

USO DI MISCELE DI LOPPA PER INIEZIONI CEMENTIZIE

G. GENTILE - L. FRIZ - R. PAOLINA - C. TERRACINI (*)

SOMMARIO - Riportate le principali caratteristiche della loppa con speciale riferimento alle sue proprietà idrauliche in vista della sua utilizzazione per le iniezioni della roccia di fondazione di una diga, si descrive l'impianto di macinazione realizzato, e si riportano le conclusioni dopo i primi mesi di funzionamento.

1 - Generalità (G. Gentile)

Nel 1953 ebbi l'occasione di svolgere un ampio studio sull'impiego come leganti nei calcestruzzi di miscele di cemento Portland normale e loppe d'alto forno macinate finemente per via umida: miscela che va commercialmente sotto il nome di « *Cemento Trief* » essendo stata ideata ed industrialmente applicata su vasta scala dal belga Sig. TRIEF.

E' noto che certe loppe basiche opportunamente granulate con raffreddamento violento all'uscita dall'alto forno, e poi finemente macinate, danno con l'acqua una pasta che lentamente indurisce senza dare notevole resistenza e che può essere nuovamente polverizzata dando un prodotto analogo a quello di partenza; ma che se nella pasta si introduce una sostanza catalizzatrice costituita da un reagente basico (calce, cemento, soda, ecc.) si inizia una reazione di idratazione con trasformazione chimica ed indurimento definitivo della pasta. Giova notare che questo si constata a temperatura ordinaria mentre a temperatura superiore ai 60° - 70° la reazione si innesca anche spontaneamente senza catalizzatore.

Di questa proprietà delle loppe se ne servono, alle volte in modo troppo empirico perché non tutte le loppe si prestano ad entrare nel cemento come parte attiva, i fabbricanti di cemento, miscelando all'atto della macinazione clinker di cemento tipo Portland con loppe più o meno bene granulate ed essiccate e ciò in varie proporzioni per cui si può passare da un cemento Portland con modeste aggiunte di loppe ad un vero cemento d'alto forno.

(*) Dott. Ing. Giulio GENTILE, Dott. Lorenzo FRIZ, Dott. Ing. Renato PAOLINA, Dott. Ing. Cesare TERRACINI, della Società Idroelettrica Piemonte - Direzione Costruzioni Idrauliche.

Caratteristica del metodo TRIEF è:

— anzitutto di usare loppe con caratteristiche chimiche e fisiche ben controllate, caratteristiche che derivano dalla composizione chimica dei minerali di partenza e dei fondenti adoperati, dalle temperature adottate nel forno e dal modo con cui è fatta la granulazione;

— poi di macinare la loppa, separatamente dal catalizzatore, in mulini ad umido, raggiungendo finenze assai più elevate di quelle che si possono economicamente raggiungere con i normali mulini da cemento. Questa finezza ha un'importanza notevolissima nei successivi fenomeni di idratazione;

— infine di usare come catalizzatore un cemento appropriato esistendo delle incompatibilità di certe loppe con certi cementi.

I risultati che allora ottenni usando un clinker di cemento artificiale tipo normale e varie loppe furono assai interessanti agli effetti della composizione di calcestruzzi in modo speciale per dighe: basso calore di idratazione, basso contenuto in calce libera, ottima impermeabilità, ecc.

Alle esperienze sia di laboratorio che semiindustriali che feci non seguì l'adozione del procedimento per la difficoltà di avere, allora, in Italia loppe adatte con le caratteristiche necessarie ed in quantità sufficiente. Ero però rimasto veramente colpito dalla finezza e dall'untuosità della pasta che si otteneva e ciò mi fece pensare all'uso della stessa per iniezione di rocce poco beanti.

L'idea venne sviluppata con ricerche di laboratorio ed i risultati ai quali si arrivò vennero applicati nell'iniezione di rocce di fondazione della diga di Beau-regard, rocce che presentano tutta una serie di

