

Approcci semplificati per l'interpretazione delle misure in dighe in terra

Enzo Massimiliano Fontanella,* Luca Pagano**

Sommario

L'articolo descrive i principali modelli di tipo semplificato disponibili per l'interpretazione delle misure realizzate su dighe in terra. Si discute il contributo che ciascuna grandezza fisica, tra quelle tipicamente osservate sulle dighe in terra (tensioni totali, pressioni interstiziali, portate filtranti, spostamenti), può dare alla caratterizzazione del comportamento meccanico della diga, analizzandone, inoltre, il grado di affidabilità e la rappresentatività.

Alcuni schemi comportamentali sono derivati dalla conoscenza delle soluzioni di problemi al contorno tipici (flussi piani in regime stazionario o transitorio; sovrappressioni interstiziali indotte in condizioni non drenate dall'incremento delle tensioni totali; processi di consolidazione monodimensionali o piani). Altri da soluzioni di problemi al contorno che semplificano notevolmente la realtà o da soluzioni di modelli complessi, sintetizzate organicamente in opportune rappresentazioni. L'articolo organizza in forma disgiunta l'esame delle diverse categorie di misura. Mostra tuttavia progressivamente come, per l'interpretazione del comportamento meccanico e idraulico della diga, sia opportuna ed efficace un'interpretazione congiunta di tutte le misure disponibili.

1. Introduzione

La quota di ubicazione, l'altezza dello sbarramento e il volume del bacino possono rendere significativa l'energia potenziale immagazzinata dalla diga. La possibilità che tale energia, in caso di collasso dell'opera, possa trasformarsi rapidamente in energia cinetica e distruggere gli insediamenti posti a valle determina livelli di rischio considerevoli, tali da richiedere particolari accorgimenti nelle attività di controllo della sicurezza della diga.

Il monitoraggio della diga e l'interpretazione delle osservazioni hanno come scopo principale il controllo del comportamento meccanico dell'opera e l'individuazione tempestiva dei fenomeni che potrebbero condurre la sezione di sbarramento al collasso [JAPPELLI, 2003]. Le stesse attività consentono poi anche di esaminare l'efficienza idraulica dello sbarramento.

Fenomeni d'instabilità globale e processi di erosione dell'elemento di tenuta costituiscono le due categorie di fenomeni più temuti. Il loro innesco può essere individuato attraverso l'interpretazione delle misure di tensione totale, di deformazione, di pressione interstiziale, di portata filtrante e di spostamento.

Interpretare una misura significa definire i fenomeni che ne hanno condizionato l'evoluzione e/o la distribuzione e caratterizzare eventuali possibili corre-

lazioni con altre grandezze fisiche note. Ad esempio (Fig. 1) durante l'esercizio di una diga la quota piezometrica misurata in un punto del nucleo è influenzata dal livello d'invaso, ma nelle prime fasi post-costruttive è significativa anche l'influenza del processo di dissipazione delle sovrappressioni interstiziali prodotte dalla costruzione dell'opera. Nelle fasi di esercizio avanzato la correlazione tra livelli d'invaso e quote piezometriche può essere interpretata modellando nelle ipotesi di flusso piano e stazionario il processo di filtrazione che si sviluppa nella diga. Nelle fasi che seguono la costruzione le evoluzioni di quota piezometrica possono invece essere spiegate modellando il processo di consolidazione attivato dalla fase costruttiva.

Interpretare le misure relative ad un'assegnata grandezza fisica significa dunque verificare che le osservazioni risultino congruenti, sotto il profilo qualitativo e, possibilmente, quantitativo, con le previsioni fornite da modelli. Esprimendo un giudizio critico sul confronto tra il dato sperimentale e un comportamento atteso si cerca di caratterizzare la relazione tra le misure e le condizioni al contorno, nonché le relazioni che sussistono tra le diverse grandezze fisiche (ad esempio, quote piezometriche e cedimenti).

I modelli di riferimento possono essere di tipo semplificato; possono cioè essere degli schemi comportamentali derivati dalla conoscenza delle soluzioni di più semplici problemi al contorno noti in letteratura (flussi piani in regime stazionario o transitorio; sovrappressioni interstiziali indotte dall'incremento delle tensioni totali; processi di consolidazione monodimensionali o piani). Oppure possono

* Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza"

** Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale, Università di Napoli Federico II

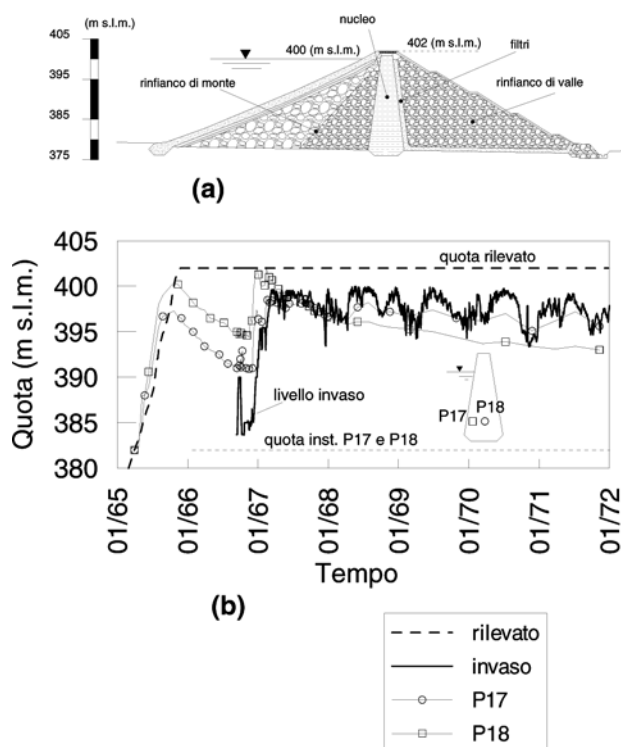


Fig. 1 – Diga di Polverina: (a) Sezione tipo; (b) quote piezometriche misurate del nucleo della diga di Polverina durante la fase costruttiva e le prime fasi dell'esercizio [PAGANO *et al.*, 2006, modificata].

Fig. 1 – Polverina Dam: (a) Main cross section; (b) piezometric heads measured in the core during construction and impoundings [PAGANO *et al.*, 2006, modified].

derivare dalla soluzione del problema al finito schematizzato con forti ipotesi esemplificative, tali da assicurare soluzioni in forma chiusa.

I modelli di riferimento possono, in alternativa, consistere in approcci avanzati, che considerano la maggior parte dei fattori condizionanti attraverso modellazioni matematiche e numeriche complesse del problema al finito.

A volte le soluzioni di questi modelli complessi, sintetizzate organicamente in opportune rappresentazioni, permettono di definire ancora una volta modelli interpretativi di tipo semplificato.

I modelli semplificati svolgono un ruolo chiave in qualsivoglia processo interpretativo. Indicano quali sono le forme più efficaci nelle quali organizzare e rappresentare le misure; individuano qualitativamente molti dei fattori che hanno condizionato il comportamento dell'opera; stimolano dubbi e interrogativi sulle misure che presentano delle anomalie, suggerendo quando sia necessario il ricorso ad approcci di tipo avanzato; guidano infine nella selezione degli ingredienti che il modello di tipo avanzato deve contenere affinché sia in grado di riprodurre il comportamento osservato.

Nell'ambito del Progetto PRIN2005 "Monitoraggio e valutazione della sicurezza nelle dighe in terra e negli argini fluviali", le unità di Roma e Napoli hanno svolto un lavoro di sintesi organica dei modelli semplificati utilizzabili per l'interpretazione preliminare delle misure realizzate nelle dighe in terra.

Dopo aver raccolto i più comuni schemi proposti dalla letteratura, l'esame di dettaglio delle misure di alcune dighe in terra ha consentito di controllare l'efficacia degli strumenti interpretativi esistenti e di elaborare nuovi modelli semplificati.

Le variazioni di spostamenti, tensioni totali, quote piezometriche, portate filtranti dipendono fortemente dalle condizioni al contorno meccaniche e idrauliche che si susseguono durante la fase costruttiva e l'esercizio. La figura 1 mostra come, nella fase costruttiva, la principale causa delle variazioni delle grandezze assunte sia il peso proprio, mentre nelle fasi di esercizio sia il livello di invaso e la sua oscillazione temporale.

I valori assunti dalle grandezze misurate (grandezze "effetto") dipendono però anche da molti altri fattori (grandezze "causa") come, ad esempio, la geometria dell'opera, le caratteristiche meccaniche e idrauliche dei materiali che la costituiscono, il tempo.

Gli schemi interpretativi che cercano di stabilire correlazioni qualitative e quantitative tra grandezze "causa" e grandezze "effetto" sono dunque associati a rappresentazioni nelle quali compaiono entrambe. Per questi motivi le misure verranno rappresentate in grafici che le legano ai seguenti fattori:

- a - carico da peso proprio
- b - oscillazioni del livello di invaso
- c - elementi di geometria dell'opera
- d - tempo

Nell'esame dei modelli l'articolo è organizzato per categoria di misura ed esamina, nell'ordine, le misure di tensioni totali, di pressioni interstiziali, di portate filtranti e di spostamenti.

