

L'individuazione di anomalie nel substrato di imposta della diga in terra sul torrente Astrone (Siena) e possibili cause del cedimento del rilevato

Gianfranco Censini¹, Vittorio D'Oriano², Giuliano Gabbani³, Alessandro Ronconi³

¹Georisorse Italia, Sinalunga (Si), info@georisorse.it

²Studio Tecnico di Geologia (STG), Firenze, stga@libero.it

³Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, giga@geo.unifi.it

Determination of earth dam sill anomalies, located on Astrone stream (Siena) and possible causes of embankment settlement

ABSTRACT: The dam on Astrone stream, where in 1970 occurred a minor instability located on the right bank, has been the object of our search in order that the reason of partial settlement of earthfill was found out. In 1997 and 2000 were executed geognostic analysis, topographic survey on earth complex, storage and surrounding structures. All fissuring meters fit in control room well, 5 soundings anchor to bedrock, laboratory test and monitoring with inclinometers and piezometers shown a slight settlement of embankment. In October 2004, a stability control of downstream side is carried out where more inclinometers, piezometers and extensimeters were installed within boreholes. Measurements are carried on all 2005 with execution of two refraction seismic profiles (P and S waves) that allows to characterize sill morphology. Geophysical survey underlined that, as previous investigations had defined, dam complex is homogeneous-type.

Key terms: Earth dam, Astrone, Settlements, Seismic tomography

Termini chiave: Diga in terra, Astrone, Cedimenti, Tomografia sismica

Riassunto

La diga sul torrente Astrone, interessata nel 1970 da un lieve dissesto localizzato sulla spalla destra e situata nel comune di Chianciano Terme (Siena), è stata oggetto di studio per l'individuazione delle cause del parziale cedimento del rilevato.

Nel 1997 e proseguite nel 2000, sono state effettuate analisi geognostiche, rilievi topografici del complesso diga, l'invaso e sulle opere accessorie. L'esecuzione di n° 5 sondaggi a carotaggio continuo spinti a non meno di cinque metri nel substrato; le prove di laboratorio ed il monitoraggio di un sondaggio con tubo piezometrico e di tre sondaggi con tubi inclinometrici hanno evidenziato un leggero parziale cedimento del corpo diga.

Nel mese di Ottobre 2004, si è proceduto ad una verifica di stabilità del paramento a monte della diga; con l'installazione di piezometri, inclinometri ed estensimetri nei fori di sondaggio. Le letture degli strumenti sono proseguite fino a tutto il 2005 e sono stati effettuati due profili di sismica a rifrazione (onde P ed S) che ci hanno permesso di caratterizzare la morfologia dell'imposta e del substrato.

L'indagine geofisica ha messo in evidenza come specificato anche dalle precedenti indagini, che il corpo diga è praticamente omogeneo.

1. Introduzione

Si tratta di una diga in terra (Fig. 1) di forma trapezia il cui coronamento, largo 6 m, è situato a quota 490m s.l.m.; gli atti di collaudo indicano la presenza di un nucleo centrale di tenuta di 31 m di altezza complessiva.



Fig. 1 Diga Astrone ripresa dal paramento a valle.
Astrone dam, downstream view

La diga poggia su termini litoidi, sia sulle spalle che sul fondo, costituiti prevalentemente da argilliti appartenenti

alla Formazione di S. Fiora. I due fianchi presentano inclinazioni diverse:

- Il paramento a monte è costituito da tratti a pendenza variabile, si passa progressivamente da una pendenza di 1/2 sul tratto più alto ad una di 1/5 su quello alla base. Inoltre c'è una rottura di pendenza alla quota di 480 m s.l.m. dovuta alla presenza di una banchina di materiale inerte a sostegno del paramento.
- Il paramento a valle invece mostra un profilo più dolce ed è intervallato, ogni 10 m circa, da berme larghe 4-5 m; al piede del paramento si trova un muro di 2 m di altezza, in "muratura di pietrame a secco", inoltre in prossimità della spalla destra è situato uno sfioratore laterale in calcestruzzo, che parte dal coronamento e termina al piede del paramento di valle.

