

CALCESTRUZZI DUREVOLI PER IMPIEGO AUTOSTRADALE: CONFRONTO TRA DIVERSE SOLUZIONI

Vito ALUNNO ROSSETTI*, Gabriele CAMOMILLA**, Giuseppe FAMILIARI**,
Giorgio PERONI**

Riassunto

Sono stati confezionati calcestruzzi a diverso rapporto acqua/cemento, a diverso dosaggio di cemento e con aggiunta d'aria, di microsilice e di microsfele di plastica, allo scopo di confrontare l'efficacia dei fattori suddetti nel fornire calcestruzzi durevoli per impiego autostradale.

I confronti sono stati effettuati misurando la resistenza a compressione, la permeabilità, la resistenza ai cicli gelo-disgelo e la velocità di carbonatazione. I risultati ottenuti indicano che il miglior complesso di prestazioni si ottiene in ogni caso per i calcestruzzi a minor rapporto acqua/cemento.

Summary

Mixes of different water/cement ratio, cement, air, silica fume and plastic microspheres content have been prepared, in order to compare the possibility of different concrete mixes to withstand aggressive highway environment.

The mechanical strength, permeability, freeze-thaw resistance and carbonation rate have been compared; the results show that the better performances can be obtained, for every test, with the concretes having a lower water/cement ratio.

1. Introduzione

Il problema della degradazione delle opere e dei manufatti di calcestruzzo riveste una notevole importanza per le strutture autostradali, normalmente situate in un ambiente discretamente ag-

gressivo e spesso assoggettate all'azione di fattori aggressivi di notevole intensità.

In base all'esperienza della Soc. Autostrade, una graduatoria delle cause di dissesto vede in ordine di intensità decrescente: fenomeni di corrosione delle armature, fenomeni dovuti ai cicli di gelo-disgelo e ai sali disgelanti, attacchi chimici dovuti alla presenza di solfati e cloruri. L'attuale orientamento tecnologico per migliorare il comportamento delle opere in calcestruzzo accrescendone la durata, è lo stesso che si riflette nelle Norme Italiane ed Europee e nelle Normative Contrattuali della Soc. Autostrade (1), ed è basato sul miglioramento della progettazione ed esecuzione dei manufatti, sull'impiego di materiali intrinsecamente dotati di caratteristiche di durabilità e sull'applicazione di vernici protettive superficiali.

Nel presente lavoro si è voluta mettere a confronto una gamma di soluzioni frequentemente adottate per migliorare la qualità del materiale, confezionando calcestruzzi di varia composizione, anche contenenti diverse aggiunte ed additivi e paragonando il loro comportamento a fronte di azioni aggressive ritenute particolarmente significative nei processi di degradazione; in particolare: carbonatazione, permeazione d'acqua nel calcestruzzo, resistenza ai cicli di gelo-disgelo. Si sono inoltre utilizzati due metodi di prova poco diffusi per la permeabilità e la resistenza al gelo, anche se

* Università di Roma "La Sapienza"

** Autostrade SpA

e 18). Si sono poi effettuate variazioni di dosaggio di cemento mantenendo costante il rapporto a/c (miscele n.1 e 2). Infine sull'impasto base sono state effettuate aggiunte di additivo aerante, microsfere di materia plastica e microsilice (miscele n. 9, 10, 10', 10'', 11, 12 e 13). Anche sull'impasto a rapporto a/c pari a 0,6 si sono aggiunti aerante e microsfere (miscele 16 e 17).

Nella Tabella 1 sono riportati i dettagli delle composizioni per le diverse miscele. Si deve rilevare il fatto che le dosi di aerante occorrente per ottenere l'aggiunta dell'aria nelle quantità desiderate sono risultate piuttosto elevate, probabilmente a causa della notevole potenza del tavolo vibrante impiegato.

2.2 Metodologie di prova

Per tutte le miscele sono stati confezionati almeno 30 provini cubici (spigolo 15 cm) compattati su tavolo vibrante. Sul calcestruzzo fresco si sono eseguite misure di consistenza secondo UNI 9418, di massa volumica secondo UNI 6394 e di contenuto d'aria inglobata secondo UNI 6395. I valori ottenuti sono riportati nella tabella 1. Il confronto tra i dati di massa volumica reale e di aria inglobata hanno evidenziato un buon accordo tra i risultati.

