzontali che permettono di registrare rispettivamente le onde di compressione (P) e quelle di taglio (S) generate in fase di energizzazione.

I geofoni sono sensori di tipo elettromagnetico che generano una tensione proporzionale alla velocità della perturbazione sismica.

I cavi utilizzati per l'acquisizione sono cavi con guaina in polipropilene schermati con connettori tipo militare Bendix o Cannon a 36 pin.

4 Descrizione del rilievo eseguito

L'indagine ha previsto l'esecuzione di 19 linee di sismica a rifrazione; nella tabella si riporta la lunghezza delle sezioni, il numero di posizioni di ricezione (geofoni) e di energizzazione:

SEZIONE	PUNTI DI RICEZIONE	DISTANZA (m)	PUNTI DI ENERGIZZAZIONE	LUNGHEZZA LINEA (m)
TR01a	24	10	9	230
TR01b	20	10	11	190
TR02a	24	10	8	230
TR02b	24	10	9	230
TR03a	24	10	7	230
TR03b	24	10	9	230
TR04	24	10	9	230
TR05a	12	10	7	110
TR05b	24	10	9	230
TR06	24	10	9	230
TR07a	24	10	9	230
TR07b	12	10	7	110
TR08a	12	10	7	110
TR08b	12	10	7	110
TR08c	12	10	7	110
TR09a	12	10	7	110
TR09b	12	10	7	110
TR10	12	10	7	110
T11	22	10	12	210
TOTALE				3350

Ogni tiro è stato ripetuto almeno una volta per migliorare mediante operazione di stacking (somma di più impulsi sismici generati nella medesima posizione) la qualità del segnale acquisito (aumento del rapporto segnale/disturbo).

La tabella seguente riporta le ubicazioni delle singole traverse sismiche con riferimento alle opere di progetto preliminare. Da essa si evince come le sole traverse sismiche TR6 all'imbocco sud galleria Pedescala, e TR7a – TR7b all'imbocco nord della galleria S Pietro, ricadono in aree ed opere di competenza del 1 lotto.

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

SEZIONE	OPERA	LUNGHEZZA LINEA (m)	UBICAZIONE
TR01a	Galleria Cogollo	230	Su precedente tracciato
TR01b	Galleria Cogollo	190	Su precedente tracciato
TR02a	Galleria Cogollo	230	Su precedente tracciato
TR02b	Galleria Cogollo	230	Su precedente tracciato
TR03a	Galleria Costa del Prà	230	Su precedente tracciato
TR03b	Galleria Costa del Prà	230	Su precedente tracciato
TR04	Galleria Forte Corbin	230	Su precedente tracciato
TR05a	Galleria Forte Corbin	110	Su precedente tracciato
TR05b	Galleria Forte Corbin	230	Su precedente tracciato
TR06	Galleria Pedescala	230	1° lotto
TR07a	Galleria San Pietro	230	1° lotto
TR07b	Galleria San Pietro	110	1° lotto
TR08a	Galleria Pedemonte	110	Oltre svincolo Valle dell'Astico
TR08b	Galleria Pedemonte	110	Oltre svincolo Valle dell'Astico
TR08c	Galleria Pedemonte	110	Oltre svincolo Valle dell'Astico
TR09a	Galleria Pedemonte	110	Oltre svincolo Valle dell'Astico
TR09b	Galleria Pedemonte	110	Oltre svincolo Valle dell'Astico
TR10	Galleria di valico	110	Oltre svincolo Valle dell'Astico
T11	Galleria di valico	210	Oltre svincolo Valle dell'Astico
		3.350	

5 Elaborazione dati

Le linee di sismica a rifrazione sono state analizzate sia tramite elaborazione tomografica sia con metodo reciproco generalizzato (G.R.M. di R. Palmer).

TOMOGRAFIA SISMICA

L'elaborazione in tomografia sismica ha previsto i seguenti step:

1. Definizione dei tempi di arrivo

I dati acquisiti sono stati convertiti da formato SEG 2 a SU (Seismic Unix) con il software SeisOpt Picker. Utilizzando lo stesso software, sono stati analizzati i film sismici acquisiti e successivamente determinati per ogni traccia i tempi di primo arrivo delle onde compressionali P e delle trasversali S (FBP - First Break Peak).

2. Elaborazione tomografica

L'elaborazione tomografica è stata effettuata con il software Rayfract che utilizza il metodo di inversione WET (Wavepath Eikonal Traveltime).

L'algoritmo di inversione utilizza l'approccio basato sulle zone di Fresnel che costituisce un'alternativa ai metodi di inversione basati sul ray tracing.

Gli assunti di base di tale modellizzazione sono:

- i raggi sismici sono considerati come fronti d'onda sferici;
- il range di frequenza dell'impulso sismico è considerato finito (condizione rappresentativa della realtà);
- la perturbazione sismica indotta si propaga in uno spazio finito 3D (zona di Fresnel) attorno al raggio sismico.

L'analisi dei tempi di primo arrivo permette di definire il modello iniziale di velocità (gradiente), attraverso il quale calcolare i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche. Calcolando i tempi residui (T_r), ossia la differenza tra tempo osservato e tempo calcolato, viene definita l'approssimazione del modello teorico al modello sperimentale.

Lo step successivo è dato dalla costruzione di un sistema di equazioni lineari che stabilisce la relazione tra i residui (T_r) e la variazione che deve essere apportata al modello iniziale di velocità per ottenere un modello quanto più possibile attendibile. L'iterazione del calcolo prosegue fino a quando la differenza tra tempi calcolati e tempi osservati risulta accettabile.

I risultati dell'inversione tomografica sono:

- matrice V_p, V_s ;
- dromocrone calcolate;

- valori di RMS dei tempi residui;
- matrice di copertura (coverage): copertura dei raggi sismici nello spazio indagato;
- matrice di risoluzione: scostamento del modello finale dal modello iniziale (variazione apportata dal processo tomografico al modello iniziale).

3. Restituzione e interpretazione e delle sezioni sismiche

I dati delle matrici Vp e Vs sono rappresentati in contouring 2D (con opportuna scala colore) mediante il software Surfer. L'algoritmo utilizzato per tale rappresentazione è il kriging con un valore di smoothing (filtro spaziale) basso. Questa funzione di interpolazione spaziale si basa sull'autocorrelazione della grandezza (in questo caso le velocità Vp o Vs a seconda della situazione), cioè l'assunto che la grandezza in oggetto vari nello spazio con continuità. Le sezioni ottenute sono state riportate su tavole costruite con il software Autocad.

METODO G.R.M.

Il metodo del reciproco generalizzato (G.R.M. di R. Palmer) consente di ricostruire rifrattori ondulati a qualunque profondità utilizzando la geometria dei profili coniugati.

Gli aspetti di base dell'elaborazione sono:

- Il calcolo della funzione analisi-velocità, dalla quale si ottiene la velocità del rifrattore.
- Il calcolo della funzione tempo-profondità, che è una misura della profondità del rifrattore, espressa in unità di tempo.

L'analisi sismica si basa sulla determinazione del tempo di tragitto delle onde sismiche tra due geofoni separati da una distanza variabile XY, che entra nel calcolo della velocità di propagazione delle onde nel rifrattore e della sezione tempo – profondità.

Il problema consiste nel calcolare con precisione la distanza XY ottimale per la quale i segmenti dei raggi che viaggiano verso l'alto e arrivano a ciascun geofono, emergano quasi dallo stesso punto del riflettore. Ciò permette di valutare tutte le eventuali variazioni laterali di velocità del rifrattore, e quindi di ricostruire anche morfologie complesse.

Il metodo G.R.M. si sviluppa attraverso due fasi:

1. Definizione delle funzioni.
2. Stima del valore ottimale di XY.

In allegato (All. 01) sono riportati i grafici z-x e v-x delle linee di rilievo elaborate con metodo G.R.M..

6 Risultati del rilievo e conclusioni

In allegato si riportano le sezioni in tomografia sismica e interpretative delle linee TR6 – TR7a – TR7b ricadenti in corrispondenza del tracciato di progetto definitivo. Le restanti traverse sismiche eseguite in sede di preliminare sono posizionate in corrispondenza di una diversa soluzione di tracciato:

6.1 Indagini sismiche

Si fa presente che la velocità sismica è un parametro che dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale quali: porosità, resistenza al taglio, compressibilità, quantità di fratture, saturazione.

Ai fini dell'interpretazione del rilievo geofisico è opportuno ricordare alcune delle osservazioni riguardanti le proprietà dei materiali:

- i materiali sciolti presentano valori di velocità inferiori rispetto a materiali lapidei;
- i materiali sciolti presentano velocità proporzionali al materiale costituente i grani e alla percentuale di vuoti;
- le velocità sono proporzionali in modo diretto allo stato di addensamento dei materiali.

