

Laureanda: Antonella Passafiume

Relatore: Prof. Raffaele Martorana

Correlatrice: Dott. Patrizia Capizzi

CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI ATTRAVERSO MISURE DI TOMOGRAFIA CROSS-HOLE

ABSTRACT

Le tecniche sismiche in foro sono spesso utilizzate per la progettazione e la programmazione di eventuali opere di intervento al fine di consolidare ed impermeabilizzare vuoti, fessure e porosità, in quanto permettono di ricavare informazioni dettagliate sulle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni, tramite la valutazione della velocità di propagazione delle onde di P e delle onde S. Le misure cross-hole, vengono eseguite con coppie sorgenti-geofoni triassiali che vengono calati parallelamente in due differenti fori. La semplice acquisizione “cross-hole”, posizionando di volta in volta la sorgente e il geofono alla stessa profondità, permette di ottenere il profilo verticale delle velocità sismiche delle onde P e delle onde S. Di contro, utilizzando un numero molto più elevato di combinazioni di posizioni sorgente/geofono, la tomografia sismica cross-hole, permette di ottenere la distribuzione delle velocità sismiche lungo tutta la sezione di terreno delimitata dai due fori. L'elevato numero di misure, se supportato da opportuni dati litostratigrafici, permette un'analisi statistica utile alla caratterizzazione meccanica delle litologie.

Nell'ambito dei “Lavori di esecuzione delle opere e delle forniture necessarie per la costruzione del lotto unico funzionale 6+7+8 Ispica – viadotti Scardina e Salvia – Modica”, la CO.SI.GE. (associazione temporanea di imprese tra la Società Italiana per Condotte d'Acqua S.p.A., mandataria, e la COSEDIL S.p.A.) ha eseguito, tramite il laboratorio Geolab srl, una serie di indagini sismiche in foro, con lo scopo di valutare il processo di consolidamento dei terreni di fondazione delle pile autostradali, con il metodo GIN. Tuttavia, i dati acquisiti nella fase di pre-consolidamento hanno evidenziato buone proprietà meccaniche del materiale, escludendo dunque la fase di consolidamento inizialmente prevista. Tutti i dati acquisiti sono stati messi a disposizione dalla Società Italiana per Condotte d'Acqua S.p.A. e utilizzati per questo lavoro. In particolare, sono stati utilizzati i risultati ottenuti da n.28 indagini geognostiche a carotaggio continuo, che hanno permesso la ricostruzione di n.28 colonne stratigrafiche (fig. 1, 2, 3).

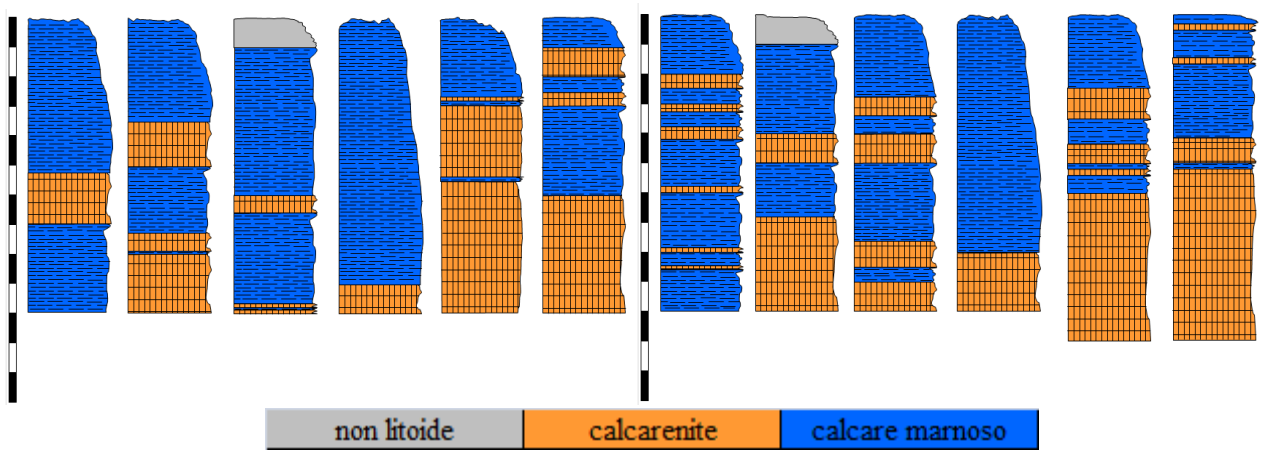


Figura 1: Ricostruzione colonne stratigrafiche da sinistra verso destra sono raffigurate le pile da 1 a 6. Al margine sinistro una barra graduata che rappresenta la profondità metro per metro; nella figura a sinistra sono illustrate le ricostruzioni dei sondaggi geognostici lato Siracusa, nella figura a destra quelle relative al lato Gela.

