MAURIZIO FURANI (*), GIUSEPPE GALASSI (*) & GABRIELE PULELLI (**)

(*) Dott. Geol., Direttore tecnico (Progeo s.r.l.).
(**) Dott. Geol., Direttore tecnico, Amministratore Unico (Progeo s.r.l.).

MOVIMENTI GRAVITATIVI PROFONDI APPLICAZIONI DI TECNICHE SISMICHE TOMOGRAFICHE

Abstract - MAURIZIO FURANI, GIUSEPPE GALASSI & GABRIELE PULELLI –
Deep gravity movements – Applications of seismic tomographyc methods.

After intense meteoric events in the autumn of the 2000 have been taken place landslide phenomena along eastern side of valley of Gressoney (AO), which have interested, east of Bosmatto town, the entire secondary valley of Letze creek mobilizing more than 60.000 mq of detritus down to fondovalle and destroying many buildings.

The great masses involved in recent gravity movements have adopted a position on ancient phenomena of slipping of rough detritus above the glacial masses of valley bottom; the total power of the paleo-landslide is estimated in approximately million cubic meters.

The recent landslide presents clear signs of movement with fresh fractures, trees folds, masses moved and in the upper side the phenomena involves also large portions of disarticulated rocks.

As a result of these events Regione Autonoma Valle d'Aosta in the within of the initiative Interreg IIIA - Alcotra - plan "RISKYDROGEO" has programmed a campaign of geo-seismic surveying for the study of the landslide phenomena in order to supply a model of the distribution of the seismic speeds to carry out one stratigraphyc and morphologic reconstruction of the sito.

Therefore a reticulum has been realized by 7 seismic lines for a total of 3.865 mt: three along the maximum slope of side and four cross-sectionally. Sensors were set between 5 and 10 m in order to guarantee sufficient detail to surveying.

Above all a tomography elaboration to achieve also some hundreds of meters underground in order to study in depth the entire side.

For each seismic section have been done shots every 3-4 stations recording all the set of sensors by means of 6 modular 24 channels Sismography Geometrics Geode connected in series for a total of 144 channels available.

Because of inaccessibility to whichever mechanical means, charges of explosive of 0.4 and 5 kg have been positioned in holes purposely realized, allowing tomography analysis to achieve the maximum depth permitted by the length of spreadings (1/4-1/6 of alignment).

The elaboration of the data has been carried out by means of S.R.A. (Seismic Refraction Analysis) applying procedures S.I.R.T. type (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) and obtaining parametric values of the underground for cells of analysis of metric dimension.

A double tomography elaboration has been realized: through speed analysis of compression waves and the study of attenuating seismic mark as the association of the data takes to a better screening on the quality of the materials.

Indeed the first is a characteristic referred more to lithology and the consistency while the second determines better the degree of accumulation of detritus and the state of fracturing of the stone.

Moreover, for being able to subdivide underground in differentiated consistency sectors and geomechanical characteristics, has been carried out a mathematical type analysis (processing of gradient) which has concurred to trace the places of the seismic sections where tomography parameters of speed and attenuation support important increments in short features (marked by a quick grouping of the parametric isolines).

From the carried out study stand out many landslide bodies characterized by compression waves speed Vp<2.1 km/sec, attributable to recent gravity movements of the side and ancient one (paleo-landslide) which have mobilized extremely heterogenous material (fine detritus up to stone masses).

They have a slipping step above a set of metamorphyc stone materials with an important fracture and alteration (low values of the module of attenuation Ma<4.1 m/db).

To this set follow, in depth, stone materials equally fractured (Vp<3 km/sec, 4.1<Ma<9 m/db) where are visible fractured steps dipping down towards the valley that have unlocked the heap; the following wide and deep modelling and the glacial erosion of the depositor have then produced extended detritus steps along the slope, at the bottom we found a superficial ungluing of the concave substrate.

The landslide bodies from the seismic tomography survey are therefore only the superficial consequence of deep structural and tectonic reasons, probably typically of this region, which have produced in this area a very intense deformation of landslide and an important fracture of masses.

Key words: Deep gravity movements, Seismic tomographic, Velocity rate, Attenuating seismic mark

Riassunto – MAURIZIO FURANI, GIUSEPPE GALASSI & GABRIELE PULELLI – Movimenti gravitativi profondi – Applicazioni di tecniche sismiche tomografiche.

In seguito ad intensi eventi meteorici nell'autunno del 2000 si sono verificati estesi fenomeni franosi lungo il versante orientale della media valle di Gressoney (AO) che hanno interessato, ad est della località Bosmatto, l'intera valle secondaria del Torrente Letze mobilizzando oltre 60.000 mq di detriti fino al fondovalle e distruggendo vari edifici.

Le grandi masse coinvolte dai movimenti gravitativi recenti si sono impostate su antichi fenomeni di scivolamento di terreni detritici molto grossolani con alla base il deposito glaciale di fondovalle; la potenza complessiva della paleofrana è stimata in circa un milione di metri cubi.

La frana recente mostra ancora a tutt'oggi chiari segni di movimento in atto con fratture fresche, alberi piegati, massi spostati e, nella parte superiore del versante, il dissesto coinvolge anche grosse porzioni di roccia disarticolata.

In seguito a questi eventi calamitosi, la Regione Autonoma Valle d'Aosta nell'ambito dell'iniziativa Interreg IIIA – Alcotra – progetto "RISKYDROGEO" ha programmato una campagna d'indagini geosismiche per lo studio del movimento franoso con lo scopo di fornire un modello della distribuzione delle velocità sismiche sulla base del quale effettuare una ricostruzione stratigrafica e morfologica del sito.

E' stato perciò realizzato un reticolo costituito da 7 linee sismiche per un totale di 3.865 m delle quali tre lungo la massima pendenza del versante e quattro trasversalmente, con spaziatura dei sensori tra 5 e 10 m per garantire un sufficiente dettaglio all'indagine e soprattutto elaborate tomograficamente in modo da raggiungere anche alcune centinaia di metri dalla superficie per studiare in profondità l'intero versante.

Per ogni sezione sismica sono stati effettuati shot di energizzazione mediamente ogni 3-4 stazioni con ricezione su tutto il set di sensori dell'allineamento utilizzando fino a 6 sismografi modulari Geometrics Geode a 24 canali di registrazione simultanea collegati in serie per un totale disponibile di 144 canali e, vista l'inaccessibilità a qualsiasi mezzo meccanico, con cariche di esplosivo tra 0.4 e 5 kg posizionate in prefori appositamente realizzati, permettendo così di raggiungere con l'analisi tomografica la massima profondità consentita dalla lunghezza degli stendimenti (1/4-1/6 dell'allineamento stesso).

L'elaborazione dei dati è stata effettuate mediante software originale **S.R.A.**® (Seismic Refraction Analysis) applicando procedure tipo **S.I.R.T**. (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) e ottenendo valori parametrici del sottosuolo per celle di analisi di dimensione metrica.

E' stata realizzata una doppia elaborazione tomografica, sia in velocità delle onde di compressione sia in modulo di attenuazione del segnale sismico in quanto l'associazione dei dati porta ad un migliore screening sulla qualità dei materiali in quanto la prima è una caratteristica legata più alla litologia ed alla consistenza mentre il secondo determina meglio il grado di addensamento per i detriti e lo stato di fratturazione per il lapideo.

Inoltre, per poter suddividere il sottosuolo in settori a consistenza e caratteristiche geomeccaniche differenziate, è stata effettuata un'analisi di tipo matematico (*processing di gradiente*) la quale ha consentito di rintracciare i luoghi delle sezioni sismiche dove i parametri tomografici di velocità ed attenuazione subiscono significativi incrementi in brevi tratti (marcati da un rapido rinfittimento delle isolinee parametriche).

Dallo studio effettuato sono stati individuati vari corpi di frana caratterizzati da velocità delle onde di compressione Vp<2.1 km/sec, attribuibili a movimenti gravitativi di versante sia recenti sia antichi (paleofrane) che hanno mobilizzato materiali di pezzatura estremamente eterogenea (da detriti fini a grossi massi lapidei) e che presentano un piano di scivolamento al tetto di una fascia di materiali lapidei metamorfici ad elevata fratturazione ed alterazione (bassi valori del modulo di attenuazione Ma<4.1 m/db).

A questa fascia seguono, in profondità, materiali lapidei altrettanto fratturati (Vp<3 km/sec, 4.1<Ma<9 m/db) nei quali sono evidenziabili piani di fratturazione immergenti verso valle che hanno sbloccchettato l'ammasso; la successiva ampia e profonda modellazione ed erosione glaciale del versante ha poi prodotto estese fasce detritiche lungo il pendio, alla base delle quali si rilevano superfici di scollamento dal substrato ad andamento concavo.

I corpi di frana individuati dalla prospezione sismica tomografica sono quindi solo la conseguenza più superficiale di motivi strutturali e tettonici profondi, probabilmente a carattere regionale, che hanno prodotto in questa zona una intensa deformazione del versante ed una accentuata fratturazione dell'ammasso.

Parole chiave: Dissesti gravitativi profondi, Tomografia sismica, Analisi di gradiente, Modulo di attenuazione.

