

INDAGINI SISMICHE APPLICATE ALLO STUDIO DI DIGHE ED INVASI IDRICI

Dott. Geol. Maurizio Furani



PROGEO srl

Via Talete 10/8
47100 Forlì
tel. 0543 - 723580
progeo@tin.it

Sommario:

Nel corso degli ultimi 10 anni un significativo sviluppo tecnologico nel campo della geofisica ha permesso di ottenere immagini ad altissima risoluzione del sottosuolo o di manufatti portando dati utili ad una loro più approfondita conoscenza.

Le tecniche sismiche, in particolare quelle tomografiche, sono quelle che hanno maggiormente beneficiato di queste innovazioni tecnologiche permettendo lo sviluppo di software ad elementi finiti e distinti per analisi dettagliate dei parametri elastici ed anelastici dei materiali.

A tal riguardo vengono presentati alcuni esempi applicativi relativi a indagini sismiche tomografiche bidimensionali e tridimensionali con riferimento allo studio di una frana attiva (frana di Scascoli - Bologna), della formazione lapidea di imposta di una diga attualmente in costruzione con verifiche durante la fase di smarino (Diga di Esaro in Calabria) e su una diga in muratura per una valutazione del grado di porosità e del peso proprio (Diga del Gabiet in Val d'Aosta).

Una delle prime tecniche geofisiche usate nell'esplorazione del sottosuolo è stata la sismica a rifrazione quando nel 1910 il geofisico tedesco L. Mintrop scoprì l'uso pratico della trasmissione delle onde attraverso la Terra. Ulteriori studi negli anni successivi permisero di ricavare profili a rifrazione determinando, in zone di test, le profondità e le caratteristiche elastiche delle formazioni geologiche locali.

Tali metodi, a partire dal 1925, furono utilizzati negli Stati Uniti nell'esplorazione petrolifera per la localizzazione dei giacimenti salini al cui contorno possono formarsi trappole per olii e gas.

A partire dal 1940 le tecniche sismiche a rifrazione iniziarono ad applicarsi alle problematiche collegate alla ingegneria civile ed alla ricerca mineraria e già nel 1941 furono effettuate ad esempio le prime indagini sismiche per un impianto idroelettrico in Svezia.

Il progresso tecnologico e scientifico in quegli anni operò sia producendo strumentazioni di acquisizione dati più efficienti sia sviluppando originali tecniche interpretative: la metodica risultò essere affidabile ed economica e portò ad un rapido incremento di questo tipo di applicazioni.

Dall'eccezione dei primi momenti divenne un metodo di indagine sistematico applicato ai problemi di ingegneria civile ed alla progettazione.

Gli sviluppi teorici delle tecniche interpretative furono tali che però queste poterono essere utilizzate solamente a partire dalla metà degli anni '50 quando iniziarono a svilupparsi strumentazioni tali da ottenere un segnale sismico analogico con un dettaglio temporale inferiore a qualche millisecondo e quindi utilizzabili nel campo della sismica a rifrazione applicata all'ingegneria.

Una indagine sismica in campo si sviluppa generalmente tramite impatti sul terreno registrando i segnali sismici su carta fotografica o registratori magnetici ed utilizzando geofoni equidistanti ed allineati lungo profili in-line.

I metodi interpretativi tradizionali che utilizzano la propagazione delle onde elastiche nella Terra erano e sono tuttora basati sui seguenti postulati fondamentali:

1. le onde si propagano con velocità differenti negli strati geologici;
2. il contrasto tra queste velocità è grande;
3. la velocità degli strati incrementa con la profondità.

I metodi interpretativi di calcolo tradizionale partono da questi postulati di base ed utilizzano una matematica con algoritmi di calcolo adeguati e generalmente le informazioni che si ottengono si riferiscono agli spessori ed alle velocità medie di orizzonti geofisici dei terreni i quali non necessariamente corrispondono ad orizzonti geologici.

E' altresì possibile fare valutazioni sul grado di fratturazione dei materiali, sulle anisotropie, localizzare discontinuità ed alterazioni, determinare la profondità del bedrock ed il grado di consistenza dei suoli ed infine la qualità dei materiali sulla base delle sole velocità di propagazione delle onde elastiche.

Il “*mondo geofisico*” che si ottiene da una indagine sismica a rifrazione con tecniche tradizionali è un mondo a strati; con questi si semplificano strutture geologiche dalle più semplici alle più complesse uniformando la qualità dei materiali in pochi e sintetici parametri. E’ un mondo privo di dettagli il quale esprime una immagine del sottosuolo semplificata.

L’indagine sismica a rifrazione con queste caratteristiche è certamente una tecnica rapida, con limitati tempi di acquisizione ed elaborazione, poco costosa e sufficientemente valida per indagini a piccola profondità per la ricerca di nette interfacce o nell’analisi di geometrie di consistenza sub-superficiali.

