

Trattamenti e strumentazione delle fondazioni delle dighe

P. SEMBENELLI *

SOMMARIO: Sottolineando la notevole carenza di studi teorici e di analisi dei dati di comportamento delle fondazioni di dighe in esercizio viene esaminata rapidamente l'evoluzione dei sistemi di trattamento delle fondazioni per mezzo di iniezioni. Viene sottolineata l'importanza e la progressiva diffusione degli schermi di drenaggio nelle spalle di dighe anche di modesta altezza. Si parla infine dei diaframmi rigidi in calcestruzzo per impermeabilizzare fondazioni alluvionali e si commentano i problemi che nascono nella zona di unione fra il diaframma e l'elemento impermeabile della diga. Vengono illustrate soluzioni recentemente adottate in differenti ipotesi progettuali. Si sottolinea infine la necessità di una adeguata e moderna strumentazione delle fondazioni delle dighe.

Credo si possa affermare che esiste una decisa sproporzione fra le energie dedicate allo studio e al trattamento delle spalle e delle fondazioni di una diga, e le energie dedicate alla diga intesa come struttura fuori terra. Altrettanto può dirsi per i procedimenti di dimensionamento, di verifica e di previsione comportamentale a disposizione dei progettisti.

I crolli della diga del Malpasset nel '59 e della diga di Teton nel '76 hanno mostrato quanto questa sproporzione sia reale e quanto vitali siano le fondazioni per il buon comportamento di qualsiasi tipo di diga.

Dati statistici mostrano che il 45% dei crolli è dovuto a filtrazioni, a erosione, a rottura di condotti nelle fondazioni, mentre i crolli dovuti a instabilità delle strutture fuori terra sono soltanto il 15%.

Vogliamo chiederci quali possono essere le cause di questa situazione? La causa fondamentale è la maggior complessità del contesto fondazioni-spalle, rispetto a quello, ben più omogeneo e discretizzabile, della struttura vera e propria della diga. Ma c'è poi la disponibilità di una maggiore varietà di procedure di prova e di metodi di calcolo, cui il progettista può far ricorso quando consideri la parte fuori terra anziché le fondazioni.

Dobbiamo purtroppo riconoscere che troppe volte confondiamo Processo con Sostanza. Una volta confusi questi due momenti, acquista validità una logica distorta, secondo la quale quanto più complesso e raffinato è il procedimento, tanto migliori sono i risultati. Questa escalation porta a sostituire l'esecuzione di un determinato calcolo al raggiungimento di una

reale conoscenza delle condizioni e delle caratteristiche della fondazione.

Continuando, se mi è concesso, questa digressione vorrei auspicare che nei Testi Legislativi e regolamentari venga messa in evidenza l'importanza di una reale e ampia conoscenza delle caratteristiche fisiche delle fondazioni e dei materiali con i quali la diga sarà costruita.

Ritornando al tema, mi limiterò a parlare dei trattamenti con iniezioni, drenaggi o diaframmi di fondazioni rocciose non carsificate e di fondazioni alluvionali.

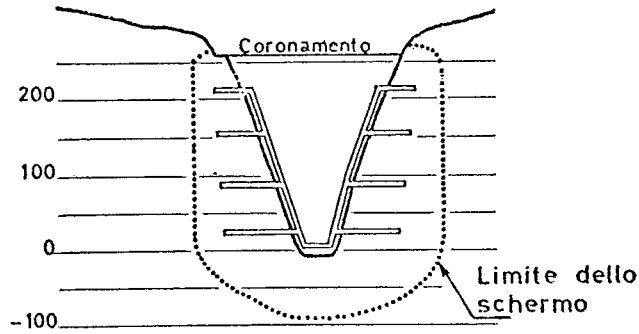
L'iniezione, come primo e più applicato metodo di trattamento, è forse quello che più ha evoluto. La sua applicazione si è fatta più diffusa e massiccia col passare degli anni. Nella Figura 1 lo schermo di iniezioni della diga di Chicoasen in Messico, ora in costruzione, viene confrontato con lo schermo di iniezioni della diga del Vajont; entrambe le dighe chiudono una gola calcarea, su un'altezza di 265 m.

