

# RESISTENZE DI UNA MISCELA CEMENTO-ARGILLA IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE DI INIEZIONE

M. BEOMONTE (\*)

**SOMMARIO:** Sono richiamati i principali requisiti richiesti ad una miscela per iniezioni di impermeabilizzazione. Sono quindi illustrate varie esperienze di laboratorio intese a studiare e mettere a punto una miscela ternaria costituita da acqua-cemento-argilla.

Infine sono illustrate alcune serie di determinazioni eseguite durante la fase di pratica applicazione di tale miscela nella esecuzione dello schermo di impermeabilizzazione di una diga. Le previsioni di laboratorio sono state controllate, con particolare riferimento ai valori delle resistenze a compressione in funzione della pressione di iniezione.

## 1 - Premesse

Per l'esecuzione di schermi impermeabili in roccia mediante iniezioni vengono comunemente impiegate miscele di acqua e cemento con aggiunte di prodotti rigonfianti e fluidificanti, quali ad esempio la bentonite.

Le caratteristiche che si richiedono a tali miscele sono:

- rendimento volumetrico il più possibile vicino al 100% o almeno superiore al 90%;
- buona penetrabilità in modo da intasare le più piccole fessure della roccia;
- una certa plasticità che consenta loro di adattarsi ad eventuali piccoli movimenti senza fessurarsi;
- un minimo di resistenza a compressione che garantisca il regolare svolgimento del processo di presa e indurimento del cemento in modo da essere sicuri che la miscela iniettata rimanga stabile nel tempo e non sia soggetta ad essere dilavata dall'acqua.

Per l'esecuzione del velo impermeabile alla diga del *Pertusillo* (1) è stata studiata una miscela di ce-

mento - argilla - acqua, già sperimentata dall'Impresa esecutrice in lavori consimili.

In quanto segue saranno illustrate le caratteristiche della miscela adottata e alcune determinazioni, su campioni prelevati in sito, dei valori delle resistenze a compressione e trazione.

Saranno altresì riportati i valori delle resistenze a compressione e trazione ottenuti da campioni di miscela non iniettata e quindi non sottoposta al processo di filtrazione sotto pressione provocato dall'iniezione.

## 2 - Prove di laboratorio - Caratteristiche dei componenti e della miscela

### a) Argilla

L'argilla usata, prelevata in una cava a 30 km dal cantiere, in località Bivio-Armento-Corleto-Gallicchio è una « argilla » azzurra del pliocene medio.

La sua composizione percentuale (vedi fig. 1) è la seguente:

- limo 68%
- argilla 32%

(\*) Dott. Ing. Mario BEOMONTE dello studio Ing. C. LOTTI - Libero professionista.

(1) Diga del *Pertusillo* sul fiume *Agri* in provincia di Potenza:

- Tipo: arco gravità
- altezza m 95
- sviluppo in cresta della volta m 317
- volume di calcestruzzo m<sup>3</sup> 360.000
- quota di coronamento m 533.

L'opera viene realizzata dall'Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione e la trasformazione Fondiaria in Puglia e Lucania, Bari, per conto della Cassa per il Mezzogiorno. Il progetto è del Prof. Ing. Carlo DRIOLI. La direzione dei lavori è stata affidata allo Studio Tecnico Ing. Carlo LOTTI - Roma.

Impresa esecutrice è la "Soc. It. per Condotte d'Acqua", Roma, che si avvale della collaborazione della Impresa "Ing. G. Rodio e C. - S.p.A.", Milano, per i lavori di iniezione. Le determinazioni geotecniche di laboratorio sono state eseguite presso il Laboratorio Geotecnico di quest'ultima.

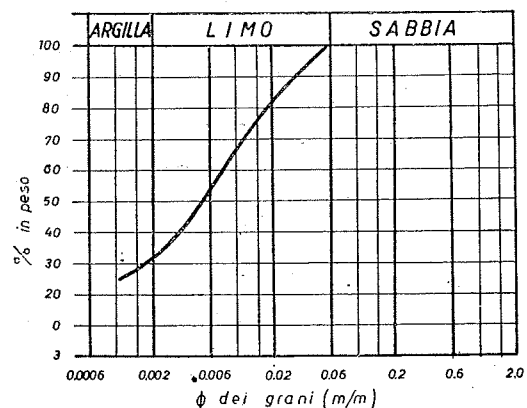


Fig. 1 - Caratteristiche granulometriche dell'argilla.

La determinazione degli indici di consistenza ha dato i seguenti risultati:

- limite di liquidità 52,8%
- limite di plasticità 17,1%
- indice di plasticità 35,3%.

Il peso specifico dei grani è di 2,765 gr/cm<sup>3</sup>.

In base alla classificazione di CASAGRANDE è da definire come « *argilla inorganica di elevata plasticità* »: essa può essere agevolmente spappolata e dispersa in acqua.