A partire dall’inizio degli anni ’80 però il successo della tomografia in medicina portò i geofisici ad implementare metodi analoghi per ricerche nel campo della esplorazione petrolifera teorizzando metodiche e tecniche di acquisizione dati sviluppando quella che viene attualmente chiamata “tomografia sismica”.

A tutt’oggi l’uso commerciale di questa tecnica di indagine si appoggia sia su solide basi teoriche sia su tecniche di acquisizione ed interpretazione che hanno permesso di incrementare in maniera esponenziale la capacità di dettaglio e di analisi anche in ambienti geologicamente complessi oppure su manufatti a piccola scala.

L’eterogeneità dei materiali indagati ha posto nuove ed impreviste problematiche ai geofisici i quali, nel campo della caratterizzazione dei materiali, hanno ora la possibilità di aumentare la risoluzione spaziale e di ottenere/estrarre informazioni impensabili in anni passati.

Nuovi algoritmi associati ad approfondite analisi dei segnali sismici permettono ora di caratterizzare i materiali naturali oppure i manufatti non solo nei termini della velocità ma anche nell’attenuazione delle onde passando da un “mondo a strati” ad un mondo a tre dimensioni i cui parametri si riferiscono ora a singoli elementi puntuali e ben definiti.

Le tecniche sismiche tomografiche permettono così di essere svincolati da una rigida geometria planare come avviene per la sismica a rifrazione standard e creare configurazioni di acquisizione costituite da punti di energizzazione e di ricezione dei segnali sismici adeguati all’obiettivo dell’indagine.

A partire da queste indicazioni di carattere assolutamente generale vengono presentati alcuni “*case histories*” i quali si riferiscono a ricerche in ambienti geologici e manufatti differenti allo scopo di comprendere le possibilità e le novità di queste metodiche originali di ricerca applicate in questo caso, ma configurabili in ambienti anche completamente diversi, al campo specifico delle dighe e degli invasi idrici connesse sia al settore della protezione civile sia alla progettazione e manutenzione delle dighe.

Tre ambienti di indagine vengono considerati: il primo si riferisce ad una “*classica*” situazione di dissesto di versante per frana con chiusura dell’alveo fluviale, il secondo allo studio di una zona d’imposta diga, il terzo infine fa riferimento ad una indagine del corpo di una diga in muratura realizzata all’inizio del 1900.

Ambiente di frana (Gole di Scascoli – Bologna)

Questa indagine è stata effettuata su un versante in movimento che ha prodotto crolli e determinato la chiusura dell'alveo del fiume Savena in località Scascoli (Bologna).

Situazioni analoghe sono peraltro presenti in molti invasi italiani le cui pendici si ritrovano in condizioni di instabilità insistendo o sul bacino idrico o sulla diga stessa rendendo necessari provvedimenti di protezione civile per messa in sicurezza delle aree.

L'esempio in oggetto fa riferimento ad una indagine realizzata su un'area in frana il cui movimento, prodotto da un creep lento ma progressivo, ha generato frane di crollo al piede (fig.1) oltre a scoscendimenti e rimodellamenti morfologici di una vasta area di versante.

Sono state realizzate sia una serie di sezioni sismiche tomografiche di limitata estensione in prossimità del piede della frana allo scopo di analizzare il fronte del movimento sia una sezione più lunga (circa 1000 m) allo scopo di valutare l'estensione in profondità del movimento gravitativo.

Le litologie in oggetto si riferiscono a flysch di varia natura con giacitura a franapoggio in bancate spesse anche vari metri incise da una tettonica non particolarmente estesa ma che ha prodotto fasce di intensa fratturazione.



Fig. 1 – Frana di Scascoli

La sezione sismica principale è stata acquisita con sensori ogni 10 m per complessive 104 stazioni, shot ogni 4-5 stazioni mediante "thumper" (massa battente da 10000 Kg, montata su trattore) con registrazioni sull'intera sezione; l'elaborazione dati ha portato alla ricostruzione del campo delle velocità delle onde di compressione e del coefficiente di attenuazione permettendo una semplice ed immediata lettura della morfologia sepolta sia nei termini geometrici sia in quelli di consistenza.

Le due immagini (fig. 2) relative alla sezione tomografica in velocità ed attenuazione sono le risultanze di una elaborazione che ha operato su circa 11000 nodi ad elementi distinti interdistanti circa 6.5 m in orizzontale e 3.0 m in verticale.

