

IL CONTRIBUTO DELLA GEOFISICA NELLA PROGETTAZIONE GEOTECNICA E NEL CONTROLLO IN CORSO D'OPERA.

Di Francesco R., Siena M.

GEO&GEO Instruments® – research & development, Teramo (TE); www.geoandgeo.com

SOMMARIO

La geotecnica è una materia molto complessa e vasta e, trattando argomenti quali la meccanica e dinamica delle terre e l'interazione terreno-struttura, necessita di una gran mole di informazioni. Mutuando la terminologia informatica la geotecnica può essere considerata come un "algoritmo di trasformazione" che risulta essere particolarmente sensibile ai dati di input, per quantità e qualità. Metodologie di investigazione indiretta del sottosuolo come la sismica a rifrazione e le indagini vibrometriche consentono di perfezionare la qualità del segnale di input sulla base di alcuni aspetti particolari che, sulla scorta di algoritmi sviluppati in originale dagli autori, possono essere riassunti in alcuni punti essenziali: a) accuratezza dei risultati; b) rapidità di esecuzione; c) controllo in corso d'opera; d) economia dei costi. Nella presente memoria, dopo aver introdotto l'algoritmo di calcolo, viene presentata una case history che illustra quanto evidenziato, riguardante la ricostruzione della geometria di una frana interessante una strada provinciale, nonché il controllo in corso d'opera dell'efficacia delle opere di consolidamento della stessa.

Parole chiave: sismica a rifrazione, indagini vibrometriche, algoritmi, propagazione onde, saturazione

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi anni lo sviluppo della tecnologia nella progettazione delle centraline di acquisizione dati per le prospezioni geofisiche ha fornito un forte impulso nella diffusione ed utilizzo delle indagini basate sulla "sismica a rifrazione" e sui "metodi vibrometrici". A ciò deve aggiungersi la creazione di modelli matematici che, implementati in software commerciali, hanno reso più agevole l'interpretazione dei dati registrati. Metodologie di calcolo note come Delay Time e GRM consentono di tenere conto di topografie e di contatti coperture-substrato comunque variabili. È anche vero però che l'interpretazione classica basata sull'utilizzo dei tempi di primo arrivo, pensati come perturbazione dinamica delle condizioni di equilibrio, mostra sovente alcuni limiti in termini di precisione dei calcoli. Di fatti il problema principale è insito nella considerazione che un singolo strato (o sismostrato) possa essere assimilato ad un corpo elastico omogeneo le cui caratteristiche di densità non varino con la profondità.

Al contrario in molti casi la caratterizzazione geotecnica di un sito ha evidenziato la presenza di una seppur minima variazione, in aumento, della densità dei terreni con la profondità, tale da complicare i segnali

registrati dai sensori in funzione della presenza di pacchetti di onde parassite. In effetti partendo dalla considerazione che solo per $V_1 = V_2$ il raggio sismico si propaga in linea retta tra due mezzi, è sufficiente una minima variazione di densità e quindi di velocità per generare un'onda rifratta. Estendendo il concetto ad un intero strato e pensando lo stesso come suddiviso in n substrati a velocità crescente con la profondità, diventa evidente come un segnale registrato sia la somma di rifrazione multiple, ovvero mostri l'ingresso di onde parassite nell'ambito della rifrazione concettualmente utile (figura 1).

L'applicazione di alcune funzioni, sviluppate in originale dagli scriventi, allo studio dei singoli sismogrammi consente di tenere conto degli effetti descritti. In altre parole è possibile scindere gli effetti legati all'ingresso delle onde parassite ed individuare il reale punto di primo arrivo che non necessariamente coincide con l'inizio della perturbazione, ottenendo una migliore risoluzione della geometria del sottosuolo nonché dei profili di velocità delle onde elastiche.

I vantaggi offerti dai metodi vibrometrici derivano invece dallo studio delle caratteristiche elastiche di un terreno in funzione dei periodi delle onde rilevate superficialmente poiché ad esempio al variare della

densità nel tempo variano le velocità di propagazione e le caratteristiche elastiche del mezzo. Il problema è incentrato nel fenomeno della “dispersione anomala” per il quale alle massime frequenze sono associate le maggiori velocità, derivante dalla constatazione sperimentale che i mezzi elastici ammettono attrito interno. L’esistenza della dispersione anomala nell’ambito delle alte frequenze rende particolarmente utile l’indagine vibrometrica ad esempio nel controllo dell’efficacia delle iniezioni nei terreni al fine di migliorarne le caratteristiche geotecniche.

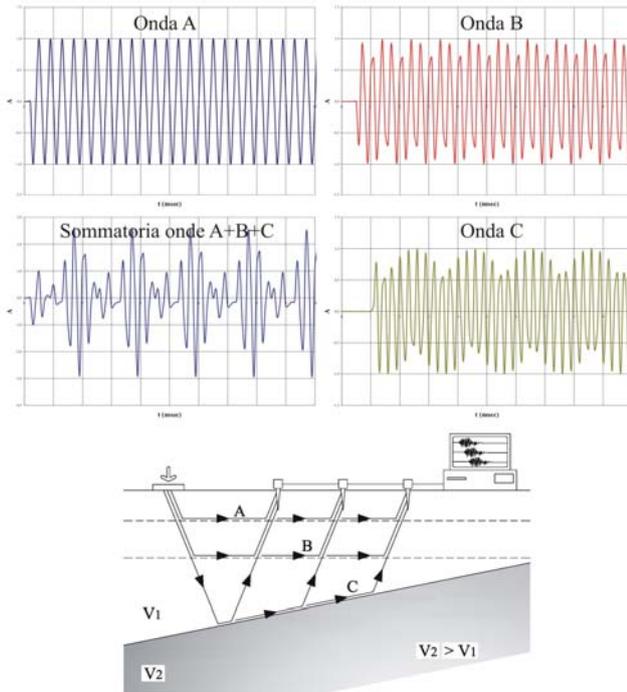


Figura 1. Esempio di ingresso di ipotetiche onde parassite, A e B, su onda rifratta utile C (da Siena et al., 2005, modificata).

