

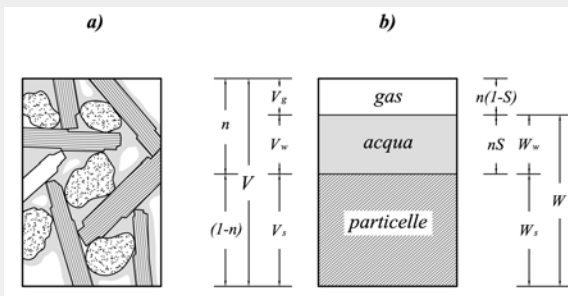
PROGETTAZIONE STRUTTURALE E GEOTECNICA DI FONDAZIONI E OPERE DI SOSTEGNO

3: COSTRUZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO

Di Francesco Romolo

Prof. Aurelio Gheresi

BREVE INTRODUZIONE AL COMPORTAMENTO MECCANICO DELLE TERRE

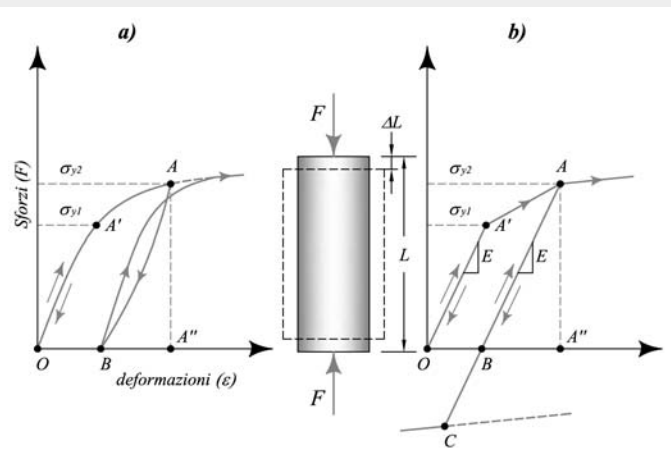


Ciò comporta che la risposta meccanica di un generico terreno, sottoposto ad esempio all'azione dei carichi indotti da una fondazione, si manifesta con una curva sforzi – deformazioni elastoplastica marcatamente non lineare e con una soglia elastica molto bassa, tanto da sviluppare deformazioni irreversibili anche con modesti livelli di sforzo.

Nel contempo la risposta meccanica di un terreno dipende dalla sua storia geologica (che si traduce nella storia tensionale), dal livello tensionale corrente, dal percorso statico e cinematico applicato a sua volta funzione dell'interazione terreno – struttura. Tutti elementi che hanno condotto il legislatore a separare il modello geologico da quello geotecnico.

I terreni non sono mezzi continui, anche se l'analisi del loro comportamento meccanico si fonda su tale assunzione; anzi rappresentano la negazione del concetto stesso di mezzo continuo, essendo di fatto costituiti da uno scheletro solido con vuoti interparticellari più o meno in comunicazione e che possono accogliere fluidi di varia natura quali aria, acqua, oli, idrocarburi, ecc.

Nel contempo i terreni manifestano un comportamento meccanico anelastico, marcatamente non lineare e caratterizzato da bassa resistenza.

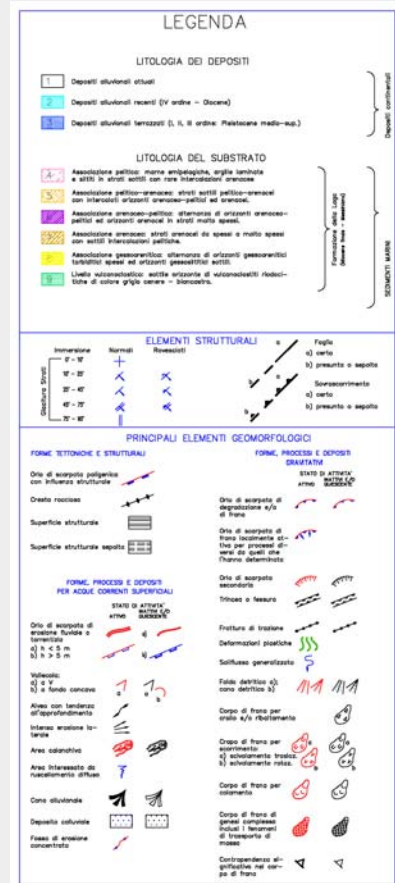


Step 1: LE CARTOGRAFIE TEMATICHE



La stesura delle carte geologiche e geomorfologiche rappresenta il primo passo nella costruzione del modello geologico di un sito così come previsto dalle NTC 2008.

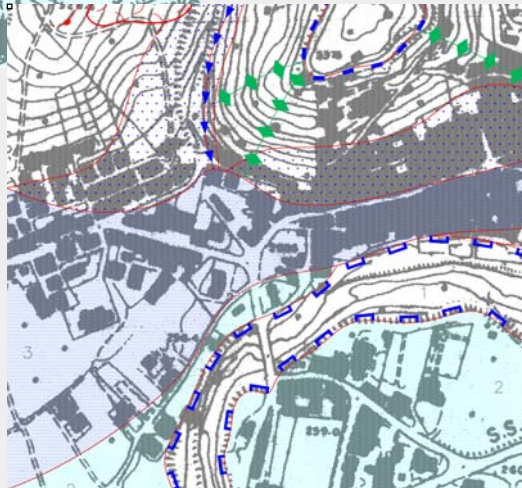
Dalla lettura della carta geologica può essere compresa la struttura profonda e superficiale, la tipologia delle formazioni rocciosa e dei terreni di copertura.