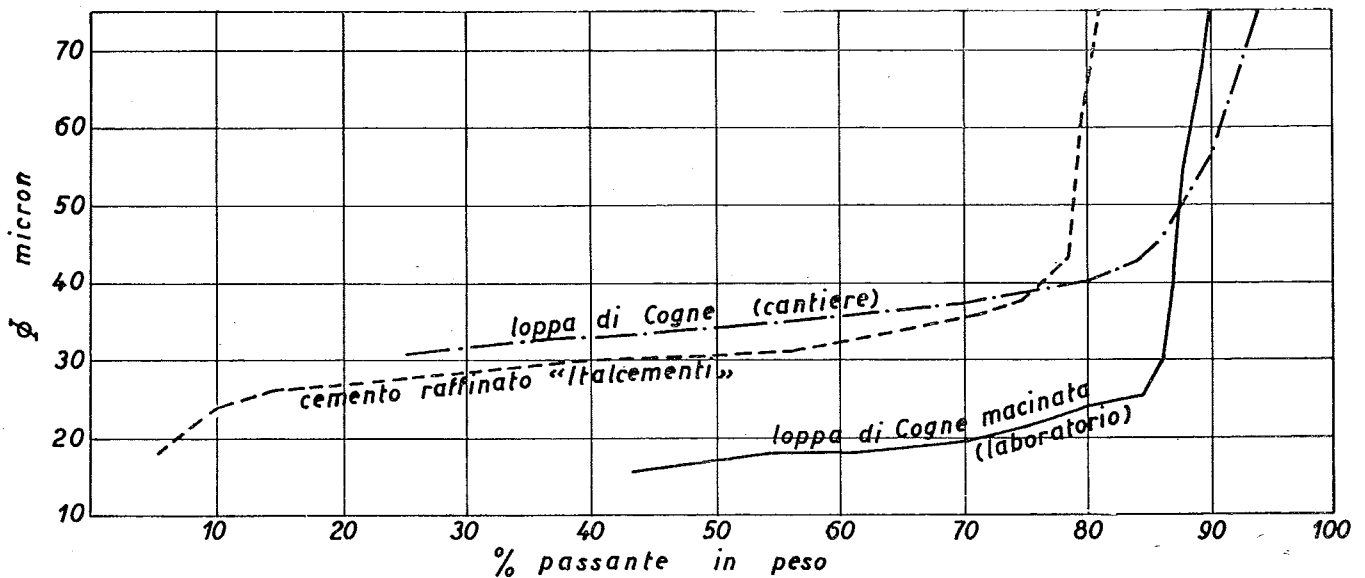


Fig. 1 - Finezza della loppa di Cogne macinata e del cemento raffinato «Italcementi».

aspetti dal micascisto compatto con poche fessure ad un complesso di micascisti fortemente fessurati, sconnessi ed in alcune zone più o meno milonitizzati.

Per quest'applicazione si cercò di avere una pasta di massima penetrazione, sostituendo al cemento, che presenta grani di dimensioni maggiori della loppa, un catalizzatore più adatto, e dopo varie prove la scelta cadde sulla calce grassa opportunamente diluita; poiché questa miscela dà resistenze minori di quelle che si ottengono con l'impiego del cemento, si giunse all'adozione della miscela loppa + calce per le iniezioni di impermeabilizzazione e della miscela loppa + cemento per le iniezioni di consolidamento.

Per quanto riguarda la loppa, la scelta cadde su quella proveniente dagli alti forni della *Cogne* in Aosta, sia per la vicinanza ai lavori, sia perché dal suo impiego ci si attendeva, dato il suo alto contenuto di sali di magnesio, un fenomeno di espansione che, se contenuto nei giusti limiti e controllabile nel tempo, gioverebbe assai al risultato delle iniezioni. L'espansione di questa miscela risultò però assai limitata e si potrebbe dire che il rigonfiamento annulla il ritiro, il che è già qualcosa.

Il seguito di questa relazione dà i particolari delle ricerche eseguite, dei metodi di cantiere adottati, dei risultati ottenuti.

Furono miei validi collaboratori: il Dott. Lorenzo FRIZ ed il Dott. Ing. Cesare TERRACINI per le ricerche di laboratorio ed il Dott. Ing. Renato PAOLINA per il campo applicativo.

1 - Ricerche di laboratorio (L. Friz, C. Terracini)

Le caratteristiche chimiche della loppa vennero studiate dal Prof. Vittorio CIRILLI, il quale giunse alle conclusioni che seguono.

Come è noto, le proprietà idrauliche si manifestano in modo tecnicamente soddisfacente se la scoria è basica e se possiede una struttura essenzialmente vetrosa; la struttura cristallina è antitetica alla idraulicità.

La presenza nella scoria di magnesio allo stato di periclasi (MgO) cristallino è dannosa nei riguardi della stabilità di volume, in quanto quello si trasforma in idrossido con un aumento di volume attorno al 20%. La loppa di Cogne ha la seguente composizione percentuale:

SiO ₂	38,5%
Al ₂ O ₃	4,2%
FeO	0,6%
MnO	0,6%
CaO	21,4%
MgO	32,4%
S	0,5%
SO ₃	1,6%

Detratta la magnesia unita all'allumina sottoforma di spinello, il rapporto molecolare (CaO + MgO)/SiO₂ è minore di 2; è quindi da escludere la formazione di magnesia cristallina allo stato di periclasi, e in effetti l'esame con i raggi X ne ha rilevato solo alcune tracce. Una ulteriore conferma si è avuta con la prova di stabilità di volume eseguita secondo le norme ASTM su loppa trattata a 215°C alla pressione di 20 atm per 3 ore; le espansioni misurate non hanno mai superato lo 0,2%, mentre le dette norme ritengono soddisfacenti valori fino a 0,5%.

Inoltre in presenza di gesso o di calce, si osserva, tanto al microscopio quanto coi raggi X, la presenza di 3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ idrato in stato vetroso, e quindi partecipa alle reazioni di idratazione.