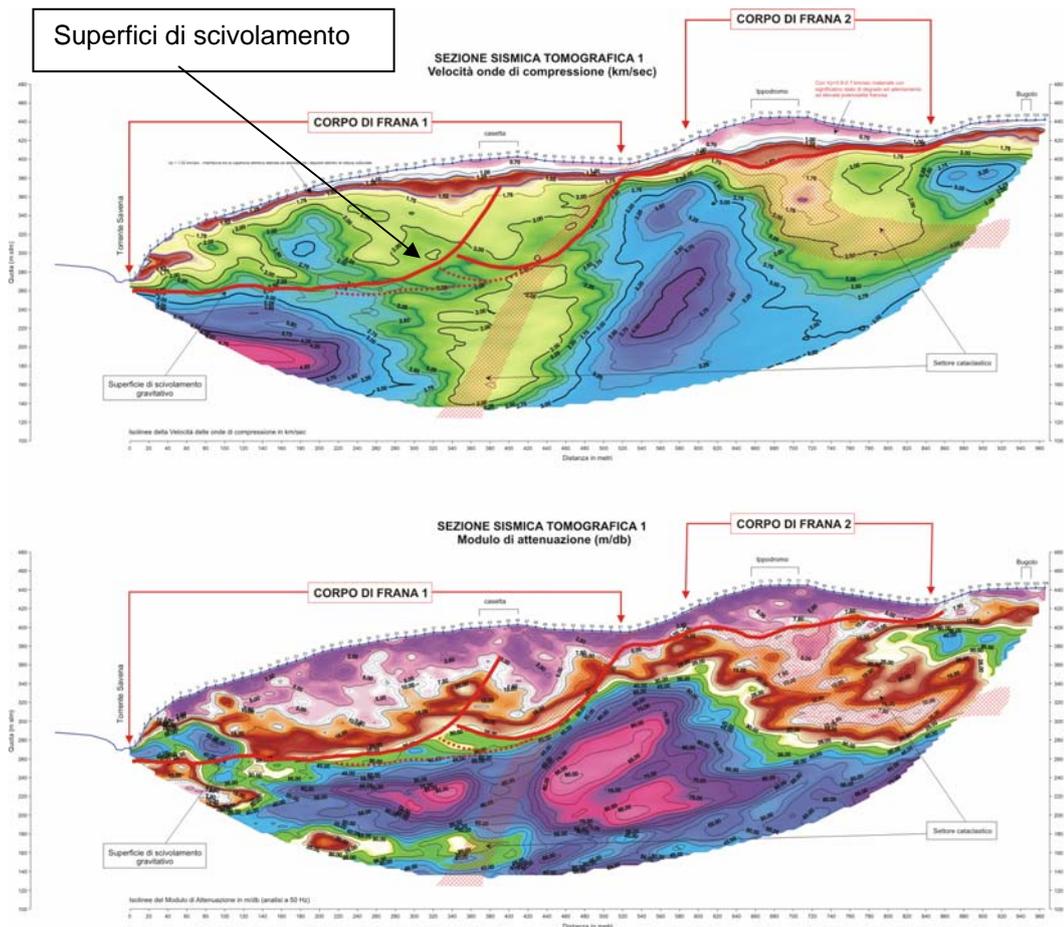


Fig. 2 – Sezioni sismiche in velocità (in alto) ed attenuazione (in basso)

Considerato l'obiettivo di analisi dell'intero versante è ovvio che l'immagine che se ne ricava è a ridotta risoluzione per quanto riguarda il fronte di frana (investigato con linee sismiche più ridotte) ma fornisce un quadro completo e significativo del versante portando ad individuare la forma della frana, a valutare le consistenze dei terreni tramite il parametro della velocità ed il grado fratturazione sulla base dell'attenuazione oltre alla localizzazione delle strutture tettoniche principali.

Il corpo della frana risulta costituito da una coltre sub-superficiale rappresentata da limitati e discontinui settori della copertura detritica (max 40 m di spessore caratterizzato da ridotte velocità delle onde di compressione) i quali sono soggetti a mobilitazioni locali e stagionali.

A questi depositi segue in profondità un ammasso lapideo a ridotte caratteristiche elastiche ma soprattutto anelastiche con valori del modulo di attenuazione molto ridotti tali da assimilare i materiali lapidei ad un corpo da fratturato ad estremamente fratturato oppure soggetto ad una intensa azione di stress.

Il limite inferiore del corpo di frana è indicato nella fig. 2 da linee in grassetto le quali corrispondono al luogo ove il gradiente dell'attenuazione è particolarmente elevato distinguendo nettamente una porzione superficiale più allentata e deformata per i movimenti di versante da una

basale consistente ed indeformata identificando in questa anche una stratificazione di consistenza a frana-poggio (a quote inferiori al corpo di frana 1) la quale non è più individuabile nel settore del corpo di frana.

La frana del corpo 1 presenta una profondità massima di 140 m con una interfaccia ben netta ma di natura composita il cui letto è principalmente suborizzontale ($< 10^\circ$) per un lungo tratto per poi inarcarsi decisamente sul fianco verso monte.

Nel settore centrale della sezione si evidenzia un nucleo ad elevata densità non rilevabile dalle indagini geologiche e geomorfologiche ma che sembra fungere da cerniera per i due movimenti franosi i quali, più a valle oltre l'allineamento in esame, tendono ad unirsi in un unico corpo di frana.

