

DIAGNOSI DELLA REAZIONE ALCALI-AGGREGATO IN CALCESTRUZZI DEGRADATI

M. COLLEPARDI(*), L. COPPOLA(**), G. MORICONI(*), M. PAURI(*)

RIASSUNTO

La reazione alcali-aggregato è una delle cause che possono compromettere la durabilità di una struttura in calcestruzzo.

Sulla base di esperienze condotte sia su strutture reali che su provini di laboratorio viene proposta una tecnica per diagnosticare in tempi relativamente brevi se il degrado delle strutture reali è imputabile alla reazione alcali-aggregati.

1. INTRODUZIONE

Sebbene gli alcali siano dei costituenti "minori" del cemento, (0,4 - 1,5% espressi come Na_2O) la loro presenza nel calcestruzzo riveste un ruolo di particolare importanza nei confronti della durabilità del conglomerato. Infatti, gli alcali possono interagire con alcune forme di silice (amorfa o non perfettamente cristallizzata) presenti negli aggregati causando espansioni e fessurazioni del conglomerato che, in alcuni casi, possono compromettere la funzionalità delle strutture o addirittura provocarne il collasso.

Questo fenomeno, che prende il nome di reazione alcali-aggregato, fu osservato per la prima volta nel 1940 da Stanton [1] negli Stati Uniti e negli anni ha assunto proporzioni tali da coinvolgere numerose opere in calcestruzzo in diverse parti del mondo: Sud Africa, Gran Bretagna, Danimarca, Canada, Australia.

Secondo Diamond [2], tutte le forme di silice sono suscettibili di reagire con gli alcali del cemento per produrre fenomeni espansivi. La velocità e l'entità dell'espansione aumenta sostanzialmente con il grado di disordine cristallino e con la porosità della roccia.

Il quarzo è la forma di silice intrinsecamente più resistente all'attacco alcalino. Tuttavia, le rocce contenenti quarzo microcristallino, e soprattutto fortemente deformato, sono suscettibili di un lento attacco da parte di soluzioni alcaline relativamente concentrate, specialmente se esiste una rete di micropori attraverso i quali possono penetrare [3, 4].

Anche la tridimite e la cristobalite, se presenti in forma scarsamente cristallina e spesso confondibili con l'opale, possono provocare la reazione alcali-aggregato [5].

Il calcedonio, che possiede una maggiore porosità ed un minor grado di cristallino rispetto al quarzo, può essere attaccato

ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction is one of the causes which can affect the durability of the concrete structures.

On the basis of tests carried out on real concrete structures as well as on laboratory specimens it has been found a technique to evaluate in relatively short times whether or not a certain degradation of real structures can be ascribed to the alkali-aggregate reaction.

più intensamente dagli alcali. Seguendo questo criterio, ci si può spiegare come l'opale, che è la forma di silice più amorfa e più porosa, sia quella più reattiva nei confronti degli alcali.

I vetri silicatici [6], infine, specialmente quelli acidi, sono particolarmente suscettibili di espansione a causa della reazione con gli alcali.

Per quanto concerne il meccanismo del fenomeno espansivo esso non è ancora chiaramente accertato. Secondo Vivian [7] la reazione non avviene tra gli ioni dei metalli alcalini (Na^+ e K^+) e l'inerte siliceo, ma piuttosto tra quest'ultimo e gli ioni ossidrilici OH^- : ciò sembrerebbe confermato dal fatto che Vivian ha registrato un fenomeno di espansione attribuito alla reazione alcali-aggregato in una malta contenente un cemento povero di alcali, opale e idrossido di tetrametilammonio capace di fornire alla soluzione ioni OH^- ma non Na^+ e K^+ .

Secondo questa ipotesi, gli alcali presenti nel cemento, anche se non direttamente responsabili della reazione alcali-aggregato, sarebbero capaci di provocare un'elevata concentrazione di ioni OH^- nella fase acquosa creando le condizioni favorevoli al fenomeno espansivo associato alla reazione alcali-aggregato. In effetti, i dati di alcuni ricercatori [8-10] mostrano che la concentrazione di OH^- nella fase acquosa presente nella pasta di cemento è più elevata se il cemento contiene una maggiore concentrazione di sodio e potassio.

