

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIREZIONE TECNICA
S.O. GEOLOGIA TECNICA**

PROGETTO DEFINITIVO

**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA**

**TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2)
Nuova Viabilità NV02**

INDAGINI GEOGNOSTICHE

Indagini Geofisiche

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RS90 00 Y 69 IG GE0005 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	SOCOTEC	Mag.2023	A. Salvagnini	Mag.2023	A. Barreca	Mag.2023	G. Benedetti

Mag.2023
ITALFERR S.p.A.
Gruppo Ferrovie dello Stato Italiano
Dott. Geol. Giampaolo Benedetti
Ordine dei Geologi Emilia Romagna
n. 1019

File: RS9000Y69IGGE0005001A.pdf

n. Elab.:

Indice

1.	PREMESSA	2
2.	METODO MASW.....	3
2.1.	PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E CENNI SUL METODO	3
2.2.	STRUMENTAZIONE IMPIEGATA	5
2.3.	SCHEMA DI ACQUISIZIONE	7
3.	RISULTATI INDAGINI MASW	8
4.	METODO SISMICA A RIFRAZIONE (SRT)	9
4.1.	PRINCIPI BASE DEL METODO.....	9
4.2.	FATTORI DI INFLUENZA DELLE VELOCITÀ SISMICHE.....	11
4.3.	STRUMENTAZIONE IMPIEGATA	14
4.4.	SCHEMA DI ACQUISIZIONE.....	14
4.5.	PROCESSING.....	14
5.	RISULTATI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE.....	16
6.	BIBLIOGRAFIA	18
	ALLEGATI	19

1. PREMESSA

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini geofisiche eseguite presso Cerda (PA) per la caratterizzazione geologica del sito investigato.

In particolare, sono state effettuate n°4 indagini di sismica a rifrazione, n°1 indagini di sismica tipo MASW (fig.1).



Figura 1 - Ubicazione Indagini.

2. METODO MASW

2.1. Principi di funzionamento e cenni sul metodo

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva, che individua il profilo di velocità delle onde di taglio V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo. La determinazione delle V_s viene ottenuta tramite l'inversione delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh (Fig. 2).

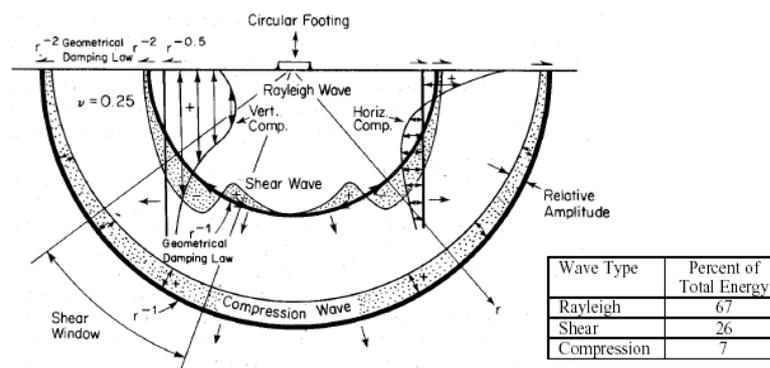


Figura 2 - Distribuzione delle onde di Rayleigh nel sottosuolo.

In un mezzo stratificato, le onde di Rayleigh sono dispersive, ossia onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999; Aki, K. and Richards, P.G., 1980). La velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh, quindi, dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza, ossia con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali dando, quindi, informazioni sulla porzione più superficiale del suolo. Onde a bassa frequenza, invece, si propagano negli strati più profondi dando informazioni, quindi, sulla parte più profonda del suolo. Le indagini MASW si distinguono in attive e passive o in una combinazione di entrambe. Nel metodo attivo, le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Nel metodo passivo, lo stendimento dei sensori può essere sia lineare, sia circolare e consente di misurare anche il rumore ambientale di fondo esistente.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2) Nuova Viabilità NV02</p>					
<p>Indagini geofisiche</p>	<p>COD. DOC. RS90</p>	<p>LOTTO 00 Y 69</p>	<p>CODIFICA IG</p>	<p>DOCUMENTO GE0005 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 4 di 20</p>

Facendo riferimento al metodo attivo da noi utilizzato, possiamo dire che, una generica acquisizione di segnali sismici lungo uno stendimento lineare, con sorgente esterna alla linea sismica, può essere rappresentata come una funzione $u(x, t)$ dove x è lo spazio e t il tempo.

Applicando ai segnali la trasformata di Fourier lungo l'asse dei tempi, otteniamo la funzione $U(x, f)$:

$$U(x, f) = \int u(x, t) e^{ift} dt \quad (2.1)$$

La funzione $U(x, f)$ può essere espressa come la moltiplicazione di due termini separati:

$$U(x, f) = P(x, f) A(x, f) \quad (2.2)$$

dove $P(x, f)$ e $A(x, f)$ rappresentano, rispettivamente, lo spettro di fase e di ampiezza.

Nella funzione $U(x, f)$, ogni componente in frequenza è completamente separata dalle altre e l'informazione del tempo di arrivo è preservata nello spettro di fase $P(x, f)$.

Nella funzione $P(x, f)$, sono contenute inoltre tutte le informazioni relative alla dispersione delle onde superficiali di Rayleigh mentre la funzione $A(x, f)$ contiene tutte le informazioni inerenti l'attenuazione e la divergenza sferica. Tenendo conto della rappresentazione esponenziale dello spettro di fase, la (2.2) può essere espressa come:

$$U(x, f) = e^{-i\phi x} A(x, f) \quad (2.3)$$

Dove $F=f/cf$ con f = frequenza angolare e cf = velocità di fase per ogni frequenza.

Operando un integrale di linea in dx e normalizzando per il modulo della funzione $|U(x, f)|$, otteniamo la funzione $V(f, \phi)$:

$$V(f, \phi) = \int e^{i\phi x} [U(x, f) / |U(x, f)|] dx = \int e^{-i(\Phi-\phi)x} [A(x, f) / |A(x, f)|] dx \quad (2.4)$$

La funzione $V(f, \phi)$, ottenuta dalla trasformazione integrale, può essere pensata come la somma, lungo tutto lo stendimento, del campo d'onda relativo ad ogni frequenza, applicando uno shift di fase dipendente dall'offset, al campo d'onda, per un'assunta velocità di fase $cf = f/\phi$.

La normalizzazione al modulo della funzione $|U(x, f)|$, minimizza i fenomeni di attenuazione e di divergenza sferica. Risulta ovvio che la funzione $V(f, \phi)$ avrà un massimo in corrispondenza di un valore:

$$\phi = F = f / cf \quad (2.5)$$

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2) Nuova Viabilità NV02					
Indagini geofisiche	COD. DOC. RS90	LOTTO 00 Y 69	CODIFICA IG	DOCUMENTO GE0005 001	REV. A	FOGLIO 5 di 20

Per un dato valore di ϕ , dove si verifica un massimo della funzione $V(f, \phi)$, la velocità di fase c_f può essere determinata. Tenendo conto che $c_f = f/\phi$, la funzione $V(f, \phi)$ può essere trasformata nella funzione $I(f, c_f)$ che viene definita “spettro di velocità di fase”. In essa, lungo l’asse c_f , appariranno dei picchi che soddisferanno, per ogni frequenza, l’equazione (2.5). Il luogo dei punti lungo questi massimi, per differenti valori di frequenza f , permette di identificare le curve di dispersione delle velocità di fase dei modi di oscillazione dell’onda superficiale di Rayleigh.

La curva di dispersione media delle velocità di fase dell’onda di Rayleigh, estratta con la metodologia MASW, è invertita al fine ottenere un modello monodimensionale di onde di taglio.

2.2. Strumentazione impiegata

L’apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prova si compone delle seguenti parti:

- sistema energizzante;
- sistema di ricezione;
- trigger;
- sistema di acquisizione dati.

Nel dettaglio:

sistema energizzante: tale sistema deve essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d’onda ripetibili e direzionali. Per generare le onde di compressione P è stata utilizzata una massa battente da 5kg.

sistema di ricezione: per l’indagine sono stati utilizzati 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz (Fig. 3).

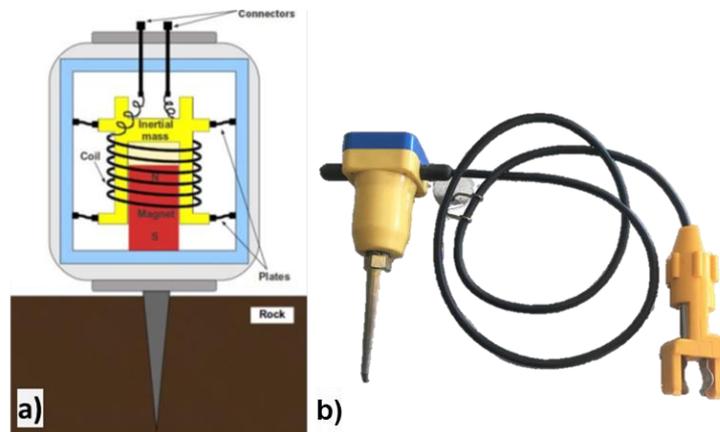


Figura 3 – Geofoni per onda P ed Sh; a) schema di funzionamento del geofono per onda P; b) geofono per onda P con frequenza caratteristica di 4.5 Hz.

trigger: la metodologia utilizzata, in quanto attiva, prevede che l’inizio della registrazione sia individuato mediante un *trigger*: consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell’istante in cui la massa battente colpisce la piastra o la trave (nel nostro caso si è usato un geofono starter) e l’impulso generato, inviato al sistema di acquisizione, consente di fissare il tempo zero di riferimento per il calcolo dei tempi di percorso delle onde generate.

sistema di acquisizione dati: sismografo costituito da un sistema multicanale a conversione digitale. Il modello è denominato *GEODE* (prodotto dalla *GEOMETRICS*, Fig. 4; Tab. 1) ed è caratterizzato da una risoluzione di acquisizione pari a 24 bit (Tecnologia Delta Sigma). Tale sistema è in grado di registrare, su ciascun canale in forma digitale, le forme d’onda e di conservarle su memoria di massa dinamica minima a 24 bit. Esso è collegato a ciascuno dei geofoni ed al sensore del trigger, consentendo quindi di registrare in forma numerica e visualizzare sotto forma di tracce, su un apposito monitor, le vibrazioni a partire dall’impulso inviato dal trigger.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2) Nuova Viabilità NV02					
	Indagini geofisiche	COD. DOC. RS90	LOTTO 00 Y 69	CODIFICA IG	DOCUMENTO GE0005 001	REV. A



Figura 4 - Sismografo GEODE (Geometrics).

A/D Conversion:	24 bit (Crystal Semiconductor sigma-delta converters)
DynamicRange:	144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2ms, 24dB.
Distortion:	0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz.
Bandwidth:	1.75 Hz to 20 kHz
Common Mode Rejection:	> -100 dB at <=100 Hz, 36 dB.
Crosstalk:	-125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms.
Noise Floor:	0.2uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz.
Stacking Trigger Accuracy:	1/32 of sample interval.
Maximum Input Signal:	2.8 VPP.
Input Impedance:	20 kOhm, 0.02 uf.
Preamplifier Gains: dB, or 0dB.	24 or 36 dB
Anti-alias Filters:	-3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB.
Pre-trigger Data:	Up to 4,096 Samples.
Sample Interval:	0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms.
Record Length:	16,000 samples standard
Delay:	0 to 9999 ms in 1 ms steps.
Data Transmission:	Ethernet connections

Tabella 1 - Specifiche tecniche Sismografo GEODE.

2.3. Schema di acquisizione

Lo stendimento sismico (Fig. 5) è stato realizzato utilizzando 24 canali d'acquisizione (geofoni) con passo intergeofonico pari a 2 m.

Per tutti i dati sismici il tempo di acquisizione è pari a 1 s e l'intervallo di campionamento corrisponde a 0.125 μ s.



Figura 5 - Fasi di acquisizione all'interno della galleria

3. RISULTATI INDAGINI MASW

L'indagine MASW, condotta nei pressi della stazione ferroviaria di Cerda a valle del pendio ubicato ad est, ha consentito di ottenere un modello monodimensionale di Vs che, com'è noto, può essere ritenuto esaustivo del profilo verticale di Vs nel punto centrale dello stendimento.