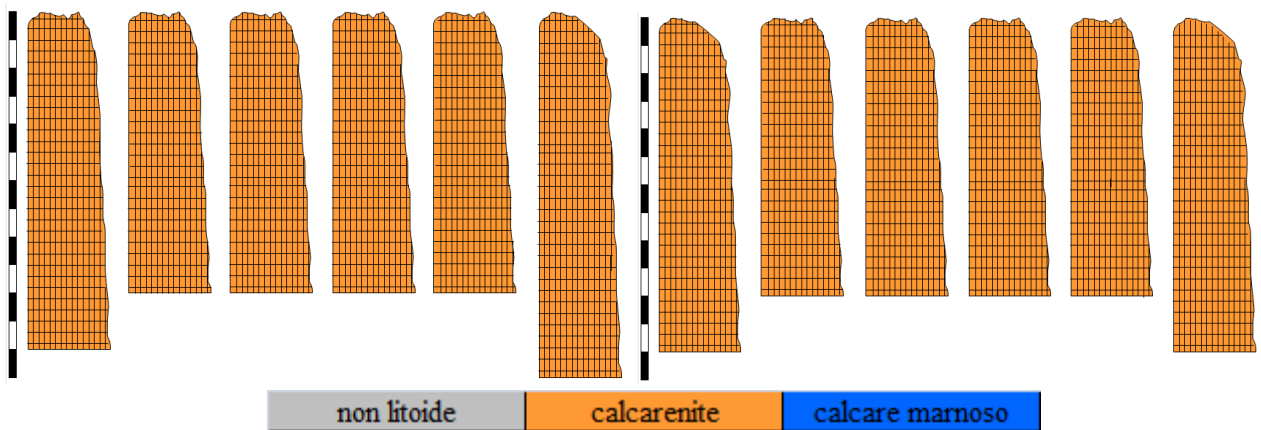


Figura 2: Ricostruzione colonne stratigrafiche, da sinistra verso destra sono le pile 7, 9, 10, 11, 12 e 13. Al margine sinistro una barra graduata che rappresenta la profondità metro per metro; nella figura a sinistra sono illustrate le ricostruzioni dei sondaggi geognostici lato Siracusa, nella figura a destra quelle relative al lato Gela.

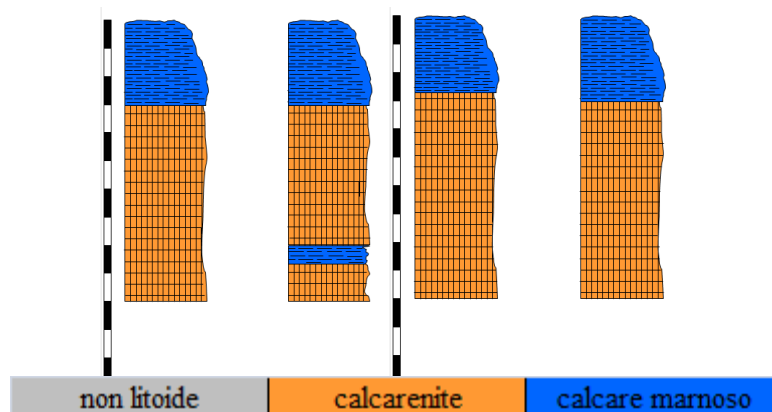


Figura 3: Ricostruzione colonne stratigrafiche, da sinistra verso destra sono raffigurate le pile 16 e 17; nella figura a sinistra è rappresentato il lato Siracusa, mentre nella figura a destra il lato Gela. Al margine sinistro delle due figure è presente una barra graduata che rappresenta la profondità metro per metro.

