

16

5/4

Prof. GIULIO NATTA - Ing. CARLO GUIDO FONTANA

LA RETROGRADAZIONE DEI CALCESTRUZZI POROSI

Estratto da *La partecipazione italiana*
al I Congresso internazionale del beton semplice ed armato.
Liegi, settembre 1930

ROMA
TIPOGRAFIA DEL SENATO
DEL DOTT. G. BARDI
1932-X

Prof. GIULIO NATTA - Ing. CARLO GUIDO FONTANA

LA RETROGRADAZIONE DEI CALCESTRUZZI POROSI

Estratto da *La partecipazione italiana*
al I Congresso internazionale del beton semplice ed armato.
Liegi, settembre 1930

ROMA
TIPOGRAFIA DEL SENATO
DEL DOTT. G. BARDI
1932-X

LA RETROGRADAZIONE DEI CALCESTRUZZI POROSI

Prof. GIULIO NATTA - Ing. CARLO GUIDO FONTANA

L'influenza del tempo sulle proprietà meccaniche dei materiali da costruzione costituisce uno dei problemi più importanti sulla resistenza dei materiali stessi.

Ad esempio, sono particolarmente interessanti le ricerche intese ad esaminare l'azione attraverso il tempo degli agenti atmosferici ordinari (anidride carbonica, acqua, ossigeno) nei confronti del calcestruzzo, azione deteriorante che si sviluppa più o meno rapidamente nei confronti di tutti i materiali da costruzione.

Per quanto tali agenti atmosferici ordinari non abbiano, almeno quando ci si trova in condizioni normali, un'immediata azione nociva sui calcestruzzi ordinari, la loro importanza e i loro effetti possono esplicarsi in certi casi particolari con rapidità e con intensità veramente eccezionali.

Un fenomeno di tale natura si è presentato a noi esaminando il comportamento di alcune importanti strutture di calcestruzzo armato, che, costruite e collaudate in modo favorevole, hanno mostrato, dopo solo due anni, i primi sintomi di una alterazione che ha obbligato il costruttore a ricostruire le strutture stesse che erano andate deteriorandosi. Noi riferiamo in questa nota, oltre alle osservazioni fatte sui calcestruzzi deteriorati o in corso di deteriorazione, le nostre ricerche, effettuate soprattutto da un punto di vista chimico e fisico, che ci hanno permesso di stabilire le cause intime del processo di retrogradazione del calcestruzzo e di ripetere il fenomeno stesso su alcuni campioni preparati in laboratorio.

Il caso, che noi abbiamo avuto occasione di esaminare, rappresenta un caso tipico di retrogradazione delle proprietà meccaniche del calcestruzzo e ci ha particolarmente interessato non solo per l'importanza delle costruzioni, ma anche per il suo sviluppo lento e progres-

sivo, che ha esteso il fenomeno ad altre costruzioni della stessa località e costruite in epoche successive, ma, naturalmente, con gli stessi materiali e con gli stessi sistemi di posa in opera.

L'esame macroscopico permette già da sé di determinare il grado di alterazione del calcestruzzo: il colore quasi giallo, la mancanza di consistenza, la friabilità, il ridursi in polvere impalpabile sotto l'azione della debole pressione delle dita, sono gli aspetti più evidenti del processo di retrogradazione che ha colpito gli elementi più fini delle malte.

Abbiamo notato come il fenomeno di retrogradazione abbia colpito in modo particolarmente intenso i calcestruzzi ove la ghiaia o il pietrisco scarseggiano, mentre la proporzione di sabbia, composta prevalentemente di elementi fini, è elevata. Invece, nei calcestruzzi con maggiore proporzione di ghiaia, tutti questi fenomeni si presentano in scala molto ridotta. Abbiamo inoltre notato, durante i lavori di demolizione e di ricostruzione delle travi e dei pilastri più deteriorati, che le armature metalliche erano coperte di uno spesso strato di ruggine, anche dove i ferri erano protetti da uno strato di calcestruzzo di 4-5 cm.; l'adesione al calcestruzzo ne era di conseguenza ridotta.

È ben noto come il ferro, anche se esposto all'azione dell'umidità, non si ossidi che in presenza di anidride carbonica e di ossigeno, e come l'infiltrazione dell'anidride carbonica nelle masse di calcestruzzo sia normalmente arrestata dall'idrato di calcio che si forma durante la presa del cemento, ma soprattutto dalla compattezza del calcestruzzo. Infatti, abbiamo notato che, mentre per certe solette deteriorate l'alterazione ha interessato tutto lo spessore di calcestruzzo, nei pilastri, invece, l'alterazione si è limitata alle parti esterne, lasciando un nocciolo centrale intatto, la cui linea di demarcazione è nettamente visibile ad occhio nudo; le parti alterate sono giallastre, le altre sono grigie. La differenza è ancora più evidente se si impiega un indicatore, la cui sensibilità è compresa tra un pH di 8,3 ed un pH di 11; ad esempio, con della fenolftaleina in soluzione alcolica il nocciolo appare rosso, mentre la parte alterata non assume alcuna particolare colorazione.