1. INTRODUZIONE

Nella Valle di Gressoney in Valle d'Aosta (Fig. 1) si sono verificate, nell'autunno del 2000, abbondanti precipitazioni nel periodo compreso fra il 30 settembre ed il 1 ottobre e pochi giorni dopo, nel periodo compreso tra l'11 e il 16 ottobre, si è verificato un secondo e più intenso fenomeno meteorologico; complessivamente, si sono avuti più di 330 mm di pioggia fino ad alta quota, con lo 0 termico posto a 3000 m s.l.m..

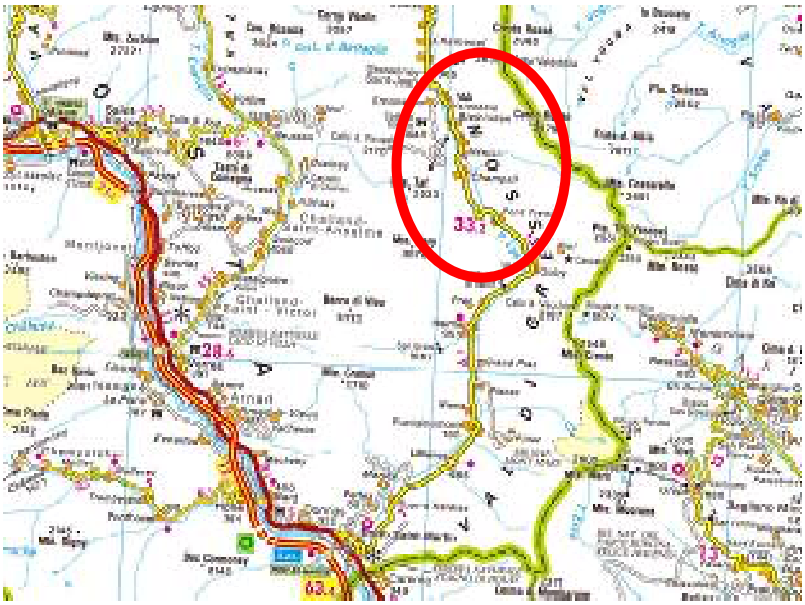

Fig. 1 – Cartografia generale dell'area di studio (nel cerchio rosso è indicato il tratto intermedio della Valle di Gressoney oggetto di rilievo geosismico).

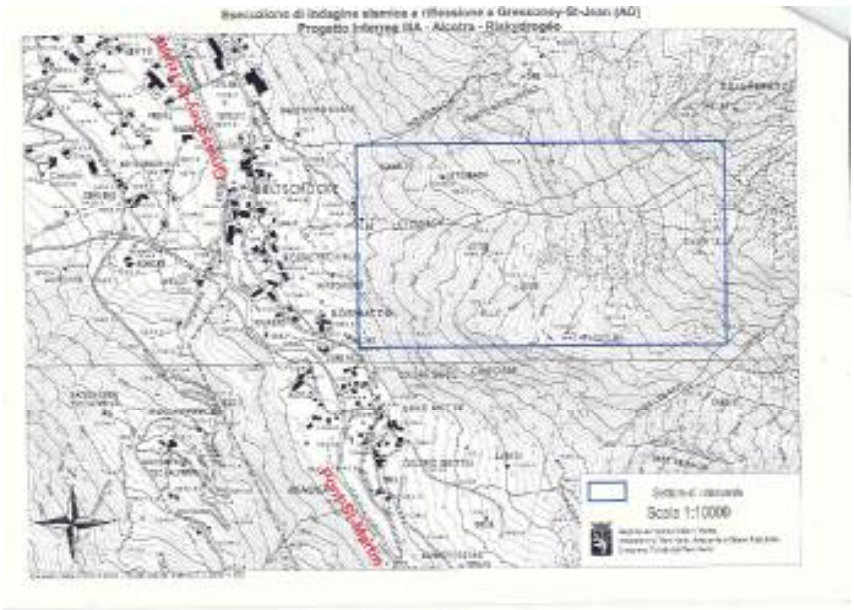

Fig. 2 – Stralcio planimetrico di dettaglio del settore d'intervento (rettangolo blu) sul versante ad est della località Bosmatto nel Comune di Gressoney Saint Jean (AO).

Quando il livello del Torrente Lys, asta principale della valle, stava già decrescendo, dal Torrente Letze, affluente in sinistra orografica, si generò una prima colata di fango e detriti che raggiunse il fondovalle; le colate di fango e detriti continuarono per tutta la notte tra il 15 e il 16 ottobre 2000 fino alla mattinata successiva quando un fenomeno gravitativo particolarmente intenso urtò con violenza un edificio e lo rase al suolo.

Le colate di fango e detriti hanno interessato una superficie di circa 60.000 mq.

In Fig. 3 è riportata una foto del bacino del Torrente Letze scattata nel Settembre 2005 dal versante opposto dove si vede chiaramente parte del conoide di fondovalle e gli edifici alla base dello stesso e soprattutto le grandi masse coinvolte dai movimenti gravitativi recenti che si sono impostate su antichi fenomeni di scivolamento di terreni detritici molto grossolani con alla base il deposito glaciale di fondovalle; la potenza complessiva della paleofrana è stimata in circa un milione di metri cubi.

La frana recente mostra ancora chiari segni di movimento in atto con fratture fresche, alberi piegati, massi spostati e, nella parte superiore del versante, il dissesto coinvolge anche grosse porzioni di roccia disarticolata.

Fig. 3 – Foto del bacino del Torrente Letze scattata nel Settembre 2005 dal versante opposto.

2. PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA

2.1. INDICAZIONI GENERALI

In seguito a questi eventi calamitosi, la Regione Autonoma Valle d'Aosta nell'ambito dell'iniziativa Interreg IIIA – Alcotra – progetto "RISKYDROGEO" ha programmato una campagna d'indagini geosismiche per lo studio del movimento franoso che interessa il bacino del Torrente Letze in località Bosmatto nel comune di Gressoney Saint Jean con la finalità di fornire un modello della distribuzione delle velocità sismiche sulla base del quale effettuare una ricostruzione stratigrafica e morfologica del sito.

In accordo con la Committenza, è stata realizzata una indagine sismica tomografica secondo un piano di ricerca che esaminasse tutte e tre le porzioni principali nelle quali può essere suddivisa la frana composita, sia lungo la massima pendenza sia in senso trasversale (Fig. 4 e Fig. 5). Dalle figure citate si vede come il piano di ricerca sia stato sviluppato secondo tre linee realizzate lungo la massima pendenza e quattro linee trasversali.

La zona indagata si estende quindi dal piede del versante a quota 1475 m s.l.m in corrispondenza del Torrente Letze fino a quota 2197 m s.l.m. ed interessa fondamentalmente tre settori: il primo sulla sinistra orografica del Letze, il secondo è il versante a valle della baita Mussolier ed il terzo è quello più esteso e segue la zona d'impluvio del Letze fino a giungere alle quote più elevate nella zona di Onder Talle.

Ognuna di queste zone è stata indagata con sezioni lungo la massima pendenza e trasversali allo scopo di ottenere una immagine, seppur a bassa risoluzione, dell'assetto tridimensionale del versante.

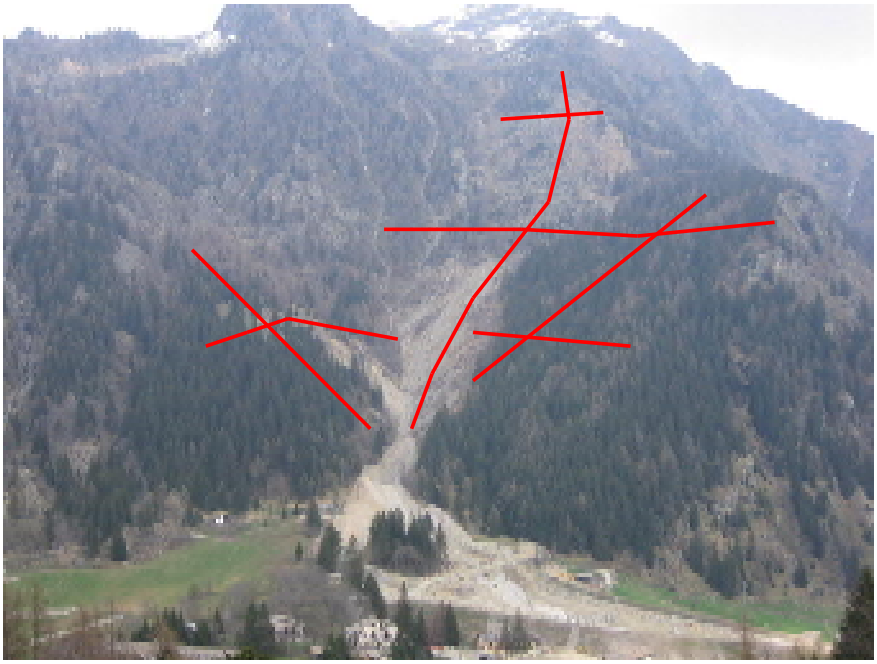

Fig. 4 – Foto precedente sulla quale sono state riportate (in rosso) le ubicazioni degli allineamenti sismici; si osservi soprattutto il notevole dislivello degli stendimenti lungo la massima pendenza del versante ed in particolare le acclività del profilo centrale.