Un ulteriore vantaggio della analisi sismica tomografica, oltre a permettere di ottenere una immagine molto affidabile del sottosuolo interpretabile geologicamente e geomeccanicamente è anche quello di caratterizzare volumetricamente gli ammassi.

In questo caso, avendo a disposizione circa 11.000 celle di analisi, è stato possibile differenziare i materiali del corpo di frana da quelli sottostanti sia con valutazioni statistiche sia con distribuzioni istogrammatiche permettendo ulteriori considerazioni sulle consistenze e sull'aspetto geomeccanico di versante sia a livello areale sia di dettaglio (fig. 3-4).

Studio del settore di fondazione della Diga di Esaro (Cosenza)

La stretta di Cameli (Cosenza) dove sta sorgendo la diga dell'Alto Esaro (fig. 5 - foto della zona d'imposta) è stata oggetto di indagini fin dagli anni '60 e tra il 1975 ed il 1979 è stato realizzato un intenso programma di indagini indispensabili per la progettazione dell'opera, passata in seguito alla costruzione.

SETTORE IN FRANA				
	Vp	Ma	Q	RQD*
	m/sec	m/decibel		%
Minimo	0.420	0.1	1.24	0.52
Media	1.753	11.1	30.23	55.22
Mediana	1.800	6.3	24.48	54.59
Massimo	3.070	60.6	103.43	100.00

COMPLESSO LAPIDEO NON IN FRANA				
	Vp	Ma	Q	RQD*
	m/sec	m/decibel		%
Minimo	0.730	1.5	0.66	0.95
Media	2.709	42.6	91.83	94.39
Mediana	2.780	42.0	94.29	100.00
Massimo	4.990	91.1	184.09	100.00

Vp = Velocità onde di compressione
 Ma = Modulo di Attenuazione (1/coefficiente di attenuazione)
 Q = Fattore Qualità
 RQD* = Valore ricavato da una funzione correlativa

Fig. 3 – Parametri geofisici d'ammasso.

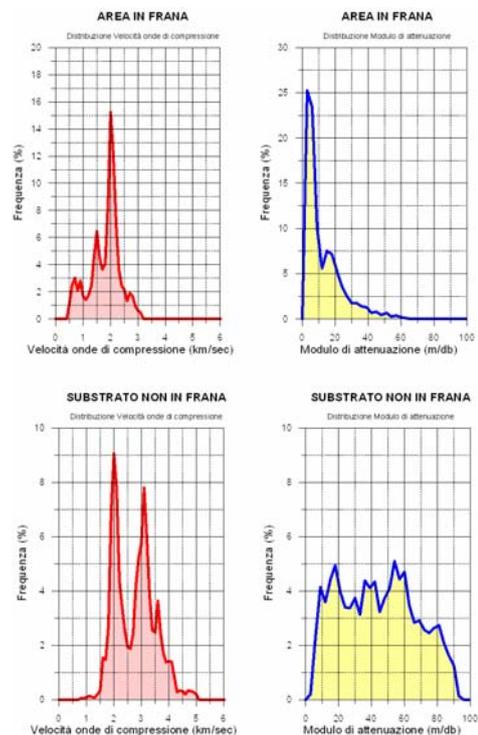


Fig. 4 – Distribuzioni dei parametri geofisici d'ammasso

Un dissesto nel dicembre 1987 a scavi praticamente ultimati ha interessato la sponda sinistra; per tal motivo ulteriori indagini sono state realizzate per un riesame delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso e per meglio valutare la stabilità e la sicurezza dell'opera le quali si sono protratte dal 1989 fino al 1991.



Fig. 5 – Impronta destra della diga di Esaro

Nel 1996 a seguito di varie vicende che hanno interessato il cantiere è stata disposta la chiusura dello stesso ed il trasferimento delle competenze dell'opera alla Regione Calabria la quale ha pianificato ed elaborato un piano di messa in sicurezza dell'area.

A partire dall'estate del 2000 la zona è stata oggetto di ulteriori indagini costituite da sondaggi, prove in sito ed in laboratorio ma principalmente da sismica tomografica con la quale si è caratterizzata arealmente l'intera zona d'impronta della diga con profili ubicati sulle sponde e sul fondo valle disposti normalmente e parallelamente all'asse vallivo. Tramite i parametri di velocità delle onde di compressione e di taglio, dei moduli elastico-dinamici, dell'attenuazione e del Fattore Qualità si è ottenuta una "fotografia" dello stato di conservazione della roccia permettendo di caratterizzare l'ammasso roccioso soprattutto ai fini della determinazione del detensionamento subito dalla roccia in un periodo di oltre 10 anni dall'inizio degli scavi.