L'ESAME DEI CALCESTRUZZI DETERIORATI. — Noi abbiamo notato, impiegando il microscopio stereoscopico, che i vari campioni di calcestruzzo deteriorati mostrano un gran numero di piccoli alveoli uniformemente distribuiti nella massa. Il legante idraulico non riem-

TABELLA I.

**Risultati di alcune determinazioni
su campioni di calcestruzzi deteriorati.**

Numero	CAMPIONI	Peso specifico reale		Peso di volume		Coefficiente di porosità		Coefficiente di imbibizione	
		rispetto al « tout venant »	rispetto al campione secco	rispetto al « tout venant »	rispetto al campione secco	rispetto al « tout venant »	rispetto al campione secco	rispetto al « tout venant »	rispetto al campione secco
1	Campioni non deterior.	—	2,628	—	2,117	—	0,1944	—	—
2	Campioni non deterior.	—	2,663	—	2,171	—	0,1850	—	—
3	Pilastrini parz. deterior.	2,55	2,69	2,12	2,06	0,168	0,232	0,0798	—
4	Pilastrini parz. deterior.	2,58	2,67	2,08	2,04	0,194	0,235	0,0902	—
5	Pilastrini parz. deterior.	2,51	2,71	2,25	2,16	0,105	0,201	0,0450	0,0950
6	Pilastrini parz. deterior.	2,56	2,73	2,21	2,12	0,137	0,223	0,0628	0,1040
7	Soletta di copertura deteriorata	2,74	—	2,03	—	0,258	—	0,1272	—
8	Soletta di copertura deteriorata	2,77	—	2,02	—	0,270	—	0,1340	—
9	Soletta di copertura deteriorata	2,74	—	2,04	—	0,257	—	0,1243	—
10	Soletta di copertura deteriorata	2,74	—	2,07	—	0,255	—	0,1187	—
11	Campioni deteriorati .	—	2,829	—	1,913	—	0,3235	—	0,1691
12	Campioni deteriorati .	—	2,844	—	1,940	—	0,3180	—	0,1636
13	Campioni deteriorati .	—	2,809	—	1,911	—	0,3195	—	0,1673
14	Fondazione Simplex .	2,53	2,70	2,04	1,96	0,194	0,273	0,0928	0,1400
15	Fondazione Simplex .	2,44	2,82	2,12	1,94	0,131	0,311	0,0626	0,1620

pie tutti i vuoti e si mostra irregolarmente distribuito in piccoli grumi isolati. Manca inoltre pressochè completamente l'aderenza della superficie glabra dei grani cristallini di sabbia con i grumi di legante idraulico.

Su tali campioni abbiamo eseguito le seguenti determinazioni: *a)* peso di volume; *b)* peso specifico; *c)* coefficiente di porosità; *d)* coefficiente di imbibizione, sia sui campioni secchi, sia su campioni *tous-venants*.

Riportiamo nella tabella 1 i risultati di alcune di tali determinazioni, dalle quali risulta che l'alterazione ha colpito i calcestruzzi più porosi. Si nota che i calcestruzzi di fondazione, immersi permanentemente in acqua marina, pur essendo molto porosi, sono sfuggiti al processo di retrogradazione.

Le nostre ricerche hanno avuto per scopo la determinazione delle trasformazioni chimiche anormali che si sono verificate nei calcestruzzi esaminati. La friabilità delle masse di calcestruzzo era talmente accentuata che si è potuto, impiegando un semplice e grossolano staccio, separare la sabbia dal pietrisco e dalla ghiaia; poi uno staccio da 400 maglie per cmq. ci ha permesso di separare il cemento e la parte più fina della sabbia.

L'analisi chimica di tutte queste frazioni ci ha permesso di determinare la quantità di cemento contenuta nel campione originario; tutti i risultati sono stati corretti dagli errori provenienti dalla presenza della sabbia e dei suoi costituenti solubili.

Abbiamo così compiuto parecchie analisi per via meccanica. L'analisi di due campioni di calcestruzzo deteriorati ha dato i seguenti risultati:

Pietrisco	23,61 %
Sabbia grossa (diametro maggiore: 1 mm.)	17,01 %
Sabbia fina (diametro $1 \div 0,5$ mm.)	37,00 %
Sabbia finissima (diametro minore: 0,5 mm.)	7,33 %
Cemento idratato	15,05 %
	100,00

Tutte queste percentuali sono espresse in peso. Considerata allo stato secco, la percentuale di cemento risulta del 12,94 %.

Le nostre determinazioni circa il peso medio di volume dei vari campioni di calcestruzzo deteriorato ci hanno dato come valore medio 2040 kg. per mc. cioè un dosaggio di cemento di

$$0,1294 \times 2040 = 264 \text{ kg. per mc.}$$

Questo dosaggio è debole.

Non crediamo però che lo scarso dosaggio di cemento sia di per sè la causa di una tardiva e progressiva deteriorazione dei calcestruzzi. Inoltre le percentuali di Cl^- di Mg^{++} nei calcestruzzi analizzati sono trascurabili e quella di SO_4^{--} è compresa nei limiti ufficialmente ammessi: quindi, a questi ordinari agenti di deteriorazione non può venire attribuito alcuno dei fenomeni qui studiati.