#### b) Cemento

Il cemento adottato è un cemento pozzolanico d'alto forno, a basso calore di idratazione, delle seguenti caratteristiche:

- residuo al vaglio da 10.000 maglie/cm<sup>2</sup> 2,9%
- acqua normale 32,1%
- tempi di presa della pasta normale:
  - inizio 8<sup>h</sup> 41'
  - fine 12<sup>h</sup> 41'
- resistenze medie a compressione della malta normale:
  - a 7 gg. 408 kg/cm<sup>2</sup>
  - a 28 » 587 »
- resistenze medie a trazione della malta normale:
  - a 7 gg. 31,2 kg/cm<sup>2</sup>
  - a 28 » 39,8 »
- resistenza media a compressione di miscela acqua-cemento confezionate con rapporto A/C = 0,35:
  - a 7 gg. 452 kg/cm<sup>2</sup>
  - a 28 » 664 »

Il rendimento volumetrico della miscela acqua-cemento in funzione del rapporto fra i due componenti risulta dal grafico di fig. 2.

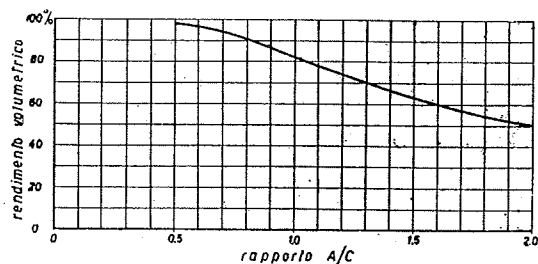


Fig. 2 - Rendimento volumetrico della miscela acqua-cemento.

#### e) Miscela

Sono stati preliminarmente studiati in laboratorio vari tipi di miscele (vedi Tab. I).

TABELLA I - Composizione delle miscele sperimentali

Sigla	% riferite al peso secco		
	Cemento	Argilla	Acqua
E 12	40	60	120
E 14	40	60	140
E 16	40	60	160
F 12	50	50	120
F 14	50	50	140
F 16	50	50	160
G 10	60	40	100
G 12	60	40	120
G 14	60	40	140
H 10	70	30	100
H 12	70	30	120
H 14	70	30	140

Queste sono state tutte confezionate con la seguente procedura:

- essiccamento lento all'aria dell'argilla;
- frantumazione dell'argilla e raccolta del passante al vaglio di 1 mm di luce;
- dispersione dell'argilla in acqua con agitatore elettrico per un periodo di 10';
- aggiunta di cemento e agitazione per altri 5'.

Di ogni miscela sono stati determinati i seguenti principali valori:

— *rendimento volumetrico*: cioè il rapporto, espresso in %, fra il volume finale del sedimento e quello iniziale della miscela mantenuta a riposo in un recipiente perfettamente impermeabile. In tutte le miscele provate si sono misurati rendimenti volumetrici compresi fra il 93,7% e il 100%.

— *grado di rigidità*: si è assunta come misura inversa del grado di rigidità  $R$  la penetrazione, espressa in cm, di una provetta standard del peso di 30 gr e del diametro di 15 mm, nel senso che a maggiori valori della penetrazione corrispondono minori valori

del grado di rigidità. I valori sono stati riportati in diagramma in funzione del tempo: si nota come siano più rigide le miscele a più basso tenore di argilla e a più elevato contenuto in acqua (vedi fig. 3).

di pressofiltrazione » determinabile sperimentalmente. La prova consiste nel misurare la quantità di acqua passante attraverso un disco di carta da filtro costituito il fondo di un recipiente stagno (« filtro pres-

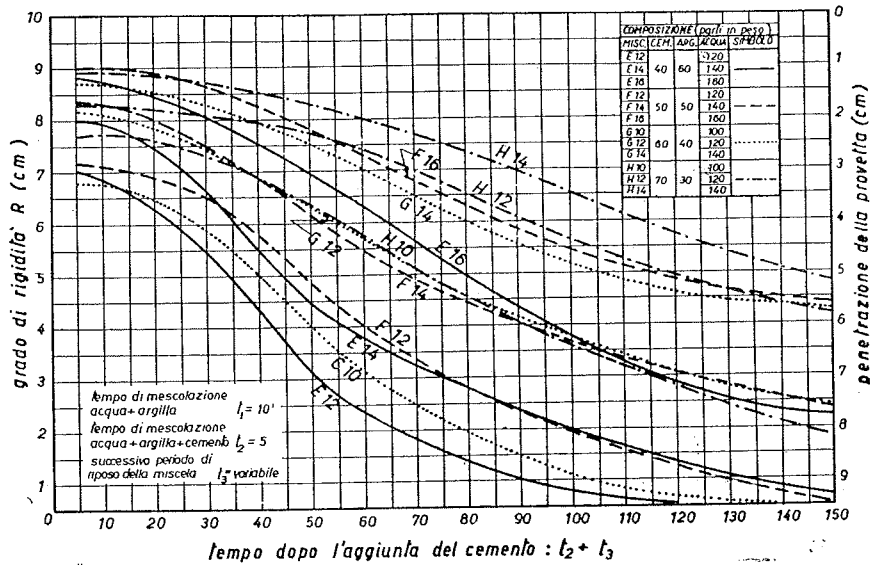


Fig. 3 - Rigidità delle miscele acqua-cemento-argilla.

