Premessa alla traduzione dei Metodi Suggeriti dall'ISRM per la determinazione della pressione mediante celle idrauliche

I Metodi Suggeriti qui presentati fanno riferimento alla determinazione dello stato di sforzo mediante l'utilizzo delle celle di pressione idrauliche. La versione originale di tale lavoro è stata pubblicata alle pagine 117-127 del volume 17 della rivista *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (1979).

La valutazione dello stato di sforzo nel terreno, all'interfaccia terreno-struttura o all'interno di una struttura interagente con il terreno (ad es., il rivestimento di una galleria), riveste un ruolo fondamentale nell'ambito dell'Ingegneria Geotecnica: la sua conoscenza è di primaria importanza per la buona riuscita del progetto o del controllo di una qualsiasi struttura che interagisce col terreno.

Da questa esigenza nasce la necessità di sviluppare appropriate tecniche di misura che consentano di determinare l'entità dello stato di sforzo assoluto e/o relativo nel terreno, all'interfaccia terreno-struttura e nella struttura. Per stato di sforzo relativo si intende la variazione dello stato di sforzo in una data zona relativamente ad un valore iniziale, considerato come valore di riferimento (o valore di zero).

In generale, si può dire che una buona campagna di prova dovrebbe rispondere ai seguenti requisiti: le modalità di prova dovrebbero essere semplici e, possibilmente, rapide; gli strumenti utilizzati affidabili e robusti (per poter operare in cantiere); i materiali con cui è realizzata l'apparecchiatura di prova resistenti sia meccanicamente sia, se necessario, chimicamente.

Inoltre le misure devono essere caratterizzate da accuratezza, precisione e risoluzione (o sensibilità) adeguate. Per la definizione di questi parametri si rimanda alla traduzione delle raccomandazioni sugli estensimetri in foro, apparsa in questa rubrica a cura dell'Ing. Vielmo al n° 4 del 1995.

Nel caso particolare di misura dello stato di sforzo l'attendibilità dei risultati ottenuti è fortemente legata al rapporto tra la rigidezza del mezzo da investigare e la rigidezza del sistema di misura, che deve essere il più possibile pari all'unità. Ciò è tanto più importante quanto più la superficie di contatto dello strumento di misura è piccola in rapporto alla zona in cui valutare lo stato tensionale.

Come detto all'inizio, la metodologia di prova qui presentata fa uso delle celle di pressione idrauliche. Tale metodologia si basa essenzialmente sulla misura della pressione necessaria ad equilibrare la pressione agente nel fluido interno del martinetto piatto, posizionato nella zona in cui valutare lo stato di sforzo agente.

Uno dei limiti maggiori di tale metodologia di prova risiede nell'impossibilità di misurare lo stato di sforzo assoluto agente nella zona da investigare: si può valutare solo lo stato di sforzo relativo.

La cella di pressione qui presentata è nota come cella Glötzl (o Gloetzl). Il meccanismo di funzionamento di tale cella potrebbe sembrare complicato, se confrontato con quello di altre celle che utilizzano un semplice trasduttore per la determinazione della pressione del fluido interno al martinetto piatto. Tale complicazione, però, è giustificata da una affidabilità maggiore e dalla possibilità di compensare eventuali perdite della tubazione. Utilizzando i trasduttori di pressione non è possibile effettuare alcun tipo di compensazione, per cui in presenza di perdite non è possibile eseguire alcuna misura.

Nel tradurre questi Metodi Suggeriti si è utilizzato il termine generico *terreno* quando nella versione originale si incontra il termine "earth", oppure quando si fa riferimento indistintamente sia alle terre che alle rocce. Per contro si sono utilizzati esplicitamente questi due termini quando nella versione originale si differenziano i due materiali.

I due curatori si scusano anticipatamente per le eventuali imprecisioni presenti nella traduzione e si dichiarano pronti ad accettare gli eventuali suggerimenti utili a migliorare il lavoro svolto.

Carlo Bardani
Nicola Grosso

Metodi suggeriti per la determinazione della pressione mediante celle idrauliche

Scopo

1. (a) La cella di pressione idraulica consiste in un martinetto piatto (un *cuscinetto* di pressione riempito con un fluido) connesso con un trasduttore idraulico o pneumatico a diaframma, che a sua volta è connesso per mezzo di un tubo flessibile ad una unità di lettura. La pressione trasmessa al martinetto piatto dal terreno o dal calcestruzzo si misura bilanciando la pressione del fluido nella cella con una pressione applicata sul lato opposto del trasduttore.

(b) La cella è concepita come un mezzo di misura delle variazioni delle pressioni totali nel terreno, nel pietrame (*rockfill*), nel calcestruzzo o all'interfaccia fra due materiali qualsiasi tra quelli appena citati. Essa può essere utilizzata anche per misurare le variazioni di pressione nella roccia, se installata in una taglio praticato con apposita attrezzatura. Tale metodo di misura ha i suoi campi tipici di applicazione nei rilevati di terra o di pietrame, nelle dighe e nelle fondazioni di dighe, nei muri di sostegno e all'estradosso o all'interno del rivestimento delle gallerie.

(c) La pressione totale in un dato punto è definita come la somma tra la pressione efficace del terreno e la pressione dell'acqua o aria interstiziale. Se si vuole valutare separatamente la pressione efficace del terreno e la pressione dell'acqua interstiziale, si deve installare un piezometro nelle vicinanze della cella di pressione. La variazione di pressione è definita come la differenza tra la pressione totale misurata in quell'istante e la pressione misurata al momento dell'installazione della cella. Utilizzando questo tipo di cella non si possono effettuare le misure di pressione assoluta, cioè della pressione del terreno prima dell'installazione della cella. Tali misure richiedono, ad esempio, l'utilizzazione di uno dei metodi suggeriti dall'ISRM per la determinazione dello stato di sforzo (ISRM Suggested Methods for Stress Determination).

(d) Il trasduttore idraulico, che costituisce un componente della cella di pressione totale, può essere utilizzato in altre applicazioni, ad esempio per la misura della pressione dell'acqua interstiziale o dei cedimenti. Queste applicazioni esulano dallo scopo di questi Metodi Suggeriti.

Apparato

2. La cella di pressione idraulica (ad es., Fig. 1) dovrebbe soddisfare i seguenti requisiti:

(a) Il sensore di pressione è costituito da un'martinetto piatto riempito con un fluido e connesso per mezzo di un tubo d'acciaio ad un trasduttore di misura della pressione e ad un tubo di compensazione, se ne è dotato. Il martinetto piatto è tipicamente costituito da due sottili lastre di acciaio, saldate lungo il bordo in modo da formare un contenitore privo di perdite per il fluido di cella. In alcuni tipi di cella vi è un intaglio, di circa 1/3 dello spessore della lastra, praticato lungo i bordi del martinetto piatto per minimizzare gli effetti di bordo durante e dopo la saldatura.