L'idraulicità della loppa si manifesta con l'aggiunta di opportuni attivatori; si prestano bene allo scopo il cemento Portland e la calce, sola o addizionata con gesso. Le migliori resistenze si ottengono con cemento ad elevato modulo calcareo. Il calore di idratazione delle miscele di cemento e loppa è analogo a quello dei cementi normali, con valori compresi fra 60÷70 cal/gr. Un'ultima osservazione importante è che una scoria magnesiaca è molto più resistente di

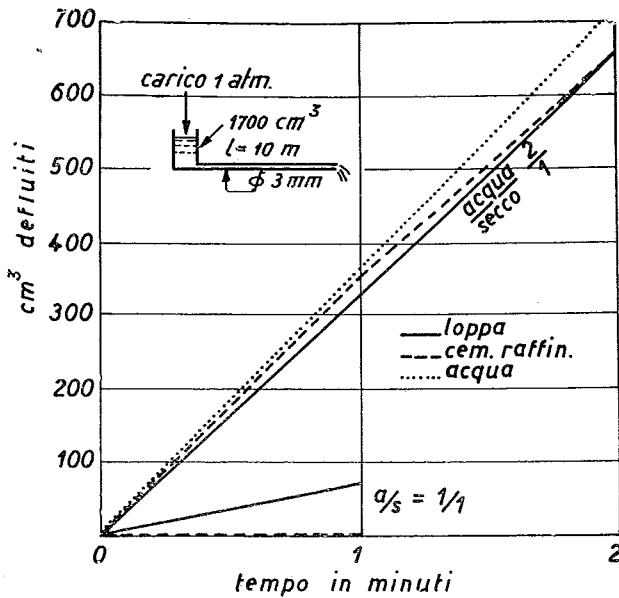


Fig. 2 - Deflusso attraverso un tubo ϕ 3 mm.

una scoria calcica al dilavamento dell'acqua, data la minor solubilità dei composti di magnesio.

Proseguendo le indagini sperimentali presso il Laboratorio Prove Materiali della S.I.P., vennero anzitutto esaminate le caratteristiche fisico-tecnologiche della loppa di Cogne.

Allo scopo di ottenere un'elevata finezza, la scoria veniva macinata per via umida in mulino a palle, col risultato di avere l'85% in peso di essa con dimensioni inferiori a 25 micron; il cemento raffinato Italcementi, usato per le iniezioni aveva in corrispondenza solo il 13% (v. Fig. 1); il confronto della finezza veniva fatto con aerometro.

La scorrevolezza è stata provata facendo defluire le paste di loppa o cemento in un tubo capillare ϕ 3 mm, lungo m 10 (v. Fig. 2); risultarono deflussi

leggermente inferiori per le miscele di loppa, con rapporto acqua-secco = 2/1; ma con 1/1 la pasta di cemento non è riuscita a passare neppure con carico di 3 atm, mentre la loppa defluiva già ad 1 atm. Analogamente, si è misurato il tempo di deflusso dei primi 500 cc da un viscosimetro MACH di capacità 1500 cc, cui si era aggiunto un tubo verticale lungo cm 63 e di diametro 4 mm; anche qui la differenza diventa importante se a/s è minore di 1/1 (v. Fig. 3).

Prove di sedimentazione (v. Figg. 4, 5 e 6) hanno mostrato che la loppa si deposita assai più lentamente del cemento; la capacità di trattenere l'acqua si è rivelata importante caratteristica della loppa. Sotto l'effetto della pressione, risulta però che l'eliminazione dell'acqua di confezione può essere superiore che nel cemento. Prove eseguite con filtro-pressa a 3 atm hanno mostrato infatti che il rapporto a/s finale è inferiore del 20-30% rispetto al corrispondente del cemento.

Le indagini finora illustrate si sono concluse con alcune prove di iniezione, che hanno chiaramente riassunto i vantaggi del materiale studiato.

In sabbia di Torre del Lago asciutta ed assestata, le paste di cemento con rapporti a/s - 2/1 e 1/1 non riuscirono a penetrare, sia pure portando la pressione a 4 atm, mentre le paste di loppa hanno fornito (cc passati attraverso un cilindro alto cm 18, diametro cm 5):

Pressione	0,1 atm		1 atm
	15 sec	30 sec	15 sec
a/s = 1/1	20	40	200
2/1	50	100	300

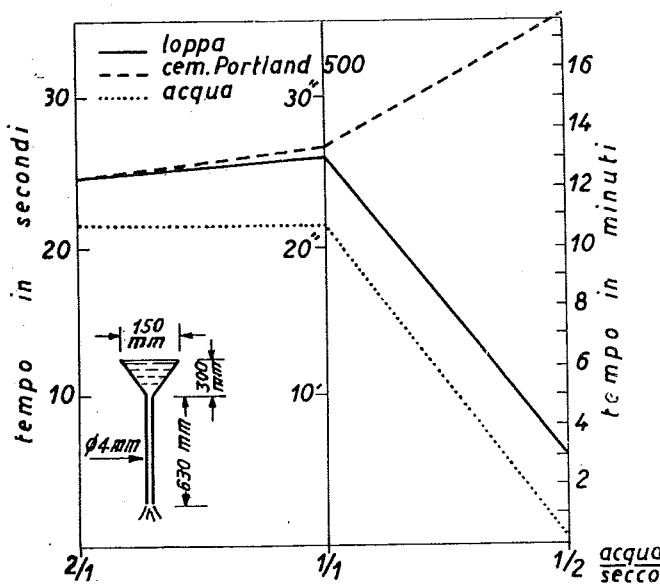


Fig. 3 - Deflusso da un viscosimetro « Mach ».