L'indagine MASW ha evidenziato la presenza di terreni che vanno a collocarsi nella categoria di suolo tipo **C**, secondo la normativa NTC2018. Le velocità in onda Sh risultano crescenti gradualmente con la profondità non evidenziando la presenza di lenti di materiale particolarmente incoerente. Inoltre, a circa 5 m dal p.c. si riscontra un netto aumento delle Vs da circa 220 m/s a 380 m/s dovuto al passaggio da materiale incoerente probabilmente rimaneggiato a materiale in posto mediamente consolidato.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2) Nuova Viabilità NV02					
	Indagini geofisiche	COD. DOC. RS90	LOTTO 00 Y 69	CODIFICA IG	DOCUMENTO GE0005 001	REV. A

Sismostrato	Profondità		Spessore	Vs (m/s)	V _{seq(0-30)}	341 m/s
1	0.00	2.80	2.80	210.00		
2	2.80	5.40	2.60	220.00		
3	5.40	24.40	19.00	380.00		
4	24.40	Inf.	Inf.	440.00	Suolo	C

Tabella 2 - Modello 1D Vsh, V_{seq(0-30)} e categoria di suolo.

Per i dettagli si rimanda agli elaborati grafici allegati alla presente relazione.

4. METODO SISMICA A RIFRAZIONE (SRT)

4.1. Principi base del metodo

Le indagini indirette, ed in particolare la metodologia a rifrazione, permettono la ricostruzione areale delle geometrie e degli spessori dei depositi di copertura, la profondità del substrato (entro i limiti di penetrazione del metodo), la verifica di eventuali discontinuità laterali, nonché di determinare le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali attraverso la determinazione dei moduli elastici dinamici. Il metodo di sismica a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo, giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde coniche o birifratte (*head wave*): le onde analizzate sono quelle birifratte ossia quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza. I contrasti di proprietà possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche. L'indagine viene eseguita disponendo una serie di i trasduttori del moto del suolo (velocimetri o accelerometri) lungo la superficie libera del suolo e generando onde elastiche da una sorgente puntiforme che può essere una massa battente, un fucile sismico o una carica esplosiva. I trasduttori situati più vicino alla sorgente rilevano prima l'onda diretta che arriva con velocità legata alle caratteristiche meccaniche dello strato di terreno più superficiale,

mentre quelli più lontani rilevano le onde birifratte che viaggiano a velocità più elevata. Quando l'onda birifratta avrà percorso sufficiente distanza alla velocità V_2 , essa arriverà prima della diretta (Fig. 6).

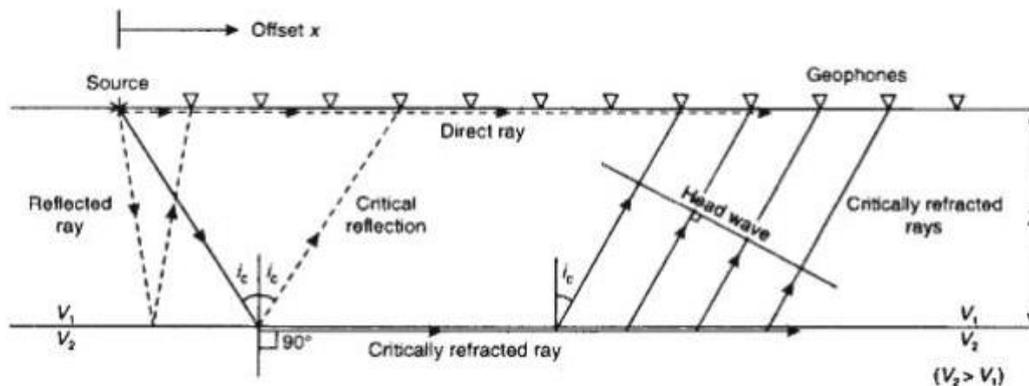


Figura 6 - Schema illustrativo delle onde sismiche

Se si riporta in un semplice grafico x-y, per ogni distanza di ciascun ricevitore, il tempo di arrivo del primo impulso letto sui sismogrammi, i punti si dispongono in una serie di allineamenti di cui il primo passante per l'origine: ciascuna linea è detta "dromocrona" ed è rappresentativa della velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo posto al di sopra di un rifratte (una superficie di separazione più o meno netta tra due materiali a comportamento elastico diverso). Il coefficiente angolare della dromocrona passante per l'origine rappresenta l'inverso della velocità di propagazione delle onde elastiche nel primo strato (V_0), i coefficienti angolari delle altre dromocrone rappresentano l'inverso delle velocità degli strati sottostanti (dal più superficiale al più profondo). L'intersezione tra due dromocrone è detto "punto di ginocchio" e rappresenta il punto in cui arrivano contemporaneamente le onde rifratte da due rifrattori adiacenti o, se consideriamo le prime due dromocrone, le onde dirette e le onde rifratte dal primo rifratte. In un'indagine di sismica a rifrazione sarà possibile individuare un numero di punti di ginocchio pari al numero di rifrattori investigati (Fig. 7).

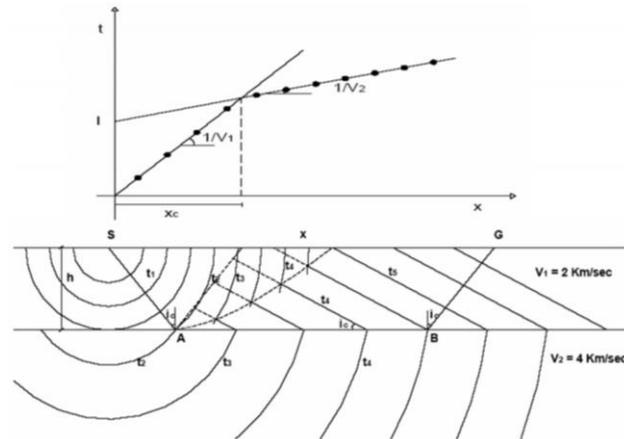


Figura 7 - Schema esemplificativo delle dromocroni in un sottosuolo a 2 strati.

Pertanto, più è profondo il rifrattore più il rispettivo punto di ginocchio sarà distante dalla sorgente: da ciò si deduce che gli impulsi rifratti possono essere ricevuti solo a partire da una certa distanza proporzionale alla profondità del rifrattore e che quindi la profondità totale di indagine è legata alla lunghezza dello stendimento dei ricevitori. Tramite semplici relazioni trigonometriche è possibile, note le velocità di propagazione delle onde elastiche nei diversi strati omogenei del sottosuolo, conoscere gli spessori di ciascuno di essi. Se gli strati sono poco spessi e caratterizzati da velocità crescente con la profondità (come normalmente avviene nei terreni non consolidati), i percorsi delle onde saranno curvi, con concavità rivolta verso l'alto, ed anche la corrispondente dromocrona sarà una curva. Nei casi reali, si assume che l'effetto delle onde dirette, in termini di ampiezza delle vibrazioni, sia predominante rispetto a quello delle onde indirette, tanto da potere trascurare queste ultime e considerare il mezzo, limitatamente all'area comprendente la sorgente e il ricevitore, come mezzo omogeneo, isotropo e non confinato.

4.2. Fattori di influenza delle velocità sismiche

Sebbene la velocità dell'onda P sia un buon indicatore del tipo di terreno o di roccia, non è un indicatore univoco. Ogni tipo di sedimento o roccia ha una vasta gamma di velocità sismiche e molti di questi range si sovrappongono tra loro. Ci sono molte variabili che influenzano il modulo elastico e quindi la velocità

delle onde di compressione delle rocce e dei terreni. Nelle tabelle 3 e 4, si riportano le velocità da bibliografia di alcune delle principali litologie.

VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE		
LITOLOGIA	VELOCITA' [m/sec]	
Suoli superficiali	300	700
Limi ed argille sature	1100	2500
Arenarie sature e porose	2000	3500
Acqua	1450	1500
Sabbie asciutte	400	1200
Sabbie sature	1500	2000
Arenarie	2100	4400
Argilliti	2000	6000
Calcari	2000	7000
Dolomie	2500	6500
Marne	2000	3000

Tabella 3 - Velocità delle onde di compressione di alcuni terreni.

VELOCITA' ONDE DI TAGLIO		
LITOLOGIA	VELOCITA' [m/sec]	
Suoli superficiali	50	300
Limi ed argille sature	200	800
Arenarie sature e porose	800	1800
Acqua	-	-
Sabbie asciutte	100	500
Sabbie sature	400	600
Arenarie	900	3100
Argilliti	500	2100
Calcari	1000	3500
Dolomie	1200	3800
Marne	750	1500

Tabella 4 - Velocità delle onde di taglio di alcuni terreni.

I primi esperimenti sulla variazione delle proprietà elastiche delle rocce sono iniziati tra il 1950 e il 1960. A quel tempo molti ricercatori (Wyllie et al., 1956; 1962; 1963; 1985) hanno studiato i cambiamenti della

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2) Nuova Viabilità NV02					
Indagini geofisiche	COD. DOC. RS90	LOTTO 00 Y 69	CODIFICA IG	DOCUMENTO GE0005 001	REV. A	FOGLIO 13 di 20

velocità di elasticità onde in funzione di saturazione, porosità e contenuto in argilla, fratturazione. In particolare:

- **Saturazione:** in condizioni di saturazione totale, la velocità delle onde P è controllata dal mezzo liquido (che è incompressibile) se superiore a quello dello scheletro solido: questo perché la velocità delle onde S non risulta influenzata da tale parametro (l'acqua non può sostenere sforzi di taglio). Per saturazioni parziali, invece, la velocità delle onde P è inferiore a quella ottenibile alla massima saturazione ma, nel contempo, è inferiore anche a quella che si ottiene per gli stati secchi.
- **Porosità e contenuto in argilla:** la diminuzione della velocità associata ad un aumento del contenuto di argilla può essere confrontata con la diminuzione della velocità associata ad un aumento della porosità. Infatti, le particelle di argilla creano una microporosità composta da piccoli pori di 1 μm riducendo notevolmente la dimensione dei pori. Da vari studi effettuati in merito, si evince che una gran parte della variazione della velocità dovuta al cambiamento di contenuto di argilla, è attribuibile alla significativa quantità di microporosità presente all'interno di minerali di argilla. Si riscontra, infatti, un brusco cambiamento delle proprietà della matrice rocciosa con l'aggiunta di una piccola quantità d'argilla.
- **Fratturazione:** il grado di fratturazione di una formazione rocciosa è legato alle proprietà idrogeologiche delle rocce, come la porosità e la permeabilità (capacità delle rocce di farsi attraversare dalle acque). L'importanza dell'impiego del metodo sismico per la valutazione del grado di fratturazione di una formazione rocciosa, è basata sulle evidenze sperimentali che indicano una diminuzione della velocità delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s) e un aumento del coefficiente di attenuazione α al crescere della densità di frattura. In sintesi, le indagini suggeriscono che le velocità delle onde P e S decrescono con l'aumentare dei parametri di frattura, mentre il rapporto V_p/V_s aumenta con il decrescere dei parametri di frattura.

Le velocità sismiche che si andranno a misurare su rocce o terreni, pertanto, saranno spesso influenzate dall'effetto contemporaneo di tutti i fattori citati (oltre che ad altri meno importanti nel nostro contesto).

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2) Nuova Viabilità NV02					
Indagini geofisiche	COD. DOC. RS90	LOTTO 00 Y 69	CODIFICA IG	DOCUMENTO GE0005 001	REV. A	FOGLIO 14 di 20

4.3. Strumentazione impiegata

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove è la stessa utilizzata per le indagini MASW; si veda il paragrafo 2.2.

4.4. Schema di acquisizione

Gli stendimenti sismici sono stati realizzati utilizzando un diverso numero di geofoni a seconda della linea effettuata e visibili in allegato grafico e passo intergeofonico di 5 m.

Lo stendimento è caratterizzato da:

- tempo di acquisizione: 2 s;
- intervallo di campionamento 1 ms.