La pratica recente prevede per le iniezioni in una roccia una quantità iniziale minima di fori ed un raffittimento progressivo regolato dagli assorbimenti, una pressione di iniezione prefissata, una densità iniziale della boiaccia basata sull'assorbimento d'acqua registrato durante le fasi di prova, e una graduale modifica delle densità della boiaccia durante il processo di iniezione. Con l'impiego di cementi a finezza controllata, di miscele ternarie e di attrezzature precise ed efficienti si può dire che questa tecnologia sia praticamente ottimizzata.

Ancora carente è invece l'aspetto previsionale ed il lavoro teorico fatto sui trattamenti con iniezioni. Quanto alle analisi teoriche non c'è molto di più di quanto fu proposto da Dachler nel 1936. Secondo Dachler l'efficienza di uno schermo di iniezioni non arriva a superare il 30%, come mostra la Figura 2.

* Dott. Ing. Piero SEMBENELLI, Ingegnere Capo Gruppo Geotecnico, ELC-Electroconsult, Milano.

Diga del VAJONT 1958



Diga di CHICOASEN 1978

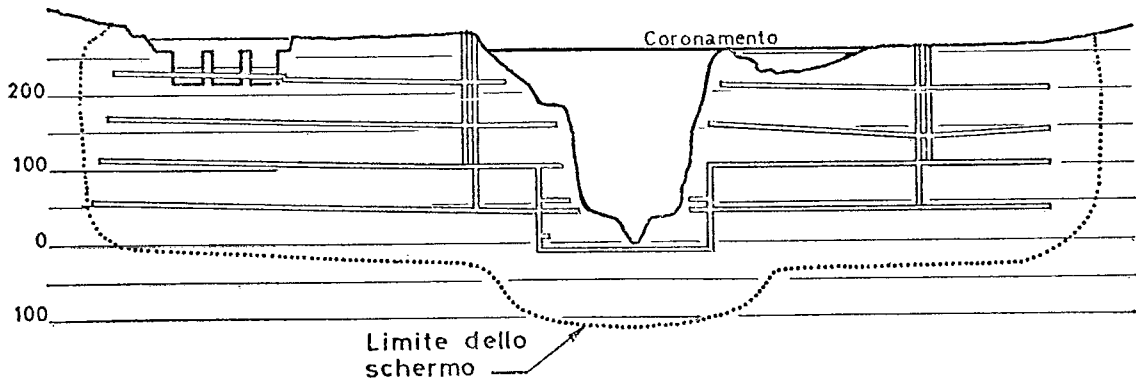
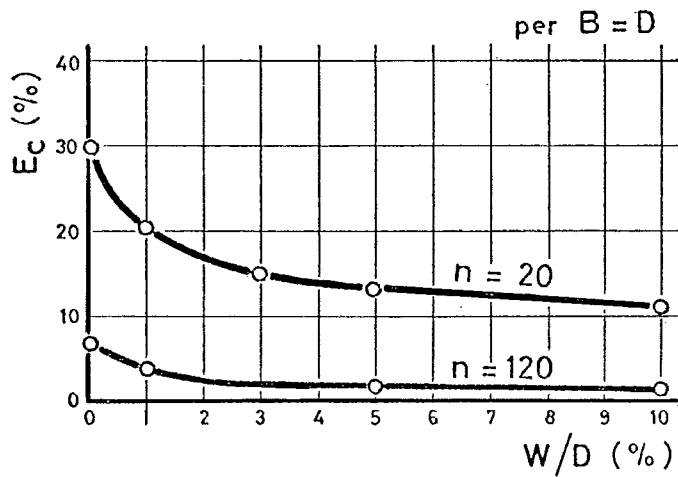


Fig. 1. - Evoluzione delle dimensioni dello schermo di iniezioni.



$$E_c = \frac{q - q_c}{q} = \frac{\ln \operatorname{sen} \frac{\pi W}{2D}}{\ln \operatorname{sen} \frac{\pi W}{2D} - \frac{n\pi B}{4D}}$$

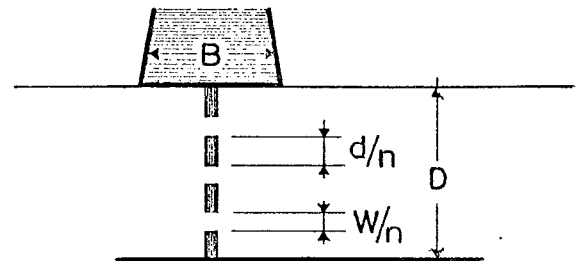


Fig. 2. - Efficienza di uno schermo di iniezioni secondo l'analisi teorica di Dachler.

