

G. NATTA e G. G. FONTANA

La retrogradazione dei calcestruzzi porosi

LEADER

Estratto dal "Giornale di Chimica Industriale ed Applicata"
Anno XIII - APRILE 1932

MILANO
VIA S. PIETRO, 10

La retrogradazione dei calcestruzzi porosi

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 volte ad esaminare e l'azione attraverso il tempo degli agenti atmosferici nei confronti del calcestruzzo e l'azione deteriorante degli agenti atmosferici ordinari (anidride carbonica, acqua, ossigeno), azione 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 nei calcestruzzi ordinari, la loro importanza e i loro effetti possono esplicarsi in certi casi particolari con una 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 calce-

struzzi deteriorati o in corso di deterioramento, 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 dei 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 colpite, ma anche per il suo sviluppo lento e progressivo, che ha esteso il fenomeno ad altre costruzioni della stessa località e costruite in epoche diverse, ma con gli stessi materiali.

L'esame macroscopico permette già da sè 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 miglior composizione granulometrica, contenenti una 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 sono protetti da uno strato di calcestruzzo di 4-5 cm.; l'adesione al calcestruzzo ne era di conseguenza ridotta.

E' ben noto come il ferro, anche se esposto all'azione dell'umidità, non si ossidi che in presenza di anidride carbonica e di ossigeno; che l'infiltrazione dell'anidride carbonica nelle masse di calcestruzzo è 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 a occhio nudo; inoltre 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 ed un pH di 11; ad esempio con della fenoltaleina in soluzione alcoolica 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 riempie 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 queste determinazioni: *a)* peso di volume; *b)* peso specifico; *c)* coefficiente di porosità; *d)* coefficiente di imbibizione sia sui campioni secchi, sia su dei campioni *tous-venants*.

Riportiamo nella seguente tabella I 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. Il minor peso specifico reale di alcuni campioni non deteriorati è dovuto alla maggior percentuale di pietrisco avente minor densità della sabbia.

Abbiamo già esposto le caratteristiche del processo di retrogradazione e le nostre ricerche hanno avuto per scopo la determinazione delle trasformazioni chimiche anormali che si sono verificate nei nostri calcestruzzi. La friabilità delle masse di calcestruzzo era talmente accentuata che si è potuto, impiegando un semplice e grossolano staccio, separare la sabbia dal

TABELLA I.

N.	CAMPIONI	Peso specifico reale rispetto al "tout venant,"	Peso specifico reale rispetto al campione secco	Peso di volume rispetto al "tout venant,"	Peso di volume rispetto al campione secco	Coefficiente di porosità rispetto al "tout venant,"	Coefficiente di porosità rispetto al secco	Coef. di imbibizione rispetto al "tout venant,"	Coefficiente di imbibizione rispetto al secco
1	Campioni non deteriorati	—	2,628	—	2,117	—	0,1944	—	—
2	»	—	2,663	—	2,171	—	0,1850	—	—
3	Pilastrini parziali. deter.	2,55	2,69	2,12	2,06	0,168	0,232	0,0798	—
4	»	2,58	2,67	2,08	2,04	0,194	0,235	0,0902	—
5	»	2,51	2,71	2,25	2,16	0,105	0,201	0,0450	0,0950
6	»	2,56	2,73	2,21	2,12	0,137	0,223	0,0628	0,1040
7	Soletta di cop.ra deter.	2,74	—	2,03	—	0,258	—	0,1272	—
8	»	2,77	—	2,02	—	0,270	—	0,1340	—
8	»	2,74	—	2,04	—	0,257	—	0,1243	—
10	»	2,74	—	2,07	—	0,255	—	0,1187	—
11	Campioni deteriorati	—	2,829	—	1,913	—	0,3235	—	0,1691
12	»	—	2,844	—	1,940	—	0,3180	—	0,1636
13	»	—	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	»	2,44	2,82	2,12	1,94	0,131	0,311	0,0626	0,1620

pietrisco e dalla ghiaia; poi in 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 si ha permesso di determinare la quantità di cemento contenuta nel campione originario; tutti i risultati sono stati corretti degli errori provenienti dalla presenza della sabbia e dei suoi costituenti solubili.

L'analisi di due campioni di calcestruzzo deteriorato ha dato i seguenti risultati:

Sabbia grossa e ghiaietto ($\Phi > 1$ mm.)	23,61 %
» fina ($\Phi = 1 \div 0,5$ mm.)	37,06 »
» finissima ($\Phi < 0,5$ 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.