2. Tensioni totali

Nel controllo delle condizioni di sicurezza del nucleo di una diga zonata si ritiene che particolari condizioni assunte dagli stati tensionali consentano la formazione di fratture o la propagazione di fratture pre-esistenti. La "fratturazione idraulica" può poi rappresentare la causa d'innescio di pericolosi fenomeni erosivi all'interno dell'elemento di tenuta. È infatti supportata sperimentalmente e teoricamente [SHERARD, 1986; DOUNIAS *et al.*, 2006; JAWORSKI *et al.*, 1981; FONTANELLA, 2006] la tesi che le fratture si innescino o si propagano quando, ad una assegnata quota, la tensione totale principale minima assume valori ridotti, prossimi a quelli che alla medesima quota assume la pressione dell'acqua nell'invaso.

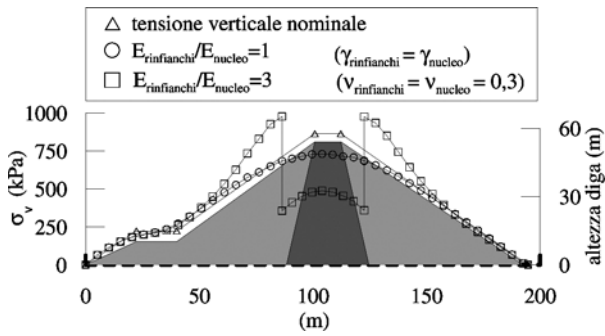


Fig. 2 – Diga di Beliche: distribuzioni teoriche delle tensioni verticali totali lungo un piano orizzontale (linea tratteggiata).

Fig. 2 –Beliche Dam: vertical total stress computed along a horizontal plane (dashed line).

Per tali motivi le misure delle tensioni totali assumono una particolare importanza. Nelle dighe zonate la differente rigidità dei materiali costituenti il nucleo e i fianchi produce distribuzioni non omogenee delle tensioni verticali. Il fenomeno, noto come effetto arco, porta a una riduzione delle tensioni nel nucleo e ad un incremento nei fianchi.

A titolo esemplificativo in figura 2 sono riportate tre distribuzioni delle tensioni verticali totali ricavate teoricamente lungo una sezione orizzontale. La distribuzione ottenuta immaginando la diga costituita da un mezzo monofase, omogeneo, a comportamento elastico lineare, ha un andamento continuo ed è molto simile alla distribuzione della tensione verticale nominale (la tensione corrispondente al peso della colonna di materiale sovrastante). Con la geometria della figura 2, anche un modesto incremento della rigidità dei fianchi rispetto a quella del nucleo è in grado invece di produrre una distribuzione della tensione verticale marcatamente discontinua con incremento delle tensioni nei fianchi e riduzione nel nucleo.

Una prima interpretazione delle misure di tensione totale verticale può essere ottenuta dalla diagrammazione delle misure lungo stendimenti orizzontali perpendicolari all'asse longitudinale della diga, confrontando, quando possibile, le misure con le distribuzioni teoriche di diga omogenea o di tensione verticale nominale.

In figura 3 e in figura 4 sono riportati due esempi di applicazione dell'approccio interpretativo illustrato. Essi sono relativi rispettivamente alle dighe di Beliche e di Camastra. In entrambi i casi l'effetto arco si evidenzia con una brusca discontinuità dei valori in corrispondenza del passaggio nucleo-fianchi.

Per la diga di Beliche il confronto tra distribuzioni misurate e distribuzione teorica nel caso di mezzo elastico lineare ed omogeneo evidenzia significativi fenomeni di migrazione tensionale. Le due distribuzioni misurate sono relative a due

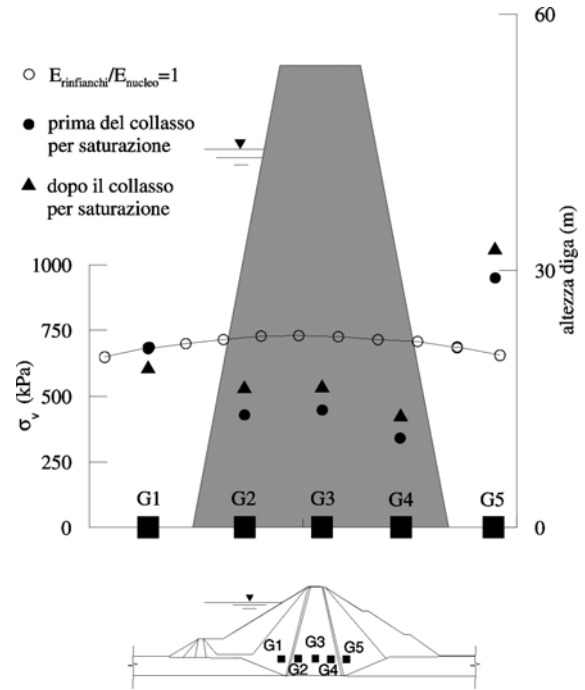


Fig. 3 – Diga di Beliche: tensioni verticali misurate a fine costruzione poco prima e subito dopo un invaso temporaneo imprevisto, confrontate con la distribuzione teorica di diga omogenea [PAGANO, 1998, modificata].

Fig. 3 – Beliche Dam: vertical total stress measured at end of construction before and after the temporary unexpected impounding, compared with a theoretical distribution for a homogeneous dam [PAGANO, 1998, modified].

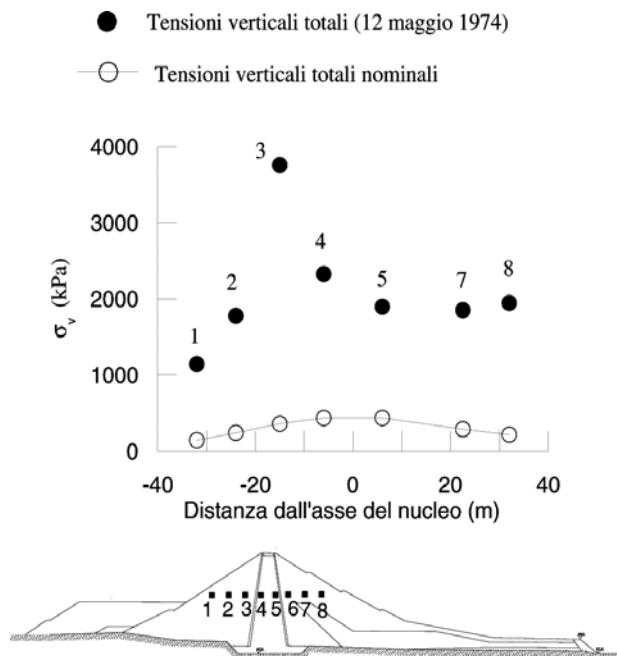


Fig. 4 – Diga del Camastra: tensioni verticali misurate a fine costruzione, confrontate con la distribuzione nominale.

Fig. 4 – Camastra Dam: vertical total stress measured at end of construction compared with the overburden pressure.

istanti temporali abbastanza ravvicinati che precedono (cerchi pieni) e seguono (triangoli pieni), per una medesima altezza di rilevato, il collasso per saturazione del fianco di monte della diga, determinato da un evento piovoso eccezionale e dal conseguente invaso temporaneo del bacino.

Le tensioni verticali misurate nella diga di Camastra, pur evidenziando un marcato effetto arco, sono caratterizzate da valori tutti decisamente superiori a quelli nominali. Al di là di concentrazioni di sforzo prodotte da effetti tridimensionali (non invocabili in questo caso), il rispetto della condizione di equilibrio verticale nella sezione considerata dovrebbe produrre distribuzioni di tensioni verticali, misurate e teoriche, che sottendono la stessa area. La marcata differenza tra l'area sottesa dalle misure e quella determinata dalla distribuzione delle tensioni nominali, fa sorgere in questo caso molti dubbi sulla affidabilità delle misure, ed evidenzia l'importanza dell'uso di un modello semplificato di riferimento in fase di diagrammazione delle misure.

In fase costruttiva è possibile stimare l'evoluzione dell'effetto arco al progredire dell'altezza del rilevato, diagrammando la tensione verticale misurata in funzione della tensione verticale nominale. In figura 5 tale stima è proposta per un punto ubicato in asse al nucleo della diga di Kastraki. La linea tratteggiata corrisponde alla condizione di uguaglianza tra le due grandezze; maggiore è lo scostamento da questa condizione, maggiore è l'effetto arco, che porta ad un trasferimento tensionale verso i fianchi più rigidi. Il diagramma evidenzia un

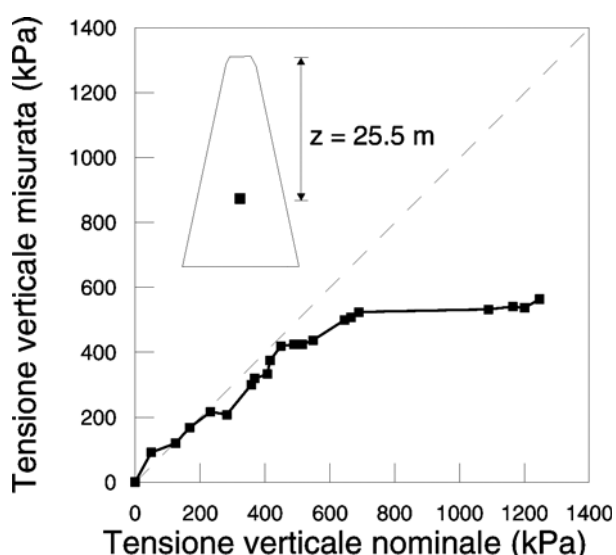


Fig. 5 – Diga di Kastraki: tensioni verticali misurate durante la fase costruttiva, in funzione della tensione verticale nominale [PAGANO *et al.*, 1998].