Figura 8 – Esempio di fasi di acquisizione

4.5. Processing

Il processing del dataset di sismica a rifrazione è stato condotto mediante il Software RAYFRACT (Intelligent Resources Inc., Canada), studiato per l'elaborazione di dati relativi ad indagini sismiche eseguite in superficie, realizzate sia con onde P che S, per scopi geotecnico-ingegneristici, ambientali, nonché per l'esplorazione nel campo delle georisorse. Rayfract consente sia la ricostruzione della geometria dei rifrattori con la sismica a rifrazione tradizionale, che la realizzazione di dettagliati modelli di velocità del sottosuolo con le più evolute tecniche tomografiche, soprattutto nel caso di strutture profonde.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2) Nuova Viabilità NV02</p>					
<p>Indagini geofisiche</p>	<p>COD. DOC. RS90</p>	<p>LOTTO 00 Y 69</p>	<p>CODIFICA IG</p>	<p>DOCUMENTO GE0005 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 15 di 20</p>

Lo schema di interpretazione utilizzato nel presente lavoro è basato sulla creazione di un modello iniziale ottenuto mediante interpretazione con una tecnica sofisticata di processo dei tempi di primo arrivo basata sui metodi dei “Fronti d’onda” (Brückl, 1987; Jones and Jovanovich, 1985) e del Plus-minus (Hagedoorn, 1959), fondata su una regressione del campo dei tempi di primo arrivo (Brückl, 1987). Tale metodo può essere considerato un’ottimizzazione dell’algoritmo del GRM, capace di risolvere l’immagine dei rifrattori con andamenti topografici molto accidentati. A partire dal modello sopraccitato è stato quindi utilizzato il codice di calcolo per la modellazione tomografica che utilizza, nell’algoritmo d’inversione, un “raytracing” con raggi curvilinei e metodi di calcolo ai minimi quadrati attraverso il metodo Delta t-v (Gebrande and Miller, 1985), al fine di migliorare il riconoscimento e la localizzazione di strutture di forma anomala, stabilizzando la soluzione dell’algoritmo d’iterazione. In generale, il tempo di percorrenza di un’onda sismica lungo un percorso S attraverso un mezzo bidimensionale (2D) può essere scritto come

$$t = \int_S u[\mathbf{r}(x, y)] \quad (2.1)$$

dove $u(\mathbf{r})$ è il campo delle lentezze (l’inverso delle velocità) e \mathbf{r} è il vettore posizione. Discretizzando il campo di lentezze $u(\mathbf{r})$ con m celle equidimensionali ognuna caratterizzata da una lentezza costante u_k ($k=1, 2, \dots, m$) la dromocrona i -esima delle n disponibili può essere scritta come

$$t_i = \sum_{k=1}^m l_{ik} \cdot u_k \quad (2.2)$$

dove l_{ik} rappresenta la porzione dell’ i -esima dromocrona nella cella k -esima. Considerando tutte le dromocrone disponibili si ottiene il seguente sistema

$$\mathbf{t} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{u} \quad (2.3)$$

dove \mathbf{t} è il vettore dei dati sperimentali (tempi di primo arrivo letti sui sismogrammi), \mathbf{M} è la matrice rettangolare contenente le porzioni dei percorsi nelle varie celle, \mathbf{u} è il vettore delle lentezze (incognite del problema). Il problema inverso da risolvere è pertanto:

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2) Nuova Viabilità NV02</p>												
<p>Indagini geofisiche</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COD. DOC.</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS90</td> <td>00 Y 69</td> <td>IG</td> <td>GE0005 001</td> <td>A</td> <td>16 di 20</td> </tr> </tbody> </table>	COD. DOC.	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS90	00 Y 69	IG	GE0005 001	A	16 di 20
COD. DOC.	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS90	00 Y 69	IG	GE0005 001	A	16 di 20								

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{M}}^{-1} \cdot \mathbf{t} \quad (2.4)$$

dove \mathbf{M} è la matrice inversa generalizzata. Poiché i percorsi sismici dipendono dalle lentezze, la matrice \mathbf{M} dipende anche dalle lentezze e quindi il problema inverso è un problema non-lineare che deve essere risolto iterativamente partendo da una soluzione iniziale (modello di partenza). L'equazione da considerare è pertanto la seguente

$$\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{t} \quad (2.5)$$

dove $\Delta \mathbf{t}$ è la differenza tra i tempi sperimentali e i tempi calcolati per il modello di lentezze iniziale u_0 ; $\Delta \mathbf{u}$ è la perturbazione del modello iniziale; e \mathbf{J} è la matrice jacobiana contenente le derivate parziali delle dromocrone rispetto alle lentezze nelle celle. Poiché il problema è parzialmente sovradeterminato (per alcune celle si hanno molti percorsi) e parzialmente sottodeterminato (per alcune celle non è disponibile nessun percorso) esso è stato risolto con la tecnica dei minimi quadrati smorzati, cioè è stata minimizzata con la seguente funzione errore

$$\varphi = \|\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} - \Delta \mathbf{t}\|^2 + \lambda \|\mathbf{L}_2 \mathbf{u}\|^2 \quad (2.6)$$

dove λ è il fattore di smorzamento e la matrice \mathbf{L}_2 è una matrice derivata seconda (operatore laplaciano) che forza la soluzione verso la soluzione più regolare possibile (smoothest solution).

5. RISULTATI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE

L'indagine geofisica ha lo scopo di ottenere informazioni sulle caratteristiche dei terreni che insistono al di sotto dello stendimento sismico. Al fine di rendere più immediata l'interpretazione e il confronto delle sismiche effettuate, è stata utilizzata una sola scala (sia per le V_p che le V_s). In linea generale, le V_p hanno restituito valori massimi di 3470 m/s mentre le V_s di 1600 m/s.

Nonostante un graduale ed omogeneo aumento delle velocità con la profondità, nel settore più superficiale delle linee sismiche si riscontra la presenza di aree caratterizzate da valori di velocità (in

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2) Nuova Viabilità NV02					
Indagini geofisiche	COD. DOC. RS90	LOTTO 00 Y 69	CODIFICA IG	DOCUMENTO GE0005 001	REV. A	FOGLIO 17 di 20

particolare Vs) nettamente inferiori rispetto alla media di contorno; la loro velocità in onda Sh non supera i 240 m/s arrivando a toccare i 110 m/s e potrebbero essere causate dalla presenza di materiale particolarmente incoerente. Per una migliore visualizzazione, le linee effettuate sono state plottate in ambiente 3D (tavv. 11-14).

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA FIUMETORTO – LERCARA DIRAMAZIONE (Lotto 1+2) Nuova Viabilità NV02</p>												
<p>Indagini geofisiche</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COD. DOC.</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS90</td> <td>00 Y 69</td> <td>IG</td> <td>GE0005 001</td> <td>A</td> <td>18 di 20</td> </tr> </tbody> </table>	COD. DOC.	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS90	00 Y 69	IG	GE0005 001	A	18 di 20
COD. DOC.	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS90	00 Y 69	IG	GE0005 001	A	18 di 20								

6. BIBLIOGRAFIA

- Achenbach J. D., Xu Y., 1999. Wave motion in an isotropic elastic layer generated by a time-harmonic point load of arbitrary direction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 106, 83 – 90.
- Aki K., Richards P. G., 1980. Quantitative Seismology, Theory and Methods. *Geological Magazine*, 118, 02, DOI: 10.1017/S0016756800034439.
- Biot M. A., 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. *Journal of the Acoustic Society of America*, 28, 2, 168-191.
- Biot M. A., 1962. Mechaniscm of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics*, 33, 4, 1482-1498.
- Boadu F. K., 1997. Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties: Analytical studies. *Journal of Applied Geophysics*, 36, 1-19.
- Cessaro R.K., 1994. Sources of Primary and Secondary Microseisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 1, 142-148.
- Gutenberg, 1958. Two types of microseisms. *JGR*, 63, 3, 595-597.

Indagini geofisiche

COD. DOC.	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS90	00 Y 69	IG	GE0005 001	A	19 di 20

ALLEGATI



TEST REPORT

1/4

MASW

CLIENTE	ITALFERR		
LAVORO:	Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2		
UBICAZIONE	Cerda		
NOME TEST	MASW		
DATA DI ESECUZIONE	02/03/2023		
COORDINATE	Lat.	4201186.87 m N	
	Long.	393220.10 m E	





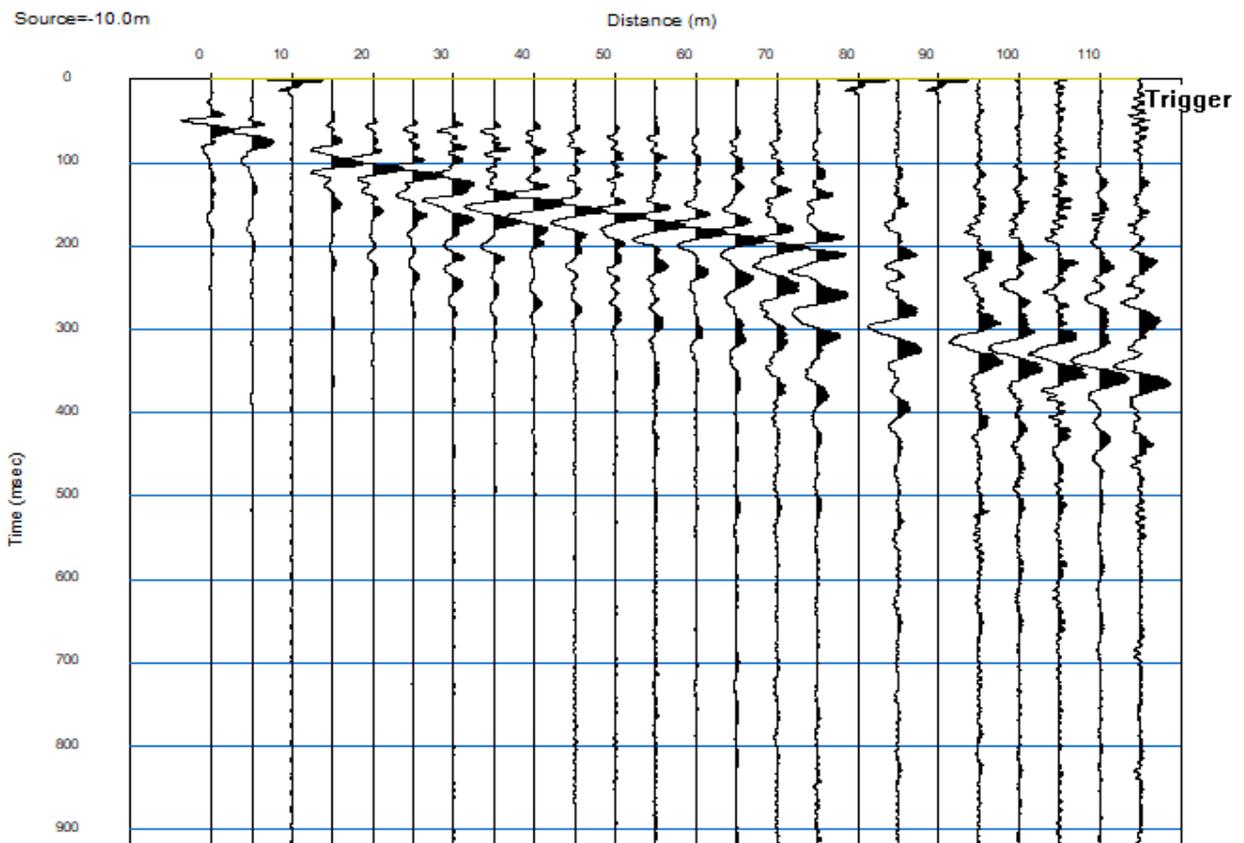
TEST REPORT

2/4

MASW

CLIENTE:	ITALFERR		
LAVORO:	Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2		
UBICAZIONE:	Cerda		
NOME TEST	MASW		
DATA DI ESECUZIONE	02/03/2023		
COORDINATE	Lat.	4201186.87 m N	
	Long.	393220.10 m E	

