

RAPPORTO TECNICO DI PROVA

Indagini geofisiche presso la strada provinciale SP98 - ENNA

Il “Libero Consorzio Comunale di Enna” ha affidato al *Laboratorio di Geotecnica e Dinamica dei Terreni* dell’Università di Enna “Kore” la campagna di indagini geofisiche presso la Strada Provinciale SP98. In particolare, sono state eseguite:

- n.1 Prova Tomografica sismica a rifrazione (in corrispondenza dell’area in frana).

1. PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE

Le indagini di sismica a rifrazione consentono di interpretare la stratigrafia del sottosuolo attraverso il principio fisico del fenomeno della rifrazione totale di un’onda sismica che incide su una discontinuità, individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse (orizzonte rifrattorio). La condizione fondamentale per eseguire studi di sismica a rifrazione è quella per cui la successione di strati da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all’aumentare della profondità. In questo modo si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti.

Le prove si basano sulla misura dei tempi di percorso delle onde elastiche per le quali, ipotizzando le superfici di discontinuità estese rispetto alla lunghezza d’onda o, comunque, con deboli curvature, i fronti d’onda sono rappresentati mediante i relativi raggi sismici. L’analisi si avvale, poi, del principio di Fermat e della legge di Snell.

Il principio di Fermat stabilisce che il raggio sismico percorre la distanza tra sorgente e rilevatore seguendo il percorso per cui il tempo di tragitto è minimo. Per tale principio, dato un piano che separa due mezzi con caratteristiche elastiche diverse, il raggio sismico è quello che si estende lungo un piano perpendicolare alla discontinuità contenente sia la sorgente che il ricevitore.



La legge di Snell è una formula che descrive le modalità di rifrazione di un raggio sismico nella transizione tra due mezzi caratterizzati da diversa velocità di propagazione delle onde o da diversi indici di rifrazione.

L'angolo formato tra la superficie di discontinuità e il raggio sismico è chiamato angolo di incidenza θ_i mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione θ_r . La formulazione matematica è:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

dove v_1 e v_2 sono le velocità dei due mezzi separati dalla superficie di discontinuità.

Per $v_1 > v_2$ si ha che $\theta_i > \theta_r$ e la sismica a rifrazione non è attuabile poiché il raggio rifratto andrebbe ad inclinarsi verso il basso. Per $v_1 < v_2$ si ha che $\theta_i < \theta_r$ ed esiste un angolo limite di incidenza per cui $\theta_r = 90^\circ$ ed il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di discontinuità. L'espressione che definisce l'angolo limite è:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

Il modo più semplice per analizzare i dati di rifrazione è quello di costruire un diagramma tempi-distanze in cui l'origine del sistema di riferimento è posto in corrispondenza della sorgente di generazione delle onde elastiche. In ascissa sono rappresentate le posizioni dei geofoni ed in ordinata i tempi dei primi arrivi.

Ai geofoni più vicini alla sorgente giungono per primi gli impulsi che hanno seguito il percorso diretto in un tempo T dato dalla relazione

$$T = x_i / V_1$$

dove x_i è la distanza tra il punto di energizzazione e il punto di rilevazione.

L'equazione precedente rappresenta una retta che passa per l'origine degli assi tempi-distanze ed il suo coefficiente angolare consente di calcolare la velocità V_1 del primo mezzo come:

$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

I tempi di arrivo dei raggi rifratti, nel diagramma tempi-distanze, si dispongono secondo una retta che avrà pendenza minore di quella delle onde dirette.



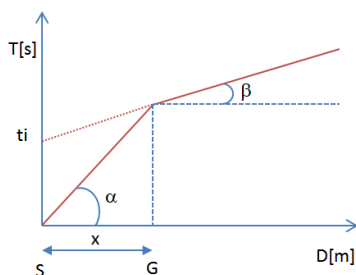


Figura 1 Curva tempi-distanze

La curva tempi-distanze tende ad avere un andamento regolare secondo una spezzata i cui vertici sono i chiamati punti di ginocchio e rappresentano, fisicamente, la condizione in cui si verifica l'arrivo contemporaneo delle onde dirette e rifratte. Per ciascuno dei segmenti individuati si determina, dunque, il tempo di ritardo t_i che rappresenta la differenza tra il tempo che il raggio sismico impiega a percorrere un tratto alla velocità propria dello strato in cui si trasmette ed il tempo che impiegherebbe a viaggiare lungo la componente orizzontale di quel tratto alla massima velocità raggiunta in tutto il percorso di rifrazione.