Fig. 5 – Kastraki Dam: vertical total stress measured at end of construction compared with the overburden pressure [PAGANO *et al.*, 1998].

primo tratto (fino a circa 400 kPa) nel quale i valori delle misure risultano molto prossimi ai valori nominali (andamento a 45°, assenza di effetti arco) ed un secondo tratto nel quale i valori misurati risultano, al contrario, progressivamente inferiori rispetto a quelli nominali (diagramma che si discosta dalla retta a 45°, presenza di fenomeni di migrazione tensionale).

Questo tipo di rappresentazione risulta particolarmente efficace soprattutto in presenza di punti di misura “sparsi”, ovvero non organizzati secondo linee orizzontali.

Nelle fasi successive al termine della costruzione il peso proprio resta invariato. Variazioni di tensione verticale totale possono essere indotte da fenomeni che caratterizzano le prime fasi dell'esercizio (collassi da saturazione, deformazioni da consolidazione primaria) o l'esercizio avanzato (consolidazione secondaria). Si tratta in genere di fenomeni che inducono nel generico elemento processi deformativi che, se contrastati dalle condizioni al contorno, determinano variazioni di tensioni verticali.

In figura 3 si riporta come esempio il collasso per saturazione del fianco di monte della diga di Beliche e le alterazioni tensionali prodotte dal fenomeno. Nel fianco di monte, assoggettato al collasso, si ha una riduzione di tensione, equilibrata, nelle restanti zone della diga, da incrementi di sforzi.

3. Pressioni interstiziali

Le misure di pressione interstiziale possono risultare di estrema utilità per la comprensione del comportamento meccanico d'insieme della diga e per la valutazione delle condizioni di sicurezza.

La grandezza fisica in considerazione risente dell'influenza di fattori diversi, meccanici e/o idraulici, in dipendenza del grado di riequilibrio idraulico presente nell'intorno del punto di misura. Se realizzate in punti rappresentativi, le misure hanno la potenzialità di caratterizzare processi di incremento di carico, processi di consolidazione, processi di filtrazione transitoria, processi di filtrazione stazionaria. In sostanza i principali processi che si susseguono nel corso della costruzione, primo invaso ed esercizio, e che controllano l'evoluzione del comportamento meccanico della diga sono tutti identificabili attraverso le misure di pressione interstiziale. La descrizione dei modelli interpretativi, distinta per fasi di vita dell'opera, evidenzierà nel seguito tale aspetto.

3.1. Fase costruttiva

Durante le fasi costruttive le distribuzioni di pressione interstiziale prodotte dall'interazione tra

lo scheletro solido e il fluido interstiziale sono controllate principalmente da fattori di tipo statico, quali il carico da peso proprio e le distribuzioni di rigidità. Possono intervenire in misura più o meno significativa anche fattori idraulici.

All'atto della posa in opera il materiale da nucleo è parzialmente saturo e la pressione della fase liquida è negativa. Successivamente, l'incremento di tensione media prodotto dalle successive fasi costruttive determina riduzioni dell'indice dei vuoti. Se il grado di saturazione iniziale del materiale è superiore all'80% tali riduzioni possono portare alla saturazione del mezzo, che, per ulteriori incrementi di carico, sviluppa valori positivi di pressione interstiziale. Nell'ipotesi che il processo costruttivo avvenga in condizioni non drenate, la saturazione del mezzo determina anche il passaggio da un comportamento non saturo-compressibile a un comportamento saturo-incompressibile.

Gli incrementi di pressione interstiziale indotti dal peso proprio possono essere accompagnati da processi di riequilibrio idraulico. In condizioni di mezzo saturo le variazioni di pressione interstiziale sono regolate dal rapporto (v/k) tra la velocità di costruzione " v " (variazione dell'altezza del rilevato nel tempo) e la permeabilità del mezzo " k ". È tale rapporto che infatti pesa gli effetti di segno opposto indotti dai processi dissipativi e dall'applicazione del carico [PAGANO *et al.*, 2006].

Nel punto di misura posto in asse al nucleo della diga di Polverina (Fig. 1) è evidente come il processo di saturazione sia abbastanza rapido. Valori positivi di pressione interstiziale si verificano infatti per incrementi del carico da peso proprio modesti, congruentemente con l'elevato grado di saturazione iniziale del materiale ($S_r > 90\%$). È altresì evidente come i gradienti di crescita siano inizialmente molto significativi per poi ridursi in fase di ultimazione del rilevato. Alla riduzione possono concorrere l'instaurarsi di processi di consolidazione, l'assottigliamento della larghezza della diga e la conseguente diffusione degli stati tensionali, l'approssimarsi delle condizioni di stato critico.

Dopo l'esame dell'evoluzione temporale di pressioni interstiziali in un punto è interessante illustrare i modelli di riferimento utili ad interpretare le distribuzioni di pressioni interstiziali a istanti di tempo prefissati.

In figura 6 sono riportate, ad una assegnata quota, le distribuzioni teoriche di quota piezometrica calcolate a fine costruzione nel nucleo di una diga zonata schematizzando il nucleo con un approccio accoppiato trifase (nel quale viene assunto un singolo tensore delle tensioni efficaci), i fianchi con un approccio monofase ed associando, sia al nucleo sia ai fianchi, un comportamento dello scheletro solido elastico lineare (i valori del modulo di Young sono pari a 40 MPa nei fianchi e a 20 MPa nel nucleo). È

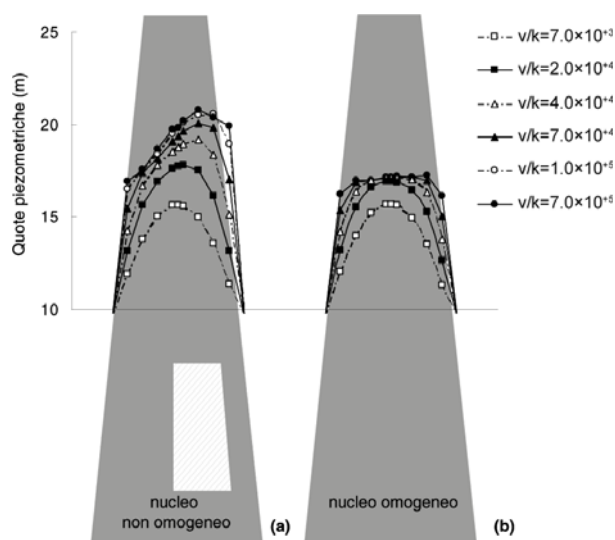


Fig. 6 – Distribuzioni teoriche di quota piezometrica calcolate a fine costruzione nel nucleo di una diga zonata al variare del rapporto tra velocità di costruzione " v " e coefficiente di permeabilità " k ": (a) nucleo con disomogeneità; (b) nucleo omogeneo [PAGANO *et al.*, 2006, modificata].

Fig. 6 – Piezometric heads computed at end of construction in the core of an earth dam as a function of the ratio of velocity of construction to permeability. (a): non-homogeneous core; (b) homogeneous core [PAGANO *et al.*, 2006, modified].

possibile osservare che i valori di quota piezometrica crescono al crescere di v/k fino a un valore di soglia del rapporto che individua l'instaurarsi di condizioni non drenate.

Le isocrone di figura 6b evidenziano come, nell'ipotesi di nucleo omogeneo, i valori di pressione interstiziale siano maggiori al centro e modesti a ridosso dei fianchi. Alla caratteristica distribuzione a campana concorrono, all'interno del nucleo, fattori sia statici sia idraulici: i valori del carico, maggiori al centro rispetto alle zone laterali; gli effetti arco, più accentuati nelle zone laterali; i contorni laterali drenanti.

Congruentemente con quanto atteso sulla base delle considerazioni svolte, le distribuzioni isotemporali di pressione interstiziale misurate nel nucleo della diga di Beliche durante la fase costruttiva (Fig. 7, curva 1) presentano valore massimo al centro e una distribuzione quasi simmetrica.

La presenza di disomogeneità della rigidità produce effetti sulla distribuzione commisurati alla sensibilità della misura a fattori di tipo statico. Più ci si approssima a condizioni non drenate, maggiore è la dipendenza delle pressioni interstiziali dagli stati tensionali, più la presenza di una disomogeneità statica, nell'influenzare gli stati tensionali, condiziona la misura delle pressioni interstiziali stesse. In figura 6a è evidenziato come la presenza di una piccola zona nel nucleo caratterizzata da un valore del modulo di Young (80 MPa) quattro volte più eleva-

