

INDAGINI GEOFISICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE DEI TERRENI INTERESSATI DA PROGETTI DI GALLERIE FERROVIARIE. UN CASO PRATICO

B. COPPOLA - Dirigente Attività Geologia, Ferrovie dello Stato S.p.a., Roma

R. DI MAIO - Borsista post-dottorato, Dipartimento di Geofisica e Vulcanologia, Università Federico II, Napoli

M. FURANI - Direttore Tecnico Progeo S.r.l., Forlì

D. PATELLA - Professore Ordinario di geofisica applicata, Dipartimento di Geofisica e Vulcanologia, Università Federico II, Napoli

G. PULELLI - Amministratore Unico Progeo S.r.l., Forlì

F.M. ROSSI - Funzionario Attività Geologia, Ferrovie dello Stato S.p.A., Roma

Sommario

A supporto dello studio di fattibilità di una linea di collegamento ferroviario transalpino fra Italia e Svizzera sono state eseguite indagini geofisiche tese ad acquisire elementi di valutazione sulle caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni interessati dal progetto, ai fini di un contributo alla scelta del tracciato più idoneo. Il caso che si presenta riguarda l'attraversamento in galleria dei rilievi presenti in destra del lago Maggiore, fra Meina e Baveno. Detti rilievi sono costituiti dalla formazione nota come "Scisti dei Laghi", facente parte del basamento cristallino sudalpino. Si tratta, per la maggior parte, di paragneiss e micascisti con livelli di anfiboliti, localmente ricoperti da terreni morenici. Da rilevamenti di superficie e da informazioni assunte per lavori analoghi in zona, risulta che la formazione che dovrebbe essere attraversata dalla galleria ferroviaria presenta sostanziali variazioni laterali per quanto attiene le caratteristiche geostutturali di ammasso. Sono state selezionate due linee di prospezione lungo le quali si sono eseguite indagini complementari di geoelettrica dipolare tomografica e di sismica a rifrazione con studio dell'attenuazione dell'energia immessa. In tratti di particolare interesse sono state poi eseguite indagini di sismica a riflessione ad alta risoluzione. I risultati ottenuti, globalmente considerati, hanno permesso di acquisire utili informazioni sull'assetto geostutturale dell'area indagata e sulle caratteristiche della circolazione idrica locale. Inoltre hanno fornito elementi di riflessione per caratterizzazioni geomeccaniche preliminari, sviluppate esclusivamente su base geofisica.

INTRODUZIONE

Il presente lavoro si inquadra nell'ambito degli studi che la Ferrovie dello Stato S.p.A. ha avviato nell'ipotesi di un nuovo collegamento ferroviario tra Milano e Berna, diretto SSE-NNW ed esteso per circa 150 km attraverso la catena alpina in corrispondenza del valico del Sempione.

La evidente complessità ed importanza dell'opera in studio comporta, già nelle fasi preliminari di progettazione, la necessità di conoscenza del quadro geologico d'insieme dell'area interessata e delle relative problematiche di natura geologico-tecnica in senso lato, legate alla realizzazione dell'opera stessa, che dovranno essere oggetto di analisi, verifica ed approfondimento in sede di progettazione.

In una prima fase di studio del progetto (prefattibilità) è stata, pertanto, condotta una ricerca prettamente bibliografica, considerando un corridoio largo circa 20 km ed esteso tra le città di Arona (Italia) e Thun (Svizzera), di cui in fig. 1.1 è riportato l'asse medio di percorso. In territorio italiano detto corridoio si sviluppa lungo la sponda occidentale del Lago Maggiore e attraversa la catena alpina in corrispondenza delle Alpi Pennine interessando tra l'altro la valle del F. Toce. In territorio svizzero il corridoio, dal passo del Sempione, attraversa la Valle del F. Rodano all'altezza delle città di Visp e Brig per poi interessare le propaggini occidentali del massiccio dell'Aar fino alle sponde del lago di Thun.

L'insieme dei dati raccolti nello studio di prefattibilità ha permesso di focalizzare le principali problematiche geologico-tecniche connesse alla realizzazione dell'opera in progetto ed ha costituito punto di partenza per la programmazione degli studi geologici di fattibilità, con i quali è stata prevista, oltre l'approfondimento di ciascun tematismo geologico (tettonica, geomorfologia, idrogeologia, neotettonica, sismica, termalismo geologico), la realizzazione di una prima serie di indagini in sito finalizzate ad un preliminare approfondimento conoscitivo di alcune problematiche geologico tecniche che potevano risultare condizionanti per la scelta della direttrice di tracciato.

A tale scopo lo studio geologico nella fase di fattibilità è stato programmato in due fasi. Nella prima fase è stata elaborata una analisi attenta dei risultati emersi nello studio di prefattibilità e da questa si è avviata una seconda fase che è stato possibile programmare in maniera più mirata sia per gli studi di superficie sia per le indagini in sito. Questo passo è risultato fondamentale nell'ottica di ottimizzazione delle risorse economiche disponibili per le indagini in sito e, quindi, per la necessità di evitare un eccessivo e improduttivo frazionamento delle aree oggetto di studio.

Con il programma di indagine attuato sono state affrontate le problematiche geomeccaniche-geostutturali legate all'attraversamento in galleria di due aree risultate di particolare interesse nella fase attuale, in quanto, come sopra accennato, possono condizionare la scelta della direttrice di tracciato:

- l'area tra Meina e Baveno lungo la sponda occidentale del Lago Maggiore;

- l'area tra Iselle (Italia) e Gondo (Svizzera) sulla direttrice di attraversamento del valico del Sempione.

Nel primo caso la formazione litoide prevedibilmente interessata dallo scavo delle gallerie ferroviarie (paragneiss e micascisti dell'unità Scisti dei Laghi) presenta sostanziali variazioni laterali delle caratteristiche geostutturali di ammasso con prevedibili implicanze geomeccaniche in fase di scavo e di dimensionamento del rivestimento dell'opera in sotterraneo. Occorre quindi acquisire elementi sull'entità e sull'estensione di tali variazioni.

Nel secondo caso le esperienze maturate in fase di scavo dell'esistente galleria ferroviaria del Sempione e la presenza di un sistema di discontinuità orientato Nord-Sud fanno presupporre l'esistenza di una fascia di terreno allentato e disgregato in direzione longitudinale rispetto all'asse della probabile direttrice di tracciato. Occorre quindi tentare di verificare l'esistenza e l'ampiezza di tale fascia alla quota del progetto e valutarne le implicazioni geomeccaniche.

INDAGINI GEOFISICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE DEI TERRENI INTERESSATI DA PROGETTI DI GALLERIE FERROVIARIE. UN CASO PRATICO

B. COPPOLA - Dirigente Attività Geologia, Ferrovie dello Stato S.p.a., Roma

R. DI MAIO - Borsista post-dottorato, Dipartimento di Geofisica e Vulcanologia, Università Federico II, Napoli

M. FURANI - Direttore Tecnico Progeo S.r.l., Forlì

D. PATELLA - Professore Ordinario di geofisica applicata, Dipartimento di Geofisica e Vulcanologia, Università Federico II, Napoli

G. PULELLI - Amministratore Unico Progeo S.r.l., Forlì

F.M. ROSSI - Funzionario Attività Geologia, Ferrovie dello Stato S.p.A., Roma

Sommario

A supporto dello studio di fattibilità di una linea di collegamento ferroviario transalpino fra Italia e Svizzera sono state eseguite indagini geofisiche tese ad acquisire elementi di valutazione sulle caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni interessati dal progetto, ai fini di un contributo alla scelta del tracciato più idoneo. Il caso che si presenta riguarda l'attraversamento in galleria dei rilievi presenti in destra del lago Maggiore, fra Meina e Baveno. Detti rilievi sono costituiti dalla formazione nota come "Scisti dei Laghi", facente parte del basamento cristallino sudalpino. Si tratta, per la maggior parte, di paragneiss e micascisti con livelli di anfiboliti, localmente ricoperti da terreni morenici. Da rilevamenti di superficie e da informazioni assunte per lavori analoghi in zona, risulta che la formazione che dovrebbe essere attraversata dalla galleria ferroviaria presenta sostanziali variazioni laterali per quanto attiene le caratteristiche geostrutturali di ammasso. Sono state selezionate due linee di prospezione lungo le quali si sono eseguite indagini complementari di geoelettrica dipolare tomografica e di sismica a rifrazione con studio dell'attenuazione dell'energia immessa. In tratti di particolare interesse sono state poi eseguite indagini di sismica a riflessione ad alta risoluzione. I risultati ottenuti, globalmente considerati, hanno permesso di acquisire utili informazioni sull'assetto geostutturale dell'area indagata e sulle caratteristiche della circolazione idrica locale. Inoltre hanno fornito elementi di riflessione per caratterizzazioni geomeccaniche preliminari, sviluppate esclusivamente su base geofisica.

INTRODUZIONE

Il presente lavoro si inquadra nell'ambito degli studi che la Ferrovie dello Stato S.p.A. ha avviato nell'ipotesi di un nuovo collegamento ferroviario tra Milano e Berna, diretto SSE-NNW ed esteso per circa 150 km attraverso la catena alpina in corrispondenza del valico del Sempione.

La evidente complessità ed importanza dell'opera in studio comporta, già nelle fasi preliminari di progettazione, la necessità di conoscenza del quadro geologico d'insieme dell'area interessata e delle relative problematiche di natura geologico-tecnica in senso lato, legate alla realizzazione dell'opera stessa, che dovranno essere oggetto di analisi, verifica ed approfondimento in sede di progettazione.

In una prima fase di studio del progetto (prefattibilità) è stata, pertanto, condotta una ricerca prettamente bibliografica, considerando un corridoio largo circa 20 km ed esteso tra le città di Arona (Italia) e Thun (Svizzera), di cui in fig. 1.1 è riportato l'asse medio di percorso. In territorio italiano detto corridoio si sviluppa lungo la sponda occidentale del Lago Maggiore e attraversa la catena alpina in corrispondenza delle Alpi Pennine interessando tra l'altro la valle del F. Toce. In territorio svizzero il corridoio, dal passo del Sempione, attraversa la Valle del F. Rodano all'altezza delle città di Visp e Brig per poi interessare le propaggini occidentali del massiccio dell'Aar fino alle sponde del lago di Thun.