Associando queste informazioni geofisiche ad un rilievo geostrutturale diffuso sull'area dell'impronta della diga si è riusciti ad ottenere un quadro completo ai fini di una valutazione del reale stato di conservazione della roccia. Sul sito in esame sono state realizzate 2 campagne sismiche tomografiche: la prima nell'estate del 2000 (15 sezioni sismiche per un complessivo di 2500 m di indagine) e la seconda nel settembre 2003 (15

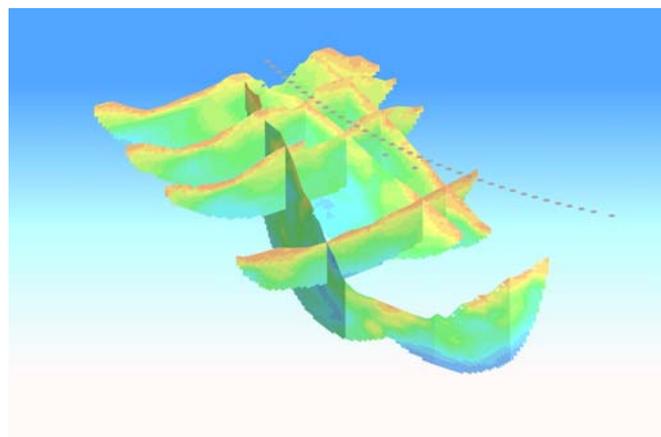


Fig. 6 - Immagine 3D di parte dei rilievi sismici in sponda sinistra

sezioni sismiche per un complessivo di 3600 m di indagine) le quali hanno interessato l'intera zona d'impronta diga ed il settore in frana in sponda sx del dissesto del 1987.

La seconda campagna geosismica è stata effettuata principalmente in sovrapposizione a quella del 2000 utilizzando il medesimo passo tra i sensori (5m) ed effettuando le medesime analisi (velocità ed attenuazione) allo scopo di valutare il detensionamento della roccia decorticata e l'alterazione prodotta nel lapideo dagli agenti atmosferici nell'arco temporale di tre anni (fig. 6).

Sulla base di tutti gli elementi d'indagine acquisiti e principalmente sulle risultanze della geosismica come unica tecnologia che ha permesso di evidenziare e valutare l'eccezionale grado di anisotropia verticolaterale dell'ammasso, si è proceduto alla programmazione degli scavi definitivi decorticando ulteriormente l'impronta della diga realizzata anni prima e ruotandola in parte per allontanarsi dal dissesto avvenuto in sponda sinistra nel 1987.

Per valutare quale metodologia di scavo fosse meglio utilizzare, scavo tradizionale mediante martellone oppure microcariche temporizzate, è stata impiegata, anche in questo caso, la tecnologia sismica tomografica con indagini pre e post blasting allo scopo di quantificare l'effetto di detensionamento ed apertura dei giunti con riduzione della coazione tra i singoli elementi lapidei.

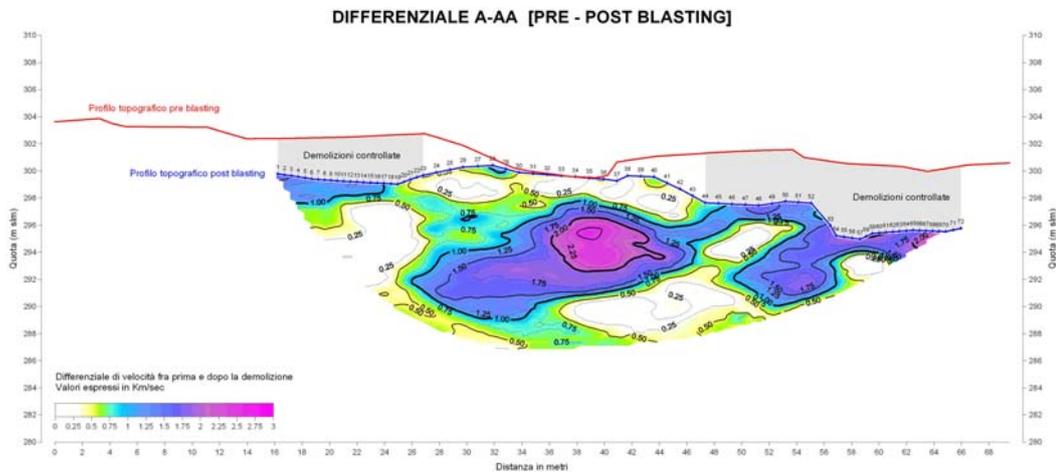


Fig. 7 – Sezione differenziale tra velocità fase pre e fase post blasting

L'indagine è stata realizzata in un settore di fondovalle ed è consistita in due sezioni ad elevata densità geofonica (passo da 50 cm a 2 m) realizzate in tempi diversi. Questo settore, dopo la prima fase d'indagine, è stato scavato in tratti diversi mediante scavo tradizionale ed esplosivo.

L'effetto di detensionamento prodotto dal martellone (scavo effettuato nel tratto tra due settori ad esplosivo) è risultato praticamente nullo, mentre per l'esplosivo si può interpretare una profondità interessata da allentamento nell'intorno di 1-2 m con variazioni anche di 1-1.5 km/sec nel differenziale di velocità di propagazione delle onde di compressione (fig. 7). L'effetto però più interessante, il quale ha alla fine condizionato la

metodica di scavo della nuova impronta, è quello che ha interessato il settore fagliato presente in alveo.