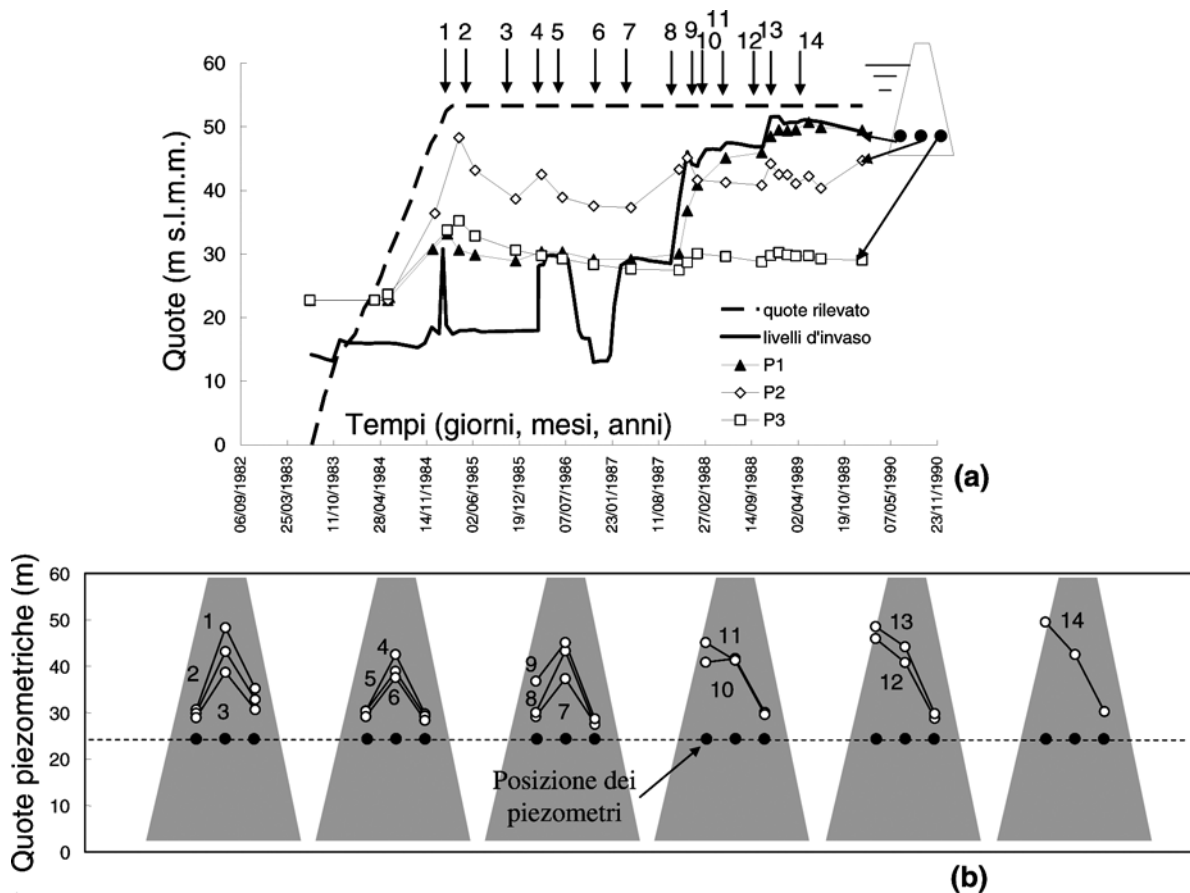


Fig. 7 – Quote piezometriche misurate nella diga di Beliche: (a) evoluzioni temporali; (b) distribuzioni isotemporalali [PAGANO *et al.*, 2006, modificata].

Fig. 7 – Piezometric heads measured in Beliche dam: (a) variation with time; (b) isochrones [Pagano *et al.*, 2006, modified].

to, influenzi la distribuzione al crescere del rapporto v/k .

Nel caso già esaminato della diga di Beliche la regolarità della distribuzione (Fig. 7, curva 1) è probabilmente riconducibile all'insensibilità che le misure presentano a disomogeneità statiche, a sua volta indotte da significativi processi di riequilibrio idraulico, possibili in virtù del ridotto rapporto v/k ($v/k=200$).

Nel caso della diga di Polverina le distribuzioni di pressione interstiziale a fine costruzione (Fig. 8, curve t_1, t_2, t_3) si presentano invece irregolari, prive della caratteristica forma a campana associabile all'ipotesi di mezzo omogeneo. È probabile infatti che le misure siano sensibili a disomogeneità di tipo statico, ciò in virtù del fatto che, a causa dell'elevato rapporto v/k ($v/k=20000$), possono verificarsi scarsi processi di riequilibrio idraulico.

Con riferimento alle distribuzioni di quote piezometriche in direzione verticale, la previsione qualitativa degli andamenti può essere derivata a mezzo di modelli semplificati o a mezzo di analisi avanzate. Se ci si pone nelle ipotesi di mezzo saturo e di deformazione monodimensionale si ottiene a termine

costruzione una distribuzione di quota piezometrica $h(z)$ esprimibile come [PAGANO *et al.*, 1999]:

$$h(z) = rH_{\max} + (1-r)z \quad (1)$$

dove H_{\max} rappresenta l'altezza del rilevato e r il rapporto tra il peso dell'unità di volume del terreno e il peso specifico dell'acqua. Essendo $r > 1$, dalla (1) si evince che h deve decrescere linearmente con la quota z . Tale risultato lo si ritrova qualitativamente (Fig. 9a) anche nelle previsioni con modelli avanzati, condotte in regime piano di deformazione nelle quali si è tenuto conto della natura trifase del materiale da nucleo [FONTANELLA, 2007].

In figura 9 b, vengono mostrate le quote piezometriche misurate in funzione della quota del rilevato; per rendere omogenei i dati, la distribuzione è normalizzata rispetto all'altezza massima della diga stessa. Le misure nelle dighe di Evretou, Polverina e Beliche a termine costruzione risultano congruenti con quanto previsto dall'equazione (1), le differenti pendenze delle curve che collegano le misure per le varie dighe considerate sono da attribuire a:

1. differenti velocità di costruzione e presenza di periodi di fermo lavori;

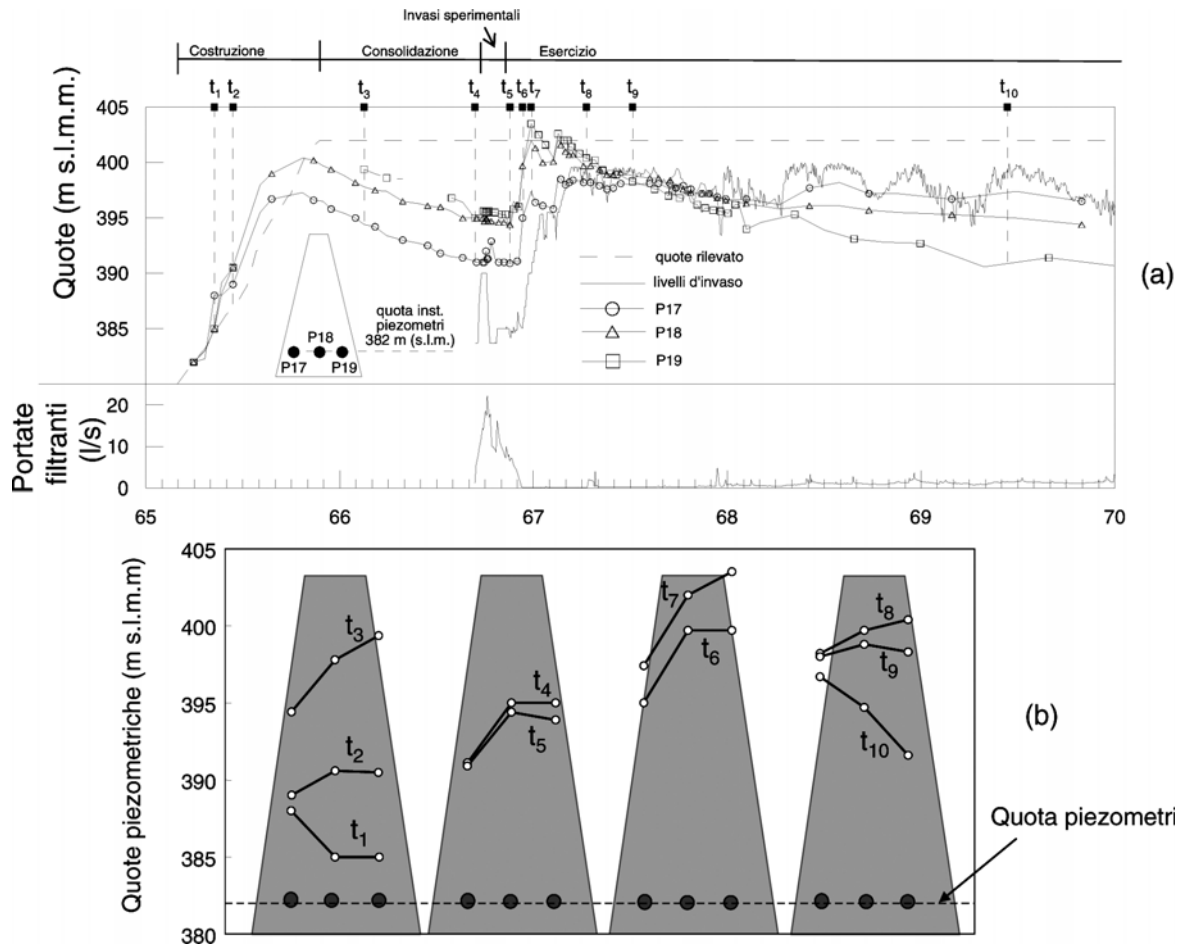


Fig. 8 – Quote piezometriche e portate filtranti misurate nella diga di Polverina: (a) evoluzioni temporali; (b) distribuzioni isotemporali.

Fig. 8 – Piezometric heads and leakage measured in Polverina dam: (a) variation with time; (b) isochrones.

2. differente regime idraulico del terreno di fondazione;
3. differente grado di saturazione del materiale posto in opera;
4. differente geometria dell'opera, in termini di larghezza nucleo e rinfianchi.

Il particolare andamento mostrato dalle misure della diga di Bilancino potrebbe essere attribuito al diverso valore del grado di saturazione del materiale messo in opera. I valori più modesti di S_r corrispondenti alla parte alta della diga riducono le sovrappressioni indotte in fase costruttiva.