- B = larghezza di base dell'elemento impermeabile
- D = spessore dello strato permeabile
- d = lunghezza di schermo ~ impermeabile
- W = lunghezza complessiva dei tratti non iniettati
- n = numero dei tratti non iniettati
- q = portata filtrante in assenza di schermo
- q_c = portata filtrante con lo schermo
- E_c = efficienza dello schermo
- d/D = rapporto di intercettazione
- W/D = rapporto di qualità dello schermo

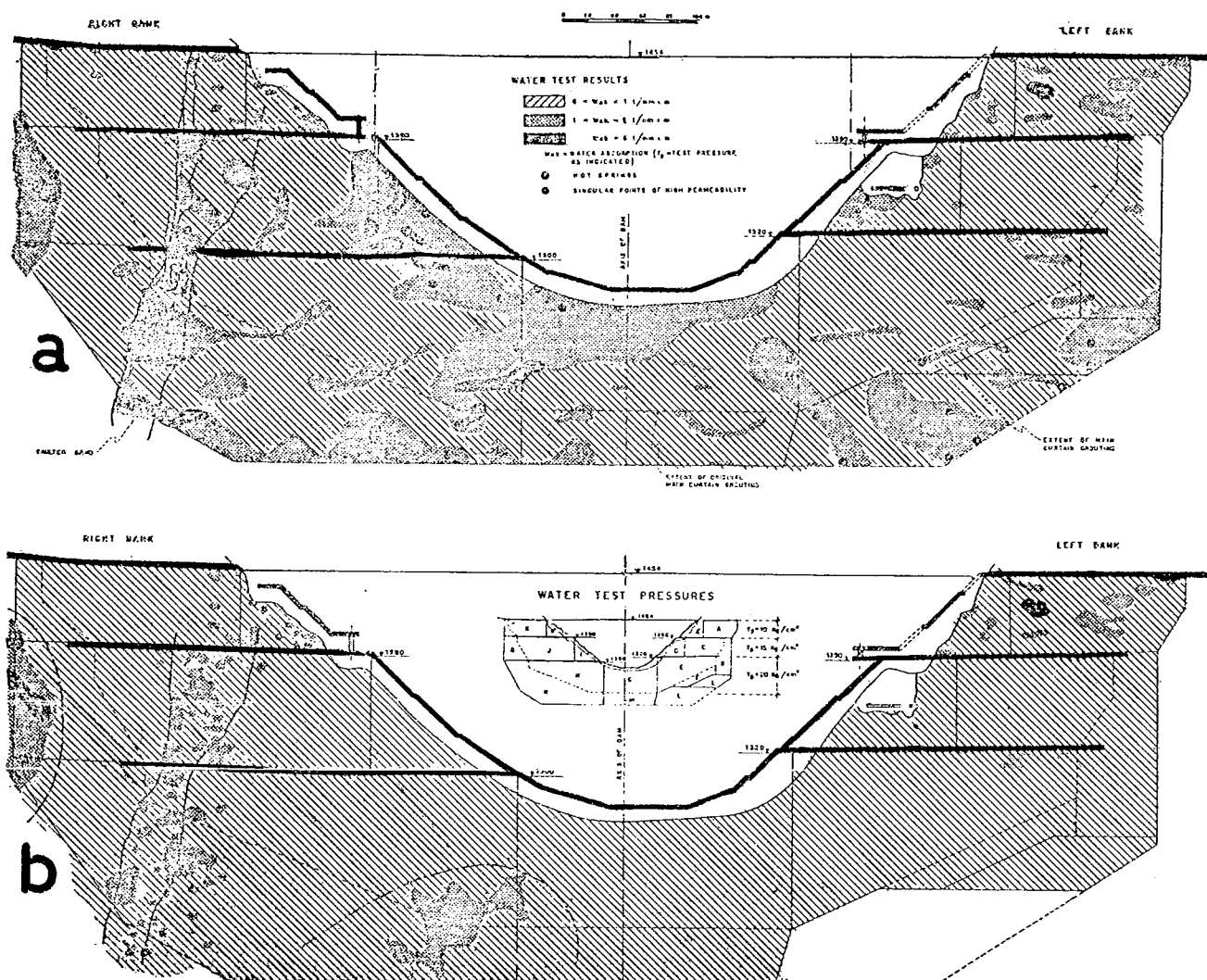


Fig. 3. - Controllo dell'effetto di un trattamento con iniezioni (diga di Kurobe IV) (a = prima del trattamento, b = dopo il trattamento).

Anche dal lato interpretativo gli sforzi sono generalmente sproporzionati alla delicatezza e all'importanza del trattamento. Un esempio di minimo può essere la zonizzazione della fondazione fatta in base agli assorbimenti d'acqua rilevati prima e dopo il trattamento con iniezioni, che mostra la Figura 3.

Va detto per inciso che in nessun caso la quantità di boiaccia iniettata può essere presa a dimostrazione della bontà e dell'efficienza del trattamento.

Schermi di iniezioni vengono utilizzati con successo anche per ridurre la permeabilità di masse alluvionali. Per questo tipo di problemi un progresso fondamentale è stato l'introduzione della colonna di iniezioni con tubo a manicotti.