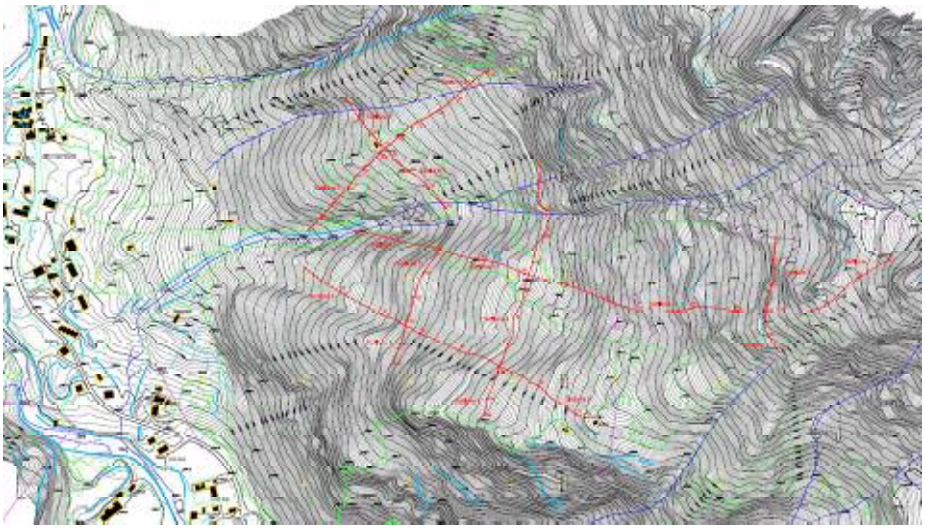

Fig. 5 – Planimetria con gli allineamenti sismici realizzati (in rosso)

2.2. MODALITA' OPERATIVE

Sono state realizzate in complesso n°7 sezioni sismiche tomografiche di cui 5 con spaziatura dei sensori di 5 m con obiettivo di indagine più superficiale e 2 con spaziatura di 10 m con l'intento di raggiungere profondità molto elevate per un complessivo di 560 stazioni su 3.865 m di allineamenti.

Le tre sezioni lungo la massima pendenza sono costituite rispettivamente da 108, 128, e 72 stazioni riceventi mentre le quattro linee trasversali sono costituite rispettivamente da 48, 96, 60 e 48 stazioni riceventi.

Per ogni sezione sismica sono stati effettuati shot di energizzazione mediamente ogni 3-4 stazioni con ricezione su tutto il set di sensori dell'allineamento permettendo così di raggiungere con l'analisi tomografica la massima profondità consentita dalla lunghezza degli stendimenti (1/4-1/6 dell'allineamento stesso).

A questo scopo, vista la logistica locale inaccessibile a qualsiasi mezzo meccanico, è stato utilizzato, come sistema di energizzazione, esplosivo in cariche variabili tra 0.4 e 5 kg, posizionate in prefori appositamente realizzati.

Per portare le attrezzature tecniche (cavi sismici, geofoni, sismografi) in quota (tranne, ovviamente l'esplosivo che è stato invece trasportato quotidianamente dal fondovalle lungo il versante da personale autorizzato) ci si è avvalsi del supporto di elicotteri (Fig. 6) i quali hanno scaricato il materiale in piazzole appositamente realizzate dalla Protezione Civile subito dopo l'evento calamitoso.

Fig. 6 – Operazioni di trasporto delle attrezzature tecniche mediante elicottero.

L'area d'indagine ha spesso presentato notevoli difficoltà soprattutto dal punto di vista logistico; l'acclività del pendio era frequentemente notevole (Fig. 7) e ciò ha causato difficoltà negli spostamenti del personale tecnico (pur ampiamente addestrato e dotato di lunga esperienza in trekking alpinistico), soprattutto nelle zone di frana recente dove la presenza di grandi blocchi a volte in equilibrio precario non rendeva agevoli le operazioni.

La pendenza del versante specie nella zona centrale in corrispondenza della parte alta dell'impluvio principale del Torrente Letze era superiore ai 45° e quindi in certi punti è stato necessario attrezzare la parete con corde fisse per salvaguardare la sicurezza degli operatori.

Fig. 7 – Foto scattata nella zona centrale della frana; tra blocchi lapidei accatastati gli operatori tecnici impostano la linea sismica sul versante.

Tuttavia, anche nei tratti intermedi del versante come nella zona centrale lungo l'impluvio principale del Torrente Letze le pendenze erano sempre molto elevate ed inoltre, in tali settori, si sovrapponevano (Fig. 8 e Fig. 9) le aree in dissesto causate dai movimenti gravitativi recenti con colate di fango e detriti.

Fig. 8 – Foto scattata nella zona dei movimenti gravitativi recenti dove si osservano le colate di fango e detriti; la linea rossa è la traccia del tratto intermedio dell'allineamento sismico longitudinale centrale.

Fig. 9 – Particolare della foto precedente dove si possono intravvedere (cerchiati in rosso) gli operatori al lavoro.

Per realizzare tomografie sismiche o in generale prospezioni sismiche di un certo dettaglio ed a profondità di decine o centinaia di metri è necessario predisporre allineamenti costituiti da un numero considerevole di apparati di ricezione (geofoni) ed eseguire molte energizzazioni ("tiri" o shot) entro lo stendimento.

Nell'area in esame si sono realizzati stendimenti costituiti fino a 128 geofoni (1.270 m di sviluppo sulla superficie topografica) e fino ad una trentina di energizzazioni rispettando uno standard operativo abbastanza consueto in sismica tomografica (shot di energizzazione mediamente ogni 3-4 stazioni con ricezione su tutto il set di sensori dell'allineamento) permettendo così di raggiungere con l'analisi tomografica la massima profondità consentita dalla lunghezza degli stendimenti (1/4-1/6 dell'allineamento stesso).

Tutte le registrazioni sono state effettuate con sismografi modulari Geometrics Geode a 24 canali di registrazione simultanea collegati in serie (Fig. 10) per un totale disponibile di 144 canali.

Fig 10 – Set di sismografi Geometrics Geode collegati in serie utilizzati per il rilievo sismico.

Per fare in modo che l'energia fosse sufficiente per raggiungere da un estremo all'altro anche gli stendimenti di lunghezza maggiore l'utilizzo di cariche di esplosivo è stato determinante, soprattutto tenendo conto che le acclività del versante precludevano l'accesso a qualsiasi mezzo meccanico per poter operare con masse battenti.

Ecco quindi che si sono dovuti predisporre lungo ciascun allineamento sismico a intervalli di qualche decina di metri l'un l'altro vari "shot point" (Fig. 11) i quali consistevano in una serie (3-4) di piccoli fori profondi ciascuno circa 1.5 m e del diametro di 40 mm entro i quali è stato possibile inserire l'esplosivo fino ad un massimo di 5-6 Kg per ogni punto.

Sono state altresì prese tutte le precauzioni necessarie per evitare infortuni in seguito agli spari; infatti, date le condizioni degradate dell'ammasso in superficie lo sparo fino ad

alcuni kg di materiale esplosivo poteva provocare il lancio di pezzi lapidei fino ad alcune decine di metri di distanza dal punto di scoppio (Fig. 12).

Fig. 11 - Operatori intenti a preparare uno shot point per esplosivo.

Fig. 12 – Shot point con alcuni kg di esplosivo.

2.3. ELABORAZIONE DATI

Considerato l'estremo degrado del materiale investigato, specie verso la superficie, l'utilizzo di una certa quantità di esplosivo si è comunque rivelata sufficiente per poter compulsare l'ammasso roccioso anche per gli allineamenti sismici di maggiore lunghezza (Fig. 13).

La registrazione presentata è relativa ad energizzazione effettuata ad un estremo della linea sismica; la registrazione è stata riportata senza le consuete operazioni di muting e filtraggio e soprattutto per far notare che, nonostante le negative implicazioni di cui sopra, sono sufficientemente chiari i primi arrivi dell'onda di compressione necessari per l'elaborazione; peraltro, nelle tracce sismografiche a relativamente bassa amplificazione e minimo filtraggio dei 128 canali si possono vedere, oltre al posizionamento dei primi arrivi, anche tutti i "noise" o disturbi esterni (canali con geofoni piantati fra un blocco e l'altro in maniera non ottimale, tratti di linea particolarmente sensibile al vento, ecc.).

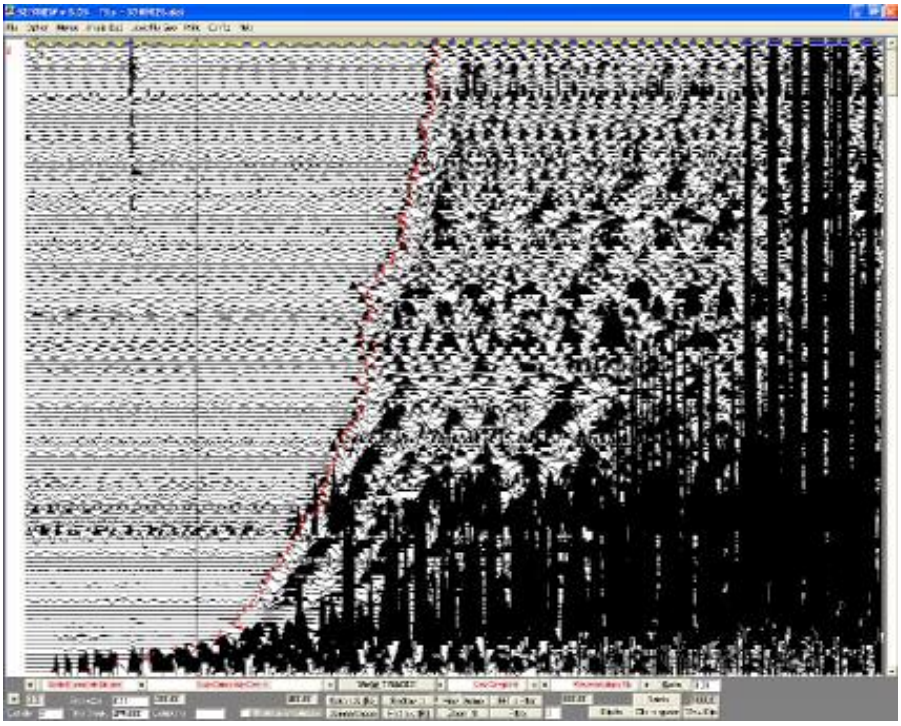

Fig. 13 – Registrazione da 128 canali di onde P con shot ad estremo linea.