La distribuzione di quote piezometriche costanti osservata nella diga di El Infiernillo risulta invece congruente con i risultati di modelli più sofisticati, nei quali i fianchi, modellati con un comportamento elastoplastico a incrudimento isotropo-deviatorico [PAGANO *et al.*, 1999], sono in grado di esplicitare sul nucleo un confinamento crescente con la quota. È bene tuttavia osservare che la particolarità della distribuzione misurata in questo caso (valori costanti del carico idraulico con la quota) lascia comunque qualche perplessità, anche in considera-

zione del fatto che è facilmente ipotizzabile una causa di malfunzionamento che darebbe come risultato proprio quello osservato. È possibile pensare infatti che l'installazione dei tubi piezometrici posti sulla stessa verticale abbia potuto creare una zona di maggiore permeabilità e dunque una via preferenziale per il movimento dell'acqua; queste condizioni di *cortocircuito* tra i piezometri potrebbero essere la causa della misura costante di carico idraulico fornita dagli strumenti posti a quote differenti.

Le rappresentazioni mostrate ed i confronti con gli andamenti teorici di riferimento consentono da un lato di esprimere una prima valutazione sull'affidabilità delle misure, dall'altro permettono di acquisire informazioni sull'evoluzione dello stato tensionale e dei processi di riequilibrio idraulico durante la costruzione.

3.2. Fasi post-costruttive

I comportamenti attesi di riferimento utili per analizzare l'evoluzione delle distribuzioni di pres-

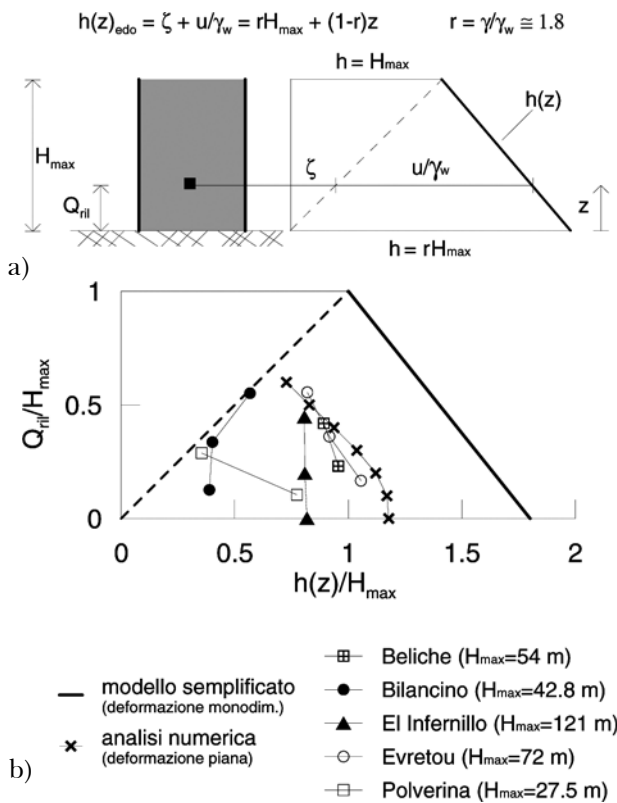


Fig. 9 – Distribuzione a termine costruzione di quote piezometriche con la quota di rilevato in alcune dighe in terra zonate: (a) schema geometrico di riferimento; (b) distribuzione normalizzata; [PAGANO, 2007, modificata].

Fig. 9 – Distribution of piezometric heads with fill level for some zoned earth dams (a) geometric scheme; (b) normalized distribution [PAGANO, 2007, modified].

sioni interstiziali nelle fasi post-costruttive sono derivabili dalle soluzioni tradizionali di due modelli: la consolidazione mono-bidimensionale e la filtrazione in un mezzo non saturo. Nell'intervallo di tempo che separa l'ultimazione del rilevato dall'inizio degli invasi sperimentali l'evoluzione delle pressioni interstiziali è controllata da processi di consolidazione. La presenza dell'invaso comporta il progressivo passaggio dalla fase regolata da fenomeni di tipo dissipativo alla fase nella quale, a governare l'evoluzione della grandezza fisica, è essenzialmente il livello d'invaso. Tale passaggio avviene in tempi differenti in dipendenza della posizione del punto considerato.

I due fenomeni descritti possono essere colti diagrammando l'evoluzione delle misure di quota piezometrica insieme alle misure dei livelli d'invaso (Fig. 10). Tale rappresentazione consente infatti di cogliere l'evoluzione temporale tipica dei processi di tipo dissipativo (valori decrescenti e derivata temporale decrescente); le sovrappressioni interstiziali generate dalla variazione del carico statico prodotto da una rapida variazione del livello d'invaso; la distribuzione di quote piezometriche in regime di

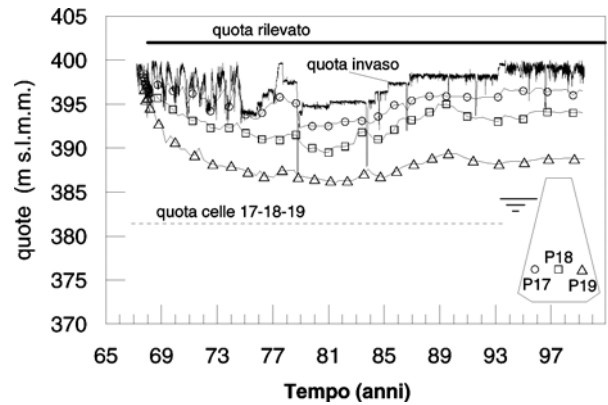


Fig. 10 – Quote piezometriche misurate in tre punti del nucleo della diga di Polverina durante la fase costruttiva e le fasi di esercizio [PAGANO et al. 2006, modificata].

Fig. 10 – Piezometric heads measured in the core of Polverina Dam during construction and impoundings [PAGANO et al. 2006, modified].

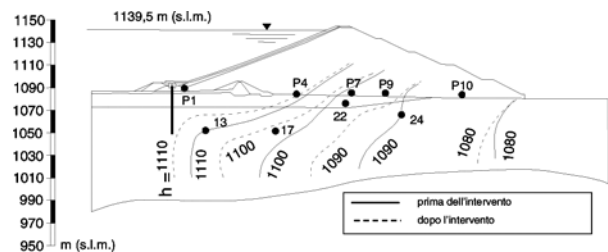


Fig. 11 – Diga di Zoccolo: isopieziche durante le fasi di esercizio ottenute a partire dalle misure di pressione interstiziale [PAGANO et al., 2004].

Fig. 11 – Isochrones of piezometric heads measured in the Zoccolo Dam [PAGANO et al., 2004].

moto stazionario, ovvero l'effetto smorzante prodotto dalla distanza del punto di misura dal contorno bagnato; il ritardo della risposta all'aumentare della distanza dal contorno bagnato, prodotto da processi transitori quali consolidazione-rigonfiamento saturazione-desaturazione.

La presenza dell'invaso in fase di consolidazione comporta distribuzioni spaziali delle misure che progressivamente tendono a trasformare l'andamento a campana, determinato dal carico da peso proprio, in un andamento decrescente monte-valle tipico di un processo di filtrazione stazionario (Fig. 7b, curve da 7 a 14; Fig. 8b curve da t_6 a t_{10}).

I processi di filtrazione che si sviluppano in una diga possono essere studiati assumendo come riferimento teorico la soluzione di un processo di filtrazione bidimensionale rappresentata graficamente a mezzo delle isopieziche. In figura 11 sono ad esempio riportate le isopieziche nella diga di Zoccolo (diga con manto) ricavate dalle misure di pressione interstiziale realizzate prima e dopo alcuni lavori di tenuta nel diaframma di monte. Tale rappresentazione evidenzia l'efficacia dell'intervento (esso pro-

duce una traslazione verso monte delle isopieziche e quindi una riduzione dei gradienti idraulici) e, più in generale, consente di caratterizzare le direzioni del flusso e quindi il funzionamento idraulico del sistema diga-terreni di fondazione.

3.3. Pressioni interstiziali e portate filtranti

Le misure di pressione interstiziale possono consentire di individuare anomalie del comportamento idraulico e risultare per questo motivo utilissime ai fini del controllo della sicurezza. Esse sono efficaci nella individuazione di problemi di tenuta idraulica se non influenzate eccessivamente da fattori di tipo statico e se il problema stesso è accompagnato da una variazione spaziale di permeabilità. Un problema di tenuta idraulica può essere sostanzialmente visto come un aumento nel tempo della permeabilità in una porzione del dominio di filtrazione. Tale aumento può essere avvertito in corrispondenza del punto di misura solo se sono assenti disturbi prodotti da altri fattori, ad esempio, sovrappressioni interstiziali generate da carichi. Nel punto di misura inoltre il regime di pressioni interstiziali non è alterato da eventuali variazioni di permeabilità omogeneamente diffuse sull'intero dominio di filtrazione.

In figura 8 è mostrato come un incremento improvviso di portate filtranti nella diga di Polverina non sia segnalato dalle misure di pressione interstiziali in quanto condizionate, in tale fase, da processi di tipo dissipativo.

In figura 12 è invece mostrato come nella diga di Zoccolo l'elevata permeabilità dell'intero sistema, che determina il rapido raggiungimento di condizioni stazionarie, consenta alle misure di quota piezometrica di segnalare dapprima l'incremento di portate filtranti e, successivamente, i decrementi indotti rispettivamente dalla perdita di tenuta del diaframma e dalle successive iniezioni di impermeabilizzazione.