Analogamente si è operato su materiale pulverolento di frizione, ricavato dalla zona rocciosa da trattare in pratica, noto per la sua spiccata impermeabilità (v. Figg. 7 ed 8).

Una seconda serie di indagini ha poi avuto lo scopo di studiare i seguenti argomenti:

— Tipo e quantità di sostanza più adatta per rendere attivo il potere idraulico della loppa.

— Caratteristiche fisiche e meccaniche di malte e paste confezionate con l'attivante e nelle proporzioni dimostrate migliori: resistenze meccaniche a varie stagionature; variazioni di volume; tempi di presa.

Il primo scopo fu raggiunto esaminando miscele composte di 100 parti in peso di loppa secca con i seguenti reattivi:

- a) Calce grassa 20 parti
- b) Cemento Portland 25 parti
- c) NaOH 3 parti
- d) Calce grassa 20 parti NaCl 5 parti
- e) » » 20 parti CaSO₄ 5 parti
- f) » » 20 parti Na₂SO₄ 2 parti
- g) Cemento Portland 25 parti CaSO₄ 5 parti

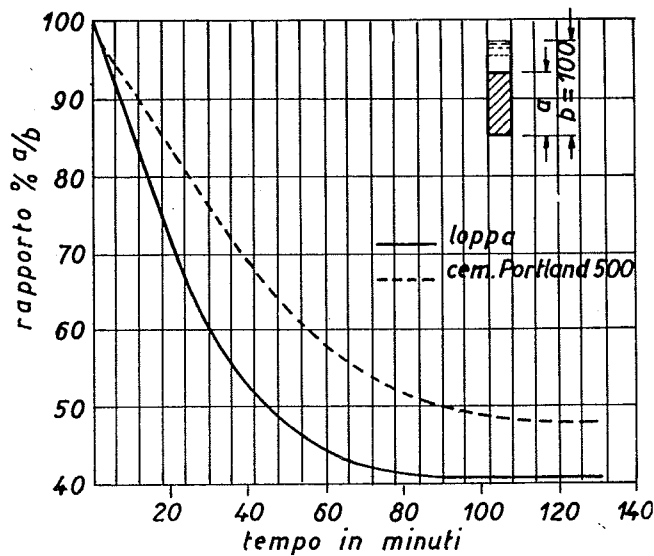


Fig. 4 - Volumi di sedimentazione.

Con molta acqua ($a/s = 4/1$) presa ed indurimento si ebbero praticamente solo per miscele contenenti cemento;

— l'esame delle variazioni di volume è stato condotto in prima approssimazione immergendo i provini in mercurio a 3 giorni dopo la presa ed operando per differenza di peso. Si sono rilevate solo diminuzioni, minime per le miscele ternarie a base di calce, più sensibili per quelle con cemento.

Le miscele scelte per un ulteriore studio furono le seguenti:

Loppa (100 parti), cemento (15, 20, 25, 30, 50 parti)

Loppa (100 parti), cemento (25, 30 parti), gesso (5, 10, 15 parti)

Loppa (100 parti), calce (10, 15, 20, 30 parti).

Si è rilevato che la migliore utilizzazione della miscela loppa+cemento corrisponde ad una composizione $(100+25) \div (100+30)$; infatti le resistenze ri-

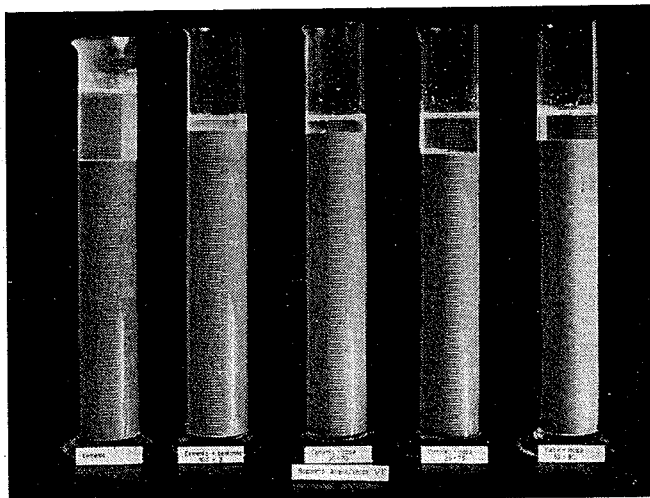


Fig. 5 - Prove di sedimentazione di miscele di:
 a) acqua - cemento
 b) acqua - cemento (100) - bentonite (2)
 c) acqua - cemento (30) - loppa (70)
 d) acqua - cemento (25) - loppa (75)
 e) acqua - calce (10) - loppa (90)
 rapporto acqua/secco = 1/1