I vantaggi derivanti dall’utilizzo in parallelo di tali metodologie vengono esposti in una case history riguardante la ricostruzione della geometria di una frana interessante una strada provinciale, nonché il controllo in corso d’opera dell’efficacia delle opere di consolidamento della stessa.

L’utilità dell’applicazione delle metodologie proposte può essere infine sintetizzata in alcuni punti essenziali: a) rapidità e precisione nella ricostruzione della geometria delle frane e dei profili di velocità; b) valutazione dell’efficacia in corso d’opera delle opere di consolidamento in relazione alle variazioni di efficienza delle trincee drenanti; c) verifica e taratura dei modelli di calcolo impostati in sede progettuale.

2 SISMICA A RIFRAZIONE

2.1 Considerazioni generali

Le prospezioni sismiche appartengono alla branca della geofisica che si occupa dell’esplorazione del sottosuolo

attraverso lo studio della propagazione di onde elastiche generate in superficie tramite esplosioni controllate, vibrazioni indotte a frequenza nota o masse battenti (Carrara et al., 1999). In ogni caso l’onda elastica generata assume la forma di impulso, ovvero di onda dotata di un tempo finito e comunque piccolo se paragonato al tempo di osservazione del sistema, tale che per un’onda longitudinale che si propaga lungo l’asse x assume la forma:

$$\Phi_{(x,t)} = I = \int_{t_0}^{t_1} F dt \quad (1)$$

essendo l’integrale della forza, generata in fase di energizzazione, mediata nel tempo.

Le condizioni che sottendono l’uso delle prospezioni basate sulla rifrazione delle onde sismiche possono essere riassunte come segue (Sankar et al., 2000):

1. le onde si propagano in strati caratterizzati da differenti velocità;
2. la velocità di propagazione deve aumentare con la profondità;
3. le interfacce tra gli strati devono essere ben distinte, ovvero non devono essere presenti passaggi graduali;
4. il raggio di curvatura dei fronti d’onda è grande rispetto alla geometria da investigare tale da poterli considerare come onde piane.

La condizione espressa dal punto “4” è sottesa dalla definizione di fronte d’onda, il quale può essere definito come il luogo dei punti che possiedono tutti la stessa fase (Boschi E. e Dragoni M., 2000). I concetti sopra introdotti sono stati gli elementi essenziali che hanno decretato il successo delle prospezioni sismiche basate sulla tecnica della rifrazione, dal momento che nella maggiore parte dei casi, che esse siano applicate a ricerche petrolifere o alle indagini geotecniche, tali condizioni risultano simultaneamente soddisfatte. Ma il vero vantaggio è che in tal modo è possibile evitare la trattazione matematica del segnale registrato (sismogramma) e sostituire lo studio della propagazione delle onde con i propri “raggi sismici”, che rappresentano il percorso dell’onda all’interno del mezzo in cui si propaga.

Di conseguenza in un mezzo omogeneo ed isotropo i raggi sono rappresentati da linee rette perpendicolari ai fronti d’onda. Ma in presenza di un mezzo isotropo disomogeneo nel quale le proprietà variano con continuità i raggi assumono una forma curva, ma sempre normale ai fronti d’onda, dando origine al fenomeno della rifrazione. Nel caso limite di mezzi caratterizzati da diversa impedenza caratteristica z , intesa come prodotto della velocità per la densità del mezzo, i raggi risultano essere sempre rettilinei all’interno dei singoli mezzi, ma con direzioni diverse dovute ad una brusca variazione al passaggio tra gli stessi.

In definitiva l’esecuzione di prospezioni sismiche basate sulla rifrazione richiede il posizionamento di sensori definiti geofoni, generalmente velocimetri, che allineati in uno stendimento registrano le onde prodotte in punti fissi e coniugati, al fine di garantire una corretta

ricostruzione della geometria del sottosuolo e relativo profilo di velocità. Tale ricostruzione inizia con l'individuazione del punto di primo arrivo su ogni sismogramma, ovvero del tempo di inizio della perturbazione dalle condizioni di equilibrio legata al passaggio dell'impulso, e termina con il calcolo della profondità basata su metodi geometrici noti, quali il Delay Time e, più recentemente, il GRM (Palmer, 1980) che consente di ricostruire geometrie del sottosuolo comunque articolate. Nell'iter procedurale seguito la determinazione dei tempi di primo arrivo rappresenta l'aspetto più delicato, dal momento che gli stessi consentono di costruire il grafico di partenza con tutte le dromocrone necessarie per la derivazione delle altre quantità utili per la ricostruzione della geometria dei mezzi investigati (figura 2).