(b) Tipicamente le celle hanno forma in pianta sia circolare che rettangolare, con dimensioni variabili da 6 a 40 cm. Compatibilmente con le dimensioni e la configurazione della zona da investigare, bisognerebbe adottare la dimensione massima della cella, per poter evitare gli errori dovuti agli effetti di bordo[1*]. Il martinetto piatto può essere dotato di cavi metallici per facilitarne l'installazione.

(c) La rigidezza (flessibilità) del martinetto piatto dovrebbe essere confrontabile con quella del materiale in cui si installa, in modo tale che lo sforzo possa trasmettersi al martinetto senza alcun effetto arco e la pressione misurata sia approssimativamente uguale a quella del materiale circostante. Le celle da installare nelle terre, quindi, dovrebbero essere più flessibili di quelle da installare in roccia o nel calcestruzzo. Per ottenere risultati soddisfacenti, lo spazio fra i piatti del martinetto, che determina il volume di fluido e di conseguenza la rigidezza della cella, non dovrebbe essere superiore ad 1 mm; inoltre, il rapporto tra il diametro della cella (lunghezza del lato) e lo spessore della cella stessa dovrebbe essere superiore a 20:1.

(d) I materiali di cui sono costituiti il martinetto piatto, il trasduttore e tutti i componenti ausiliari dovrebbero essere scelti per resistere alla corrosione prodotta dal materiale circostante e dall'acqua interstiziale, inoltre tali materiali dovrebbero essere compatibili con i fluidi di cella e di misura[2].

(e) Per poter assicurare un'adeguata rigidezza, il fluido di riempimento della cella ('il fluido di cella')

* I numeri ad apice si riferiscono alle note di chiusura.

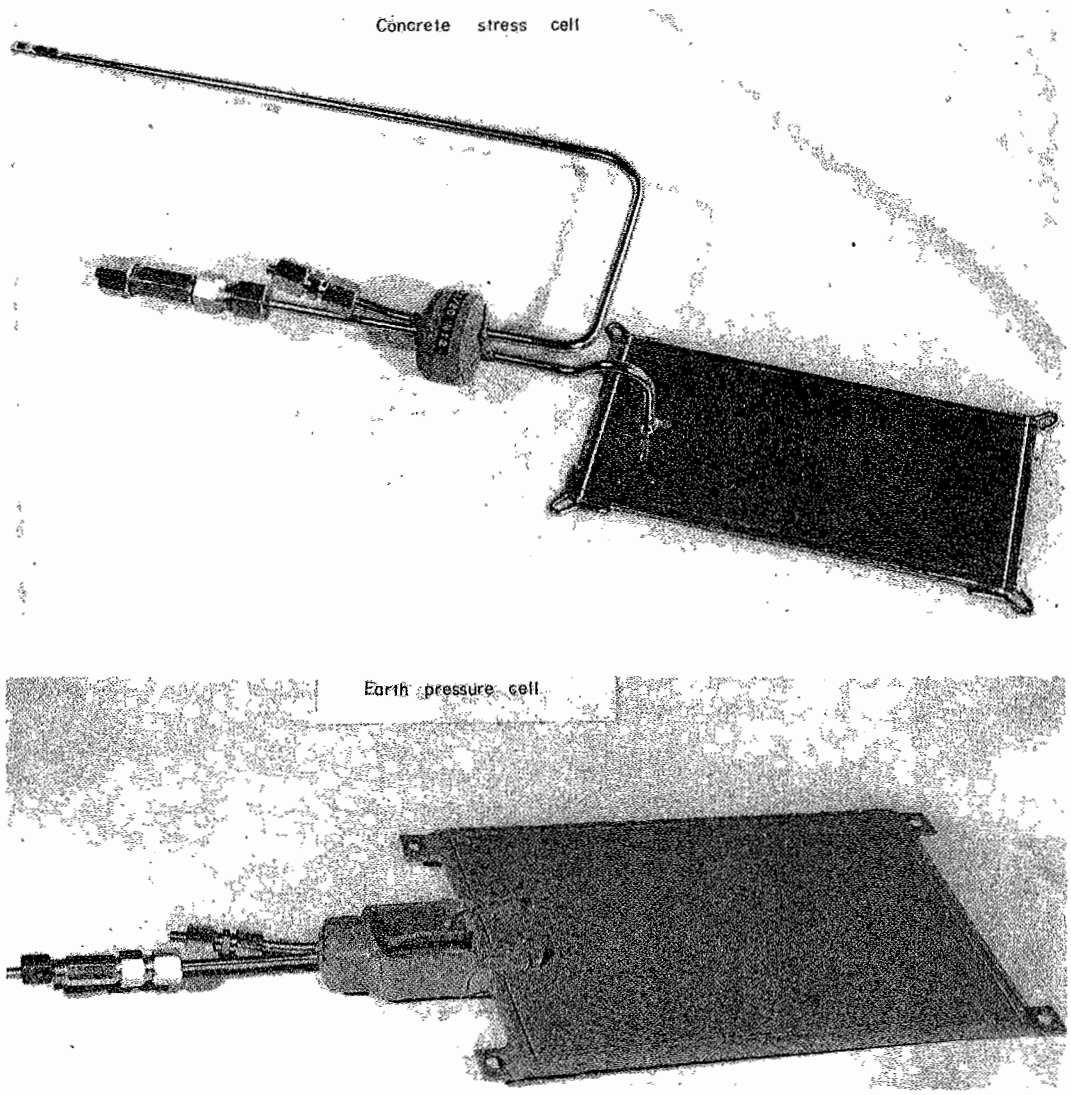

Fig. 1– Esempi di differenti modelli di cella di pressione idraulica (Foto: Gloetzl, W. Germany).

dovrebbe essere il mercurio se la cella deve essere installata in roccia o nel calcestruzzo, ma dovrebbe essere un fluido meno denso, come l'olio, se la cella deve essere installata in terra. La cella, i tubi di connessione e di compensazione e il trasduttore dovrebbero essere completamente riempiti con il fluido privo di bolle d'aria. La cella è solitamente riempita dal produttore in condizioni controllate in fabbrica.

(f) Il tubo di connessione fra il martinetto piatto e il trasduttore può essere saldato sulla faccia della cella o alle sue flange. Le connessioni con la cella e col trasduttore devono essere abbastanza resistenti da evitare danneggiamenti che provochino restringimenti o perdite durante l'installazione e l'utilizzazione. Il tubo di connessione, tipicamente di lunghezza variabile da 20 a 60 mm, dovrebbe essere piegato, come da progetto, in fabbrica per evitare danneggiamenti o pieghe non desiderate.