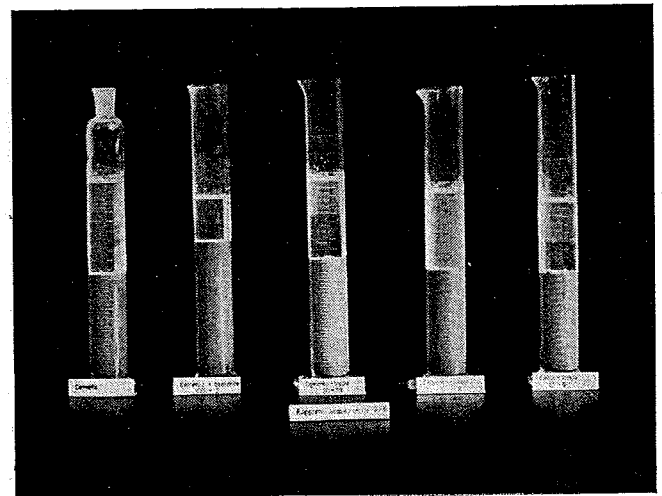


Fig. 6 - Prove di sedimentazione di miscele di:
 a) acqua - cemento
 b) acqua - cemento (100) - bentonite (2)
 c) acqua - cemento (30) - loppa (70)
 d) acqua - cemento (25) - loppa (75)
 e) acqua - calce (10) - loppa (90)
 rapporto acqua/secco = 2/1

Per le prove b) e g) si prese il cemento raffinato Italcementi, che servì anche quale termine di confronto. I risultati ottenuti si possono così riassumere:

— dal punto di vista delle resistenze, le miscele con cemento, e segnatamente con cemento e gesso, si sono avvicinate di più al cemento puro, pur restandogli inferiori; quelle con calce hanno resistenze alquanto minori, e tra queste quella ternaria con calce e gesso offre valori relativamente più alti;

— l'impiego dei reattivi studiati determina inizi di presa e durate più lunghe che per il solo cemento, in misura minore però per le miscele b) f) e g).

sultano maggiori che per il solo cemento (circa del 10%); minime sono le diminuzioni di volume; per contro maggiori sono le durate di presa, con inizi più rapidi, salvo che per miscele ricche di acqua.

L'aggiunta di gesso alle miscele di cemento comporta un aumento delle resistenze se è in piccole quantità (5 parti), un ritardo dell'inizio della presa e una più lunga durata.

Per quel che riguarda le miscele con calce, le resistenze meccaniche, come già detto, sono risultate nettamente inferiori a quelle con cemento, essendosi dimostrata come dose migliore quella con 10 parti. Quanto ai tempi di presa, mentre la durata è risultata indipendente dalla dose, l'inizio è assai più tardo

rispetto alle miscele di cemento. Le variazioni di volume risultano inferiori rispetto al cemento.

Nel complesso, i dati più significativi per le miscele loppa+cemento e loppa+calce sono risultati:

Caratteristiche	Miscela			
	I	II	III	
Tempi di presa su paste normali (ore)	Inizio	4 ^h 50'	3 ^h 05'	9 ^h
	Fine	7 ^h 30'	5 ^h 55'	17 ^h
	Durata	2 ^h 40'	2 ^h 50'	8 ^h
Resistenze a compressione su malte normali (Kg/cm ²)	gg 7	97	106	64
	gg 28	180	207	94
	gg 90	203	224	98
Diminuzioni di volume apparente dopo indurimento rispetto a quello di confezione, su paste con diversi a/s	100	80	29	

- I = Cemento raffinato Italcementi
- II = Loppa+cemento (100+30)
- III = Loppa+calce (100+10)

Un interessante confronto fra i tempi di presa è illustrato in Fig. 9: in forme cubiche lato cm 20 si sono versate paste con rapporto a/s = 2/1; si è poi provato l'affondamento a tempi successivi di un ago di sezione 2,5 mm² gravato da pesi di 300, 1000, 3000 gr.

Dai risultati di queste esperienze, la Direzione Costruzioni Idrauliche della S.I.P. ha deciso di adottare per la diga di Beauregard le seguenti miscele:

— per le iniezioni di consolidamento: usufruendo delle migliori resistenze meccaniche, miscele di cemento nel rapporto loppa/cemento = 3/1;

— per le iniezioni di impermeabilizzazione: usufruendo della maggiore finezza del reattivo, miscele di loppa e calce nel rapporto loppa/calce = 9/1.

2 - Impiego in cantiere (R. Paolina)

La macinazione della loppa di Cogne avviene per via umida in due mulini rotanti, con corpi macinanti di dimensioni 40÷10 mm, graduati nei 4 scomparti e con peso complessivo di 54 ql per ciascun mulino. La produzione di un mulino è di 4,5 ql/ora; l'acqua viene regolata in modo che il rapporto acqua/secco si mantenga pari a 1/2. La finezza di macinazione è tale che l'80% in peso della loppa abbia dimensioni inferiori a 40 micron; ne risulta una granulometria alquanto più grossolana di quella di laboratorio (v. Fig. 1), con vantaggio non grande sul cemento; alcune caratteristiche, come la decantazione, risultano perciò peggiorate (v. Fig. 4).