2.2 Considerazioni teoriche

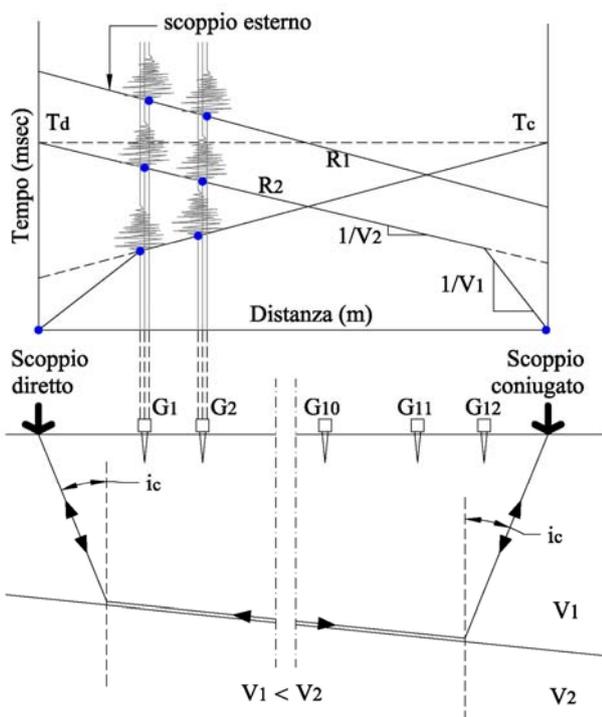


Figura 2. Esempio di stendimento sismico e modalità di costruzione delle dromocrone.

I concetti posti alla base dell'utilizzo ed interpretazione della sismica a rifrazione sono sostanzialmente quattro: 1) un raggio sismico subisce, al passaggio tra due strati dotati di diversa impedenza caratteristica, una rifrazione che rispetta la legge di Snell:

$$\frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}\beta} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

nella quale α e β rappresentano rispettivamente l'angolo di incidenza e quello di rifrazione, mentre V_1 e V_2 le velocità dei mezzi attraversati; 2) secondo il principio di Fermat il raggio sismico percorre la distanza tra la sorgente e i geofoni seguendo, tra gli infiniti percorsi, quello di tempo minimo; 3) esiste un valore limite

dell'angolo di incidenza che comporta la trasmissione del raggio sismico lungo l'interfaccia, impedendone di fatto la propagazione allo strato sottostante (figura 2);

$$\text{sen}i_c = \frac{V_1}{V_2} \rightarrow i_c = \text{sen}^{-1} \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

dove i_c è l'angolo critico di rifrazione; 4) ogni punto situato su un dato fronte d'onda può essere considerato come una sorgente sismica, altresì noto come principio di Huygens. Tale principio è una conseguenza dell'equazione di un'onda che si propaga lungo la retta x , o equazione di D'Alembert:

$$\frac{1}{V_{P,S}^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \quad (4)$$

per cui ogni qualvolta i punti della retta vengono posti in oscillazione gli stessi diventano a loro volta emettitori di onde. L'involuppo di tali nuove onde, dopo un tempo $t + \Delta t$, dà luogo ad un nuovo fronte d'onda. Nell'eq. (4), V è la velocità di propagazione dell'onda che assume la forma di (Serra P. e Tinti S., 1984):

$$V_P = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (5.1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} \quad (5.2)$$

dove V_P e V_S sono la velocità di onde longitudinali e trasversali rispetto alla retta di propagazione x e che dipendono chiaramente dalle caratteristiche elastiche ed inerziali del mezzo essendo E_d e G_d i moduli elastici dinamici normali e tangenziali e ρ la densità media. Tali velocità sono fornite dall'inversa della pendenza delle rette, definite dromocrone, di cui alla figura 2.

Una volta note le velocità di tutti i mezzi e i tempi di primo arrivo è possibile ricavare ulteriori dati che consentono infine il calcolo degli spessori al di sotto di ogni geofono e dei punti di energizzazione.

2.3 Funzioni di analisi dei tempi di primo arrivo

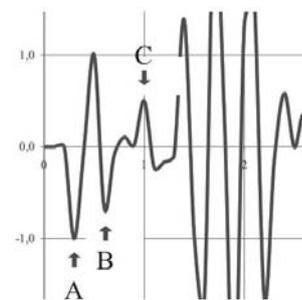


Figura 3. Particolare della porzione iniziale della sommatoria delle onde di cui alla figura 1 (da Siena et al., 2005). A e B indicano i punti di ingresso delle onde parassite, C del segnale corretto.

Il problema della corretta definizione dei tempi di primo arrivo è insito sostanzialmente nella lunghezza tipica dei sismogrammi, generalmente dell'ordine delle decine di millisecondi, ragion per cui appare ovvio come tale determinazione assuma una importanza fondamentale ed un elevato grado di precisione. Occorre però innanzitutto constatare come, nella interpretazione della sismica a rifrazione, devono essere rispettati due vincoli:

- i tempi diretti (T_d) e coniugati (T_c), ovvero provenienti da energizzazione speculari, devono essere necessariamente uguali, essendo uguali le distanze percorse stante il principio di Fermat (figura 2, punti T_d e T_c);
- la differenza dei tempi misurati da ogni geofono e provenienti da diversi scoppi deve rimanere costante; ovvero le dromocrone devono essere parallele per segnali provenienti dalla stessa interfaccia (figura 2, rette R_1 ed R_2).

