

RAPPORTO TECNICO DI PROVA
MISURA SISMICA IN FORO DOWN HOLE

PROSPEZIONI GEOFISICHE

-
-

REV.	Data e località	Ditta	Redatto	Controllato	Approvato	COMM.-JOB:
0			Dott. Giuseppe Coco	Dr. M. Corrao Dr.	Dott. Giuseppe Coco	

CONSORZIO L.R.
Laboratori Riuniti

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874.
Iscritta al R.E.A. 270647

consorzio@lr-srl.it

www.LR-SRL.it

Uffici e Sede legale

Via Pablo Picasso n. 2
95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

Laboratorio Aut. L. 1086/71

Zona Industriale, Capannone n. 5
94010 Catenanuova (EN)

Fax +39 095 7336297

Laboratorio Aut. Terre e Rocce

Via C. Colombo n. 69
94018 Troina (EN)

INDICE	pag.
1.0 - SISMICA IN FORO DEL TIPO DOWN – HOLE	3
1.1-GENERALITÀ	3
1.1.1-STRUMENTAZIONE ED ACQUISIZIONE DATI	4
1.1.2 - STIMA DEI TEMPI DI PRIMO ARRIVO ED ELABORAZIONE DATI	5
1.2 - MODULI ELASTICI	6
1.2.1 PARAMETRI GEOSISMICI	9
1.3 - RISULTATI DOWN-HOLE	10
DH_S71	10

1.0 - SISMICA IN FORO DEL TIPO DOWN – HOLE

1.1-GENERALITÀ

Mediante la tecnica di indagine di sismica in foro tipo down hole è possibile determinare la velocità di propagazione (media e d'intervallo) delle onde sismiche di compressione (P) e trasversali o di taglio (S).



La metodologia down-hole, come le altre tecniche di sismica in foro, ha il vantaggio di non avere come condizione che la velocità aumenti con la profondità (es. sismica di rifrazione superficiale), giacché i tempi di arrivo delle onde elastiche vengono valutati via via che queste ultime penetrano negli strati più profondi del terreno.

Con tale tecnica è altresì sempre possibile valutare eventuali inversioni di velocità nell'ambito del pacco di litotipi incontrati nella perforazione.

1.1.1-STRUMENTAZIONE ED ACQUISIZIONE DATI

La strumentazione utilizzata consiste in due geofoni 3D e di un sismografo con memoria incrementale. L'ancoraggio del sensore alle pareti del foro avviene tramite pistoncini pneumatici a mandata doppia.

Le caratteristiche tecniche del sistema sopra descritto sono:

- 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;
- n° 2 sensori a tre componenti con periodo proprio pari a 10 Hz.

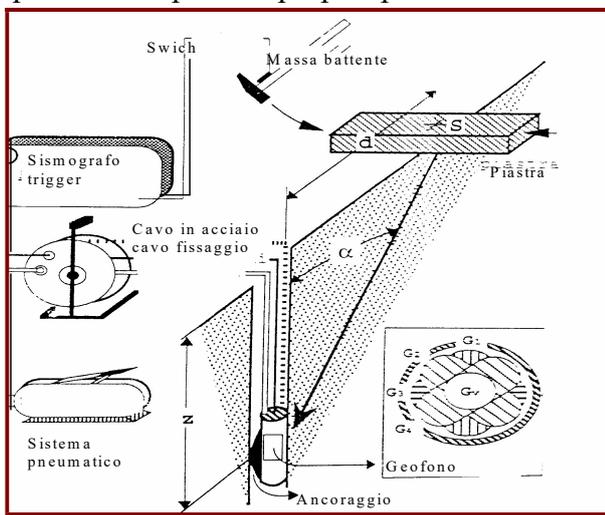


Figura 1. Sistema d'acquisizione Down - Hole

L'energizzazione del terreno è effettuata mediante l'impatto verticale di una massa battente su una piastra d'acciaio posizionata sul terreno ad una distanza di 2 m. dall'asse foro, per la generazione delle onde longitudinali P.