Graficamente il tempo di ritardo è dato dall'intersezione della retta che comprende un segmento della curva tempi-distanze con l'asse dei tempi.

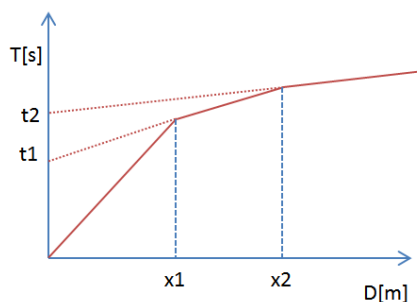


Figura 2 Determinazione tempo di ritardo

Infine, dalla conoscenza dei tempi t_i è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)}V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}} \left(t_i - \frac{2h_1\sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1V_i} - \dots - \frac{2h_{(i-2)}\sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1V_{(i-2)}} \right)$$

In situazioni morfologiche complesse può essere utilizzato come metodo di elaborazione il Metodo Reciproco Generalizzato (Generalized Reciprocal Method) discusso da Palmer nel 1980.



Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.

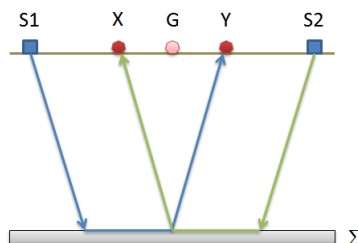


Figura 3 Metodo G.R.M.



Il primo passo operativo è quello di costruire un diagramma tempi-distanze individuando nei sismogrammi ottenuti dai dati di campagna i primi arrivi delle onde sismiche. Per determinare la distanza XY ottimale è necessario considerare più punti di energizzazione tanto agli estremi quanto all'interno dello stendimento. Ciò permette di individuare con maggiore accuratezza i tempi relativi ad un medesimo rifrattore utili a caratterizzare le dromocrone, fondamentali all'interpretazione.

Nelle interpretazioni multi strato, la generazione delle dromocrone può sfruttare tecniche di phantoming per sopperire alla mancanza dei dati per alcuni rifrattori.

Dalla costruzione delle dromocrone è possibile determinare la funzione velocità secondo l'equazione

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_2}}{2}$$

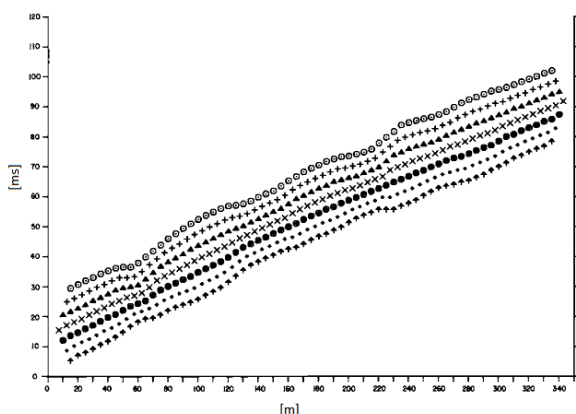


Figura 4 Costruzione delle dromocrone



dove T_{S_1Y} e T_{S_2X} sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S_1 ad X e dalla sorgente S_2 ad Y mentre $T_{S_1S_2}$ è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S_1 ed S_2 , esternamente simmetrici rispetto allo stendimento. T_v è il tempo calcolato su un geofono G posto tra X ed Y, non necessariamente coincidente con la posizione di un geofono dello stendimento.

Il calcolo della funzione T_v viene eseguito per ogni valore di XY compreso tra zero e metà dello stendimento con variazione pari alla distanza reale tra i geofoni dello stendimento. La migliore retta di regressione delle funzioni velocità ottenute, permette di determinare l'XY ottimo e la velocità del rifrattore che è ricavata dal coefficiente angolare.

Per mezzo della funzione tempo-profondità è possibile trovare la profondità del rifrattore espressa in unità di tempo. L'espressione di tale funzione è:

$$T_G = \frac{T_{S_1Y} + T_{S_2X} - \left(T_{S_1S_2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

dove V_n è la velocità del rifrattore.