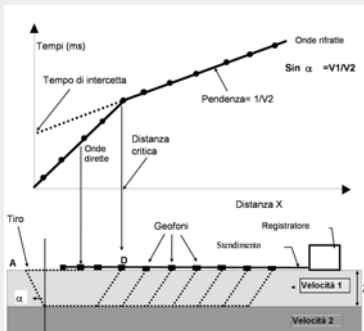
La carta geomorfologica sintetizza i depositi, i processi e le forme presenti sul territorio.

Consente di comprendere le problematiche connesse con la stabilità del sito, i fenomeni morfogenetici in atto e, tramite misure morfometriche, anche di stimare gli spessori dei terreni di copertura.

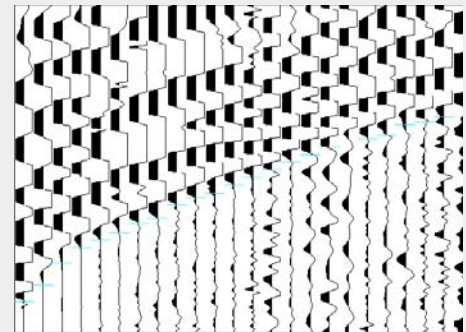
Rappresenta un elemento essenziale per la definizione di una corretta sezione stratigrafica di dettaglio.



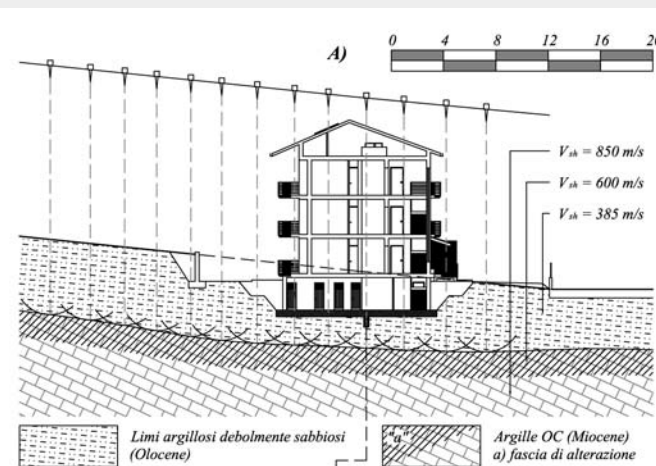
Step 2: GEOFISICA APPLICATA: la sismica a rifrazione



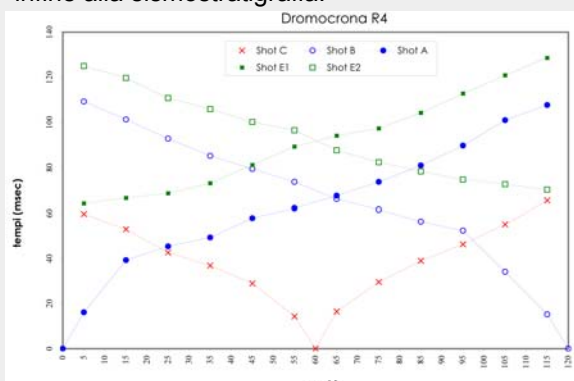
La sismica a rifrazione basa sui i suoi principi sulla propagazione, diretta o rifratta, delle onde elastiche nel sottosuolo. Il metodo prevede il posizionamento di 12/24 geofoni sul terreno lungo un allineamento e nell'energizzazione, mediante mazza su piastra in alluminio o tramite esplosivo, di onde P o S_H .



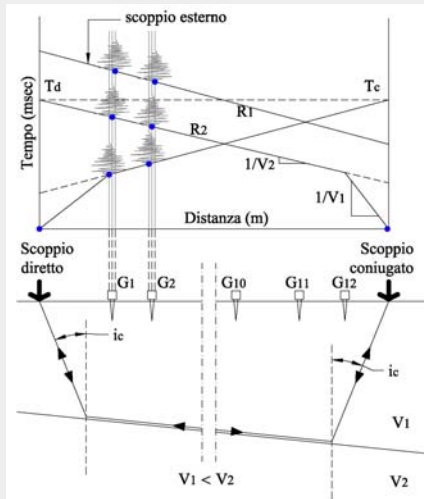
Gli elementi fondamentali che ne consentono l'uso sono il principio di Huygens (*sorgenti sismiche*), il principio di Fermat (*tempo minimo*) e la legge di Snell (*angolo critico*).



Dall' assemblaggio delle dromocrone è possibile risalire al numero degli strati, alla loro velocità ed infine alla sismostratigrafia.



Step 2: GEOFISICA APPLICATA: la sismica a rifrazione



Un metodo semplice, ma efficace anche in presenza di stratificazioni, per calcolare gli spessori sotto ogni geofono si basa sull'utilizzo del tempo di ritardo (**Delay Time**) il cui punto di partenza è dato dall'assemblaggio delle dromocrone nel classico diagramma tempi - distanze.