6.1.1 Sismica a rifrazione

L'elaborazione dei dati sismici delle velocità P e S ha portato all'individuazione delle seguenti unità:

- La prima unità superficiale, con valori di velocità P inferiori a 1200-1400 m/s e valori di velocità S inferiori a 450-550m/s, caratterizzata dalla presenza di materiale sciolto.
- La seconda unità, con velocità P comprese tra 1200-1400 e 2800 m/s e velocità S comprese tra 450-550 e 1100-1200 m/s, caratterizzata da materiale granulare maggiormente addensato o da materiale lapideo dall'elevato grado di fatturazione ed alterazione.
- La terza unità, con velocità P maggiori di 2800 m/s e velocità S maggiori di 1100-1200 m/s, si riferisce a materiale lapideo di buone caratteristiche geomeccaniche.

Nella seguente tabella si riepilogano le unità individuate e le relative velocità P e S:

UNITA'	Velocità P (m/s)	Velocità S (m/s)
1	< 1200-1400	< 450-550
2	1200 < Vp < 2800	450-550 < Vs < 1100-1200
3	> 2800	> 1100-1200

Le interfacce tra le differenti unità sono state identificate tramite un'analisi del gradiente di velocità sismica effettuata sulle sezioni tomografiche; tale tecnica di elaborazione è infatti la migliore in contesti di variazione graduale delle velocità sismiche del sottosuolo, come nel caso in esame.

Nella seguente tabella si riporta lo spessore delle unità delle traverse sismiche di interesse:

SEZIONE	UNITA' 1		UNITA' 2		UNITA' 3	
	Spessore MIN (m)	Spessore MAX (m)	Spessore MIN (m)	Spessore MAX (m)	Quota MAX (m)	Quota MAX (m)
TR06	5	10	9	17	372	350
TR07a	10	23	-	-	427	388
TR07b	10	12	-	-	419	-

Su parte delle linee d'indagine è stato inoltre applicato il metodo di analisi G.R.M., che non ha dato risultati significativi a causa della mancanza di contrasti netti tra le diverse unità, dell'interdistanza geofonica utilizzata, e dunque di punti di ginocchio chiaramente identificabili.

Si fa presente che il G.R.M. ha confermato l'andamento crescente o decrescente delle isolinee di velocità identificate dalla tomografia, nonostante i valori riscontrati non siano da considerarsi corretti a causa della mancanza di un punto di ginocchio preciso.

Grazie all'analisi G.R.M. è stata comunque identificata un'interfaccia a 800 m/s che indica il passaggio da detrito superficiale sciolto a materiale comunque sciolto, ma con un grado di addensamento maggiore. Tale orizzonte lento è stato confrontato con i risultati ottenuti dall'elaborazione tomografica e riportato sulle sezioni allegato al progetto come interfaccia interna all'unità superficiale identificata grazie all'analisi del gradiente di velocità sismica.

I risultati dell'elaborazione con metodo G.R.M. sono riportati in allegato (Allegato 01).