L'insieme dei dati raccolti nello studio di prefattibilità ha permesso di focalizzare le principali problematiche geologico-tecniche connesse alla realizzazione dell'opera in progetto ed ha costituito punto di partenza per la programmazione degli studi geologici di fattibilità, con i quali è stata prevista, oltre l'approfondimento di ciascun tematismo geologico (tettonica, geomorfologia, idrogeologia, neotettonica, sismica, termalismo geologico), la realizzazione di una prima serie di indagini in sito finalizzate ad un preliminare approfondimento conoscitivo di alcune problematiche geologico tecniche che potevano risultare condizionanti per la scelta della direttrice di tracciato.

A tale scopo lo studio geologico nella fase di fattibilità è stato programmato in due fasi. Nella prima fase è stata elaborata una analisi attenta dei risultati emersi nello studio di prefattibilità e da questa si è avviata una seconda fase che è stato possibile programmare in maniera più mirata sia per gli studi di superficie sia per le indagini in sito. Questo passo è risultato fondamentale nell'ottica di ottimizzazione delle risorse economiche disponibili per le indagini in sito e, quindi, per la necessità di evitare un eccessivo e improduttivo frazionamento delle aree oggetto di studio.

Con il programma di indagine attuato sono state affrontate le problematiche geomeccaniche-geostrutturali legate all'attraversamento in galleria di due aree risultate di particolare interesse nella fase attuale, in quanto, come sopra accennato, possono condizionare la scelta della direttrice di tracciato:

- l'area tra Meina e Baveno lungo la sponda occidentale del Lago Maggiore;
- l'area tra Iselle (Italia) e Gondo (Svizzera) sulla direttrice di attraversamento del valico del Sempione.

Nel primo caso la formazione litoide prevedibilmente interessata dallo scavo delle gallerie ferroviarie (paragneiss e micascisti dell'unità Scisti dei Laghi) presenta sostanziali variazioni laterali delle caratteristiche geostrutturali di ammasso con prevedibili implicanze geomeccaniche in fase di scavo e di dimensionamento del rivestimento dell'opera in sotterraneo. Occorre quindi acquisire elementi sull'entità e sull'estensione di tali variazioni.

Nel secondo caso le esperienze maturate in fase di scavo dell'esistente galleria ferroviaria del Sempione e la presenza di un sistema di discontinuità orientato Nord-Sud fanno presupporre l'esistenza di una fascia di terreno allentato e disgregato in direzione longitudinale rispetto all'asse della probabile direttrice di tracciato. Occorre quindi tentare di verificare l'esistenza e l'ampiezza di tale fascia alla quota del progetto e valutarne le implicazioni geomeccaniche.

La campagna di indagini, che viene presentata e discussa nei paragrafi seguenti, riguarda l'area tra Mèina e Baveno ed è stata articolata esclusivamente in indagini di tipo geofisico, tenendo conto del livello di approfondimento insito in uno studio di fattibilità. Sono state eseguite prospezioni di tipo elettrico, mediante geoelettrica doppio dipolo elaborata con tecnica tomografica, e prospezioni sismiche a rifrazione con studio dell'attenuazione dell'energia immessa. In un tratto di particolare interesse nell'area in esame è stata eseguita anche una prospezione sismica a riflessione ad alta risoluzione.

Nelle note seguenti vengono presentati e discussi i risultati delle indagini che hanno rappresentato un valido supporto per una prima scelta della direttrice di tracciato più idonea, fornendo altresì interessanti elementi di analisi e confronto dei risultati forniti dalle differenti tecniche di prospezione geofisica adottate.

1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

1.1. Brevi cenni sulla genesi e sulla tettonica della catena alpina nell'area di studio

La genesi della catena alpina è stata oggetto di numerosi studi fin dalla fine del secolo scorso, ma soltanto agli inizi degli anni 70 di questo secolo, con l'avvento delle nuove teorie della tettonica a placche applicate alle Alpi, si assiste ad un impulso della ricerca teorica con interpretazioni innovative sull'evoluzione del bacino originario alpino (Tetide).

In questo nuovo quadro le fasce longitudinali, riconoscibili nello sviluppo regionale della catena alpina e differenziabili per caratteristiche morfologiche, tettoniche e paleogeografiche, possono essere interpretate come strutture ("Insiemi") riferibili ad aree geografiche determinate ("Domini") che vengono precisati come segue:

- Dominio Elvetico (a cui è associato anche il Dominio Ultraelvetico): rappresenta una fascia continentale della zolla europea settentrionale che verrà coinvolta in una fase tardiva dell'orogenesi alpina. A questo Dominio appartengono i massicci cristallini esterni, la loro copertura (in parte autoc-tona) e una serie di falde di scollamento mesozoico-terziarie;
- Dominio Pennidico: rappresenta l'estremo margine del continente europeo originariamente a contatto con il paleo-oceano della Tetide, fortemente coinvolto nell'orogenesi alpina. In questo Dominio, a causa della tettonica disgiuntiva, si individuano alcune zone (Vallese, Brianzonese, Piemontese-Ligure) che presentano differenti caratteristiche paleogeografiche;
- Dominio Austroalpino: costituisce il margine della placca insubrica (meridionale) sovrascorso durante l'orogenesi al di sopra delle unità pennidiche;
- Dominio Sudalpino: rappresenta il basamento cristallino ercinico e preercinico e la copertura carbonifero-terziaria della placca insubrica. Questo Dominio è stato interessato marginalmente dall'orogenesi alpina che in questa area si è manifestata con una tettonica fragile e con una pressoché totale assenza del metamorfismo.

Anche il complesso di formazioni geologiche, più o meno tettonicamente complicato (Insieme o Sistema), che corrisponde a ciascuno dei suindicati Domini, resta contraddistinto con il medesimo aggettivo; abbiamo, così, gli Insiemi Elvetico, Pennidico, Austroalpino, Sudalpino.

I contatti tra i diversi sistemi, e tra le varie unità all'interno di ciascun sistema, sono di natura tettonica con presenza di fasce cataclastiche e/o milonitiche spesso trasformate e rielaborate dai processi metamorfici sin-orogenetici soprattutto nell'area pennidica. Ne deriva che la conoscenza dei rapporti geotettonici tra le diverse unità e la natura dei loro contatti assume un'importanza decisiva non solo nell'ambito di una ricerca scientifica ma anche, nel caso di grandi opere civili, in rapporto alla necessità di prevedere e di prevenire gli inevitabili problemi tecnici che possono manifestarsi nell'attraversamento di un orogeno. In termini estremamente sintetici, il passaggio tra Elvetidi e Pennidi, nell'area di studio, è oggetto di controversia, ma in linea di massima può essere individuato nell'area di contatto tra il massiccio dell'Aar (con la sua copertura mesozoica) e la Zona di Brig-Sion-Courmayeur. Il contatto tra Pennidi e Austridi è, viceversa, definito in base alla presenza/assenza di falde o livelli ofiolitici considerando pennidiche tutte quelle falde che giacciono al di sotto dell'unità ofiolitica strutturalmente più alta. Il passaggio Austridi-Alpi Meridionali, infine, è definito da una fascia di rocce fortemente scistose (Scisti di Fobello e Rimella) origina-

tesi in una "shear zone" che ha interessato rocce della Zona Sesia-Lanzo (Austridi) e litotipi appartenenti alle Alpi Meridionali.

Le caratteristiche geotettoniche salienti dei sistemi tettonici che si incontrano lungo il corridoio in studio, vengono qui di seguito brevemente riassunte procedendo nel senso delle spinte orogenetiche, da sud a nord.

- Le Alpi Meridionali affiorano tra Arona e Vogogna e comprendono rocce del basamento cristallino e della copertura terziaria per lo più non interessate dal metamorfismo alpino. Il basamento cristallino è costituito da litotipi metamorfici appartenenti alle unità della Zona Ivrea-Verbano (granuliti e kinzigiti) e degli Scisti del Lago (serie di micascisti e paragneiss interessati da plutoni ercinici e masse gneissiche pre-erciniche). La copertura mesozoica, sovrastante i porfidi permiani, nella zona di Arona è rappresentata prevalentemente da una sequenza carbonatica.

Queste formazioni sono interessate da alcune dislocazioni a carattere regionale, citiamo in particolare la Linea della Cremosina, a Nord di Arona, che è una faglia pre-alpina riattivata nell'orogenesi alpina ed interessa la Serie dei Laghi, la Linea Cossato-Mergozzo-Brissago, che separa la Serie dei Laghi dall'unità Ivrea-Verbano. Quest'ultima è dislocata dalla Linea Pogallo-d'Orta all'altezza di Mergozzo, che ha i caratteri di una faglia profonda in corrispondenza della quale si rileva un salto del grado metamorfico tra la Serie dei Laghi e la Zona Ivrea-Verbano.

- Il sistema delle Austridi, tra Vogogna e Cardezza, affiora in giacitura verticalizzata ed in parte milonitizzata (Scisti di Fobello e Rimella); la fascia deformata sfuma a Nord nella Zona Sesia-Lanzo costituita da litotipi gneissici decisamente più compatti.

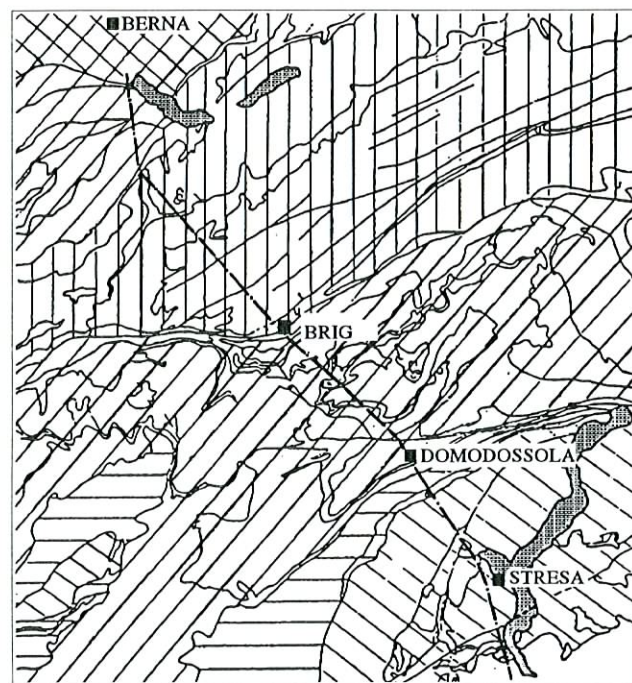


Fig. 1.1

- Le falde appartenenti alle Pennidi si rinvergono a nord di Cardezza e fino a Brig (Svizzera). Strutturalmente esse sono caratterizzate da piegamenti polifasici e complessi che presentano, tuttavia, un carattere isoclinalico a giacitura differenziata. Nel tratto tra Cardezza e Domodossola affiorano verticalizzate le falde pennidiche superiori (Falda del Monte Rosa, Zona di Moncucco) costituite essenzialmente da ortogneiss e paragneiss associati ad anfiboliti e litotipi secondari. A Nord di Domodossola si attraversano, invece, le falde pennidiche inferiori (Falda Antigorio, Falda Monte Leone, Falda Lebundun) caratterizzate da una maggiore complessità strutturale con contatti tettonici da subverticali a suborizzontali. I contatti che delimitano le masse gneissiche delle falde cristalline sono segnati in genere dalla presenza di marmi, calcescisti e micascisti appartenenti alla copertura mesozoica. Analoghi litotipi di copertura permo-carbonifera si attraversano in prossimità di Brig allo sbocco della galleria di valico.