SISMOGRAMMA





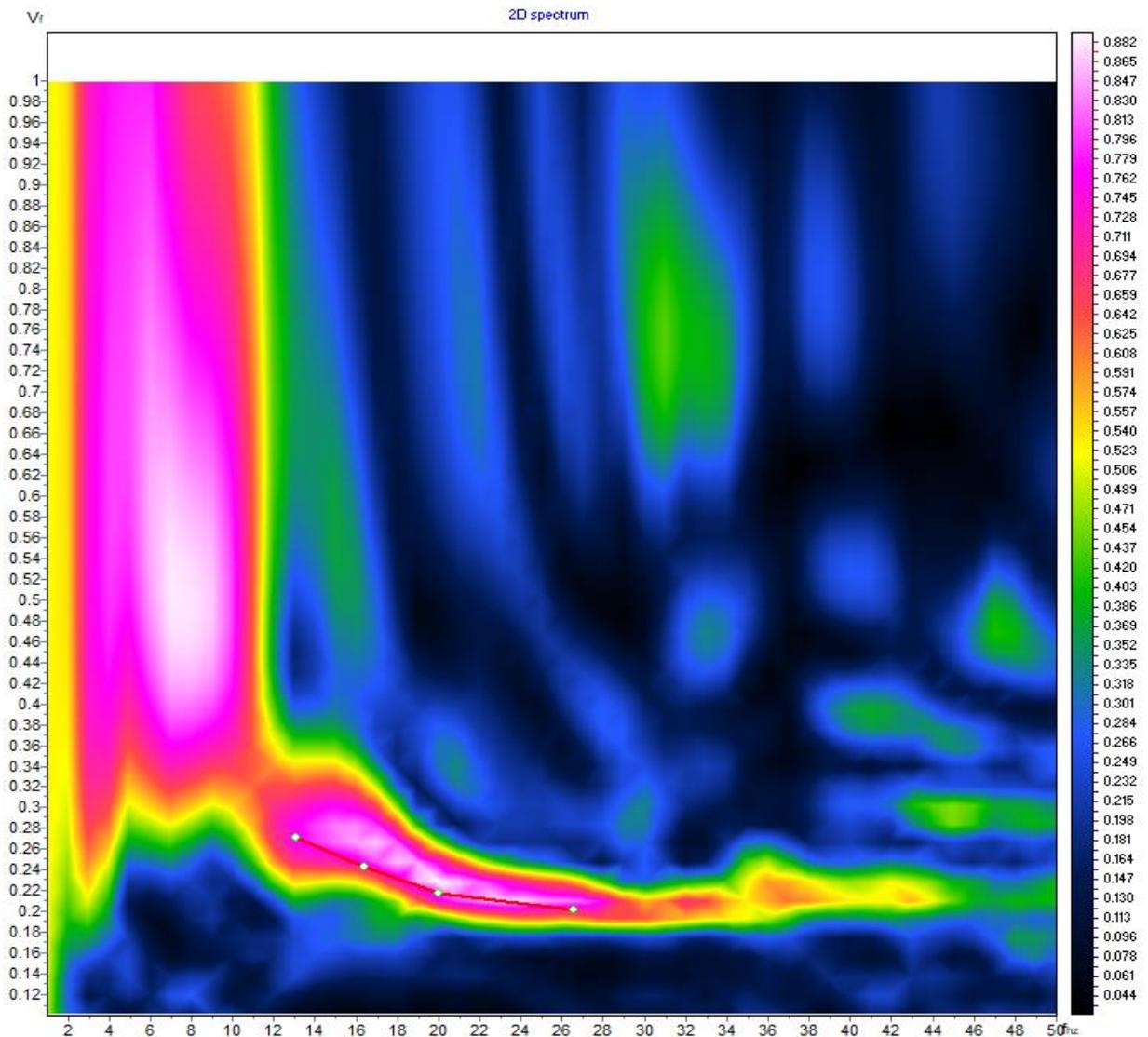
TEST REPORT

3/4

MASW

CLIENTE:	ITALFERR		
LAVORO:	Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2		
UBICAZIONE:	Cerda		
NOME TEST	MASW		
DATA DI ESECUZIONE	02/03/2023		
COORDINATE	Lat.	4201186.87 m N	
	Long.	393220.10 m E	

SPETTRO OSSERVATO E CURVA DI DISPERSIONE





TEST REPORT

4/4

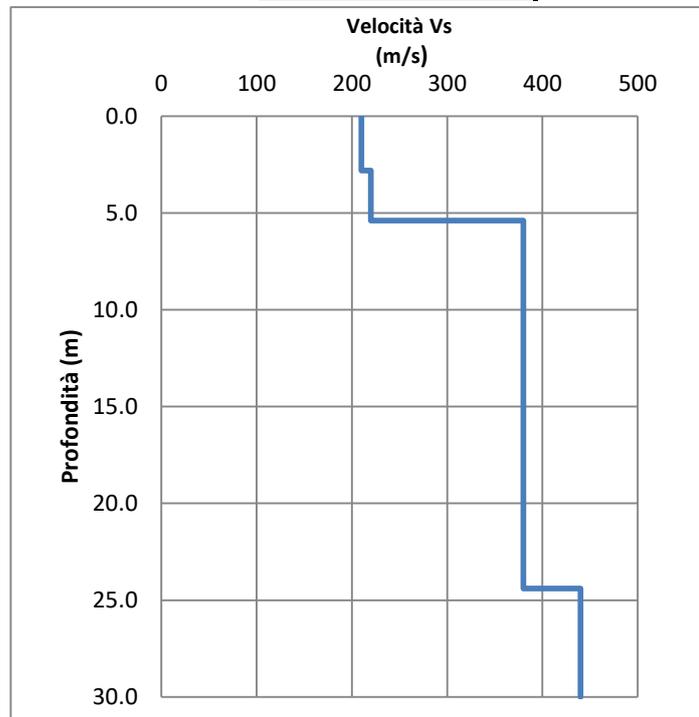
MASW

CLIENTE:	ITALFERR		
LAVORO:	Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2		
UBICAZIONE:	Cerda		
NOME TEST:	MASW		
DATA DI ESECUZIONE	02/03/2023		
COORDINATE	Lat.	4201186.87 m N	
	Long.	393220.10 m E	

GRAFICO & TABELLA Vs - h

Sismostrato	Profondità		Spessore	Vs (m/s)
1	0.00	2.80	2.80	210.00
2	2.80	5.40	2.60	220.00
3	5.40	24.40	19.00	380.00
4	24.40	inf.	inf.	440.00

Vs eq (0 - 30) **341**
Suolo **C**



Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Indagine tomografia sismica a rifrazione

EMISSIONE: Rev.00
DATA: 14/03/2023

Elaborato	Verificato	Approvato
Paola Luiso	Donato Fiore	Massimo De Iasi
<i>Paola Luiso</i>	<i>Donato Fiore</i>	<i>Massimo De Iasi</i>
Marco Taddeo		
<i>Marco Taddeo</i>		

TAVOLA N°2

Ubicazione Indagine sismica a rifrazione (SIS)



Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:



Indagini:

SRT
Data di esecuzione:

Marzo 2023

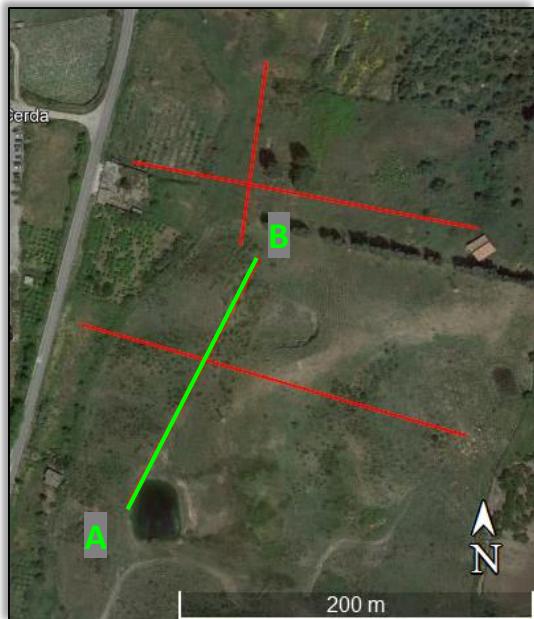
Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo

Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



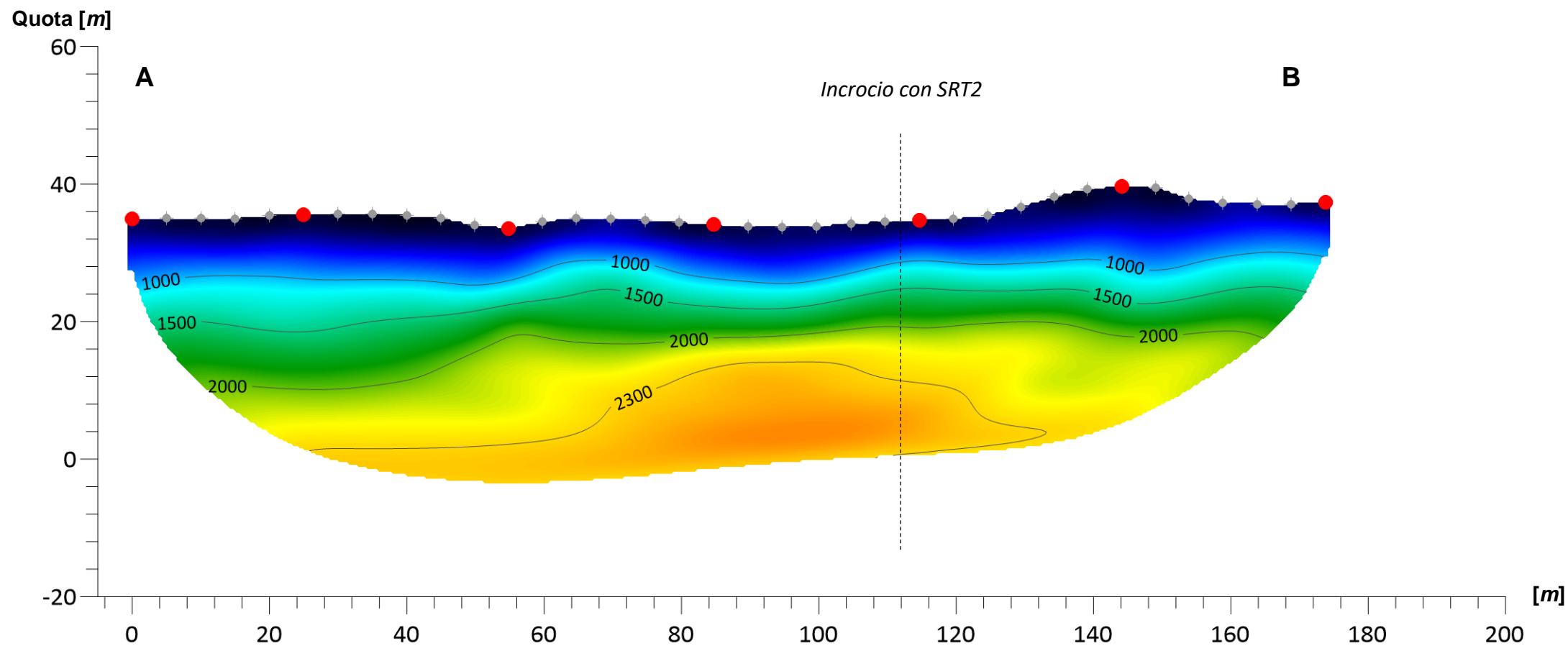
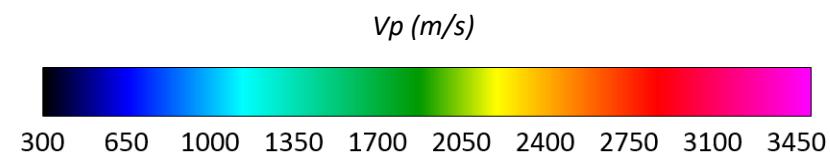
TAVOLA N°3

Tomografia sismica – SRT 1 – Onda P



Passo intergeofonico: 5 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4201162.125 m N	393310.735 m E
B	4201315.678 m N	393390.214 m E



Scala 1 : 800

Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:

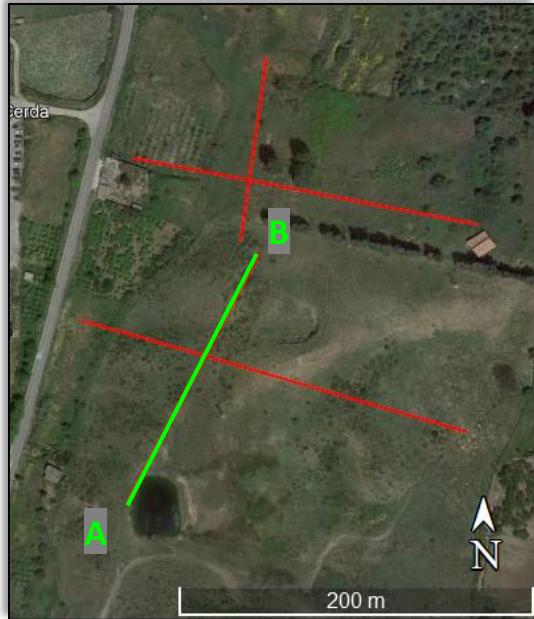
Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