Noi però non crediamo 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^- e di Mg^{++} nei calcestruzzi analizzati sono trascurabili e quella di SO_3^{--} è compresa nei limiti ufficialmente ammessi e 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 »
$Al_2O_3 + Fe_2O_3$	7,03 »
CaO	53,50 »
MgO	0,77 »
SO_3	1,11 »
CO_2	15,28 »

Risulta da queste analisi, dall'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 calcarea marnosa macinata. Tali miscele sono largamente usate oggi in pratica.

Noi 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 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 di 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 \AA^3 , mentre il volume del carbonato, come calcite, è di 60 \AA^3 , 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. Lo 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 causato 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 adulterato con almeno il 40 % di rocce silico-calcaree crude e finemente macinate. Oggi queste miscele sono molto impiegate. 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 proporzioni 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 il 95 % della sabbia ha granuli con dimensioni inferiori od uguali ad 1 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
» 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, ma non mancano componenti feldspatici e quarzosi, certi silicati basici colorati e cristalli di magnetite.

La magnetite e una parte di 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 dete-

riorati con altre sabbie impiegate su larghissima scala per costruzioni a Milano (sabbie estratte dal bacino dell'idroscalo a Milano); si è determinata la quantità di sostanza argillosa formatasi 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), FERET (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 di 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 che, poichè il peso di volume della sabbia è di 1.568 kg/mc., che un metro cubo del calcestruzzo in questione contiene più di 750 litri di sabbia.

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 100-200 litri di cemento idratato non potevano certo riempire completamente tale spazio.

(1) ABRAMS, *Bull. of the Lewis Inst. Struct. Mater. Res. Lab., Chicago*, 1, 22.

(2) FERET, *France Belgique (Revue de l'ingénieur)*, 6, N. 3, 63 (1923).

(3) TALBOT e RICHART, *Bull. University of Illinois, Eng. Exp. Stat.*, 137, 23.

(4) J. BOLOMEY, *Bull. Techn. de la Suisse Rom.*, 193 (1929).

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 iniziò 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 e 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 grigie, presentano un pH superiore a 12.

L'alluminato tricalcico si idrolizza per un $pH = 12,3$ (5); tutti gli altri alluminati si idrolizzano per valori di pH poco superiori a 11, mentre il ferrite e il silicato dicalcico si idrolizzano per un $pH = 13$.

Da questo possiamo dedurre che le porzioni esterne del calcestruzzo deteriorato non contengono più alcuno di quei costituenti (alluminati di- e tricalcici idrati, silicati e ferrite 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 nelle 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 precedenti esposti ci portano a considerare la cattiva composizione granulometrica e la conseguente forte porosità come la causa della retrogradazione del calcestruzzo. Infatti è così che gli agenti atmosfere-

(5) W. M. LEARCH e R. H. BOGUE, *Journ. of Phys. Chem.*, 31, 1627 (1927).

rici hanno potuto agire con rapidità grandissima, mentre nei calcestruzzi 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