— *attitudine ad espellere l'acqua*: la permeabilità della miscela all'acqua in essa contenuta e cioè la sua attitudine a « strizzarsi » per effetto dell'iniezione sottopressione può essere individuata dal « coefficiente

sa » in cui viene posta una certa quantità di miscela e nel quale viene mantenuta una pressione costante (vedi fig. 4).

La variazione del tenore d'acqua nel corso della prova è risultata soddisfacentemente espressa dalla relazione  $W = W_0 (1 - K t)$  ove:

$W$  = tenore d'acqua dopo un tempo  $t$

$W_0$  = tenore d'acqua iniziale

$t$  = periodo di pressofiltrazione (minuti)

$K$  = coefficiente di pressofiltrazione determinabile

sperimentalmente e dipendente dai seguenti fattori:

- caratteristiche dei componenti
- composizione della miscela
- caratteristiche della filtropressa
- pressione.

Le prove sono state eseguite alla pressione 7 atm. La rappresentazione grafica del fenomeno nel piano cartesiano  $W, t$  è una retta (vedi figg. 5, 6, 7 e 8) e dal suo esame si vede chiaramente che:

— il coefficiente  $K$  aumenta col crescere di  $W_0$  (cioè una miscela molto fluida è più facilmente « strizzabile ») e col diminuire del rapporto argilla-cemento: infatti è l'argilla che trattiene l'acqua;

— il tenore d'acqua finale  $W_f$  aumenta con il rapporto argilla-cemento, confermando la precedente os-

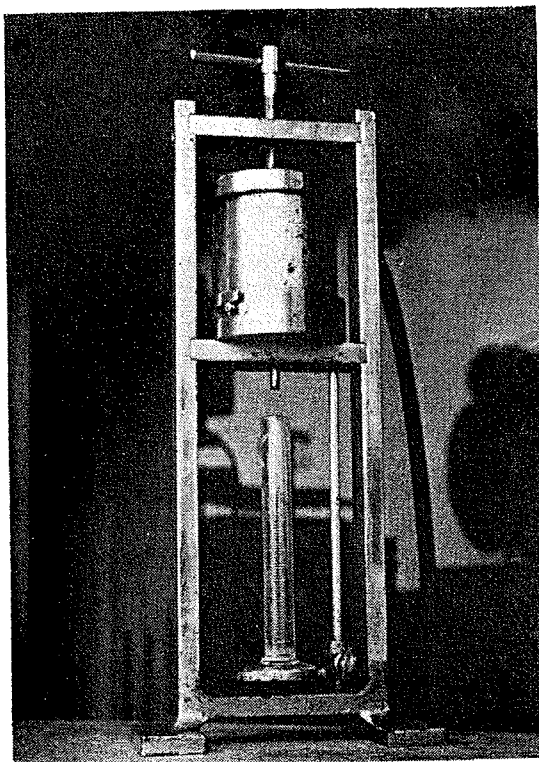


Fig. 4 - Filtropressa.

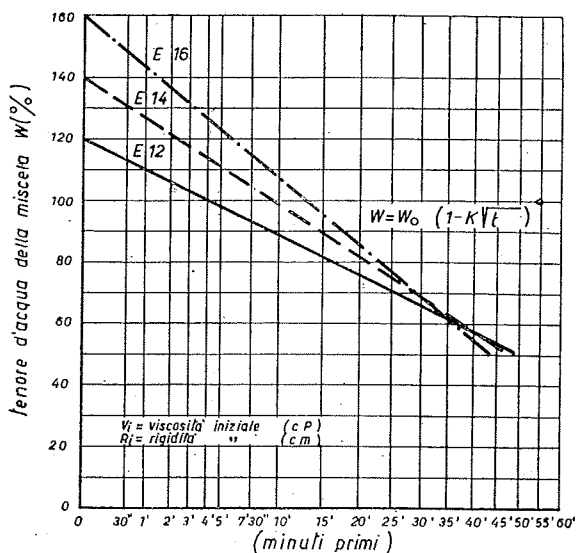


Fig. 5 - Grafico della prova di presso filtrazione per miscele tipo E.