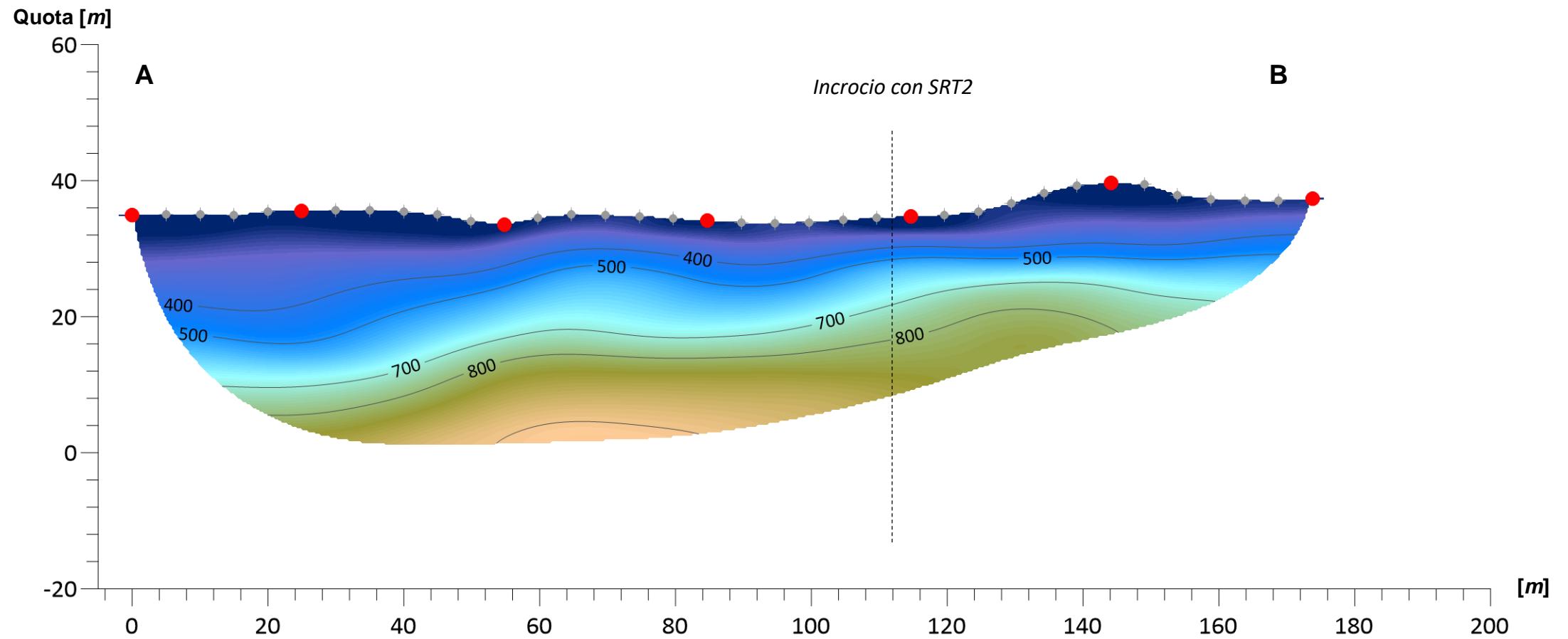
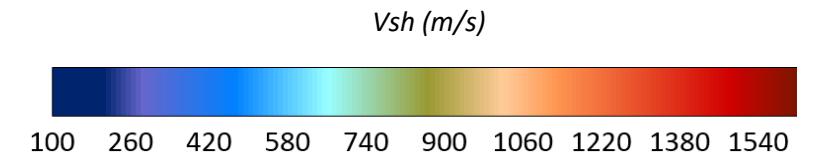
TAVOLA N°4

Tomografia sismica – SRT 1 – Onda Sh



Passo intergeofonico: 5 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4201162.125 m N	393310.735 m E
B	4201315.678 m N	393390.214 m E



Scala 1 : 800

Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:

Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



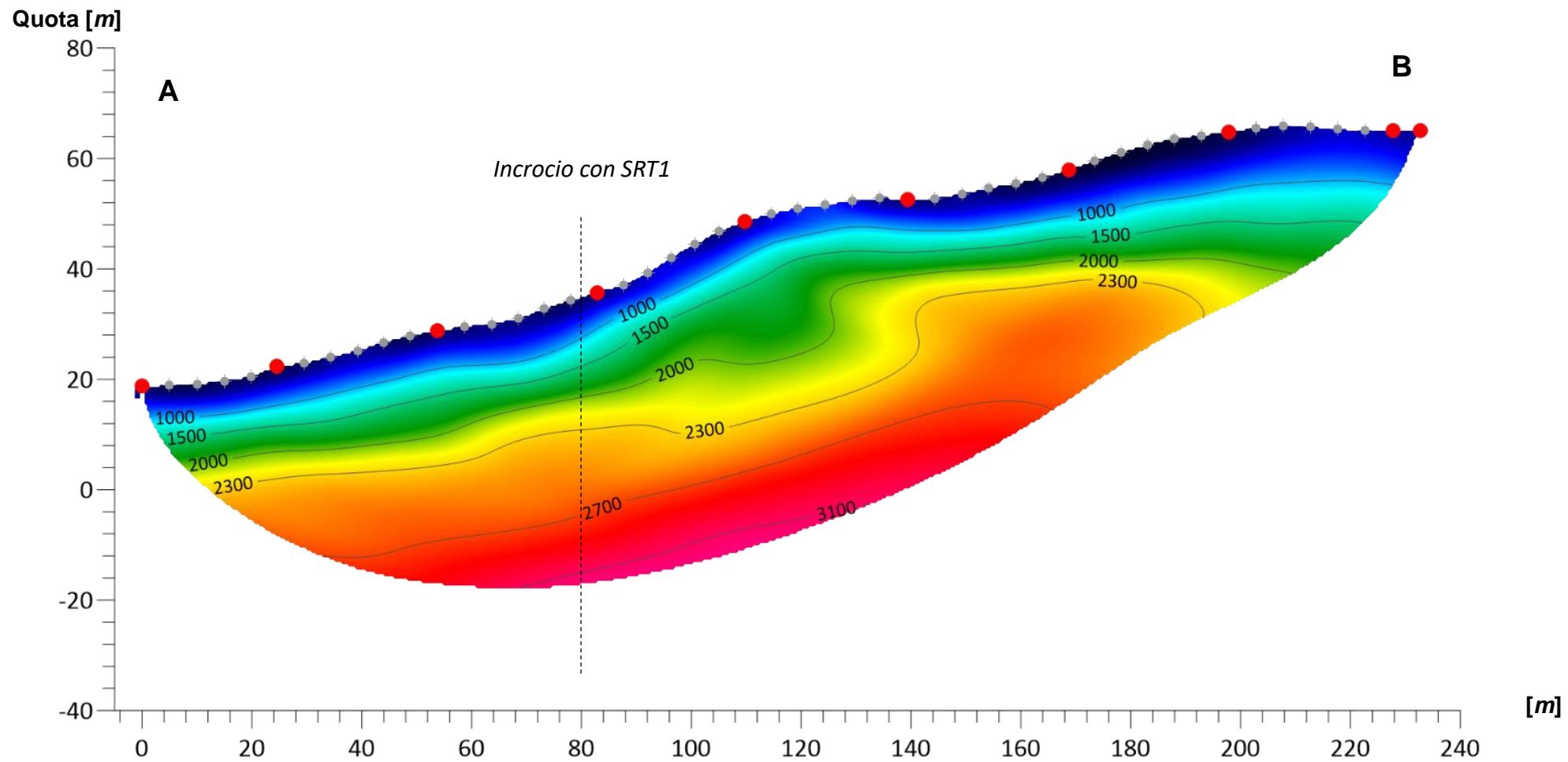
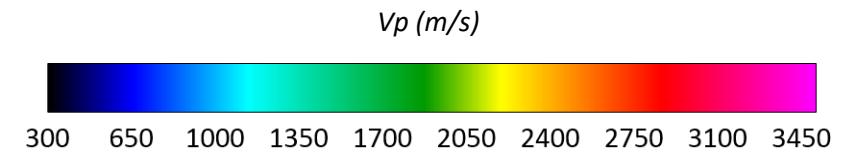
TAVOLA N°5

Tomografia sismica – SRT 2 – Onda P



Passo intergeofonico: 5 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4201273.509 m N	393284.072 m E
B	4201211.27 m N	393500.386 m E



Scala 1 : 1100

Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:

Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



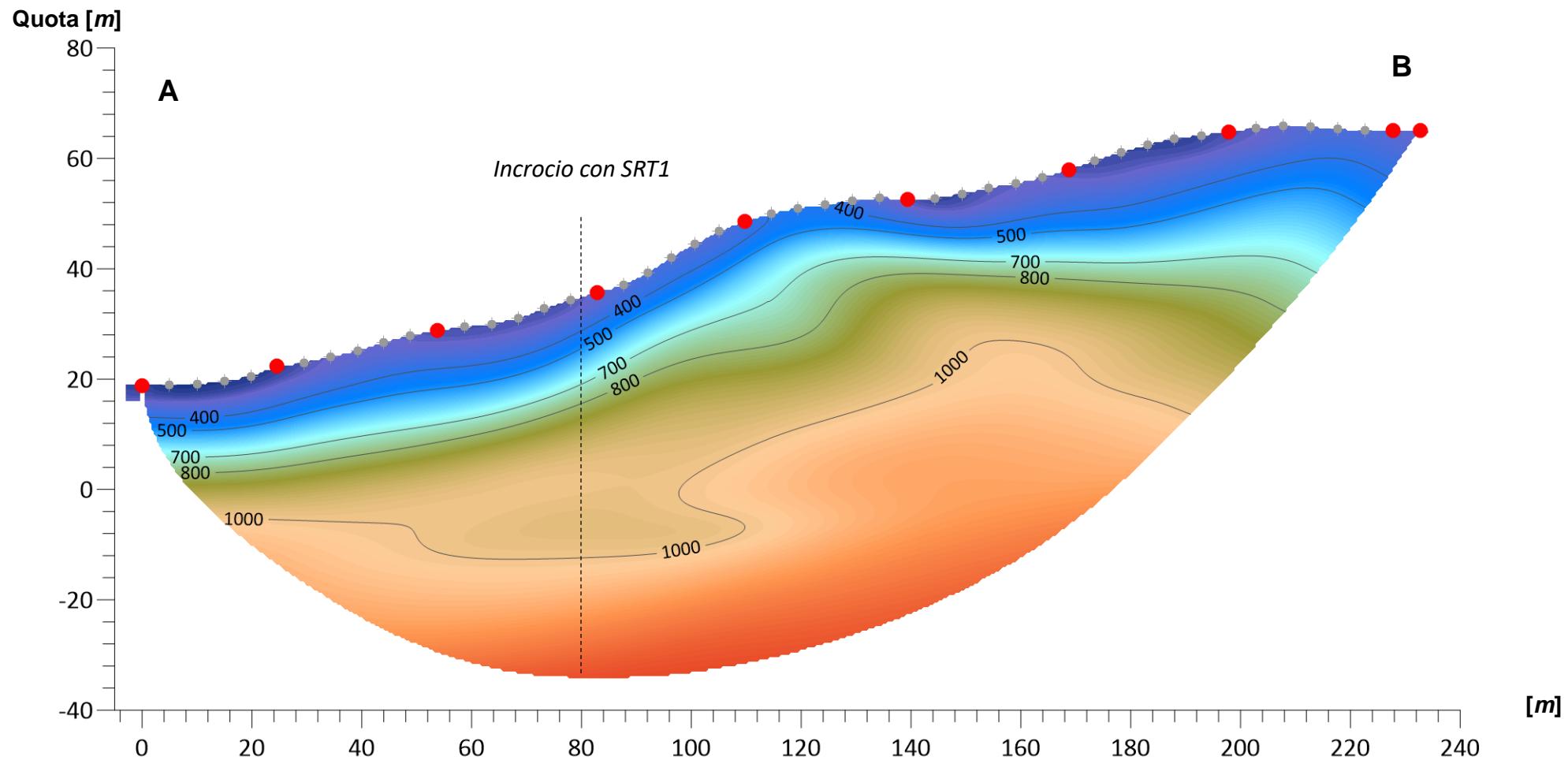
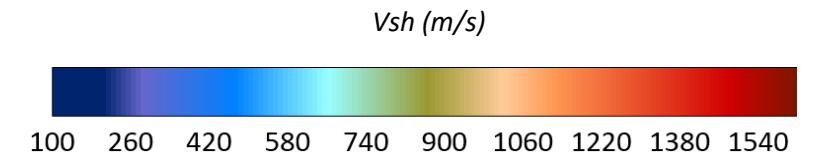
TAVOLA N°6