Per ognuno di questi sondaggi è stata eseguita una tomografia sismica di tipo cross-hole (il secondo sondaggio utilizzato per ogni tomografia è stato eseguito a distruzione di nucleo). Tutti i sondaggi geognostici e le tomografie cross-hole sono stati eseguiti a fondo delle piazzuole di preparazione delle fondazioni delle pile autostradali (a circa 7 metri di profondità).

I dati sismici acquisiti sono stati filtrati ed invertiti con il software Geotom, che utilizza la tecnica di ricostruzione algebrica SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique), al fine di ricostruire i modelli bidimensionali di velocità delle onde P e delle onde S, per ogni tomografia cross-hole eseguita.

In particolare vengono riportate due tomografie sismiche relative a situazioni diverse riscontrate nel sottosuolo, in particolare, le tomografie della pila 5 lato Siracusa e della pila 12 lato Gela; di seguito le tomografie sismiche (fig. 4) sono analizzate secondo tre scale di colore diverse, nella prima si tratta di una scala a gradazione di colore, nella seconda una scala ad intervalli di colore, nella terza una scala di soglia di colore (richiesta dai committenti).

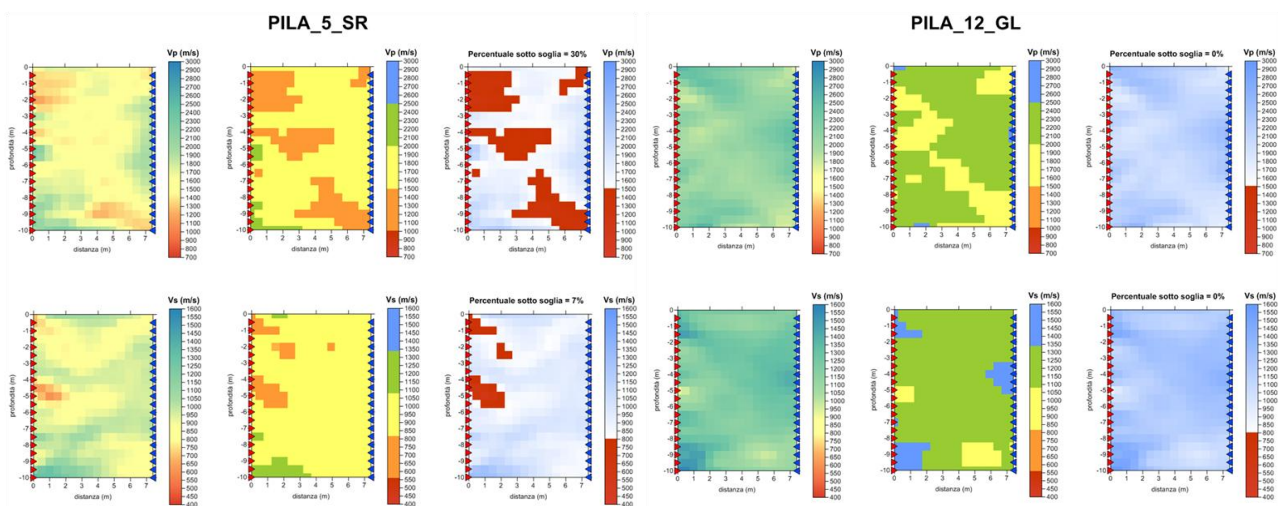


Figura 4: Tomografia sismica cross-hole relativa alla pila 5 lato Siracusa (a sinistra) e alla pila 12 lato Gela (a destra).

I modelli di velocità di propagazione delle onde sismiche sono stati utilizzati, con il supporto delle ricostruzioni litostratigrafiche, per una valutazione delle proprietà meccaniche dei terreni.

In primo luogo è stata calcolata le velocità, delle onde S e delle onde P medie e invertite in funzione della litologia, non tenendo conto della profondità di estrazione della carota (fig. 5). Nelle calcareniti, le velocità delle onde P e delle onde S sono in generale abbastanza elevate; al contrario, nei calcari marnosi le velocità di propagazione delle onde P e delle onde S hanno medie relativamente più basse e solo in pochi casi superano quelle delle calcareniti.