4. Spostamenti

Le misure delle componenti di spostamento risultano fondamentali per la caratterizzazione della risposta statica della diga. Consentono di determinare o controllare le proprietà meccaniche dei terreni posti in opera, di comprendere l'evoluzione dei processi che si sviluppano nella diga e, sulla base di essi, valutare l'evoluzione delle condizioni di sicurezza; vengono realizzate lungo verticali assestometriche o inclinometriche all'interno del corpo diga oppure con strumentazione topografica su punti del contorno dell'opera. Le misure di spostamenti sono molto affidabili e, in virtù del loro carattere integrale, poco sensibili a disomogeneità di tipo statico.

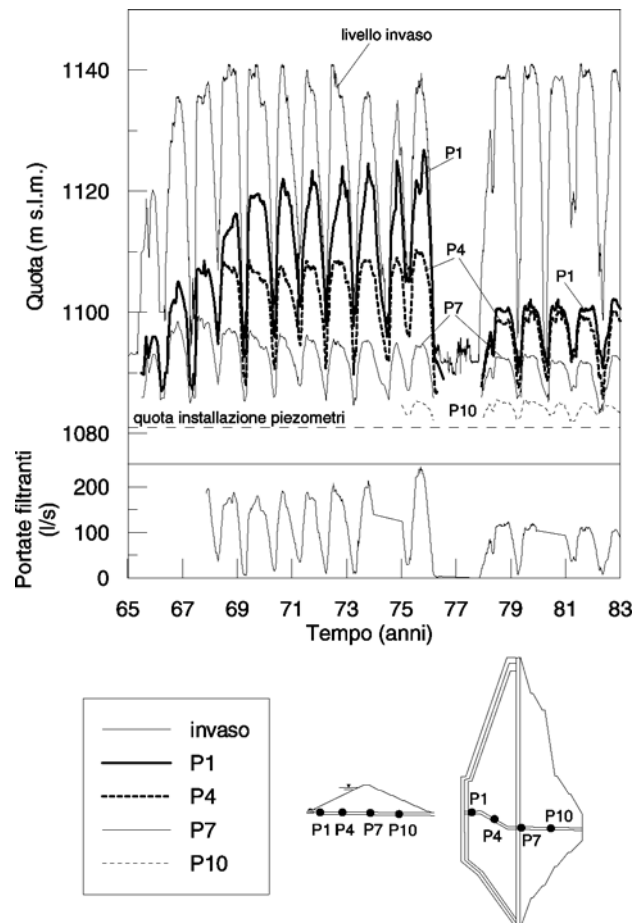


Fig. 12 – Evoluzione temporale delle quote piezometriche e delle portate filtranti misurate nella diga di Zoccolo.

Fig. 12 – Piezometric heads and leakage measured in the Zoccolo Dam.

Sono caratterizzate, di conseguenza, da distribuzioni abbastanza continue, che necessitano, per essere caratterizzate, della disponibilità di pochi punti di misura [PAGANO *et al.*, 2006].

4.1. Cedimenti in fase costruttiva

Nel corso delle fasi costruttive i modelli semplificati disponibili interpretano essenzialmente la distribuzione dei cedimenti assestometrici riportati in funzione della quota.

In figura 13 sono rappresentati i profili osservati nella diga di Zoccolo durante le fasi costruttive. Per ciascuna verticale assestometrica sono riportate due serie di profili: la serie indicata con "a" riporta le misure originarie. La serie indicata con "b" è stata ottenuta a partire dalla precedente eliminando i punti di misura per i quali è stata effettuata in ritardo la lettura di zero. Questo è purtroppo un errore sperimentale frequente, indotto in genere dalla velocità di costruzione significativa che porta alla lettura di zero quando la zanca assestometrica, già immersa nel rilevato, ha oramai subito spostamenti

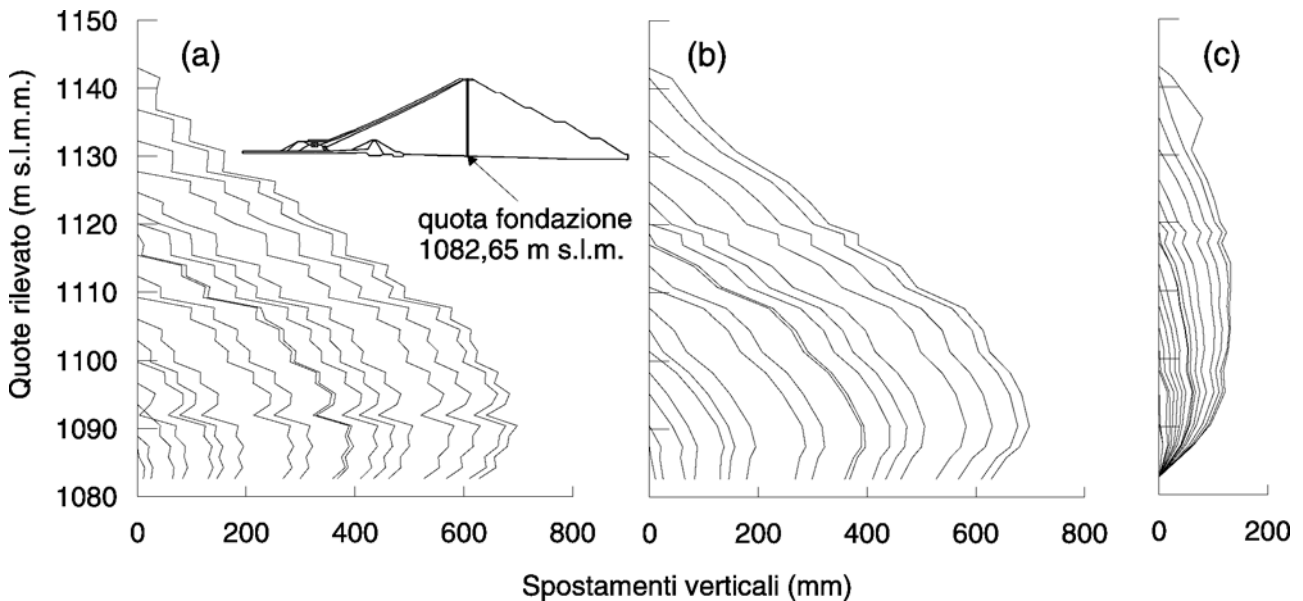


Fig. 13 – Cedimenti misurati in fase costruttiva nella diga di Zoccolo: a) misure non corrette; b) misure corrette; c) misure depurate del cedimento del piano fondazione.

Fig. 13 – Settlement profiles observed during construction in the Zoccolo Dam: a) uncorrected measures; b) corrected measures; c) measured settlements relative to the foundation base.

significativi. La lettura di zero risulta infatti corretta solo se effettuata quando la quota della zanca coincide con la quota corrente del rilevato.

Il cedimento letto a quota fondazione è l'effetto integrale delle deformazioni che si sviluppano nei terreni di fondazione. Dai diversi profili è possibile detrarre tale contributo per isolare gli accorciamenti del solo rilevato (Fig. 13c).

I cedimenti, depurati del contributo del cedimento del piano fondazione, possono essere interpretati con un modello semplificato [MARSAL, 1958]. Nelle ipotesi di rilevato omogeneo di altezza H , costituito da materiale con peso dell'unità di volume γ e caratterizzato da un regime monodimensionale di deformazione e da comportamento elastico lineare (rigidezza D), assumendo e uno stato tensionale coincidente con quello nominale lo spostamento "s" che si sviluppa alla generica quota z è esprimibile come:

$$s(z) = \frac{\gamma}{D} (H-z)z \quad (2)$$

La (2) è l'equazione di una parabola con massimo posto a metà altezza. Il profilo di cedimenti teorico è dunque simmetrico.

Lo spostamento massimo s_{\max} si verifica a quota $z=H/2$, per cui dalla (2) è possibile derivare il valore della rigidezza monodimensionale D come:

$$D = \frac{\gamma}{s_{\max}} \frac{H^2}{4} \quad (3)$$

L'elaborazione dei dati di figura 13a consente ad esempio di ottenere una stima della rigidezza monodimensionale ($D \approx 160 \text{ Mpa}$), da confrontare con quanto assunto in fase progettuale. La procedura risulta sostanzialmente corretta se lo schema di diga è tale da rendere trascurabili i fenomeni di migrazione tensionale e verosimile l'ipotesi di considerare lo stato tensionale coincidente con quello nominale. Altre soluzioni analitiche forniscono [PAGANO *et al.*, 1998] lo spostamento al variare della quota nell'ipotesi di rigidezza variabile linearmente con la quota stessa $D = D_0 + \mu\zeta$

$$S(z) = \gamma \frac{H-z}{\eta} \ln \left(1 + \frac{\eta}{D_0} z \right) \quad (4)$$

Per rigidezze decrescenti con la quota ($\eta < 0$) si ottengono profili distorti verso l'alto, mentre per rigidezze crescenti con la quota ($\eta > 0$) si ottengono profili distorti verso il basso.

Queste soluzioni consentono di attribuire un'interpretazione alle evoluzioni articolate spesso seguite dai profili sperimentali. Ad esempio in figura 14 è possibile osservare che le forme dei profili misurati nella diga del Camastra in asse al nucleo, distorte verso l'alto nelle prime fasi costruttive e distorte verso il basso in seguito, sembrano congruenti con l'andamento della densità secca con la quota, posto che tale andamento rappresenti anche quello delle rigidezze.