N° miscela	Composizione parte solida		K	Vi	Ri	Tenore d'acqua della miscela (%)						t <sub>f</sub>
	CEM.	ARG.				Periodo di filtrazione						
						0	5'	10'	15'	30'	t <sub>f</sub>	
E 12	40	60	0.082	47	7.0	120	98.0	88.5	82.0	66.0	51.0	49'
E 14	40	60	0.093	27	8.0	140	111.0	98.5	90.0	69.0	51.0	46'
E 16	40	60	0.104	18	8.8	160	123.0	107.5	95.0	69.0	51.0	43'

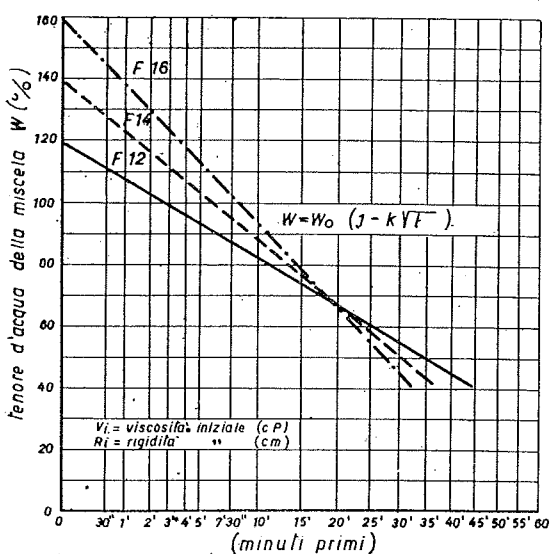


Fig. 6 - Grafico della prova di presso filtrazione per miscele tipo F.

N° miscela	Composizione parte solida		K	Vi	Ri	Tenore d'acqua della miscela (%)						t <sub>f</sub>
	CEM.	ARG.				Periodo di filtrazione						
						0	5'	10'	15'	30'	t <sub>f</sub>	
F 12	50	50	0.099	33	7.2	120	93.5	82.0	73.5	54.0	41.0	44'
F 14	50	50	0.117	17	8.4	140	103.5	88.0	76.5	50.0	41.0	36'
F 16	50	50	0.131	13	9.0	160	113	93.0	78.0	44.0	41.0	31'

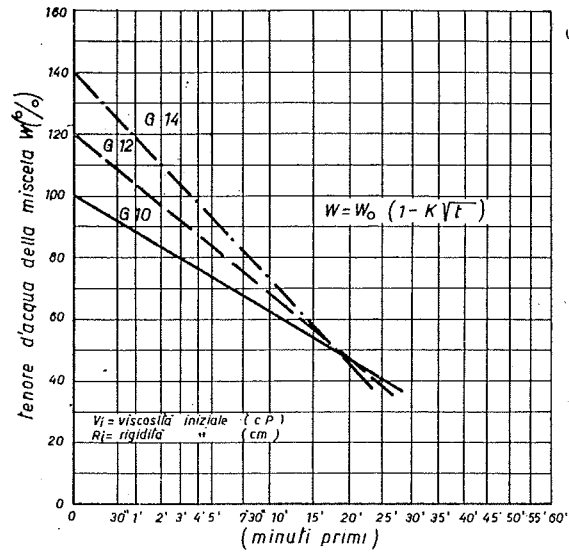


Fig. 7 - Grafico della prova di presso filtrazione per miscele tipo G.

N° miscela	Composizione parte solida		K	V <sub>i</sub>	R <sub>i</sub>	Tenore d'acqua della miscela (%)						t <sub>f</sub>
	CEM.	ARG.				Periodo di filtrazione						
						0	5'	10'	15'	30'	t <sub>f</sub>	
G 10	60	40	0.119	33	6.7	100	73.0	62.0	53.5	36.0	36.0	29'
G 12	60	40	0.136	17	8.1	120	83.5	68.0	56.5	36.0	36.0	26'
G 14	60	40	0.151	9	8.7	140	92.5	72.5	57.5	36.0	36.0	24'

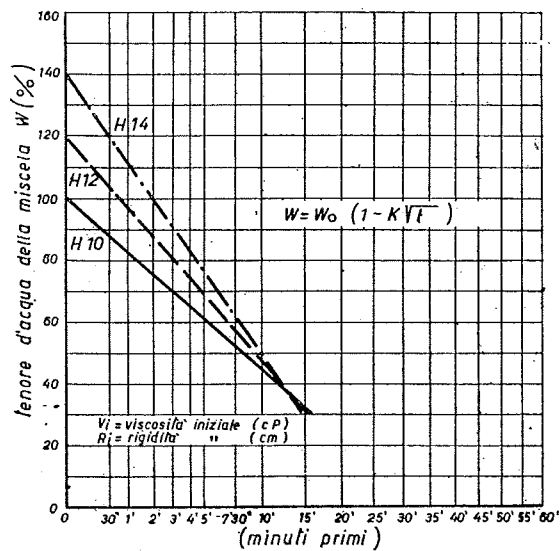


Fig. 8 - Grafico della prova di presso filtrazione per miscele tipo H.