Non viene tuttavia sempre colta con sufficiente chiarezza la differenza fondamentale che esiste tra una iniezione in roccia, caratterizzata

da giunti e da fessure, e una iniezione in un mezzo granulare, caratterizzato da pori.

Materiali, criteri e metodi operativi, debbono per forza modificarsi al passare dall'uno all'altro materiale.

Anche per le iniezioni in alluvione l'analisi teorica previsionale richiede ulteriori sforzi tanto più che i risultati ottenuti con questa tecnologia, sono come spesso accade, generalmente positivi ma in alcuni casi non del tutto soddisfacenti.

L'argomento merita quindi ulteriore approfondimento con nuove ricerche teoriche e analisi dettagliate dei lavori eseguiti.

Nella maggior parte delle dighe è tuttavia più importante controllare le filtrazioni che eliminarle. Questa considerazione, cui spesso non viene dato il peso che merita, ci porta a parlare dei drenaggi. Purtroppo per gli schermi di drenaggio si può dire ancora meno di quanto non

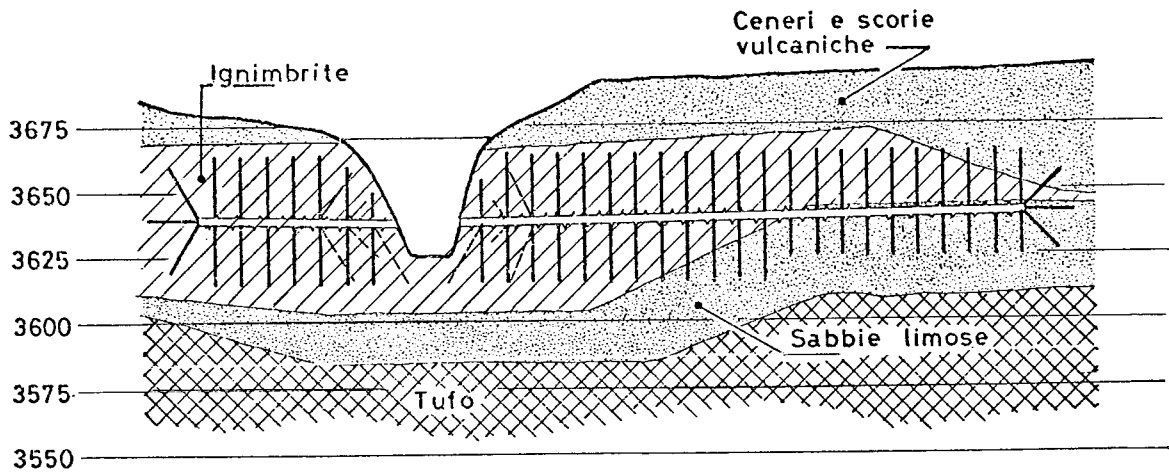


Fig. 4. - Estensione di uno schermo di drenaggi in fondazione sensibile al dilavamento (diga di Aguada Blanca).