L'ipotesi di Vivian, secondo la quale gli ioni OH^- , e non gli ioni Na^+ e K^+ , sarebbero responsabili della reazione alcali-aggregato, è però contraddetta dai dati di Chatterji [11] secondo il quale la presenza di una soluzione acquosa di NaCl (al 10%) a contatto con una malta o calcestruzzo contenente aggregati reattivi accelera enormemente il fenomeno espansivo legato alla reazione alcali-aggregato. Poiché l'ingresso di ioni Na^+ e Cl^- nella malta o nel calcestruzzo non modifica il contenuto di ioni OH^- della fase acquosa della pasta di cemento, l'ipotesi di Vivian sembrerebbe contraddetta.

L'impiego di cementi di miscela (pozzolanici o d'altoforno) consente di ridurre o addirittura di eliminare l'espansione provocata dalla reazione alcali-aggregato. L'azione delle pozzolane, anch'esse contenenti silice reattiva, sembra essere legata ad un

(*) Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra, Facoltà di Ingegneria, Università di Ancona.

(**) Enco, Engineering Concrete, Spresiano.

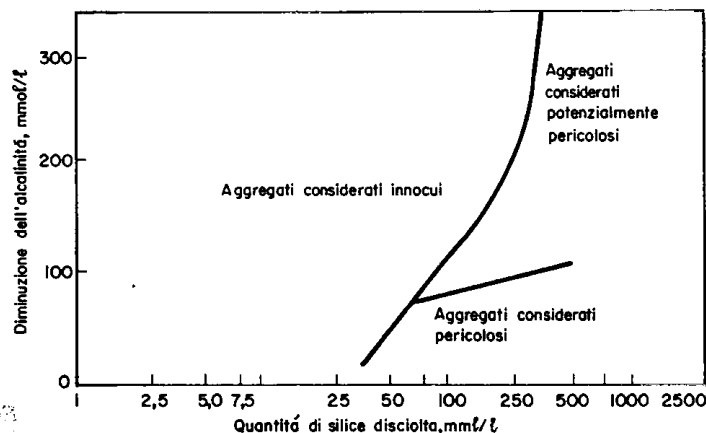


Fig. 1 - Diminuzione dell'alcalinità in funzione della silice disciolta per valutare la reattività dell'aggregato.

aumento dell'area superficiale del solido reattivo e, quindi, ad una minore concentrazione di alcali riferita all'aria unitaria [12].

Le condizioni ambientali possono influenzare la reazione alcali-aggregato che risulta favorita in ambienti caldi e umidi particolarmente se il calcestruzzo è molto poroso da consentire un facile accesso dell'acqua, elemento questo essenziale per il manifestarsi della reazione alcali-aggregato [13].

Un altro tipo di azione espansiva che si verifica nella reazione alcali-aggregati è legata non alla presenza di silice reattiva ma di carbonato nelle rocce dolomitiche [14, 17]. Secondo French e Poole [18] il processo consiste nella cosiddetta dedolomitizzazione, in quanto la dolomite dell'inerte ed il silicato idrato di calcio della pasta cementizia si trasformano in idrossido di magnesio, carbonato di calcio e gel di silice. La reazione è favorita dalla presenza di gesso, dalla porosità dell'inerte, oltre che dalla presenza di argilla, come già ipotizzato da Gillot e Swenson [19, 20].

In realtà la reazione alcali-carbonato è considerata un evento molto meno probabile che non la reazione alcali-silice e finora è stata segnalata prevalentemente in Canada.

Anche in Italia negli ultimi anni sono stati segnalati casi di degrado di strutture in calcestruzzo per reazione alcali-aggregato principalmente nelle regioni del versante adriatico (Emilia Romagna, Marche, Molise) [21].

2. PROCEDURE DI CONTROLLO

La valutazione della potenziale reattività agli alcali degli aggregati è stata oggetto di numerosi studi, come testimonia il gran numero di metodi di prova disponibili in letteratura [22].

Questi ultimi generalmente prevedono valutazioni direttamente sull'aggregato oppure sul sistema acqua-cemento-aggregato.