La quota di massimo invaso di ritenuta è a 486 m s.l.m., mentre la quota di massimo invaso autorizzato è a 487,3 m s.l.m. (fase di massima piena) con un franco di 4 m; la capacità di invaso del lago è stimata intorno ai 3 milioni di m³.

2. Indagini geognostiche

Gli interventi della presente campagna geognostica sono stati effettuati sul corpo diga (Fig. 2), fra i mesi di Ottobre e Novembre 2004; in particolare sono stati eseguiti n° 7 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo, di cui, 4 sul coronamento (S6, S7, S9, S10); 2 sulla banchina di valle (S8, S11) e 1 sulla strada a lato dello sfioratore (S12).



Fig. 2 Sondaggi geognostici.
Geognostic soundings

Da ciascun foro di sondaggio sono stati prelevati campioni tramite campionatore a pareti sottili tipo Shelby, ed effettuate prove di laboratorio. Sono state inoltre eseguite prove SPT in foro. Successivamente sono stati installati 2 estensimetri a base lunga, 2 tubi inclinometrici e 3 piezometri tipo Casagrande. In tutti i sondaggi è stato raggiunto il substrato costituito da termini litoidi costituiti generalmente da argilliti alternate a calcari marnosi e marne molto consistenti. Dalle analisi sui campioni prelevati nei

sondaggi risulta che il rilevato è costituito da materiali a composizione litologica omogenea, prevalentemente da un limo argilloso con frequenti clasti ed elementi litoidi di natura calcarea ed arenacea. L'indice di plasticità mostra valori variabili dal 17 al 22 % (termini mediamente plastici), l'indice di consistenza medio ha valori maggiori di 1 (consistenza semisolido), quindi di materiali piuttosto compatti; la permeabilità dei campioni è molto scarsa mostrando valori di K dell'ordine di grandezza di 10⁻⁸-10⁻⁹ cm/s. Per quanto riguarda la compressibilità i campioni del rilevato sono moderatamente sovraconsolidati, mentre quelli del substrato risultano normalconsolidati.

Sul coronamento è installata una rete topografica costituita da 9 capisaldi, uno dei quali situato alla base del pozzo di accesso alla camera di manovra.

3. Monitoraggio della strumentazione

Dal monitoraggio di questa rete (dal 1989 al 2004) si può vedere come, relativamente alle variazioni di quota, i due capisaldi esterni insieme al pozzo si presentano pressoché stabili, mentre i restanti capisaldi mostrano un trend in progressivo abbassamento che ha raggiunto i 28 cm col capisaldo n° 6. Riguardo gli spostamenti trasversali si nota che i valori massimi si hanno per il cps. 2 (10.60 cm) e per il cps. P (9.40 cm) con traslazione verso monte così come il cps. 3; mentre i cps. 1, 4, 5, 7, 8 mostrano traslazione verso valle.

Come accennato in precedenza sono stati installati, nei sondaggi S6 e S7 ubicati sul coronamento, n° 3 basi estensimetriche in ciascuno alle profondità di 15, 30 e 60 m dal piano di campagna.

La misura "zero" è stata effettuata in data 19/11/04 ed i valori disponibili fino ad ora mostrano un leggero "cedimento" iniziale con una successiva risalita ed un ulteriore cedimento, anche se le misure effettuate da gennaio in poi evidenziano una sostanziale stabilità delle basi estensimetriche ad eccezione di quella posizionata nel sondaggio S7 alla profondità di 15 metri, che mostra un continuo cedimento fino ad accumulare circa 7 mm in 3 mesi.