Ma se la teoria prevede ciò la pratica talora dimostra condizioni anche molto diverse, in funzione di complesse condizioni di variazioni laterali di densità/velocità. Con riferimento alla figura 3, che rappresenta la porzione iniziale di un singolo impulso, è evidente come l'ingresso nel segnale di due onde parassite A e B determina l' indesiderata anticipazione del reale punto di primo arrivo (punto C). In ogni caso le onde parassite riescono ad anticipare la vera rifrazione solo per alcuni geofoni, oltre i quali le stesse appaiono come una semplice perturbazione del segnale registrato e il loro numero è funzione della velocità del mezzo sottostante.

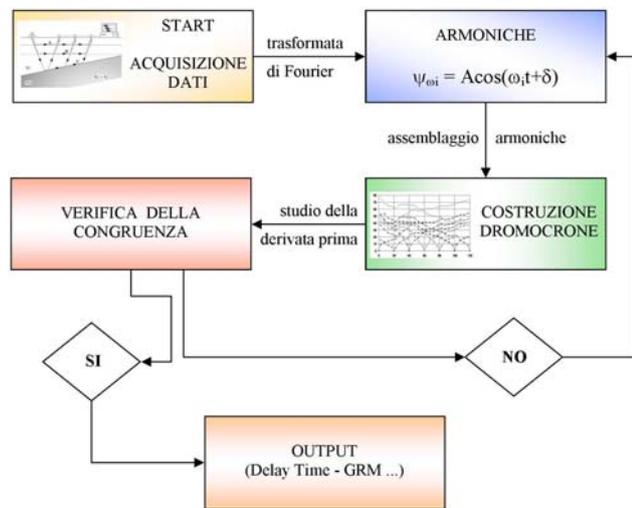


Figura 4. Diagramma di flusso relativo all'analisi dei tempi di primo arrivo.

La metodologia sviluppata in originale e proposta per la prima volta in modo esauriente, può essere sintetizzata come proposto nel diagramma di flusso di cui alla figura 4. Terminata la fase di acquisizione dati in campagna, il punto di partenza prevede la scomposizione dei singoli sismogrammi mediante applicazione della trasformata di Fourier, in considerazione del fatto che una possibile soluzione all'eq. (4) è data da:

$$\Phi_{(x,t)} = A \cos(kx + \delta) \sin(\omega t + f) \quad (6)$$

che rappresenta l'equazione generale del moto in funzione dello spazio x e del tempo t . In essa:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (7)$$

rappresenta la pulsazione angolare dipendente dalla frequenza f e dal periodo T e:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

definito numero d'onda, è funzione della lunghezza d'onda λ . Ciò implica che per ogni lunghezza d'onda avremo una funzione sinusoidale o cosinusoidale definita armonica o componente monocromatica, caratterizzata in ampiezza, frequenza e fase; la somma di una serie discreta di armoniche fornisce l'impulso di partenza registrato:

$$I = \sum_{i=1}^n \Phi_{oi} = \sum_{i=1}^n A \cos(\omega_i t + \delta) \quad (9)$$

Nella eq. (9) Φ_{oi} rappresenta un'onda progressiva con pulsazione angolare dipendente dalla frequenza i -esima, mentre δ invece è la fase. Il primo termine dell'eq. (6) è uguale a 1 per la condizione iniziale $x = \delta = 0$. Il simbolo sommatoria è stato sostituito al simbolo integrale proprio per le condizioni imposte, e cioè che la composizione dell'impulso dipende solo da un numero finito e discreto di armoniche, non essendo costante sull'intervallo considerato.

L'esperienza insegna che in genere la somma anche delle sole prime 16 armoniche può essere sufficiente a replicare il segnale registrato (Carrara et al., 1999), mentre nelle funzioni proposte vengono sistematicamente utilizzate fino a 60 armoniche. Ciò comporta ovviamente un elevato onere computazionale, dal momento che per uno stendimento sismico con dodici geofoni e sette punti di energizzazione (scoppi) è necessario analizzare fino a 5040 armoniche, ognuna caratterizzata da un proprio tempo di primo arrivo.

A questo punto il passo successivo consiste nella costruzione in serie delle dromocrone secondo il metodo classico, utilizzando però tutte le armoniche a partire dalla prima, il che comporta l'assemblaggio di numero elevato di grafici. Una analisi iterativa continua di tutti i grafici consente infine l'individuare della corretta combinazione, dal momento che una ed una sola combinazione rispetterà le condizioni iniziali "a" e "b".

Il passo finale, definito "verifica della congruenza", consiste quindi nella verifica dei calcoli eseguiti mediante lo studio della derivata prima applicata ai segnali utilizzati:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Phi_{oi} = -A \omega \sin(\omega t + \delta) \quad (10)$$

In effetti, confrontando le figure 3 e 5, l'ingresso nel segnale della rifrazione corretta C corrisponde ad una importante variazione in derivata prima. Occorre a tal proposito precisare che i segnali di cui alle figure di riferimento sono da intendersi come puramente teoriche, dal momento che le registrazioni reali risultano essere molto più complesse tali da consentire una migliore risoluzione in derivata prima, laddove il punto di reale primo arrivo appare generalmente come una brusca variazione di pendenza.