Tra i metodi di valutazione che coinvolgono il solo aggregato sicuramente il più valido è l'esame petrografico (ASTM C 295 oppure UNI 8520/4). Esso consiste nell'analizzare sezioni sottili, ricavate dall'aggregato da utilizzare, mediante microscopio ottico al fine di determinare la presenza di minerali reattivi quali l'opale, il calcedonio, il quarzo criptocristallino [23]. L'assenza di questi ultimi è sufficiente a dichiarare l'aggregato idoneo per il confezionamento del calcestruzzo; la loro presenza, invece, non necessariamente implica la reattività dell'aggregato con gli alcali.

Allorquando l'analisi petrografica evidenzia la presenza di minerali potenzialmente reattivi, la effettiva reattività agli alcali degli inerti può essere accertata mediante una prova chimica (ASTM C 289, UNI 8520/22) consistente nel trattare l'aggregato con una soluzione di idrossido di sodio e nel misurare il quantitativo di silice disciolta, nonché la riduzione di alcalinità della

soluzione [24]. Questi due valori individuano un punto nel diagramma di Fig. 1.

Il diagramma della Fig. 1 è suddiviso in tre aree relative ad aggregati innocui, pericolosi o potenzialmente pericolosi, ed a seconda dell'area nella quale il "punto" è posizionato si dovrebbe dedurre il giudizio sull'aggregato da impiegare. Tuttavia, sono sorte alcune perplessità sulla validità assoluta di questo metodo chimico, giacché alcuni autori [25] sostengono che solo se il "punto" è situato nell'area del diagramma relativa agli aggregati innocui la prova è realmente significativa; quando, invece, il "punto" cade nelle altre due aree non necessariamente gli aggregati debbono essere considerati pericolosi o potenzialmente pericolosi.

Tra i metodi che implicano valutazioni sul comportamento del sistema acqua-cemento-aggregato, il più utilizzato è il metodo del "prisma di malta" (ASTM C 227 oppure UNI 8520/22); esso consiste nel valutare l'espansione dei prismi di malta confezionati con l'aggregato da analizzare, opportunamente frantumato per riprodurre una data curva granulometrica e utilizzato in rapporto 2,25 : 1 con un cemento ricco in alcali (0,60 come Na_2O per la norma ASTM e 0,80 per la norma UNI), mantenuti in ambiente alla temperatura di 38°C: secondo le norme ASTM l'aggregato è considerato idoneo per il confezionamento del calcestruzzo se dopo tre mesi l'espansione del prisma è inferiore allo 0,05% o dopo sei mesi allo 0,1%; secondo la norma UNI 8520/22, invece, l'aggregato è considerato idoneo se l'espansione dei prismi di malta è inferiore a 0,08% e 0,1% rispettivamente a tre e sei mesi.

Secondo Swenson e Gillot [26] il metodo del "prisma di malta" non è utilizzabile per valutare la reattività agli alcali degli aggregati calcarei e di alcuni aggregati silicei ad espansione lenta. Infatti, per queste due categorie di aggregati, responsabili di numerosi fenomeni distruttivi per alcali-reazione, non essendo la reazione con gli alcali accompagnata dalla formazione di gel capace di rigonfiare per assorbimento di acqua - come avviene, invece, per la classica reazione alcali/aggregati silicei - non si producono in breve tempo espansioni tali da dichiararli inaccettabili secondo il test del prisma di malta. E' il caso, ad esempio, dell'aggregato calcareo di Cipro e di alcune rocce vulcaniche della Corea [27].

Per gli aggregati calcarei la determinazione della potenziale reattività agli alcali può essere effettuata con il test del "cilindro di roccia" (ASTM C 586): questo metodo valuta le caratteristiche espansive dell'aggregato mediante immersione di un cilindro di roccia (da cui l'aggregato proviene), avente diametro di 9 mm e altezza di 35 mm, in una soluzione 1N di idrossido di sodio: la roccia viene considerata potenzialmente reattiva se l'espansione del cilindro è superiore allo 0,1%.

Newlon e Sherwood [28] hanno trovato una soddisfacente correlazione tra l'espansione di cilindri di roccia calcarea valutata secondo il metodo ASTM C 586 e l'espansione di calce-

struzzi confezionati con aggregati provenienti dalla stessa roccia e cementi con alto tenore di alcali.