La pasta di loppa passa dal mulino ad un vascone di capacità m³ 6 (v. schema di Fig. 10), munito di agitatore rotante a 10 giri/min, con due pale forate mobili e due fisse sulle pareti; contemporaneamente, la pasta viene tenuta in movimento per mezzo di una pompa centrifuga da 2,4 CV, che la preleva al fondo del vascone versandola poi entro il medesimo. Tale pompa serve anche a trasferire la pasta in un vascone di raccolta di capacità m³ 20, il cui agitatore ruota pure a 10 giri/min. Quando esso è pieno, una pompa centrifuga da 13 CV invia la pasta ad un secondo vascone da m³ 20, posto in prossimità della centrale di iniezione e distante m 75 dal precedente. Una pompa da 9,5 CV preleva poi la loppa, mantenendola nel circuito sul quale sono inserite due bocchette di prelievo ai dosatori. Tutte le tubazioni in cui circola la loppa hanno diametro 3".

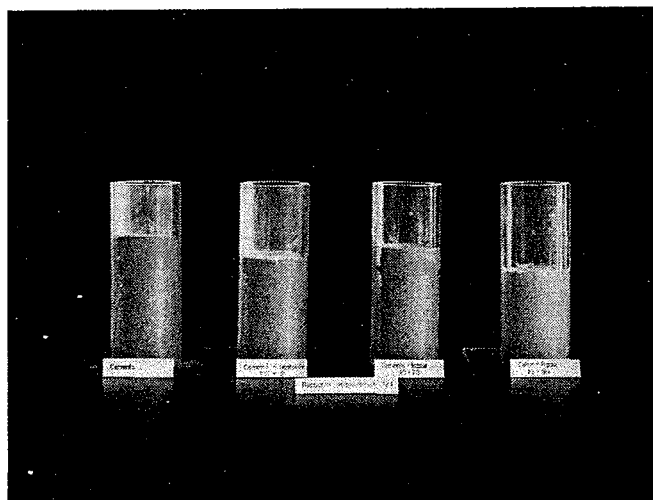


Fig. 7 - Prove di iniezioni in sabbia di Torre del Lago di miscele di:

- a) acqua - cemento
 - b) acqua - cemento (100) - bentonite (2)
 - c) acqua - cemento (30) - loppa (70)
 - d) acqua - calce (10) - loppa (90)
- rapporto acqua/secco = 1/1

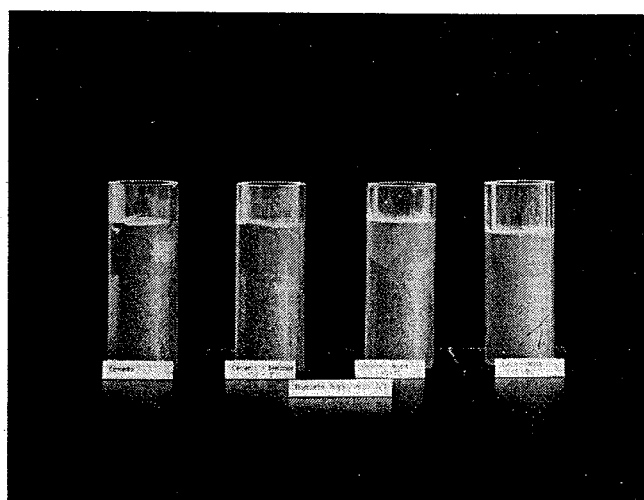


Fig. 8 - Prove di iniezioni in sabbia di Beauregard di miscele di:

- a) acqua - cemento
 - b) acqua - cemento (100) - bentonite (2)
 - c) acqua - cemento (30) - loppa (70)
 - d) acqua - calce (10) - loppa (90)
- rapporto acqua/secco = 1/1

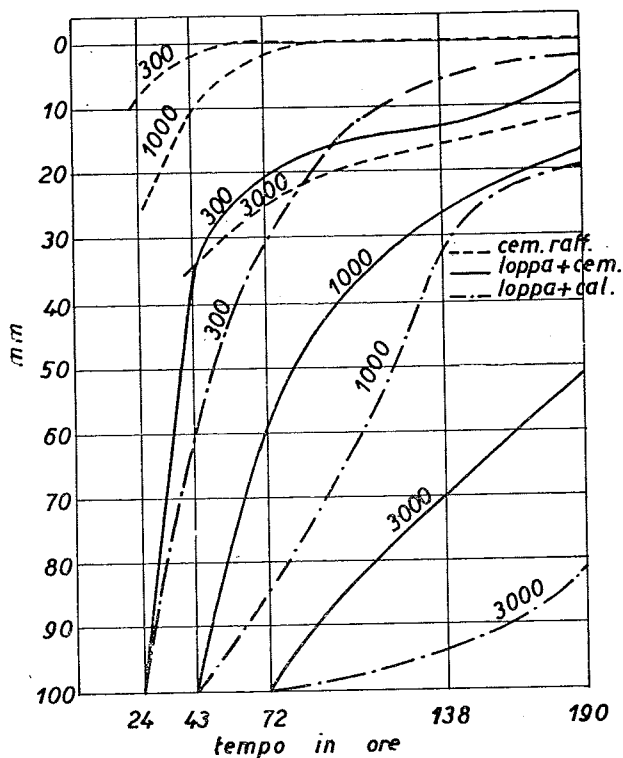


Fig. 9 - Affondamento di un ago di sezione $2,5 \text{ mm}^2$ con carico progressivo 300, 1000, 3000 gr in una pasta con $a/s = 2/1$ iniziale.