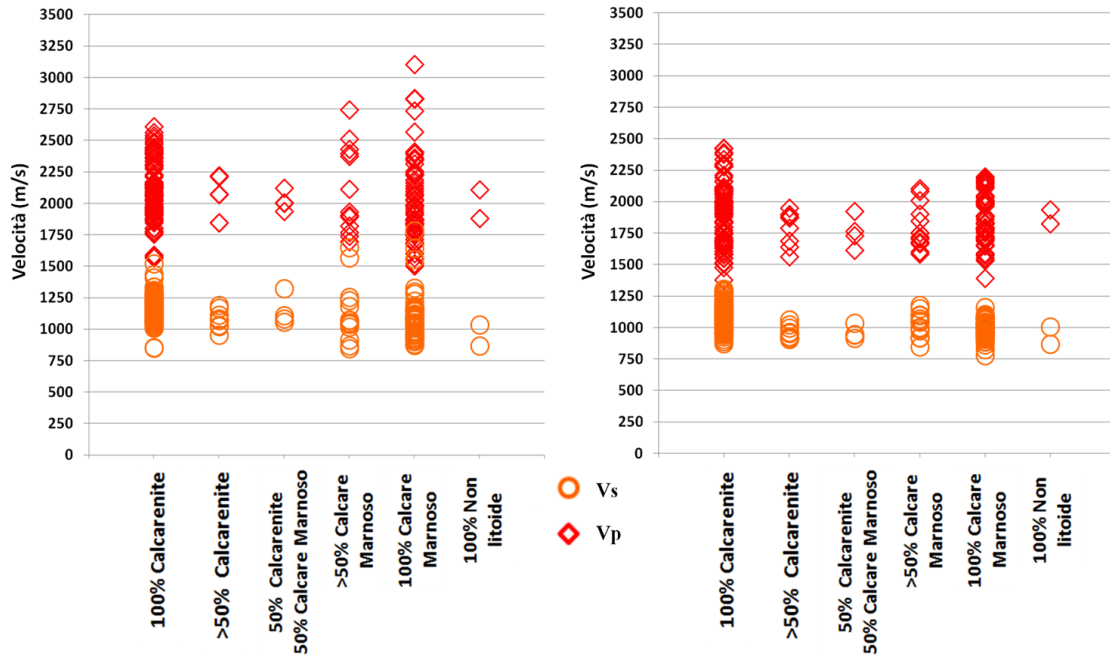


Figura 5: Grafici complessivi delle velocità, medie e invertite, delle onde P e delle onde S in funzione della litologia.

È stato in seguito elaborato uno studio statistico per la caratterizzazione sismica delle litologie presenti (calcarei marnosi e calcareniti), esaminando l'andamento generale delle loro proprietà meccaniche e fisiche in funzione della profondità (fig. 6); è possibile affermare che con la profondità tendono a crescere le velocità; questo è visibile soprattutto per le velocità invertite dalle quali si riesce a notare l'incremento,