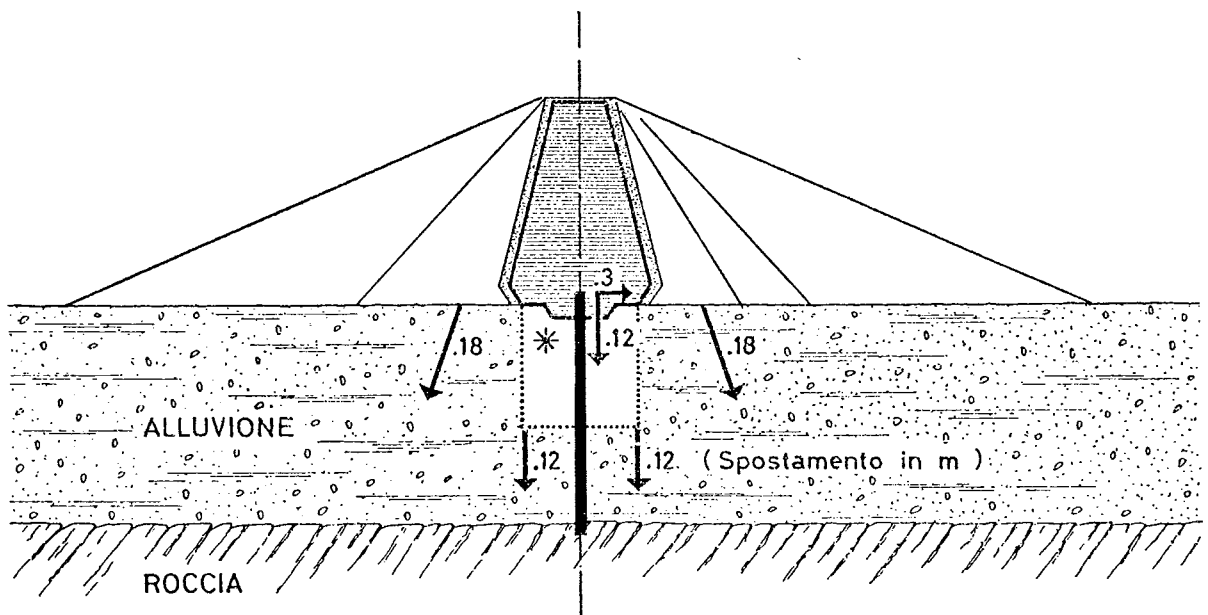


Fig. 5. - Spostamenti in testa di diaframma in calcestruzzo (diga della Villita) * (nella parte sommitale del diaframma sono state calcolate sollecitazioni di compressione di circa 260 kg/cm²).

si sia detto per gli schermi di iniezione. Scarseggiano teorie, giustificazioni progettuali e documentazioni su risultati ottenuti.

I progettisti seguono criteri spesso opposti. Si va dall'assenza totale di schermi di drenaggio a schermi molto estesi, quale quello illustrato nella Figura 4.

Anche questo tema merita e necessita approfondimenti sia sul piano teorico che sul piano pratico delle tecniche e dei risultati.

Non possiamo dimenticare, tra i dispositivi per il trattamento delle fondazioni, i diaframmi in calcestruzzo. Questa soluzione, frutto delle capacità e dell'inventiva dei vari geotecnici italiani (tra i quali mi si consenta includere l'ing.

Veder) ha avuto molte applicazioni in Italia e all'estero. Basterà citare la diga di Maniquagan 3, dove con un diaframma si raggiunsero profondità di 130 m, dando una dimostrazione unica della potenzialità di questa soluzione e dell'eccellenza delle tecnologie costruttive disponibili.