Riportiamo l'analisi del cemento usato nella costruzione studiata, quale risulta dalla media delle determinazioni eseguite sui campioni del cemento usato e prelevato all'atto del suo impiego e da determinazioni eseguite su campioni di boiaccia, riferite al cemento anidro:

SiO_2 insolubile	8,76 %
SiO_2 solubile	12,22 %
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	7,03 %
CaO	53,50 %
MgO	0,77 %
SO_3	1,11 %
CO_2	15,28 %

Risulta da questa analisi, dato l'elevato tenore di CO_2 , e dall'esame delle densità, che il cemento usato era costituito da una miscela di klinker macinato e di inerti costituiti da roccia silico-calcareo macinata. Tali miscele sono largamente usate oggi in pratica.

Abbiamo poi osservato dei pilastri ove la deteriorazione è notevole alla superficie; in essi gli strati superficiali hanno un colore giallastro, mentre il nocciolo interno è grigio.

Tra gli strati interni e gli strati esterni, che, come si è detto, si differenziano nettamente come stato di conservazione e colore, abbiamo riscontrato, come unica differenza nella composizione ponderale, la diversa percentuale di anidride carbonica: naturalmente, sono molto più ricchi in CO_2 gli strati esterni del calcestruzzo.

Si può quindi ritenere che la grande porosità iniziale dei calcestruzzi deteriorati sia la causa essenziale del rapido assorbimento di anidride carbonica. La trasformazione dell'idrato di calcio in carbonato porta ad una variazione di volume (il volume della molecola di idrato di calcio è di $54 \cdot 10^{-24}$ cc., mentre il volume del carbonato, come calcite, è di $60 \cdot 10^{-24}$ cc., con un incremento quindi dell'11,11 %); tale accrescimento di volume, quando il calcestruzzo è sufficientemente compatto, può dare una reazione interna uguale e contraria agli sforzi generatisi da questo accrescimento di volume e

rendere il calcestruzzo più compatto e meglio adatto a reagire alle sollecitazioni esterne. L'accrescimento della compattezza inoltre impedisce l'afflusso verso l'interno dell'anidride carbonica.

La grande porosità iniziale del calcestruzzo deteriorato non ha permesso che si verificasse questo accrescimento nella capacità di assorbire lavoro di deformazione. Crediamo invece che l'anidride carbonica per la porosità del calcestruzzo abbia favorito l'idrolisi di quei costituenti della malta cementizia, che noi consideriamo ordinariamente stabili, fino ad una decomposizione dei silicati e degli alluminati di calcio in carbonato, silice ed allumina, secondo un processo simile a quello che si verifica in natura nella caolinizzazione dei feldspati.

Da tutti i dati analitici che abbiamo potuto dedurre nelle nostre ricerche, abbiamo dovuto concludere che il cemento impiegato nella costruzione studiata era una miscela di cemento Portland artificiale addizionato con almeno il 40 % di roccia silico-calcareo cruda e finalmente macinata. La grande diffusione dei cementi così addizionati e i buoni risultati genericamente ottenuti ci impediscono di considerare l'adulterazione del cemento con sostanze inerti in forte proporzione come la causa principale dei fenomeni studiati. Si può però ritenere che un cemento addizionato con sostanze inerti presenti minore facoltà di reagire alla penetrazione degli agenti atmosferici (in particolare anidride carbonica), soprattutto quando i calcestruzzi risultano notevolmente porosi.

Abbiamo determinato la composizione granulometrica della sabbia impiegata ed esaminato la sua alterabilità chimica per ricercare l'influenza di tali fattori nella deteriorazione del calcestruzzo. Abbiamo riscontrato come il materiale impiegato avesse caratteristiche poco soddisfacenti per venire impiegato in costruzioni in cemento armato. Infatti, certi campioni di sabbia erano costituiti per il 95 % di granuli con dimensioni inferiori od uguali ad un mm. Di conseguenza il valore del peso di volume della sabbia è molto basso rispetto al suo peso specifico, come si può dedurre dai dati qui riportati:

peso specifico medio della sabbia	2,796
peso di volume della sabbia non costipata . . .	1,568.

Al microscopio si può facilmente vedere come la sabbia sia povera di elementi calcarei e come sia in prevalenza costituita da cristalli provenienti dalla decomposizione di rocce trachitiche e leucitiche:

non mancano però dei componenti feldspatici e quarzosi, certi silicati basici colorati e cristalli di magnetite.

La magnetite e una parte dei silicati basici contenuti nella sabbia sono notevolmente alterabili, ma crediamo che nell'interno dei calcestruzzi non deteriorati i processi di degradazione atmosferica non possano verificarsi, giacchè l'alterazione idrolitica dei silicati è impedita dall'alcalinità delle malte.

Per meglio sincerarsi sull'andamento di questi fenomeni, abbiamo istituito un confronto tra le sabbie impiegate per la confezione dei calcestruzzi deteriorati con altre sabbie impiegate su larghissima scala per costruzioni a Milano (sabbie estratte dal bacino dell'idroscalo di Milano); si è determinato la quantità di sostanza argillosa formata in seguito all'azione concomitante ed accelerata dell'anidride carbonica, dell'ossigeno e dell'acqua e per la durata di parecchi mesi. Abbiamo trovato che effettivamente la sabbia, impiegata per la confezione del calcestruzzo deteriorato, ha dato una maggior quantità di prodotti argillosi; dobbiamo tuttavia affermare che questo fenomeno, da un punto di vista quantitativo, non può venir considerato come la causa essenziale della retrogradazione osservata, poichè l'alcalinità del cemento idratato può impedire l'idrolisi dei minerali più alterabili, che sono anche i più basici.