7 Documentazione fotografica



Indagine sismica a rifrazione



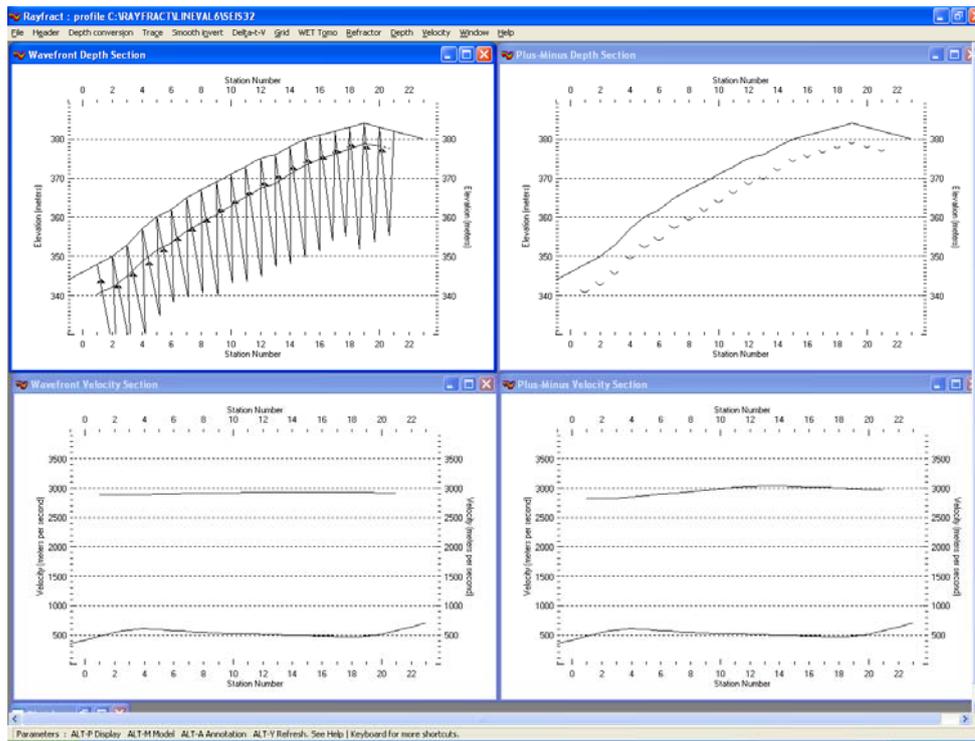
Indagine sismica a rifrazione

ALLEGATO 1

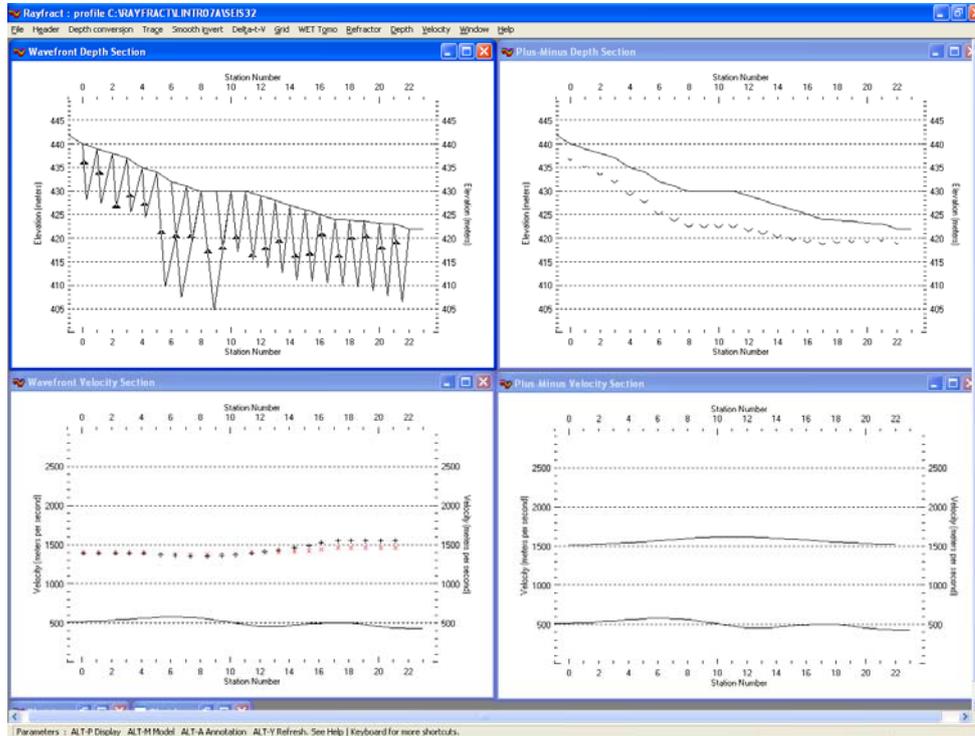
ELABORAZIONE CON METODO GRM

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

Linea TR06



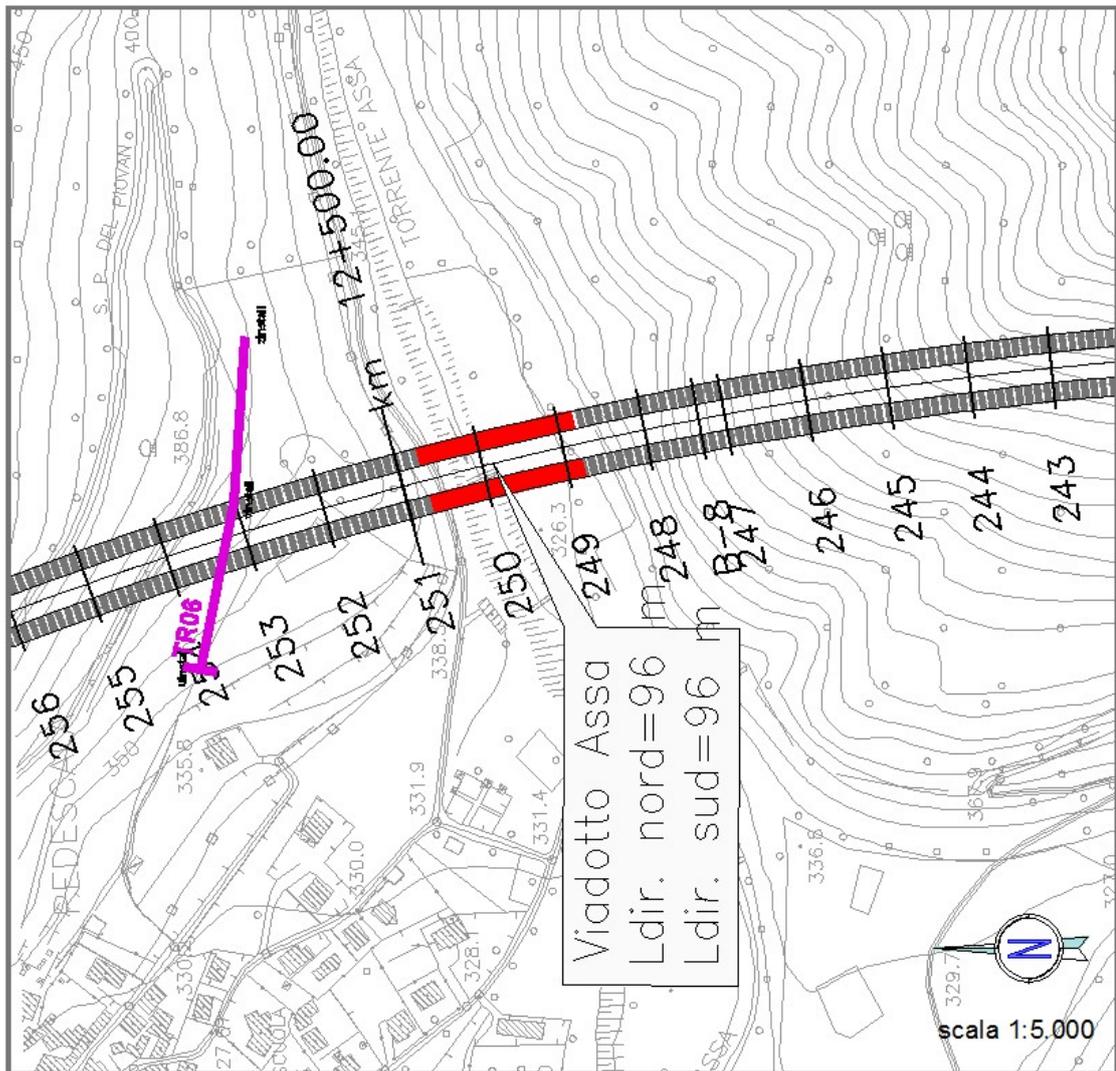
Linea TR07a



ALLEGATO 2

SEZIONI SISMOINTERPRETATIVE

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



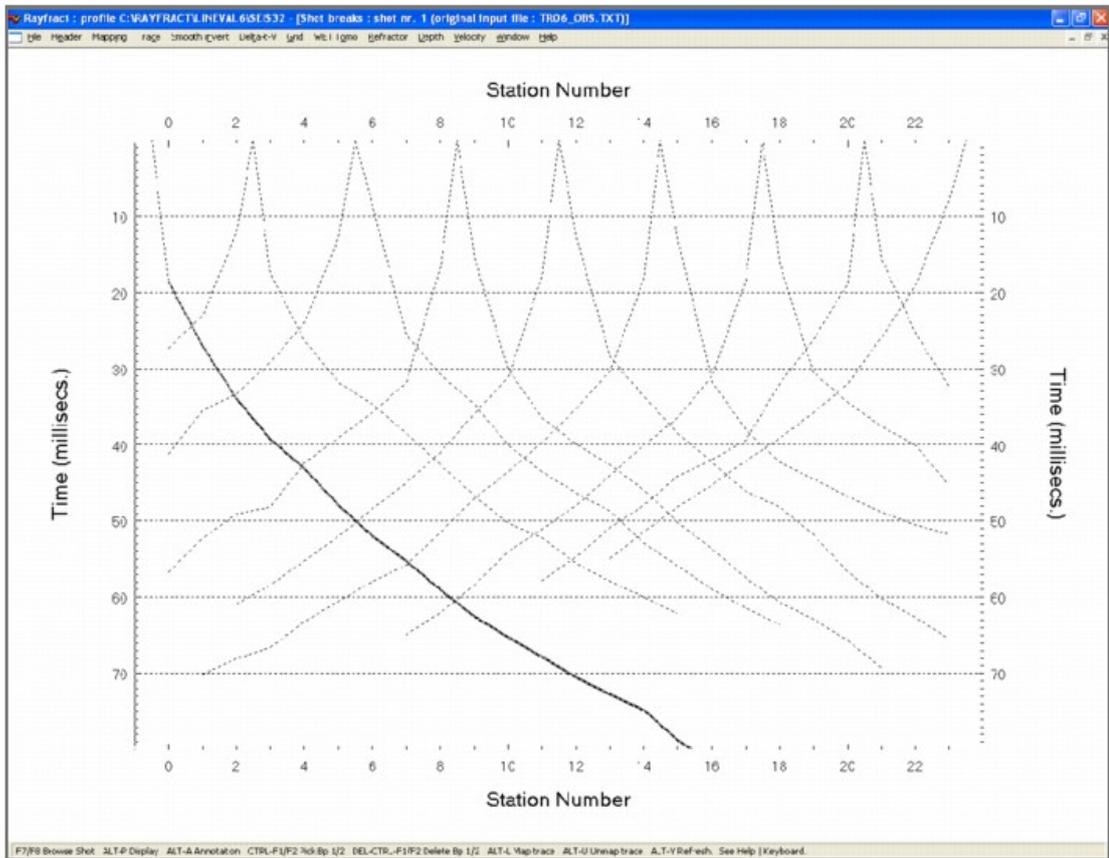
Planimetria ubicazione traversa sismica TR06 (imbocco sud galleria Pedescala)

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



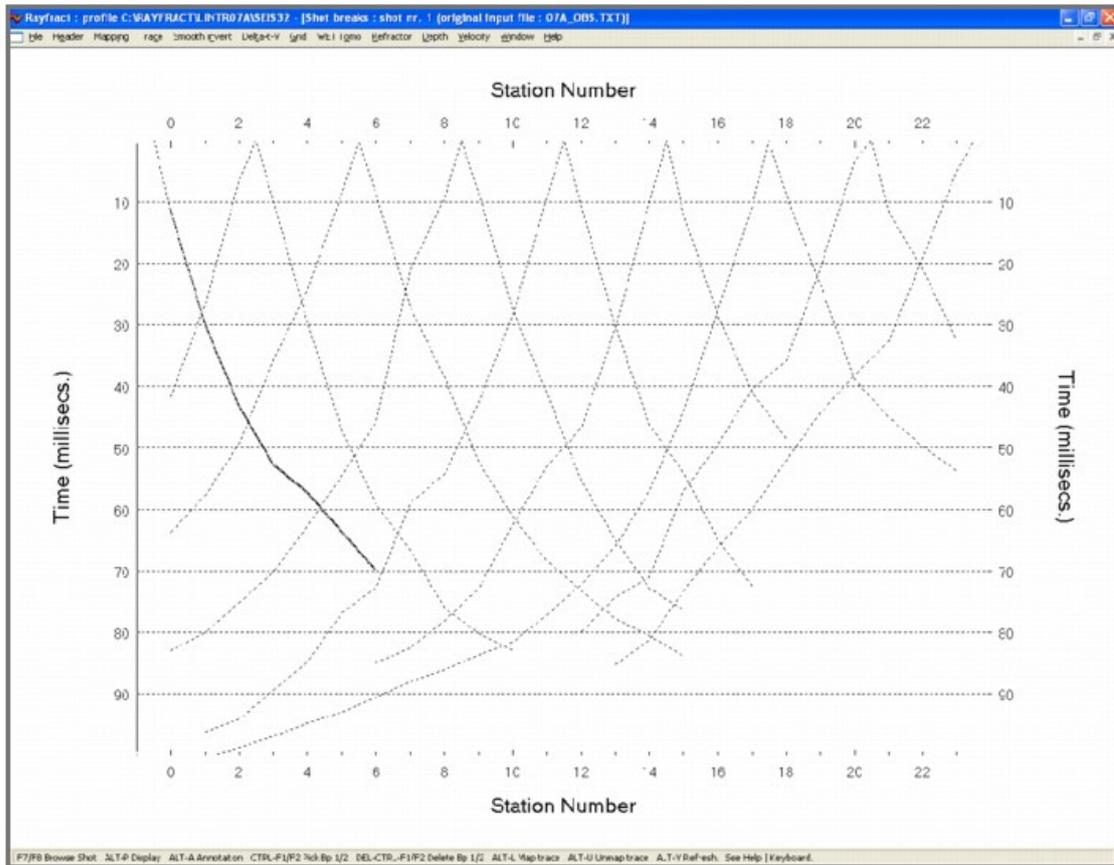
Planimetria ubicazione traverse sismiche TR07a e TR07b (imbocco nord galleria S Pietro)