Per gli aggregati silicei ad espansione lenta, per i quali il test del cilindro di roccia non ha dato risultati soddisfacenti [29, 30], la valutazione della potenziale reattività agli alcali può essere effettuata con il metodo del "prisma di roccia in miniatura"; esso consiste nel valutare l'espansione di prismi di roccia (3x6x30 mm) immersi in una soluzione di idrossido di sodio. Questo metodo è simile a quello del cilindro di roccia, ma consente, grazie alle dimensioni più piccole del prisma rispetto al cilindro, di registrare l'espansione dovuta alla reazione alcali-aggregato in un tempo più breve. Questo test è stato utilizzato con buoni risultati per valutare la reattività di alcuni aggregati silicei della regione dell'Ontario [31].

Un altro metodo per valutare la potenziale reattività agli alcali è quello del "prisma di calcestruzzo" (Canadian Standard Association 23.2-14 A); esso consiste nel valutare l'espansione di prismi di calcestruzzo (75x75x300 mm), confezionati con l'aggregato da analizzare, mantenuti in una camera a nebbia alla temperatura di 23°C: un'espansione superiore allo 0,03% è indice di una potenzialità degli aggregati a reagire con gli alcali. Il test, molto simile a quello del "prisma di malta", consente, a differenza di quest'ultimo, di confezionare i prismi di calcestruzzo impiegando l'aggregato con la stessa granulometria e con lo stesso rapporto inerte/cemento che verrà utilizzato per il conglomerato da destinare alla realizzazione delle opere. Il test del prisma di calcestruzzo consente di valutare con sufficiente sicurezza la reattività degli aggregati calcarei e di quelli silicei ad espansione lenta [32].

Oltre ai metodi normalizzati esistono in letteratura numerose prove di particolare interesse le quali sono di valido ausilio per approfondire alcuni aspetti della reazione alcali-aggregato soprattutto se utilizzate unitamente alle procedure normalizzate.

I più importanti sono:

- a) il *gel pat* test;
- b) il test di espansione accelerata su prismi di malta;
- c) il metodo della cella osmotica.

Il *gel pat* test [33] consiste nel mescolare l'aggregato da analizzare, opportunamente frantumato, con pasta di cemento e nell'immergere i provini di malta per 28 giorni in una soluzione di idrossido di sodio e potassio: gli aggregati sono considerati reattivi se al termine della prova si presentano parzialmente dissolti e sui provini vi è la comparsa di gel biancastro.

Il test d'espansione accelerata prevede il confezionamento di prismi di malta (10x10x40 mm) i quali, dopo un giorno di stagionatura a 20°C vengono trattati a 100°C per 4 ore e quindi per sei ore in una soluzione al 10% di idrossido di potassio alla temperatura di 150°C in autoclave: terminato questo trattamento si determina l'espansione subita dai provini [34].

Il metodo della cella osmotica [35-36] consiste nel sistemare gli aggregati da analizzare in una cella di reazione riempita con

una soluzione di NaOH. La cella di reazione è divisa da una seconda cella di deposito, anch'essa contenente la stessa soluzione di NaOH, da una membrana di pasta di cemento. Allorquando avviene la reazione alcali-aggregato, per osmosi l'acqua migra dalla cella di deposito a quella di reazione; questo flusso produce una differenza di altezza tra i menischi di due tubi capillari sistemati sulla sommità delle due celle: questa differenza è assunta come misura di reattività.

Dall'esame della letteratura tecnica disponibile appare evidente che allo stato attuale non esiste ancora un unico metodo di valutazione della reattività agli alcali dei vari aggregati indipendentemente dalla loro origine e natura mineralogica (silicea o calcarea). Ciò comporta qualche rischio da parte del produttore di calcestruzzo nel prendere una decisione circa l'impiego o meno di utilizzare aggregati sospettati di essere reattivi.

Ancor più lacunosa appare la situazione circa la diagnosi del degrado del calcestruzzo in relazione alla presenza di aggregati reattivi: quest'aspetto del problema non riguarda tanto la possibilità di impiegare o meno aggregati idonei, quanto invece l'attribuzione alla reazione alcali-aggregato del degrado di una struttura in calcestruzzo nel quale ormai certi aggregati sono stati impiegati. L'obiettivo del presente lavoro è proprio quello di contribuire alla messa a punto di un metodo diagnostico per la valutazione della reazione alcali-aggregati in strutture in calcestruzzo degradate.