(g) Il trasduttore idraulico o pneumatico (ad es., Fig. 2) è una valvola idraulica che consiste di un diaframma di acciaio flessibile, plastica o gomma incorporato in una custodia metallica. Il diaframma deve separare completamente il fluido di cella dal fluido di misura in qualsiasi condizione di lavoro. Un lato del diaframma è in contatto col fluido di cella e l'altro è collegato con i tubi di andata e ritorno del fluido di misura. Il trasduttore deve essere progettato in modo tale che la pressione del fluido di cella sia leggermente maggiore di quella del fluido di misura, così da prevenire un flusso di ritorno del fluido di misura. Quando la pressione di misura applicata eccede la pressione di cella di una quantità corrispondente all'inerzia del diaframma, questo si sposterà permettendo un flusso all'interno del tubo di ritorno del fluido di misura.

(h) Il progetto e i materiali del trasduttore dovrebbero essere tali da assicurare la minima inerzia del diaframma, cosicché la pressione del fluido di misura corrisponda il più possibile con quella del fluido di cella all'istante della misura. Questo basso valore dell'inerzia del diaframma dovrebbe essere

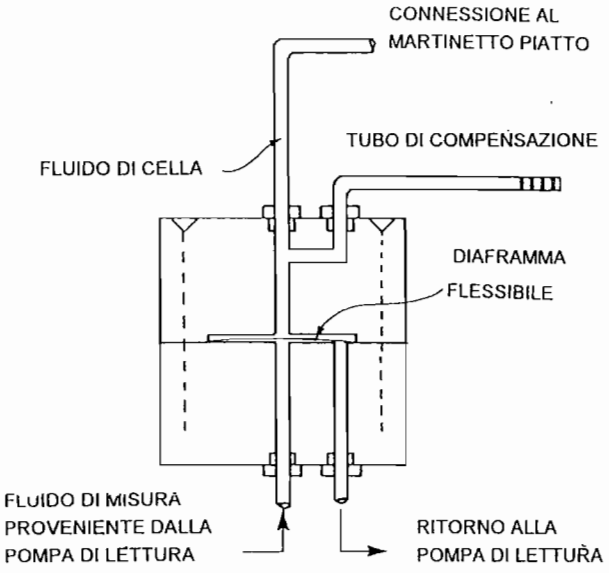

Fig. 2 – Disegno schematico: trasduttore a diaframma idraulico (pneumatico).

mantenuto per tutta la durata di esercizio della cella. La corrosione dei componenti, le variazioni di forma o la flessibilità del diaframma influenzeranno negativamente le caratteristiche operative del trasduttore durante il suo uso. Poiché l'inerzia del diaframma è la differenza tra la pressione di cella e la massima pressione misurata necessaria per l'apertura del diaframma, essa non dovrebbe essere maggiore del 3% della minima pressione che la cella deve misurare.

(i) Il trasduttore è generalmente inserito, insieme con il martinetto piatto, all'interno del terreno circostante o del calcestruzzo e dovrebbe essere protetto dal malfunzionamento dovuto alla pressione trasmessa da questi materiali o da una struttura idonea alla sua protezione oppure applicando un rivestimento di gomma o di un simile materiale protettivo. Il trasduttore dovrebbe essere posizionato facendo riferimento alla posizione del martinetto piatto, in modo tale da non risultare in una zona non rappresentativa o di non uniforme trasferimento della pressione dal materiale circostante al martinetto piatto.

(j) Quando la cella deve essere installata all'interno del calcestruzzo o in una zona ad esso adiacente, per cui l'eventuale ritiro potrebbe creare un vuoto tra il martinetto piatto e la zona circostante, essa dovrebbe essere equipaggiata con un "tubo di compensazione" o con attrezzature analoghe per aumentare il volume del fluido di cella. Il tubo di compensazione può consistere, ad es., di un tubo metallico riempito con il fluido di cella e connesso o al martinetto piatto o al trasduttore. Questo tubo può essere modellato per iniettare ulteriore fluido nella cella, come descritto nel Par. 13(e).

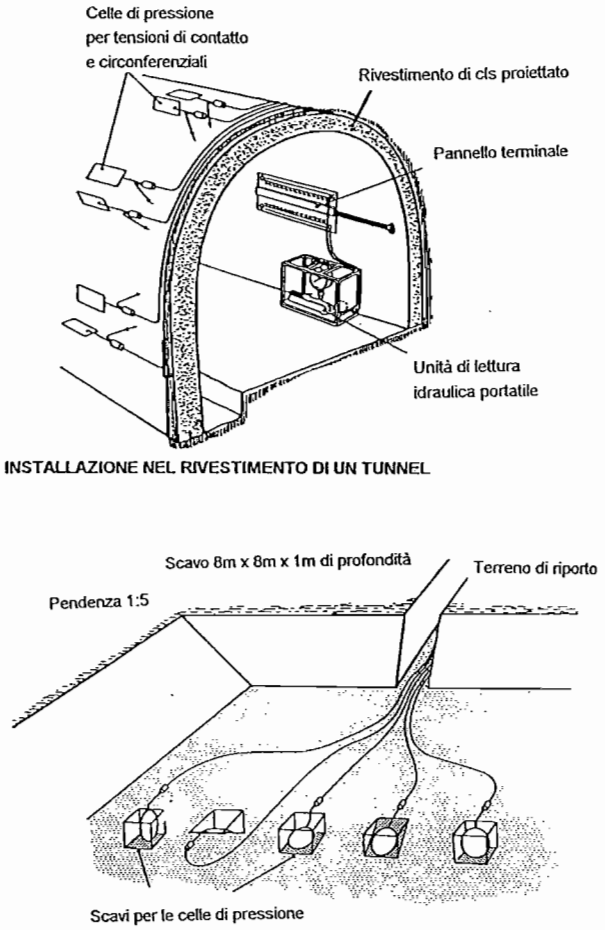

Fig. 3 – Esempi di collegamenti terminali per le celle di pressione idrauliche.

3. I tubi di connessione idraulica, le valvole, gli accoppiamenti, i pannelli terminali etc. per collegare l'unità pompa di lettura a una o più celle (ad es., Fig. 3) dovrebbero rispettare i seguenti requisiti:

(a) Per ogni singola cella è richiesto un tubo di andata del fluido di misura direttamente dalla pompa. Ci potrebbe essere un tubo di ritorno del fluido oppure i tubi di ritorno da più celle potrebbero essere accoppiati e collegati da non meno di 2 tubi alla centralina di lettura.

(b) I tubi dovrebbero essere flessibili per poter essere convenientemente allocati all'interno di una apposita guida fino all'unità di lettura. Ad es., essi possono essere fabbricati in plastica, acciaio o rame. Tali materiali devono rispondere alle caratteristiche elencate successivamente all'interno di questi Metodi Suggeriti.