Al fine di facilitare la generazione delle onde trasversali, per la valutazione della velocità di propagazione delle onde di taglio SH, il terreno è stato sollecitato tangenzialmente tramite impatto orizzontale di una massa oscillante battente su un parallelepipedo di legno ancorato al suolo.

1.1.2 - STIMA DEI TEMPI DI PRIMO ARRIVO ED ELABORAZIONE DATI

I segnali sismici registrati in formato digitale sono stati analizzati nel dominio del tempo con apposito software su piattaforma Linux (CWP/SU) per la stima del primo arrivo delle onde sismiche generate (P ed S).

I tempi di primo arrivo delle onde S sono stati determinati tramite la procedura di Boatwright (1987)¹, che prevede la tecnica dell'inversione di fase previa rotazione delle componenti orizzontali del geofono.

L'elaborazione dei dati consiste nella consiste nel diagrammare i tempi di tragitto t misurati lungo il percorso sorgente-ricevitore in funzione della profondità z .

Le procedure di interpretazione applicate al set dati registrati consistono in: **metodo diretto** e al **metodo intervallo modificato**.

Il **metodo diretto** consiste nel diagrammare i tempi di tragitto misurati t_{OSS} lungo il percorso sorgente-ricevitore in funzione della profondità z . I t_{OSS} devono essere corretti per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde. L'equazione che permette tale correzione, funzione della profondità di investigazione, è la seguente

$$t_{corretto} = \frac{z}{r} \cdot t_{osservato} = \frac{z}{\sqrt{z^2 + d^2}} \cdot t_{osservato} \quad (1)$$

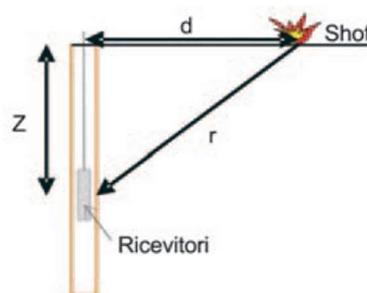


Figura 2. Raggio sismico diretto

dove

z = profondità di investigazione

¹ Boatwright John, Porcella R., Fumal T., Liu Hsi-Ping, (1986), *Direct estimates of shear wave amplification from a borehole near Coalinga, California*, Earthquake Notes, v. 57, p.8.

r = distanza tra sorgente e ricevitori

d= distanza sorgente-asse foro

Il metodo pseudo-intervallo modificato consiste nel misurare i tempi di tragitto dell'onda sismica (velocità intervallo) fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità (figura 3). Rispetto al metodo diretto, consente una maggiore definizione del profilo di velocità (velocità intervallo reale). La velocità delle onde sismiche P ed S tra due ricevitori consecutivi è uguale a:

$$V = \frac{r_2 - r_1}{t_{2CORR} - t_{1CORR}} \quad (2)$$

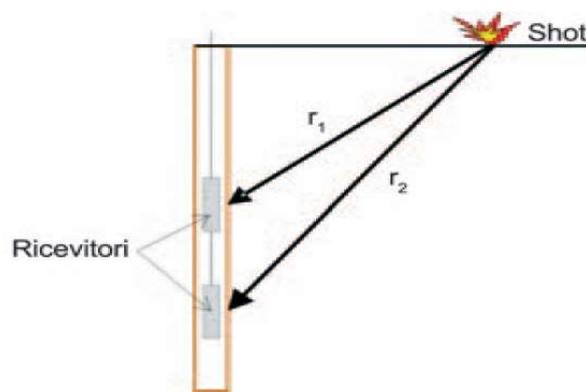


Figura 3. Percorso sismico metodo intervallo curvilineo

dove

r₁=distanza tra la sorgente e il primo ricevitore

r₂=distanza tra la sorgente e il secondo ricevitore

t₁=tempo di tragitto corretto tra la sorgente e il primo ricevitore

t₂=tempo di tragitto corretto tra la sorgente e il secondo ricevitore.