I valori che hanno fornito gli inclinometri sono così riassumibili:

- L'inclinometro nel pozzo, ha mostrato un leggero movimento verso monte;
- I due inclinometri posizionati nei sondaggi lungo la strada hanno indicato movimenti intorno ai 15-18 mm alla profondità di 5-6 m con direzione verso Ovest Sud-Ovest;
- I tre inclinometri collocati nei sondaggi sul coronamento sono ancorati al substrato ad una profondità che va dai 22 ai 35 m dal p.c.; essi mostrano spostamenti con direzione prevalente verso Nord e Nord-Ovest che non superano i 20 mm con la sola eccezione di quello posizionato in corrispondenza della spalla destra dove la risultante dello spostamento mostra una evidente

superficie di rottura intorno alla profondità di 14 metri rispetto al piano coronamento che porta ad uno spostamento complessivo di circa 25 mm. I risultati provenienti dal monitoraggio piezometrico, hanno sempre evidenziato, per il piezometro situato sulla berma, un livello intorno ai 24-26 m di profondità, cioè esattamente in corrispondenza del contatto fra substrato litoide in posto e rilevato; non sono mai state misurate variazioni significative di tale livello. L'andamento piezometrico non sembra comunque essere assolutamente influenzato dai periodi di invaso/svaso del bacino di accumulo.

Le verifiche dei cedimenti sul rilevato e sul substrato relativamente ad un'opera con simili caratteristiche geometriche, morfologiche e litostratigrafiche portano alle seguenti conclusioni: per il rilevato nel complesso l'assestamento potrebbe ritenersi stabilizzato, tranne che sulla verticale di S7 fino alla profondità di 15 m in quanto la curva di tendenza dell'assestamento, ricavata dall'estensimetro, è rettilinea, anziché parabolica, e quindi non mostra segnali di esaurimento; per il substrato l'assestamento potrebbe ritenersi stabilizzato con i dati di S6, mentre ancora in fase di consolidazione secondaria con i dati di S9. Per quanto attiene il progressivo abbassamento del coronamento, anche se in misura diversa fra spalle e corpo diga, in via preliminare esso poteva essere ricondotto al più generale processo di consolidazione dell'intero rilevato, ma le prove effettuate tenderebbero a negare questa eventualità. Infatti, sono state effettuate verifiche dei cedimenti sia sul rilevato (consolidazione sotto il peso proprio), sia sul substrato e dai risultati di tali prove è possibile dire che per un'opera con simili caratteristiche avrebbe potuto essere previsto un cedimento complessivo di circa 130 cm (104 cm nel rilevato + 20 cm nel substrato) ed un tempo di esaurimento dello stesso di circa 25 anni. Il cedimento totale quindi avrebbe dovuto esaurirsi, considerando il 1966 come anno di completamento dell'opera, intorno al 1991, ovvero 14 anni fa.

4. Indagini geofisiche

Come riportato nella planimetria di Fig. 3, nel Novembre del 2005 è stato effettuato anche un profilo sismico a rifrazione, ubicato sullo sbarramento per uno sviluppo complessivo di 240 m; il profilo parte dalla sponda destra, circa 30 metri oltre il limite dell'opera e raggiunge la sponda sinistra, circa 10 m oltre il limite del canale sfioratore. Fino a metà del profilo il tracciato coincide con la sommità dell'argine, nella seconda metà la direzione è stata ruotata di circa 15 gradi in modo da evitare la zona dove si trova l'opera in calcestruzzo del canale sfioratore. Le operazioni di acquisizione dati sono state eseguite mediante il sismografo OYO McSeis SX a 24 canali in grado di acquisire le informazioni con dinamica a 18 bit e memorizzare i dati in files formato SEG-2. Il profilo è stato esplorato in due tranches di 120 m ciascuna, con geofoni a

cadenza di 5 m ed alcuni punti di tiro, ubicati nella parte centrale sono stati utilizzati per entrambe le stese in modo da ricostruire, per questi punti di tiro, sismogrammi fino a 48 canali.

Per l'acquisizione con onde P sono stati utilizzati geofoni verticali OYO a 10 Hz e le vibrazioni sono state generate mediante l'impatto di una mazza di 11 kg su di una piastra in teflon appoggiata al terreno. Per l'acquisizione con onde SH sono stati utilizzati geofoni orizzontali OYO a 10 Hz; le vibrazioni sono state generate mediante l'impatto orizzontale di un pendolo di 20 kg (Fig. 4) ai lati di un'asse di legno appoggiato al terreno, zavorrato dal peso di un'autovettura, ove accessibile, oppure dal peso di due o più operatori. In questo tipo di acquisizione è stata effettuata l'inversione della polarità dei segnali generati (battendo da entrambi i lati dell'asse) e l'acquisizione con polarità invertita dei geofoni al fine di annullare l'eventuale componente di compressione (onda P) generata ed enfatizzare la componente orizzontale. Le operazioni di acquisizione sono state effettuate in accordo con le Istruzioni tecniche per le indagini geologico - tecniche, indagini geofisiche e geotecniche diramate dal Servizio Sismico regionale della Regione Toscana (Ferrini et Alii, 2003).