N° miscela	Composizione parte solida		K	V <sub>i</sub>	R <sub>i</sub>	Tenore d'acqua della miscela (%)						t <sub>f</sub>
	CEM.	ARG.				Periodo di filtrazione						
						0	5'	10'	15'	30'	t <sub>f</sub>	
H 10	70	30	0.180	23	7.7	100	60.5	44.0	31.0	31.0	31.0	15'
H 12	70	30	0.194	11	8.4	120	68.0	46.5	31.0	31.0	31.0	14' ½
H 14	70	30	0.207	30	8.9	140	76.0	48.0	31.0	31.0	31.0	14'

servazione, ma a parità di questo, è indipendente da  $W_0$ ;

— il periodo di tempo  $t_f$ , necessario perché la miscela perda l'acqua e si raggiunga il valore  $W_f$ , è tanto maggiore quanto maggiore è il rapporto argilla-cemento mentre diminuisce al crescere di  $W_0$ : cioè è sempre l'argilla che rallenta il processo di pressofiltrazione mentre in una miscela più fluida esso avviene più rapidamente.

### 3 - Determinazioni in sito

Le determinazioni di cui al paragrafo precedente hanno condotto alla scelta di una miscela costituita dal 40% di cemento e il 60% di argilla per la esecuzione dello schermo impermeabile della diga di *Pietra del Pertusillo*.

Nel corso dei lavori di iniezione è sorto spontaneo il desiderio di controllare le caratteristiche principali della miscela iniettata e precisamente:

- tenore d'acqua iniziale  $W_0$  e finale  $W_f$ ,
- resistenza a compressione

Le modalità di tale secondo prelievo sono state le seguenti:

— iniezione del foro  $\varnothing$  65 mm a pressione costante;

— prelievo di 3 campioni per ogni foro, 5 ore dopo l'inizio dell'iniezione, a profondità fra 5 e 6 metri, scartando cioè i primi 5 metri di miscela iniettata e rimasta nel tratto superiore del foro in quanto non omogenea: si è supposto cioè che nelle prime 5 ore il tenore d'acqua rimanga praticamente costante ed eguale a quello  $W_f$  esistente alla fine del processo di pressofiltrazione avvenuto entro il foro;

— immediata paraffinatura della fustella estratta dal foro ad evitare perdite per evaporazione durante il trasporto dalla zona di iniezione al laboratorio del cantiere;

— pesatura del campione prima e dopo essiccazione in stufa a 105° fino a peso costante.

Le prove si sono potute eseguire solo su miscele iniettate a pressioni superiori alle 50 atm. per impossibilità di prelevare campioni, prima dell'inizio della presa del cemento, da miscele iniettate a pressioni più basse.

I risultati delle prove sono riassunti nella Tab. II.

TABELLA II - Tenore d'acqua iniziale e finale di miscele iniettate

Miscela iniettata a 50 atm.				Miscela iniettata a 70 atm.				
Caratteristiche iniziali		Caratteristiche finali			Caratteristiche iniziali	Caratteristiche finali		
		Camp. I	Camp. II	Camp. III		Camp. I	Camp. II	Camp. III
Peso totale	1316	2444	2467	2306	1335	2378	2589	2930
Peso cemento + argilla	519	1456	1629	1417	600	1514	1743	1942
Peso acqua	797	988	838	889	735	864	846	988
Tenore d'acqua $W_0$ e $W_f$	154%	68%	51%	63%	122%	56%	49%	51%

- resistenza a trazione
- valori delle resistenze della miscela non iniettata.

#### a) Determinazione del tenore d'acqua

Il tenore d'acqua iniziale  $W_0$  è stato determinato prelevando 1 litro di miscela dalla sala iniettori e misurando il peso della miscela e il peso del residuo secco dopo essiccazione in stufa a 105° fino a peso costante.

Il tenore d'acqua finale  $W_f$  della miscela iniettata è stato determinato prelevando con fustella campioni di miscela dai fori di iniezione.

#### b) Prove di resistenza a compressione

La determinazione dei valori della resistenza a compressione della miscela iniettata è stata condotta su un certo numero di « carote » di miscela iniettata in fori  $\varnothing$  65 mm.

Le carote venivano estratte 6 giorni dopo l'iniezione e lasciate a stagionare nella camera termostatica a 18°, e umidità relativa prossima alla saturazione, del laboratorio del cantiere.