Infine, i tempi misurati consentono, in funzione della distanza tra il punto d'energizzazione e la ricezione dei segnali, di definire, per i singoli intervalli, le velocità delle onde P (V_p) e delle onde S (V_s), il coefficiente di Poisson (σ) ed i moduli elasto-dinamici e geosismici.

1.2 - MODULI ELASTICI

Il calcolo dei moduli elastici si basa sulla teoria dell'elasticità, la quale prevede che, per sforzi impulsivi e di piccola energia, i corpi subiscono deformazioni linearmente proporzionali alle forze che le originano.

In presenza di tali condizioni anche ai terreni ed alle rocce si possono attribuire le proprietà dei corpi elastici, vale a dire: omogeneità, isotropia e continuità. Pertanto, per sollecitazioni impulsive e di bassa energia, terreni e rocce rispondono nel campo della legge di Hooke:

$$\sigma = \varepsilon K$$

dove:

σ = sforzo applicato

ε = deformazione prodotta

K = coefficiente di proporzionalità (è un generico coefficiente di proporzionalità che assume significato fisico diverso in relazione al tipo di forze applicate e deformazioni conseguenti).

Le deformazioni e le tensioni generate da un transiente sismico rispondono al requisito di sollecitazioni impulsive di bassa energia. Quindi i terreni e le rocce attraversate da radiazioni sismiche subiscono deformazioni di tipo elastico.

Tali deformazioni trovano un'intrinseca corrispondenza con le fasi P e S dell'input sismico. Infatti, le velocità di propagazione delle onde sismiche variano al variare delle caratteristiche geomeccaniche e fisiche dei litotipi coinvolti e, pertanto, consentono di ottenere informazioni sulle proprietà elastiche dei mezzi attraversati.

Tali parametri, riportati nella tabella seguente, esprimono le caratteristiche elastiche di un corpo quando è sottoposto ad uno sforzo e sono:

- modulo d'elasticità o di Young (E) che fornisce una misura del rapporto sforzo-deformazione nel caso di una semplice torsione o compressione. Il modulo di Young dipende e dalla porosità dalla pressione litostatica. I valori minimi del modulo si registrano in litotipi ad alta porosità saturi in gas, mentre i valori massimi si hanno per litotipi a bassa porosità, sotto pressione e saturi d'acqua.

- densità geofisica (γ^{din}) è un parametro che indica lo stato di addensamento dei terreni ed è paragonabile al peso di volume geotecnica.

- rapporto di Poisson (σ) che dà la misura della deformazione geometrica subita da un corpo elastico e varia da 0.2 a 0.3 per le rocce compatte; da 0.3 a 0.35 per le sabbie e da 0.4 a 0.5 per le argille.

- modulo di rigidità (G) che esprime la misura del rapporto sforzo-deformazione nel caso di uno sforzo di taglio, stabilendo pertanto la resistenza del corpo alle variazioni di forma. Tale parametro è fortemente dipendente dalla porosità e dalla pressione litostatica. Assume valori più bassi in litotipi ad alta porosità, sottoposti a bassa pressione e saturi d'acqua.

- modulo di volume o di compressibilità (K) misura il rapporto sforzo-deformazione nel caso di una pressione idrostatica ed indica la resistenza del corpo alle variazioni di volume. Tale parametro varia con la porosità, con la pressione e con la quantità d'acqua presente nella roccia. Aumenta con il grado di saturazione, con il decrescere della porosità e con l'aumentare della pressione litostatica.

- modulo di contrasto (M) che esprime la misura del rapporto sforzo-deformazione nel caso di uno sforzo di compressione, stabilendo pertanto la resistenza del corpo alle variazioni in direzione perpendicolare al fronte di propagazione. Tale parametro è fortemente dipendente dalla porosità e dalla pressione litostatica. Assume valori più bassi in litotipi ad alta porosità, sottoposti a bassa pressione e privi d'acqua.