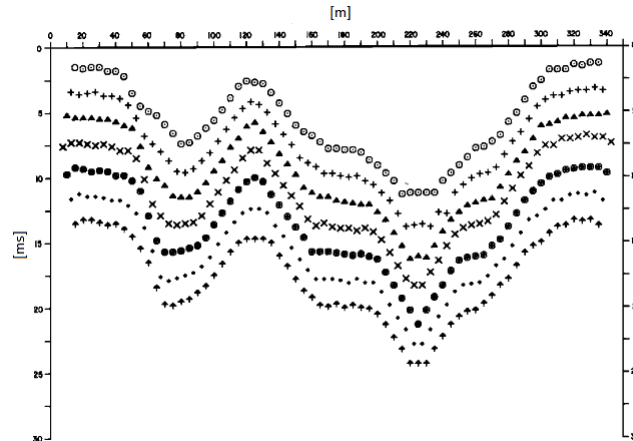


Figura 5 Andamento velocità dei rifrattori

Analogamente a quanto avviene per la funzione velocità si determinano diverse funzioni tempo-profondità per l'insieme dei valori XY di studio. Tra le funzioni trovate, quella che presenta la maggiore articolazione compete al valore di XY ottimo.

Infine, è possibile determinare lo spessore del rifrattore in corrispondenza delle posizioni dei geofoni G mediante la relazione:



$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

dove h rappresenta la profondità minima dal geofono G dunque la morfologia del rifrattore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio h.

Uno dei principali vantaggi del G.R.M. è che il fattore di conversione della profondità è relativamente insensibile alle inclinazioni fino a circa 20°.

1.1 Strumentazione e configurazione geometrica

La strumentazione utilizzata è costituita da un sismografo multicanale A6000S MAE, avente le seguenti caratteristiche tecniche:

- capacità di campionamento dei segnali tra 0.002 e 0.00003 sec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del “tempo zero” (time break);
- filtri High Pass e Band Reject;
- “Automatic Gain Control”;
- convertitore A/D a 24 bit.

La configurazione spaziale in sito è equivalente ad un dispositivo geometrico punto di scoppio-geofoni “base distante in linea”. In particolare è stato utilizzato il seguente set-up:

- n.24 geofoni ad asse di oscillazione verticale con interspazio (Gx) di 2,00 metri;
- n.7 energizzazioni;
- massa battente pesante di 8 kg.

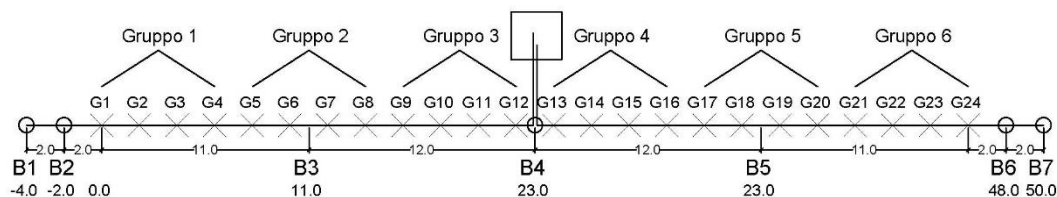


Figura 6 Schema di prova

1.2 Dati generali

Descrizione: Lavori di manutenzione straordinaria e miglioramento sicurezza SP98

Committente: Provincia di Enna





Zona Intervento: S1 - Tomografia Sismica: T1

Data esecuzione della prova: 03/03/2020

Ubicazione: SP94 km 0+800 circa

Latitudine 37.49276[°] Longitudine 14.310508[°] Altitudine 631[m]



Figura 7 Ubicazione del sito oggetto di indagine

1.3 Geometria dei geofoni

	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	632.7
2	2.0	632.5
3	4.0	632.3
4	6.0	632.2
5	8.0	632.1
6	10.0	632.0
7	12.0	631.9
8	14.0	631.8
9	16.0	631.7
10	18.0	631.5
11	20.0	631.4
12	22.0	631.3
13	24.0	631.2





Laboratorio Prove Geotecniche

Facoltà di Ingegneria e Architettura - Università degli Studi di Enna - Kore

14	26.0	631.1
15	28.0	630.9
16	30.0	630.8
17	32.0	630.7
18	34.0	630.6
19	36.0	630.5
20	38.0	630.4
21	40.0	630.3
22	42.0	630.1
23	44.0	630.0
24	46.0	629.9

1.4 Dati delle battute

Battuta 1

Posizione sorgente X: -4 [m]