LINEA TR06



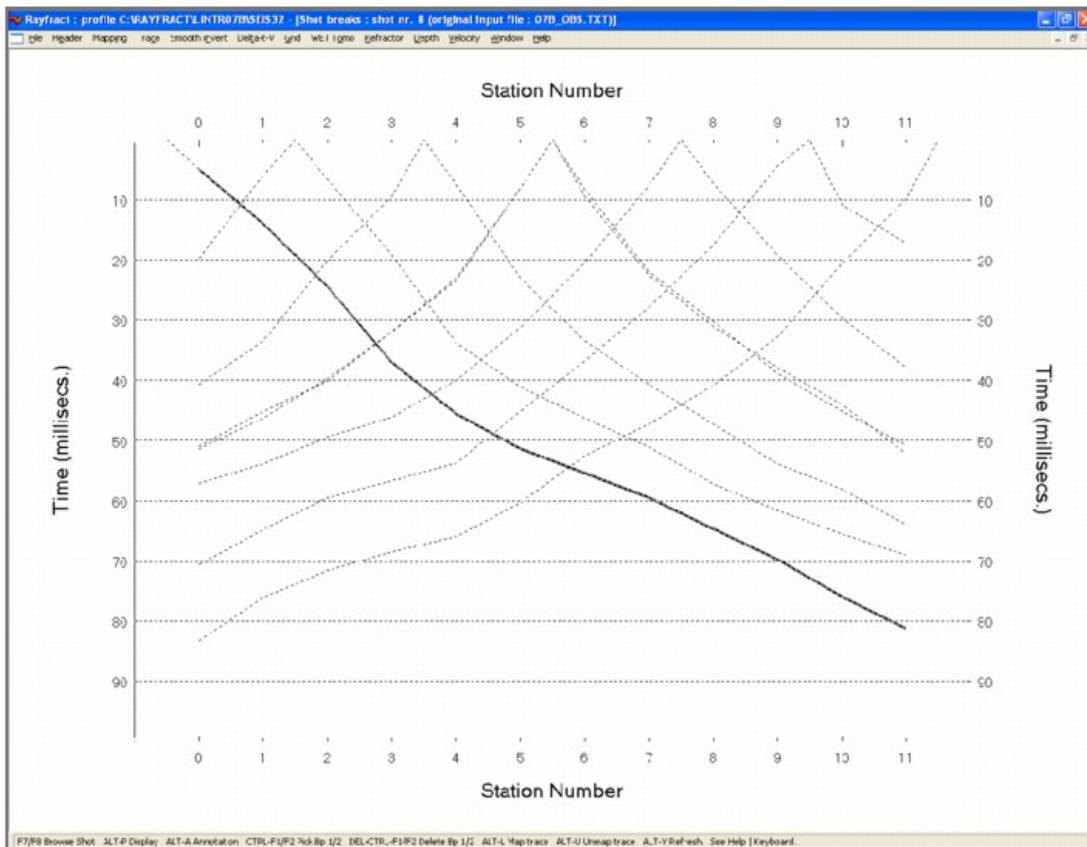
Dromocrone traversa sismica TR06

LINEA TR07a



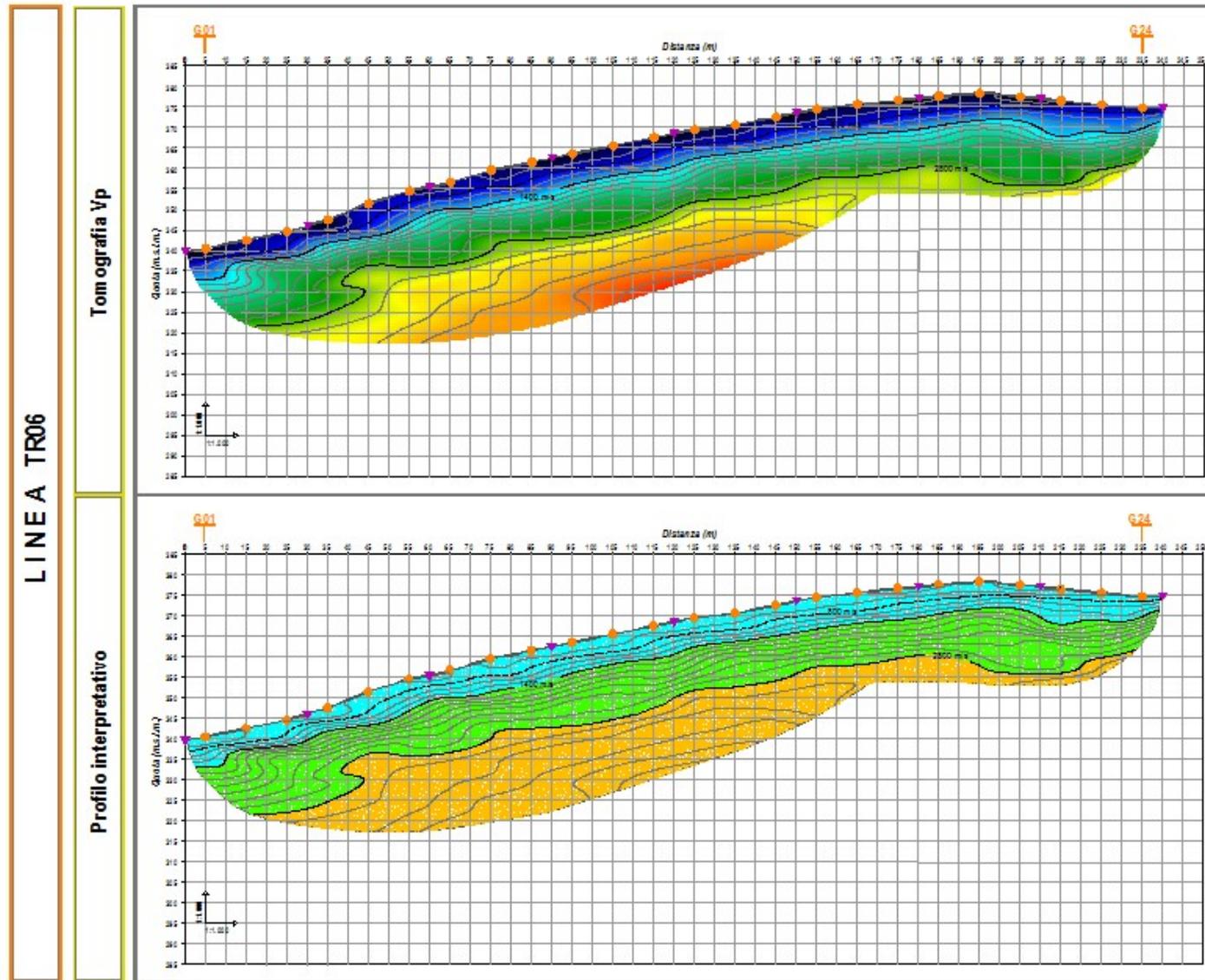
Dromocrone traversa sismica TR07a

LINEA TR07b



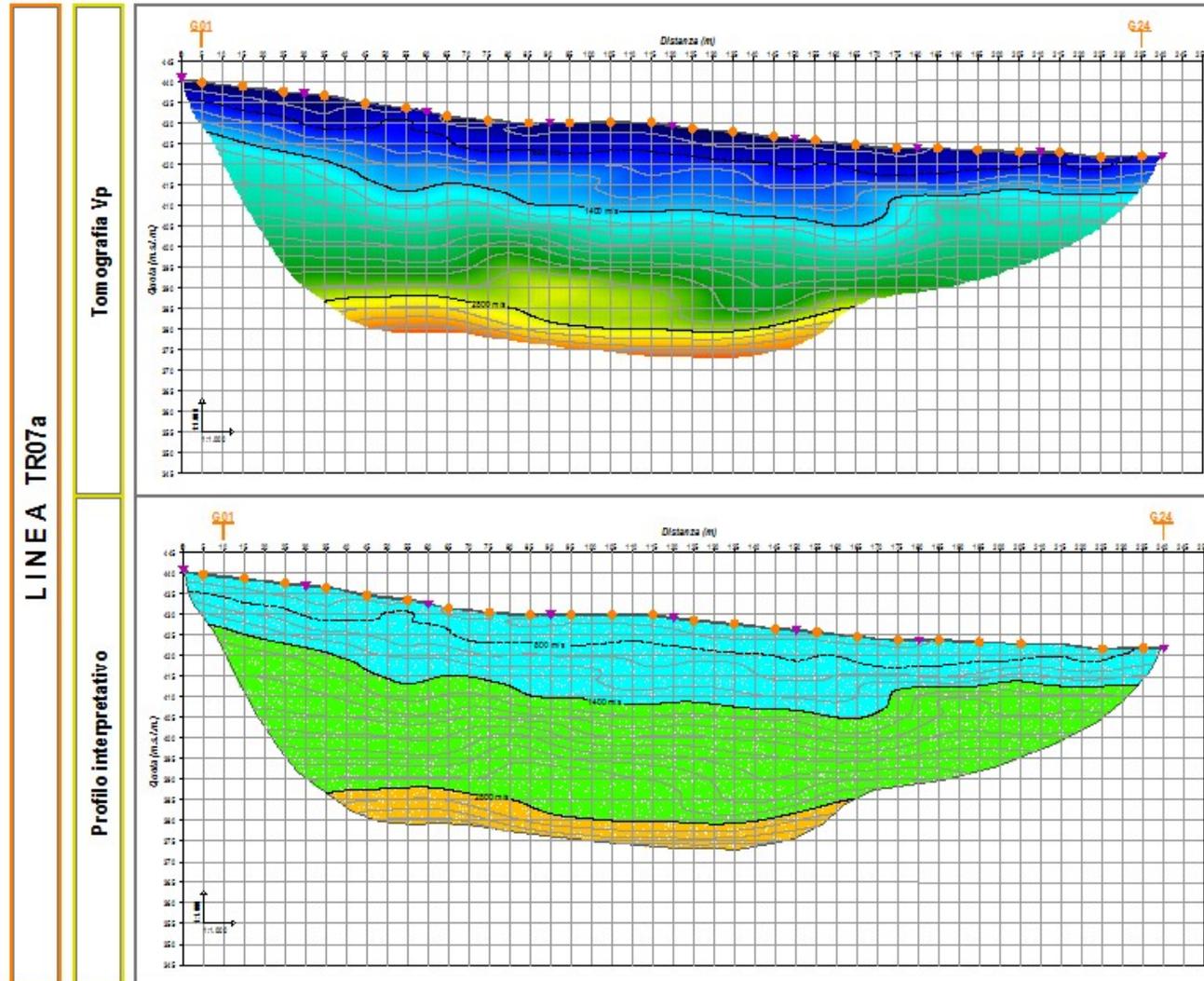
Dromocrone traversa sismica TR07b

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO



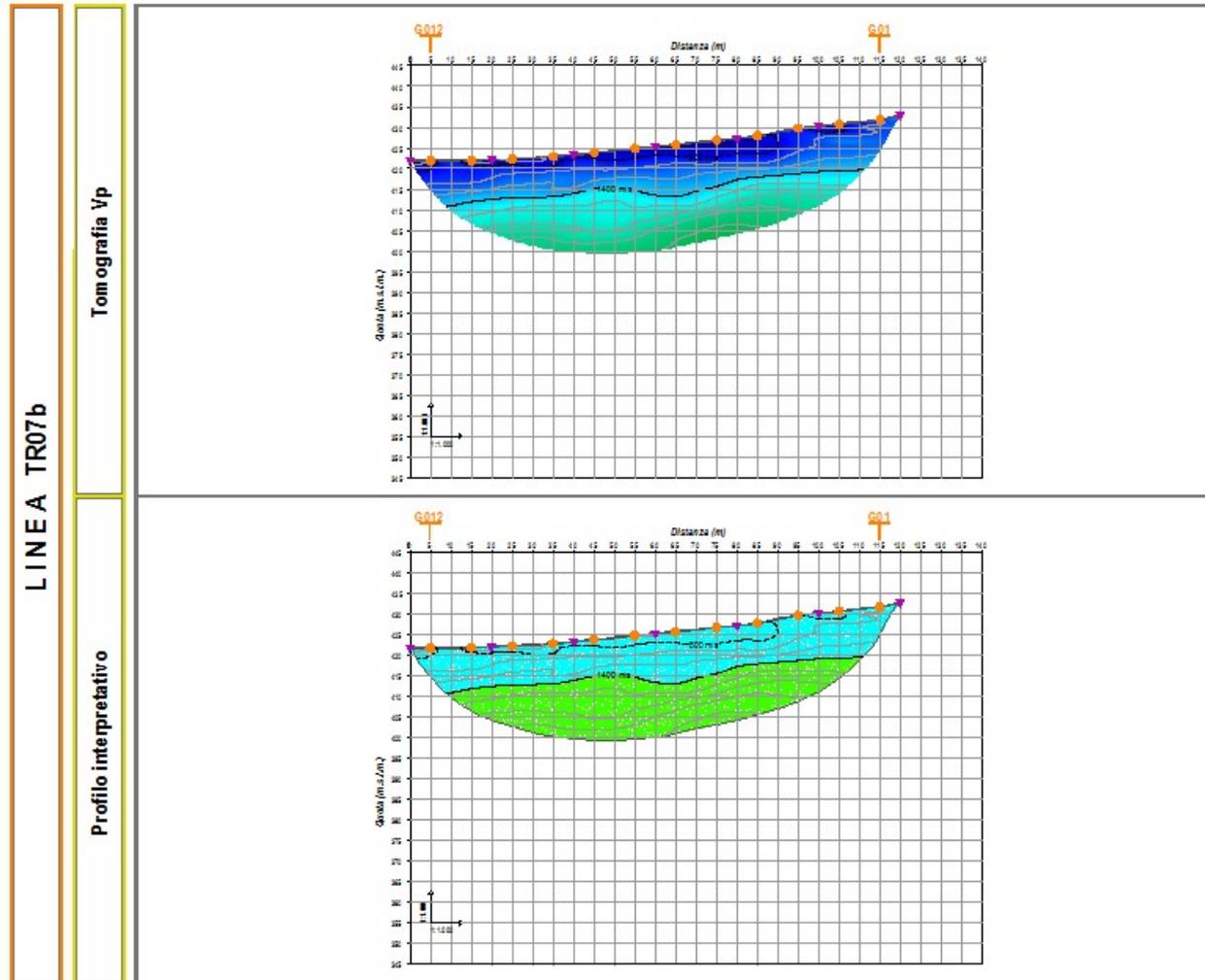
AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

Sezione sismo-interpretativa TR06



AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

Sezione simo-interpretativa TR07a



Sezione simo-interpretativa TR07b

AUTOSTRADA VALDASTICO

INDAGINE MAGNETOTELLURICA

1. INTRODUZIONE.....	35
2. DESCRIZIONE DEL METODO DI INDAGINE MAGNETOTELLURICO	36
3. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA.....	40
4. UBICAZIONE DEI PROFILI MAGNETOTELLURICI	42
5. RISULTATI OTTENUTI	43

Allegati:

- Sezione 1 - VALPEGARA

1. INTRODUZIONE

La presente relazione illustra e descrive le indagini geofisiche con metodologia magnetotellurica (MT) realizzate nel periodo Giugno-Luglio 2011 dalla ditta Techgea sul tracciato di progetto Preliminare dell'Autostrada A31 Trento – Valdastico-Piovene Rocchette.

Scopo principale dell'indagine è stata la caratterizzazione litostratigrafica del sottosuolo, in particolare nelle zone di elevata copertura delle gallerie (in ambiente montano a morfologia irregolare) dove risulta difficoltoso realizzare indagini alternative.

Più in dettaglio, la tecnica di indagine MT determina le caratteristiche di resistività elettrica del sottosuolo, consentendo di valutare sia le variazioni verticali (attribuibili a cambi litologici o a cambi delle proprietà fisiche dell'ammasso roccioso, quali fatturazione o contenuto d'acqua) e sia le variazioni laterali, generalmente collegate a discontinuità tettoniche (con riduzione della resistività elettrica legata a fenomeni di cataclasi o per circolazione idrica).

Sono stati tracciate complessivamente n. 7 sezioni MT. Di queste n.6 ricadono oltre lo svincolo di Valle dell'Astico dove ha termine il 1° lotto, e la sola traversa magnetotellurica denominata MT01P ricade in corrispondenza del tracciato di progetto definitivo e più precisamente in corrispondenza del settore settentrionale della galleria S Pietro.