Anche nel campo dei diaframmi alcune realizzazioni sono state coronate da successo, altre sono state insoddisfacenti. Come tutti gli interventi in fondazione anche un diaframma implica dei problemi. Di questi due sono fondamentali: primo, le deformazioni indotte sul diaframma dal carico della struttura e da quello idrostatico; secondo, lo stato tensionale che

il diaframma può indurre nelle parti adiacenti della struttura.

In molti casi per i quali sono disponibili misure accurate, si è notato che il modesto spessore del diaframma e le sue caratteristiche superficiali, sono tali da farlo assestare insieme alla fondazione, sia quando esso è pensile come nella diga di Vernago di cui riferiscono Croce e coautori, sia nel caso in cui il diaframma arriva in roccia come alla diga di Villita schematizzata nella Figura 5. Alla Villita il diaframma ha una profondità di quasi 80 m.

L'alluvione, per ridurre gli assestamenti è stata iniettata fino a 25 m di profondità. Pur arrivando il diaframma decisamente in roccia, si è assestato di 0.12 m sia in testa che 25 m più in basso, cioè al limite dello spessore di alluvione iniettata. Ciononostante il diaframma non ha perduto la sua impermeabilità e continua a svolgere la funzione per cui è stato previsto, in modo soddisfacente.

Indubbiamente in questo caso il diaframma è stato sottoposto a un livello di sollecitazioni che lo ha plasticizzato e deformato ben più di quanto non si usi pensare quando si decide di adottare questa soluzione.

Misure di altra natura eseguite su alcuni diaframmi importanti confermano la possibilità di deformazioni considerevoli nel diaframma e di un suo assestamento solidalmente con la fondazione. Sulla testa del diaframma di Maniquagan 3 e di Eastmain fu adottato lo schema che appare esemplificato in Figura 6a. Per segnalare livelli eccessivi di pressione al contatto nucleo-cunicolo furono installate delle celle di carico e per ovviarvi furono disposte sacche di bentonite e valvole di spurgo operando le quali si

possono ridurre le pressioni di contatto. All'atto pratico non furono mai misurate pressioni preoccupanti né fu mai necessario ridurle.

La Figura 6 confronta tre diverse soluzioni derivate da tre concezioni della interazione diaframma-struttura. Alla soluzione della Figura 6a si giunge ammettendo che il diaframma non si assesti con la struttura; l'aggiunta di sacche di bentonite che possano venire scaricate qualora si raggiunga un livello di sollecitazione eccessivo, permette di proteggere il diaframma.

Alla soluzione della Figura 6c si giunge ammettendo che il diaframma si assesti con il terreno. La preoccupazione fondamentale diviene in questo caso assicurare un percorso di filtrazione attorno alla testa del diaframma sufficientemente lungo. Questa soluzione è stata adottata alla diga di Bakolori, di cui riferiscono Calvino e coautori.

Alla soluzione della Figura 6b si giunge se esiste sia la possibilità che il diaframma non si assesti sia la possibilità che esso subisca assestamenti inferiori a quelli totali della fondazione. Il tappo di bentonite rappresenta un dispositivo di sicurezza nel caso che le pressioni giungano a valori eccessivi. In questo caso si conta su un fenomeno di fratturazione idraulica del materiale del nucleo da parte della bentonite che verrebbe iniettata lungo le linee di fratturazione sigillandole e al tempo stesso riducendo il livello delle pressioni attorno alla testa del nucleo.

La Figura 6 illustra un'altra possibile alternativa di progetto e cioè l'adozione di un cunicolo in testa al diaframma per permettere ispezioni ed eventuali trattamenti.