1.2.1 PARAMETRI GEOSISMICI

I parametri geosismici esprimono il comportamento sismico di un pacchetto lito - stratigrafico, in termini di potere di trasmissione dell'energia sismica da una formazione all'altra. Tale caratteristica è legata all'impedenza sismica ed a due coefficienti ad essa dipendenti: coefficiente di rifrazione (t) e coefficiente di riflessione (ξ).

- L'impedenza sismica (IS) è data dal prodotto della velocità di propagazione delle onde trasversali per la densità del mezzo in cui l'onda si propaga. L' IS è un parametro che permette di valutare l'amplificazione sismica al sito.

- I coefficienti di rifrazione (t) e di riflessione (ξ), sono altri due valori legati alla rigidità dei terreni. Tali coefficienti rappresentano il rapporto tra l'ampiezza dell'onda riflessa o rifratta con l'ampiezza dell'onda incidente.

ξ può assumere valori compresi tra -1 e $+1$: quando ξ tende a $+1$, l'onda riflessa ha la stessa fase ed ampiezza dell'onda incidente, mentre quando ξ tende a -1 , l'onda riflessa avrà la stessa ampiezza dell'onda incidente, ma sarà in opposizione di fase.

t è sempre positivo e, laddove i terreni hanno forte contrasto di impedenza sismica ($\rho_2 \gg \rho_1$), il coefficiente t tende a 2 , cui corrisponde un aumento della frazione di energia trasmessa.

1.3 - RISULTATI DOWN-HOLE

L'elaborazione dei dati sismici consiste nel differenziare il sottosuolo sismostrati e di calcolarne le grandezze fisiche medie (Tabella " Valori Medi") e nel calcolare i valori intervallo (Vd Tabella valori intervallo) e nella loro rappresentazione grafica. Inoltre, è stato calcolato il valore V_{SEQ} (1) per la definizione della categoria di sottosuolo, secondo quanto previsto dalla vigente normativa sismica.

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad (1)$$

dove

h_i \Rightarrow spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$ \Rightarrow velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N \Rightarrow numero di strati;

H \Rightarrow profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da VS non inferiore a 800 m/s

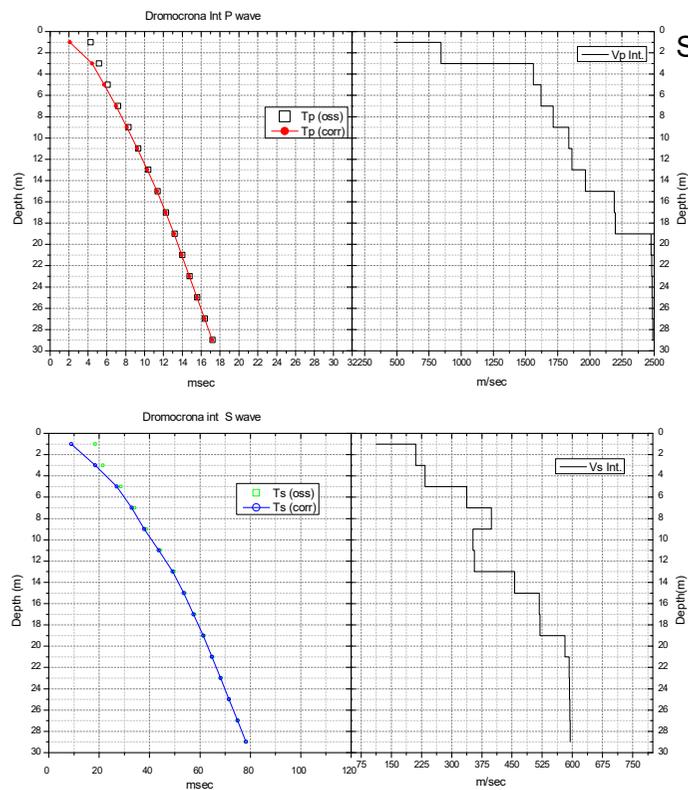
DH_S71

INTERVENTO 8 Km 4+335

Nel complesso le funzioni intervallo sono caratterizzate da un andamento regolare con la profondità. .