I lineamenti tettonici presenti nell'area di affioramento delle Pennidi sembrano presentare prevalentemente caratteri di deformazione fragile. La Linea delle Centovalli, che prosegue a Ovest nella faglia del Sempione, ha un andamento Est-Ovest a giacitura subverticale con movimenti sia verticali che trascorrenti. La Faglia del Sempione, che immerge verso SW, mette a contatto tra di loro le unità pennidiche superiori e inferiori attraverso una fascia cataclastica e milonitizzata. La faglia dell'Alpe Veglia, a direzione Est-Ovest, è di incerta definizione; infatti benché la presenza di questo disturbo sia stata rilevata durante lo scavo della galleria ferroviaria esistente, in superficie non si hanno riscontri certi sulla sua continuità laterale in direzione Ovest e sulla sua estensione in profondità. In prossimità di Brig il fronte delle Pennidi determina un'area tettonicamente molto attiva, sede di fenomeni sismici anche recenti.

- Le unità delle Elvetidi sono rappresentate a Nord di Brig dai paragneiss del basamento cristallino ercinico dell'Aar con la loro copertura permo-giurassica con grado di alloctonia variabile.

1.2. Cenni di inquadramento dell'area Mèina-Baveno

L'area interessata dalle indagini geofisiche è compresa tra i paesi di Vezzo, Gignese, Massino Visconti e Sovazza siti a monte di Stresa in prossimità della sponda occidentale del Lago Maggiore (fig. 1.2). In questo tratto le direttrici di tracciato ipotizzabili interessano, in galleria, i versanti a distanza variabile dalla sponda lacustre.

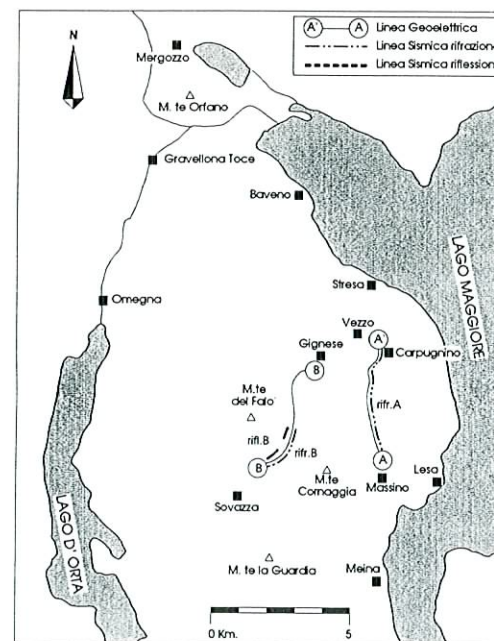


Fig. 1.2

I litotipi attraversati sono costituiti da paragneiss e micascisti appartenenti all'unità della Serie dei Laghi (sistema delle Alpi Meridionali); il complesso metamorfico, caratterizzato da rocce marcatamente scistose, risulta parzialmente coperto da depositi morenici quaternari di spessore variabile.

L'area è bordata perifericamente da più sistemi di discontinuità (Linea della Cremosina, Linea Pogallo-d'Orta, Linea Cossato-Mergozzo-Brissago, accennate nel paragrafo precedente) che pur non interessandola direttamente ne hanno condizionato l'assetto strutturale, come si può dedurre dall'analisi della morfologia superficiale legata alla presenza di un sistema di linee orientate in accordo con l'andamento delle principali linee tettoniche regionali. Inoltre l'attività dell'area è avvalorata dalla presenza di una faglia neotettonica in prossimità di Arona (poco più a Sud) e dal comportamento diversificato dell'area nel Pliocene e nel Quaternario; infatti a nord di una direttrice Est-Ovest passante tra Stresa e Lesa essa è interessata da un intenso e continuo sollevamento nel Pliocene e nel Quaternario; viceversa, a sud della medesima direttrice risulta un modesto abbassamento seguito da un sollevamento debole e moderato, nel Pliocene, e da un continuo abbassamento nel Quaternario. Si è, quindi, in presenza di una zona soggetta a basculamento strutturale.

Gli aspetti idrogeologici non presentano a priori particolari anomalie: siamo in presenza di formazioni litoidi interessate da fenomeni di tettonica fragile e pertanto caratterizzate da permeabilità per fratturazione, differenziata in relazione alla diffusione, alla intensità ed alle caratteristiche fisiche e geometriche dei sistemi di discontinuità. Dette formazioni sono ricoperte, con spessori variabili, da terreni morenici con permeabilità da media a bassa, per porosità. In generale si può schematizzare una circolazione d'acqua, di percolazione, drenante verso il lago, che costituisce livello di base locale.

Da quanto sopra appaiono delineati gli obiettivi principali della ricerca in questa fase di studio di fattibilità:

- acquisire elementi conoscitivi sulle condizioni geotettoniche e idrogeologiche delle formazioni, ai fini della scelta della più opportuna direttrice di tracciato;
- acquisire elementi di valutazione sulle caratteristiche meccaniche degli ammassi rocciosi che saranno interessati dal progetto.

2. TOMOGRAFIA GEOELETTICA DIPOLARE

2.1. Introduzione

Il contributo geoelettrico allo studio in questione è costituito nell'esecuzione di due tomografie dipolari di superficie lungo i profili: Stresa 1 - AA' (Massino) e Stresa 2 - BB' (Gignese). La traccia dei profili è riportata nella mappa di fig. 1.2.

La prospezione geoelettrica consiste, com'è ben noto, nella determinazione sperimentale del parametro della resistività apparente, attraverso misure congiunte di intensità di corrente elettrica, inviata nel sottosuolo mediante una coppia di elettrodi infissi nel terreno, e di tensione ai capi di una seconda coppia di elettrodi, anch'essi in contatto diretto col suolo.

L'analisi del comportamento della resistività apparente, al mutare della dimensione e posizione del dispositivo elettrodo di misura, fornisce un quadro normativo della distribuzione delle resistività intrinseche nel sottosuolo, nell'ambito dei volumi investigati, e quindi, in buona sostanza, un contributo significativo al disegno del locale assetto geologico-strutturale, nonché alla soluzione di eventuali problematiche applicative ad esso connesse.

In particolare, la tecnica geoelettrica della tomografia dipolare di superficie lungo un profilo, allo stato attuale decisamente meno usuale del convenzionale sondaggio geoelettrico verticale, consiste nella realizzazione di un'immagine di estremo dettaglio del comportamento areale della resistività elettrica lungo il piano della sezione verticale passante per il profilo scelto.

La fig. 2.1. mostra schematicamente il procedimento di campagna per la realizzazione d'una pseudo-sezione geologica con la tecnica tomografica dipolare. La corrente elettrica è immessa nel sottosuolo mediante un dipolo caratterizzato da due elettrodi contigui A e B posti a distanza δ l'uno dall'altro. La misura della tensione, creata dal flusso di corrente, è effettuata mediante un secondo dipolo, in linea con il precedente, anch'esso caratterizzato da due elettrodi contigui, M ed N, distanti di nuovo δ l'uno dall'altro.

La distanza fra gli elettrodi di corrente e di potenziale più vicini tra loro, precisamente B ed M, è regolata in maniera da risultare un numero intero n di volte l'ampiezza dipolare δ . La procedura tomografica di campagna consiste nell'eseguire vari transetti lungo il tracciato, ciascuno dei quali corrisponde ad un'assegnata posizione di uno dei due dipoli lungo il profilo, che viene mantenuto fisso mentre l'altro dipolo si allontana progressivamente dal primo lungo il medesimo profilo, assegnando valori crescenti ad n (1,2,...,N). La rappresentazione più adeguata dell'insieme di tutti i risultati conseguiti consiste nell'attribuire ciascun valore di resistività apparente al punto di intersezione tra due linee oblique, convergenti verso il basso, spiccate con un'angolazione di 45° dai centri dei due dipoli, ubicati nelle posizioni cui competono le misure di corrente e tensione dalle quali nasce il valore di resistività apparente in considerazione. Le resistività apparenti, distribuite come detto nei punti della griglia conseguente alle varie disposizioni mutue dei due dipoli, vengono poi sottoposte a una valutazione comparativa, che si concretizza nel tracciamento di una famiglia di isolinee di resistività apparente. Il quadro d'insieme che ne deriva, eventualmente rifinito con l'uso di una scala di colori o di grigi o con altri mezzi di contrasto tra settori contigui, rappresenta di fatto una immagine tomografica del sottosuolo lungo il profilo scelto.

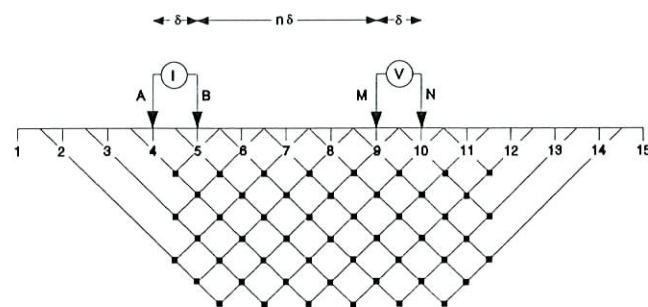


Fig. 2.1

Schema della tecnica del profilo geoelettrico dipolare per la realizzazione di una pseudo-sezione tomografica

2.2 Strumentazione e operazioni di campagna.

Le unità strumentali necessarie all'esecuzione di misure geoelettriche sono, notoriamente, l'apparato di energizzazione ed il sistema di ricezione.