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	3.7746
2.0	5.0328
4.0	7.1298
6.0	9.2268
8.0	10.9043
10.0	14.6789
12.0	16.3565
14.0	20.1311
16.0	21.3893
18.0	23.0669
20.0	24.3251
22.0	26.8415
24.0	27.6803
26.0	29.7773
28.0	29.7773
30.0	32.2936
32.0	34.8100
34.0	37.3264
36.0	40.6816
38.0	44.8756
40.0	46.9726
42.0	49.0696
44.0	51.1666
46.0	53.2635





Battuta 2

Posizione sorgente X: -2 [m]

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	2.9358
2.0	4.1940
4.0	5.8716
6.0	7.5492
8.0	9.6462
10.0	13.4207
12.0	14.6789
14.0	18.4535
16.0	20.1311
18.0	22.2281
20.0	25.1639
22.0	26.8415
24.0	28.5191
26.0	29.7773
28.0	31.0355
30.0	31.0355
32.0	32.2936
34.0	34.8100
36.0	36.9070
38.0	38.5846
40.0	39.4234
42.0	42.7786
44.0	45.2950
46.0	47.3920



Battuta 3

Posizione sorgente X: 11 [m]

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	12.8815
2.0	9.5862
4.0	6.8901
6.0	5.3923
8.0	2.3966
10.0	2.0970
12.0	2.0970
14.0	2.3966
16.0	4.1940
18.0	9.5862



Laboratorio Prove Geotecniche

Facoltà di Ingegneria e Architettura - Università degli Studi di Enna - Kore

20.0	14.9785
22.0	19.7716
24.0	23.6660
26.0	27.8600
28.0	28.7587
30.0	29.6574
32.0	30.8557
34.0	32.0540
36.0	32.6531
38.0	33.8514
40.0	35.9484
42.0	37.7458
44.0	39.8428
46.0	41.3407

Battuta 4

Posizione sorgente X: 23 [m]

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	29.9570
2.0	27.5604
4.0	26.0626
6.0	25.1639
8.0	19.7716
10.0	16.7759
12.0	13.4806
14.0	9.8858
16.0	7.1897
18.0	4.4935
20.0	2.0970
22.0	1.7974
24.0	1.7974
26.0	2.9957
28.0	6.2910
30.0	13.1811
32.0	19.7716
34.0	23.3665
36.0	26.6617
38.0	27.5604
40.0	28.7587
42.0	30.8557
44.0	33.2523
46.0	35.0497





Battuta 5

Posizione sorgente X: 35 [m]

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	44.9355
2.0	43.2379
4.0	41.5404
6.0	39.8428
8.0	37.4462
10.0	35.9484
12.0	33.8514
14.0	32.9527
16.0	31.1553
18.0	29.6574
20.0	27.8600
22.0	26.0626
24.0	20.9699
26.0	15.5776
28.0	11.6832
30.0	7.1897
32.0	5.0927
34.0	1.7974
36.0	1.7974
38.0	3.5948
40.0	7.1897
42.0	10.1854
44.0	12.5819
46.0	14.6789



Battuta 6

Posizione sorgente X: 48 [m]

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	50.9269
2.0	50.3278
4.0	49.4290
6.0	47.9312
8.0	46.1338
10.0	44.3364
12.0	42.5389
14.0	41.0411
16.0	39.2437
18.0	38.6445
20.0	37.1467
22.0	36.5475



Laboratorio Prove Geotecniche

Facoltà di Ingegneria e Architettura - Università degli Studi di Enna - Kore

24.0	35.3493
26.0	32.9527
28.0	29.3579
30.0	27.5604
32.0	23.9656
34.0	18.5733
36.0	16.1768
38.0	14.0798
40.0	11.6832
42.0	9.2867
44.0	3.8944
46.0	1.4978



Battuta 7

Posizione sorgente X: 50 [m]

Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	52.7243
2.0	50.9269
4.0	49.7286
6.0	48.5303
8.0	47.6316
10.0	46.1338
12.0	45.5346
14.0	43.7372
16.0	41.3407
18.0	39.5432
20.0	38.0454
22.0	36.9966
24.0	35.9484
26.0	33.8514
28.0	31.7544
30.0	28.1596
32.0	24.5647
34.0	20.3708
36.0	18.2738
38.0	15.5776
40.0	14.3794
42.0	11.0841
44.0	8.3880
46.0	2.6961