Giova qui ricordare i recenti studi di Abrams (1), Féret (2), Talbot e Richart (3) e di Bolomey (4), che ci danno delle relazioni sufficientemente approssimate tra il carico di rottura, la porosità, la quantità di cemento, l'acqua d'impasto. Le formule proposte dai citati autori ci lasciano la possibilità di calcolare entro certi limiti l'affievolirsi delle proprietà meccaniche dei calcestruzzi per un accrescimento della porosità e del quantitativo d'acqua d'impasto; ma noi non possiamo applicare ragionevolmente tali formule, perchè le porosità che noi abbiamo misurato nei calcestruzzi più deteriorati sono troppo elevate e fuori del campo di applicabilità di tali formule.

La grande porosità iniziale dei calcestruzzi deteriorati deve venire così prevalentemente attribuita alla elevata percentuale di sabbia (più del 60 % in peso). Si può dedurre, poichè il peso di volume della sabbia è di 1,658 kg./mc., che un metro cubo del calcestruzzo in questione contiene più di 750 litri di sabbia.

(1) ABRAMS, « Bull. of the Lewis Just. Struct. Mater. Res. Lab. Chicago », 1, 22.

(2) FÉRET, *France et Belgique*, « Revue de l'ingénieur », 6, n. 3, 63 (1923).

(3) TALBOT E RICHART, « Bull. Univ. Illinois, by Ex. Stat. », 137, 23.

(4) J. BOLOMEY « Bull. Techn. Suisse Rom. », 193 (1929).

rendere il calcestruzzo più compatto e meglio adatto a reagire alle sollecitazioni esterne. L'accrescimento della compattezza inoltre impedisce l'afflusso verso l'interno dell'anidride carbonica.

La grande porosità iniziale del calcestruzzo deteriorato non ha permesso che si verificasse questo accrescimento nella capacità di assorbire lavoro di deformazione. Crediamo invece che l'anidride carbonica per la porosità del calcestruzzo abbia favorito l'idrolisi di quei costituenti della malta cementizia, che noi consideriamo ordinariamente stabili, fino ad una decomposizione dei silicati e degli alluminati di calcio in carbonato, silice ed allumina, secondo un processo simile a quello che si verifica in natura nella caolinizzazione dei feldspati.

Da tutti i dati analitici che abbiamo potuto dedurre nelle nostre ricerche, abbiamo dovuto concludere che il cemento impiegato nella costruzione studiata era una miscela di cemento Portland artificiale addizionato con almeno il 40 % di roccia silico-calcareo cruda e finalmente macinata. La grande diffusione dei cementi così addizionati e i buoni risultati genericamente ottenuti ci impediscono di considerare l'adulterazione del cemento con sostanze inerti in forte proporzione come la causa principale dei fenomeni studiati. Si può però ritenere che un cemento addizionato con sostanze inerti presenti minore facoltà di reagire alla penetrazione degli agenti atmosferici (in particolare anidride carbonica), soprattutto quando i calcestruzzi risultano notevolmente porosi.

Abbiamo determinato la composizione granulometrica della sabbia impiegata ed esaminato la sua alterabilità chimica per ricercare l'influenza di tali fattori nella deteriorazione del calcestruzzo. Abbiamo riscontrato come il materiale impiegato avesse caratteristiche poco soddisfacenti per venire impiegato in costruzioni in cemento armato. Infatti, certi campioni di sabbia erano costituiti per il 95 % di granuli con dimensioni inferiori od uguali ad un mm. Di conseguenza il valore del peso di volume della sabbia è molto basso rispetto al suo peso specifico, come si può dedurre dai dati qui riportati:

peso specifico medio della sabbia	2,796
peso di volume della sabbia non costipata . . .	1,568.

Al microscopio si può facilmente vedere come la sabbia sia povera di elementi calcarei e come sia in prevalenza costituita da cristalli provenienti dalla decomposizione di rocce trachitiche e leucitiche:

non mancano però dei componenti feldspatici e quarzosi, certi silicati basici colorati e cristalli di magnetite.

La magnetite e una parte dei silicati basici contenuti nella sabbia sono notevolmente alterabili, ma crediamo che nell'interno dei calcestruzzi non deteriorati i processi di degradazione atmosferica non possano verificarsi, giacchè l'alterazione idrolitica dei silicati è impedita dall'alcalinità delle malte.

Per meglio sincerarsi sull'andamento di questi fenomeni, abbiamo istituito un confronto tra le sabbie impiegate per la confezione dei calcestruzzi deteriorati con altre sabbie impiegate su larghissima scala per costruzioni a Milano (sabbie estratte dal bacino dell'idroscalo di Milano); si è determinato la quantità di sostanza argillosa formata in seguito all'azione concomitante ed accelerata dell'anidride carbonica, dell'ossigeno e dell'acqua e per la durata di parecchi mesi. Abbiamo trovato che effettivamente la sabbia, impiegata per la confezione del calcestruzzo deteriorato, ha dato una maggior quantità di prodotti argillosi; dobbiamo tuttavia affermare che questo fenomeno, da un punto di vista quantitativo, non può venir considerato come la causa essenziale della retrogradazione osservata, poichè l'alcalinità del cemento idratato può impedire l'idrolisi dei minerali più alterabili, che sono anche i più basici.