TABELLA VALORI MEDI

Profondità dal p.c. (m)	VP (m/sec)	VS (m/sec)	γ^{din} (gr/cm ³)	σ	Vp/Vs
da 0 a -3	661.25	161.21	1.74	0.47	4.14
da -3 a -9	1632.93	323.14	2.08	0.48	5.27
da -9 a -15	1888.44	388.41	2.14	0.48	4.91
da -15 a -FONDO FORO	2401.41	570.31	2.24	0.47	4.21
Profondità dal p.c. (m)	G (Kg/cm ³)	K (Kg/cm ³)	E (kg/cm ³)	M (kg/cm ³)	Imp. Sismica (t*m ⁻² *sec ⁻¹)
da 0 a -3	519.75	7890.50	1525.64	8583.50	285.29
da -3 a -9	2319.24	53571.39	6847.95	56663.71	673.00
da -9 a -15	3343.65	73384.31	9874.87	77842.51	830.97
da -15 a -FONDO FORO	7454.32	122172.23	21917.12	132111.32	1276.82



S71_DH

Depth (m)	VPI (m/sec)	VSI (m/sec)
da 0 a -3	661.25	161.21
da -3 a -9	1632.93	323.14
da -9 a -15	1888.44	388.41
da -15 a -FONDO FORO	2401.41	570.31

Grafico 1. Dromocrone, Velocità media ed intervallo

CONSORZIO L.R.
Laboratori Riuniti

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874. Iscritta al R.E.A. 270647

consorzio@lr-srl.it

www.LR-SRL.it

Uffici e Sede legale

Via Pablo Picasso n. 2
95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

Laboratorio Aut. L. 1086/71

Zona industriale, Capannone n. 5
94010 Catenanuova (EN)

Fax +39 095 7336297

Laboratorio Aut. Terre e Rocce

Via C. Colombo n. 69
94018 Troina (EN)

- Il valore del V_{SEQ} risulta uguale a 375.32 m/s

CALCOLO DI V_{seq} E DEFINIZIONE DEI SUOLI TIPO					
Z (m)	Spessore (h (m))	V_s (m/s)	h/V_s (sec)	$V_s Z$ (m/s)	$V_{seq\ 30}$ (m/s)
1.00	1.0	111.91	0.0089	111.91	375.32
3.00	2.0	210.52	0.0095	162.72	
5.00	2.0	233.44	0.0086	185.16	
7.00	2.0	337.54	0.0059	212.58	
9.00	2.0	398.43	0.0050	237.16	
11.00	2.0	352.65	0.0057	252.18	
13.00	2.0	356.48	0.0056	264.06	
15.00	2.0	456.10	0.0044	279.77	
17.00	2.0	517.69	0.0039	295.76	
19.00	2.0	519.92	0.0038	309.82	
21.00	2.0	581.88	0.0034	324.26	
23.00	2.0	591.87	0.0034	337.53	
25.00	2.0	592.90	0.0034	349.58	
27.00	2.0	593.67	0.0034	360.56	
29.00	3.0	594.24	0.0050	362.81	