Le prove sono state condotte a 7, 28 e 90 gg. di stagionatura e per la loro esecuzione i provini (« carote ») venivano trattati nel modo seguente:

— spianatura delle facce: mediante sega a disco abrasiva ricavando dei provini all'incirca di altezza pari a 1÷2 volte il diametro;

— cattura dei provini: le facce opposte dei provini venivano ricoperte con una miscela di zolfo e

sabbia allo stato fluido; la miscela, raffreddandosi, veniva a costituire una cappa dura e perfettamente piana.

Con l'ausilio di un piccolo supporto si realizzava anche il parallelismo fra le due facce opposte (vedi fig. 9).

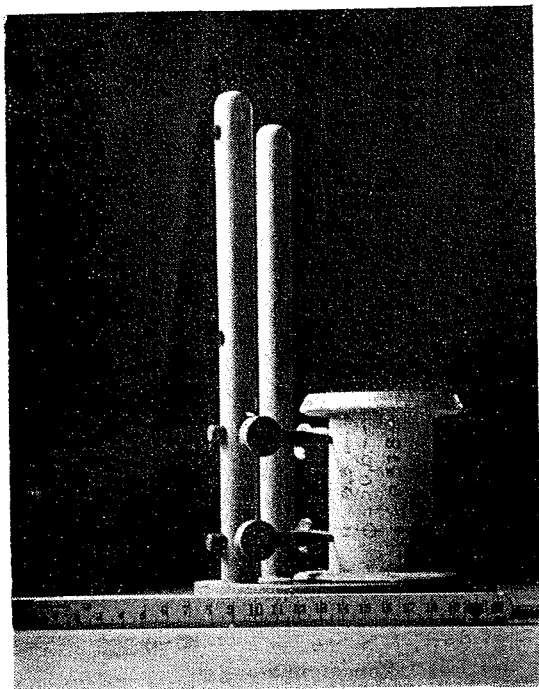


Fig. 9 - Attrezzatura per cattura provini. Si nota il provino cilindrico con la superficie superiore coperta dalla cappa di zolfo e sabbia, e l'apparecchio per il controllo del parallelismo fra le due basi del provino.

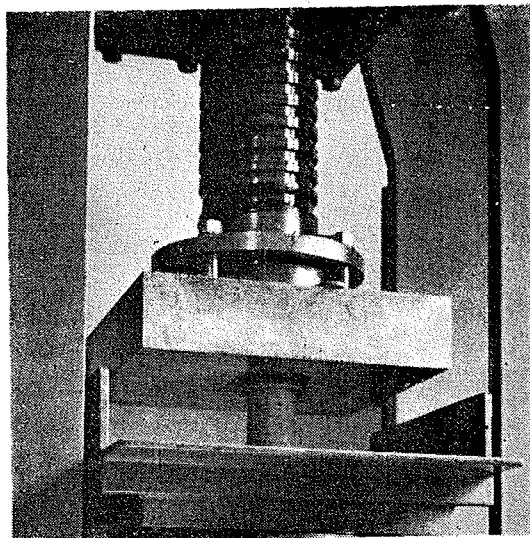


Fig. 10 - Prova di resistenza a compressione su provino cilindrico ("carota").

Nella Tab. III sono riportati i valori delle resistenze a compressione a 7, 28 e 90 gg. di stagionatura ottenuti da campioni di miscela iniettata a 30, 40 e 50 atm.

TAB. III - Resistenze a compressione a 7, 28, 90 giorni di stagionatura su campioni di miscela iniettata

Stagionatura	7 giorni			28 giorni			90 giorni		
	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Pressione di iniezione atm.									
Resistenza kg/cm <sup>2</sup>	12,6	96	172	90	90	76	117	169	98
	35,3	81	98	56	134	188	108	135	165
	105	86	92	115	57	208	80	118	263
	64,6	48	118	92	385	198	140	330	167
	70,2	58	96	88	180	184	92	454	145
	5,6	184	147	106	180	131	71	81	100
	52,1	130	108	92	110	90	110	109	100
	12,6	226	116		96	163		146	224
		72	104		114	190			182
			71			238			143
			161						167
			167						196
			143						271
			157						
			104						
			73						
			122						
			94						
			92						
			151						
			124						
Resistenza media	44,7	109	120	91	150	167	101	193	170

c) *Resistenze a trazione*

La determinazione dei valori della resistenza a trazione è stata pure eseguita su un certo numero di « carote » seguendo per il prelievo e la stagionatura

le prove brasiliane su provini di calcestruzzo (v. fig. 11).