Giova qui ricordare i recenti studi di Abrams(1), Féret(2), Talbot e Richart (3) e di Bolomey(4), che ci danno delle relazioni sufficientemente approssimate tra il carico di rottura, la porosità, la quantità di cemento, l'acqua d'impasto. Le formule proposte dai citati autori ci lasciano la possibilità di calcolare entro certi limiti l'affievolirsi delle proprietà meccaniche dei calcestruzzi per un accrescimento della porosità e del quantitativo d'acqua d'impasto; ma noi non possiamo applicare ragionevolmente tali formule, perchè le porosità che noi abbiamo misurato nei calcestruzzi più deteriorati sono troppo elevate e fuori del campo di applicabilità di tali formule.

La grande porosità iniziale dei calcestruzzi deteriorati deve venire così prevalentemente attribuita alla elevata percentuale di sabbia (più del 60 % in peso). Si può dedurre, poichè il peso di volume della sabbia è di 1,658 kg./mc., che un metro cubo del calcestruzzo in questione contiene più di 750 litri di sabbia.

(1) ABRAMS, « Bull. of the Lewis Just. Struct. Mater. Res Lab. Chicago », 1, 22.

(2) FÉRET, *France et Belgique*, « Revue de l'ingénieur », 6, n. 3, 63 (1923).

(3) TALBOT E RICHART, « Bull. Univ. Illinois, by Ex. Stat. », 137, 23.

(4) J. BOLOMEY « Bull. Techn. Suisse Rom. », 193 (1929).

La sabbia impiegata aveva una percentuale di vuoti pari al 41 %, sicchè la miscela di sabbia e di ghiaia o pietrisco aveva il 31 % di vuoti. I 100 — 120 litri di cemento idratato non potevano certo riempirli completamente.

CONCENTRAZIONE DI IONI IDROGENO NEI CALCESTRUZZI DETERIORATI. — Come si è già detto avanti, i calcestruzzi deteriorati sono neutri rispetto a molti indicatori e fino ad una notevole profondità.

Questo fenomeno è tanto più accentuato, quanto più intensa è la deteriorazione; i campioni prelevati da alcune solette deteriorate sono neutri per tutto il loro spessore.

Nei pilastri deteriorati più antichi (aventi cioè 3 anni di vita), abbiamo osservato come la reazione alcalina si inizi ad una profondità di 3-4 cm., talvolta anche ad una profondità di 8 cm.

Si è potuto osservare che le parti esterne del calcestruzzo deteriorato, colorate in tinta giallastra mantengono, in soluzioni acquose in equilibrio con le fasi solide, un pH di poco superiore ad 8 e quindi praticamente uguale a quello del carbonato di calcio. Le parti interne, che sono più grige, presentano un pH superiore a 12.

L'alluminato tricalcico si idrolizza per un pH eguale a 12,3 (1); tutti gli altri alluminati si idrolizzano per valori di pH poco superiori a 11, mentre il ferrito e il silicato dicalcico s'idrolizzano per un pH di circa 13.

Da questo possiamo dedurre che le porzioni esterne del calcestruzzo deteriorato non contengono più alcuno di quei costituenti (alluminati bi- e tricalcico idrati, silicato e ferrito dicalcico), che, secondo le ipotesi correnti, sono, con l'idrato di calcio, i leganti del calcestruzzo.

Questo fenomeno d'idrolisi è la causa della più elevata percentuale di silice insolubile riscontrata nell'analisi dei campioni provenienti dai calcestruzzi esterni. L'acido silicico, formatosi per idrolisi, ha subito quindi un processo di disidratazione e di invecchiamento.

PROVE SU CAMPIONI PREPARATI IN LABORATORIO. — I dati precedentemente esposti ci inducono a considerare la cattiva composizione granulometrica e la conseguente forte porosità come la causa della retrogradazione del calcestruzzo. Infatti è così che gli agenti atmosferici hanno potuto agire con rapidità grandissima, mentre nei calcestruzzi

(1) W. M. LEARCH E ROTT. BOGUE, « J. of. Phys. Chem. », 31, 1627 (1927).

ordinari essi agiscono con grande lentezza e con effetti completamente diversi. Per confermare questa ipotesi, abbiamo preparato in laboratorio, usando la stessa sabbia impiegata nella confezione dei calcestruzzi deteriorati, parecchi campioni di malta con i seguenti dosaggi: 200 e 300 kg. di cemento; 400, 600 e 800 litri di sabbia; 150 e 200 litri d'acqua. Nella preparazione di questi campioni si è esclusa la ghiaia, dato che essa non ha apportato alcuna azione diretta al processo chimico di retrogradazione.

Per ciascun dosaggio furono preparati 8 campioni; 4 con un cemento naturale e 4 con un cemento artificiale addizionato di polvere finissima di roccia silico-calcareo, in proporzioni tali (circa 50 %) che il cemento risultante presentasse nelle malte normali circa la stessa resistenza del cemento naturale.