(c) La lunghezza, i diametri interno ed esterno e il materiale della tubazione dovrebbero essere selezionati in modo tale da assicurare che non si abbiano ostruzioni o perdite durante l'installazione o l'utilizzazione e che la velocità di flusso e la perdita

di pressione lungo la tubazione siano tali che le misure possano essere effettuate entro i limiti di accuratezza richiesti. La lunghezza della tubazione può essere tipicamente variabile da 10 a 500 m. Il diametro interno del tubo è normalmente variabile da 2 a 5 mm, in funzione della viscosità del fluido utilizzato. Nella scelta della tubazione dovrebbe essere richiesto il parere del produttore e, se si hanno dubbi, bisognerebbe effettuare delle prove. La massima pressione cui possono essere soggetti la tubazione e i suoi accessori senza essere danneggiati (pressione di rottura della tubazione) usualmente dovrebbe essere almeno doppia rispetto alla massima pressione che deve sopportare durante l'esercizio.

(d) Quando si devono utilizzare più celle, queste possono essere convenientemente collegate ad una unità terminale (di lettura) con valvola di diramazione, fissata alla struttura o posta all'interno di un vano per gli strumenti. L'unità terminale dovrebbe essere progettata in modo tale da assicurare, a rotazione, una connessione priva di perdite del manometro con ogni singola cella, e da prevenire l'ingresso di aria all'interno della condotta di andata del fluido di misura. Potrebbero essere utilizzati attacchi rapidi.

4. L'attrezzatura di installazione per facilitare il collocamento, l'etichettatura e il riempimento delle celle, delle tubazioni e delle unità terminali, include:

(a) L'attrezzatura per la preparazione dell'alloggio della cella, per il posizionamento della cella e per il fissaggio della stessa, come descritto ai Parr. 9-12 "Installazione".

(b) L'attrezzatura per il collegamento e il fissaggio dei tubi del fluido di misura e delle unità terminali e per l'etichettatura di ciascun tubo con le relative celle.

(c) L'attrezzatura per il riempimento dei tubi di andata con il fluido di misura e per il controllo di eventuali perdite nei circuiti idraulici. In alcuni casi a tal fine si può utilizzare l'attrezzatura di lettura[3].

5. L'attrezzatura di lettura include un serbatoio per il fluido, una pompa con manometro per misurare la pressione applicata, un rivelatore per indicare il ritorno del fluido dalla cella. L'attrezzatura è solitamente posizionata in una unità trasportabile e può fornire aria, azoto od olio in pressione. L'attrezzatura di lettura dovrebbe rispondere ai seguenti requisiti:

(a) La scelta fra i fluidi di cella dovrebbe essere presa in base ai requisiti del progetto. Il gas è conveniente e non inquinante, ma solitamente è impiegato a pressioni inferiori a 3 MPa. Per pressioni elevate e anche per linee di trasporto molto lunghe normalmente si utilizza un liquido (generalmente a bassa viscosità, ad es. una miscela al 90% di cherosene e al 10% di olio non detergente), al fine di evitare ritardi dovuti alla compressibilità. Il gas in pressione è erogato da una bombola di gas compresso dotato di valvola regolatrice. Il liquido in pressione è fornito o da una pompa elettrica o da una pompa manuale.

(b) La pompa o il sistema di pressurizzazione del gas dovrebbero essere capaci di applicare pressioni superiori almeno del 20% alla massima pressione da misurare. Inoltre dovrebbe essere tale da poter incrementare o decrementare gradualmente la pressione applicata all'interno di tutto il range di misura e da poter mantenere questa pressione stazionaria per parecchi minuti.

(c) Il sistema rivelatore del flusso di ritorno, sia a vista (sistema a liquido) sia meccanico (sistema a gas) dovrebbe essere capace di indicare un flusso di ritorno minore del 10% del massimo flusso possibile all'interno del trasduttore di cella e della tubazione.

(d) Il manometro dovrebbe avere un intervallo con valore massimo pari al 110-150% della massima pressione da misurare, e una accuratezza di misura migliore del ±2% della pressione misurata all'interno di questo intervallo.

6. L'attrezzatura per la calibrazione dovrebbe essere capace di assicurare che i requisiti di accuratezza siano rispettati durante tutta la campagna di misura, per esempio:

(a) Il progetto del martinetto piatto dovrebbe essere controllato, ad es. in una pressa, per determinare gli effetti di bordo e per valutare il fattore di correzione appropiato[3].

(b) Può essere necessaria una calibrazione per compensare gli effetti della temperatura nel luogo di installazione della cella[4].

(c) Prima dell'installazione bisogna controllare l'assemblaggio di tutte le componenti del sistema di lettura per determinare l'inerzia del diaframma e gli effetti del ritardo tra il pompaggio e il ritorno del fluido.

(d) Il manometro di lettura dovrebbe essere calibrato almeno prima e dopo la campagna di misura, ad es. utilizzando un manometro di taratura a contrappeso.

7. L'insieme di requisiti di accuratezza devono essere specificati in accordo con i requisiti della campagna di misura.

Generalmente l'accuratezza globale della misura dovrebbe essere migliore del ±5% della pressione da misurare, includendo in tale indicazione gli effetti combinati delle inaccuratezze dovute al ritardo, alla temperatura, alle perdite di pressione nei tubi e gli errori di calibrazione del trasduttore[5].

Procedimento

8. Scelta del sito.

(a) Le celle generalmente sono installate in coppia o a gruppi per misurare nello stesso sito la pressione secondo direzioni differenti. Le celle adiacenti

dovrebbero essere separate da una distanza almeno pari al diametro (dimensione tipica) delle celle, in modo da evitare che la presenza di una cella abbia effetti sulla lettura della cella adiacente. In Fig. 3 si può vedere una tipica disposizione.

(b) L'ubicazione della cella o dei gruppi di celle si determina in base agli obiettivi specifici della misura da effettuare; comunque ogni cella dovrebbe essere posizionata in una zona del terreno non disturbata (per esempio da esplosivo) e rappresentativa del materiale circostante.

(c) La cella deve essere in contatto uniforme e continuo con il materiale circostante. Il terreno adiacente alla cella dovrebbe essere privo di sporgenze o di inclusioni di materiale non rappresentativo che causerebbero irregolarità della pressione sui martinetti piatti.

(d) Le celle non dovrebbero essere posizionate in luoghi in cui potrebbero essere esposte ad apprezzabili cambiamenti di temperatura, dovuti, ad es., all'azione della luce solare o di un vento freddo sulle superfici esposte. In questi casi si potrebbe richiedere un isolamento termico.

9. Installazione in terra.

(a) Quando le celle vanno installate in una terra naturale o in un terrapieno si effettua uno scavo in cui accomodare un gruppo di celle, dopodiché per ogni singola cella si scava manualmente una buca nella posizione esatta in cui verrà allocata, con la faccia piana inclinata correttamente. L'intero scavo dovrebbe essere stabile, con inclinazione adeguata dei lati e dimensione degli stessi non minore di 4x4x2 m di profondità. Le buche delle celle dovrebbero essere scavate con estrema cura per evitare disturbi nella terra, e ognuna di esse dovrebbe essere di dimensioni circa doppie della cella che deve ospitare.