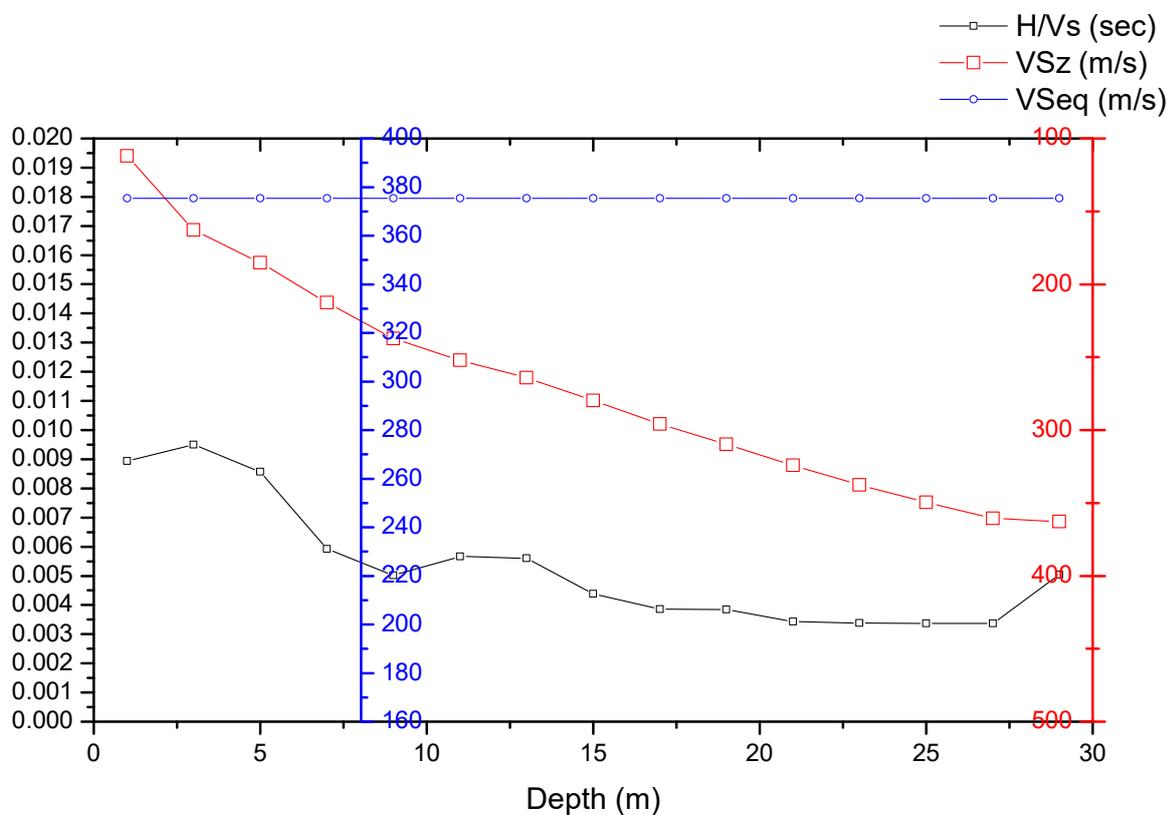


Grafico 2. Velocità media equivalente

TABELLA VALORI INTERVALLO

OFFSET (m)	Prof. (m)	V _{Pi} (m/s)	V _{Si} (m/s)	γ _{din} (gr/cm ³)	G (Kg/cmq)	k (Kg/cmq)	E (Kg/cmq)	M (Kg/cmq)	σ	V _p /V _s	Imp. Sismica (t ² m ⁻² sec ⁻¹)	Coeff. t	Coeff. ξ
2	1	478.87	111.91	1.65	2.1E+02	3.6E+03	6.2E+02	3.9E+03	0.4711	4.28	184.36	1.3538	-0.3538
	3	843.63	210.52	1.83	8.3E+02	1.2E+04	2.4E+03	1.3E+04	0.4668	4.01	386.22	1.1098	-0.1098
	5	1561.95	233.44	2.06	1.1E+03	5.0E+04	3.4E+03	5.1E+04	0.4886	6.69	481.45	1.1857	-0.1857
	7	1621.09	337.54	2.08	2.4E+03	5.2E+04	7.1E+03	5.6E+04	0.4773	4.80	701.06	1.0881	-0.0881
	9	1715.75	398.43	2.10	3.4E+03	5.8E+04	1.0E+04	6.3E+04	0.4715	4.31	836.50	0.9455	0.0545
	11	1837.46	352.65	2.13	2.7E+03	7.0E+04	8.0E+03	7.3E+04	0.4809	5.21	750.09	1.0066	-0.0066
	13	1861.43	356.48	2.13	2.8E+03	7.2E+04	8.2E+03	7.5E+04	0.4810	5.22	760.10	1.1277	-0.1277
	15	1966.42	456.10	2.15	4.6E+03	7.9E+04	1.3E+04	8.5E+04	0.4716	4.31	982.71	1.0735	-0.0735
	17	2190.99	517.69	2.20	6.0E+03	1.0E+05	1.8E+04	1.1E+05	0.4704	4.23	1138.56	1.0025	-0.0025
	19	2198.93	519.92	2.20	6.1E+03	1.0E+05	1.8E+04	1.1E+05	0.4704	4.23	1144.27	1.0675	-0.0675
	21	2476.19	581.88	2.25	7.8E+03	1.3E+05	2.3E+04	1.4E+05	0.4708	4.26	1309.86	1.0087	-0.0087
	23	2481.29	591.87	2.25	8.0E+03	1.3E+05	2.4E+04	1.4E+05	0.4698	4.19	1332.87	1.0010	-0.0010
	25	2484.97	592.90	2.25	8.1E+03	1.3E+05	2.4E+04	1.4E+05	0.4698	4.19	1335.57	1.0007	-0.0007
	27	2487.70	593.67	2.25	8.1E+03	1.3E+05	2.4E+04	1.4E+05	0.4698	4.19	1337.56	0.0000	1.0000
	29	2489.77	594.24	2.25	8.1E+03	1.3E+05	2.4E+04	1.4E+05	0.4698	4.19	1339.07	0.3513	0.6487