Il primo passo consiste nel determinare le velocità di ogni sismostrato che nel caso della figura a fianco sono V_1 e V_2 dovendo valere la condizione $V_1 < V_2$. Notare che le velocità sono il reciproco della pendenza delle singole porzioni di dromocrone attinenti ai vari strati. In altre parole dallo studio delle dromocrone è possibile determinare quanti strati esistono e le loro velocità.

Il secondo passo comporta la determinazione del **tempo di intercetta**, tramite diverse tecniche compresa la semplice proiezione regressiva delle porzioni di dromocrone fino all'asse delle ascisse.

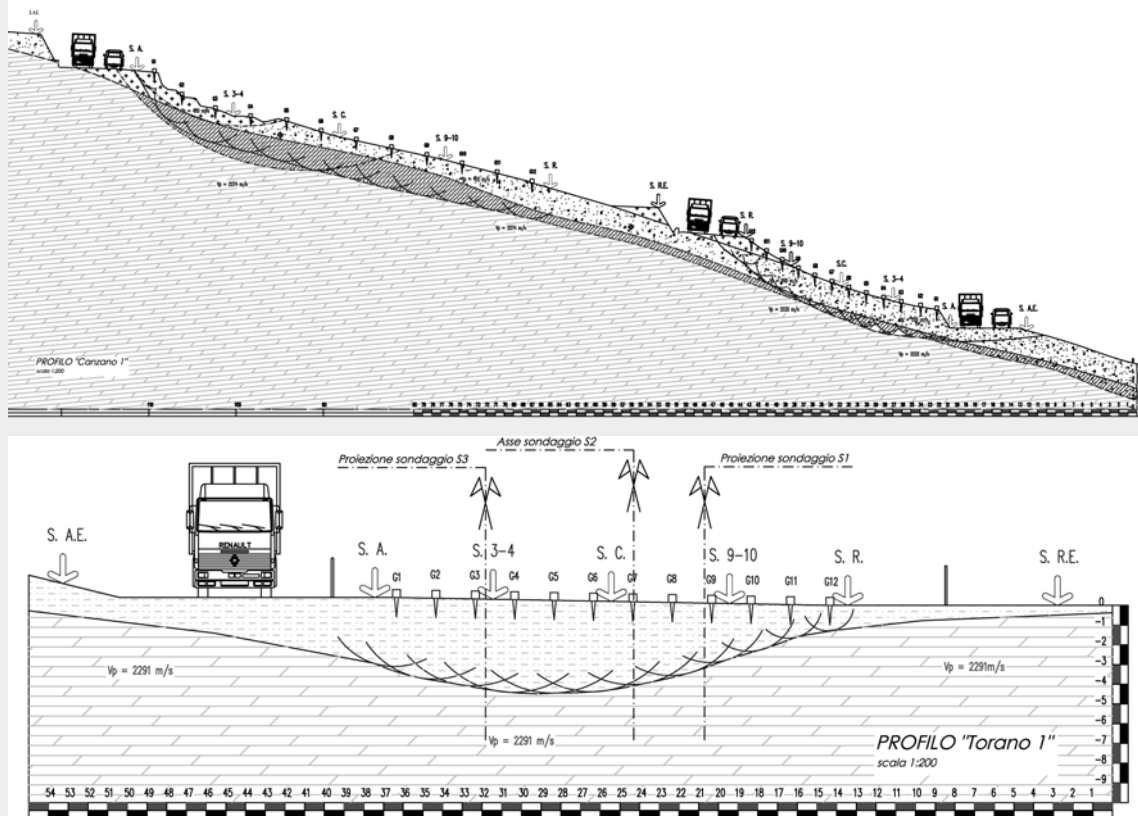
L'ultimo passo consiste nel calcolo vero e proprio degli spessori al di sotto di tutti i geofoni, che nel caso di un singolo strato è dato dalla equazione in basso a sinistra.

Nel caso, infine, di stratificazioni multiple occorre calcolare i tempi di intercetta di tutte le singole porzioni delle dromocrone per poi utilizzare entrambe le seguenti equazioni.

$$z_1 = \frac{t_i}{2} \cdot \frac{V_1 \cdot V_2}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad z_2 = \left[t_{i2} - \frac{2h_1 \cdot \sqrt{V_3^2 - V_1^2}}{V_1 \cdot V_3} \right] \cdot \frac{V_2 \cdot V_3}{2\sqrt{V_3^2 - V_1^2}}$$

Step 2: GEOFISICA APPLICATA: la sismica a rifrazione

Quali sono i limiti della sismica a rifrazione?



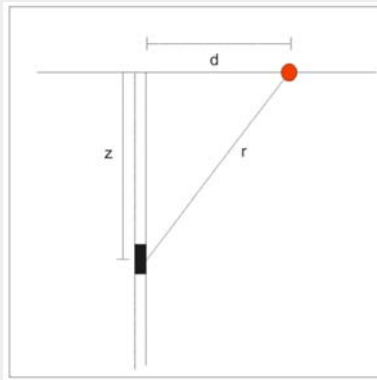
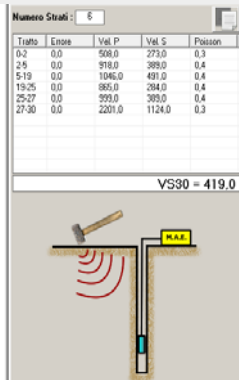
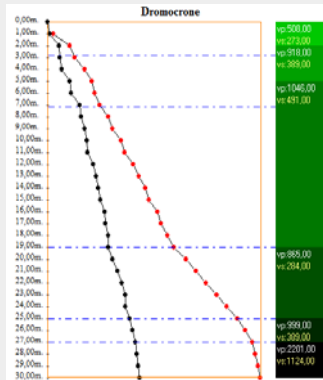
Step 3: GEOFISICA APPLICATA: la down - hole

Il metodo down-hole sfrutta la presenza dei fori di sondaggio per condurre all'esecuzione di "sismica in foro"; ovviamente quest'ultimo deve essere opportunamente condizionato con un tubo in plastica cementato nello spazio anulare al fine di evitare fenomeni di risonanza indesiderati.