La rigidezza "D" può tuttavia essere influenzata da fattori bi o tri-dimensionali.

La perdita di confinamento con la quota, determinata dal progressivo distanziamento dal contatto at-

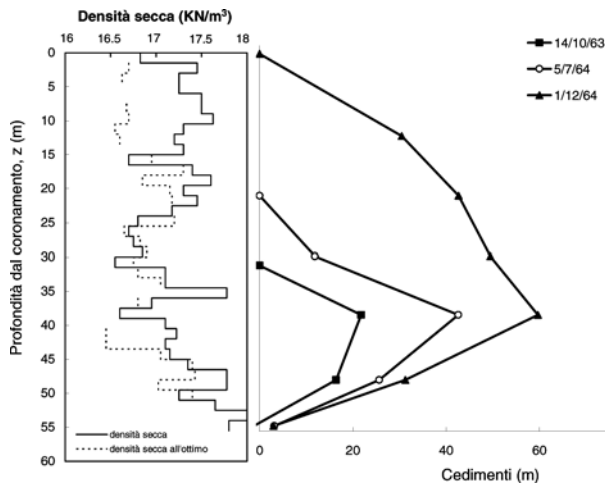


Fig. 14 – Evoluzione dei profili di cedimenti misurati nella diga del Camastra durante la fase costruttiva e confronto dell'evoluzione con le distribuzioni di densità secca misurate durante le prove di controllo.

Fig. 14 – Camastra Dam: Comparison between settlement profiles observed during construction and dry density measured in situ.

tritivo rilevato-piano di fondazione e dalla forma trapezoidale della sezione trasversale, produce una riduzione di “D” con la quota, tanto più esaltata quanto maggiore è la tendenza del mezzo ad espandere lateralmente (mezzo saturo, carico in condizioni non drenate, pressioni interstiziali significative). La migrazione tensionale dal nucleo ai fianchi tende invece ad incrementare D poichè produce un confinamento maggiore. Poichè la migrazione tensionale tipicamente si incrementa con la quota, essa tende parimenti ad incrementare D con la quota.

Le distorsioni dei profili possono allora derivare, piuttosto che dalla distribuzione delle proprietà meccaniche del materiale posto in opera, da fenomeni importanti come l'effetto arco e la perdita di confinamento con la quota, associati rispettivamente a riduzioni di stato tensionale e accumulo di sovrappressioni interstiziali.

È interessante notare come questi approcci per l'interpretazione delle misure di cedimento risultino molto efficaci soprattutto se utilizzati congiuntamente all'interpretazione delle misure di pressioni interstiziali e tensioni totali.

4.2. Spostamenti in esercizio

Durante le fasi di esercizio si possono manifestare, attraverso variazioni più o meno significative degli spostamenti nel tempo, sia fenomeni attesi e innocui sia meccanismi imprevisi e pericolosi. Lo spostamento di un punto può essere cioè la razionale conseguenza delle variazioni tensionali prodotte dall'invaso, da processi di consolidazione primaria e

secondaria, da fenomeni di collasso da prima saturazione di materiali a grana grossa o a grana fine. Oppure, essere la manifestazione di un meccanismo di instabilità parziale o globale della diga.

Il collasso del fianco di monte della diga di Beliche descritto in precedenza, nella quota parte che produce deformazioni, altera i profili di cedimento. Tali alterazioni sono evidenziate riportando i profili osservati a monte e a valle in corrispondenza di due verticali assestometriche poste in posizione simmetrica rispetto all'asse della diga (Fig. 15).

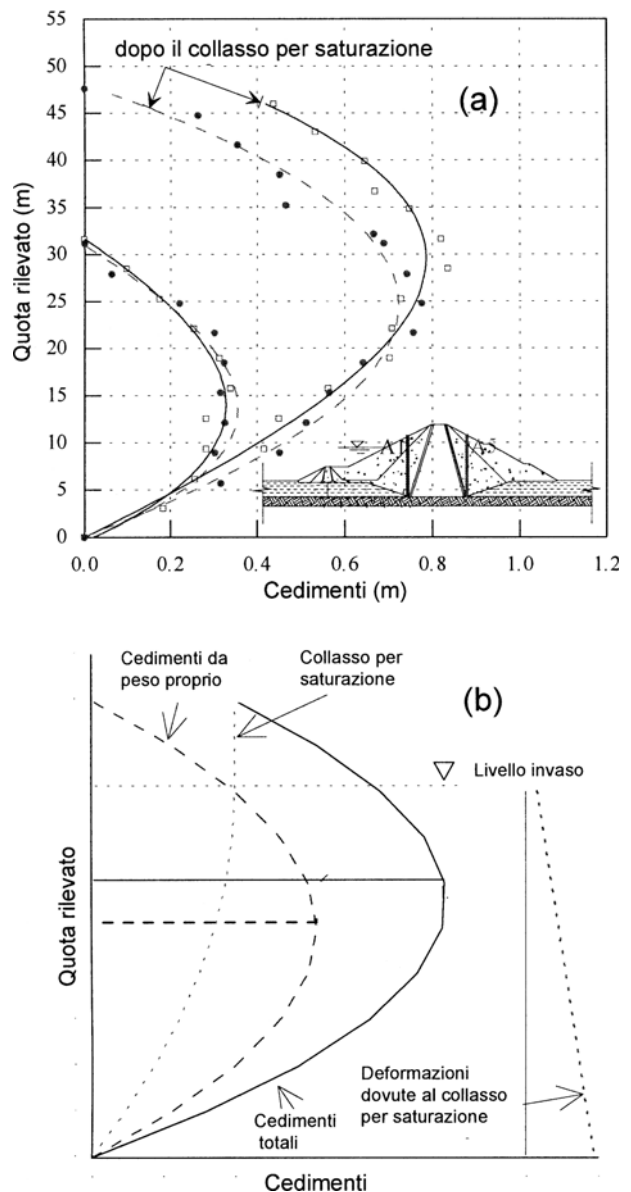


Fig. 15 – Collasso per saturazione nel fianco di monte della diga di Beliche: (a) confronto tra misure assestometriche nel fianco di monte e di valle, prima e dopo il collasso; (b) interpretazione degli effetti indotti dal collasso.

Fig. 15 – Beliche Dam: collapse due to saturation of the upstream shell: (a) comparison between settlement profiles of the upstream and downstream shell, before and after collapse; (b) interpretation of collapse effects.

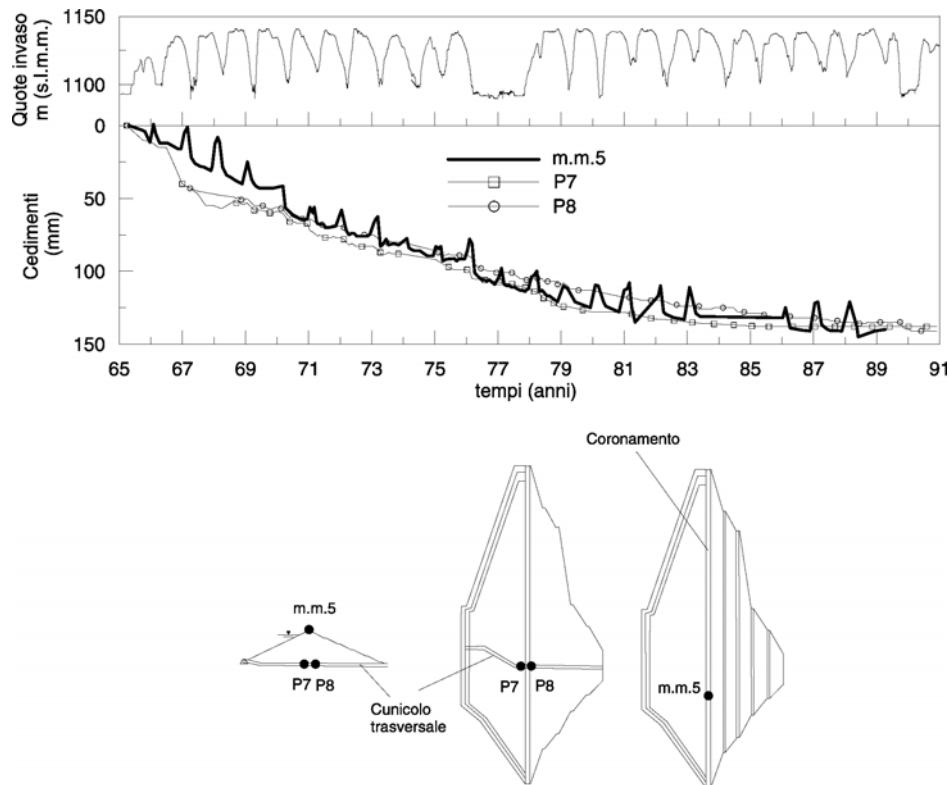


Fig. 16 – Diga di Zoccolo: evoluzioni di cedimenti misurate sul coronamento (m. m. 5.) e nel cunicolo trasversale (P7 e P8) durante le fasi di esercizio.

Fig. 16 – Zoccolo Dam: vertical settlements recorded at crest and in the transversal tunnel (P7 and P8) under working conditions.

È possibile notare come al collasso si associ un incremento di cedimenti e uno spostamento verso l'alto della quota di massimo spostamento. Il modello meccanico di figura 15b interpreta tale evoluzione, ipotizzando che le deformazioni da collasso, così come evidenziato sperimentalmente, siano crescenti al crescere della tensione media.