Tomografia sismica – SRT 2 – Onda Sh



Passo intergeofonico: 5 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4201273.509 m N	393284.072 m E
B	4201211.27 m N	393500.386 m E



Scala 1 : 1100

Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:

Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



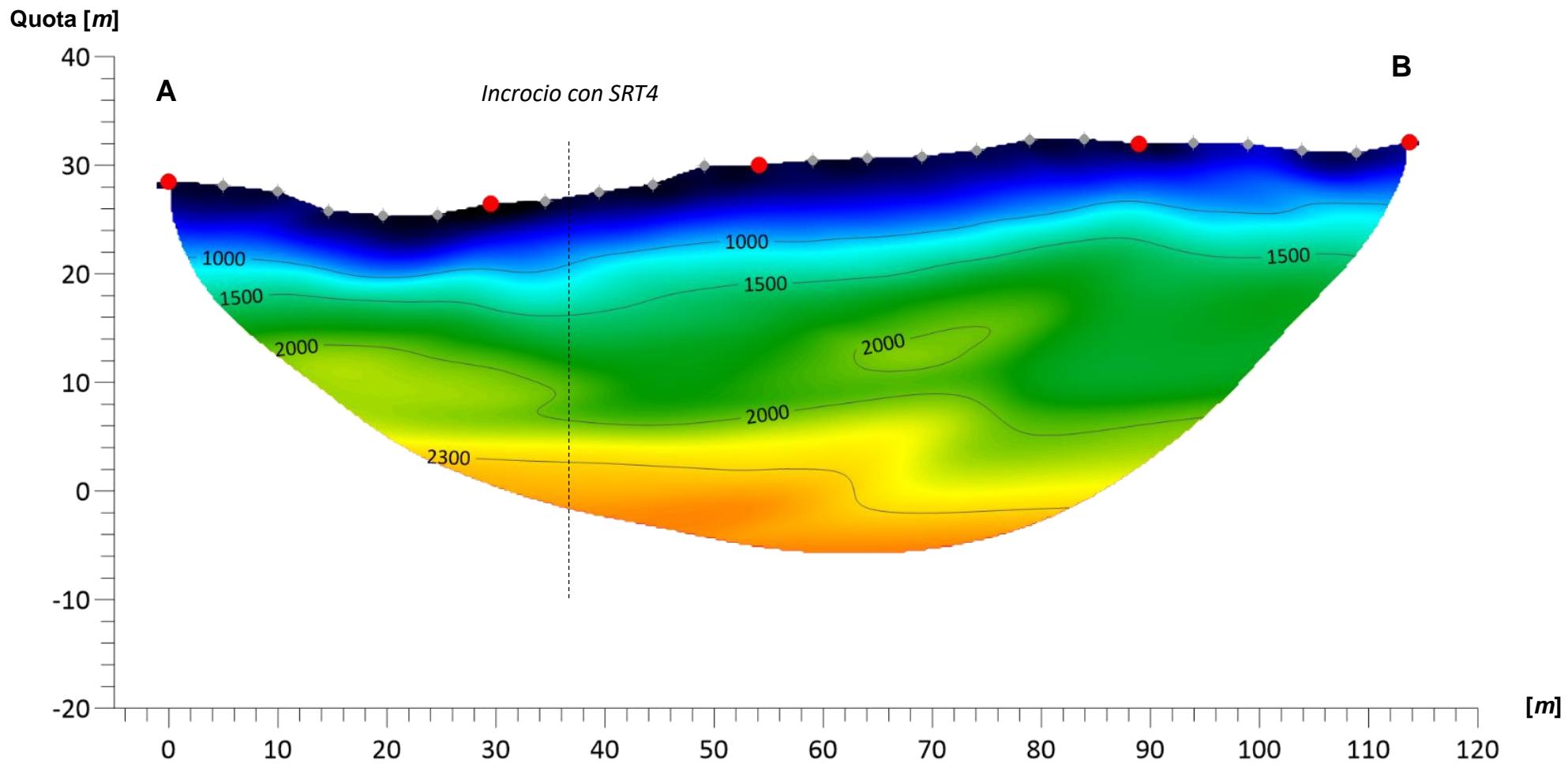
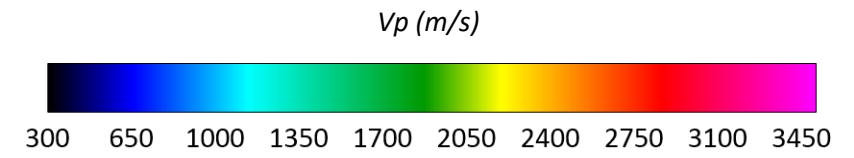
TAVOLA N°7

Tomografia sismica – SRT 3 – Onda P



Passo intergeofonico: 5 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4201273.509 m N	393284.072 m E
B	4201211.27 m N	393500.386 m E



Scala 1 : 550

Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:
 ITALFERR
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



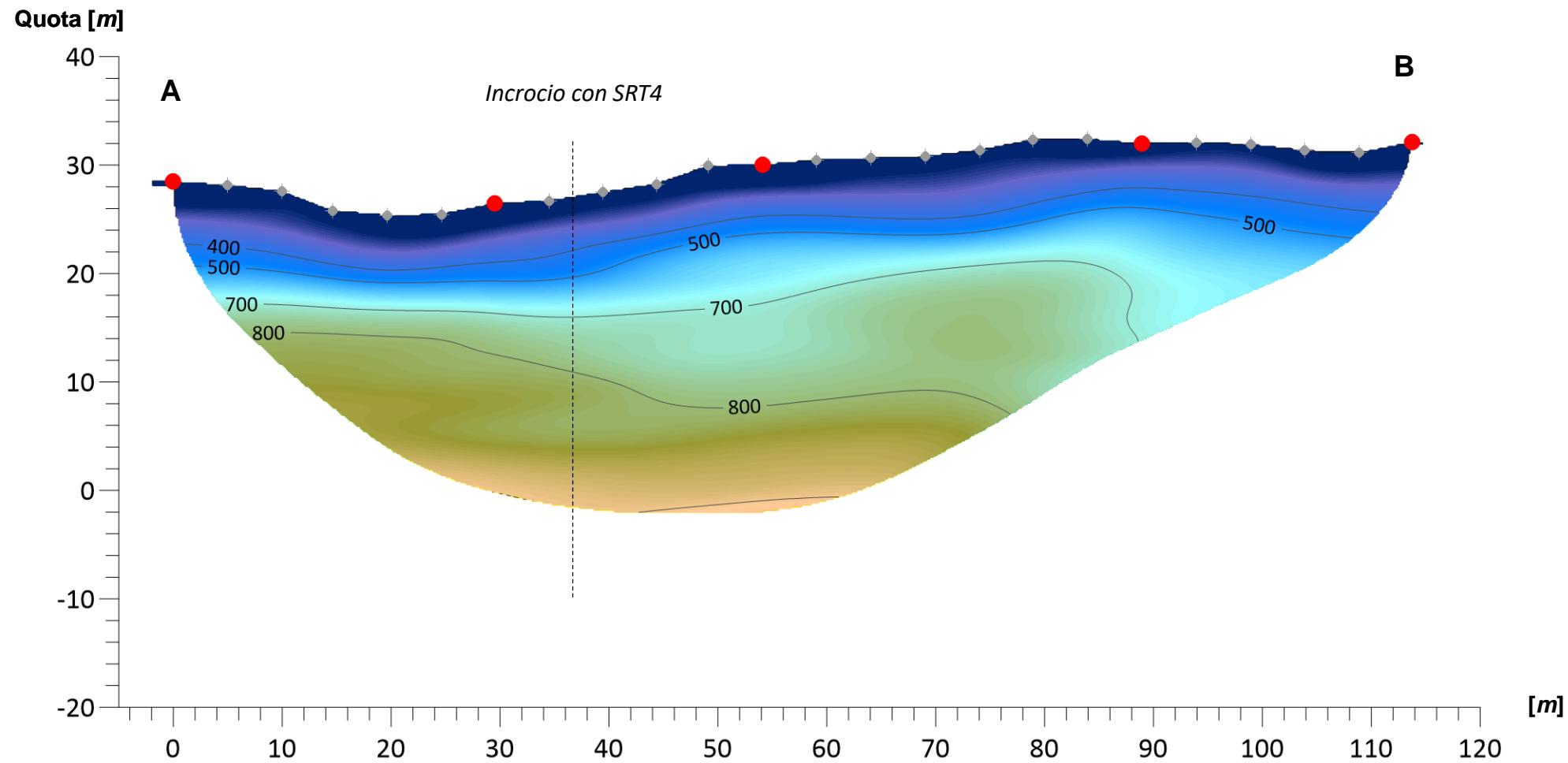
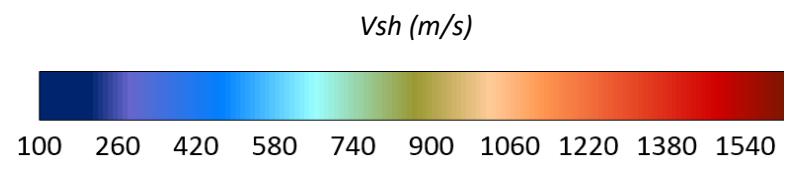
TAVOLA N°8

Tomografia sismica – SRT 3 – Onda Sh



Passo intergeofonico: 5 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4201273.509 m N	393284.072 m E
B	4201211.27 m N	393500.386 m E



Scala 1 : 550

Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:

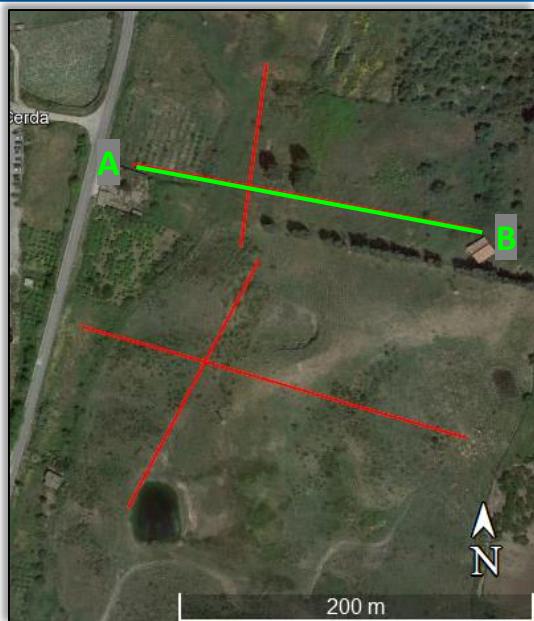
Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