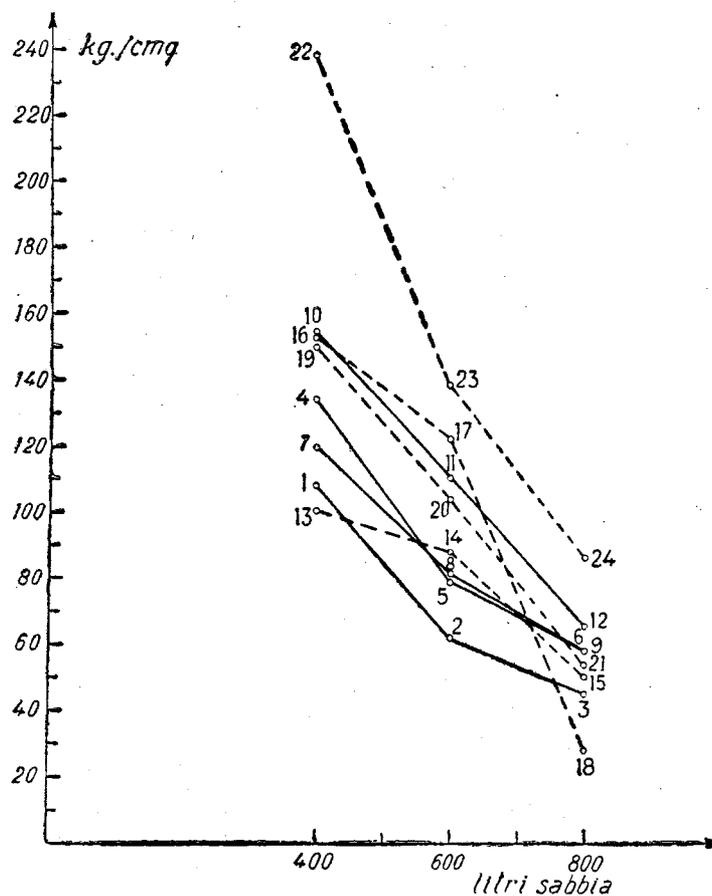


Fig. 1 - Diagramma della variazione del carico di rottura in funzione dei litri di sabbia impiegati, per provini conservati tre mesi all'aria (Vedi tabella II).

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 cemen-

to risultante presentasse nelle malte normali circa la stessa resistenza del cemento naturale.

Lo scopo delle nostre esperienze era la ricerca di

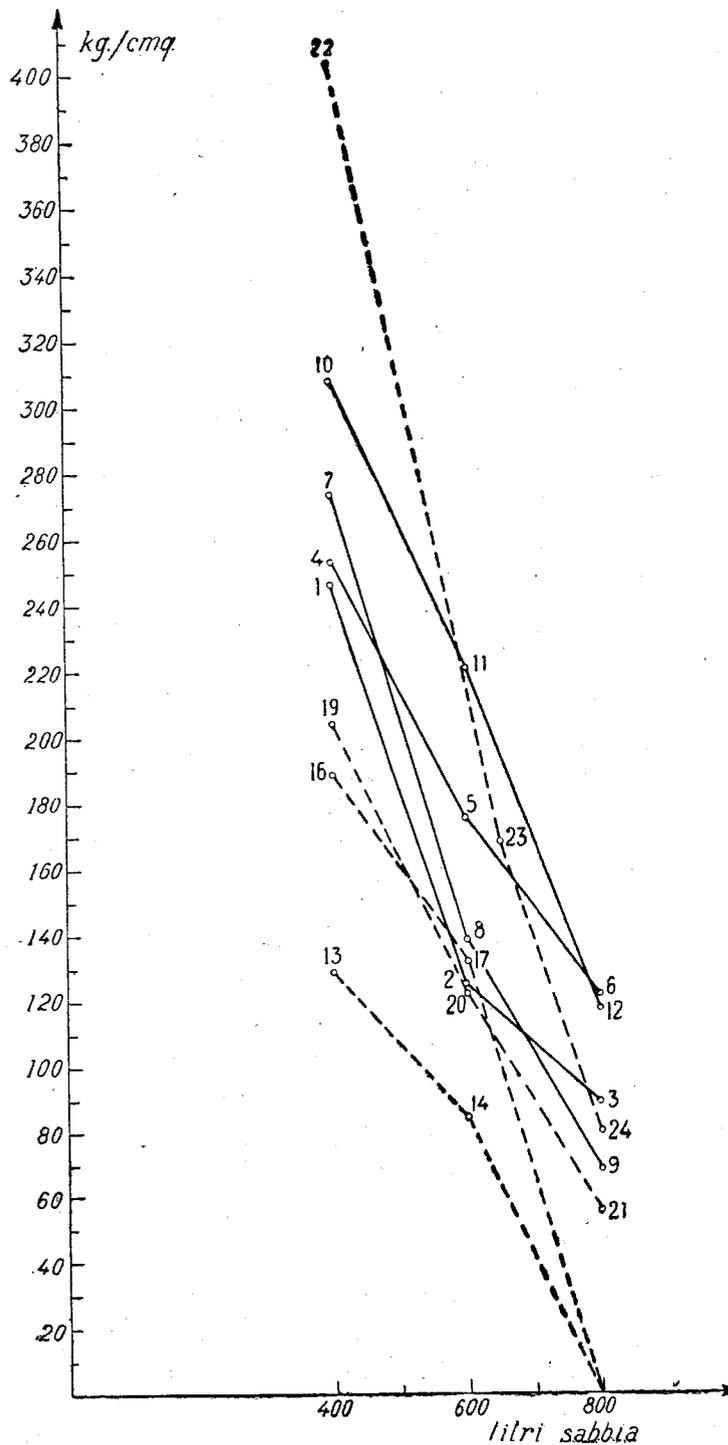


Fig. 2 - Diagramma della variazione del carico di rottura in funzione dei litri di sabbia impiegati per provini conservati un mese all'aria e un mese in CO₂ umido (Vedi tabella II).