(b) Eccetto che nei casi in cui il rilevato sia di pietrame, i frammenti di roccia di dimensioni maggiori di 1/10 del diametro della cella dovrebbero essere rimossi e rimpiazzati da materiale a grana fina, generalmente compattato manualmente all'interno dei vuoti lasciati dai frammenti di roccia rimossi. Si realizza un letto di materiale fine compattato per separare la cella da qualsiasi irregolarità nei lati delle buche. La cella è dunque fissata nella sua posizione facendo cura che sia in contatto continuo con il materiale sottostante, e cercando di essere sicuri della sua funzionalità.

(c) Ogni buca è successivamente colmata con materiale a grana fine, compattato manualmente ad una densità simile a quella della terra circostante.

(d) Quando il rilevato è di materiale grossolano, come il pietrame, la buca dovrebbe essere di dimensioni maggiori e colmata con materiale di granulometria variabile, con il materiale a grana più grossa nella zona adiacente al materiale di ripiena e il materiale a grana più fine nella zona adiacente alla cella.

(e) La tubazione del fluido di misura è attentamente identificata, etichettata e trasportato alla postazione di lettura alloggiandola in un apposito trincea. La tubazione dovrebbe essere stesa lungo la trincea lasciandola libera di accomodarsi ad eventuali movimenti del rilevato e dovrebbe essere protetta superiormente ed inferiormente con materiale a grana fine contro eventuali danneggiamenti dovuti all'attrezzatura di compattazione. Quando i tubi si devono necessariamente incrociare dovrebbero essere separati da almeno 150 mm di materiale granulare. Nel caso di opere di contenimento di acqua la trincea ed il rinterro devono essere realizzati in modo tale da prevenire perdite ed erosione interna.

(f) Lo scavo in cui accomodare tutte le celle del gruppo è successivamente rinterrato e compattato con il materiale proprio del rilevato, dopo aver provveduto ad eliminare i frammenti di roccia di dimensioni maggiori della dimensione delle celle. Prima di ultimare il rinterro con un'attrezzatura meccanica leggera, bisognerebbe realizzare 3 strati di 10-20 cm ognuno, da compattare con un'attrezzatura manuale. Non bisognerebbe utilizzare rulli vibranti finché non si sia effettuato un rinterro di almeno 2 m.

10. Installazione all'interfaccia tra terra e calcestruzzo o roccia

(a) Quando si piazzano le celle in adiacenza a frangiflutti, pali, muri di sostegno, fognature o altre strutture, esse possono essere attaccate alla cassaforma e inserite nella struttura o assicurate alla struttura prima del rinterro, oppure possono essere inserite nel rinterro a piccola distanza dalla struttura. Il contatto tra la cella e il materiale di rinterro dovrebbe essere realizzato per mezzo di materiale a grana fine, come precedentemente descritto.

(b) L'interfaccia tra la struttura e la cella dovrebbe consistere in un cuscinetto di malta cementizia o di resina epossidica, installata come previsto al Par. 11(c). La cella dovrebbe essere fissata in modo sicuro alla struttura, accertandosi che non vi siano spazi o particelle dure o sporgenze in contatto con la cella.

11. Installazione all'interfaccia fra calcestruzzo (o calcestruzzo proiettato) e roccia.

(a) L'area di roccia o calcestruzzo sulla quale posizionare la cella dovrebbe essere liscia, con ondulazioni al massimo di ±10 mm. Il materiale sciolto dovrebbe essere eliminato. L'area dovrebbe essere rivestita con uno strato di malta cementizia con uno spessore di 15 mm. La cella dovrebbe essere pulita dal grasso e da qualsiasi pittura alluminosa e inserita nella malta cementizia.

(b) La posizione del trasduttore e del tubo di compensazione dovrebbero essere testati assicurandosi che il tubo di compensazione, necessario quan-

do la cella è installata nel calcestruzzo o nelle sue vicinanze, sia accessibile dopo la messa in opera dal calcestruzzo proiettato o del calcestruzzo.

(c) Si realizza un cuscino di malta cementizia (ad es. con rapporto cemento:sabbia pari a 1:2 e valore di consistenza di circa 4 secondi al cono VB) sulla superficie della roccia o del calcestruzzo e si posiziona la cella premendola contro il cuscino di malta cementizia finché lo spessore di quest'ultimo risulti essere di 5-10 mm. Bisogna evitare che rimangano intrappolate bolle d'aria. La cella è assicurata nella sua posizione o per mezzo di perni inseriti nella roccia o nel calcestruzzo, o fissandola all'armatura adiacente. Il fissaggio deve essere tale che la cella resti nella sua posizione durante le fasi di getto del calcestruzzo o del calcestruzzo proiettato.

(d) La tubazione si svolge lungo la parete della struttura o dello scavo fino all'unità di lettura, è etichettata e fissata in modo sicuro all'armatura o, tramite perni, alla roccia o al calcestruzzo. Se la tubazione deve essere inserita nel calcestruzzo o nel calcestruzzo proiettato essa deve essere fissata ad intervalli non superiori di 3 m per tutta la sua lunghezza. Bisogna evitare la formazione di ginocchi o di restrizioni. La tubazione che non è protetta dall'inserimento nel calcestruzzo deve essere protetta in altro modo, ad es. per mezzo di condotte metalliche.

(e) Si deve testare il corretto funzionamento di ciascuna cella e tutte le perdite devono essere riparate prima del getto del calcestruzzo o del calcestruzzo proiettato.

12. Installazione nel calcestruzzo.

(a) La cella è fissata all'armatura o alla struttura. Il suo posizionamento dovrebbe essere tale da assicurare una totale copertura di calcestruzzo. Si deve evitare che restino intrappolate eventuali bolle d'aria.

(b) L'allineamento delle cella dovrebbe essere di $\pm 10°$ rispetto a quello specificato dal cliente. Le celle devono essere fissate saldamente per assicurare che il loro allineamento si mantenga durante il getto del calcestruzzo.

(c) Per le misure nel calcestruzzo con aggregato di grande dimensione (ad es., >30 mm) si consiglia, se possibile, di inglobare le celle in una miscela cementizia speciale in cui siano state rimosse le particelle più grossolane dell'aggregato.

(d) Tutti gli altri aspetti dell'installazione dovrebbero seguire le specifiche del precedente Par. 11.

13. Connessione, riempimento e controllo delle celle.

(a) L'apparecchiatura terminale é fissata saldamente nella sua posizione, o vicino alle celle, ad es. come apparecchiatura a muro, o lontano da esse, ad es. all'interno di un apposito alloggio per gli strumenti. I pannelli terminali dovrebbero essere controllati preventivamente per assicurarsi del corretto funzionamento delle valvole e della mancanza di perdite nel sistema. L'indicazione delle celle dovrebbe essere chiara ed etichettata permanentemente.

(b) La tubazione etichettata è collegata ai terminali appropriati ed è assicurata in sede. Finché è ancora possibile, bisognerebbe effettuare, su ogni cella, un controllo per verificare quale riparare o sostituire, così da assicurare il corretto funzionamento del circuito idraulico.