Come si è detto, le operazioni di campagna per consentire l'elaborazione tomografica più di dettaglio sono analoghe a quelle di sismica standard con elaborazione per rifrattori anche se, per i rilievi di sismica tomografica, il numero di registrazioni che vengono realizzate è assai superiore, anche più del doppio (Fig. 14), per consentire di avere a disposizione una quantità di dati tale da coprire con la giusta geometria dei raggi e in maniera omogenea l'intera sezione sismica in tutti i settori e fino alle profondità adeguate senza lasciare tratti scoperti o disomogenei.

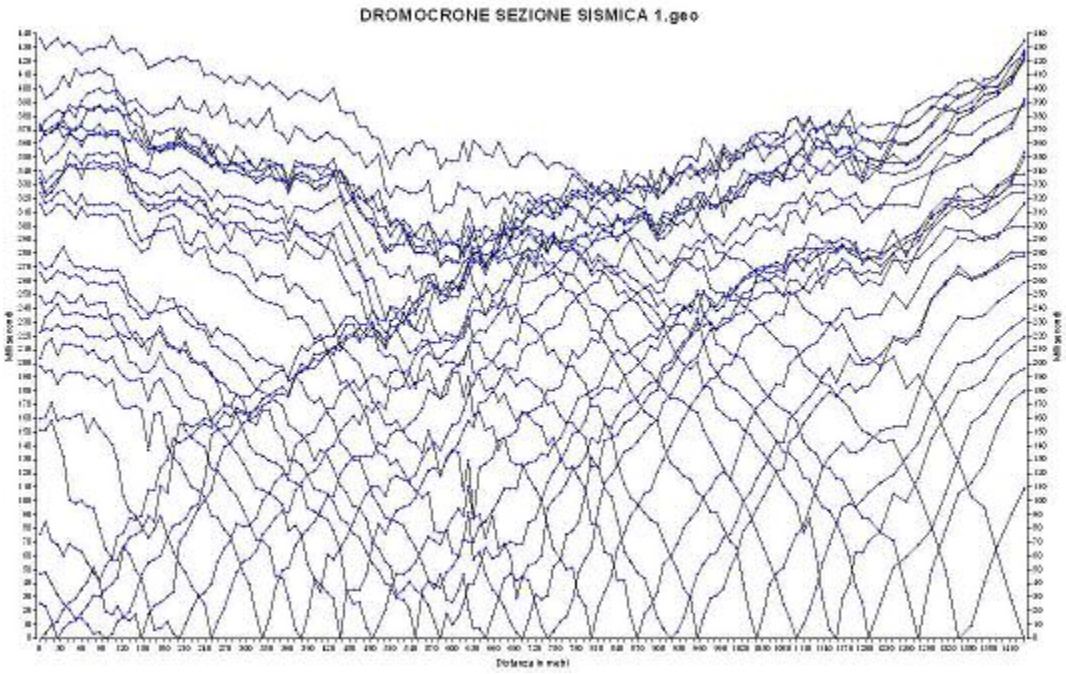

Fig. 14 – Dromocrone (diagrafie tempi-distanze) della sezione sismica longitudinale 1 in asse alla valle del Torrente Letze.

Dall'esempio presentato di una delle 7 linee sismiche eseguite (ma potrebbe valere anche per le altre non riportate per esigenze di spazio) si evidenzia la quantità relativamente insolita di energizzazioni necessarie per il corretto tracciamento dei raggi (ray tracing) nel sottosuolo e la successiva elaborazione tomografica per celle unitarie di dimensione metrica.

Si evidenzia peraltro, oltre ai tempi di arrivo dell'onda di compressione di qualche centinaio di millisecondi per i tiri più distanti (dovuti alla penetrazione in profondità dei raggi per diverse centinaia di metri) pur considerando l'ammasso di tipo lapideo e quindi relativamente compatto e veloce almeno nelle porzioni più profonde meno fratturate e decompresse, anche la sostanziale congruenza tra tempi reciproci di dromocrone coniugate a conferma della corretta lettura (e/o correzione temporale per eventuali errori del tempo di partenza allo shot) dei primi arrivi e quindi delle esatte operazioni di picking sui sismogrammi.

Anche se dall'analisi mirata delle sole dromocrone è possibile rilevare, dal punto di vista qualitativo, moltissime indicazioni di carattere morfologico e strutturale, le considerazioni potrebbero essere sviluppate ulteriormente ma, per sintetizzare i risultati, vengono qui direttamente presentati alcuni degli esempi più significativi degli elaborati finali ottenuti con il software originale **S.R.A.**® (Seismic Refraction Analysis), del quale si riporta un esempio di processing in Fig. 15 e le cui potenzialità sono già state illustrate in precedenti Atti del Workshop in Geofisica dagli stessi Autori del presente testo ed ai quali si rimanda per i dettagli.

In questa sede si ricorda solo che vengono applicate procedure tipo **S.I.R.T**. (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) le quali forniscono valori parametrici (es. di velocità sismica) per partizioni unitarie (celle di analisi di dimensione metrica), con le quali l'operatore ha cercato, con successive iterazioni dalla prima modellazione del sottosuolo, di far convergere (dal punto di vista statistico fino a quando gli scarti quadratici

e le varianze dei tempi calcolati sono minimi rispetto a quelli definiti in input) i dati modellati con quelli reali e corrispondenti ai tempi ottenuti dalle dromocrone originali.

In pratica le successive approssimazioni calcolate dall'elaboratore coi dati sempre più affinati e inseriti dall'operatore terminano quando le dromocrone, relative a quella data distribuzione di velocità particellari, sono coincidenti e con scarto minimo (mediamente inferiore a 0.5%) con quelle reali ottenute dalle letture degli F.B.P. sui sismogrammi.

Inoltre con tale tecnologia elaborativa si sopperisce alla mancanza di rifrattori significativi e alla presenza, assai comune col procedere in profondità, di materiale non sufficientemente differenziato nei termini fisici dei parametri elastici, per cui le tecniche tradizionali di sismica a rifrazione non riescono a discriminare il grado di consistenza, alterazione o disomogeneità dell'ammasso.

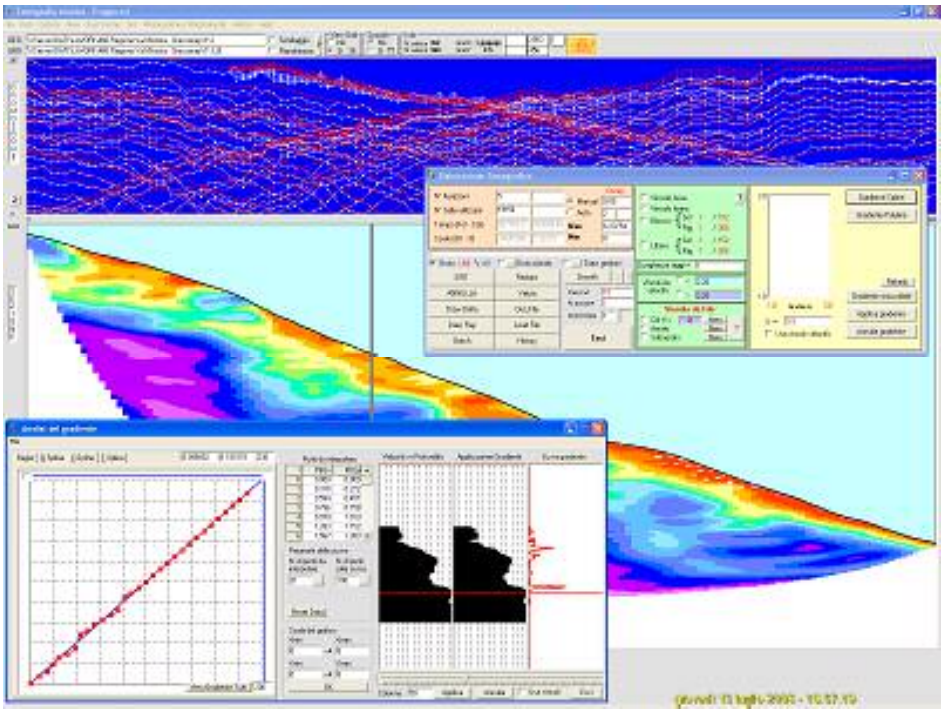

Fig. 15 – Esempio di processing col programma **S.R.A.**® (Seismic Refraction Analysis) per la sezione tomografica 1 (la sezione è invertita in ascisse rispetto alla sezione definitiva).