L'apparato di energizzazione, utilizzato per l'espletamento delle campagne di misure qui in discussione, è costituito da un generatore di tensione in continua alimentato da batterie, provvisto di commutatore automatico della polarità secondo periodi preselezionabili, per l'invio nel sottosuolo, tramite gli elettrodi A e B del dipolo attivo di corrente, di un treno d'onde quadre di corrente a frequenza molto bassa (< 0.1 Hz). La durata della fase di energizzazione, ossia la lunghezza totale del treno d'onde, è determinata nel corso della misura, in base al rapporto segnale-rumore caratteristico del sito.

Il sistema di ricezione è invece costituito da un millivoltmetro digitale collegato ad un computer, che memorizza i valori di tensione ai capi degli elettrodi M ed N del dipolo passivo con un passo di campionamento regolare, preselezionato dall'operatore in modo da rientrare un numero intero di volte nel ciclo completo di un'onda di corrente. Inoltre, un software di esercizio fornisce in tempo reale, alla fine di ogni ciclo di corrente, la media di tutte le stime della tensione di picco, riferite ai cicli di corrente via susseguirsi. Per comprendere il significato di questa tecnica di misura, è necessario tener conto che, nelle normali condizioni sperimentali, oltre al segnale di tensione direttamente collegato alla corrente di energizzazione, sono sempre presenti nel sottosuolo due fattori di disturbo, dei quali uno a carattere stazionario, generato da fenomeni di polarizzazione spontanea, e l'altro a carattere casuale, provocato da sorgenti naturali e/o artificiali spurie di vario genere.

La procedura computerizzata appena descritta mira pertanto ad isolare il segnale utile di tensione, mediante il processo di rimozione immediata del

fattore di disturbo stazionario e di abbattimento progressivo di quello casuale. Il primo obiettivo si raggiunge banalmente grazie all'inversione della polarità del flusso di corrente continua nel sottosuolo, cioè grazie all'uso dell'onda quadra di corrente. Il secondo obiettivo viene invece raggiunto grazie a quella proprietà dei processi stocastici, che afferma che la somma di m elementi di un rumore casuale, comunque selezionati, ne attenua la portata rispetto ad un segnale coerente di un fattore pari alla radice quadrata di m (Sheriff, 1984).

Prima dell'esecuzione delle misure si provvede a marcare sul terreno i punti in cui disporre i dipoli di corrente e di tensione. A tale scopo, per le esigenze proprie della ricerca di cui si tratta, è stata fissata un'ampiezza dipolare δ pari a 100 m. Sono quindi risultate, lungo le linee dei profili, le seguenti numerazioni progressive: da 1 a 50 per la linea Stresa 1-AA' e da 1 a 45 per la linea Stresa 2-BB'.

Riprendendo il discorso iniziale sulla tecnica di esecuzione della tomografia geoelettrica, per lo studio in esame si è proceduto con la seguente modalità. Fissata la posizione del dipolo di tensione in corrispondenza di una coppia consecutiva di punti lungo il tracciato a partire dalla coppia 1-2, si è dato inizio alla sequenza di misure, disponendo il dipolo di corrente in corrispondenza della coppia di punti immediatamente successiva a quella occupata dal dipolo di tensione, e così via fino al termine del transetto. Così ad esempio se il dipolo di misura veniva ad occupare la posizione 5-6, il dipolo di corrente procedeva progressivamente nelle posizioni 7-8, 9-10 La posizione più distante del dipolo mobile è regolata dalla massima profondità d'investigazione richiesta dal problema in esame. Nel caso in questione, la massima penetrazione lungo tutti e due i profili è stata fissata intorno ai 400 m., e poiché la profondità di investigazione corrisponde all'incirca alla metà della distanza fra i centri dei due dipoli, ciò ha comportato la scelta di N pari a 7.

Per il calcolo della resistività apparente è stata utilizzata la seguente formula (Hanneson, 1990)

$$\rho_a = [\pi \cdot \delta \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2)] \cdot (V/I)$$

dove V è la tensione ai capi del dipolo di misura ed I è l'intensità della corrente inviata nel sottosuolo col dipolo di energizzazione. Definendo V in volts, I in ampères e δ in metri la resistività apparente viene espressa in ohm-metri (Ωm). Il termine fra parentesi quadre è comunemente denominato fattore geometrico.

2.3. Analisi delle tomografie geoelettriche.

Le figg. 2.2 e 2.3 mostrano le pseudo-sezioni geologiche risultanti a seguito delle ricostruzioni tomografiche lungo i profili selezionati. Passiamo ora all'analisi degli andamenti strutturali prevalenti nelle due pseudo-sezioni.

A) Profilo Stresa 1-AA' (Massino)

La pseudo-sezione relativa al tracciato Stresa 1-AA' (Massino) manifesta valori di resistività apparente che variano da poco meno di 100 Ωm fino a poco più di 2000 Ωm .

Emerge una chiara generale tendenza della resistività ad aumentare verso il basso. Infatti, i valori più alti di resistività si riscontrano quasi dappertutto ad una profondità di investigazione superiore ai 300 m.

Appare evidente poi, lungo tutta la pseudo-sezione, una marcata variabilità laterale della resistività con passaggi alquanto bruschi da zone conduttive ad altre resistive. Inoltre, in alcuni settori del profilo, la forma chiusa delle isolinee mette in luce l'esistenza di nuclei ora molto conduttivi ora molto resistivi.

In linea di massima, la parte più resistiva (da 800-1000 Ωm in su) può essere associata a rocce lievemente fratturate con debole circolazione idrica all'interno. Viceversa, le componenti a resistività medio-bassa (da 300 a 800 Ωm) possono essere riferite a rocce più fratturate e con non trascurabile circolazione idrica all'interno. Infine, le zone che presentano le più basse resistività (da 300 Ωm in giù) possono essere verosimilmente caratterizzate da un elevato contenuto di particelle di argilla.

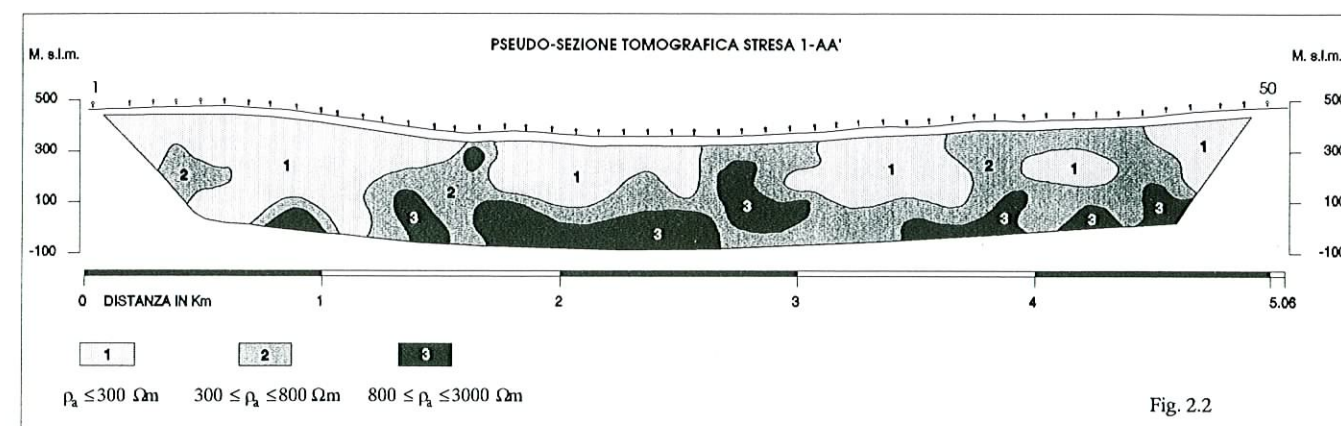


Fig. 2.2

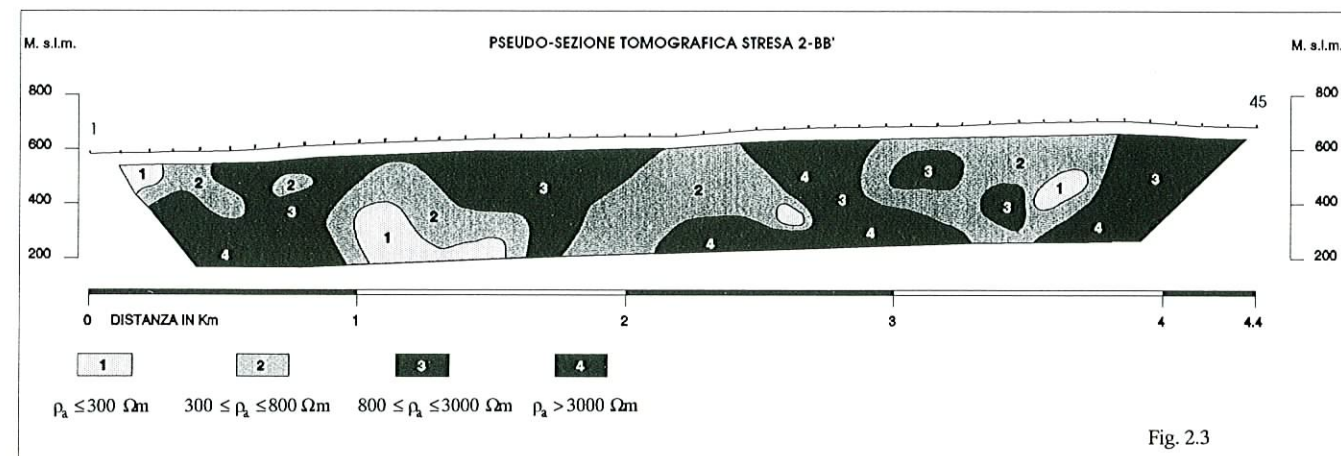


Fig. 2.3

B) Profilo Stresa 2-BB' (Gignese)

Nella pseudo-sezione relativa al tracciato Stresa 2-BB' (Gignese) si osservano valori di resistività apparente variabili da poco meno di 100 Ωm fino a poco più di 10000 Ωm .