Di seguito sono descritte le caratteristiche del metodo impiegato e la sezione interpretativa dello stendimento MT01P di interesse progettuale.

2. Descrizione del metodo di indagine Magnetotellurico

I sistemi MT (si definiscono AMT quelli che lavorano su bande di frequenza $\geq 10\text{Hz}$) appartengono tipologicamente al gruppo di indagini EM (elettromagnetiche) e sono impiegati per rilevare l'impedenza elettrica alla superficie terrestre utilizzando una serie di misure simultanee delle fluttuazioni del campo elettrico e magnetico locale.

Tali misurazioni di terreno sono fatte per un periodo di diversi minuti secondo bande di frequenza stabilite che, per la strumentazione impiegata, variano da 10Hz fino a 10 kHz (da qui classificabile di tipo audiomagnetotellurica); ad esse viene applicata la trasformata di Fourier e quindi memorizzate come spettri di impedenza (Figura 1).

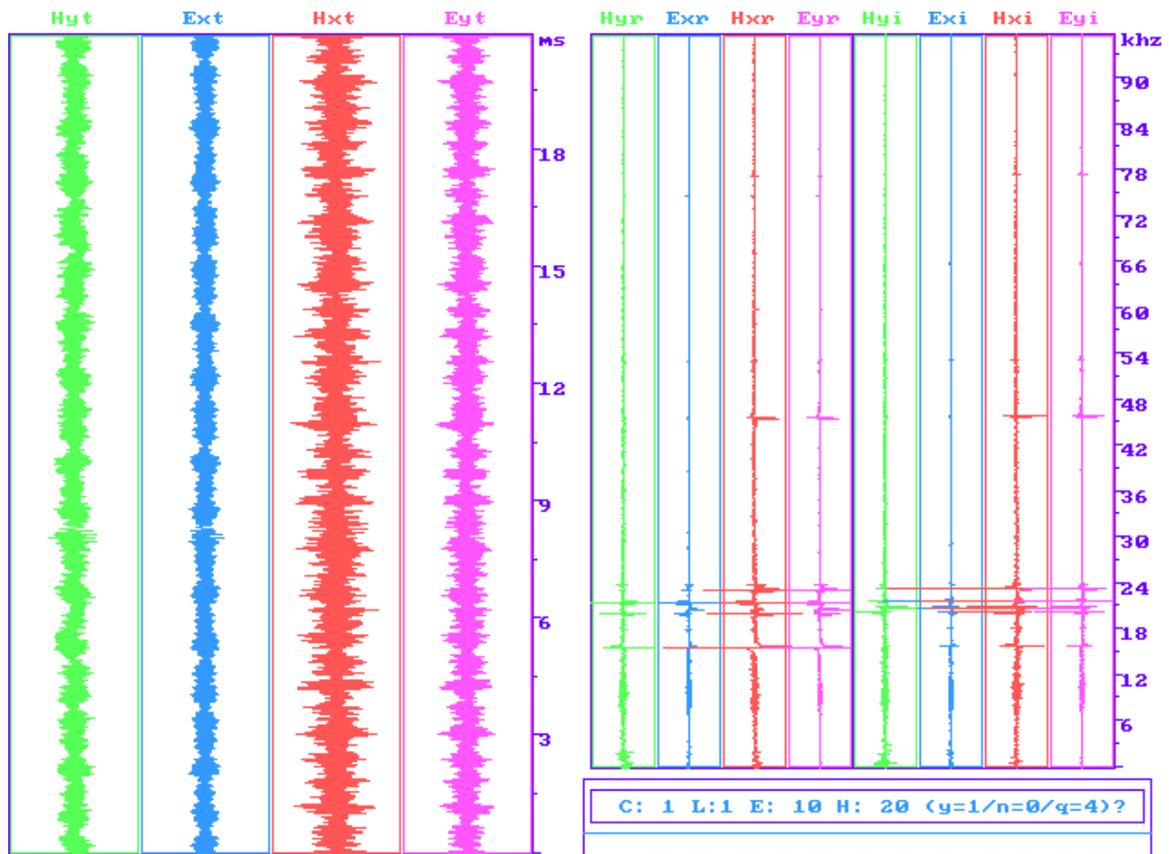


Figura 1 - Serie temporali e loro trasformazione nel dominio della frequenza con scomposizione nella componente reale ed immaginaria (parte dx del grafico)

Durante il rilievo il parametro che viene misurato è l'**impedenza**; nella prospezione MT, se con E_x si indica la componente del campo elettrico in una arbitraria direzione orizzontale e con H_y il campo magnetico associato, in una direzione ortogonale, l'**impedenza di superficie** Z_s vale:

$$Z_s = E_x/H_y$$

L'impedenza di superficie è un numero complesso a causa della differenza di fase tra H_y e E_x . Le misure di impedenza di superficie in funzione della frequenza possono essere interpretate in termini di proprietà elettriche del sottosuolo. L'impedenza di superficie, che dipende dalla frequenza, è un tensore (misure del vettore totale del campo magnetico ed elettrico) se la struttura della conducibilità non è stratificata (cioè se il mezzo è omogeneo). Diventa uno scalare in presenza di una struttura stratificata isotropa.

L'impedenza di superficie calcolata da questi valori spettrali è una funzione complessa della frequenza dove i dati di frequenza più elevati sono influenzati dalle strutture poco profonde e vicine e quelli di frequenza più bassa dalle strutture allocate a profondità più elevata e a maggiore distanza dal sito di misura.

I moderni sistemi di magnetotellurica sono progettati per registrare variazioni di entrambi i campi, magnetico ed elettrico, in due direzioni ortogonali, ed utilizzano queste registrazioni per calcolare l'impedenza di superficie nel sito di misura. La formulazione tensoriale è preferita a quella scalare quando i campi sorgente sono assimilabili a onde piane in quanto gli elementi di impedenza Z non variano nel tempo (l'impedenza di superficie scalare è più facile da calcolare ma può variare quando variano i campi sorgente).

Il passaggio dalla variazione di impedenza alla resistività elettrica reale del sottosuolo avviene grazie all'applicazione di un algoritmo di calcolo iterativo (si veda allegato 1), con restituzione delle curve di resistività elettrica reale (Figura 2).

Per lo scopo delle indagini geologiche, un sondaggio MT fornisce quindi una stima della resistività verticale al di sotto del punto ove è localizzato il ricevitore indicando inoltre la complessità geoelettrica dell'area del sondaggio. In zone dove la distribuzione della resistività non varia rapidamente tra diversi punti di misura, il sondaggio di resistività costituisce una ragionevole stima della stratificazione geoelettrica del sottosuolo.

Più in dettaglio, l'elaborazione dei dati viene effettuata con una procedura di 2D Analysis. Essa consiste nel plottaggio bidimensionale dei parametri calcolati per i singoli sondaggi punti di sondaggio opportunamente filtrati (utilizzando la funzione di Bostick). Quella che si ottiene quindi, una volta selezionati i punti che si intendono inserire nel profilo, è una rappresentazione della distribuzione delle unità fisiche misurate (resistività/profondità, resistività/frequenza e fase/frequenza).

Nella realizzazione dell'immagine bidimensionale del sottosuolo si può scegliere il fattore di *smoothing* che rappresenta la lunghezza del filtro spaziale che viene applicato ai dati. Il significato del fattore di smoothing è immediato: un valore elevato tenderà a fornire un'immagine piuttosto piatta e con poca risoluzione orizzontale, ma con una buona stima della profondità. La scelta dovrà quindi essere un compromesso, il migliore ottenibile, tra l'esigenza di dettaglio orizzontale e precisione nella scala verticale. Non si tratta, in questo caso, di un procedimento di inversione, peraltro realizzabile quando le necessità e caratteristiche dell'indagine lo consigliano, bensì dell'applicazione di un filtro allo scalare (o al tensore) della resistività apparente misurata.

La profondità minima di "lettura" è regolata dalla legge della *skin depth* ed è funzione della radice quadrata del rapporto resistività/frequenza.