Per il caso in esame, essendo stata effettuata una doppia elaborazione tomografica, è stata data più importanza al modulo di attenuazione del segnale sismico piuttosto che alla velocità delle onde di compressione come screening sulla qualità dei materiali in quanto l'analisi dei dati in velocità è una caratteristica legata più alla litologia ed alla competenza dei materiali mentre l'attenuazione è un parametro collegabile all'addensamento nei detriti ed alla fratturazione nel lapideo.

Infatti, l'energia sismica è assorbita dai materiali in vario grado in relazione alle differenze rispetto alla condizione di perfetta elasticità pertanto l'attenuazione esprime l'entità del fenomeno di assorbimento dell'energia sismica da parte dei materiali in cui è propagata.

Le cause che producono l'attenuazione sono essenzialmente la perdita di energia per riscaldamento del mezzo attraversato e quella subita da parte dell'onda primaria per generazione di onde secondarie. Quest'ultimo processo viene chiamato "scattering" (termine inglese non direttamente traducibile, ma che può essere impropriamente reso dal termine italiano "diffusione") ed il decremento dell'energia delle onde primarie prodotto da questo fenomeno viene chiamato attenuazione per scattering.

I meccanismi del processo che determinano l'assorbimento sono da ricercarsi principalmente nell'attrito intergranulare ed in secondo ordine nella creazione di sovrappressioni dei fluidi nei pori.

Senza entrare in dettagli, in questa sede basta ricordare che il coefficiente di attenuazione, o il suo inverso modulo di attenuazione, vengono determinati col metodo del rapporto spettrale il quale permette di risalire all'attenuazione dell'onda sismica determinando la differenza tra i valori di ampiezza del segnale tra il punto di shot ed un qualsiasi ricevitore lungo l'allineamento sismico.

Altro punto fondamentale del processo elaborativo effettuato è stata l'analisi del gradiente la quale consente di suddividere l'ammasso in orizzonti a competenza e grado di fratturazione differenziato mediante un'analisi di tipo matematico (*processing di gradiente*) la quale ha lo scopo di rintracciare i settori della sezione sismica dove il parametro elastico tomografico considerato (velocità sismica, attenuazione) subisce significativi incrementi in brevi tratti (marcati da un rapido rinfittimento delle isolinee parametriche); vengono poi associati ai passaggi di gradiente viraggi marcati di colorazione della rappresentazione tomografica della sezione sismica per cui questa risulta ancor più facilmente interpretabile semplicemente sulla base delle variazioni di tonalità di colore.

E' in questi luoghi, i quali non necessariamente coincidono per un'area ad un unico valore, ove la probabilità di individuare una interfaccia geofisica e geomeccanica significativa è maggiormente elevata.

Per la determinazione ed individuazione quindi di tali orizzonti è stato applicato sui dati tomografici un algoritmo statistico il quale valuta la variazione del parametro tomografico (ad es. Velocità, Attenuazione) in termini di gradiente verticolaterale.

E' evidente che se i parametri geofisici non variano arealmente oppure variano di poco il gradiente è pressoché nullo o molto basso, laddove invece si presentano variazioni verticolaterali importanti il gradiente si presenta con i massimi valori ed è in tali tratti quindi che è possibile localizzare passaggi significativi e suddividere il sottosuolo in "strati" di consistenza differenziata ed inoltre, nel caso in cui sia possibile una taratura mediante sondaggi geomeccanici, effettuare anche una correlazione litologica.

Infine, un'ulteriore possibilità interpretativa è offerta dall'analisi dei pattern delle isolinee, dalla densità e vicinanza di queste, dalla morfologia che presentano (concavità, inflessioni, incisioni ecc.); da queste caratteristiche morfometriche rilevate lungo la sezione sismica si possono ottenere informazioni su ampia scala ed in continuità spaziale relativamente alla presenza di faglie, di settori fratturati ed a competenza differenziata.

2.4. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Per motivi di spazio, dei 7 allineamenti sismici effettuati, si presentano solo alcune elaborazioni tomografiche ritenute più significative per meglio evidenziare le particolarità geomorfologiche e tettoniche dell'ammasso in dissesto.

Della sezione longitudinale 1, in asse all'impluvio principale del Torrente Letze e quindi al movimento franoso più recente, si riportano le sezioni sismiche in termini di velocità delle onde di compressione (Fig. 16), di modulo di attenuazione del segnale sismico (Fig. 17) ed interpretazione morfo-strutturale (Fig. 18) mentre delle altre linee più significative, cioè quelle realizzate lungo la massima pendenza del versante, sezione 2 e sezione 6 si riportano solo le sezioni in modulo di attenuazione (Fig. 20 e Fig. 21).

Come esempio di sezione in velocità delle onde di compressione la linea 1 (Fig. 16) mostra la presenza o meno di una fascia subsuperficiale in tonalità marrone a velocità Vp<2.1 km/sec che identifica una facies geofisica rappresentata da materiale di copertura (anche in grossi blocchi lapidei, dello spessore anche di varie decine di metri) con caratteristiche di deformabilità molto accentuate e, viste le acclività del pendio, con elevate potenzialità franose e la cui interfaccia basale, segnalata da un'isolinea in grassetto blu, identifica il tetto della formazione lapidea a consistenza differenziata (localmente affiorante nella parte alta del versante).

Proseguendo in profondità lungo la sezione 1 viene evidenziata con la velocità Vp di 3,06 km/sec una ulteriore interfaccia di gradiente la quale separa lo strato più alterato e fratturato della formazione lapidea (tonalità gialle) da un materiale roccioso sempre più competente (viraggi di tonalità dal verde al blu al viola).

Quindi l'ammasso lapideo presenta una fascia più superficiale (2,1<Vp<3,06 km/sec) con spessori variabili da pochi metri ad oltre 30-40 m in condizioni di maggior alterazione ed apertura delle fratture, fenomeni imputabili sia a stress tettonico-decompressivo sia agli effetti prodotti dalla modellazione glaciale.

Segue una facies geofisica a velocità più elevata (3,06<Vp<6,2 km/sec) indice di materiale da poco fratturato a molto compatto anche se bisogna considerare che i materiali metamorfici in questione, rispetto ad altri materiali lapidei (calcari, flysch), hanno un'origine condizionata dalla temperatura e dalla pressione e tendono normalmente a presentare valori di velocità estremamente elevati tali cioè da farli ritenere estremamente compatti e densi anche se in realtà la scistosità e la fratturazione latente li rendono invece particolarmente sensibili all'alterazione degli agenti atmosferici in particolare verso la superficie topografica per cui è nell'ordinario in questi litotipi rilevare elevati spessori della fascia di alterazione o "cappellaccio" a cui seguono in profondità materiali entro i quali al contrario le onde sismiche viaggiano a velocità molto elevata.

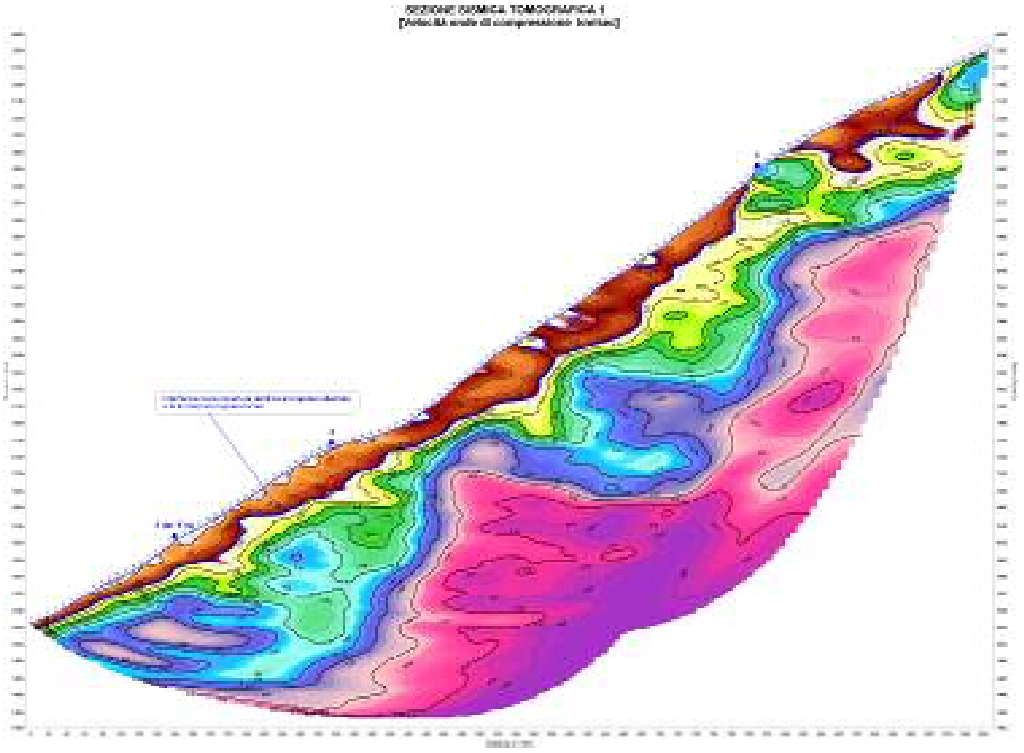

Fig. 16 – Sezione sismica tomografica 1 (elaborazione in velocità delle onde di compressione).