La sformatura e la stagionatura dei campioni sono state effettuate secondo UNI 6127 in camera umida a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidità relativa non minore del 90 %. La prova di resistenza allo schiacciamento è stata eseguita a 1, 7, 28 e 90 giorni di maturazione, con le modalità previste da UNI 6132-72. I risultati sono riportati in tabella 2 e figura 1.

Per i provini schiacciati a 28 giorni (in numero variabile da 7 a 15 cubi per le varie miscele) i valori del coefficiente di variazione sono risultati variabili da 5,8 a 1,7.

Un efficiente metodo normalizzato per la misura della permeabilità del calcestruzzo risulterebbe estremamente utile per la valutazione della sua attitudine a resistere agli agenti aggressivi dell'ambiente di esercizio e specialmente se la prova potesse essere eseguita in sito. Purtroppo in Italia un simile metodo non è stato ancora messo a punto; le difficoltà nella standardizzazione sono dovute anche alla natura eterogenea del calcestruzzo che porta a

risultati notevolmente dispersi, anche su provini ottenuti dallo stesso impasto e con lo stesso procedimento.

La prova di permeabilità è stata eseguita con due metodi. Il primo metodo è la determinazione del coefficiente di Darcy effettuata su provini a sezione quadrata di lato 15 cm e altezza di 15 e 7,5 cm mediante acqua a pressione di 20 e 25 bar per periodi fino a 240 ore. Per i campioni che dopo tale durata di prova non hanno lasciato passare acqua, si è eseguito un taglio a secco su un piano parallelo alla direzione di percolamento; sulle due facce messe a giorno si è valutata la profondità di penetrazione dell'acqua. I risultati (tabella 3) sono la media di 3 misure.

Il secondo metodo proposto da Figg (2), consiste nel misurare il tempo necessario all'abbassamento da 0,55 a 0,50 bar della depressione generata mediante una pompa a vuoto all'interno di un foro praticato nel provino di calcestruzzo. I risultati sono riportati nella tabella 4 che consente di ricavare una valutazione di merito.

La valutazione della resistenza ai cicli gelo-disgelo a contatto con soluzione di cloruro di sodio, è stata valutata mediante la Norma sperimentale Rilem CDC 2 (2), che valuta la resistenza del calcestruzzo in funzione del grado di scrostatura, della perdita di massa e della percentuale di superficie scrostata del provino. I risultati delle prove, riportati nella figura 4, rappresentano la media di tre determinazioni.

La determinazione della resistenza ai cicli di gelo disgelo è stata anche effettuata secondo UNI 7087-72 calcolando la variazione del modulo elastico, i risultati sono riportati nella tabella 3.

La prova di carbonatazione è stata effettuata con le modalità previste dalla UNI 9944, dopo 390 giorni di esposizione dei provini in una galleria autostradale, in condizioni ritenute favorevoli per lo sviluppo del fenomeno.

3. Esame dei risultati e discussione

I risultati di tutte le prove sono stati suddivisi raggruppando:

- le miscele aventi medesimo rapporto a/c e diverso dosaggio di cemento,

NUMERO IMPASTO	CEMENTO [kg/mc]	SUPERFL. [kg/mc]	AERANTE [kg/mc]	MICRO- SFERE [kg/mc]	MICRO- SILICE [kg/mc]	ADDITIVO PREDOSATO [kg/mc]	A/C	MV [Kg/mc]	ARIA %	SLUMP [mm]
1	311	6,2	/	/	/	/	0,43	2509	1,1	10
2	490	/	/	/	/	/	0,45	2382	1,4	140
8	400	8,0	/	/	/	/	0,43	2508	1,4	240
9	400	8,0	/	2,5	/	/	0,43	2447	2,5	240
10	400	8,0	0,40	/	/	/	0,43	2479	2,5	240
10'	400	8,0	0,30	/	/	/	0,43	2403	4,4	240
10''	400	8,0	0,40	/	/	/	0,43	2417	6,1	240
11	400	8,4	/	/	20	/	0,43	2454	2,2	240
12	400	8,8	/	/	40	/	0,43	2420	1,9	220
13	400	4,0	/	/	/	45	0,44	2448	1,0	240
15	400	/	/	/	/	/	0,60	2369	0,8	240
16	400	/	/	6,5	/	/	0,60	2278	1,8	240
17	400	/	2,0	/	/	/	0,60	2261	4,7	240
18	400	10	/	/	/	/	0,39	2471	1,8	185

Tabella 1 - Composizione delle miscele studiate

per uno di essi esiste una proposta di norma.