Nella Tab. IV sono riportati i valori delle resistenze a trazione a 7, 28 e 90 giorni di stagionatura otte-

TAB. IV - *Resistenze a trazione a 7, 28 e 90 giorni di stagionatura su campioni di miscela iniettata*

Stagionatura	7 giorni			28 giorni			90 giorni		
	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Pressione di iniezione atm.									
Resistenza kg/cm <sup>2</sup>	0,0	3,2	0,3	2,1	0,0	0,0	3,5	3,0	3,8
	1,5	7,3	3,7	7,2	1,2	2,9	8,8	1,4	1,0
	0,8	5,1	3,0	5,9	3,8	8,2	7,1	8,2	3,4
	5,7	9,5	4,0	6,0	3,6	1,3	4,7	11,0	4,0
	0,0	6,2	4,3	5,5	4,6	3,6	7,1	10,7	3,7
	1,6	6,3	0,4	4,7	3,0	2,3	6,3	6,1	1,9
	2,7	3,0	3,3	3,2	2,6	2,9		2,2	3,2
			4,0	1,7	2,2	2,6		3,8	2,1
			0,4		1,2	3,1			2,6
			3,2			2,4			2,4
			1,7						1,9
			2,3						
			3,5						
			3,1						
			3,4						
			4,1						
			4,9						
			2,7						
			5,9						
			8,2						
			4,1						
Resistenza media	1,7	4,1	3,3	4,5	2,5	2,9	6,6	5,8	2,7

la stessa tecnica adottata per le carote da sottoporre a prova di compressione.

Anche in questo caso veniva eseguita la spianatura delle facce mediante sega a disco abrasiva.

Per realizzare la sollecitazione di trazione è stato eseguito il tipo di prova cosiddetta brasiliana costruendo una apparecchiatura analoga a quella usata per

nuti da campioni di miscela iniettata a 30, 40 e 50 atm.

4) *Resistenze della miscela non iniettata*

Oltre che le determinazioni di cui ai paragrafi precedenti, condotte sulle « carote » di miscela iniettata, sono stati altresì determinati i valori delle resistenze a compressione, trazione e flessione su provini di miscela prelevata alla stazione di pompaggio, cioè non sottoposta al processo di pressofiltrazione.

Le prove sono state condotte su due serie di 6 provini delle seguenti dimensioni;

- per le prove di compressione: provini  $7 \times 7 \times 7$ ;
- per le prove di trazione: forme a 8 regolamentari per provini di malta normale;
- per le prove di flessione: provini  $4 \times 4 \times 16$ .

La miscela era la stessa sulla quale era stato determinato il tenore di acqua iniziale e finale e le cui caratteristiche sono riportate nella Tab. II.

Nella Tab. V sono riportati i valori delle resistenze medie delle due serie.

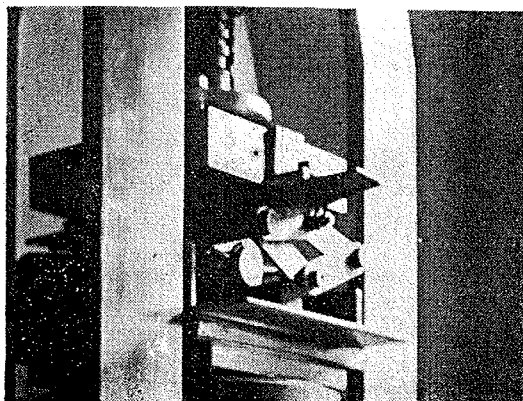


Fig. 11 - Prova di trazione (brasiliana) su provino cilindrico (« carota »).



TAB. V - Valori della resistenza di miscele non iniettate

Stagionatura	7 giorni			28 giorni			90 giorni		
Tipo di prova	Compr.	Traz.	Fless.	Compr.	Traz.	Fless.	Compr.	Traz.	Fless.
I serie	5,6	1,8	3,8	15,2	2,5	7,9	20,4	—	10,8
II serie	6,0	2,0	3,8	21,4	4,2	8,0	24,4	4,2	10,3
Medie	5,8	1,9	3,8	18,3	3,3	8,0	22,4	4,2	10,5

4 - Elaborazione dei risultati

Riportando in diagramma, in funzione della pressione di iniezione, i valori medi delle resistenze a compressione di cui alla Tab. III e V si vede chiaramente (fig. 12) come tali valori crescano notevolmente con la pressione di iniezione fino a un certo valore di questa: per pressioni sempre crescenti non si ha analogo incremento delle resistenze.

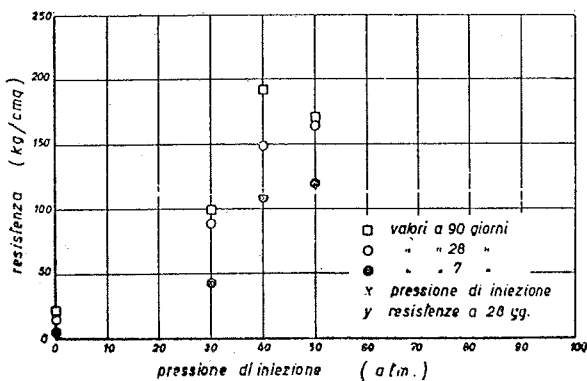


Fig. 12 - Resistenze a compressione in funzione della pressione di iniezione.