Il metodo della sismica down-hole consiste in:

- 1) energizzazione eseguita in superficie in vicinanza del foro;
- 2) posizionamento dei sensori nel foro a profondità prefissate (esempio ogni metro);
- 3) determinazione del tempo diretto impiegato dall'impulso a raggiungere il geofono (determinato come nella sismica a rifrazione);
- 4) calcolo del tempo corretto, per tenere conto della deviazione indotta al raggio sismico dalla stratificazione, e costruzione delle dromocroni nel grafico tempi corretti – profondità;
- 5) calcolo degli spessori dei sismostrati e relative velocità.



$$T_{corr} = \frac{z}{r} t_{oss};$$

Equazione approssimata per il calcolo dei tempi corretti

t_{oss} = tempo diretto

z = profondità geofoni

r = distanza sorgente

T_{corr} = tempo corretto

A sinistra: esempio di Down-Hole eseguita a L' Aquila; a sinistra: figura estratta da "Di Fiore Vincenzo (ricercatore geofisico – Istituto per l' Ambiente Marino Costiero – Napoli)

Step 3: GEOFISICA APPLICATA: la down - hole

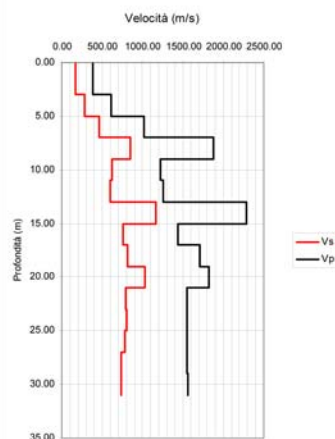
Esempio di tabelle con parametri ottenibili dalle prove DH

Profondità	Tp	Ts	Tpcorr	Tscorr
1.00	3.37	10.78	1.51	4.82
3.00	5.94	17.98	4.94	14.96
5.00	6.75	20.05	6.27	18.61
7.00	7.96	23.35	7.65	22.45
9.00	8.91	25.50	8.70	24.90
11.00	10.93	31.89	10.75	31.37
13.00	13.30	39.03	13.15	38.57
15.00	15.50	45.65	15.36	45.25
17.00	18.00	52.87	17.88	52.51
19.00	20.10	58.69	19.99	58.36
21.00	21.50	62.11	21.40	61.83
23.00	23.10	65.91	23.01	65.66
25.00	24.60	69.74	24.52	69.52
27.00	26.10	73.67	26.03	73.47
29.00	27.40	76.77	27.34	76.59

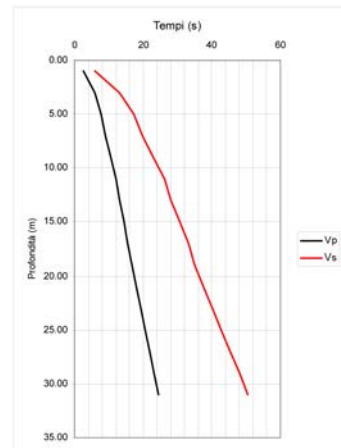
Tabella riepilogativa dei parametri

tp: Lettura tempo primo arrivo onde P (ms)
ts: Lettura tempo primo arrivo onde S (ms)
tpcorr: Lettura corretta onde P per eccentricità sorgente (ms)
tscorr: Lettura corretta onde S per eccentricità sorgente (ms)
vp: Velocità media nell'intervallo di profondità delle onde P (m/s)
vs: Velocità media nell'intervallo di profondità onde S (m/s)

Profondità	Vp	Vs	Vp/Vs	Poisson
0.00 - 1.00	664	207	3.20	0.45
1.00 - 3.00	582	197	2.95	0.44
3.00 - 5.00	1510	547	2.76	0.42
5.00 - 7.00	1442	521	2.77	0.43
7.00 - 9.00	1916	819	2.34	0.39
9.00 - 11.00	973	309	3.15	0.44
11.00 - 13.00	836	278	3.01	0.44
13.00 - 15.00	901	299	3.01	0.44
15.00 - 17.00	796	275	2.89	0.43
17.00 - 19.00	947	342	2.77	0.43
19.00 - 21.00	1415	577	2.45	0.40
21.00 - 23.00	1242	522	2.38	0.39
23.00 - 25.00	1326	518	2.56	0.41
25.00 - 27.00	1327	507	2.62	0.41
27.00 - 29.00	1531	641	2.39	0.39



Esempio di elaborazione per velocità ad intervallo di profondità



Esempio di elaborazione per dromocroni (curve tempi-profondità o distanze)