(c) Le celle in cui si utilizza del liquido come fluido di misura possono essere riempite con la pompa di lettura, ma è conveniente riempirla versando il liquido dal proprio serbatoio. Il metodo di riempimento dovrebbe essere tale da assicurare che i tubi di andata siano completamente riempiti. Nelle zone in cui è facile che resti intrappolata dell'aria bisognerebbe prevedere dei punti di spurgo.

(d) Bisognerebbe effettuare un controllo lungo tutta la tubazione per localizzare le eventuali perdite e per accertarsi che tutte le tubazioni e le celle abbiano un adeguato supporto, siano prive di danneggiamenti e siano protette. Ogni tubo dovrebbe essere temporaneamente scollegato dalla cella e tutto il sistema dovrebbe essere testato ad una pressione pari al 120% della massima prevista in esercizio.

(e) Dopo il completamento dell'installazione e del rinterro, la pressione nelle celle dovrebbe essere nuovamente misurata e registrata. Le celle nel calcestruzzo sono dunque ripressurizzate, usualmente dopo un periodo di due o tre giorni per permettere il ritiro del calcestruzzo e la dissipazione del calore dovuto all'installazione, così da assicurarsi di leggere un valore leggermente positivo. Ciò può essere ottenuto, ad es., strozzando il tubo o per mezzo di una pompa di iniezione. Il valore della pressione dopo la compensazione è considerato come valore della lettura di zero, alla quale bisogna riferire tutte le seguenti letture. Tale valore non dovrebbe eccedere il 5% della massima pressione prevista in esercizio.

14. Procedura per le letture.

(a) L'attrezzatura di lettura dovrebbe essere calibrata almeno prima dell'inizio della campagna di prove e dopo il suo completamento e dovrebbe essere controllata alla fine di ogni serie di letture. Tutti i malfunzionamenti dovrebbero essere corretti immediatamente.

(b) L'unità di lettura è collegata ai tubi di andata e ritorno della cella, facendo attenzione ad evitare l'intrappolamento di aria nei tubi di andata.

(c) Si incrementa gradualmente la pressione fornita finché non si registra un flusso di ritorno. Questo dovrebbe essere mantenuto per un periodo di almeno 4 minuti per assicurare la rimozione di bolle d'aria (sistema liquido) e per stabilire le condizioni stazionarie. Si esegue, infine, una lettura approssimata della pressione di andata.

(d) Si decrementa la pressione e la si incrementa di nuovo ad una velocità molto bassa e costante (usualmente 3-4 cm^3/min) finché si osserva il flusso di ritorno. Si annota la 'pressione di by-pass', essendo questa la minima pressione alla quale, sotto le condizioni di flusso minimo, si ottiene un flusso di ritorno stazionario. Solitamente c'è un picco caratteristico nella curva pressione-flusso, dovuto all'inerzia della valvola a diaframma. Questo picco dovrebbe essere ignorato e, come lettura, si dovrebbe considerare il valore della pressione stazionaria (Fig. 4).

(e) Bisognerebbe effettuare varie letture finché non si stabilisce un valore coerente di Pr. Per ogni misura bisognerebbe eseguire un minimo di tre letture.

(f) Quando si hanno perdite o blocchi parziali nella tubazione si possono utilizzare speciali procedure per ottenere una lettura approssimata[7]. I requisiti di tali procedure speciali dovrebbero essere annotate nella relazione.

(g) La pressione all'interno dei tubi di andata dovrebbe essere mantenuta ad un livello tale da evitare l'ingresso di aria, oltreché ben al di sotto della pressione di rottura dei tubi stessi.

(h) La procedura di lettura è, dunque, ripetuta per ogni cella per la quale è richiesta la lettura.

(i) La frequenza delle letture dovrebbe essere specificata in base alle richieste della campagna di prova, e dovrebbe essere modificata di tanto in tanto in funzione della velocità di variazione della pressione registrata.

(j) I risultati in situ dovrebbero essere registrati su un foglio simile a quello di Fig. 5, concepito in modo da facilitare il confronto di una serie di letture con le serie precedenti.

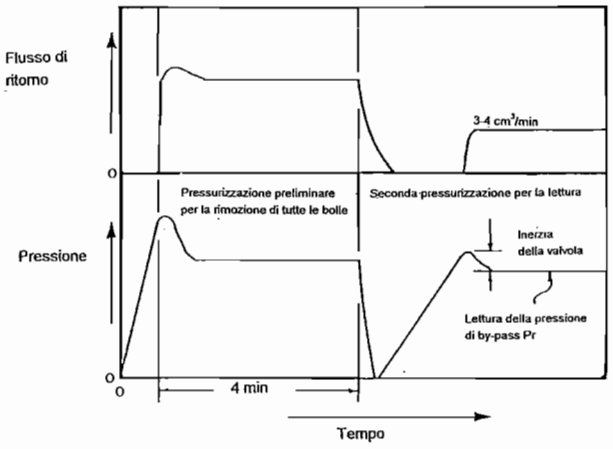

Fig. 4 – Sequenza di pompaggio per le letture (Vedi Par. 14).

Calcoli

15. (a) La pressione di cella P si ottiene dalla lettura di Pr eseguendo le seguenti correzioni:

$$P = (Pr - Pi - Ph - Pf) \times E$$

dove

Pr è la pressione di lettura

Pi è la pressione di cella iniziale applicata durante le operazioni e (nel calcestruzzo) successivamente aggiustata per la compensazione del ritiro.

Ph è la correzione di carico statica per la pressione dovuta alla differenza in altezza fra la cella e l'unità di lettura (solo per il liquido; per il gas Ph = 0).

Pf è una correzione per le perdite d'attrito all'interno della linea d'andata del fluido.

E è un fattore correttivo (minore di 1.0) per compensare gli effetti di bordo della cella.

(b) In molte applicazioni sono di interesse solo le variazioni di pressione. In questi casi si esegue una lettura iniziale Pi dopo il completamento dell'installazione, che include i contributi di Ph e Pf, i quali rimangono costanti durante tutte le fasi della campagna di prova. In questi casi si ha:

$$P = (Pr - Pi) \times E$$

Si deve comunque notare che la minima pressione che queste celle possono registrare è (Pi + Ph + Pf), cosicché se bisogna registrare valori di pressione bassi è preferibile utilizzare un gas come fluido di misura.

(c) La correzione di altezza Ph può essere calcolata come segue:

$$Ph = \gamma(h_1 - h_2)$$

dove

γ = peso unitario del fluido di misura, g/cm^3 (per i gas il peso unitario è nullo)

$h_1 - h_2$ = differenza in altezza (cm) fra l'unità di lettura e la cella (positiva se la cella è al di sotto dell'unità di lettura)

Ph è dunque ottenuto in g/cm^2 e dovrebbe essere convertito in kPa moltiplicando per 0.0981.