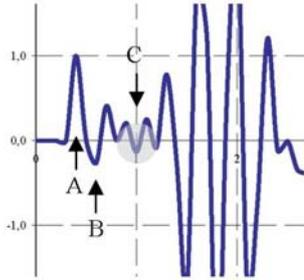


Figura 5. Particolare della derivata prima applicata alla sommatoria delle onde di cui alla figura 3.

3 METODI VIBROMETRICI

Qualunque operazione interessi un terreno, che essa comporti ad esempio la realizzazione di un rilevato, di uno scavo o l'esecuzione di una galleria, determina sempre una variazione nel tempo e nello spazio delle proprietà elastiche del mezzo, che possono aumentare o diminuire in relazione alla tipologia della perturbazione.

Le caratteristiche elastiche di un terreno, come già evidenziato con le equazioni (5.1) e (5.2) influenzano direttamente le velocità di propagazione delle onde sismiche, sia esse naturali che artificiali, mentre una completa caratterizzazione di un sito richiede la determinazione del modulo elastico dinamico E_d e del coefficiente di Poisson dinamico ν_d . E tale determinazione può essere eseguita mediante indagini vibrometriche le quali, ripetute periodicamente, consentono anche di ricavare le leggi di variazione nel tempo delle costanti elastiche.

In effetti l'utilizzo di più sensori triassiali capaci di registrare sia onde longitudinali e sia onde trasversali polarizzate su piani mutualmente ortogonali, consente di ricavare i parametri anzidetti tramite le seguenti equazioni (Carrara et al., 1999):

$$E_d = V_S^2 \rho \left[\frac{(3V_P^2 - 4V_S^2)}{(V_P^2 - V_S^2)} \right] \quad (11)$$

$$\nu_d = \frac{0.5 \left(\frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1} \quad (12)$$

Occorre nel contempo anche evidenziare come la registrazione di onde elastiche prodotte artificialmente, così come introdotto per le prospezioni sismiche a rifrazione, consente anche di valutare semi-quantitativamente il grado di compattezza di un terreno e nuovamente la sua variazione nel tempo. In effetti le onde, pensate come sommatoria di un numero infinito di armoniche, viaggiano con la velocità di fase definita dalla relazione di dispersione:

$$V_f = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{k} = f\lambda = \frac{\lambda}{T} \quad (13)$$

che si ottiene dalla combinazione delle equazioni (7) e (8).

L'analisi di tale semplice equazione consente di valutare come la velocità, legata alle proprietà elastiche, risulti inversamente proporzionale al periodo delle onde registrate e direttamente proporzionale alla frequenza ed alla lunghezza d'onda delle stesse. Poiché inoltre k e ω sono legate dalla relazione di dispersione, l'esistenza di una banda di frequenze $\Delta\omega$ implica una corrispondente banda Δk di numeri d'onda (Boschi E. e Dragoni M., 2000) il che comporta che la velocità di gruppo del pacchetto di onde influenzi la lunghezza di ogni singola armonica componente. In definitiva, per un dato mezzo, considerata costante la velocità del pacchetto d'onde, la lunghezza d'onda e la frequenza risultano inversamente proporzionali. Ma al variare delle caratteristiche del mezzo si assiste ad una variazione di velocità direttamente proporzionale alla frequenza.

E tale fenomeno, per il quale alle massime frequenze sono associate le maggiori velocità di propagazione, è noto con il nome di "dispersione anomala".

Il fenomeno della dispersione anomala nell'ambito delle alte frequenze si presta ottimamente ad esempio per la verifica delle operazioni di consolidamento di un terreno mediante iniezioni di cemento, anche se è necessario precisare che il terreno si comporta sostanzialmente come un filtro passa-basso, per cui con l'aumentare della distanza dalla sorgente al ricevitore si assiste ad una attenuazione delle alte frequenze. Un problema che deve essere noto a chi esegue le operazioni di acquisizione dati in campagna.

4 UN CASO DI STUDIO

4.1 Considerazioni applicative

La metodologia proposta è stata convenientemente utilizzata per la ricostruzione della geometria di alcune frane, di genesi e cinematica differente, che hanno interessato diverse strade provinciali del territorio collinare dell'Abruzzo teramano. In particolare il caso di studio presentato riguarda una frana di genesi complessa, dettata da condizioni di innesco di natura prevalentemente roto-traslazionale parzialmente evolutasi in colata (figura 6) e che ha coinvolto terreni colluviali limo-argillosi nonché il sottostante substrato marnoso costituito da alternanze di argille mioceniche sovraconsolidate e

fessurate e sottili interstrati arenacei e siltici (Formazione della Laga).

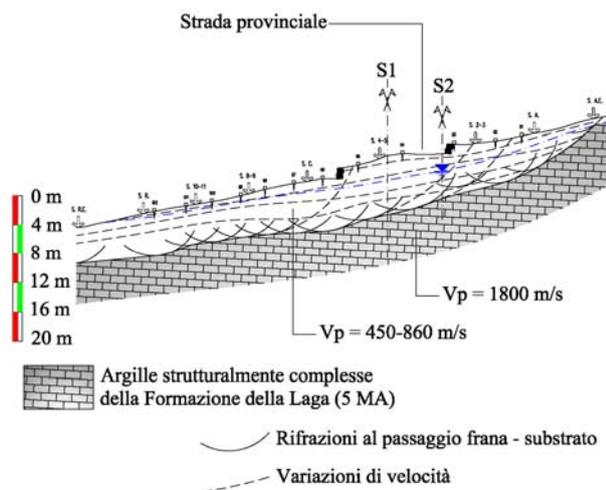


Figura 6. Sezione stratigrafica della frana studiata, con il coinvolgimento della sede stradale della S.P. 75 (TE).