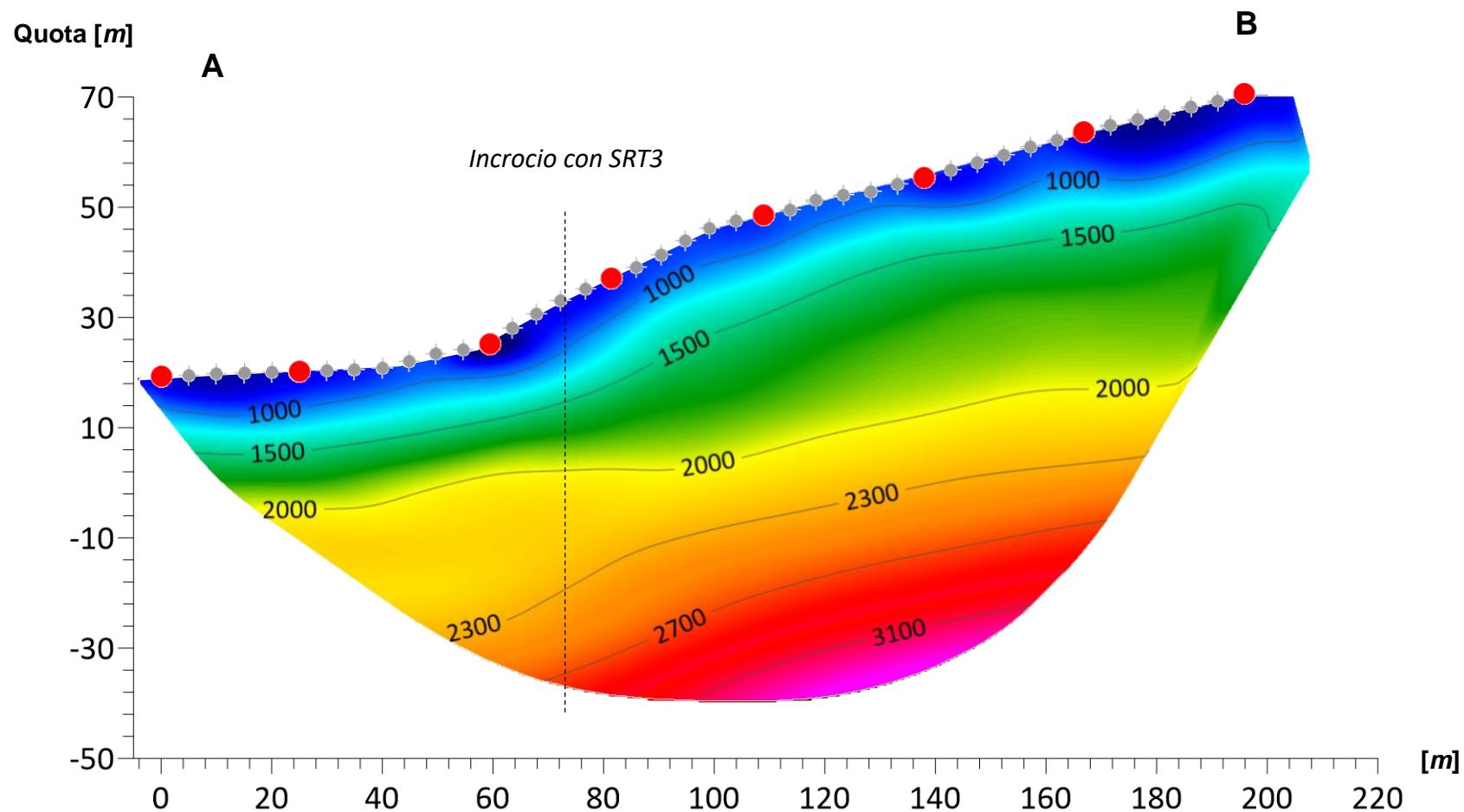
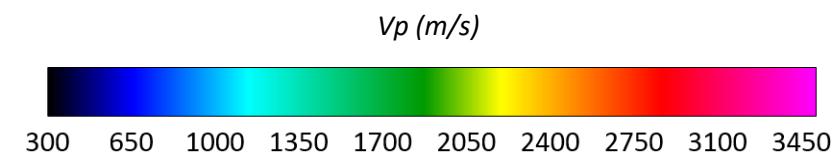
TAVOLA N°9

Tomografia sismica – SRT 4 – Onda Sh



Passo intergeofonico: 5 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4201372.743 m N	393319.621 m E
B	4201334.655 m N	393508.073 m E



Scala 1 : 1200

Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:

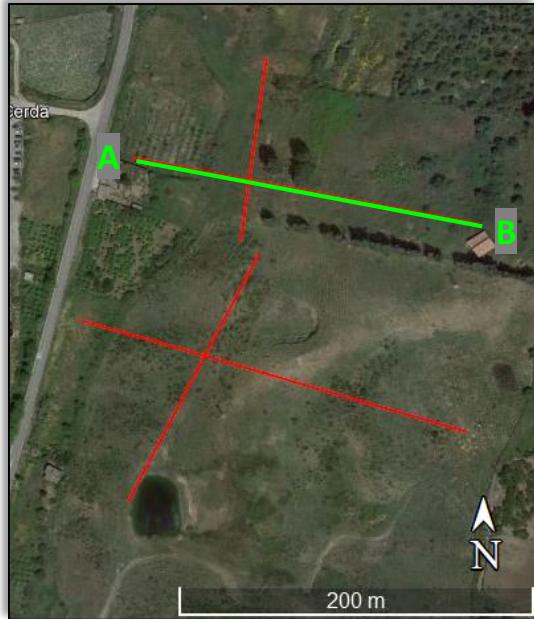

Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



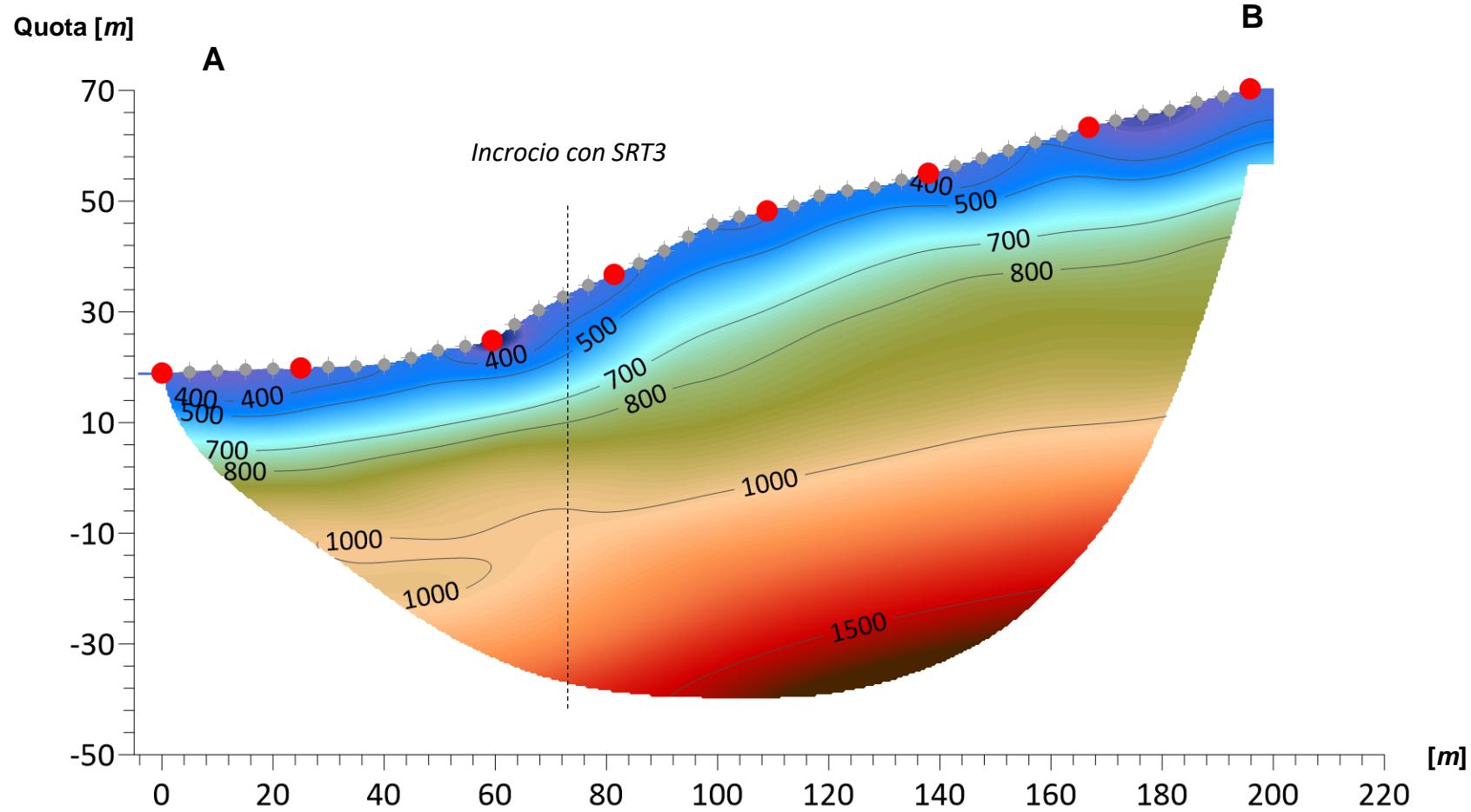
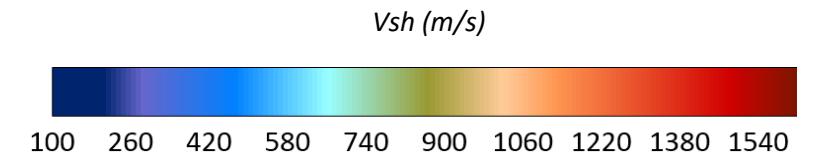
TAVOLA N°10

Tomografia sismica – SRT 4 – Onda Sh



Passo intergeofonico: 5 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4201372.743 m N	393319.621 m E
B	4201334.655 m N	393508.073 m E



Scala 1 : 1200

Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:
 ITALFERR
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

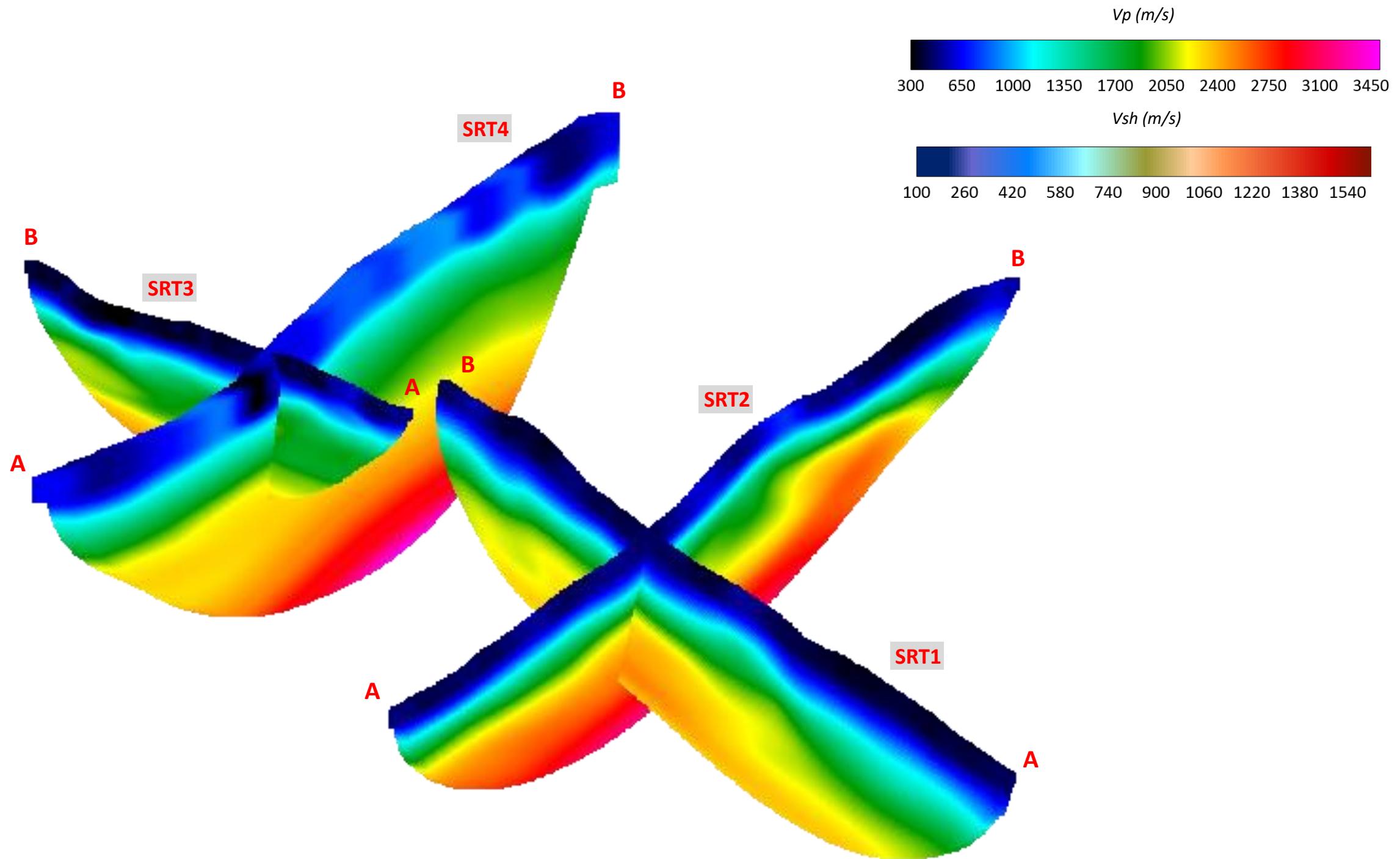
Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