A differenza del profilo precedente, in questa tomografia si stenta a riconoscere quella generale tendenza della resistività a crescere verso il basso.

Ciò può essere in parte dovuto alla circostanza che le resistività sono qui globalmente attestate su livelli più elevati, ed in parte dovuto ad una maggiore variabilità laterale che ora si manifesta con più forti contrasti di resistività anche alle massime profondità d'investigazione raggiunte.

E' ora anche più marcata la tendenza delle isolinee a circoscrivere sia nuclei ad elevatissima resistività, in maggioranza, che sporadici nuclei a bassa resistività.

Particolare rilevanza assume il comportamento delle isolinee nel settore compreso tra i punti 1 e 14, dove il nucleo conduttivo di forma pseudo-ellittica, posto al di sotto dei punti da 10 a 14, sembra adagiarsi sulla porzione più profonda d'una superficie inclinata, che marca la separazione di detto nucleo conduttivo da quello ad elevata resistività, che si concentra alla sua sinistra al di sotto dei punti da 3 a 9.

Analogha considerazione potrebbe essere fatta nel settore opposto al di sotto dei punti da 36 a 42, dove, sia pure in maniera decisamente meno marcata, si rintraccia la presenza di una coppia di nuclei conduttivo-resistivo a contatto lungo un piano apparentemente inclinato.

Per quanto attiene infine la lettura in chiave geologica dei valori di resistività emersi in questa tomografia, si può ritenere che valgano le stesse considerazioni di prima, salvo la circostanza che ora i termini a più alta resistività (da 800 Ωm in su) sono decisamente prevalenti e che la presenza di valori ben al di sopra dei 10000 Ωm porta ad ammettere l'esistenza, localmente, di nuclei rocciosi molto compatti ed anidri.

3. PROSPEZIONI SISMICHE

3.1. Indicazioni generali

La prospezione sismica a rifrazione è stata effettuata sul versante occidentale del Lago Maggiore tra gli abitati di Gignese, Carpiugino e Massino Visconti.

L'indagine in oggetto, è stata finalizzata alla determinazione, in continuità areale, delle caratteristiche stratigrafiche e di consistenza differenziata del substrato lapideo rappresentato, come in precedenza detto, nella zona di Stresa dalla "Serie dei Laghi" (micascisti a biotite e muscovite, granatiferi, con gneiss minuti - Scisti dei Laghi -).

Per ottenere una più significativa indagine sullo stato di consistenza o degrado del materiale roccioso investigato si è effettuato congiuntamente all'analisi della velocità di propagazione delle onde di compressione (V_p), lo studio dell'attenuazione dei segnali sismici che si sintetizza nella valutazione del fattore adimensionale di qualità (FQ).

La copertura detritica è costantemente presente lungo le sezioni sismiche con spessori variabili; per quanto riguarda invece il substrato roccioso, questo è interessato pressoché ovunque da più o meno estesi fenomeni di dislocazione e fratturazione.

3.2. Modalità operative

Il programma di investigazione previsto è risultato costituito (fig. 1.2) da n° 2 linee sismiche a rifrazione (A, B) e da una linea sismica a riflessione in corrispondenza della linea sismica a rifrazione B. E' stato possibile perciò effettuare analisi del substrato lapideo e ricercarne le sue differenziazioni interne fino a circa 110 - 180 metri di profondità dal piano campagna; profondità maggiori sono state indagate in corrispondenza della linea B con la prospezione sismica a riflessione.

Come sorgente di energia sismica è stato utilizzato un apparato energizzatore costruito dalla Progeo s.r.l. ad impatto meccanico visibile nell'immagine qui riportata in fig. 3.1.

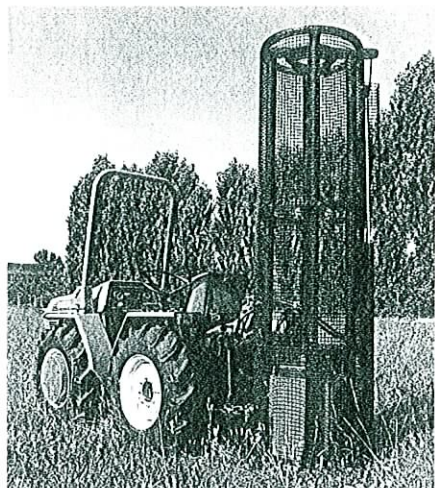


Fig. 3.1

Apparato energizzatore per sismica a rifrazione e riflessione "Thumper".

Il sistema digitale di acquisizione dei dati di rifrazione sismica è costituito da un sismografo Geometrics ES-2401 a 24 canali di registrazione simultanea, da geofoni, amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la registrazione dei dati digitali.

L'interpretazione dei tempi di rifrazione, acquisiti in maniera automatica e controllati dall'operatore tramite opportuno software dalle registrazioni digitali di campagna, è stata effettuata mediante analisi computerizzata secondo il Generalized Reciprocal Method (Palmer 1980).

Il metodo GRM, riconosciuto come uno dei migliori e significativi per le determinazioni sismostratigrafiche, consente di discriminare con precisione al di sotto di ogni geofono, le profondità e le velocità dei vari rifrattori consentendo una dettagliata analisi in continuità areale delle particolarità strutturali e di consistenza differenziata rilevabili nel sottosuolo.

3.3. Fattore qualità (FQ)

Tra le diverse indicazioni attingibili in fase di prospezione microsismica sono di rilevante interesse geognostico – per la significatività circa la natura e lo stato dei materiali – quelle correlabili al fenomeno di attenuazione anelastica degli impulsi sismici.

In concomitanza col processo di attenuazione, l'energia sismica è assorbita dai materiali in vario grado, in relazione allo specifico divario rispetto alla condizione di perfetta elasticità; i meccanismi di tale processo sono da ricercarsi principalmente nella fratturazione, per i materiali lapidei, nella granulometria e consistenza, per quelli detritici, e la sua misura permette una parametrizzazione dei materiali in tali termini.

Per i materiali lapidei, valori di FQ < 10–12 indicano rocce molto fratturate, decomprese ed alterate; valori superiori a 20–30 materiali a struttura massiccia, compatti e poco fratturati.

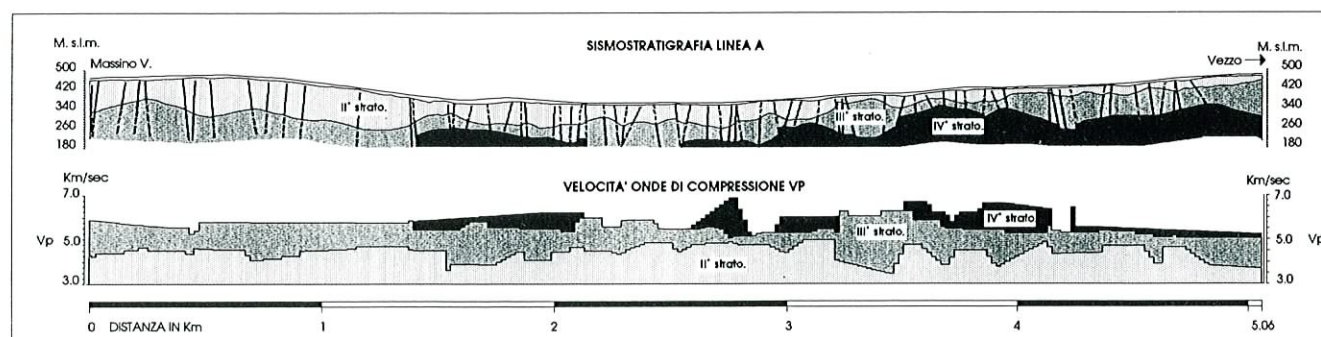


Fig. 3.2

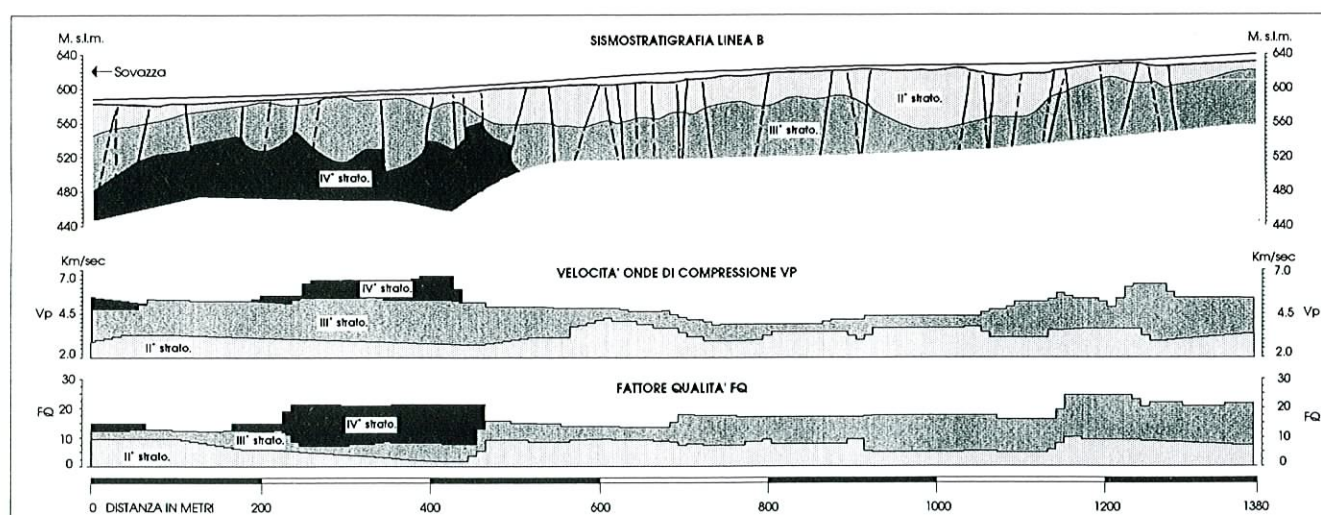


Fig. 3.3

La migliore utilizzazione del fattore qualità FQ si ottiene dall'esame areale delle variazioni di questo entro lo stesso livello sismostratigrafico ottenuto dalla prospezione sismica a rifrazione. In questo caso, mediante le variazioni laterali, è possibile individuare i settori a comportamento anelastico differenziato.