Il vantaggio fondamentale derivante dall'esecuzione delle prospezioni sismiche a rifrazione è legato sostanzialmente proprio alla constatazione del coinvolgimento, nel movimento franoso, del sottostante substrato roccioso, tale da rendere difficoltosa l'analisi stratigrafica in sede di investigazione diretta mediante sondaggi a carotaggio continuo. In effetti, mentre il recupero delle carote ha consentito di differenziare i termini litologici tra terreni colluviali, substrato alterato e substrato integro, le prospezioni sismiche, in virtù della notevole differenza di impedenza caratteristica tra i mezzi attraversati, ha consentito di mappare con elevato dettaglio la geometria delle superfici di scivolamento principale e secondarie. In tal modo è stato anche possibile scoprire lo smembramento del corpo di frana in tre sub-corpi e di spiegare la maggiore ampiezza delle deformazioni concentrate proprio in corrispondenza della strada provinciale.

La caratterizzazione geotecnica ed il monitoraggio piezometrico e topografico hanno evidenziato una stretta dipendenza dell'evoluzione del fenomeno franoso dalle oscillazioni stagionali della falda, tale da suggerire la progettazione di trincee drenanti. Inoltre l'esecuzione di prove di laboratorio (taglio diretto, edometriche e triassiali) integrate da dati di letteratura (Sciarra N., 1988) e l'applicazione delle equazioni (11) e (12), hanno consentito la caratterizzazione meccanica e dinamica dei terreni investigati, come riassunto nelle tabelle 1 e 2:

Tabella 1. Principali caratteristiche geotecniche.

	γ_n [kN/m ³]	c' [kPa]	ϕ' [°]	ψ [°]	E' [MPa]	ν
Frana	20.4	7	28.3	0	7.1	0.38
Substrato	21.6	50	34	15	150	0.22

Tabella 2. Principali caratteristiche dinamiche.

	ρ [kN/m ³]	V_p [m/s]	V_s [m/s]	Z_p [kN/m·s]	E_d [MPa]	ν_d
Frana	20.4	700	340	14280	6067	0.34
Substrato	21.6	1800	1050	38880	59159	0.24

Le caratteristiche dinamiche pertinenti al corpo di frana riportate in tabella 2 sono da intendersi come valori medi, mentre Z_p è l'impedenza caratteristica basata sulle onde P, tale che il loro rapporto:

$$\frac{Z_{substrato}}{Z_{frana}} = \frac{38880}{14280} = 2.72 \quad (14)$$

giustifica il vantaggio di operare con metodologie basate sulla rifrazione di onde impulsive.

4.2 Considerazioni teoriche

Considerato che gli elementi stratigrafici e geotecnici a disposizione hanno condotto alla progettazione di trincee drenanti, quale metodologia di consolidamento del corpo stradale in dipendenza di un'attiva dinamica delle acque di falda, l'utilizzo delle metodologie geofisiche proposte per un efficace controllo in corso d'opera richiede una relazione matematica che leghi le variazioni di velocità di propagazione delle onde in funzione dello spazio e del tempo. Il problema è incentrato sulla constatazione che la velocità di propagazione delle onde impulsive è funzione delle caratteristiche elastiche ed inerziali dei mezzi, come dettato dalle equazioni (5.1) e (13), mentre nel contempo la densità dei terreni è dipendente dalle condizioni di saturazione e dalle relazioni quantitative tra lo scheletro solido e l'indice dei vuoti, oltre che essere funzione, generalmente lineare, della profondità. Quest'ultima constatazione, utilizzata quale elemento fondamentale per la proposizione dell'algoritmo di cui alla figura 4, comporta anche che gli impulsi generati artificialmente in superficie non si propagano secondo onde sferiche, quanto piuttosto secondo onde ellittiche, con l'asse maggiore verticale parallelo all'asse z.

Poiché, inoltre, l'esecuzione di trincee drenanti impone lo sviluppo di un processo di consolidazione in funzione dell'instaurarsi di condizioni di flusso transitorio, ne deriva che la velocità deve essere necessariamente considerata una funzione composta.

Ciò implica quindi che, per un mezzo trasversalmente isotropo soggetto a consolidazione, l'equazione di continuità assuma la forma di:

$$K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{(1+e)} \left[S \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial S}{\partial t} \right] \quad (15)$$

nella quale il primo termine denota una portata transitoria, mentre il secondo termine la consolidazione o il rigonfiamento, chiaramente dipendente dalla saturazione S e dall'indice dei vuoti e . Ma, considerato che la densità può essere espressa come:

$$\rho = (1-n) \cdot \gamma_s + (n \cdot \gamma_w \cdot S) \quad (16)$$

ne deduciamo che la stessa è funzione di:

$$\rho = \rho(z, e, S, t) \quad (17)$$

Inoltre, considerando la dipendenza di V da ρ , deduciamo anche che:

$$V = V(x, z, e, S, t) \quad (18)$$

Una possibile equazione che rappresenti parzialmente la dipendenza espressa dalla (18), può assumere la seguente forma:

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = V_x^2 \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} + V_z^2 \frac{\partial^2 \chi}{\partial z^2} \quad (19)$$

la cui soluzione può essere del tipo:

$$\chi_{(x,z,t)} = A \cos(kx + \delta) \cos(kz + \delta) \sin(\omega t + f) \quad (20)$$

dalla quale, con qualche manipolazione matematica, otteniamo:

$$V_x^2 + V_z^2 = \frac{\omega^2}{k^2} \quad (21)$$

Per le considerazioni fin qui espresse abbiamo la condizione che:

$$V_z \geq V_x \Rightarrow V_z = m \cdot V_x, \forall (m \geq 1), m \in \mathfrak{R}^+ \quad (22)$$

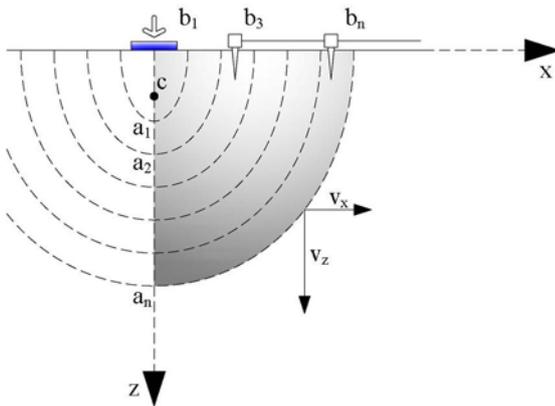


Figura 7. Modalità di propagazione di onde ellittiche.

Quindi, ponendo $\omega^2/k^2 = a^2$ nell'eq. (21) e dividendo tutto per a otteniamo l'equazione di una ellisse:

$$\frac{V_z^2}{a^2} + \frac{m \cdot V_x^2}{a^2} = 1 \quad (23.1)$$

$$\frac{V_z^2}{a^2} + \frac{V_x^2}{b^2} = 1 \quad (23.2)$$

a dimostrazione delle ipotesi iniziali. In particolare abbiamo che $a^2 > b^2$, con $\pm a^{1/2}$ e $\pm b^{1/2}$ che rappresentano i punti di intersezione dell'ellisse con gli assi cartesiani e $c = \pm[(a^2 - b^2)^{1/2}, 0]$ che invece individua le coordinate dei fuochi (figura 7).

Lo scopo fondamentale del monitoraggio, mediante geofisica, consiste nel relazionare la variazione del profilo di velocità del sottosuolo con le condizioni di efficienza puntuale delle trincee drenanti, queste ultime dipendenti quindi dalla posizione e dal tempo (Desideri et al., 1997). Occorre pertanto impostare una equazione che esprima tale relazione di dipendenza. Se assimiliamo il terreno ad un sistema trifase ipotizzato come un mezzo continuo, è necessario considerare la presenza di tre continui che occupano la stessa regione di spazio e che interagiscono spartendosi la propagazione di un impulso. Possiamo comunque semplificare il fenomeno considerando la propagazione di tre onde disaccoppiate, provenienti dal medesimo impulso, attraverso lo scheletro solido (s), l'acqua (w) e l'aria (a) contenuta nei pori:

$$V_{(z,t)} = \left[(1 - n_{(z,t)}) \sqrt{\frac{E_t}{\rho_t}}(kz) \right] + \left[n_{(z,t)} \cdot S_{(z,t)} \sqrt{\frac{K_w}{\rho_w}} \right] + \left[n_{(z,t)} (1 - S_{(z,t)}) \sqrt{\frac{K_a}{\rho_a}} \right] \quad (24)$$

nella quale E e K indicano i moduli elastici e volumetrici, mentre il termine (kz) una possibile relazione lineare con la profondità. Considerando note le velocità nell'acqua ($V_w = 1500$ m/s) e nell'aria ($V_a = 340$ m/s), l'eq. (24) si trasforma nella seguente forma:

$$v_{(z,t)} = \left[(1 - n_{(z,t)}) \sqrt{\frac{E_t}{\rho_t}}(kz) \right] + \left[n_{(z,t)} \cdot S_{(z,t)} \cdot V_w \right] + \left[n_{(z,t)} (1 - S_{(z,t)}) \cdot V_a \right] \quad (25)$$

A questo punto la soluzione può finalmente essere ottenuta risolvendo in serie le equazioni (15), (25) e (21). In altre parole possiamo simulare l'andamento nel tempo e nello spazio del processo di consolidazione, per poi introdurre la variazione delle condizioni di saturazione e di porosità nelle successive equazioni, pervenendo al profilo di velocità di riferimento del sottosuolo. Pertanto, l'esecuzione di prospezioni sismiche a rifrazione e di indagini vibrometriche consente di poter valutare sia quantitativamente che qualitativamente la condizioni di efficienza delle trincee drenanti, in relazione alle variazioni delle velocità e in funzione della relazione di dispersione.

Nel caso in discussione, considerando un indice dei vuoti dei terreni in frana $e = 0.759$, una porosità $n = 43.1\%$ ed un grado di saturazione $S = 98\%$, imponendo che l'efficienza finale raggiunga il valore dell'80%, si ha

che la saturazione finale sarà $S_f = 0.196$ mentre la velocità varierà come mostrato nella figura 8.