3. MATERIALI E METODOLOGIE DI PROVA

Sono stati impiegati i seguenti materiali:

cemento Portland di classe 425 con un tenore di alcali (espressi come Na_2O) pari allo 0,6%;

inerti naturali non reattivi agli alcali (valutazione effettuata secondo metodologia proposta dalla Norma UNI 8520/22);

inerti naturali potenzialmente reattivi agli alcali (valutazione effettuata secondo Norma UNI 8520/22).

Con i materiali a disposizione sono stati confezionati due calcestruzzi, entrambi con rapporto acqua/cemento pari a 0.5 e abbassamento al cono di Abrams (*slump*) pari a 15 cm, di cui uno contenente solo aggregati non reattivi agli alcali, l'altro, invece, contenente sia aggregati reattivi che aggregati non reattivi agli alcali.

Per ogni calcestruzzo sono state confezionate dodici travi le quali sono state stagionate per 28 giorni in ambiente alla temperatura di 20°C e U.R. = 95%. Al termine della stagionatura da ogni trave mediante una carotatrice sono stati ricavati provini cilindrici (diametro 10 cm; altezza 20 cm) i quali sono stati semi-immersi nei seguenti ambienti a 40°C:

acqua;

soluzioni acquose di idrossido di sodio (1-2-4-8N);

soluzione acquosa di cloruro di sodio (10%).



Fig. 2 - Rigonfiamento ed espulsione di pasta di cemento all'interfaccia pasta-aggregato.

Settimanalmente ogni carota è stata sottoposta ad un esame visivo, (onde accertare l'insorgere di microfessurazioni o di dissoluzioni dell'aggregato o di espulsioni di materiale) e a misurazione del diametro e dell'altezza per valutare l'eventuale espansione conseguente alla reazione alcali-aggregati.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

Di seguito sono descritti i risultati delle prove per semi-immersione delle carote di calcestruzzo nei tre ambienti menzionati:

4.1 IMMERSIONE IN ACQUA

Le carote di calcestruzzo confezionate con gli aggregati non reattivi dopo 6 mesi di esposizione nei diversi ambienti, non hanno evidenziato alcuna manifestazione di degrado; in particolare non sono state notate microfessure, mentre gli inerti si presentavano perfettamente aderenti alla pasta di cemento. Inoltre, non sono state registrate variazioni dimensionali significative: l'aumento del diametro delle carote è stato di circa 350-400 $\mu\text{m/m}$ imputabile alla espansione naturale (*swelling*) che subisce il conglomerato allorché è immerso in acqua.

Anche le carote di calcestruzzo confezionate con la miscela di inerti reattivi ed idonei, dopo 6 mesi di immersione in acqua, non hanno mostrato alcun segno di degrado né espansioni significative.

4.2 IMMERSIONE IN CLORURO DI SODIO

Non si sono registrate significative variazioni dimensionali nelle carote indipendentemente dal tipo (reattivo o idoneo) di aggregato impiegato. Solo lievi cavillature sono apparse dopo 5 mesi di immersione sulle carote prelevate dal calcestruzzo confezionato con la miscela di inerti idonei e reattivi.

4.3 IMMERSIONE IN IDROSSIDO DI SODIO

Le carote immerse in soluzione acquosa di NaOH 1N (40g/l) hanno mostrato notevoli segni di degrado già dopo 60 giorni, con espulsione di frammenti di pasta di cemento (Fig. 2) e distacco degli elementi lapidei reattivi all'interfaccia pasta-aggregato con comparsa di microfessurazioni e nei casi più gravi di completo scollamento degli aggregati dal calcestruzzo (Fig. 3).

Analoghi comportamenti sono stati registrati sulle carote immerse nelle soluzioni di NaOH più concentrate (da 2 a 8N).



Fig. 3 - Microfessure e scollamento degli inerti dal calcestruzzo.

Non sono state, invece, registrate significative variazioni dimensionali nelle carote immerse nelle soluzioni di NaOH per 6 mesi se si eccettuano le zone nelle quali erano localizzate le espulsioni degli aggregati reattivi.