L'elaborazione complementare in modulo di attenuazione della stessa sezione 1 (Fig. 17) fornisce, come già evidenziato nel precedente paragrafo, un parametro per una valutazione qualitativa dello stato di fratturazione se si è in roccia o del grado di addensamento se i materiali sono detritici.

Come per tutte le indagini geofisiche ogni parametro geofisico per renderlo quantitativo dal punto di vista geomeccanico ha bisogno comunque di una taratura con misure dirette anche se consente in ogni caso, nei limiti di attendibilità del metodo e delle esperienze pregresse dell'autore, di fornire indicazioni sufficientemente attendibili.

Nella sezione 1 il modulo di attenuazione dell'ammasso indagato (le isolinee sono espresse in metri/decibel) presenta quasi ovunque parametri decisamente bassi (fascia di colore azzurro-bianco) per i primi 10-30 m (Ma<4,1 m/db, interfaccia di gradiente) per poi crescere in profondità.

Questo valore di gradiente non corrisponde necessariamente all'interfaccia tra la copertura detritica e la formazione lapidea e può anche svilupparsi entro la formazione lapidea ed in questo caso la distanza tra il tetto del lapideo (rilevato invece con l'analisi del gradiente di Vp a 2.1 km/sec) e l'isolinea Ma=4.1 m/db in attenuazione indica lo spessore del "cappellaccio", cioè della fascia alterata ed allentata la quale, se si manifestano le condizioni meccaniche ed idrologiche, può divenire parte integrante dei movimenti gravitativi del versante.

In profondità il modulo di attenuazione tende a crescere abbastanza gradualmente lungo tutta la sezione 1 in modo che possiamo associare ad ogni stato fessurativo del materiale roccioso un valore o meglio un range di valori ben definito; si evidenzia così in particolare una spessa fascia di fratturazione del lapideo (anche dell'ordine del centinaio di

metri) almeno fino a valori di Ma>18 m/db (fascia arancio-gialla) oltre la quale in profondità il materiale roccioso è sostituito da uno analogo ma caratterizzato da maggior compattezza (roccia sana con valori tra circa 20 e 50 m/db, tonalità blu-grigio).

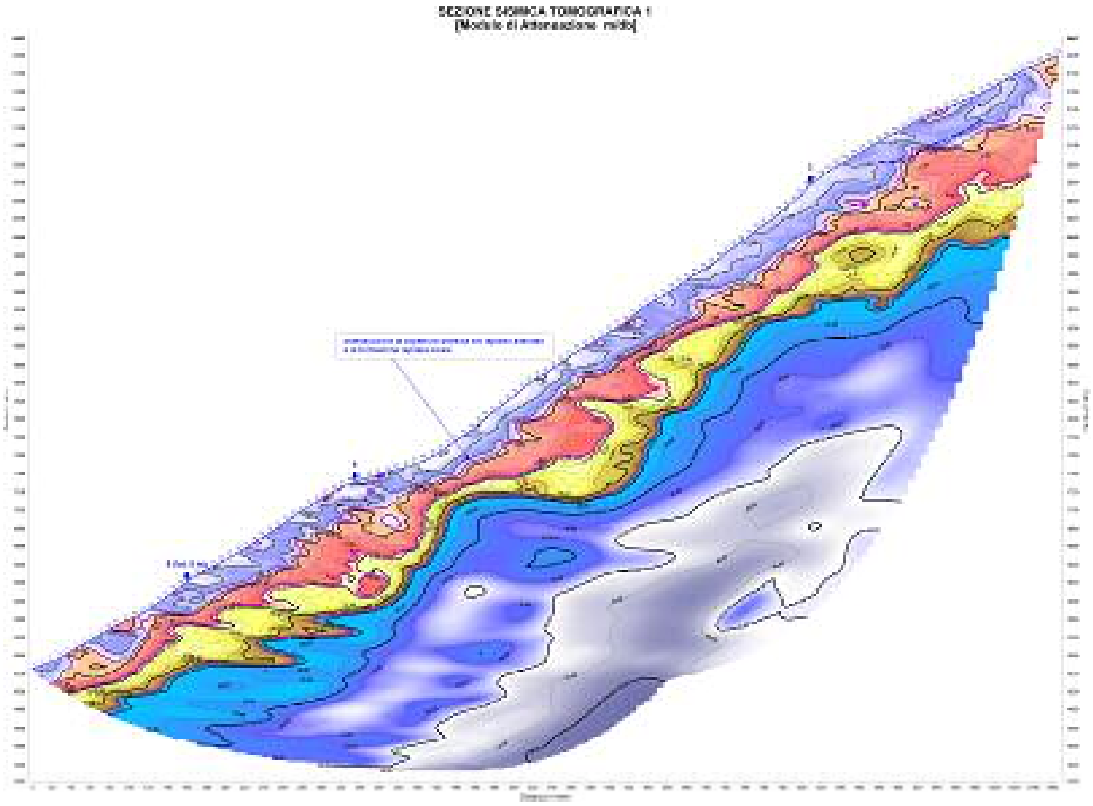

Fig. 17 - Sezione sismica tomografica 1 (elaborazione in modulo di attenuazione).

Dall'integrazione dei diversi dati geosismici (in velocità ed in attenuazione) della stessa sezione si sono quindi elaborate ipotesi interpretative morfo-tettoniche del versante in oggetto realizzando la sezione di Fig. 18.

Dal punto di vista tettonico, si rileva un fascio di lineazioni con vergenza verso valle (tratteggio blu) che ha "sblocchettato" l'ammasso roccioso in profondità, determinando altresì un elevato allentamento e fratturazione sulle testate in prossimità della superficie topografica.

In questi tratti, segnalati in tratteggio bianco, i materiali lapidei hanno subito una modellazione producendo profondi piani di scivolamento multiplo a forma concava i quali si distribuiscono lungo tutto il versante.

Sopra di essi si sono avuti ripetuti movimenti gravitativi (sia antichi sia recenti) che hanno prodotto la coltre in frana di materiale eterogeneo e localmente ad elevatissimo disaddensamento (materiale incoerente per accumulo di grandi blocchi e massi lapidei).

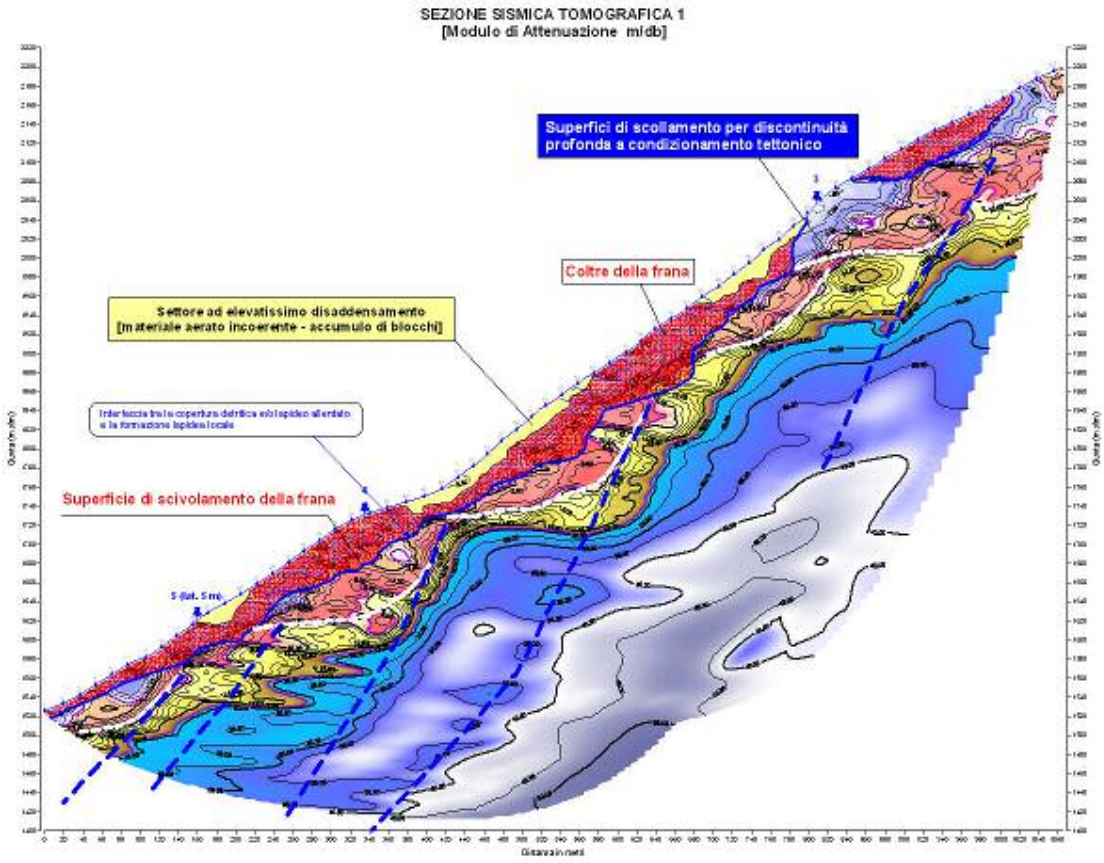

Fig. 18 - Sezione sismica tomografica 1 (interpretazione morfo-tettonica).

La sezione in esame può essere anche analizzata dal punto di vista statistico al fine di una generale visualizzazione delle condizioni di consistenza dei materiali coordinando i valori delle velocità delle onde di compressione (Vp) e del modulo di attenuazione (Ma) allo scopo di ricavarne indicazioni dal punto di vista qualitativo e quindi di caratterizzazione dell'ammasso (anche se non quantificabili previa taratura con prove in situ ed in laboratorio).

I valori dei due suddetti parametri relativi a tutte le celle metriche nelle quali è stata suddivisa la sezione tomografica (celle di analisi di larghezza coerente con la geometria d'indagine ed approssimativamente con larghezza pari alla metà della spaziatura dei sensori ed altezza pari ad un quarto di quest'ultima) sono stati coordinati nei grafici cartesiani di Fig. 19 che rappresentano il sistema integrato di caratterizzazione in base all'analisi dinamica, decisamente più efficace per facoltà individuante rispetto a quelli monodimensionali basati sui soli parametri elastici di velocità o attenuazione, in quanto si prendono in considerazione sia i comportamenti elastici sia quelli anelastici, ottenendo così una sintesi più qualificata dello stato deformativo del materiale esaminato.

Nel grafico di sinistra sono indicate tutte le celle analitiche e nel grafico di destra sono indicati i campi di distribuzione; per un determinato valore di velocità si possono avere dei range di distribuzione del valore del modulo di attenuazione molto diversi e questo in funzione principalmente dello stato fessurativo del materiale.

Sulla base di quanto riportato è possibile ottenere quindi una caratterizzazione dei materiali analizzati in classi geofisiche e più i valori coordinati sono minori più il materiale è

scadente; ad esempio, qualitativamente i valori dell'ammasso della fascia subsuperficiale risultano sempre nelle classi 5 e 6 quindi si tratta di materiali da molto deformabili a deformabili e a fratturazione più elevata per i termini a minor modulo di attenuazione.

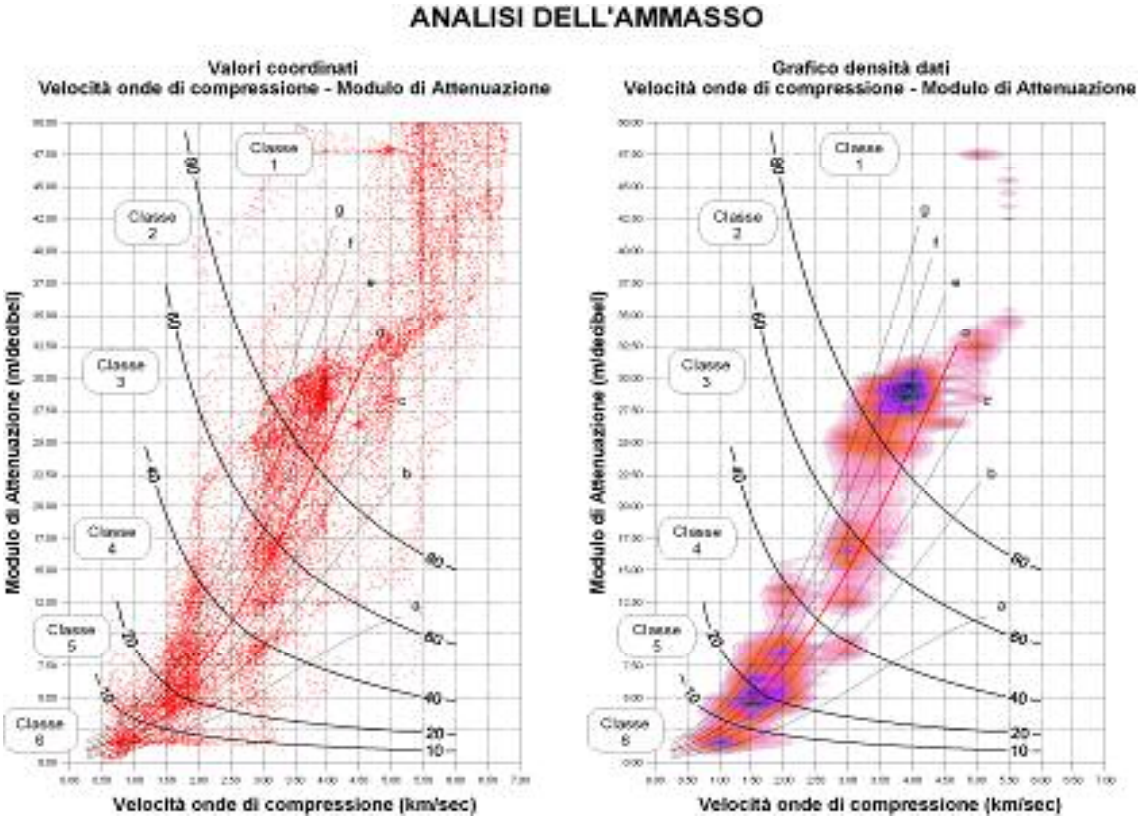

Fig. 19 - Sistema integrato di caratterizzazione dei materiali in base all'analisi dinamica.

Per quanto riguarda le altre due sezioni realizzate lungo la massima pendenza del versante e presentate in questo testo, in Fig. 20 è riportata l'elaborazione finale interpretativa della sezione 2 eseguita nel tratto meridionale dell'area indagata.

Nella sezione interpretata è evidenziata la fascia di materiale in frana in reticolo rosso, e la superficie di scivolamento in grassetto blu mentre il piede del versante sembra in condizioni di stabilità proprio in ragione di parametri elastici localmente più elevati (in azzurro).

La formazione lapidea presenta la tipica fascia di alterazione fino all'incirca poco a monte dell'intersezione con la sezione 4; anche in questo caso come per la sezione 1, si rileva un condizionamento tettonico che ha prodotto superfici di discontinuità subverticali immergenti verso valle (tratteggio blu) oltre ad una faglia nel tratto più a monte.

Si nota inoltre una accentuata ondulazione dell'isolinea del modulo di attenuazione 9 m/db (cromaticamente evidenziata dal passaggio tra la fascia in rosa e quella sottostante in giallo) interpretabile, anche in questo caso, come una possibile superficie di scivolamento profonda, a geometria multipla, la cui parte di monte è appoggiata sui settori di discontinuità tettonica (a tratteggio blu) con punte di massima profondità attorno ai 90 m poco a monte dell'intersezione con la sezione 5.

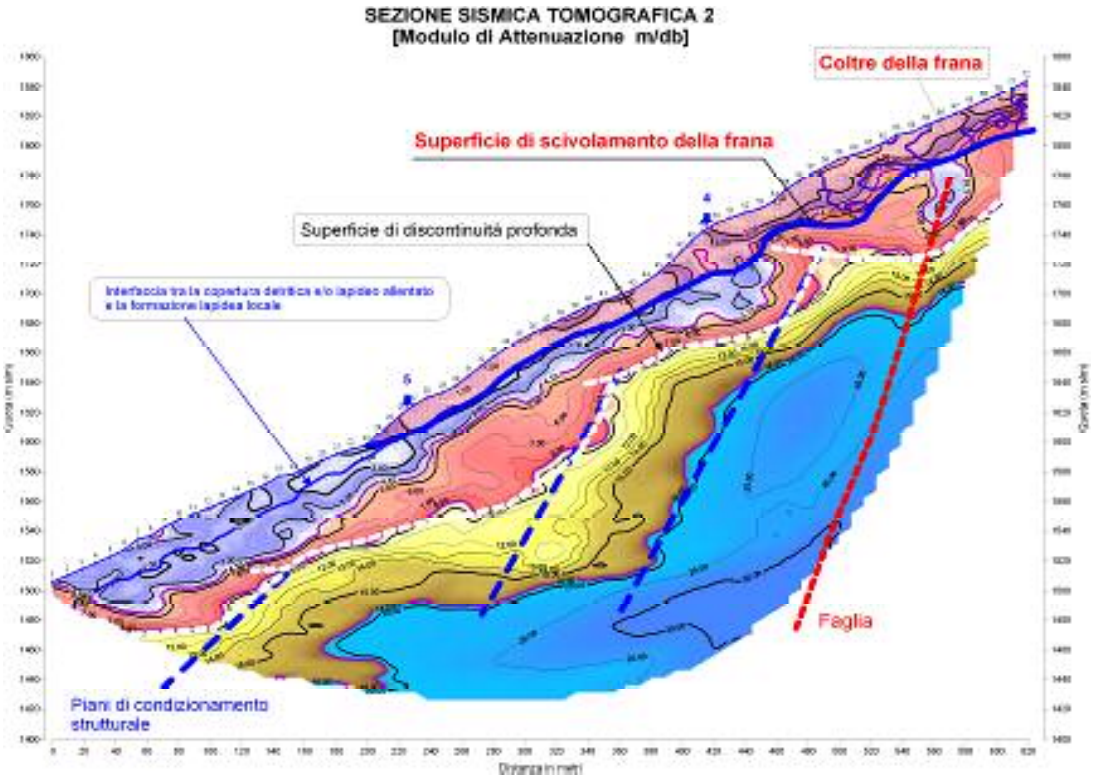

Fig. 20 - Sezione sismica tomografica 2 (interpretazione morfo-tettonica).

In Fig. 21 è riportata invece l'elaborazione finale interpretativa della sezione 6 eseguita nel tratto settentrionale dell'area indagata.

In questa sezione, oltre alla consueta porzione di coltre in frana (a reticolo rosso) qui con spessore che oscilla tra i 5 ed i 20 m e tende ad assottigliarsi verso valle, si può notare che il modulo di attenuazione presenta l'interfaccia del valore di 4.1 m/db a profondità decisamente superiori al tetto del lapideo, normalmente più del doppio, a significare che una notevole porzione della roccia si presenta fortemente allentata (alterata) e può essere in parte, soprattutto nella porzione più in quota, mobilizzata nel movimento di versante in atto.

Infatti, il materiale lapideo si presenta fortemente fratturato per oltre 40-60 m dal p.c. (Ma<9 m/db – fascia rosa) con morfologia condizionata da stress tettonico (presenza di gradoni e fasce di fratturazione suborizzontale).

In sezione si rileva anche la presenza di una faglia ad orientamento subverticale (leggermente immergente verso monte) che affianca una struttura a gradoni (tratteggio in blu) ondulati nella parte più elevata del versante (tratteggio bianco).

Questa struttura è senz'altro il prodotto di un incisivo condizionamento tettonico e l'interfaccia ondulata potrebbe interpretarsi come una superficie di scivolamento profonda.

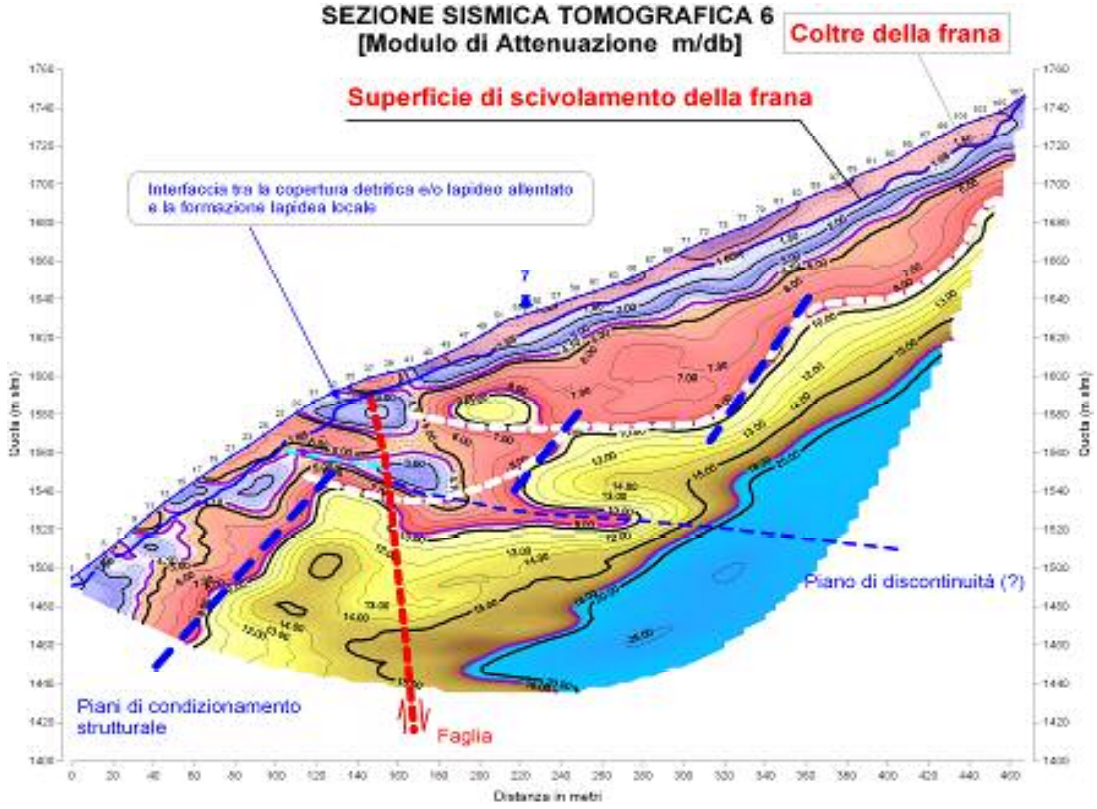

Fig. 21 - Sezione sismica tomografica 6 (interpretazione morfo-tettonica).

In conclusione di questa esposizione si può in sintesi affermare che dallo studio effettuato sono stati individuati vari corpi di frana caratterizzati da velocità delle onde di compressione Vp<2.1 km/sec, attribuibili a movimenti gravitativi di versante sia recenti sia antichi (paleofrane) che hanno mobilizzato materiali di pezzatura estremamente eterogenea (da detriti fini a grossi massi lapidei) e che presentano un piano di scivolamento al tetto di una fascia di materiali lapidei metamorfici ad elevata fratturazione ed alterazione (bassi valori del modulo di attenuazione Ma<4.1 m/db).

A questa fascia seguono, in profondità, materiali lapidei altrettanto fratturati (Vp<3 km/sec, 4.1<Ma<9 m/db) nei quali è visibile un netto e deciso condizionamento tettonico che ha prodotto piani di fratturazione immergenti verso valle (Ovest) sblocchettando l'ammasso e drappeggiando le testate sulle quali è insistita un ampia e profonda modellazione di versante producendo superfici di scollamento ad andamento concavo.

I corpi di frana individuati sono quindi solo la conseguenza più superficiale di motivi strutturali e tettonici profondi, probabilmente a carattere regionale, che hanno prodotto, in questa zona una intensa deformazione del versante ed una accentuata fratturazione dell'ammasso.

Una possibile ipotesi interpretativa di questi fasci di fratturazione è riportata nella planimetria di Fig. 22 che sintetizza (in tratteggio blu) gli elementi morfo-tettonici principali riscontrati in tutte le sezioni sismiche tomografiche realizzate e che quindi deriva da una correlazione tra le strutture rilevate in profondità in corrispondenza dei vari allineamenti.

L’andamento delle lineazioni che se ne ricava è prevalentemente in direzione Nord-Sud con immersione verso valle (Ovest).

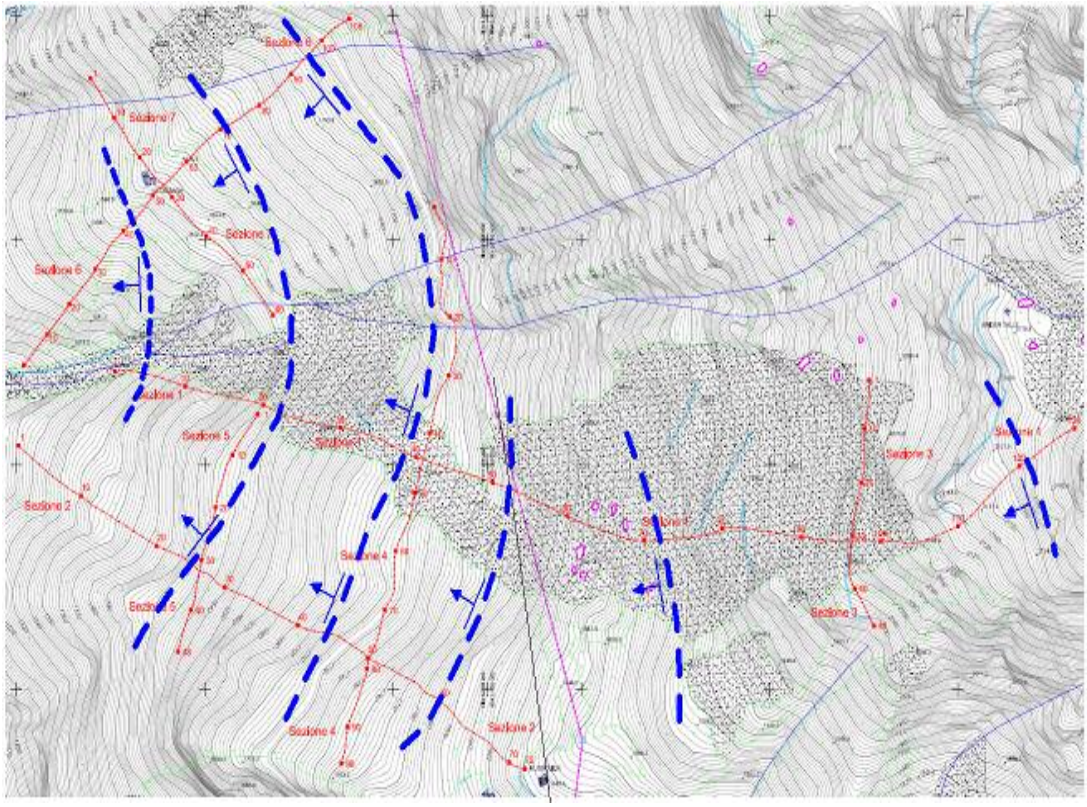

Fig. 22 – Ipotesi di correlazione tra le principali strutture tettoniche profonde (in tratteggio blu) rilevate sulle sezioni sismiche (in rosso); su ciascuna lineazione è riportato il vettore di pendenza.

Indirizzo dell’autore:
Progeo s.r.l. - Via Talete 10/8, 47100 Forlì - Tel 0543 723580 – Fax 0543 721486
Sito web: www progeo.info – E mail: mail.progeo@gmail.com