Una ulteriore potenzialità del parametro FQ, peraltro la più significativa ed interessante a livello diagnostico e classificativo dello stato di consistenza del materiale, deriva dalla correlazione con il parametro al quale FQ è associato e cioè Vp, sulla base di grafici coordinati FQ-Vp (vedasi paragrafo 4).

3.4. Analisi dei risultati della sismica a rifrazione.

Nelle due aree in esame riferite al settore di Stresa (linee A e B) la prospezione sismica ha rilevato in profondità al di sotto della copertura detritico-morenica 3 orizzonti primari del substrato lapideo che risultano contraddistinti da notevoli variazioni nel grado di fratturazione e compattezza (Vp tra 2700 e 6870 m/sec, FQ –analizzato nella sola linea B– tra 1.80 e 24.53) con un più significativo incremento nello stato di consistenza globale oltre i 50 m con Vp sempre maggiore di 4000 m/sec e FQ maggiore di 13 (vedasi fig. 3.2 e 3.3).

L'andamento complessivo in profondità del parametro Vp, per un'analisi sull'omogeneità del substrato lapideo, viene riportato nella fig. 3.4, con riferimento sia alla linea A sia alla B, ove sono riportate in ascissa le velocità Vp ed in ordinata i corrispondenti valori di profondità del rifrattore lungo il quale tale valore è stato determinato.

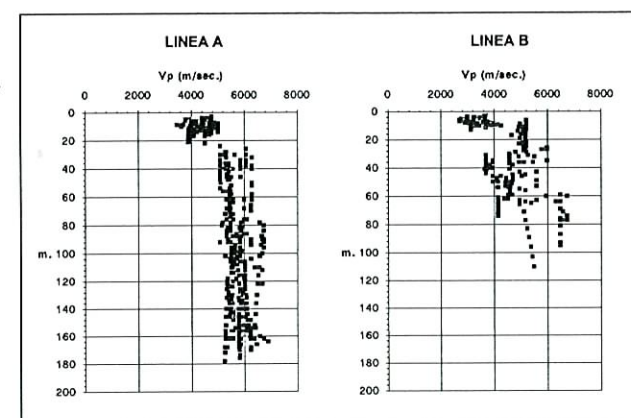


Fig. 3.4

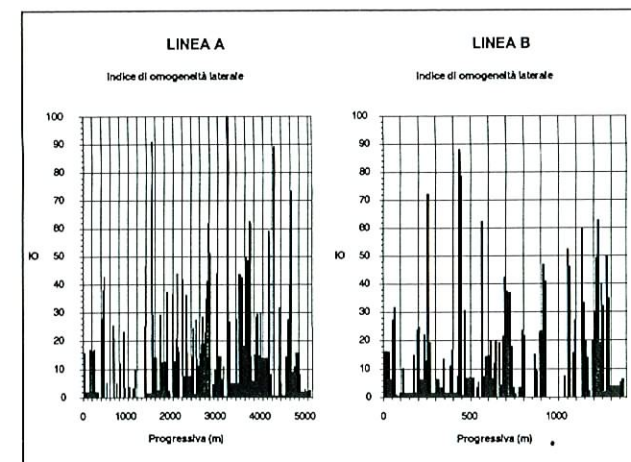


Fig. 3.5

Le funzioni di profondità ottenute consentono di rilevare come:

- lungo la sezione A si abbia una concentrazione di valori di Vp mediamente elevati entro i primi 20 m., successivamente si rilevano valori non eccessivamente dispersi (elevata omogeneità d'insieme del materiale a livello di ammasso), che sono distribuiti fino alle massime profondità rilevate (180 m.).

- sulla sezione B si presenta invece una concentrazione di valori mediamente più bassi entro i primi 15 m. a cui poi seguono in profondità valori che si disperdono in un range molto più ampio, indicativo di materiale maggiormente disomogeneo rispetto a quello litologicamente simile della precedente linea A.

Per localizzare le litoclasti, faglie e/o settori cataclastici, oltre a valutare l'omogeneità laterale delle aree investigate in funzione delle variazioni di velocità sismica, è stato definito un indice di omogeneità laterale di velocità (IO) ricavato tramite le variazioni laterali dei parametri cinematici $\Delta Vp/\Delta L$ nei vari livelli sismostratigrafici dove ΔVp è la variazione di velocità e ΔL è la spaziatura intergeofonica. Nella fig. 3.5 sono rappresentate le somme dei valori assoluti delle variazioni cumulative dell'indice di omogeneità laterale (rapporto $\Delta Vp/\Delta L$) rilevati in tutti e tre gli orizzonti sismostratigrafici del bedrock sia per la linea A sia per la B allo scopo di evidenziare lungo le varie progressive le zone caratterizzate da maggior grado di fratturazione, dislocazione e/o settori cataclastici.

A parte i picchi più accentuati che denotano le maggiori variazioni cinematiche lungo le linee e che corrispondono alle diaclasi più marcate, si rilevano in entrambi i grafici estesi settori, con indice IO mediamente inferiore a 20, indicativi di diffusa fratturazione.

Nella linea B è stata effettuata l'analisi del fattore qualità FQ, il cui andamento complessivo è presentato in fig. 3.6 in funzione della profondità, il quale consente di rilevare una concentrazione di valori medio bassi (<10) entro i primi 10–15 m. A profondità superiori tale parametro presenta una notevole dispersione; sono valori nel complesso poco elevati che contraddistinguono un materiale litico piuttosto fratturato ed alterato anche in profondità, almeno fino ai 110 m.

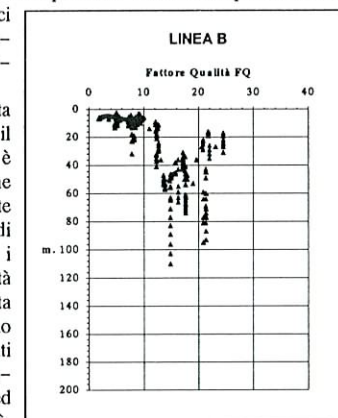


Fig. 3.6

3.5 Analisi dei risultati della sismica a riflessione

In considerazione delle profondità da investigare (a luoghi fino a qualche centinaio di metri dalla superficie topografica) si è effettuata un'indagine sismica a riflessione ad alta risoluzione per poter definire nei suoi aspetti fondamentali soprattutto l'assetto geotettonico dell'area indagata, in una zona caratterizzata da complicità strutturali.

L'indagine è stata focalizzata in corrispondenza della linea sismica a rifrazione B, dove tra l'altro risultavano alcuni problemi geologici di determinante importanza evidenziati anche dall'interpretazione della geotomografia elettrica (SED) effettuata in tale zona, di cui si è trattato al paragrafo 2.

La metodologia sismica a riflessione determina la profondità e la pendenza delle discontinuità geologiche; inoltre, è l'unico metodo che permette di ottenere gli andamenti di stratificazioni sovrapposte quando non si abbia velocità di propagazione sempre crescente con la profondità.

Il risultato di un profilo sismico dipende in gran parte dai parametri utilizzati nel corso dell'acquisizione dati, scelti dopo aver realizzato un profilo walkaway (test per saggiare le caratteristiche dell'obiettivo dell'indagine).

Sono stati realizzati 1320 metri di stendimento sismico con gruppi di geofoni posti ad intervalli di 5 m. e con molteplicità di copertura del 1200% consentendo di discriminare e delimitare con sufficiente dettaglio gli aspetti tettonici e strutturali principali presenti nell'area indagata.

Nelle figure sono presentate:

1. Sismosezione (risultanze del processing su cui si sono sovrapposti i principali settori di faglia – fig. 3.7).

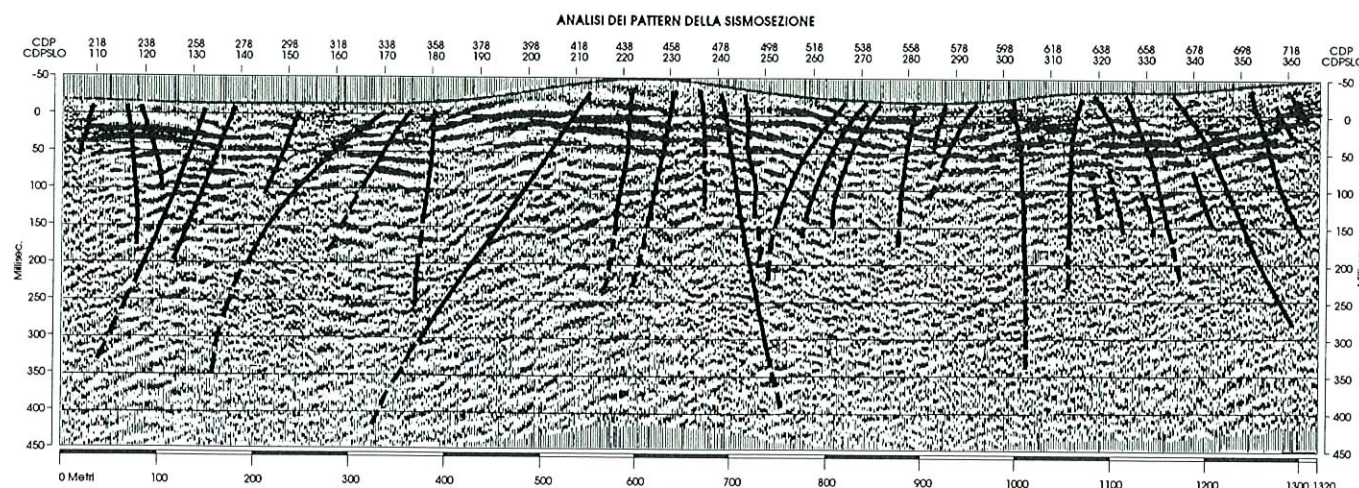


Fig. 3.7

2. Schema tettonico interpretativo (sezione finale ottenuta integrando i dati dei rilevamenti geologici, della sismica a riflessione e di quella a rifrazione realizzata sul medesimo allineamento - fig. 3.8).

In sintesi l'analisi rileva tre principali orizzonti riflettenti:

- il primo (1) subsuperficiale e comunque non oltre i 100 metri di profondità si presenta a luoghi discontinuo e dislocato;

- il secondo (2) si presenta, sempre dotato di elevata coerenza laterale anche se con minore ampiezza, a profondità variabili tra 120 e 400 metri dal piano campagna, anch'esso dislocato, a luoghi anche fortemente e talora discontinuo;

- l'ultimo orizzonte significativo (3) si presenta a profondità variabili tra 500 e 600 metri e rimane localizzato, al contrario dei primi due che si rilevano più o meno costantemente lungo tutta la sezione.