Ciò dipende dal fatto che oltre un certo limite di pressioni non si ottiene una ulteriore diminuzione del rapporto acqua-cemento dal quale dipende la resistenza a compressione della miscela.

Nel diagramma di fig. 13 sono riportati i valori delle resistenze a compressione di cui alle Tabelle III e V in funzione del tempo di stagionatura.

Anche qui si vede come per stagionature superiori ai 28 giorni non si ha un pratico incremento delle resistenze a compressione.

L'esame delle Tabelle IV e V mostra infine come l'iniezione sotto pressione non abbia provocato alcun

incremento delle resistenze a trazione rispetto a quelle ottenute con miscele non iniettate.

Le prove in sito hanno messo anche in evidenza come esista una certa relazione fra pressione di iniezione, rapporto cemento-acqua e resistenza alla com-

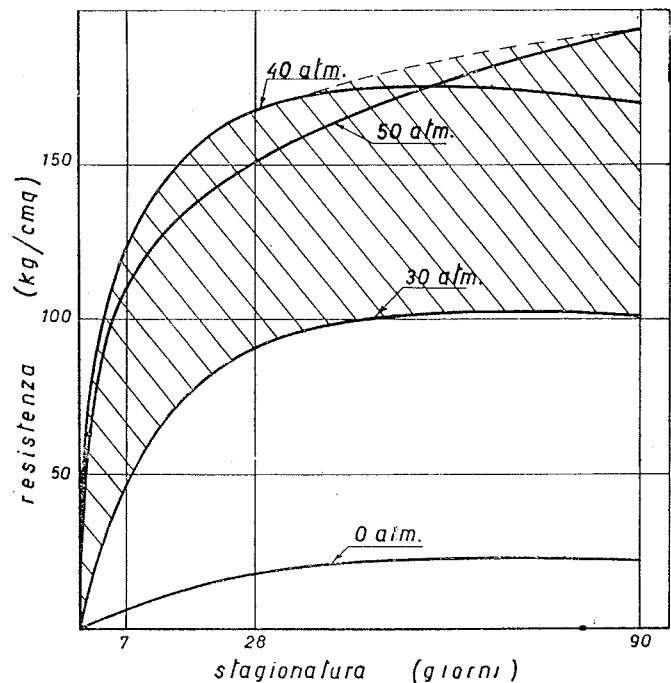


Fig. 13 - Diagrammi delle resistenze a compressione in funzione della stagionatura e a varie pressioni di iniezione.

pressione nel senso che tali ultime due variabili sono entrambe funzioni crescenti della prima.

La resistenza alla compressione appare quindi come funzione non tanto del rapporto cemento-acqua, che parimenti dipende dalla pressione di iniezione, quanto di quest'ultima.

## 5 - Conclusioni

Le prove eseguite e i risultati ottenuti hanno messo in luce le ottime caratteristiche di una miscela per iniezioni costituita da cemento e argilla.

Dato il basso costo di quest'ultima la miscela consente una notevole economia rispetto alle miscele di solo cemento o cemento con aggiunta di bentonite.

Inoltre, contrariamente a quanto avviene per le miscele con solo cemento, si ha un rendimento volumetrico assai prossimo all'unità.

**SUMMARY:** We have described the main features required by a mixture for impermeabilisation injection.

Different laboratory tests have then been illustrated in order to study and prepare a mixture of three compounds, i.e. water, cement and clay.

Finally some kinds of tests carried out during the construction of a dam have been described.

Laboratory forecasts, with particular reference to the values of compression strengths, depending upon injection pressure have been checked.

Ma il fatto più importante è l'elevato valore delle resistenze a compressione di tali miscele e la sua dipendenza dalla pressione di iniezione.

Come risulta dalle curve di fig. 13 si sono raggiunte resistenze a 28 giorni comprese fra i 100 e i 200 kg/cm<sup>2</sup> e cioè tali da far pensare alla possibilità di usare tali miscele anche per trattamenti di consolidamento. Peraltro i bassi valori delle resistenze a trazione e soprattutto i notevoli scarti fra i valori ottenuti, sconsigliano a mio avviso un tale uso.

**SOMMAIRE:** Nous avons rappelé les principales caractéristiques qui sont demandées à un mélange pour injections d'impermeabilisation.

Nous avons ensuite décrit plusieurs expériences de laboratoire ayant pour but l'étude et la mise au point d'un mélange ternaire constitué de ciment, d'argile et d'eau.

Pour terminer nous avons illustrée une série de déterminations exécutées pendant la phase d'application pratique de ce mélange dans l'exécution de l'écran d'impermeabilisation d'un barrage.

Ceci pour contrôler les prévisions du laboratoire surtout en rapport aux valeurs des résistances à compression en fonction de la pression d'injection.