Esempio di Down-Hole eseguita dal Dott. Di Fiore Vincenzo (ricercatore geofisico – Istituto per l' Ambiente Marino Costiero – Napoli) ed energizzata in onde P ed S_H, conducente a due profili di velocità del sottosuolo ed alla possibilità di:

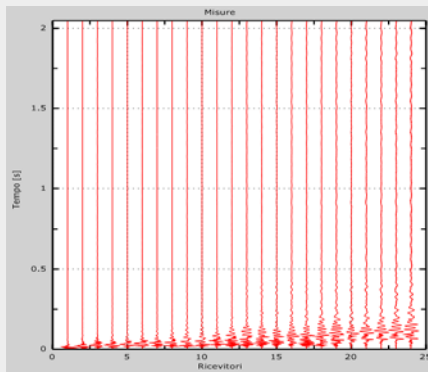
- 1) studiare la stratigrafia
- 2) determinare la $V_{s,30}$;
- 3) risalire alla categoria di sottosuolo

L' esempio fornisce:

$V_{s,30} = 392 \text{ m/s}$

Quale categoria di sottosuolo?

Step 4: GEOFISICA APPLICATA: la MASW



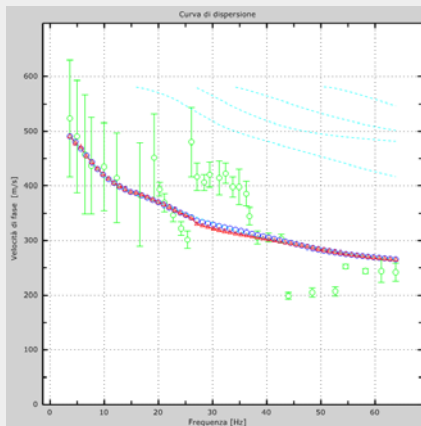
Il metodo MASW (**Multichannel Analysis of Surface Waves**) è una tecnica di indagine che consente di definire il profilo di velocità delle onde di taglio tramite la misura delle onde superficiali mediante geofoni posti in superficie.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, le quali si trasmettono con velocità correlata alla rigidezza del terreno. **In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo ovvero sono onde la cui velocità dipende dalla frequenza.**

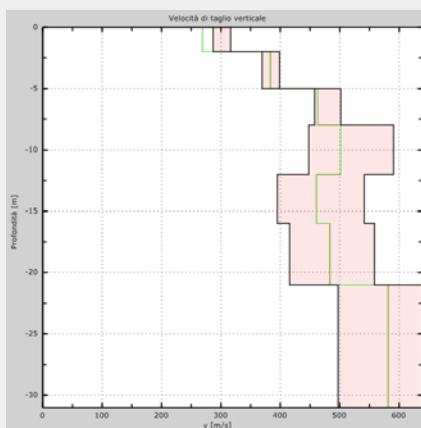
Il metodo MASW comporta diverse fasi operative:

- 1) acquisizione dati;
- 2) calcolo della velocità di fase apparente sperimentale mediante analisi matematica del segnale (trasformata doppia di Fourier);
- 3) calcolo della velocità di fase apparente numerica;
- 4) individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio modificando gli spessori, le velocità, il peso di volume degli strati fino ad ottenere la sovrapposizione tra la velocità di fase sperimentale e quella numerica del sottosuolo.

La figura in alto mostra le tracce sperimentali acquisite a Paganica (AQ) nei pressi della omonima faglia ed in terreni alluvionali di spessore superiore a 30 metri; la figura in basso illustra la sovrapposizione tra le curve di dispersione sperimentale e numerica.



Step 4: GEOFISICA APPLICATA: la MASW



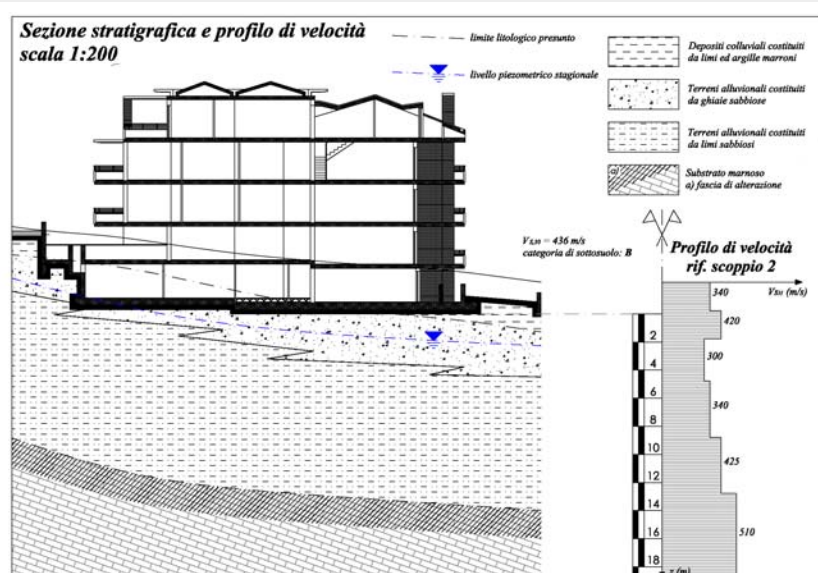
A destra un altro esempio di applicazione della tecnica MASW allo studio del profilo di velocità del sottosuolo relativo alla costruzione di un edificio residenziale su terreni alluvionali antichi:

$V_{s,30} = 436 \text{ m/s}$

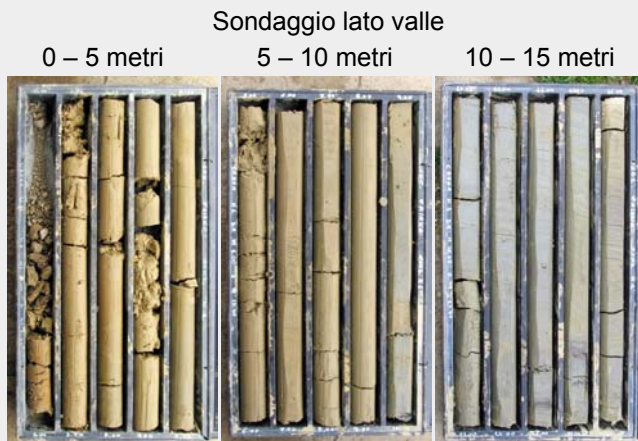
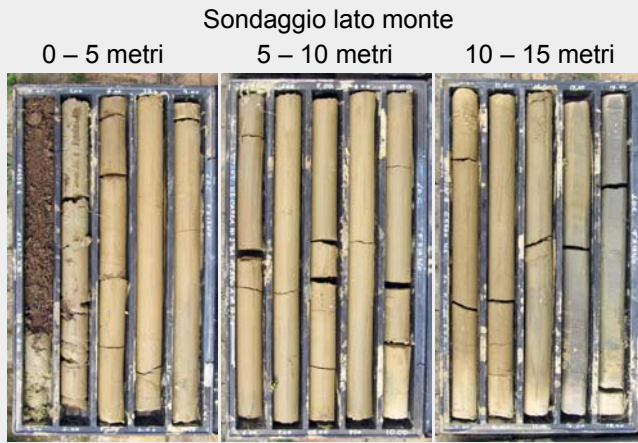
L'attribuzione della categoria B deriva dalla bassa velocità mostrata dal substrato. **E' corretta?**

La tecnica di interpretazione si conclude con la costruzione del profilo di velocità, il quale deve sempre essere confrontato con la stratigrafia locale e con il profilo geotecnico al fine di determinare, dal calcolo della $V_{s,30}$, **la più corretta categoria di sottosuolo.**

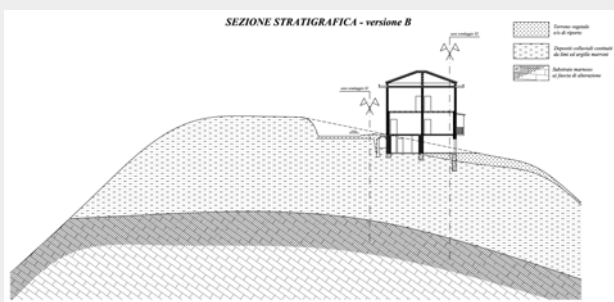
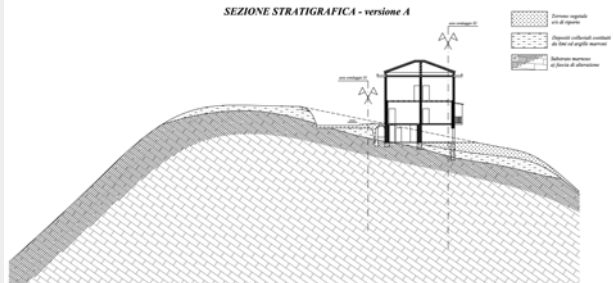
Nel caso specifico è stato ottenuto: $V_{s,30} = 467 \text{ m/s}$