Sulla base dei risultati ottenuti emerge che un test accelerato per attribuire o meno la responsabilità del degrado del calcestruzzo alla reazione alcali-aggregato consiste nell'immergere il campione di calcestruzzo da esaminare in una soluzione di NaOH 1N alla temperatura di 40°C.

5. APPLICAZIONE DEL TEST ACCELERATO AD UNA STRUTTURA REALE

Per verificare l'affidabilità del metodo ad un caso reale sono state prelevate delle carote da una struttura in calcestruzzo situata sul versante adriatico che manifestava evidenti segni di degrado consistenti in diffuse fessurazioni.

Avendo escluso per la struttura in esame che il degrado fosse dovuto a cause di natura statica, o ad altri agenti aggressivi (cloruri e solfati, etc.) in quanto assenti nell'ambiente in cui la struttura si trova, è stata avanzata l'ipotesi che il degrado fosse imputabile alla reazione alcali-aggregato; questo fenomeno come già anticipato è stato il responsabile di numerosi degradi nell'area in cui la struttura è situata. Il problema era appunto stabilire scientificamente che la causa del degrado dipendesse dalla reattività degli aggregati agli alcali.

Pertanto, una carota è stata semi-immersa a 40°C in una soluzione acquosa di idrossido di sodio (1N) e sottoposta ad esame visivo e a misurazione del diametro.

La carota di calcestruzzo semi-immersa in soluzione di idrossido di sodio, ha presentato dopo circa 60 giorni le stesse manifestazioni di degrado registrate per il test condotto sui provini di laboratorio (paragrafo 4.3).

In particolare sono stati registrati rigonfiamenti localizzati in corrispondenza di alcuni inerti, come anche distacchi tra inerti e malta di cemento.

Altre carote prelevate dalla struttura fessurata sono state trattate meccanicamente per "estrarre" dal calcestruzzo gli aggregati, attraverso una grossolana rimozione meccanica della malta cementizia che avvolgeva gli elementi lapidei. Dopo questo trattamento meccanico gli aggregati ancora ricoperti dai residui di malta cementizia sono stati immersi in acido fino a rimuovere le incrostazioni cementizie residue. Gli aggregati così ottenuti, dopo lavaggio con acqua, sono stati sottoposti ad analisi petrografica e chimica secondo quanto prescritto dalla norma UNI 8520/22.

L'analisi petrografica ha evidenziato la presenza negli aggregati di alcune forme di silice pericolosa.

Tutti gli aggregati "estratti" dal calcestruzzo sono stati suddivisi in due frazioni: la prima frazione è stata sottoposta direttamente alla prova chimica (Fig. 1) prevista dalla Norma UNI

8520/22; dalla seconda frazione sono stati selezionati gli aggregati reattivi sulla base del responso petrografico e soltanto questi sono stati sottoposti alla prova chimica. I risultati di questa prova sulle due frazioni di aggregato hanno indicato che solo gli aggregati "estratti" dal calcestruzzo e selezionati sulla base dell'indagine petrografica non risultano idonei.

6. CONCLUSIONI

Semi-immersed in una soluzione acquosa di idrossido di sodio 1N (40g/l) alla temperatura di 40°C una carota di calcestruzzo prelevata da una struttura degradata è possibile avere

in un tempo relativamente breve una risposta circa l'attribuzione della causa del degrado alla reazione alcali-aggregato.

La prova evidenzia dopo 60 giorni la comparsa di microfessurazioni, di rigonfiamenti localizzati di pasta di cemento o addirittura di scollamenti degli aggregati dalla pasta di cemento.

Il responso fornito dal test di semi-immersione delle carote di calcestruzzo può essere confortato dall'analisi petrografica effettuata sugli aggregati "estratti" con procedimento chimico meccanico dalle carote di calcestruzzo.