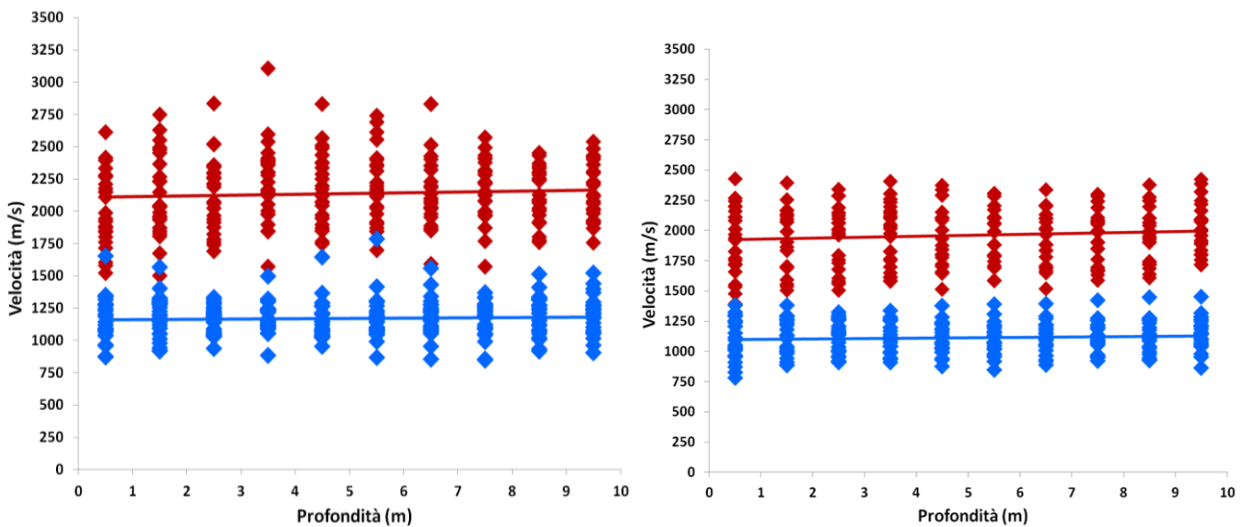


Figura 6: Grafico complessivo dell'andamento delle velocità medie delle onde P e delle onde S, in funzione della profondità (a sinistra) e delle velocità medie invertite delle onde P ed S in funzione della profondità (a destra). Le rette indicano le linee di tendenza delle velocità, metro per metro.

Queste valutazioni sono poi state ripetute su tutti gli spezzoni di carota di un metro, costituiti esclusivamente da calcare marnoso e da calcarenite, per una caratterizzazione dei litotipi stessi. In generale, si è evidenziato come nelle tomografie sismiche cross-hole caratterizzate esclusivamente da calcarenite le velocità di propagazione delle onde elastiche tendono ad essere più elevate rispetto alle tomografie sismiche caratterizzate anche dalla presenza di calcare marnoso. Nel calcare marnoso (roccia pseudocoerente), infatti, le velocità medie ed invertite delle onde P e delle onde S risultano, mediamente, più basse rispetto alle velocità di propagazione delle onde elastiche nella calcarenite che è una roccia coerente (fig. 7, 8).

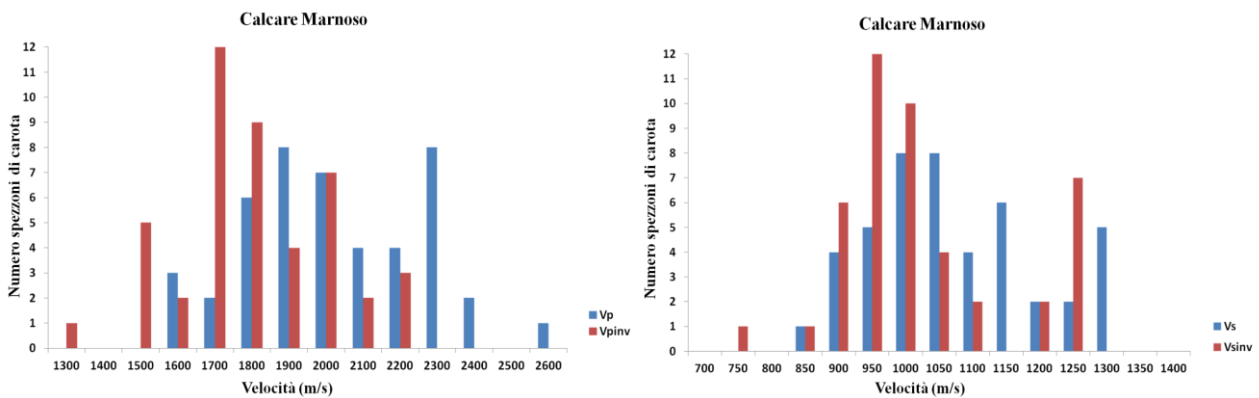


Figura 7: Grafici complessivi dell'andamento delle velocità (medie e invertite), delle onde P (a sinistra) e delle onde S (a destra), in funzione del numero di spezzoni di un metro di carota caratterizzate dal 100% di calcari marnosi.