In questo caso l'effetto di allentamento si è sviluppato per una fascia di 4-6 m attorno alla faglia producendo importanti variazioni nei parametri cinematici (fino ad oltre 2.5 km/sec !!); le vibrazioni prodotte dal blasting hanno interessato i materiali della fascia cataclastica, i quali presentavano presumibilmente caratteristiche di fratturazione latente, ed hanno prodotto una significativa riduzione della coazione tra gli elementi lapidei aumentando nel complesso la deformabilità dell'ammasso.

Lo scavo dell'impronta è così avvenuto mediante metodiche tradizionali con continui monitoraggi geosismici tomografici man mano che questo procedeva verso fondo valle. Questa ulteriore campagna sismica si è protratta da febbraio a settembre 2004 realizzando sezioni per 3800 m ed ottenendo, vista l'arealità e la densità dell'indagine, una immagine tridimensionale delle caratteristiche elastiche del sottofondo (fig. 8).

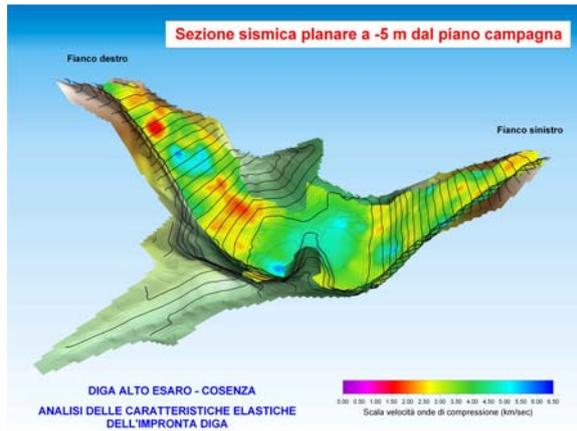


Fig. 8 – Sezione planare in velocità

Mediante tale elaborazione si è ottenuta, associando i dati temporali, l'ultima immagine del lapideo di fondazione prima di iniziare la costruzione dell'opera d'arte dalla quale è stato possibile localizzare tridimensionalmente i settori fratturati e allentati sui quali procedere ad ulteriori escavazioni oppure a opere di consolidamento o intasamento delle fessure.

Introspezione tomografica della Diga del Gabiet (Gressoney – Val d'Aosta)

La Diga del Gabiet è una struttura a gravità costituita da pietrame (fig. 9) con legante cementizio il quale, a seguito di filtrazione di acqua, è stato parzialmente dilatato e alterato.



Fig. 9 – Diga del Gabiet

Da tale constatazione è derivata la necessità di determinarne il grado di porosità e/o permeabilità e di conseguenza il peso effettivo della struttura per una valutazione del suo grado di stabilità oppure eventualmente per intervenire con iniezioni mirate di malte cementizie ad effetto impermeabilizzante o per lo meno per una riduzione della porosità primaria.

A questo scopo è stata realizzata una indagine geognostica (luglio 2003-luglio 2004) consistita in 3 sondaggi meccanici realizzati per taratura e in indagini geo-sismiche realizzate sia in foro (tecnica Down Hole) per ottenere dati ad alta risoluzione (misure ogni 50 cm) sia dalla superficie sismica tomografica in velocità ed attenuazione per complessivi 1307 m di sezioni. Infine prove di laboratorio su malta e lapideo hanno completato il quadro informativo. Sono state realizzate 10 sezioni sismiche lungo ciascun gradino per l'intera lunghezza del paramento di valle della diga con stazioni geofoniche ogni 1.5-2.5 m e shot con martello strumentato ogni 4-5 stazioni; l'elaborazione è stata effettuata con 20809 celle di analisi tomografica di dimensione submetrica (fig. 10).

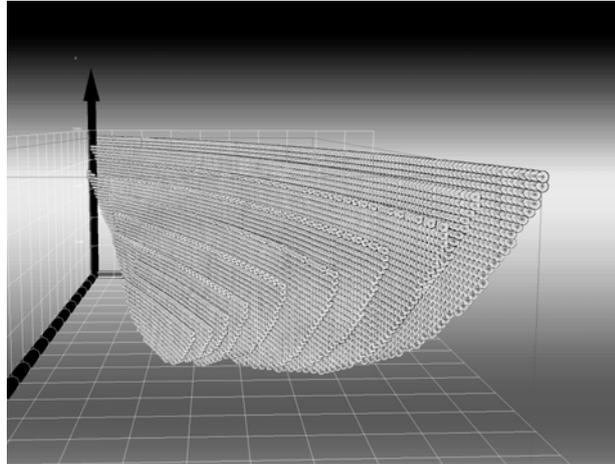


Fig. 10 – Schema tridimensionale dei dati delle sezioni tomografiche (una serie di dati per gradino della diga)

Per comprendere l'analisi sismica realizzata è necessario fare un breve cenno su quello che esprime il parametro dell'attenuazione, peraltro utilizzato anche nei due precedenti casi presentati.