E' stata inoltre evidenziata, dallo studio dei pattern e dalle singole fasi dei segnali, la presenza di un settore cataclastico di spessore variabile tra 50 e 100 metri localizzato a livello superficiale ed immergente verso l'inizio della linea, evidenziato in tratteggio obliquo sullo schema tettonico interpretativo di fig. 3.8.

La struttura geologica primaria che ne risulta riguarda le oscillazioni vertico-laterali (evidenziate dalle frecce) dell'orizzonte 2, che risulta variamente deformato da fasci dislocativi dei quali sono stati evidenziati i due principali (f1 e f2).

Il primo (f1) si pone a separazione tra un blocco rialzato (lato inizio linea), caratterizzato da una spiccata uncinate (comportamenti dei materiali allo sforzo del tipo duttile) ed un blocco ribassato (a destra del precedente); tale dislocazione presenta le caratteristiche di faglia inversa (*upthrust*) ed a questa risultano collegate morfologie tettoniche del tipo *pop-up* (cunei di espulsione per faglie inverse frontali e verticali posteriori, rappresentati in tratteggio orizzontale). La presenza di "apparenti" strutture di estrusione tettonica del tipo *pop-up* potrebbe ben collegarsi, ed avere una certa significatività, all'interno di sistemi di embricazione e raccordi crostali e quindi alla struttura geologica regionale caratterizzata da importanti elementi tettonici trascorrenti (linea Mergozzo, Pogallo e Cremosina) congiunte al lineamento Insubrico (localmente linea del Canavese). Il principale problema connesso a queste strutture deriva

dall'origine dell'inversione della vergenza delle faglie, "inverse" frontali e "dirette" a posteriori, che potrebbe collegarsi, in prima analisi, a distinti atti dinamici ed, in particolare, alla sovrapposizione di due superfici di accavallamento conseguenti ad altrettanti eventi compressivi principali.

Il secondo fascio dislocativo (f2) si pone a separazione tra un blocco, quello centrale, localizzato tra le due strutture tettoniche (f1 e f2), fortemente inclinato e dislocato, rialzato sul lato del fascio dislocativo f2, e quello laterale, verso fine linea, anch'esso dislocato ma tendenzialmente suborizzontale.

L'analisi nel campo delle frequenze delle singole tracce ha mostrato una costanza nelle frequenze principali lungo tutta la sezione tranne nel tratto centrale, quello confinato tra i fasci dislocativi f1 e f2, dove la frequenza principale si riduce a valori mediamente inferiori a 40 Hz nelle fasi principali collegabili ad una maggiore fratturazione dell'ammasso roccioso rispetto alle rimanenti tratte del rilievo a riflessione.

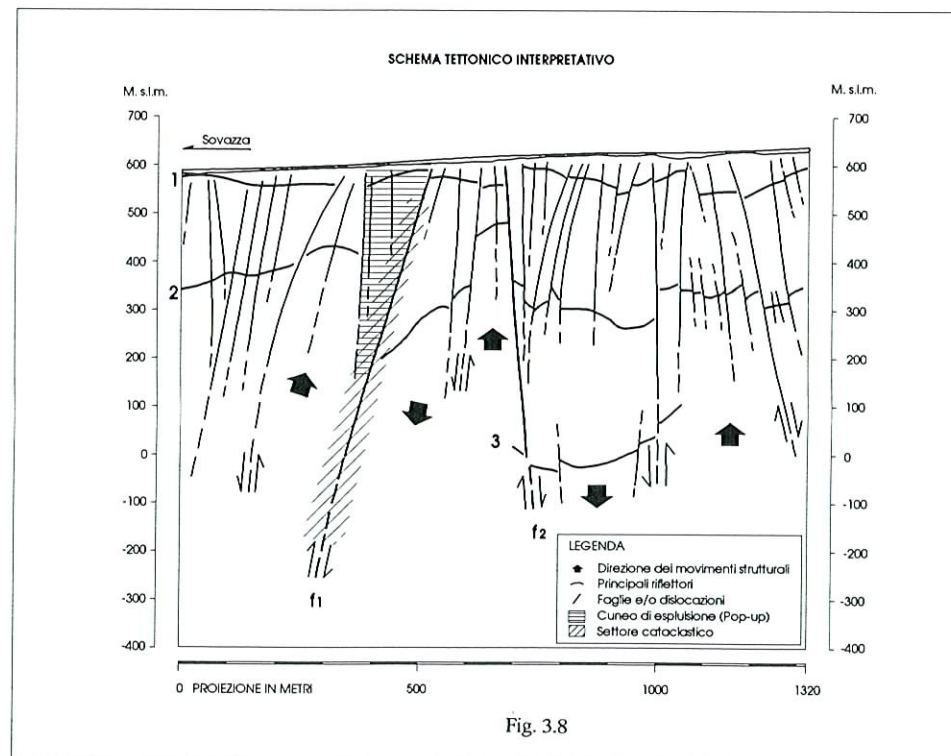


Fig. 3.8

4. CORRELAZIONE TRA PARAMETRI SISMICI E CARATTERISTICHE GEOMECCANICHE

Nel tentativo di ottenere una prima stima delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi interessati dai futuri scavi sono state applicate due diverse metodologie che, sulla base dei parametri geofisici disponibili, permettono di descrivere l'ammasso in termini di stato di fratturazione e di regime deformativo prevalente.

I metodi applicati sono:

- a) correlazione velocità sismica V_p - Indice di qualità Q di Barton;
- b) correlazione velocità sismica V_p - Fattore di qualità FQ .

a - La metodologia proposta da Barton N. (1992) correla l'indice di qualità Q del materiale con la velocità delle onde sismiche di compressione rilevate in esso attraverso una relazione ricavata sperimentalmente:

$$Q = 10[(V_p - 3500)/1000]$$

Tale espressione è stata ricavata dall'Autore sulla base di alcune prove sismiche del tipo cross-hole analizzate con tecnica tomografica; è naturale, quindi, che nell'applicare un simile metodo sperimentale e nel valutarne i risultati si devono tenere in debito conto i limiti insiti nella correlazione stessa, in termini di applicabilità e attendibilità, legati al numero ed alla natura dei casi sperimentali. Questo criterio, d'altronde, deve essere sempre alla base dell'applicazione di un qualsiasi sistema di classificazione.

Nel grafico di fig. 4.1 sono riportati a titolo di esempio i risultati delle elaborazioni relative alla linea B. Da questa è possibile avanzare alcune considerazioni, relative alle profondità investigate dalla sismica a rifrazione:

- nell'area Mèina-Baveno i terreni della Linea sismica A presentano in generale caratteristiche migliori con valori dell'indice Q caratteristici di ammassi da scadenti a eccezionalmente buoni; sono assenti del tutto i termini più bassi dell'indice Q ;

- nella linea sismica B si rileva una maggiore dispersione sia in termini globali (Q da molto scadente a eccezionalmente buono) sia in riferimento alla variabilità dei singoli strati sismici (in particolare III° strato);

Nell'area in esame le gallerie in progetto interesseranno i litotipi del II° e III° strato sismico (ammassi da molto scadenti a eccezionalmente buoni).

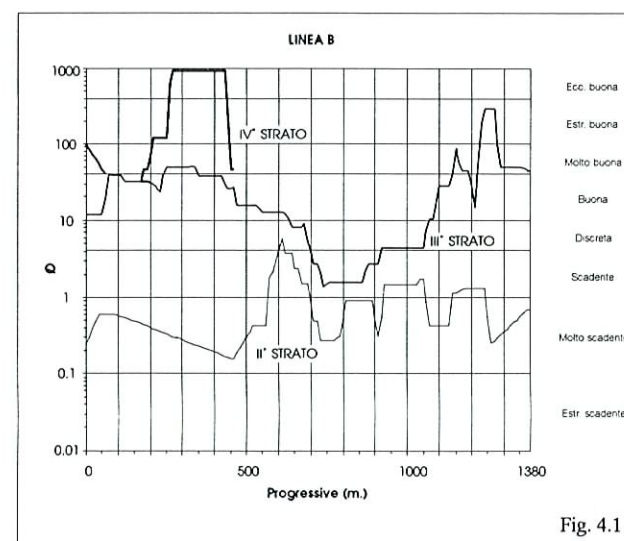


Fig. 4.1

b - La correlazione tra la velocità sismica V_p e il fattore di qualità FQ è stata messa a punto dalla Progeo srl, prendendo in considerazione sia i parametri elastici (V_p) sia anelastici (fattore di qualità FQ) nel tentativo di ottenere un quadro più dettagliato del comportamento di un ammasso in termini di regime deformativo.

I valori del fattore di qualità e di V_p identificano nel diagramma (fig. 4.2) una serie di curve derivate da un modello reologico non lineare di tipo elasto-plastico caratteristico di un materiale che presenta deformazioni reversibili fino al raggiungimento del limite di snervamento oltre il quale la deformazione procede a tensione costante ed, irreversibilmente, fino alla rottura.

In tale modello l'attenzione è rivolta al limite di snervamento inteso come soglia del comportamento elastico di un materiale. Le curve paraboliche, indicate con le lettere "a"-"g", sono state ricavate sperimentalmente dalla Progeo su litotipi e condizioni geosturali diverse: queste curve rappresentano i luoghi dei punti corrispondenti ai limiti di snervamento per uno stesso materiale sottoposto a carichi σ_1 crescenti in un campo omogeneo e crescente anch'esso di confinamento σ_3 .

Le curve ellittiche, indicate con i numeri da "3-2" a "6-5", propongono invece una suddivisione di tipo geomeccanico elaborata utilizzando i sistemi di classificazione proposti da Rabcewicz-Pacher e da Deere.

I risultati delle elaborazioni condotte per la linea sismica B (fig. 4.2) indicano che la maggior parte dei litotipi indagati giacciono nel campo di deformazione plastica con passaggio graduale a profondità crescenti da ammassi molto spingenti a materiali leggermente fratturati.