Step 5: LE PERFORAZIONI DI SONDAGGIO

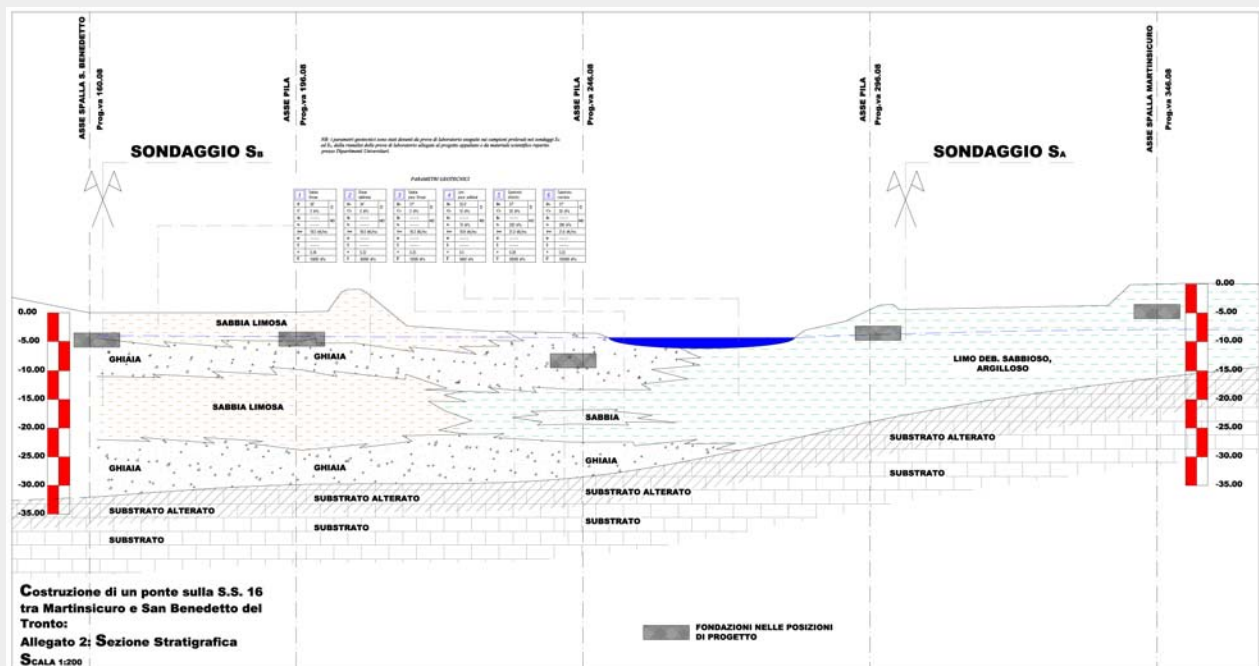


Un'accurata interpretazione delle stratigrafie, tenuto conto del contesto geomorfologico, consente di definire una corretta sezione stratigrafica o in alternativa di fuorviare del tutto il tecnico progettista preposto alla definizione del modello geotecnico. Nel caso di prelievo campioni occorre prestare attenzione alla lunghezza degli stessi, in funzione delle prove sperimentali previste.