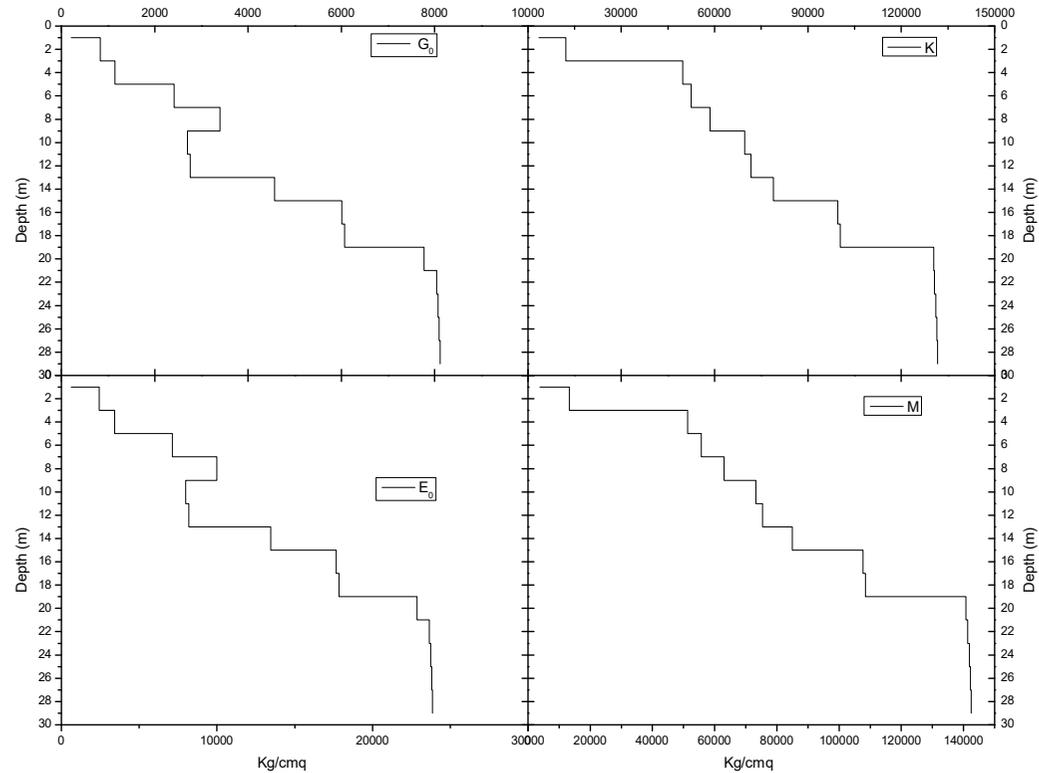


Grafico 3. Moduli elastici / profondità.