1.5 Interpretazione con il metodo G.R.M.

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	3.4	12.0
G= 2.0 [m]	3.3	8.1
G= 4.0 [m]	3.4	6.7
G= 6.0 [m]	3.8	6.4
G= 8.0 [m]	3.5	3.5
G= 10.0 [m]	3.9	3.9
G= 12.0 [m]	4.0	4.0
G= 14.0 [m]	4.2	4.2
G= 16.0 [m]	4.2	4.2
G= 18.0 [m]	4.4	4.4
G= 20.0 [m]	5.0	5.0
G= 22.0 [m]	4.8	4.8
G= 24.0 [m]	4.9	4.9
G= 26.0 [m]	5.5	5.5
G= 28.0 [m]	5.2	5.2
G= 30.0 [m]	5.1	5.1
G= 32.0 [m]	5.2	5.2
G= 34.0 [m]	5.5	5.5
G= 36.0 [m]	5.8	5.8
G= 38.0 [m]	6.2	6.2
G= 40.0 [m]	6.3	6.3
G= 42.0 [m]	6.8	6.8
G= 44.0 [m]	7.1	7.1
G= 46.0 [m]	7.4	7.4
Velocità [m/sec]	738.6	1271.7



	Strato n. 1	Strato n. 2
Coefficiente Poisson	0.35	0.35
Densità [kg/m³]	1800.00	1800.00
Vp [m/s]	738.57	1271.70
Vs [m/s]	354.80	610.91
G0 [MPa]	226.59	671.77
Ed [Mpa]	981.89	2911.01
M0 [MPa]	755.30	2239.24
Ey [Mpa]	611.79	1813.79

G0: Modulo di deformazione al taglio;

Ed: Modulo edometrico;

M0: Modulo di compressibilità volumetrica;

Ey: Modulo di Young;