Vorrei concludere ricordando un aspetto fon-

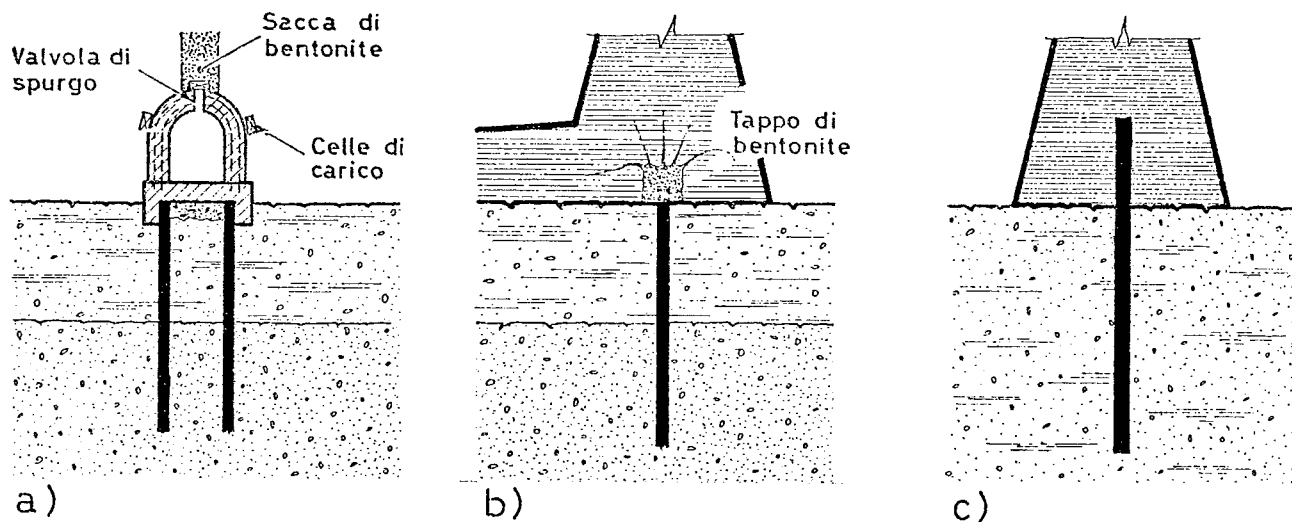


Fig. 6. - Soluzioni alternative di innesto diaframma-nucleo.

damentale, inscindibile da ogni discorso sulle fondazioni di una diga, e cioè la necessità di conoscere e seguire l'effetto dei trattamenti eseguiti e il comportamento delle diverse parti della struttura.

Non è logico che una volta finiti i lavori il progettista perda di vista l'opera che ha, alla fine, concepito. È addirittura inammissibile che questa venga dimenticata da tutti.

Purtroppo anche la strumentazione risente di quel sottile condizionamento che viene dalla diversa potenzialità che assume un dato sperimentale, quando può essere utilizzato in una serie di elaborazioni teoriche. È forse per questo che, all'atto pratico, si strumentano molto di più la parte fuori terra di una diga che la sua fondazione.

Sulla strumentazione delle spalle di una diga due osservazioni sembrano fondamentali. Particolare importanza hanno i fenomeni che intervengono durante la costruzione e i primissimi invasi. Di qui la necessità di *strumentare prima della costruzione*.

In secondo luogo è estremamente importante disporre sia di strumenti che forniscano misure puntuali sia di strumenti che forniscano caratteristiche di massa della roccia delle spalle, e che permettano di seguirne l'evoluzione nel tem-

po. La Geofisica, con le tecniche cross-hole e con emittenti installate permanentemente nella fondazione ha già mosso passi importanti verso soluzioni soddisfacenti. Ancora troppo spesso la Geofisica viene utilizzata solo durante gli studi e totalmente ignorata durante la costruzione e dopo la messa in servizio della diga.

Vorrei concludere auspicando che raccolta, diffusione e discussione dei dati sul comportamento delle fondazioni delle dighe in materiali granulari divengano più intense e siano accompagnate da un rinnovato interesse per l'analisi teorica dei molti aspetti di questa parte vitale per ogni diga.

SUMMARY

Treating and instrumenting dams foundations

Underlining the notable absence of theoretical studies and analysis of data on behaviour of foundations of dams in operation the method of treating foundations by means of grout injection is briefly examined. The importance and progressive spreading of the use of drainage curtains in dam abutments even of modest height is underlined. The use of rigid concrete diaphragms to impermeabilize foundation in alluvium is then discussed and comments made on the problems which arise at the junction of the diaphragm and the impermeable zone of the dam. The solutions adopted in recent designs are illustrated. Finally the need for adequate and modern instrumentation of dam foundations is emphasized.