Alla centrale di iniezione, la pasta viene dosata a volume e scaricata in un agitatore da 130 l, 60 giri/min, ove le si aggiunge acqua da un dosatore a pressione di capacità 30 l, in modo da raggiungere il rapporto a/s pari a 2/1, 1,5/1, secondo le necessità. In un agitatore sottostante si prepara la miscela acqua-cemento e si versa quella con calce, dosate pure a volume; la calce è preparata a parte nel rapporto $a/s = 2/1$, in vasche da 1300 l, una coppia delle quali serve per la macerazione (24 ore) e la seconda coppia per il prelievo; le vasche sono munite di agitatori ad aria. In un terzo mescolatore si prepara la miscela loppa+cemento (calce)+acqua, e di qui essa viene prelevata dagli iniettori.

I controlli eseguiti sulla loppa sono quelli di finezza (con aerometro), di umidità, di presa e di resistenza. Si è presentata anche la necessità di impiegare miscele con cemento Portland normale e cemento pozzolanico, e anche in tali occasioni le resistenze si sono dimostrate sempre ottime. Per intasamenti a tergo di murature si è impiegata una miscela con sabbia e col 3% di bentonite, e non è risultato che quest'ultima danneggiasse le qualità meccaniche.

La roccia nella quale si inietta loppa è costituita da uno scisto fortemente micaceo, con frequenti vene e noduli quarzosi; esso si presenta in due formazioni distinte:

— micascisto sano e compatto, interessato da fessure di varia importanza, di permeabilità $0,4 \div 1,2 \text{ l/m min}$ a 10 atm

— micascisto fortemente degradato, costituito da un'alternanza di blocchi disgiunti e da strati di ma-

teriale di frizione ridotto allo stato pastoso e pochissimo permeabile, potenti da pochi cm a qualche metro; la permeabilità è di $1 \div 3,6 \text{ l/m min}$ a 10 atm.

Le miscele a base di loppa vengono generalmente iniettate con rapporto $a/s = 2/1, 1,5/1$; nel caso di forti assorbimenti, e considerata la pressione, si passa a 1/1.

La pressione necessaria per l'iniezione di loppa è risultata inferiore del 10÷20% rispetto a quella per il cemento, che però viene impiegato con l'aggiunta del 2% di bentonite. Nel passaggio da un mezzo all'altro durante l'iniezione, si osserva infatti una variazione maggiore nel caso delle fessure piccole e limitate, e che non è da confondere con l'andamento generale dell'assorbimento.

La roccia si è finora dimostrata più ricettiva nei confronti della loppa che del cemento, in misura maggiore se le fessure sono ben pulite; astruendo dal vario ritmo di iniezione, e tenendo conto della diversa importanza dei dati raccolti, si è avuto:

Natura della roccia	Pressione atm	Foro m	Assorbimento Kg/m ora	
			loppa	cemento
Micascisto sano	50	1176 2525	118	70
Micascisto fratturato	30	653 3583	156	116

Il riempimento delle fessure da parte della loppa sembra dunque più completo; quelle secondarie, trascurate dalla prima iniezione, risultano poi maggiormente interessate da un secondo trattamento con loppa che non dal cemento; gli assorbimenti delle iniezioni di ritorno arrivano infatti nel primo caso al 50% del valore di andata, nel secondo non oltrepassano il 35%.

Altri elementi di confronto fra loppa e cemento si sono potuti raccogliere su quei fori che, per necessità contingenti, subirono un trattamento alternato coi due materiali durante la medesima iniezione. Facendo uguale a 100 l'assorbimento del primo mezzo, si è avuto:

Natura della roccia	Foro m	Passaggio durante l'iniezione			
		loppa → cemento		cemento → loppa	
Micascisto sano	45	100	47	—	—
Micascisto fratturato	192 76	100	46	—	—
		—	—	100	118

Passando da loppa a cemento, la pressione necessaria per l'iniezione cresce, come si è visto; le fes-