Fig. 4 Energizzazione trasversale con pendolo ad impatto orizzontale (Onde S)
Transversal powered (S waves)

I dati acquisiti sono stati processati con due differenti softwares al fine di ricostruire le sezioni tomografiche relative alle velocità delle onde P e delle onde SH; in particolare, per il picking degli istanti di primo arrivo delle vibrazioni generate nei vari punti di tiro ai vari geofoni è stato utilizzato il software REFLEX che permette tutte le operazioni di filtraggio e di signal enhancement, utili alla migliore individuazione dell'istante di arrivo dei segnali. Questo software porta a ricostruire le dromocroni per tutti i punti di tiro assemblando anche i sismogrammi differenti acquisiti per le due tranches del profilo con punti di tiro in comune. Nelle Fig. 5a ed 5b si possono osservare due

esempi di sismogrammi a 48 canali, ottenuti assemblando due differenti registrazioni di 24 canali ciascuna relativa allo stesso punto di tiro.

I dati del picking dei primi arrivi sono stati inseriti, insieme alle informazioni topografiche dei vari punti di posizionamento dei geofoni e dei tiri, in specifici files di input per il software di ricostruzione tomografica RAYFRACT (Rowdewahl, 2003) che porta alla rappresentazione della evoluzione della velocità sismica (per le onde P o per le onde SH) nel sottosuolo. Questa elaborazione avviene in almeno due fasi successive: una prima elaborazione porta alla ricostruzione delle stratigrafie di velocità sismica con la tecnica Delta-t-V, cioè si ricostruiscono con cadenza pari alla metà della cadenza dei geofoni (CMP = Common Mid Point) le successioni di velocità compatibili con l'andamento di tutte le possibili dromocroni nei punti intermedi tra punto di tiro e geofono.

Dal modello ricostruito come successione di stratigrafie di resistività viene elaborato un modello ad elementi finiti di piccolissime dimensioni (ordine di grandezza di qualche decimetro di lato) che può già rappresentare un attendibile

modello del sottosuolo. Tuttavia questo rappresenta una prima approssimazione alla soluzione.

Il passo successivo è quello di ottimizzare, in maniera iterativa, il suddetto modello di partenza mediante la tecnica WET (Wavepath Eikonal Traveltime). In pratica si effettua il calcolo delle differenze dei tempi di arrivo dai vari punti di tiro ai vari geofoni, tra i valori sperimentali misurati nei sismogrammi ed i tempi calcolati sul modello di partenza. In base alle differenze riscontrate, per ciascun percorso delle onde sismiche, si apportano modifiche, in aumento o in diminuzione, delle velocità che caratterizzano i vari elementi che sono stati interessati dal passaggio del fronte d'onda considerato.

Ad ogni iterazione, dopo avere apportato le modifiche alle velocità dei vari elementi, il nuovo modello viene sottoposto ad una operazione di smoothing che porta ad una migliore omogeneità dei valori di velocità entro aree di dimensioni maggiori. In genere sono sufficienti da 10 a 20 iterazioni per giungere ad un modello che porta a scarti medi tra i tempi (Traveltime) dei vari percorsi dell'ordine di qualche millisecondo (Schuster & Quintus-Bosz, 1999).