TAVOLA N°11

Tomografia sismica – SRT 4 – Onda Sh



Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:

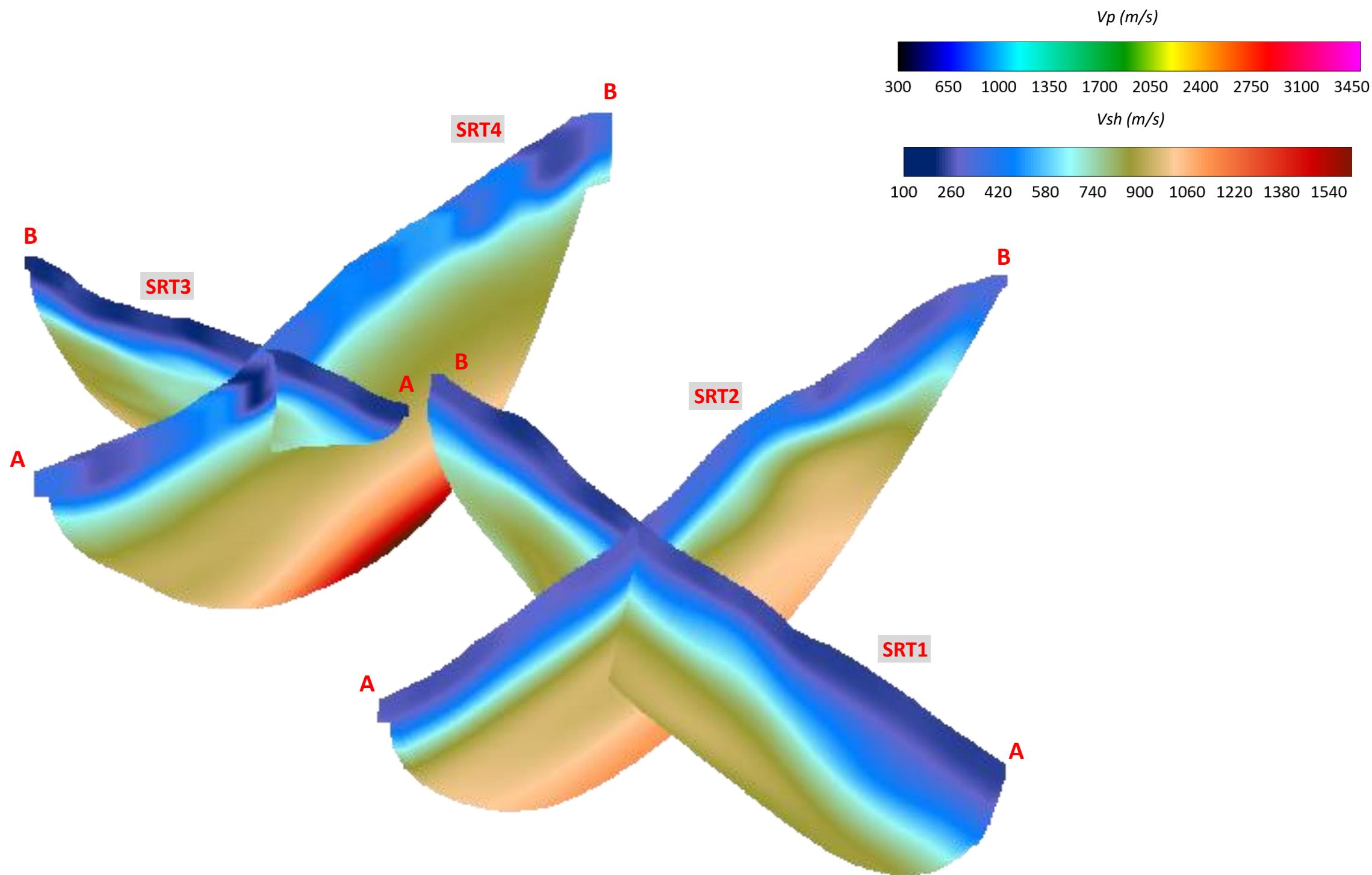

Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



TAVOLA N°12

Tomografia sismica – SRT 4 – Onda Sh



Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:

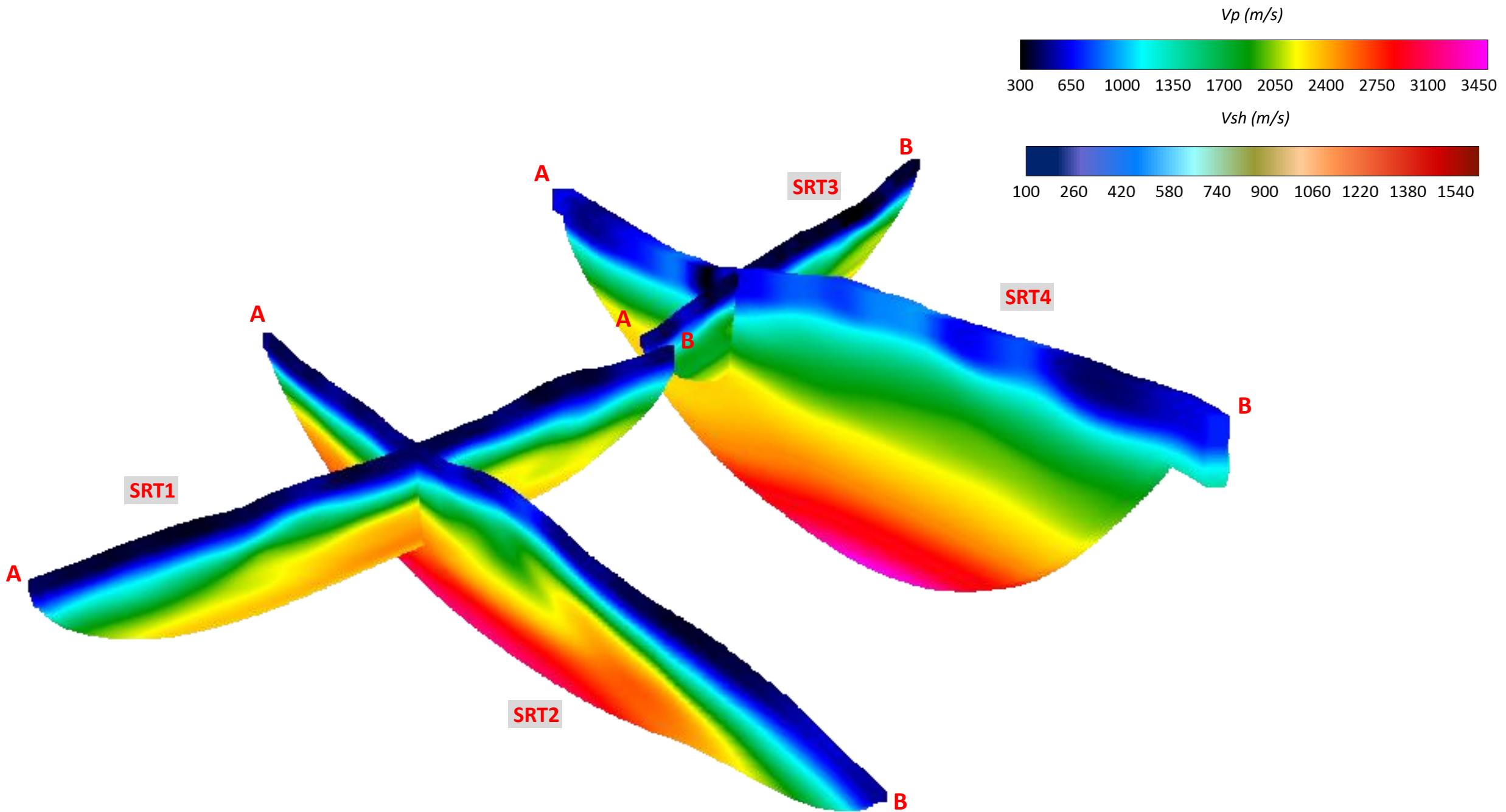

Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



TAVOLA N°13

Tomografia sismica – SRT 4 – Onda Sh



Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:

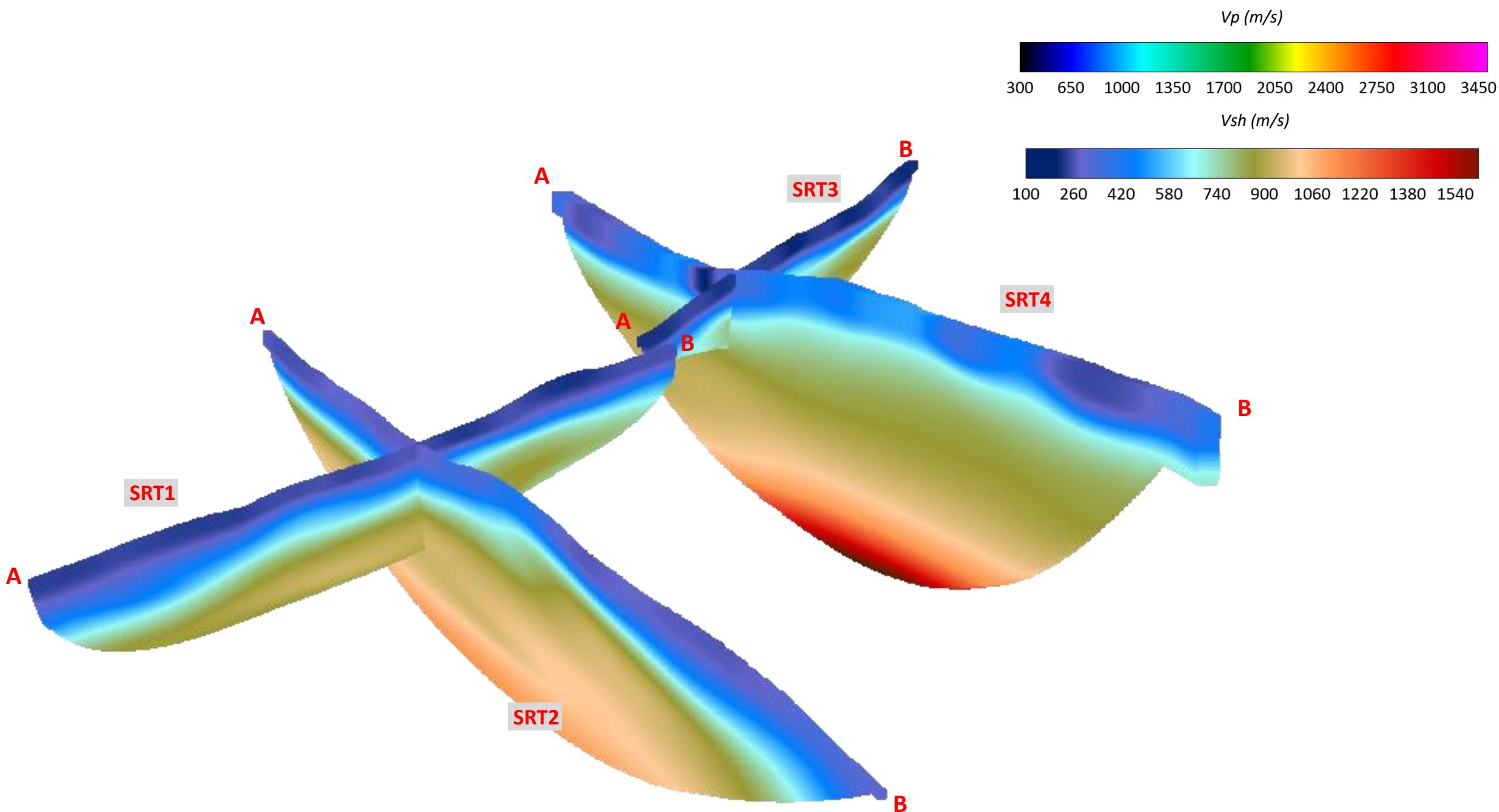

Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



TAVOLA N°14

Tomografia sismica – SRT 4 – Onda Sh



Lavoro:
Esecuzione di indagini geofisiche presso Cerda (PA) - V02 PA-CT Lotto 1-2

Committente:

GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Marzo 2023

Elaborato: P. Luiso - M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi