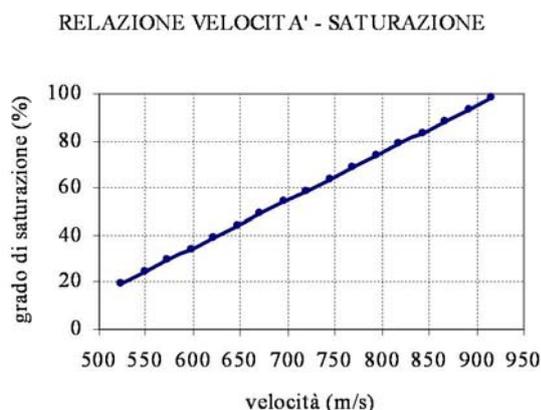


Figura 8. Grafico relativo alla variazione di velocità in funzione del grado di saturazione, per un assegnato valore di densità.

5 CONCLUSIONI

Le prospezioni basate sulla generazione di onde sismiche sono precedenti al 1910 ma fu solo verso il 1925 che esse assunsero un ruolo essenziale nella geofisica applicata allo studio del sottosuolo ed alle indagini geotecniche (Sankar et al., 2000) altresì definite come “piccola ingegneria”. Addirittura durante la prima guerra mondiale le metodologie basate sulla sismica a rifrazione furono utilizzate dai tedeschi per l’individuazione dei mortai nemici. E in circa un secolo di evoluzione l’elemento ritenuto essenziale, l’individuazione dei tempi di primo arrivo, non è mai stato messo in discussione.

È stato pertanto eseguito un riesame delle condizioni base che sottendono l’uso della sismica a rifrazione, seguito dalla presentazione di un algoritmo in originale che tiene conto di diversi fattori e che consente di fatto una miglior risoluzione della geometria e dei profili di velocità del sottosuolo.

Infine è stato presentato un caso di studio nel quale è enfatizzato l’utilizzo della sismica a rifrazione e di metodi vibrometrici nel monitoraggio e nei controlli in corso d’opera, constatato che qualunque operazione comporta la variazione delle proprietà inerziali ed elastiche delle terre. E in tal modo è possibile anche analizzare la validità dei modelli geotecnici di calcolo utilizzati.

Ciò ha richiesto l’analisi della propagazione degli impulsi in mezzi trasversalmente isotropi, caratterizzati da incremento di densità con la profondità e da variazioni nel tempo, conducendo all’ipotesi di onde ellittiche. Infine è stata ricavata una equazione che lega la variazione della saturazione con il profilo di velocità, utile nel caso di esecuzione di trincee drenanti.

BIBLIOGRAFIA

- Boschi E., Dragoni M., 2000. *Sismologia*. UTET, Torino (Italy).
- Carrara E., Rampolla A., Roberti N., 1999. *Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici*. Liguori Editore, Napoli (Italy).
- Desideri A., Miliziano S., Rampello S., 1997. *Drenaggi a gravità per la stabilizzazione dei pendii*. HEVELIUS EDIZIONI srl, Benevento.
- Di Francesco R., Labagnara R., Siena M., 2003. *Il ruolo della sismica a rifrazione nelle indagini geognostiche: alcune case histories basate su un nuovo modello interpretativo*. 1° Convegno Nazionale di Geologia Applicata e Ambientale, Università di Chieti (Italy).
- Palmer D., 1980. *The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation*. Burke K.B.S. Ed., S.E.G., USA.
- Sankar K. N., Hari P. P., Shamsuddin S., 2000. *Geophysical Prospecting for Groundwater*. A.A. Balkema, Rotterdam (Netherlands).
- Sciarra N., 1988. *Geologia e geotecnica di argille consistenti del Pliocene abruzzese*. Boll. Soc. Geol. It., 107.
- Serra P., Tinti S., 1984. *Complementi di Fisica 1*. Zanichelli Editore Spa, Bologna (Italy).
- Siena M., Di Francesco R., Di Biagio A., Valente A., 2005. *Considerazioni sui tempi di primo arrivo nell’utilizzo della sismica a rifrazione: alcune case histories nell’ambito della progettazione stradale*. XXIV Convegno Nazionale Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida – CNR, Roma (Italy).

ABSTRACT

THE ROLE OF THE GEOPHYSICS IN THE GEOTECHNICAL DESIGN AND IN THE CONTROL DURING THE WORK.

Keywords: refraction shooting, vibrometric inquiries, algorithm, elliptic waves

Geotechnics is a any complex and wide subject and dealing with topics such as mechanic and dynamic of soil and soil-structure interaction, demands a lot of information. Using the informatic terminology, geotechnics can be considered as an “algorithm of transformation”, that is particularly sensitive to data of input both in quantity and in quality. Methodologies of indirect investigation of subsoil such as refraction shooting and the vibrometric inquiries permit to improve the quantity of input signals according to some particular aspect that, on the basis of algorithm developed by the authors, can be summed up to same essential points: a) accuracy of results; b) speediness of execution; c) control during the work; d) economic prices. After introducing the algorithm of calculus, a case history illustrating what has been pointed out, concerning the reconstruction of geometry of a landslide regarding a local street as well as a control during the work of the validity of the work of consolidation, is shown in present memory.