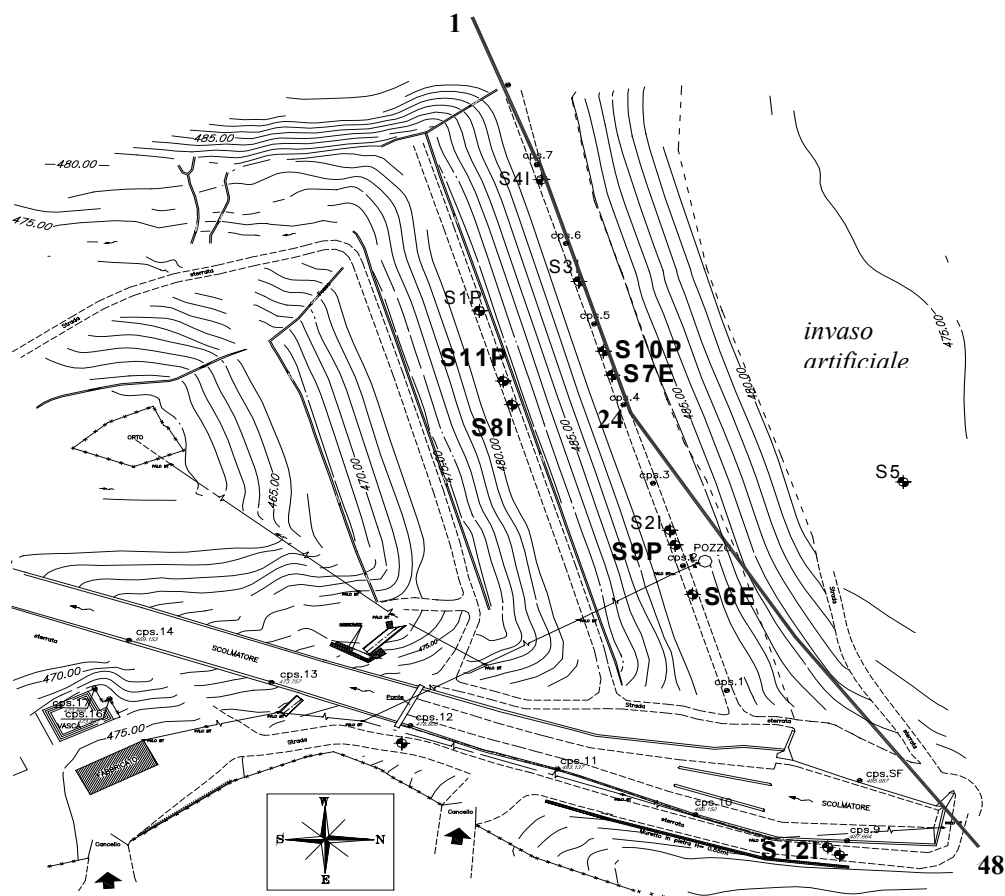


Fig. 3 Planimetria della diga con l'ubicazione dello stendimento (Z-Z') e dei sondaggi (S) nei quali sono stati installati inclinometri (I), piezometri (P) ed estensimetri (E).