La reattività agli alcali degli aggregati estratti dal calcestruzzo può essere ulteriormente confermata dall'analisi chimica (Norma UNI 8520/22) effettuata sui soli aggregati reattivi selezionati in base all'analisi petrografica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] STANTON T.E., "Proc. Am. Soc. Civil. Engrs", 66,1781 (1940).
- [2] DIAMOND S., Cem. Concr. Res., 6, 549 (1976).
- [3] MATHER K., Misc. Paper, C-73-11, U.S.Army Eng. Waterways Expt. Sta. 20 pp. (1973).
- [4] MATHER K., Trans. Red. Bd., Conference Session on Alkali-Aggregate Reaktions, Washington (1976).
- [5] MIELENZ R.C., Proceedings A.S.T.M., 54, 1188 (1954).
- [6] MIELENZ R.C., Bull. Geol. Soc. Amer., 57, 309 (1946).
- [7] VIVIAN H.E., "Austr. J. Appl. Sci.", 2, 108 (1951).
- [8] LAWRENCE C.D., "Highway-Research Board", Special Report n. 90, Structure of Port land Cement Paste and Concrete, 378 (1966).
- [9] ROBERTS M.H., "Current Paper 61/88", Building Res. Stat., London (1968).
- [10] LONGUET P., L. BURGLIN, A. ZELWER; "Rev. Mater Constr.", 676, 35 (1973).
- [11] CHATTERJI S., "Cement Concrete Research", 8, 647 (1978).
- [12] VERBECK G.S., C. GRAMLICH, "Proceedings A.S.T.M.", 55, 1110 (1956).
- [13] Highway Research Board, "The alkali-aggregate reaction in concrete" Research Report 18-C, Washington DC (1958).
- [14] HANSEN F.C., A.S.T.M. Spec. Tech. Publicn. n. 169-A, 487 (1966).
- [15] SWENSON E.G., ASTM Bull., 226, 48 (1957).
- [16] SWENSON E.G., J.E. GILLOTT, Highway Res. Board N. 45, 21 (1964).
- [17] SWENSON E.G., J.E. GILLOTT, Mag. Concr. Res., 59, 95 (1967).
- [18] FRENCH W.J., A.B. POOLE, Cem. Concr. Res., 4, 925 (1974).
- [19] GILLOTT J.E., E.G. SWENSON, J. Eng. Geol., 2, 7 (1967).
- [20] GILLOTT J.E., Symposium on Alkali-Aggregate Reaktion, 213, Reykjavik, Iceland (1965).
- [21] ROSSETTI V.A., La Prefabbricazione, 6, 263, (1981).
- [22] TURRIZIANI R., Proc. V. of 8° Congresso International de Quimica do Cimento, Vol. 1, pag. 388, Rio de Janeiro (1986).
- [23] Office Chief. of Engineers (OCE), Appendix B, Washington (1971).
- [24] MIELENZ R.C., L.P. WITTE, Am. Soc. Testing Mat. Proc., 48, 1071 (1948).
- [25] CHIKEN B., W.S. HALSTED, Public. Roads, 8, 177 (1959).
- [26] SWENSON E.G., J.E. GILLOTT, Highway Res. Board Bulletin, 275 (1960).
- [27] SIMS I., Concrete, 11, 29 (1981)
- [28] NEWLON H., W.C. SHERWOOD, "Potentially reactive carbonate rocks", Virginia Council of Highway Invest. and Res., Charlottesville, Va (1962).
- [29] DUNCAN M.A.G., "Correlation of field and laboratory evidence of alkali-silica reactivity in Nova Scotia Concrete", Thesis, Nova Scotia Tech. College, Halifax, Canada (1970).
- [30] DOLAR-MANTUANI L.M.N., Highway Res. Rec. 268, 99 (1969).
- [31] GRATTAN-BELLEW P.E., Proceedings 4th Int. Conf. "The effects of alkalis in cement and concrete", Purdue University, Publ. No. CE-MAT 1-78 Purdue, Indiana, USA (1978).
- [32] GRATTAN-BELLEW P.E., Conf. on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, (1981).
- [33] FULCAN V., Y. HOUST, Chantier 11, 131 (1979).
- [34] MING-SHU T., H. SUN-FEN, Z. SHI-HUA, Cem. Concr. Res., 13, 417 (1983).
- [35] VERBECK G.S., C. GRAMLICH, ASTM Proceeding, 55, 1110 (1955).
- [36] STARK D., VI International Conference Alkalis in Concrete, 351, Copenhagen (1983).