(d) La correzione per le perdite d'attrito nel tubo Pf dovrebbe essere misurata durante l'installazione, prima di collegare la cella, essendo la pressione richiesta per mantenere un flusso stazionario attraverso la tubazione con una velocità di flusso simile a quella ottenuta durante le misure. In condizioni normali, con tubazioni non ostruite e correttamente scelte, questa correzione dovrebbe essere piccola.

(e) Il fattore di correzione E dovrebbe essere stabilito dal produttore sulla base dei test di controllo in una pressa. A tal fine bisognerebbe inserire una cella rappresentativa all'interno di un blocco di ce-

DATI IN SITU: CELLE DI PRESSIONE IDRAULICA

LOCALITA' TUNNEL CITTA' DI SANTA LUCIA STAZIONE N. 14

DATA DI INSTALLAZIONE 28-dic-77 PROGRESSIVA 6+42

DATA	ORA	TEMP.	cella n.	LETTURE (kPa)								ANNOTAZIONI
1978		°C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
03-gen	22:10	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Pressione di compensazione
10-gen	17:50	13	6	35	75	84	111	84	1	2	2	
15-gen	17:30	9	11	72	198	136	191	293	9	3	3	
01-feb	8:35	15	15	91	253	193	235	354	16	4	3	
15-feb	9:15	17	17	105	310	215	252	402	21	5	4	
01-mar	23:50	19	20	128	335	235	273	460	28	5	6	Barre di sostegno
15-mar	21:00	19	23	151	342	240	281	481	35	8	8	
03-apr	12:30	21	25	164	353	246	289	502	45	11	10	
01-mag	21:00	19	27	175	362	251	294	520	53	15	15	Rivestimento interno
10-giu	18:35	23	29	184	368	255	298	541	58	18	19	
30-lug	22:00	21	30	190	370	260	300	560	60	20	20	

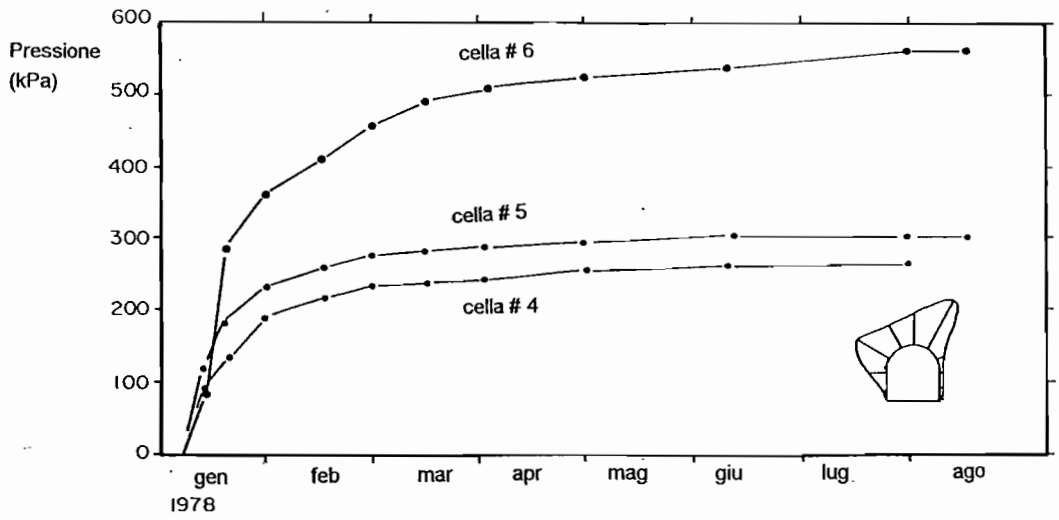

Fig. 5 – Esempio, presentazione dei risultati della cella di pressione.

mento di dimensioni almeno triple rispetto alla cella. Solitamente la correzione è significativa per celle di piccole dimensioni.

(f) In più, può essere richiesto un fattore di correzione per la temperatura in determinate applicazioni, come per le celle da inserire nel calcestruzzo[4]. La correzione Pt da sottrarre alla lettura può essere espressa come:

$$Pt = Kt(tr - ti)$$

dove
(tr–ti) è l'incremento di temperatura (°C) dall'istante della lettura iniziale Pi; Kt è un coefficiente che esprime la risposta del sistema (cella, fluido e materiale circostante) alla temperatura.

Sperimentalmente, si è trovato che il valore di Kt è compreso nell'intervallo $20 \div 50$ kPa/°C per le celle installate nel calcestruzzo. Il valore effettivo dipenderà dalle dimensioni della cella.

(g) L'entità e l'importanza delle precedenti correzioni, che in molti casi si riveleranno trascurabili, dovrebbero essere valutate all'inizio della campagna di prova e dovrebbero essere annotate nel rapporto finale, a prescindere dalla loro significatività.

(h) I corretti valori della pressione di cella P dovrebbero essere tabellati e graficati così da mostrare le fluttuazioni di pressione come una funzione del tempo trascorso dopo l'installazione.

Presentazione dei risultati

16. Se non diversamente precisato, i risultati dovrebbero essere presentati in due differenti forme:

un Rapporto di Installazione in cui sono precisate le informazioni principali sugli strumenti del sistema all'istante dell'installazione; a questo rapporto devono seguire i Rapporti del Monitoraggio in cui sono riportati periodicamente i risultati delle osservazioni di routine. I Rapporti del Monitoraggio saranno generalmente richiesti ad intervalli frequenti al fine di minimizzare il ritardo tra la scoperta di un comportamento anomalo e l'esecuzione di tutti gli interventi che possono essere necessari.

17. Il Rapporto di Installazione dovrebbe contenere quanto segue:

(a) Una descrizione e gli schemi della strumentazione utilizzata per il monitoraggio, compresi le specifiche dettagliate di funzionamento e i manuali di istruzioni.

(b) I dettagli dei metodi utilizzati per l'installazione, la calibrazione e il monitoraggio; bisogna fare riferimento a questi Metodi Suggeriti dell'ISRM, spiegando soltanto le differenze rispetto alle procedure qui raccomandate.

(c) Una pianta in cui siano specificate le posizioni delle celle di pressione rispetto alla configurazione strutturale e al terreno o al calcestruzzo circostanti.

(d) Per ogni cella un rapporto in cui sia indicato il valore di pressione iniziale al momento dell'installazione e, se applicabile, della pressione di compensazione per il ritiro. Dovrebbero essere inclusi i dettagli della calibrazione e della determinazione dei fattori di correzione, insieme con i commenti relativi sulle peculiarità o sui problemi incontrati durante l'installazione di ciascuna cella.

18. I Rapporti di Monitoraggio dovrebbero includere quanto segue:

(a) Un foglio aggiornato dei risultati del monitoraggio e grafici dei risultati simili a quelli mostrati in Fig. 5.

(b) Un breve commento ponendo l'attenzione sui cambiamenti significativi di pressione e su tutti i malfunzionamenti cui sono andati incontro gli strumenti a partire dal precedente rapporto.