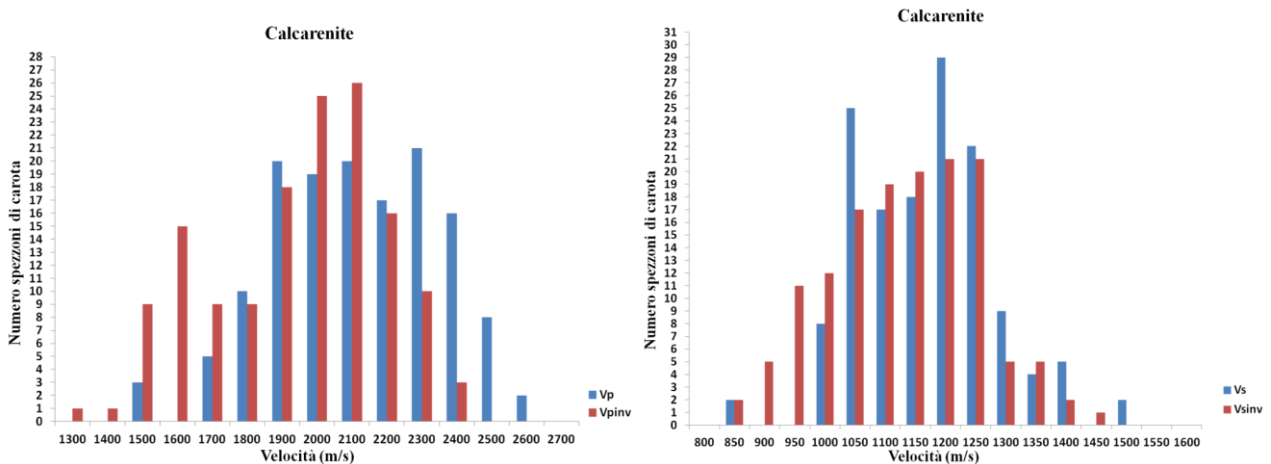


Figura 8: Grafici complessivi dell'andamento delle velocità (medie e invertite), delle onde P (a sinistra) e delle onde S (a destra), in funzione del numero di spezzoni di un metro di carota caratterizzate dal 100% di calcarenite.

Inoltre la calcarenite, indipendentemente dalla profondità, mostra un valore costante del parametro RQD, mentre per il calcare marnoso è stato evidenziato un incremento della percentuale di recupero del materiale a profondità maggiori (fig. 9).

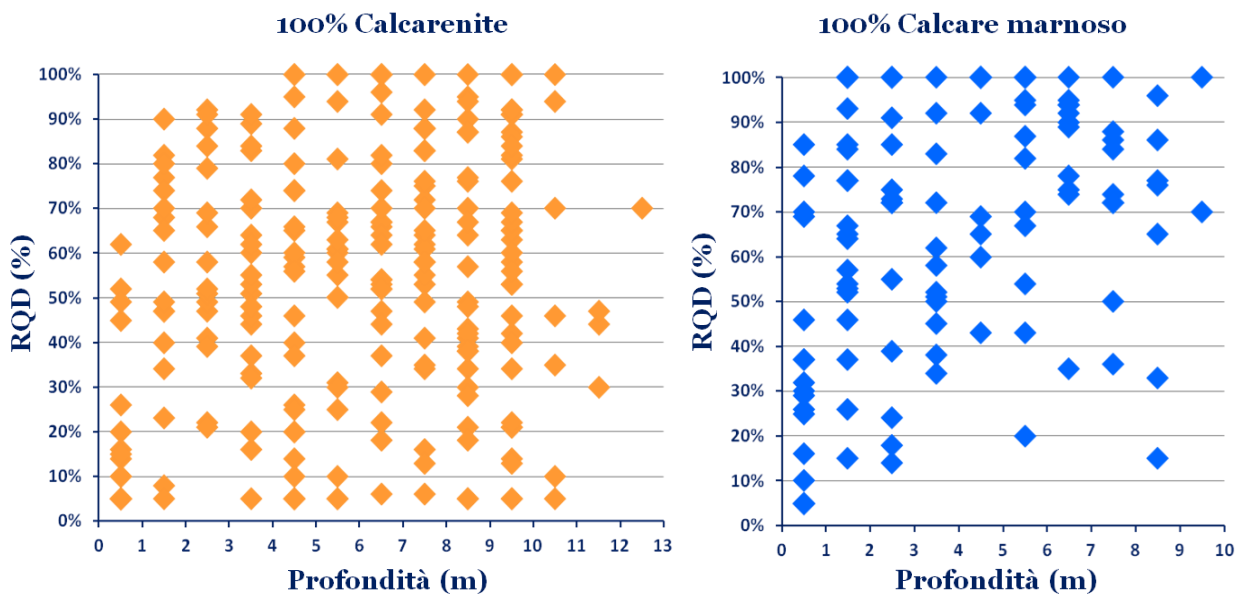


Figura 9: Grafico del parametro RQD in funzione della profondità per tutti gli spezzoni di carota costituiti esclusivamente da calcarea marnoso (in alto) e da calcarenite (in basso).