Durante le fasi di esercizio acquista rilievo particolare la diagnosi dell'evoluzione temporale del campo di spostamenti, attraverso rappresentazioni appropriate e con il supporto delle evoluzioni di altre grandezze fisiche misurate.

I modelli di riferimento sono in genere quelli che inquadrano processi di tipo dissipativo, processi di creep, effetti prodotti dal carico statico dell'invaso. Un elemento importante che deve emergere dalle rappresentazioni utilizzate è la tendenza evolutiva dei processi deformativi. Processi di deformazione dovuti al comportamento viscoso del terreno o alla consolidazione primaria sono caratterizzati da gradienti temporali decrescenti nel tempo. Gradienti temporali crescenti potrebbero invece essere associati a meccanismi pericolosi in atto nel corpo diga.

Sono pertanto utili le evoluzioni temporali puntuali delle misure. In tal caso è opportuno riportare in diagramma le osservazioni relative a più punti di mis-

ura assieme alle evoluzioni delle quote di invaso (Fig. 16). In taluni casi può risultare efficace riportare i tempi in scala logaritmica, con l'obiettivo di distinguere le evoluzioni associabili a processi di consolidazione (processi di tipo dissipativo) dalle evoluzioni associate a processi di deformazione viscosa.

L'obiettivo può essere perseguito anche diagrammando le isocrone della distribuzione (profili assestometrici, profili inclinometrici, profili lungo direzioni orizzontali o inclinate). In tal caso (Fig. 17) è opportuno che l'intervallo temporale tra un'isocrona e quella successiva sia sempre lo stesso. Un addensamento progressivo delle isocrone è manifestazione di una tendenza alla stabilizzazione del quadro deformativo, mentre un allargamento può risultare manifestazione di una tendenza al collasso.

A volte può risultare efficace, nel diagrammare le distribuzioni spaziali isotemporali, riportare anche la geometria delle stratificazioni presenti nel sottosuolo. Ad esempio, figura 17 evidenzia come la distribuzione dei cedimenti possa dipendere da fattori quali l'altezza della diga e la presenza nei terreni di fondazione di una formazione di limo argilloso estremamente compressibile.

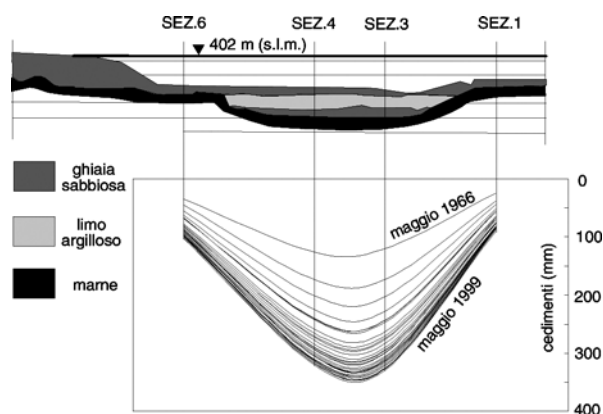


Fig. 17 – Misure di livellazione sul coronamento della diga di Polverina durante le fasi di esercizio [PAGANO *et al.* 2004, modificata].

Fig. 17 – Polverina Dam: settlements profiles along the crest dam under working conditions. [PAGANO *et al.* 2004, modified].

5. Conclusioni

Sono stati esaminati i principali modelli semplificati oggi disponibili per studiare il comportamento meccanico e idraulico di una diga in terra partendo dalle misure di monitoraggio. L'esame ha evidenziato i principali aspetti del processo di interpretazione delle misure.

Un primo problema esaminato è l'interpretabilità del dato sperimentale, in relazione all'affidabilità della misura e alla rappresentatività delle informazioni fornite da valori puntuali della grandezza fisica misurata.

L'esame di diversi approcci di interpretazione delle misure ha mostrato l'opportunità di analizzare in modo congiunto più categorie di osservazioni; in questo modo infatti si incrementa l'efficacia del processo interpretativo giungendo ad una visione generale del comportamento meccanico e idraulico dell'opera.

L'esame di dettaglio delle diverse categorie di grandezze misurate in una diga ha inoltre permesso di identificare limiti e potenzialità delle misure individuando la migliore sequenza di analisi.

È bene in primo luogo esaminare le misure di cedimento, che risultano affidabili e rappresentative; per queste misure sono inoltre disponibili numerosi modelli interpretativi. Sono in grado di fornire informazioni molto utili alla caratterizzazione del comportamento d'insieme, individuando i principali fenomeni che hanno interessato la diga.

Le misure di pressione interstiziale, affidabili e rappresentative soprattutto quando i processi di riequilibrio idraulico sono in fase avanzata, possono fornire utili elementi che consentono, insieme alle misure dei cedimenti, la caratterizzazione del comportamento d'insieme. Sono spesso efficaci anche

per l'individuazione di condizioni di stato pericolose della diga (problemi d'instabilità globale e di tenuta idraulica). Con riferimento ai problemi di tenuta idraulica, le misure di pressione interstiziale sono efficaci soprattutto se analizzate insieme alle misure di portata filtrante, in genere affidabili e rappresentative ma di bassa risoluzione.

Le misure di tensione totale sono frequentemente poco affidabili e poco rappresentative e risultano dunque meno efficaci nella caratterizzazione del comportamento globale dell'opera. Possono però risultare utili se interpretate insieme ad altre misure.

I piani di monitoraggio più efficaci sono pertanto quelli che consentono un'interpretazione congiunta delle diverse categorie di misura concentrando i punti di misura delle diverse categorie in medesime sezioni e, a parità di sezione, in punti prossimi tra loro.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato sviluppato nell'ambito del Progetto PRIN2005 "Monitoraggio e valutazione della sicurezza nelle dighe in terra e negli argini fluviali" Coordinata dal prof. A. Desideri, che si ringrazia per le discussioni avute nell'ambito dell'attività di ricerca.

Gli autori desiderano ringraziare il Registro Italiano Dighe ed in particolare gli Ingegneri dell'Ufficio geotecnico per il supporto e la proficua collaborazione fornita.

Bibliografia

- DOUNIAS G., POTTS D., VAUGHAN P. (1996) – *Analysis of progressive failure and cracking in old British dams*. Géotechnique, 46, n. 4, pp. 629-640.
- FONTANELLA E. M. (2005) – *Fratturazione idraulica nelle dighe in terra zonate*. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Roma "La Sapienza".
- FONTANELLA E.M. (2007) – *Previsione del comportamento meccanico e idraulico di una diga in terra zonata: effetti del contenuto d'acqua di compattazione*. XXIII Convegno Nazionale di Geotecnica, pp. 245-252.
- JAPPELLI R. (2003) - *Le costruzioni geotecniche per le grandi dighe in Italia*. Conf. "Arrigo Croce" 2002, Rivista Italiana di Geotecnica, 2, pp. 17-78.
- JAWORSKI G. W., DUNCAN J. M., BOLTON H. (1981) – *Laboratory study of hydraulic fracturing*. Journ. of Geotech. And Geoenvironmental Eng., pp. 713-732.
- MARSAL R. J. (1958) – *Analisis de asentamientos en la presa Presidente Aleman*. Oaxaca, vol. V, Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico.
- PAGANO L. (1998) – *Interpretation of mechanical behaviour of earth dams by numerical analysis*. Proc. Work-

- shop in Naples on Prediction and Performance in Geotechnical Engineering, Naples, pp. 89-150.
- PAGANO L. (2007) – *Analisi a ritroso di dighe in terra*. XXIII Convegno Nazionale di Geotecnica, Relazione di Panel, Padova, maggio 2007.
- PAGANO L., DESIDERI A., VINALE F. (1998) – *Interpreting settlement profiles of earth dams*. Journ. of Geotech. And Geoenvironmental Eng., pp. 923-932.
- PAGANO L., DESIDERI A., VINALE F. (1999) – *Controllo delle pressioni neutre nel nucleo di dighe zonate: la diga di El-Infiernillo*. XX Convegno Nazionale di Geotecnica, Parma, pp. 537-543.
- PAGANO L., DESIDERI A., SICA S. (2004) – *Rappresentazione delle misure realizzate su dighe in terra*. XXII Convegno Nazionale di Geotecnica, Palermo, pp. 569-577.
- PAGANO L., DESIDERI A., SICA S. (2006) – *Representativeness of Measurements in the Interpretation of Dam Behavior*. Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 43, pp. 87-99.
- SHERARD J. L. (1986) – *Hydraulic fracturing in embankment dams*, Journ. of Geotech. and Geoenvironmental Eng., pp. 905-927.

Simplified models for the interpretation of data records of embankment dams

Summary

The paper presents a review of the principal simplified models available for the interpretation of data records of embankment dams. The representativeness of measurements normally monitored in earth dams is discussed, including vertical total stress, pore water pressure, settlements, total discharge. The analysis of measurements permits to investigate how a given measured quantity can be used to interpret the dam's mechanical behavior. Some interpretative models derive from the simple, parametric solutions of boundary value problems such as: two-dimensional steady state seepage problems; excess pore water pressure produced in undrained conditions; one and two-dimensional consolidation problems. Other interpretative models are derived from the solution of realistic, complex boundary value problems. The paper examines separately the several type of measurements carried out on embankment dams, and shows that a comprehensive interpretation of all the available measurements is necessary for a proper interpretation of the mechanical behaviour of the dam.