Lo scopo delle nostre esperienze era la ricerca di dati comparativi tra i cementi naturali e i cementi artificiali addizionati. Una metà dei campioni preparati fu conservata nei sotterranei del laboratorio; l'altra metà, dopo un mese di conservazione all'aria, fu posta in una atmosfera di anidride carbonica umida sotto una pressione superiore di 10 mm. di mercurio alla pressione atmosferica.

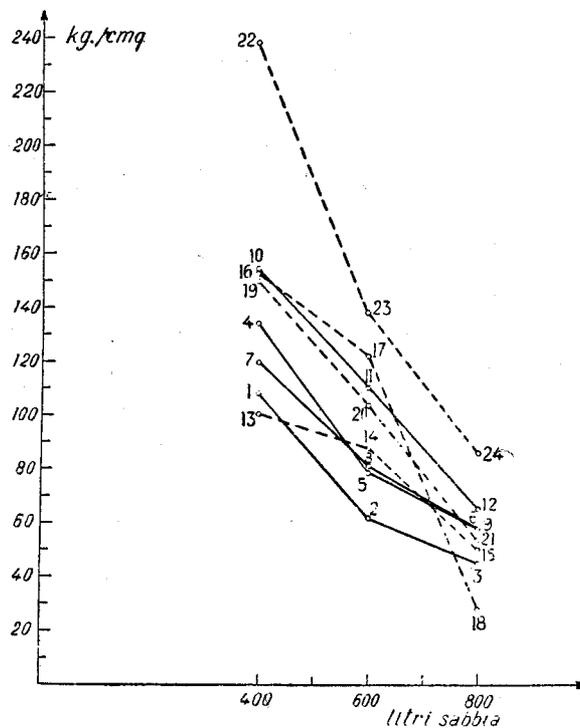


Fig. 1. - Provini conservati 3 mesi all'aria.

Diagramma della variazione del carico di rottura in funzione dei litri di sabbia impiegati, per provini preparati con cemento naturale (numeri da 1 a 12) e con cemento artificiale addizionato (numeri da 13 a 24): per dosaggi di 250 kg. in cemento con 200 litri di acqua di impasto (numeri 1, 2, 3; 13, 14, 15) e con 150 litri di acqua di impasto (numeri 7, 8, 9, 19, 20, 21), e per dosaggi di 300 kg. in cemento con 200 litri d'acqua d'impasto (numeri 4, 5, 6; 16, 17, 18) e con 150 litri di acqua (numeri 10, 11, 12; 22, 23, 24) (vedi tab. 2).

Di tutti questi campioni venne determinato: *a)* il peso di volume; *b)* il carico di rottura; *c)* lo spessore dello strato carbonatato.

Nei campioni che vennero mantenuti 2 mesi nell'atmosfera di anidride carbonica, la carbonatazione si è propagata con una notevole velocità; soltanto i campioni più ricchi in cemento presentarono ancora un nocciolo con reazione alcalina; questo nocciolo ha maggiori dimensioni nei campioni preparati con cemento naturale. I risultati numerici ottenuti sono riassunti nella tabella 2.

Ecco le nostre principali osservazioni:

CONFRONTO TRA I CEMENTI:

a) Campioni conservati all'aria (fig. 1). I campioni confezionati con cemento addizionato presentarono, dopo tre mesi, dei carichi di rottura un po' maggiori, soprattutto per alti dosaggi di cemento e per deboli proporzioni d'acqua d'impasto;

b) Campioni conservati un mese all'aria e successivamente per un mese nell'anidride carbonica (fig. 2). I campioni confezionati con cemento addizionato presentarono un carico di rottura tanto più basso quanto più fu elevata la quantità d'acqua d'impasto. Fu osservata una maggior resistenza solo in quei campioni che vennero confezionati impiegando molto cemento e poca acqua d'impasto. Tutti gli altri campioni presentano carichi di rottura più bassi di quelli dei campioni corrispondenti confezionati con cemento naturale.

Prolungata di un altro mese la permanenza dei campioni nella atmosfera di anidride carbonica umida, i soprascritti risultati vennero totalmente confermati.

INFLUENZA DELL'ACQUA D'IMPASTO SULLE PROPRIETÀ MECCANICHE.

— La tabella 2 ci dà le variazioni del carico di rottura in funzione dell'acqua d'impasto. La diminuzione del carico di rottura per un aumento d'acqua d'impasto da 150 a 200 litri d'acqua per mc. è molto importante, soprattutto nei campioni confezionati con cemento addizionato. Tali differenze, espresse in forma percentuale, ci dicono che la diminuzione è compresa tra il 30 ed il 50 % per i campioni più ricchi di cemento e raggiunge il 100 %, riducendosi la resistenza a zero, nei campioni più poveri.

INFLUENZA DEL RAPPORTO CEMENTO : SABBIA. — Una diminuzione di questo rapporto porta naturalmente con sé ad una diminuzione del carico di rottura. Per malte confezionate con cemento natu-

TABELLA 2.

Resistenze a compressione delle malte di cemento.