Per ogni singola pila è stato inoltre valutato l'andamento, in funzione della profondità d'indagine e della litologia, delle velocità medie delle onde P e delle onde S (calcolate sui percorsi rettilinei), delle velocità medie invertite delle onde P e delle onde S (calcolate sui percorsi curvilinei dopo l'inversione dei dati) e del fattore RQD, in percentuale.

In particolare vengono riportati due esempi relativi alle tomografie illustrate in precedenza (fig. 10).

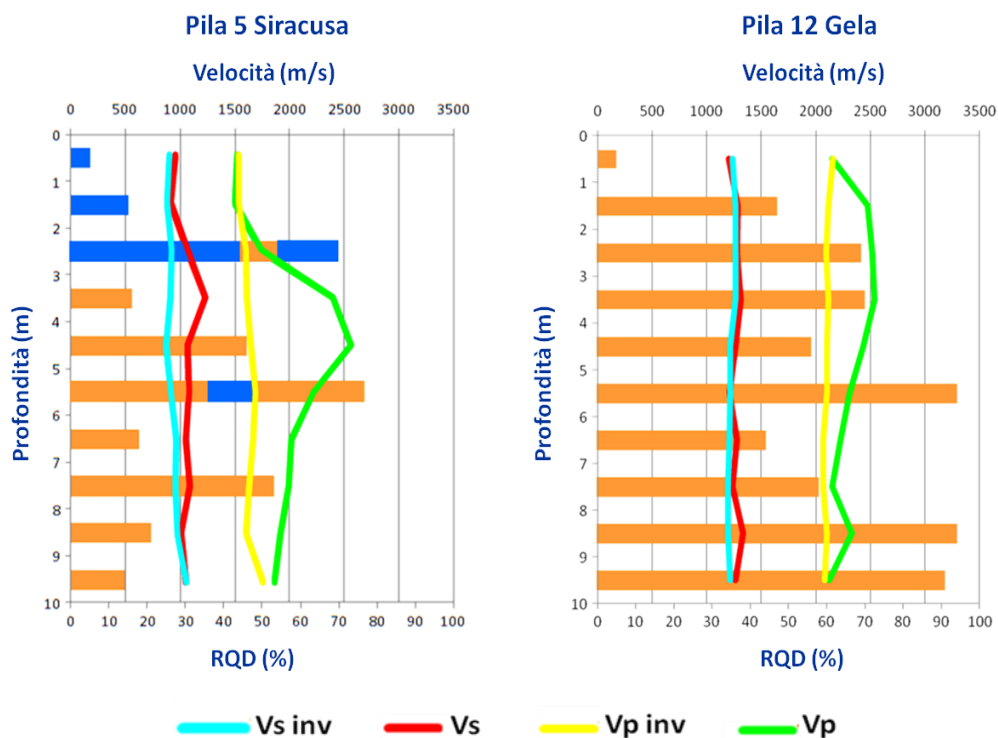


Figura 10: Grafico riassuntivo dell'andamento dei parametri per lo studio della pila 5 lato Siracusa (a sinistra) e della pila 12 lato Gela (a destra). Gli istogrammi indicano il parametro RQD e risultano colorati in base alla litologia (arancio per la calcarenite e azzurro per il calcarea marnoso).

Infine sono stati analizzati i risultati di un intervento di consolidamento con metodo GIN, eseguito su una delle pile, al fine di valutare l'efficienza del metodo e il miglioramento delle proprietà meccaniche e fisiche dei terreni, rispetto alla situazione iniziale.