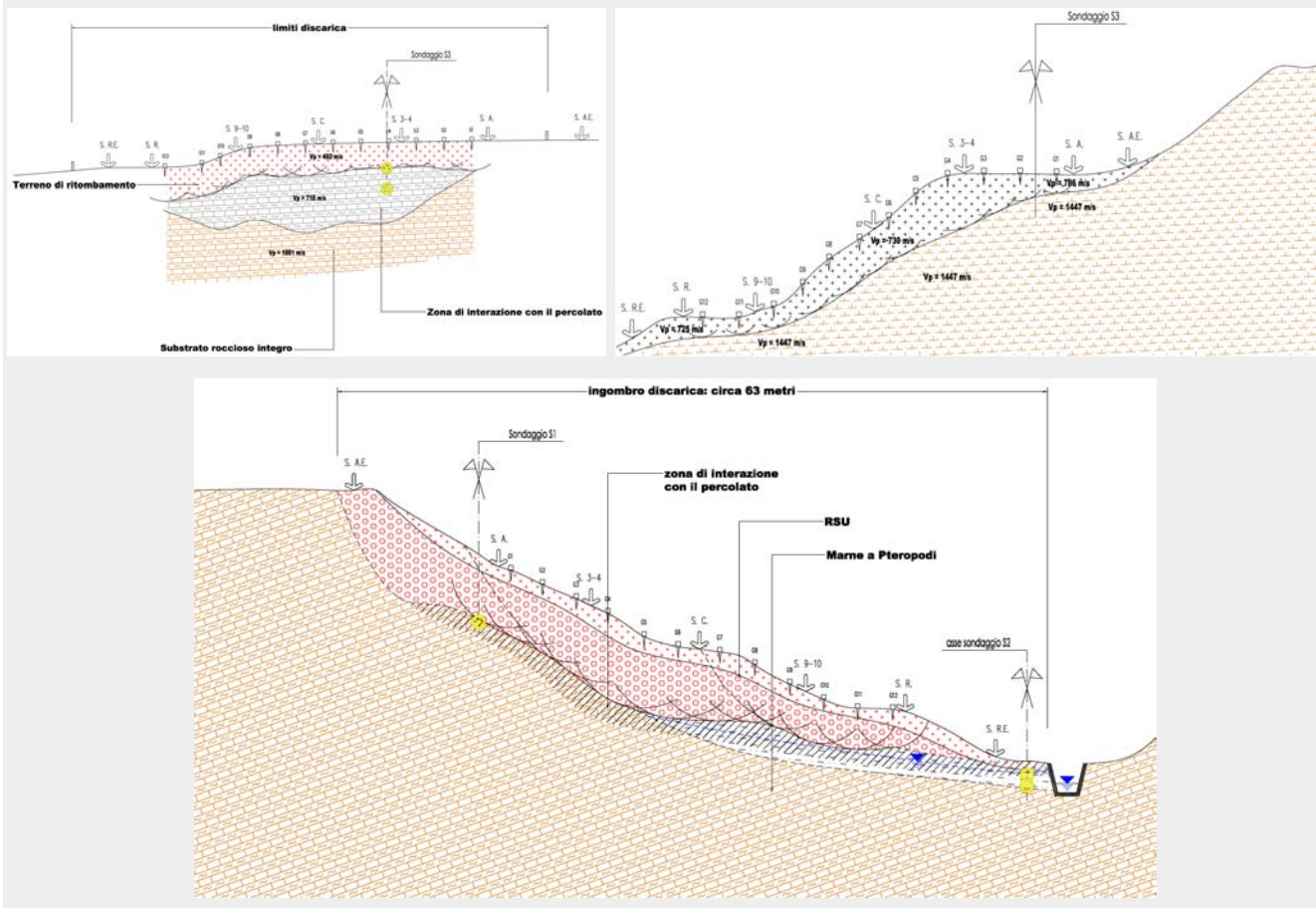


Step 6: LA SEZIONE STRATIGRAFICA

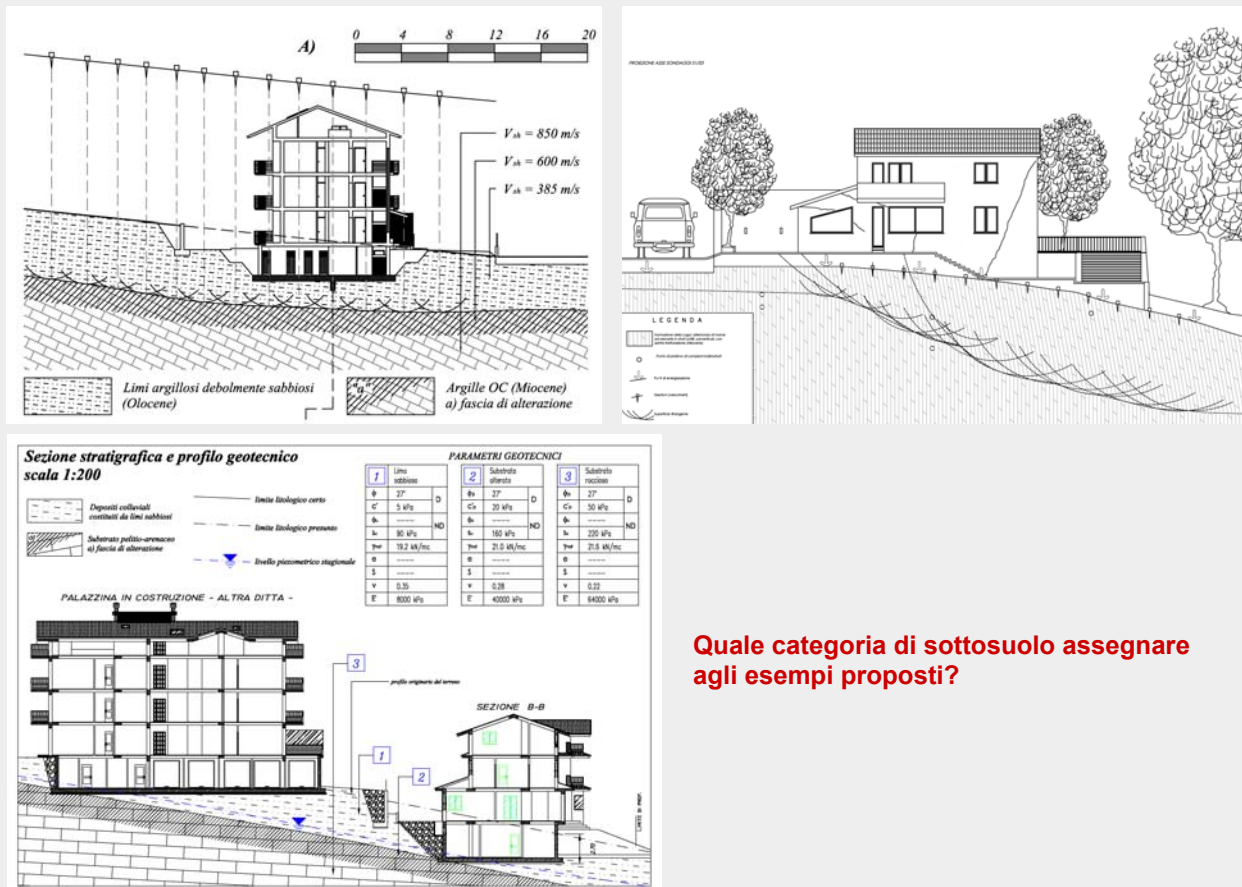
La costruzione accurata di una sezione stratigrafica consente di definire tutte le problematiche di carattere geotecnico, di definire un appropriato piano di indagini e di giungere alla formulazione di un corretto profilo geotecnico al quale affidare tutte le verifiche agli SLU ed SLE.



Esempi di sismica a rifrazione applicata alla bonifica di siti inquinati



Esempi di sismica a rifrazione applicata all'edilizia residenziale



Quale categoria di sottosuolo assegnare agli esempi proposti?

Problematiche connesse con la definizione della categoria di sottosuolo

Il paragrafo 3.2 delle nuove NTC introduce il concetto di **pericolosità sismica** espressa in funzione della massima accelerazione attesa (a_g) determinata in condizioni di *free-field*. Il punto di partenza è dato da un substrato roccioso affiorante con superficie topografica orizzontale, al quale associare una **categoria di sottosuolo A** ed una **categoria topografica T1** relativi entrambi ad assenza di amplificazioni sismiche, come dettagliato dalle sottostanti tabelle.

Tabella 3.2.II

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Tabella 3.2.III – Categorie aggiuntive di sottosuolo.

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

Esempio:

- 1) Terreni alluvionali di spessore di 10 metri a $V_s = 300$ m/s
- 2) Substrato alterato di spessore di 5 metri a $V_s = 500$ m/s
- 3) Substrato integro a $V_s = 700$ m/s

$$V_{s,30} = 463 \text{ m/s}$$

Quale categoria attribuire, soprattutto se con il solo modello geologico non sono note le proprietà meccaniche?

FINE

*Tutte le figure sono protette dai diritti di copyright;
contattare gli autori per l'autorizzazione all'uso.*