Il prodotto finale è costituito da una sezione che definisce la distribuzione della resistività elettrica in funzione della profondità, molto simile ad una sezione geoelettrica.

```

IMAGEM (ver.2.19)
    Copyright (C)
    EMI 1998
    HHHHHHHHHHHHHHHHHHH
    pana.010 50Hz
    T:      0      0
    R:    2470    0
    X: 10.00 Y: 15.00
    PRINTER: HP COLOR

    1      OPTIONS
    2      GAIN SETTING
    3      ACQUISITION
    4      DATA ANALYSIS
    5  1-D ANALYSIS
    6      2-D ANALYSIS
    7      CHANGE MODE
    8      EXIT
    
```

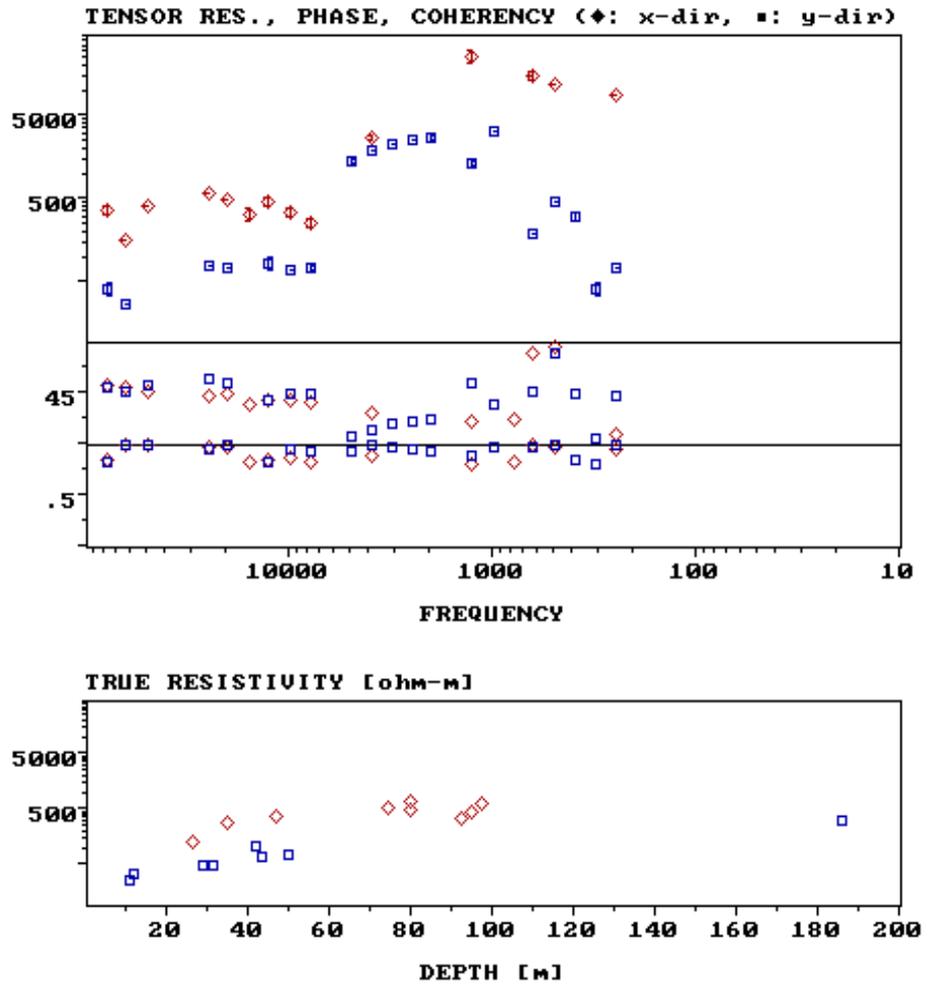


Figura 2 - Ampiezza, fase e coerenza (in funzione della frequenza) del segnale magnetico (Hx e Hy) ed elettrico (Ex e Ey), con derivazione della resistività reale

3. Strumentazione utilizzata

La configurazione in campo dello strumentazione MT prevede (Figura 3)

- la disposizione di 4 elettrodi disposti a croce (per comodità secondo i quattro punti cardinali)
- la disposizione dei due sensori elettromagnetici tra loro ortogonali ad una distanza di circa 25 m dallo strumento ricevente. Nel caso in esame sono stati usati sensori Phoenix con frequenza massima centrata di 10000 hz
- un'unità ricevente. Nel caso in esame, si è utilizzata l'unità Phoenix MTU-5

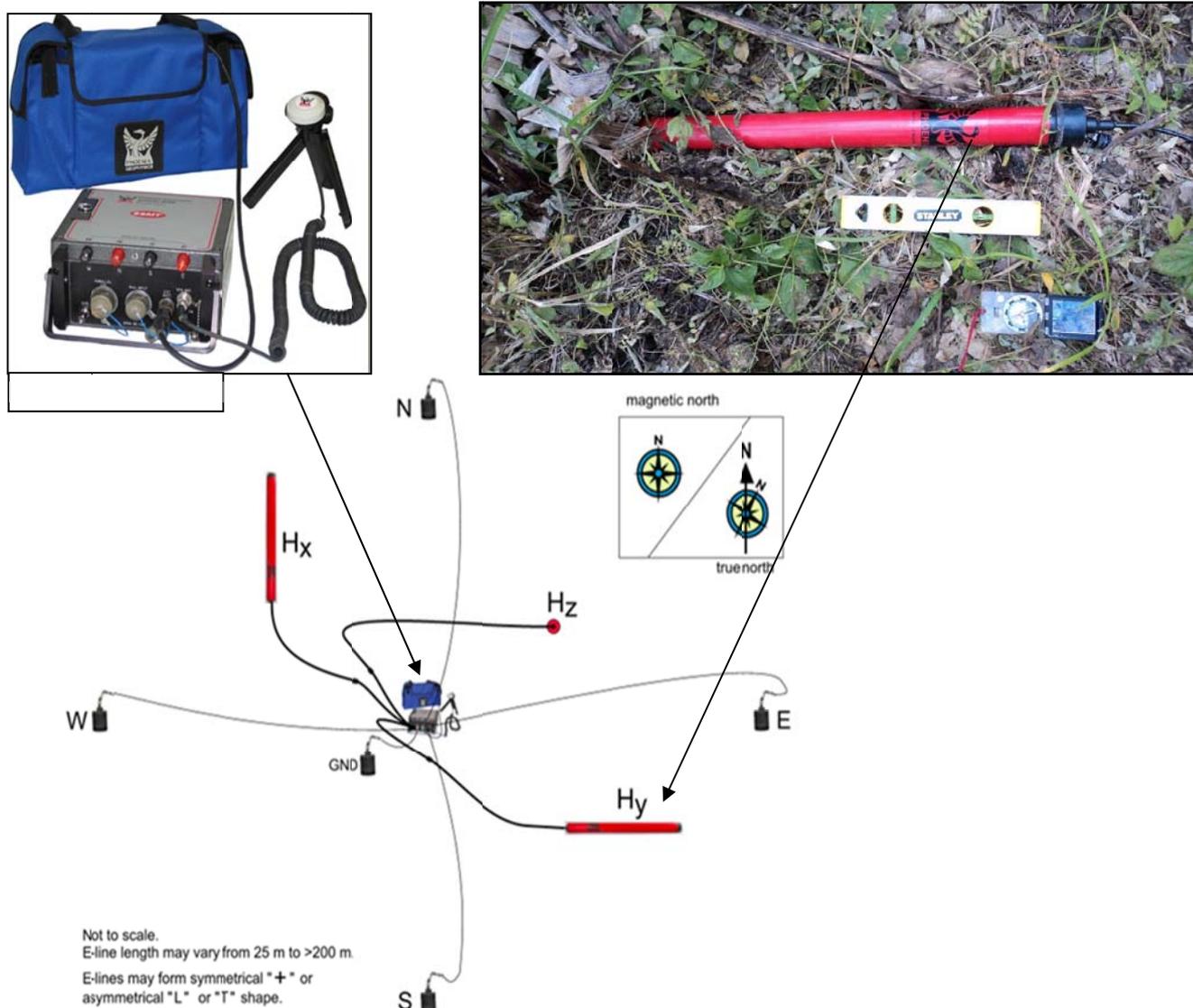


Figura 3 – disposizione della strumentazione MT

Trattandosi di un'indagine di tipo passivo, i sensori registrano le correnti elettriche naturali tempi di acquisizione variabili, ma generalmente sono compresi tra un minimo di 30 minuti fino a 12 ore per punto di misura (a seconda del disturbo presente).

Poiché si acquisiscono dei dati su un punto (sondaggio), per ottenere una sezione è necessario acquisire più punti lungo un allineamento, con una spaziatura tra i punti adeguata alla risoluzione richiesta (normalmente tra 50 e 100 m).

L'interpolazione tra dati adiacenti consente la definizione di una sezione di resistività elettrica (esattamente come nel caso di una sezione geoelettrica di resistività).

4. UBICAZIONE DEI PROFILI MAGNETOTELLURICI

L'ubicazione delle sezioni magnetotelluriche è riportata nella planimetria ubicazione indagini allegata al progetto nonché nelle tavole in allegato al testo.