Quando un'onda elastica attraversa un mezzo la sua energia meccanica viene progressivamente convertita in calore a causa di attriti e viscosità tra le particelle: la presenza di porosità, fratture, acqua, gas determinano un decadimento dell'energia dell'onda sismica modificandola in frequenza ed in ampiezza.

Quando un'onda elastica attraversa un mezzo la sua energia meccanica viene progressivamente convertita in calore a causa di attriti e viscosità tra le particelle: la presenza di porosità, fratture, acqua, gas determinano un decadimento dell'energia dell'onda sismica modificandola in frequenza ed in ampiezza.

Il coefficiente di attenuazione è quindi una misura geofisica della qualità dei materiali ed associandolo alla velocità (parametro funzione principalmente della densità) si ottiene quello che viene chiamato Fattore Qualità sismico il quale funge da sintesi geognostica nel campo viscoelastico fornendo indicazioni qualitative dei materiali indagati e, per correlazione con dati di laboratorio e prove geotecniche in sito, estendibili ad aree più ampie (fig.11).

Classe geofisica	Fattore Qualità (range)	Descrizione
Classe 6	0-10	materiali detritici, lapidei alterati
Classe 5	10-15	materiali detritici compatti, lapideo molto fratturato
Classe 4	15-20	materiale fratturato mediamente consistente
Classe 3	20-50	materiale poco fratturato
Classe 2	50-70	materiale leggermente fratturato
Classe 1	>70	materiale compatto

Fig. 11 - Tabella correlativa classe geofisica – Fattore Qualità

La Progeo ha da tempo sviluppato un proprio sistema di caratterizzazione degli ammassi lapidei correlando i valori della velocità delle onde di compressione e dell'attenuazione sismica con la classificazione di Bieniawski.

Con il grafico di caratterizzazione (fig. 12) si prendono in considerazione sia i comportamenti elastici sia quelli anelastici ottenendo una sintesi più qualificata dello stato deformativo del materiale esaminato: questo grafico è rappresentato da un fascio di curve che separa le classi geofisiche intersecato da una serie di curve convergenti all'origine che fornisce una partizione indicativa del grado di deformabilità passando da quella più elevata a quella prossima all'asse delle ascisse.

La grande quantità di dati elaborati tomograficamente della diga del Gabiet ha permesso di realizzare una significativa analisi statistica ricavando parametri medi e varianze oltre a rendere affidabili le successive analisi per la determinazione della porosità e del peso di volume d'ammasso.

La diga in definitiva presenta un valore medio di velocità sismica di 3960 m/sec (range tra 2320 – 6260 m/sec), un modulo di attenuazione compreso tra 0.11 e 15.35 m/db (con valore medio pari a 1.97 m/db) e un Fattore Qualità compreso tra 4.9 e 105.7 (con valore medio di 28.0).

Coordinando le velocità ed il modulo di attenuazione nel grafico di caratterizzazione (fig. 12) i dati si distribuiscono principalmente in prossimità dell'asse delle ascisse indicando un complesso tendenzialmente molto deformabile.

Essendo la diga costituita da un ammasso anisotropo di malta e pietrame le cui velocità ultrasoniche medie sono rispettivamente 4.090 km/sec e 5.391 km/sec rispetto al valore di velocità media tomografica di 3.960 km/sec è evidente che, anche solo sulla base di queste semplici indicazioni, il manufatto è significativamente rappresentato anche da una notevole quantità di vuoti per mancanza di cementazione e/o porosità nella malta ($\phi_{\text{medio}}=15.68\%$ da prove di laboratorio).

La presenza di valori di attenuazione estremamente elevati indica esattamente questa situazione: l'energia sismica viene dissipata principalmente dalle fessure e dalla porosità presenti come mostrato anche da una ispezione visiva mediante telecamera nei fori di sondaggio dalla quale sono stati ricavati log dei vuoti.

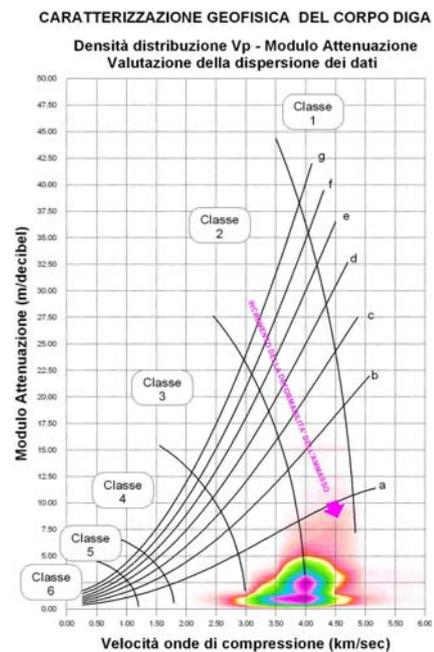


Fig. 12 – Caratterizzazione geofisica della diga del Gabiet

Mediante analisi statistiche su base sperimentale si sono coordinati i dati geofisici, di laboratorio ed i log in foro (Down Hole e telecamera) ottenendo funzioni correlative per determinare la percentuale del lapideo e della malta in funzione del Fattore Qualità e la porosità in funzione del Modulo di Attenuazione.