Il processo di consolidamento era stato progettato in funzione delle caratteristiche fisico-meccaniche tipiche dell'alternanza calcarenitico-marnosa del membro Irminio della formazione Ragusa. In effetti i valori di velocità delle onde elastiche, confermate da dati di laboratorio su alcuni campioni di roccia (misure di velocità ultrasoniche e prove di compressione monoassiale), hanno escluso la necessità del consolidamento. Tuttavia su una pila è stato eseguito, in un campo prove iniziale, l'intervento di consolidamento, tramite metodo GIN, al fine di consolidare ed impermeabilizzare possibili vuoti, fessure e porosità. Non avendo a disposizione i dati relativi alla fase di pre-consolidamento, è stato eseguito un confronto fra i dati ricavati dalla pila consolidata con una media dei dati (metro per metro) ricavati dalle pile non consolidate relative alla stessa litologia, la calcarenite (fig. 11, 12).

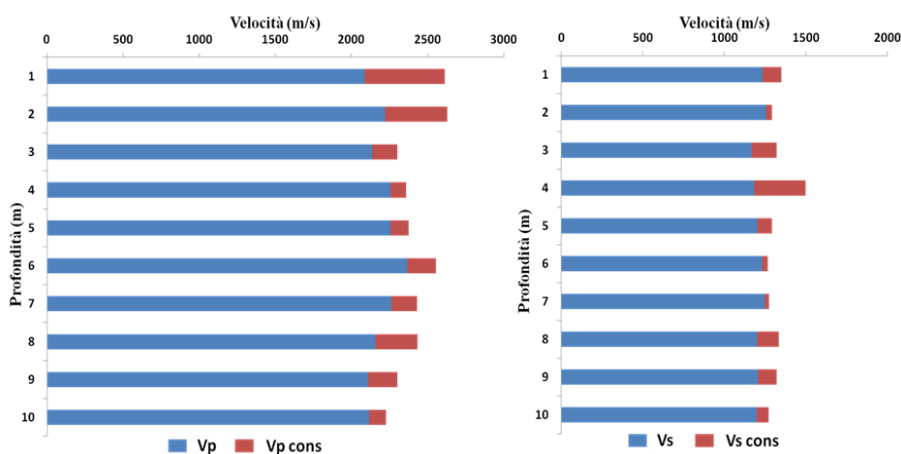


Figura 11: Grafici velocità media-profondità della pila 9 lato Gela (consolidata) e della media delle pile 7, 10, 11, 12 e 13 (non consolidate); a sinistra il grafico riporta le velocità delle onde P, a destra le velocità delle onde S.

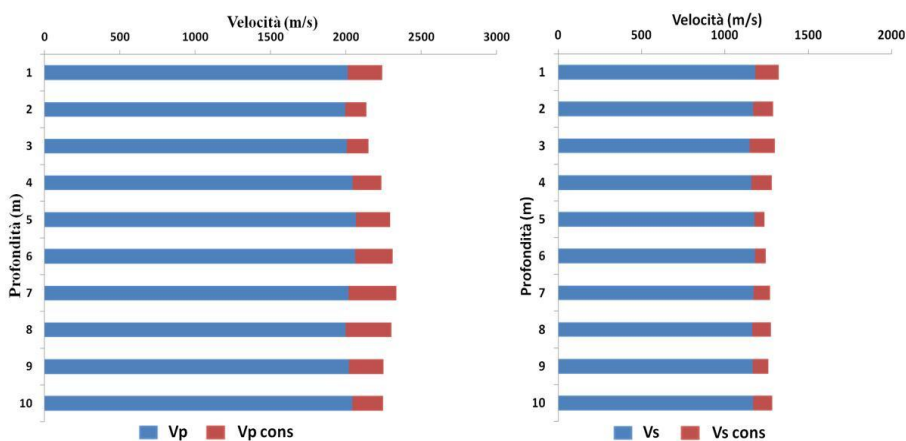


Figura 12: Grafici velocità invertita-profondità della pila 9 lato Gela (consolidata) e della media delle pile 7, 10, 11, 12 e 13 (non consolidate); a sinistra il grafico riporta le velocità delle onde P, a destra le velocità delle onde S.

Da questo confronto è stato verificato come l'intervento di consolidamento è stato sicuramente efficace. È stato infatti valutato l'incremento delle velocità di propagazione delle onde P e delle onde S di circa il 10%, confermando il miglioramento delle caratteristiche meccanico-fisiche della calcarenite.