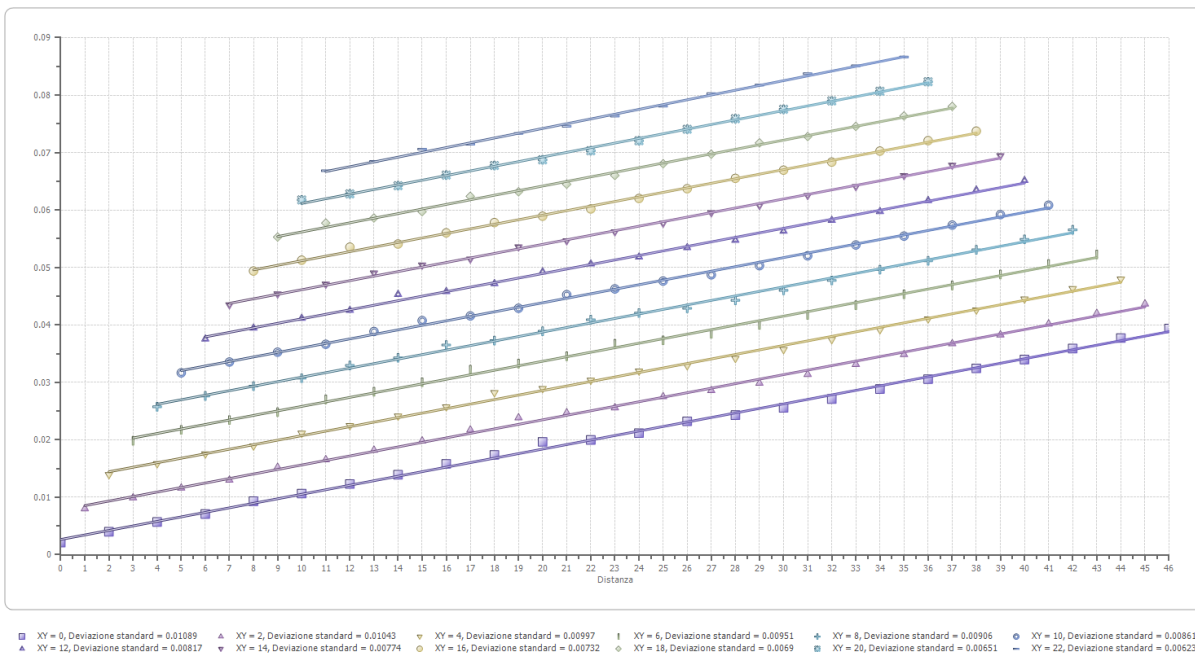


Figura 8 Funzione velocità

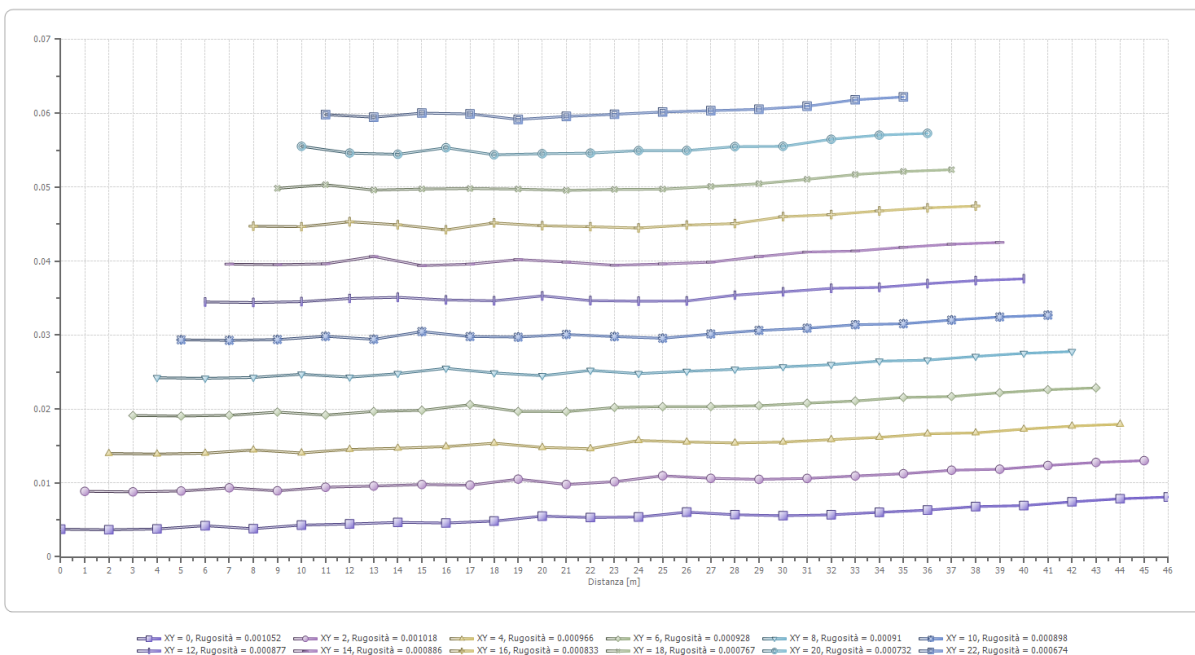


Figura 9 Funzione tempo-profondità



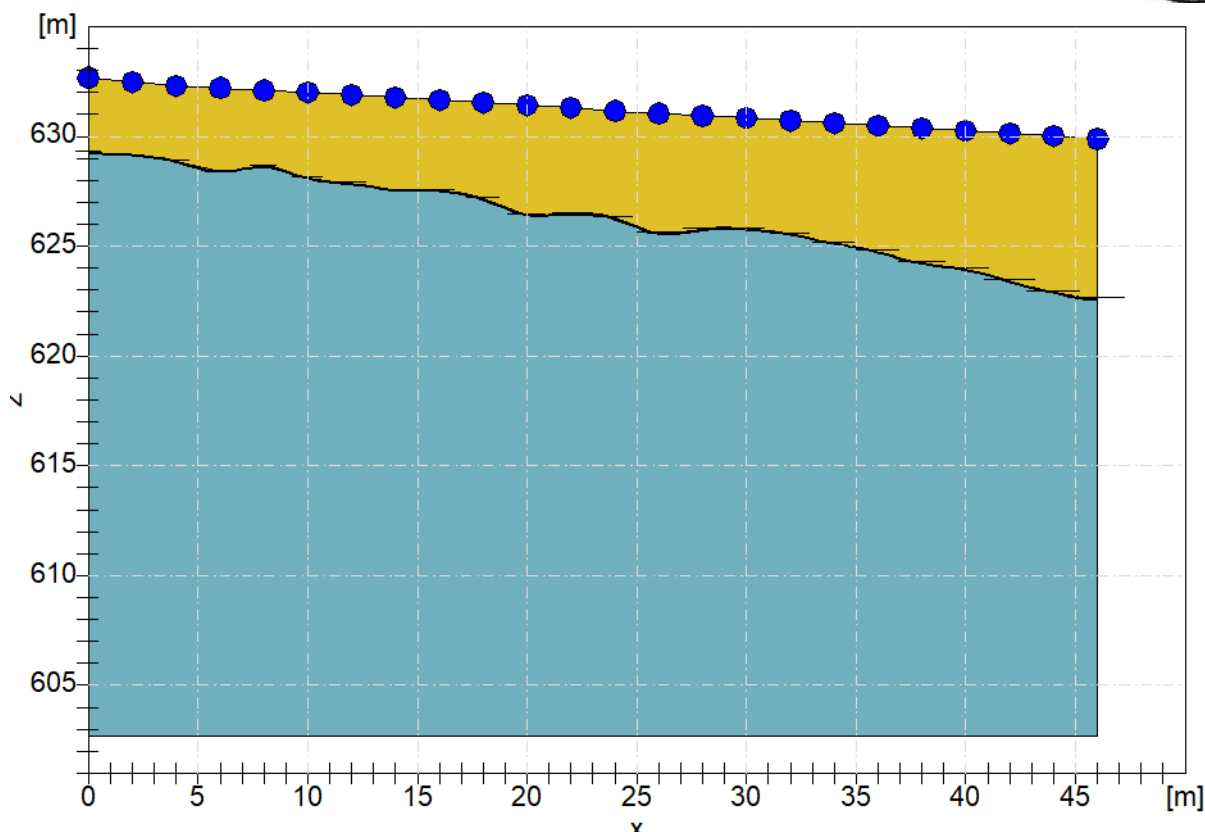


Figura 10 Andamento morfologico dei rifrattori

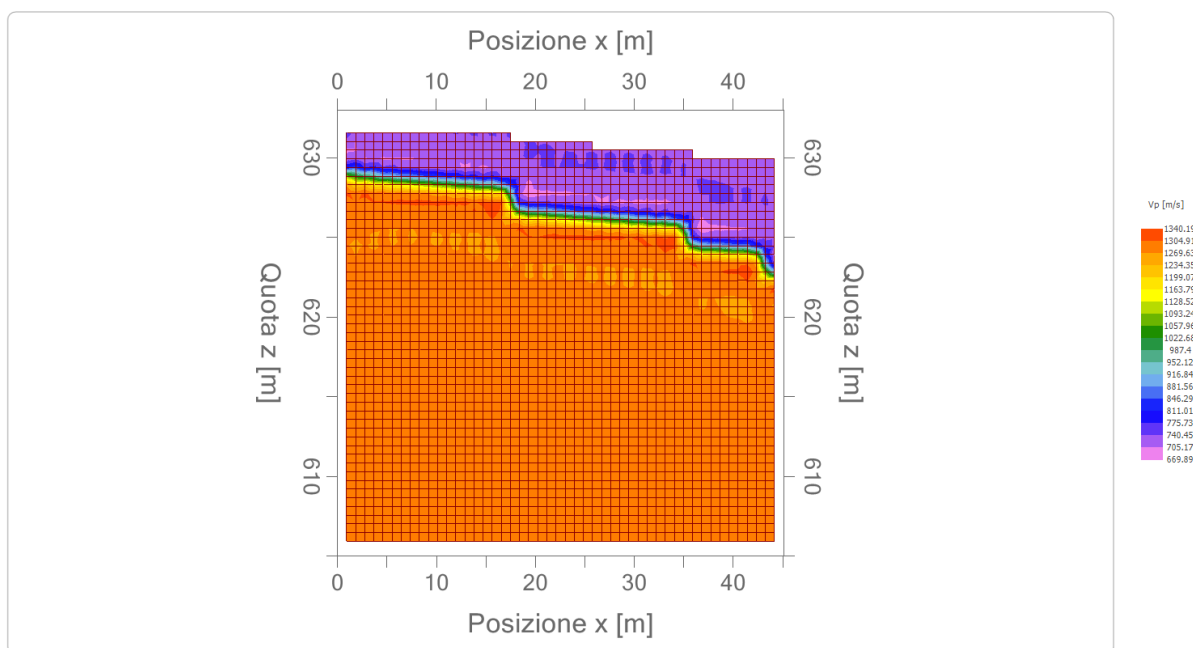


Figura 11 Mappa delle velocità



Annotazioni:

- Il presente certificato è composto da n.16 pagine.

Gli Sperimentatori

dott. ing. Giosuè Distefano

dott. ing. Paolo Mirlisenna

Il Responsabile del Laboratorio

prof. ing. Francesco Castelli