In sintesi, la diga del Gabiet si presenta con:

- percentuale del lapideo pari al 48.31%;
- percentuale della malta pari al 51.69%;
- porosità media dell'8.50%.

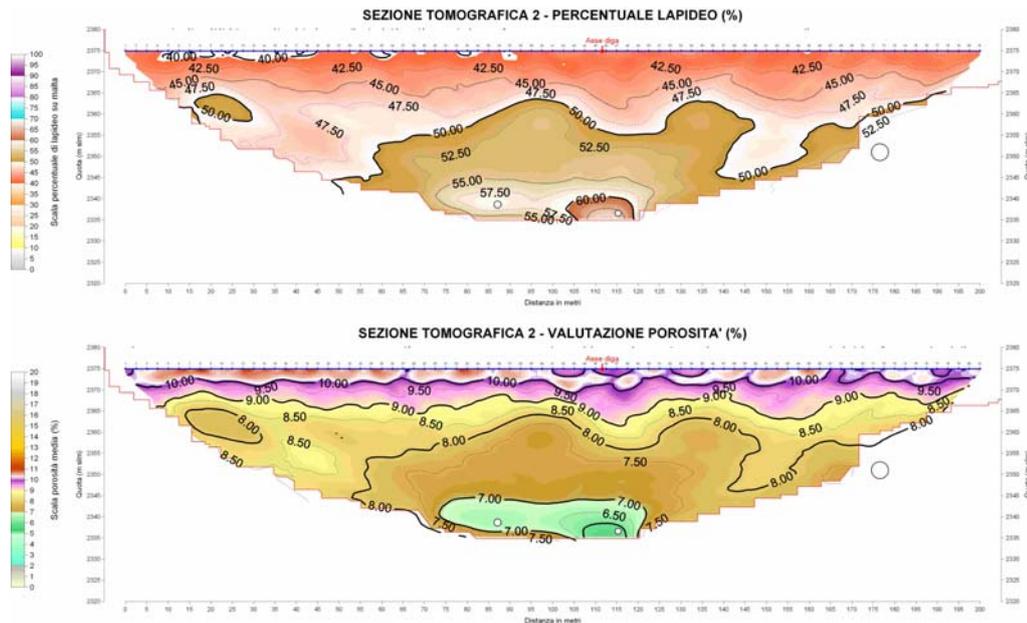


Fig. 13 – Sezione tomografica 2 in percentuale lapideo e porosità

Anche in questo caso, come per il precedente della diga di Esaro, si è ottenuta una valutazione tridimensionale della struttura con la quale è possibile localizzare anomalie ed eventualmente intervenire con iniezioni e consolidamenti.

BIBLIOGRAFIA PRINCIPALE

- Dines K., Litle I., 1979. Computerized geophysical tomography, Proc. IEEE, 67, pp. 1065-1073.
- Ewing, W.M., Jardetzky, W.S., Press, F., 1957. Elastic waves in layered media. McGraw Hill Book Co. Inc., New York
- Kaelin B. and Lane R. Johnson, 1999. Using seismic crosswell surveys to determine the aperture of partially water-saturated fractures. *Geophy. J.*, 64, pp. 12-13.
- Mavko G., Mukeriji T., Dvorkin J., 1998. The rock physics handbook. Cambridge University press.
- Nolet G. (ed.), 1987. Seismic tomography, with applications. *Global seismology and exploration geophysics*.
- Oppenheim A.V., Schafer R.W., 1975. Digital Signal Processing. Prentice-Hall, Enc.
- Robinson, E. A., S. Treitel, 1980. Geophysical signal analysis. Prentice-Hall, Enc.
- Stewart R.R., 1991. Exploration seismic tomography. *Fundamentals. SEG Course Notes*, 190 pp.
- Tien-when Lo, Inderwiesen P., 1994. Fundamentals of seismic tomography. *Geophy. Monograph series*, 6.
- Toksoz N., Johnston D.H., 1981. Seismic wave attenuation. *Geophysics reprint series*, 2.
- Watanabe T., K. Sassa 1996. Seismic Attenuation Tomography and its Application to Rock Mass Evaluation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. dc Geomech. Vol. 33, No. 5*, pp. 467-477.
- White, D. J., 1989, Two-dimensional seismic refraction tomography. *Geophy. J.*, 97, pp. 223-245.