Numero del provino	TIPO DEL CEMENTO	Dosaggio del cemento <i>kg/mc.</i>	Dosaggio della sabbia <i>litri</i>	Acqua d'impasto <i>litri</i>	Peso di volume <i>kg/mc.</i> — Campioni conservati 9 mesi all'aria	Carichi di rottura <i>kg/cmq.</i>		
						Campioni conservati 3 mesi all'aria	Campioni conservati 9 mesi all'aria	Campioni conservati un mese all'aria e un mese in CO ₂ umida
1	Naturale . .	250	400	200	2065	108	134	245
2	Naturale . .	250	600	200	1953	62	76	124
3	Naturale . .	250	800	200	1907	45	48	88
4	Naturale . .	300	400	200	2013	134	130	252
5	Naturale . .	300	600	200	1954	79	97	175
6	Naturale . .	300	800	200	1968	58	70	121
7	Naturale . .	250	400	150	1946	120	130	273
8	Naturale . .	250	600	150	1907	81	97	138
9	Naturale . .	250	800	150	1897	58	65	68
10	Naturale . .	300	400	150	1989	155	151	308
11	Naturale . .	300	600	150	1977	110	130	220
12	Naturale . .	300	800	150	1903	65	75	117
13	Artificiale . .	250	400	200	1997	100	130	128
14	Artificiale . .	250	600	200	1951	88	90	84
15	Artificiale . .	250	800	200	1915	50	57	0
16	Artificiale . .	300	400	200	2037	153	169	188
17	Artificiale . .	300	600	200	1974	122	128	132
18	Artificiale . .	300	800	200	1952	28	23	0
19	Artificiale . .	250	400	150	2050	150	166	203
20	Artificiale . .	250	600	150	1981	104	120	126
21	Artificiale . .	250	800	150	1934	54	64	56
22	Artificiale . .	300	400	150	2113	238	304	402
23	Artificiale . .	300	600	150	2013	138	154	168
24	Artificiale . .	300	800	150	2026	86	85	80

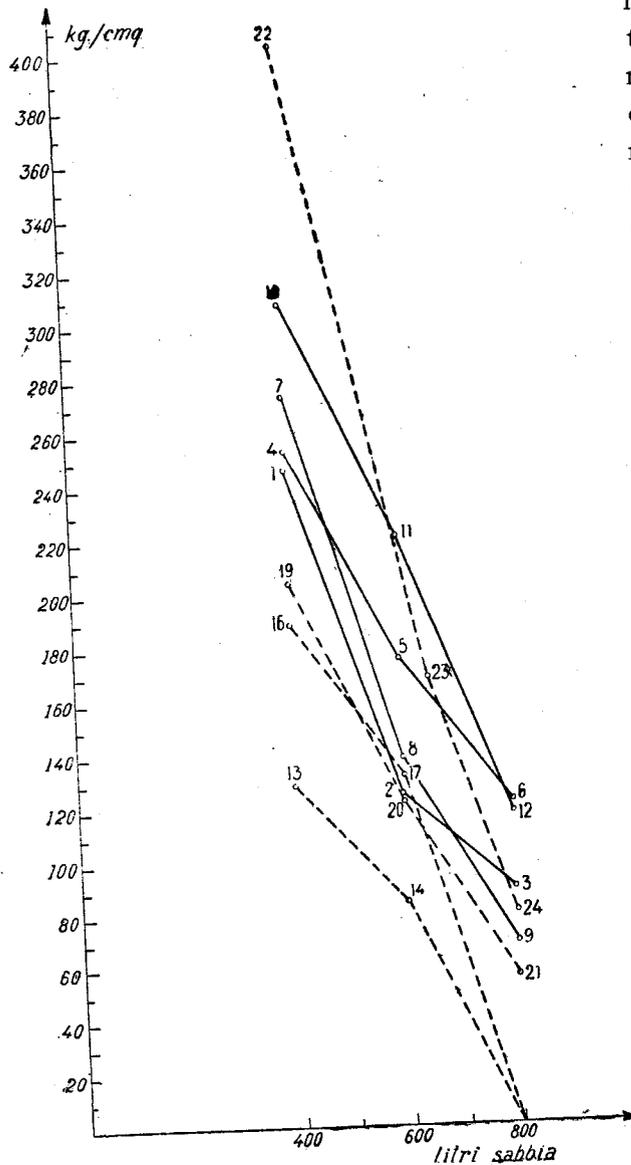


Fig. 2. — Provini conservati un mese all'aria e un mese in atmosfera di CO₂ umida.

Diagramma della variazione del carico di rottura in funzione dei litri di sabbia impiegati, per provini preparati con cemento naturale (numeri da 1 a 12) e con cemento artificiale addizionato (numeri da 13 a 24): per dosaggi di 250 kg. in cemento con 200 litri di acqua d'impasto (numeri 1, 2, 3; 13, 14, 15) e con 150 litri di acqua d'impasto (numeri 7, 8, 9; 19, 20, 21), e per dosaggi di 300 kg. in cemento con 200 litri d'acqua d'impasto (numeri 4, 5, 6; 16, 17, 18) e con 150 litri d'acqua (numeri 10, 11, 12; 22, 23, 24) (vedi tab. II)

rale e conservate per tre mesi all'aria, il carico di rottura, a parità di altre condizioni, si riduce del 55 % in media allorchè il dosaggio di sabbia passa da 400 e 800 litri.