Dam planimetry with geophones and soundings location

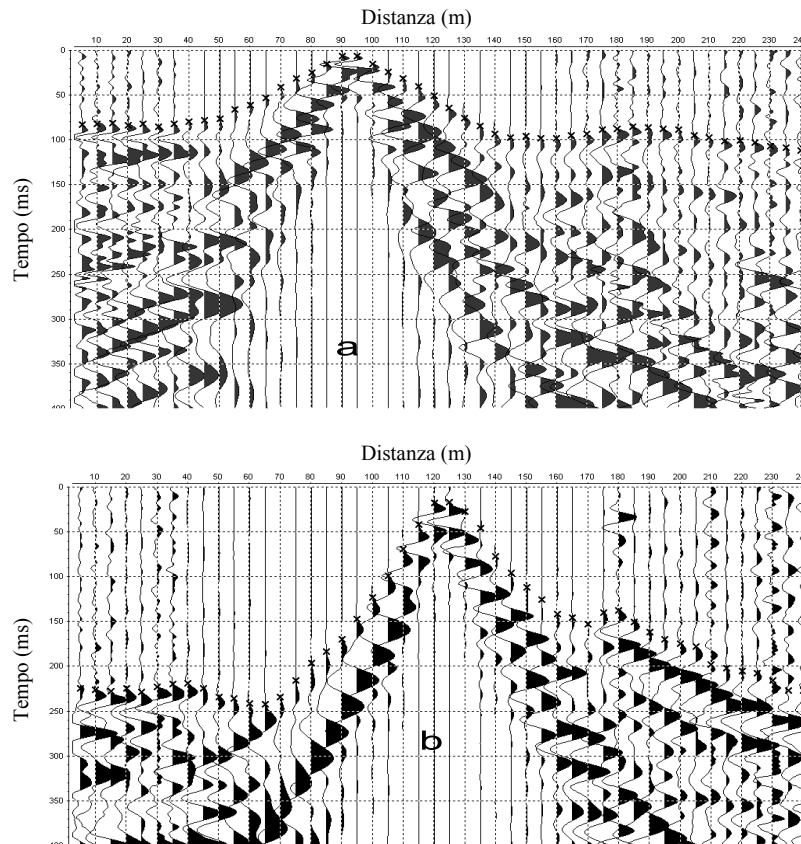


Fig. 5 Sismogrammi su 48 canali (*a* onde P, *b* onde S)
 48 channels seismograms (*a* P waves, *b* S waves)

5. Tomografia Sismica ed interpretazione dei dati

Con le modalità suddette sono state ottenute le tomografie relative alla velocità delle onde P (Fig. 6a) ed alla velocità delle onde SH (Fig. 6b), in particolare per quanto riguarda le onde P si può sottolineare che uno strato con velocità inferiore ad 800 m/s, corrispondente alla parte di argine non saturo ed allo strato areato naturalmente presente anche sui fianchi, presenta uno spessore massimo di circa 20 m nella zona centrale dello sbarramento con una evidente inflessione verso il basso nella zona prossima alla camera di manovra.

Il passaggio al substrato costituito dai materiali compatti in posto, caratterizzato da velocità sismiche superiori a 2200-2400 m/s, come riscontrato in contesti litologici simili, avviene a profondità che nel centro dello sbarramento sono di oltre 40 m con una chiara asimmetria tra la sponda destra, dove l'aumento è graduale, e la sponda sinistra dove si ha una netta inversione della velocità nella zona sottostante il canale scolmatore con una zona di allentamento che presenta un modesto trend di immersione verso Est.

La zona intermedia di transizione tra lo strato superficiale areato ed il substrato può corrispondere sia alla parte di rilevato artificiale in cui la saturazione del terreno è

totale, sia alla parte allentata del substrato; proprio la zona con inversione di velocità che è stata prima indicata rientra sicuramente in questa seconda ipotesi e potrebbe indicare la zona di allentamento che provocò, anni addietro fenomeni di dissesto del canale sfioratore.

Nella tomografia della velocità con onde SH la situazione appare in generale in linea con quanto indicato per le onde P, in particolare: uno strato con VSH inferiore a 400 m/s, indicativo di una scarsa compattezza del materiale costituente il rilevato presenta un massimo spessore nella zona prossima alla sponda destra, mentre risulta notevolmente assottigliato verso la sponda sinistra. È interessante notare che la zona dove si ha il massimo spessore di questo strato coincide con quella dove si sono verificati i maggiori cedimenti dell'argine (Caposaldo 6 = Geofono 16) e, pertanto conferma che vi è un materiale con scadenti caratteristiche geotecniche.

Il bedrock, come in altri contesti litologicamente simili, lo si può delimitare con l'andamento della linea di isovelocità di 800 m/s, in questo caso il parallelismo con l'andamento delle tomografie in onde P è valido nella zona della sponda destra mentre nella sponda sinistra la profondità di questa discontinuità tende a coincidere con la base della zona di inversione di velocità evidenziata oltre i

geofoni 34-36, evidenza questa che la parte di formazione affiorante nella sponda sinistra, pur appartenente litologicamente al substrato, presenta una accentuata

alterazione in situ, evidenziata dalle onde P con una zona di inversione di velocità, ma più chiaramente con le onde SH (Lecomte et alii, 2000).