In linea generale si osserva (come anche in altre linee sismiche fuori dalla zona Mèina-Baveno) che i materiali rocciosi molto alterati e mediamente fratturati sono presenti nello strato sismico più superficiale (II° strato) e parzialmente a quote inferiori (III° strato); viceversa materiali definibili poco fratturati sono alla fascia più profonda del bedrock (IV° strato e gran parte del III° strato).

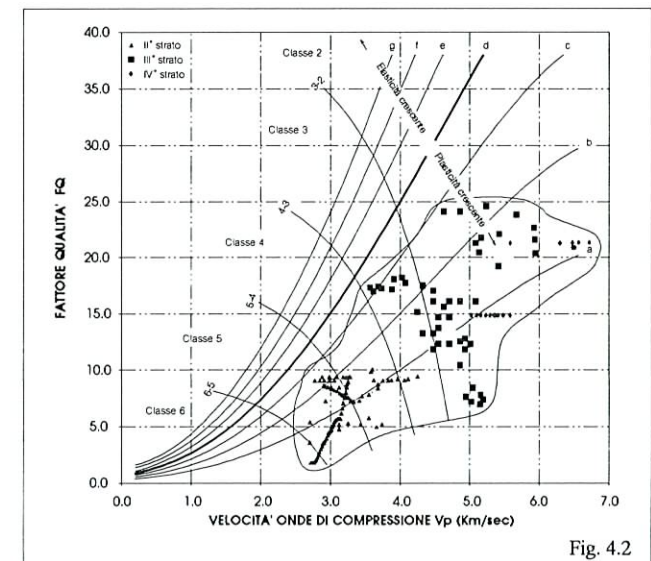


Fig. 4.2

Un cenno particolare va dedicato all'esame della fig. 4.3 in cui sono messi a confronto i risultati ottenuti con le due metodologie classificative.

I valori rilevati cumulativamente in tutte le linee sismiche (anche fuori dalla zona Mèina-Baveno) appartenenti alla classe 2-Progeo corrispondono, nella classificazione di Barton, ad ammassi da discreti ad eccezionalmente buoni. Negli altri casi si osserva una maggiore sovrapposizione tra le classi Progeo e quelle di Barton, anche se la dispersione in termini di indice Q -Barton appare più limitata.

La classe 3-Progeo corrisponde a materiali scadenti-discreti di Barton mentre la classe 4-Progeo varia da scadente a molto scadente sovrapponendosi con le classi 5/6-Progeo che comprendono termini da molto scadenti ad estremamente scadenti.

L'analisi dei due metodi di caratterizzazione, da un lato conferma la cautela espressa all'inizio del paragrafo circa l'acritica applicabilità delle correlazioni, ma dall'altro lascia intravedere ulteriori possibilità di caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi per via indiretta. E' evidente che occorre un'accurata taratura basata su molti riscontri diretti, che verranno effettuati nelle successive fasi di indagine nel prosieguo degli studi per la progettazione di gallerie, di questo e di altri progetti.

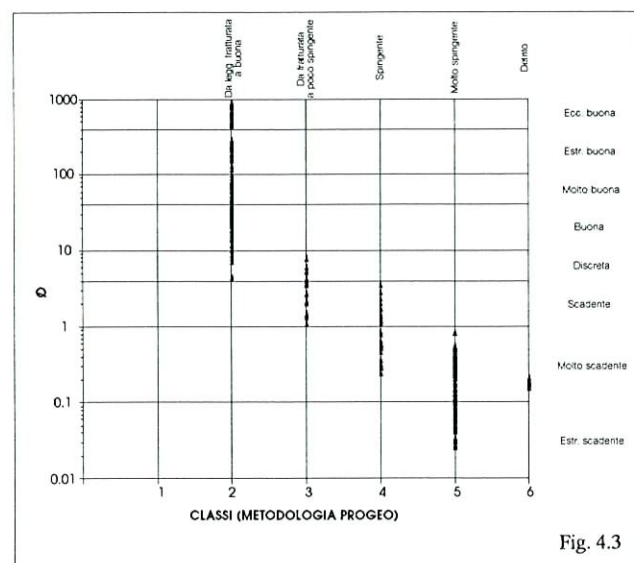


Fig. 4.3

5. CONCLUSIONI

Le indagini illustrate nella presente nota si inquadrano nell'ambito dello studio di fattibilità che le Ferrovie dello Stato stanno conducendo per la realizzazione di un collegamento ferroviario tra Milano e Berna attraverso la catena alpina.

Nel corso degli studi propedeutici sono stati focalizzati alcuni aspetti problematici di particolare interesse ai fini della scelta della direttrice di tracciato più idonea. Uno di tali aspetti è l'attraversamento in galleria della propaggine montuosa esistente in sponda occidentale del Lago Maggiore fra Meina e Baveno. In questo tratto la sponda del lago descrive un'ampia ansa convessa ad est che dovrebbe essere superata con un tracciato più diretto. Nel caso specifico va ricercata la soluzione ottimale con riferimento, da un lato, alle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni da attraversare, e dall'altro, agli aspetti operativi quali ad esempio l'opportunità di realizzare più gallerie brevi e/o attacchi intermedi.

In base agli elementi conoscitivi acquisiti in sede di studi preliminari, i terreni presenti in zona (metamorfiti della "Serie dei Laghi", appartenenti al Sistema Sudalpino) hanno caratteristiche fisiche e assetto idrogeologico notevolmente variabili lateralmente, per cui una più approfondita conoscenza della struttura geologica locale e delle caratteristiche meccaniche dei terreni presenti si impone già dalla fase di studio di fattibilità per le notevoli conseguenze economiche che ne derivano.

Un primo approccio allo studio della zona è stato fatto con ricorso a prospezioni geofisiche, oltre ai rilevamenti di campagna. Sono state selezionate due linee di indagine lungo le quali è stata eseguita sismica a rifrazione e geoelettrica dipolare di tipo tomografico. In un tratto risultato di particolare interesse su una delle linee indagate è stata eseguita una prospezione sismica a riflessione ad alta risoluzione. Queste indagini fra loro complementari, hanno fornito elementi conoscitivi utili agli scopi prefissati.

Abstract

Within the feasibility project of a transalpine railway line connecting Italy to Switzerland, a geophysical investigation program has been carried out. The goal was to acquire evaluation elements of the physical and mechanical behaviours of the rocks interested by the project, as a contribution to the choice of the most suitable railway layout. The case-history, which we describe in this paper, concerns the tunnel crossing of the reliefs located on the western shore of Lago Maggiore between Meina and Baveno. They are constituted by the formation known as "Scisti dei Laghi", belonging to the south-alpine crystalline basement. It mostly consists of paragneiss and micaschists with interbedded amphibolite levels locally overlain by morainic terrains. From surface geology and excavation works around the area, it resulted that the interested formation presents substantial lateral variations, as it concerns the geostructural body features. We have selected two prospecting profiles, along which we have performed complementary geophysical investigations, using dipolar geoelectrics with a tomographic approach and refraction seismics with study of energy attenuation. Along sectors of particular concern, we have also performed high resolution reflection seismics. Globally considered, the results so far obtained have permitted to achieve significant information about both the geostructural setting in the surveyed area and the pattern of the local underground hydrogeologic circulation. Moreover, we have also derived useful preliminary indications on the geomechanical behaviour of the investigated rock bodies, exclusively developed on a geophysical basis.

In particolare, le tomografie elettriche, che hanno indagato le profondità maggiori di 100 m fino a 400-500 m, hanno messo in evidenza variazioni laterali di resistività correlabili con la natura e con la struttura dei terreni, e soprattutto con la presenza dell'acqua all'interno della massa rocciosa.

Nel tratto ove è stata eseguita la sismica a riflessione, questa ha mostrato un assetto geostrutturale perfettamente coerente con le risultanze della tomografia elettrica. Infine le profondità minori, fino a 100-150 m dalla superficie topografica, sono state indagate con la sismica a rifrazione che ha evidenziato la presenza e gli spessori dei terreni morenici di copertura e, attraverso lo studio dell'attenuazione dei segnali, ha fornito elementi di giudizio sullo stato di fratturazione delle masse rocciose indagate.

Con riferimento specifico ai problemi di tipo geomeccanico, si è tentata una caratterizzazione indiretta degli ammassi rocciosi in oggetto per mezzo di correlazioni empiriche tra i parametri geofisici (velocità di propagazione delle onde sismiche e fattore di qualità Q derivante dallo studio dell'attenuazione dei segnali) e l'indice Q di Barton.

Come si può osservare nel complesso si tratta di risultati preliminari che, se da un lato necessitano di approfondimento e di taratura con riscontri diretti che verranno effettuati nel prosieguo degli studi per la realizzazione del progetto, dall'altra lasciano intravedere interessanti possibilità di utilizzazione delle metodiche geofisiche per la caratterizzazione delle rocce.

BIBLIOGRAFIA

- AUT. VARI (1981) "Seismic Wave Attenuation". Society of Exploration Geophysicists, n° 2, Tulsa USA.
- BARTON N. (1992): "Norwegian method of tunneling". World Tunneling, June 1992.
- BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1974): "Engineering classification of the rock masses for the design of tunnel support". Rock Mech., 6.
- DENHAM L. R. (1984) "Seismic Interpretation". Proceedings of the I.E.E.E., n° 10.
- ENTE FERROVIE DELLO STATO (1990): "Valico del Sempione: studio di prefattibilità". Attività Geologia, inedito.
- FERROVIE DELLO STATO SPA (1992): "Studio geologico tecnico relativo allo studio di fattibilità Sempione e Gottardo". ISTRAT-ITALFERR SIST.A.V., inedito.
- HANNESON J.E. (1990) "A model for interpreting IP/resistivity data from areas of steep dip and thin overburden, in J.B. Fink et al. (Ed.S.), Induced Polarization, Applications and Case Histories, Series Investigation in Geophysics". Society of Exploration Geophysicists, n° 4, Tulsa USA.
- OZDOGAN YILMAZ (1987) "Seismic data processing". Society of exploration geophysicist Tulsa USA.
- PALMER D. (1980) "The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation". Kenneth B.S. Burke, Tulsa USA.
- SHERIFF R.E. (1984) "Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics". Society of Exploration Geophysicists, Tulsa USA.
- SOCIETÀ GEOLOGICA ITALIANA (1992): "Guide Geologiche Regionali. Le Alpi dal M. Bianco al Lago Maggiore". BE-MA Editrice.