(c) I risultati di tutte le calibrazioni o controlli degli strumenti eseguiti a partire dal precedente rapporto.

Note

1. Gli effetti di bordo si verificano per la presenza della saldatura lungo la circonferenza del martinetto piatto. Essi sono maggiori quando la cella è piccola e costruita rigidamente. Lo spessore della flangia lungo la circonferenza della cella è anch'esso critico, dal momento che la flangia può impedire parzialmente il trasferimento degli sforzi alla cella dal materiale circostante. Gli effetti di bordo sono difficili da determinare, ma devono essere stimati sperimentalmente inserendo la cella all'interno di un grosso blocco di calcestruzzo, sottoposto successivamente a compressione uniassiale in condizioni controllate di laboratorio.
2. Il mercurio utilizzato per riempire le celle da utilizzare in roccia o nel calcestruzzo può corrodere i metalli. Le celle che devono contenere mercurio generalmente sono costruite in acciaio inossidabile, invece le celle riempite di olio possono essere costruite di acciaio dolce, rame o materiali simili.
3. Le celle possono essere riempite con una pompa manuale quando la lunghezza del tubo di andata e il volume della cella sono relativamente piccoli. In caso contrario è più conveniente riempire la cella versando il liquido dal proprio serbatoio, utilizzando un collettore progettato appositamente.
4. Probabilmente il miglior metodo per la determinazione della correzione di temperatura è di incorporare nella struttura da monitorare una cella speciale addizionale che è soggetta alla temperatura ambiente ma non alla pressione. Un apparente aumento della pressione dovuto ad una variazione di temperatura può, dunque, essere sottratto alla lettura di pressione eseguita sulla cella adiacente che è stata installata in modo tale da essere soggetta alla pressione della struttura circostante. Questa precauzione sarà raramente necessaria in quanto in molte circostanze si può dimostrare che il fattore di correzione per la temperatura risulta essere insignificante.
5. Possono esistere ulteriori e largamente sconosciute fonti di errori, per esempio dovuti ad un inadeguato rapporto delle rigidezze delle celle e del materiale circostante; al posizionamento della cella in una zona non rappresentativa della struttura; all'inadeguata dimensione del martinetto piatto per l'applicazione in corso. Queste fonti di errore possono essere evitate con un'attenta pianificazione del programma di strumentazione, prima dell'inizio della campagna di prova.
6. L'alluminio reagisce col cemento portland formando un gas, per cui le celle da installare nel calcestruzzo non dovrebbero contenere componenti di alluminio. In alcuni casi le celle fornite dal produttore sono protette dalla corrosione con una pittura di alluminio che dovrebbe essere rimossa prima dell'installazione nel calcestruzzo, per evitare l'accumulazione di gas che potrebbe seriamente influenzare le misure di pressione.
7. Le tubazione di andata del fluido della cella di pressione possono andare incontro a perdite o a blocchi parziale durante il corso della campagna di prova, a causa di eccessivi movimenti del terreno. Una perdita sarà individuata all'unità di lettura, in quanto risulterà impossibile mantenere una pressione stazionaria dopo l'apertura della valvola a diaframma. Un blocco sarà individuato alla pompa, a causa della diminuzione della velocità del flusso di ritorno. Generalmente si può continuare ad eseguire le letture, a patto che tali problemi non siano troppo seri, controllando accuratamente la velocità di flusso applicata e purché i risultati siano attentamente esaminati ed interpretati. Se si va incontro a tali problemi la stessa unità di pompaggio dovrebbe essere controllata. La possibilità di blocchi o perdite è la principale ragione per cui queste specifiche si riferiscono ad ogni singola linea di andata ad ogni cella, cosicché se un tubo ne è affetto gli altri no.

Bibliografia

AGARWAL S. L. and VENKATESAN S. (1965) – *An instrument to measure skin friction and normal earth pressure on deep foundations*. Am. Soc. Test. Mats., STP392.

ARTHUR J.R.F. and ROSCOE K.H. (1961) – *An earth pressure cell for the measurement of normal and shear stresses*. Civ. Engng. publ. Wks Rev., n. 659.

BROWN S.F. (1971) – *The performance of earth pressure cells for use in road research.*, Civ. Engng publ. Wks Rev. 66, pp. 160-165

ESCARIO V., SAGASETA C. (1972) – *Lateral forces on an experimental section of the Madrid subway.* Proc. 5th Europian Conf. Soil Mech. Found. Engng., vol. I, Madrid.

FRANZ G. (1958) – *Umnittelbare Spannungsmessung in Beton und Baugrund.* Der Bauingenieur, Heft 5.

HABIB P. and MARCHAND R. (1952) – *Mesures des pressions de terrains par l'essai de verin plat.* Ann. I.T.B.T.P., n. 58, Paris.

HAMILTON J.J. (1960) – *Earth pressure cells, design, calibration and performance.* NRC., Div. of Bldg. Res. Tech. P. n. 109, Ottawa.

KALLSTENIUS T. and BERGAU W. (1956) – *Investigations of soil pressure measuring by means of cells.* Royal Swedish Geotechnical Inst., Proc. n. 12, Stockholm.

KRUSE G.H. (1965) – *Measurement of enbakment stresses on a hundred-foot-high retaining wall. Instruments and apparatus for soil and rock mechanics.* A.S.T.M. Stand. 392, pp. 131-142.

LEVILLAIN J.P. (1973) – *Mesure des pressions derrière et sous un mur de soutenement.* Rapport de recherche n. 22, Lab. Cent. Ponts et Chaussées, Paris.

MASSARSCH R. (1975) – *New method for measurement of lateral earth pressure in cohesive soils.* Can. Geotech. J. 12.

PANEK L.A. (1961) – *Measurement of rock pressure with an hydraulic cell.* Proc. A.I.M.E. Meeting St. Louis, TP61.

PEATTIE K.R. (1958) and SPARROW R.W. – *The fundamental action of earth pressure cells.* Conf. on Earth Pressure Problems.

SAUER G. and JONUSCHEIT P. (1975) – *Kräfteumlagerungen in der Zwischenwand eines Doppelröhrentunnels im Zuge eines Synchronovortriebes.* Rock. Mech. H.7/3.

SAUER G. and SHARMA B.A.(...) – *A system for stress measurement in costructions in rock. Field Measurements.* Rock Mechanics; Proc. Int. Symp. 1, pp. 317-329.

SCHOBER W. (1965) – *Large scale application of Glötzl type hydraulic stress cells at the Gepatsch rockfill dam Austria.* Baumess Technick, Bericht 1.

THOMAS H.S.H. and WARD W.H. (1969) – *The design, costruction and performance of a vibrating wire earth pressure cell.* Géotechnique, 19, pp. 39-51.

TROLLOPE D.H. and CURRIE D.T. (1959) – *Small embedded earth pressure cells-their design and calibration.* Third Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.