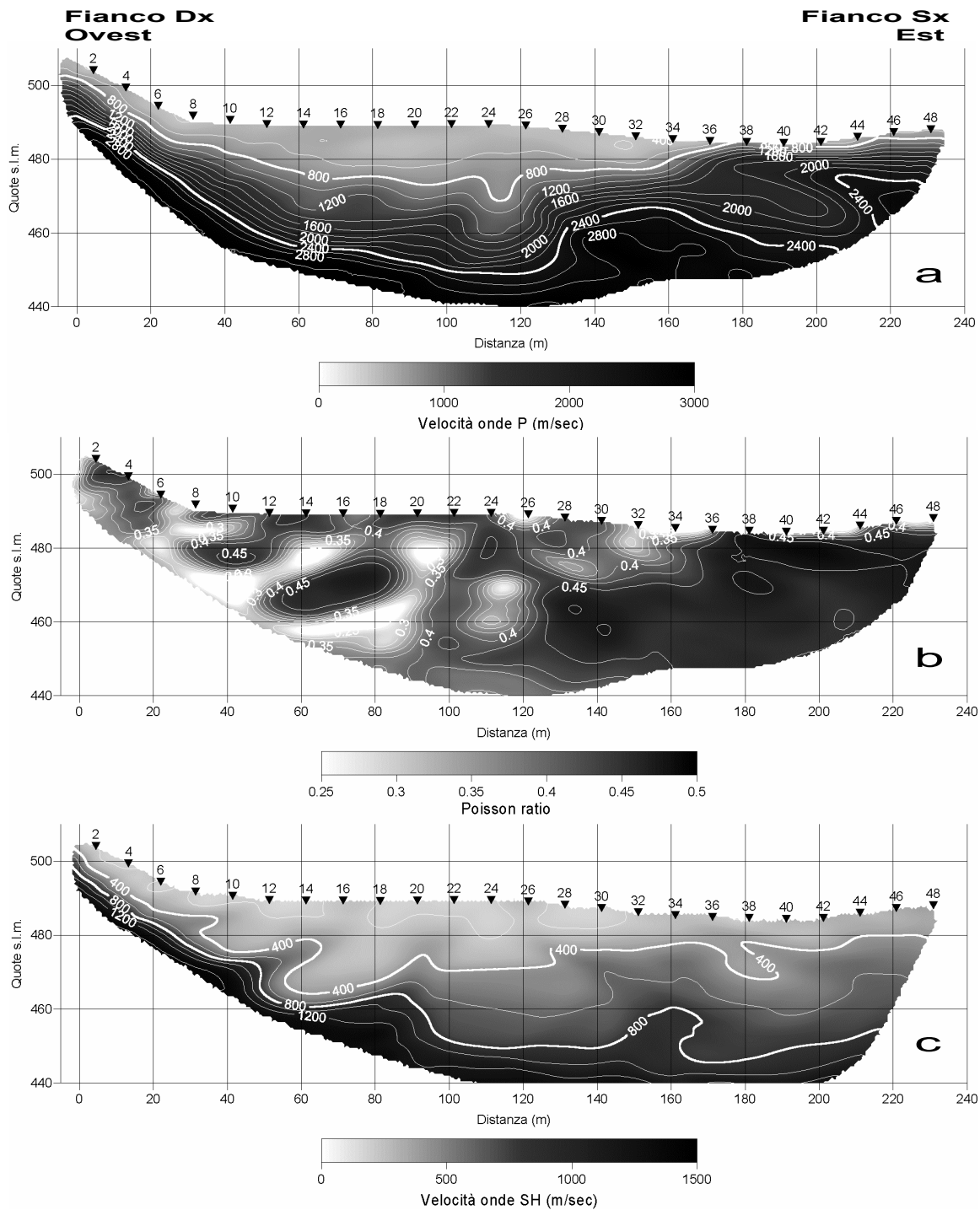


Fig. 6 Tomografie ottenute dall'interpolazione di onde P (a), rapporto di Poisson (b) e onde S (c)
Tomographic profiles from interpolation of P waves (a), Poisson ratio (b) and S waves (c)

Anche in questo caso la parte di sottosuolo compresa tra la isovelocità 400 ed 800 m/s si deve considerare come la

fascia di transizione tra la parte via via più compatta dell'argine artificiale e la parte alterata in situ del substrato.