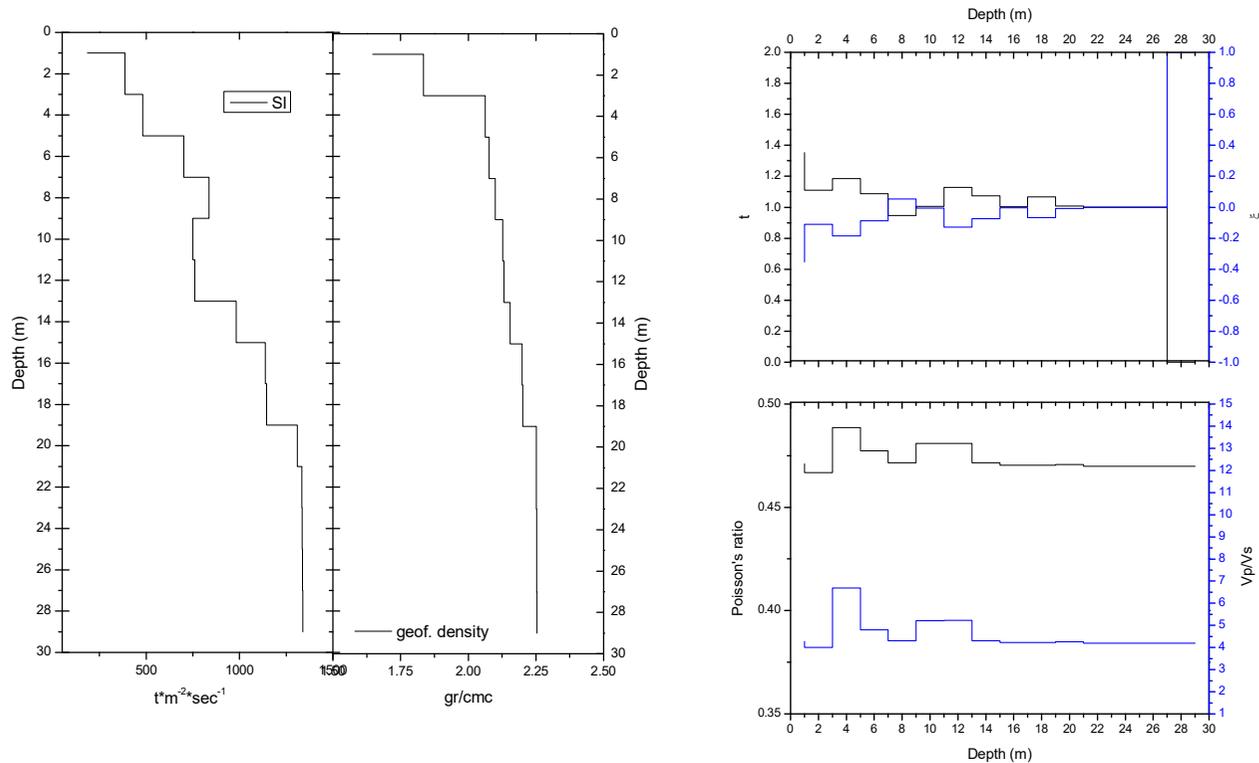


Grafico 4. - Impedenza sismica, Densità geofisica, Coefficiente di Poisson V_p/V_s Coefficiente di rifrazione e di riflessione /Profon

17

CONSORZIO L.R.
Laboratori Riuniti

Codice Fiscale, P. IVA e Iscrizione al Reg delle Imprese di Catania n. 05184000874. Iscritta al R.E.A. 270647

consorzio@lr-srl.it

www.LR-SRL.it

Uffici e Sede legale

Via Pablo Picasso n. 2
95037 San Giovanni La Punta (CT)

Tel. +39 095 336490

Laboratorio Aut. L. 1086/71

Zona industriale, Capannone n. 5
94010 Catenanuova (EN)

Fax +39 095 7336297

Laboratorio Aut. Terre e Rocce

Via C. Colombo n. 69
94018 Troina (EN)