Tale diminuzione è più sensibile nelle malte confezionate con cemento addizionato e raggiunge il 64 %.

La diminuzione si accentua per tutti i campioni che hanno subito l'azione dell'anidride carbonica ed in particolare per quei campioni che furono confezionati con cemento addizionato (57-76 %). Infine, per i campioni confezionati con cemento addizionato e con 200 litri d'acqua d'impasto, il carico di rottura, per la stessa variazione di dosaggio della sabbia, è sceso a zero.

INFLUENZA DELL'INVECCHIAMENTO. — Secondo le nostre esperienze, l'azione dell'anidride carbonica e l'azione del tempo sono perfettamente comparabili, sia nel calcestruzzo confezionato con cemento

naturale sia nel calcestruzzo confezionato con cemento artificiale addizionato. L'azione dell'anidride carbonica ha dato, nei campioni più ricchi in cemento naturale, aumenti del carico di rottura compresi tra 88 e 120 %; nei campioni più poveri in cemento, tali aumenti sono un po' inferiori (dal 17 al 96 %); nei campioni invece confezionati con cemento artificiale addizionato, abbiamo trovato soltanto un aumento più debole per i calcestruzzi più ricchi in cemento (dal 25 al 69 %); per i calcestruzzi più poveri in cemento abbiamo riscontrato o deboli incrementi o diminuzioni molto gravi (+ 22 % a - 100 %).

CONSIDERAZIONI SUI PESI SPECIFICI. — Dato l'intento di riprodurre in laboratorio i calcestruzzi e le malte che noi abbiamo veduto deteriorati, si è proceduto, come indagine preliminare, al controllo del peso di volume dei provini preparati e si è potuto notare che i pesi di volume delle malte deteriorate sono quasi uguali a quelli dei provini preparati in laboratorio, più ricchi di sabbia e confezionati con 200 litri d'acqua d'impasto. Infatti, per i calcestruzzi deteriorati, deducendo il peso e il volume della ghiaia o del pietrisco che erano presenti, si deduce un peso di volume della malta compreso tra 1850 e 1900 kg/mc.

I dati raccolti nella tabella I sono superiori perchè si riferiscono a campioni di calcestruzzo contenenti ghiaia o pietrisco.

* * *

CONCLUSIONI. — Si è osservato un interessante fenomeno di retrogradazione tardiva delle proprietà meccaniche del calcestruzzo in un'importante struttura di cemento armato.

Tale fenomeno di retrogradazione è dovuto alla concomitanza di parecchi fattori sfavorevoli. La composizione granulometrica dei calcestruzzi studiati, cattiva per difetto di pietrisco o di ghiaia, per l'eccesso dei costituenti fini della sabbia ed anche per il probabile eccesso d'acqua d'impasto, peggiorata per l'impiego di cemento addizionato, non poteva dare calcestruzzi ad alta resistenza, anche se il dosaggio di cemento non fosse disceso sotto il normale.

L'elevatissima porosità del calcestruzzo e la grande superficie specifica delle malte, dovuta soprattutto alla composizione granulo-

metrica della sabbia, hanno permesso il verificarsi di importanti fenomeni di idrolisi e la carbonatazione della calce prodottasi.

Tutti questi fenomeni avvengono anche nei calcestruzzi ordinari, ma in modo molto lento e per uno strato strettamente superficiale.

Durante questo processo di retrogradazione del calcestruzzo, che noi abbiamo riprodotto in laboratorio, abbiamo osservato che la maggior parte di queste reazioni portano ad un aumento di volume.

Da un punto di vista meccanico le deduzioni alle quali si può giungere sono molto diverse secondo la porosità e il dosaggio di cemento nella malta e nel calcestruzzo. Si può concludere infatti che:

a) nei calcestruzzi ricchi di cemento e poco porosi il lento accrescimento di volume produce un aumento di compattezza e di resistenza meccanica; l'idrolisi è estremamente lenta poichè l'aumento di volume porta ad una diminuzione di porosità. Pertanto in tali calcestruzzi si osserva un aumento lento e graduale di resistenza;

b) nei calcestruzzi poveri e porosi il fenomeno di idrolisi e di carbonatazione è rapido e l'aumento di resistenza attraverso il tempo è trascurabile;

c) nei calcestruzzi poverissimi in cemento, ad alta porosità (1) e ad alta superficie specifica, con resistenza meccanica iniziale debole, tutti questi fenomeni si accentuano.

Nei calcestruzzi che contengono soltanto piccole quantità di cemento puro, si osserva una retrogradazione della resistenza che talvolta, quando le malte sono confezionate con cementi addizionati, può raggiungere la disgregazione naturale del calcestruzzo.

(1) Riguardo agli effetti prodotti dagli agenti atmosferici nel calcestruzzo hanno influenza, oltre alla porosità complessiva, anche le dimensioni e la distribuzione statistica dei pori. L'alterabilità del calcestruzzo è tanto maggiore a parità di porosità quanto minori sono le dimensioni dei singoli pori e quindi tanto maggiore la loro superficie specifica. Ciò spiega la resistenza agli agenti atmosferici dei calcestruzzi cellulari.