Dalle due tomografie di velocità sismica delle onde P e delle onde SH, con il semplice calcolo per ogni singolo elemento finito in cui è stata suddivisa la tomografia si è ottenuta la tomografia relativa al rapporto di Poisson (Poisson ratio) che indica lo stato di rigidità dinamica del materiale, valori prossimi a 0.5 sono indicativi di materiali molto deformabili (sedimenti limo-argillosi recenti) mentre valori bassi, fino a 0.25, indicano materiali più rigidi ed elastici (formazioni litoidi o sedimenti molto compatti e cementati).

Nella tomografia di Fig. 6 si possono evidenziare varie zone con caratteristiche differenti: la sponda destra dove i valori oscillano intorno a 0.35 e suggeriscono la presenza della formazione di Santa Fiora con una buona compattezza derivante anche, probabilmente, da una elevata densità dei livelli litoidi calcarei. La zona con valori del rapporto di Poisson prossimi a 0.25 si sviluppa anche al di sotto dell'argine. La parte ovest del corpo diga (fianco destro), tra i geofoni 10 e 26: questa porzione di tomografia presenta una marcata variabilità dei valori che oscillano tra quelli tipici dei depositi argillo-sabbiosi (0.45-0.48) a quelli degli elementi litoidi, quindi si può ipotizzare che in questa zona vi sia una maggiore eterogeneità dei materiali che costituiscono il rilevato, eterogeneità che può essere indizio di una minore cura nel prelievo dei materiali da cui è derivato un maggiore assestamento dell'opera nell'insieme.

La parte Est del rilevato: anche in questo tratto del corpo diga si hanno valori oscillanti tra 0.35 e 0.4 ma si nota una minore variabilità rispetto alla zona Ovest, questa situazione è in accordo con un minore assestamento dell'insieme. Il

substrato del fianco sinistro e la sponda sinistra (lato Est): in tutta questa zona i valori sono pressoché costanti intorno a 0.45 e sono indice di omogeneità litologica su termini meno rigidi rispetto alla situazione presente sul fianco Ovest (sponda destra).

6. Conclusioni

In conclusione le informazioni ottenute sia dalle indagini dirette che da quelle indirette riguardo il rilevato e il terreno di fondazione, portano a considerare il corpo diga di tipo omogeneo sebbene siano presenti situazioni di locale disomogeneità nella parte Ovest del rilevato che, probabilmente hanno portato ad un maggiore assestamento per la presenza di materiali meno compatti fino a circa 20 m nella zona del Caposaldo 6. Inoltre si può segnalare la presenza di una situazione di maggiore alterazione ed allentamento in situ del substrato nella zona Est (fianco sinistro) che, seppur omogeneo presenta una zona di allentamento fino a profondità di circa 20 m nella zona sottostante il canale sfioratore.

Per cui si può affermare, alla luce delle recenti analisi geofisiche, che i cedimenti riscontrati nel rilevato possono essere imputabili al fatto che il rilevato è stato eseguito intorno alla soglia naturale presente nel fondovalle del torrente Astrone sfruttandola come nucleo e che in secondo luogo il riempimento ha di conseguenza seguito la morfologia dovuta all'incisione del torrente stesso subendo un costipamento differenziale.

Bibliografia

- Ferrini M. et Alii, 2003. Istruzioni tecniche per le indagini geologiche-tecniche, indagini geofisiche e geotecniche, statiche e dinamiche, finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici della Toscana Regione Toscana. Direzione generale delle politiche territoriali e ambientali. Servizio sismico regionale. Firenze.
- Lecomte I., Gjøystdal H., Dahle A., Pedersen O. C., 2000. Improving modelling and inversion in refraction seismics with a first-order Eikonal solver. *Geophysical Prospecting*, Vol. 48 Issue 3.
- Rowdewahl S., 2003. Manual for the software RAYFRACT, Intelligent Resources Inc.
- Schuster, G. T., Quintus-Bosz A., 1999. Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. *Geophysics* v. 58, 1314-1323.