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 di 10 mm. di mercurio superiore a quella atmosferica.

Di tutti questi campioni venne determinato: a) il peso di volume; b) il carico di rottura.

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 nell'unita tabella II.

Ecco le nostre principali osservazioni:

CONFRONTO TRA I CEMENTI. — a) campioni conservati all'aria: I campioni confezionati con cemento addizionato hanno presentato, 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: I campioni confezionati con cemento addizionato presentarono un carico di rottura molto 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 corrispondenti confezionati con cemento naturale.

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

INFLUENZA DELL'ACQUA D'IMPASTO SULLE PROPRIETÀ MECCANICHE. — L'unita tabella II ci dà le variazioni del carico di rottura in funzione dell'acqua di 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 del cemento addizionato. Tali dif-

TABELLA II.

N. del provino	Tipo del cemento	Dosaggio del cemento in Kg.	Dosaggio della sabbia in litri	Acque di impasto in litri	Peso di volume in Kg./mc.	Carichi di rottura in Kg./cmq.		
						Campioni conservati 3 mesi all'aria	Campioni conservati 9 mesi all'aria	Campioni conservati un mese all'aria e un mese in CO ₂ umido
1	Naturale	250	400	200	2065	108	134	245
2	»	250	600	200	1953	62	76	124
3	»	250	800	200	1907	45	48	88
4	»	300	400	200	2013	134	130	252
5	»	300	600	200	1954	79	97	175
6	»	300	800	200	1968	58	70	121
7	»	250	400	150	1946	120	130	273
8	»	250	600	150	1907	81	97	138
9	»	250	800	150	1797	58	65	68
10	»	300	400	150	1989	155	151	308
11	»	300	600	150	1977	110	130	220
12	»	300	800	150	1903	65	75	117
13	Artificiale addiz.	250	400	200	1997	100	130	128
14	»	250	600	200	1951	88	90	84
15	»	250	800	200	1915	50	57	0
16	»	300	400	200	2037	153	169	188
17	»	300	600	200	1974	122	128	132
18	»	300	800	200	1952	28	23	0
19	»	250	400	150	2050	150	166	203
20	»	250	600	150	1981	104	120	126
21	»	250	800	150	1934	54	64	56
22	»	300	400	150	2113	238	304	402
23	»	300	600	150	2013	138	154	168
24	»	300	800	150	2026	86	85	80

ferenze 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 sè ad una diminuzione del carico di rottura. Per malte confezionate con cemento naturale 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 a 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 disceso 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 del cemento naturale sia nel calcestruzzo confezionato con cemento artificiale addizionato. L'azione dell'anidride carbonica ha dato, nei campioni più ricchi in cemento naturale, degli 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 dei deboli incrementi o delle diminuzioni molto gravi (+22 % a -100 %).

Tutti questi dati sono espressi graficamente nei diagrammi uniti (fig. 1 e fig. 2).

CONSIDERAZIONI SUI PESI SPECIFICI. — Dato che avevamo l'intenzione di riprodurre in laboratorio i

calcestruzzi e le malte che noi abbiamo veduto deteriorati, abbiamo, come indagine preliminare, controllato il peso di volume dei provini preparati ed abbiamo 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 dovuta 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 granulometrica della sabbia, hanno permesso degli 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 alterazione 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:

a) nei calcestruzzi ricchi di cemento e poco po-

rosi il lento accrescimento di volume produce un aumento di compattezza e di resistenza meccanica; la 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) per i calcestruzzi poverissimi in cemento ad alta porosità (6) ed 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 causare la disgregazione naturale del calcestruzzo.

Laboratorio di Chimica Generale e Laboratorio per lo studio dei materiali da costruzione del R. Politecnico di Milano, agosto 1930-VIII.

Giulio NATTA e Carlo Guido FONTANA

(6) 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 béton è tanto maggiore a parità di porosità quanto minori sono le dimensioni dei singoli pori e quindi tanto maggiore la loro superficie specifica. Questo spiega la resistenza agli agenti atmosferici dei calcestruzzi cellulari.