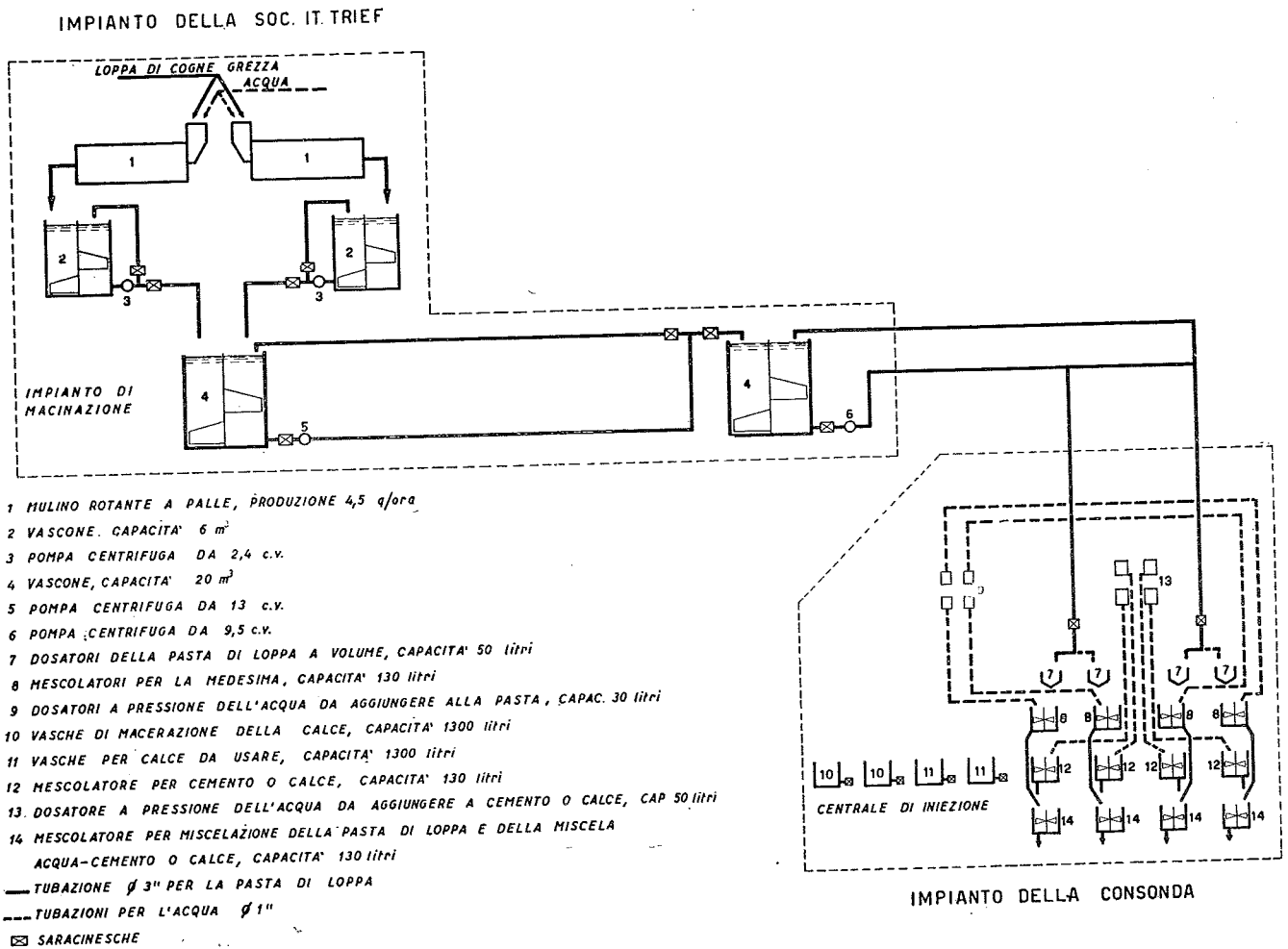


Fig. 10 - Schema di utilizzazione della loppa di Cogne macinata per iniezioni.

sure si occludono rapidamente ed il foro si esaurisce. Per altro esiste un limite di iniettabilità della loppa, che si ritiene di poter migliorare aggiungendo ad essa uno stabilizzatore. Allo stato attuale, si è accertato che neppure la loppa riesce ad imbibire l'accennato materiale di frizione, la cui permeabilità è assai bassa (0,2-0,4 l/m min a 10 atm); basta però una preventiva ed anche limitata iniezione di bentonite perché la loppa trovi in esso delle vie, nelle quali corre

poi più facilmente ed a lungo che non il cemento.

L'esame delle carote di riproforazione ha permesso di stabilire il periodo minimo di attesa che deve intercorrere fra la fine dell'iniezione e l'inizio della riproforazione; la loro umidità è risultata pari al 20÷25%, come per il cemento, e, pur considerando il fatto che questi rilievi sono eseguiti nel foro ove più sentita è la pressione, l'attesa è stata stabilita in 6÷10 ore (6 ore per il cemento).

SOMMAIRE - Après avoir fourni les principales caractéristiques du laitier en insistant tout particulièrement sur ses propriétés hydrauliques en vue de son utilisation pour les injections du rocher de fondation d'un barrage, les auteurs décrivent l'installation de meulage qui a été réalisée; ils citent en outre les conclusions auxquelles ils ont abouti après les premiers mois de fonctionnement.

SUMMARY - After have referred the main typical qualities of slag, particularly as regards its hydraulic properties, prospecting its use for injections in the rock foundation of a dam, the paper describes the grinding plant as it was executed and draws the conclusions after the first months of operation.