L'elenco di punti di acquisizione (e delle relative sezioni) è riportato in tabella 1.

Sezione	PUNTO MT	UTC TIME	ZONA		X	Y	QUOTA
Sezione 1	01P01	9:38:17	32	T	682490	5083124	598
	01P02	10:41:35	32	T	682479	5083216	568
	01P03	11:24:48	32	T	682455	5083282	565
	01P04	12:35:52	32	T	682468	5083360	575
	01P05	14:29:26	32	T	682432	5083438	561
	01P06	15:43:39	32	T	682423	5083501	564
	01P07	16:41:12	32	T	682419	5083605	565

Tabella 1 - Elenco punti di misura.

5. RISULTATI ottenuti

I risultati delle sezioni di resistività elettrica derivanti dalla modellazione dei singoli punti di misura MT sono riportati nelle sezioni allegare in calce al testo.

In generale, si rileva una stratificazione a differenti resistività elettrica, con variazioni verticali corrispondenti a variazioni litostratigrafica e variazioni laterali più legate a presenza di faglie o (più in generale) discontinuità tettoniche.

In particolare, si osserva generalmente la presenza di:

- un elettrostrato superiore a resistività da media ($\rho > 500 \Omega.m$) a elevata ($\rho > 1000 \Omega.m$), con tonalità di colore rosso
- un elettrostrato intermedio a resistività da medio-bassa a bassa ($100 < \rho < 250 \Omega.m$) con tonalità di colore blu
- un elettrostrato basale (e generalmente molto profondo) con resistività simili o addirittura più elevate dell'elettrostrato superiore ($\rho > 1000 \Omega.m$), tonalità di colore rosso

Dalle informazioni che scaturiscono dalla cartografia geologica si può dedurre che lo strato superiore resistivo corrisponda alla sequenza calcarea triassica (dal Biancone, ai Calcari Grigi fino alla Dolomia Principale), i cui spessori possono variare lateralmente per effetto dei rigetti e delle dislocazioni tettoniche.

La sequenza conduttiva intermedia è costituita a sua volta da “blocchi” tettonici dislocati da linee strutturali di svincolo che, in alcuni casi, proseguono fino a grande profondità. Si tratta verosimilmente di una sequenza litologica avente caratteristiche tali da mostrare un’ apprezzabile riduzione dei valori di resistività elettrica.

Infine l’elettrostrato basale, rilevato solo in alcuni casi e comunque posto a profondità molto superiori rispetto alle opere, può essere interpretato come il substrato metamorfico sottostante al permotrias.

Il passaggio dal modello geofisico al modello geologico non è possibile senza una conoscenza dettagliata dell’assetto geologico locale. I “motivi” geofisici salienti, elettrostratigrafia (sequenza litostratigrafica) e discontinuità verticali (faglie) forniscono tuttavia un fondamentale ausilio per la definizione del modello geologico.

Dal quadro informativo disponibile l’interpretazione dello stendimento MT01P porta ad ipotizzare lo sviluppo della galleria (posta attorno alla quota 300 mslm) entro la Dolomia Principale in facies fratturata.

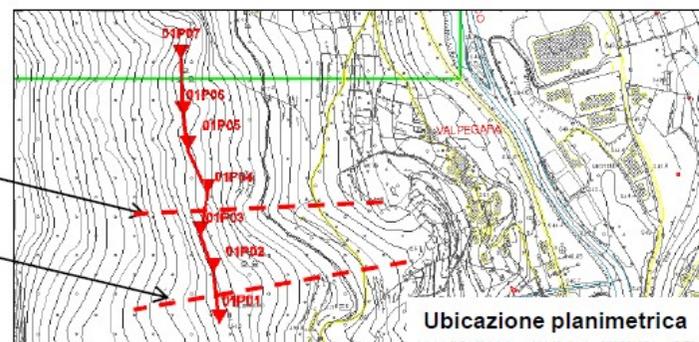
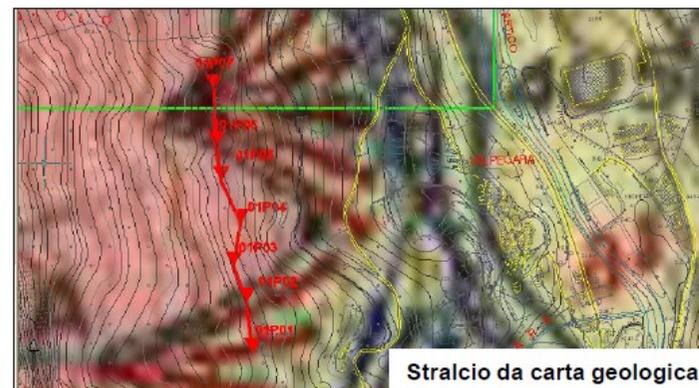
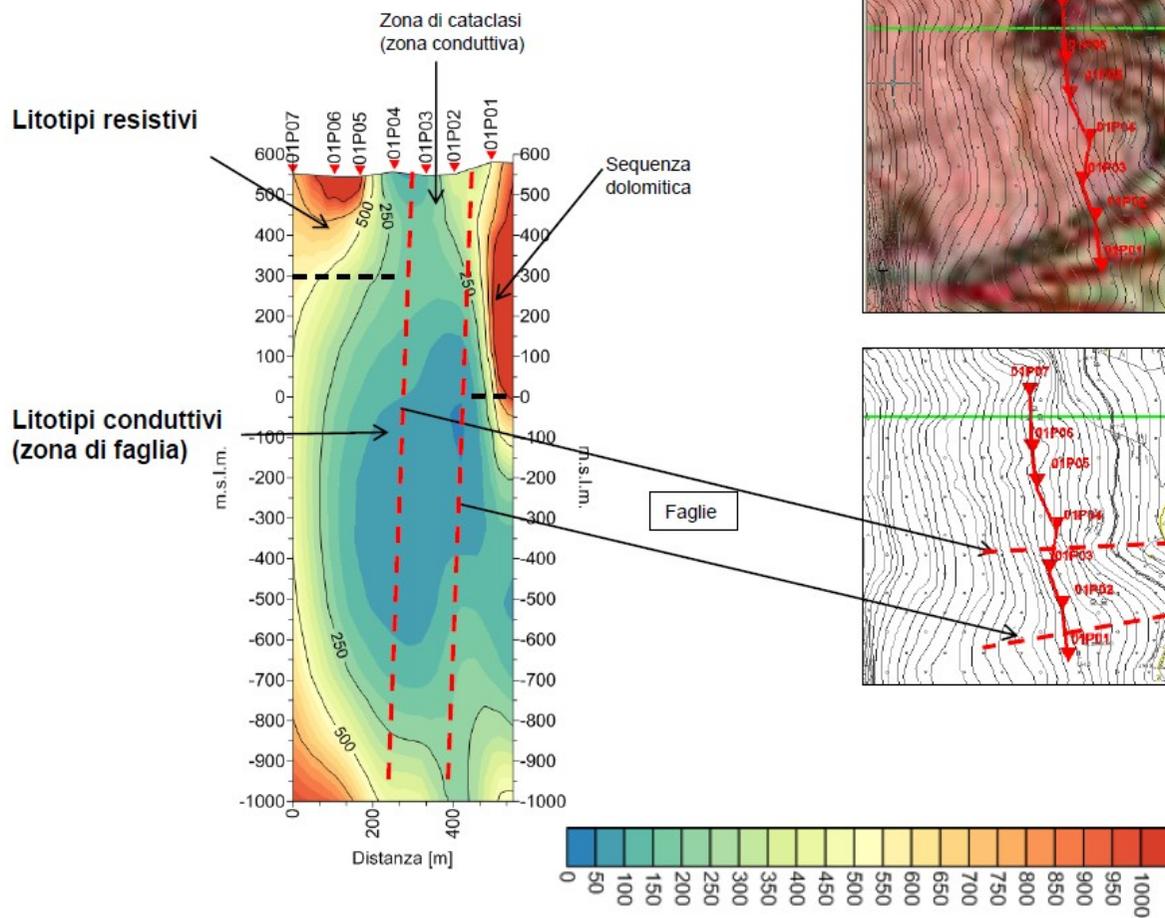
ALLEGATO

STENDIMENTO MAGNETOTELLURICO MT01P

AUTOSTRADA VALDASTICO A31 NORD
1° LOTTO - PIOVENE ROCCHETTE – VALLE DELL'ASTICO

Sezione 1 – Valpegara

Profili MT P01 ÷ P07



Techgea Srl Indagini geofisiche - www.techgea.eu	
Committente:	Consorzio Raetia
Progetto:	Indagine magnetotellurica
Sito:	A31 tronco Nord
Data:	Luglio 2011
Relazione:	1795/11
	Tavola: 10