2. Parte sperimentale

Allo scopo di paragonare il comportamento delle miscele studiate, in mancanza di un test di durabilità generico, si è studiato per i materiali e le miscele esaminate il comportamento in prove standardizzate che misurano aspetti particolari normalmente ritenuti significativi ai fini della durabilità. Naturalmente si è anche studiata l'influenza della composizione delle miscele sulla loro resistenza a compressione. Materiali e metodi vengono descritti nei paragrafi seguenti.

2.1 Materiali e miscele

Per il confezionamento delle miscele sono stati utilizzati i seguenti materiali

- cemento Pozzolanico 425
- aggregati, litologicamente appartenenti a rocce ignee provenienti dall'alveo del fiume Toce, disponibili in un unico stock per tutte le prove, suddivisi in tre pezzature;
 - ghiaia, dimensione 9,52 /38,1 mm, rapporto di miscela 50%
 - sabbione, dimensione 0,074 /12,7 mm, rapporto di miscela 35%
 - sabbia, dimensione 0,075 /4,76 mm, rapporto di miscela 15%;
- un additivo superfluidificante rispondente alla UNI 8145 che nel dosaggio consigliato dal produttore (2% sul

peso del cemento) consente una riduzione del dosaggio d'acqua d'impasto pari al 25%;

- un additivo aerante rispondente alla UNI 7103-72 da introdurre unitamente all'acqua d'impasto in quantità variabile a seconda della percentuale di aria occlusa che si desidera ottenere
- microsilice (silica fume) avente un tenore di SiO_2 non cristallina del 94-98% e superficie specifica pari a 20-30 m^2/g ;
- un prodotto in commercio predosato, costituito da un additivo in polvere a base di microsilice ad elevata superficie con aggiunta di superfluidificante;
- microsfele di plastica, aventi dimensioni di 20-40 micrometri, proposte dal produttore come alternativa all'aria aggiunta.

Per l'esecuzione di questo studio sono state confezionate 14 miscele di calcestruzzo. Tutte le miscele derivano da una miscela di riferimento, avente le seguenti caratteristiche: cemento pozzolanico 425 dosato a 400 kg/m^3 , rapporto $\text{a/c} = 0,45$, aggregato siliceo del fiume Toce, avente diametro massimo $D_{\text{max}} = 38,1$ mm, consistenza pari a 180-220 mm ottenuta con uso di superfluidificante.

Rispetto alla miscela di base si è poi modificato il rapporto a/c a pari lavorabilità facendo variare i dosaggi di acqua e tipo di additivo fluidificante (impasti n. 15

Impasto n.	Resistenza a compressione [MPa]			
	1 gg	7 gg	28gg	90gg
1	21,9	42,1	52,6	57,0
2	13,7	35,5	44,5	53,8
8	25,3	43,8	48,9	56,2
9	14,2	36,8	47,4	52,5
10	19,6	42,4	49,1	53,5
10'	14,7	39,5	46,6	53,7
10''	14,4	35,1	44,7	51,9
11	19,8	44,1	56,9	59,3
12	18,3	48,5	61,7	69,6
13	18,1	47,8	57,7	66,0
15	5,5	22,7	30,7	40,6
16	6,9	16,9	23,8	26,8
17	3,1	14,6	21,6	22,2
18	29,7	48,7	60,6	67,9

Tabella 2 - Resistenze a compressione fino a 90 giorni

- b) le miscele aventi medesimo dosaggio di cemento ma differenti rapporti a/c,
- c) miscele aventi differente contenuto d'aria,
- d) miscele aventi differente contenuto di microsilice,
- e) miscele contenenti differenti tipi di additivi.

3.1 Misure sul calcestruzzo fresco

I valori ottenuti per le differenti miscele sono riportati in Tabella 1. I dati della tabella evidenziano il fatto che per ottenere il desi-

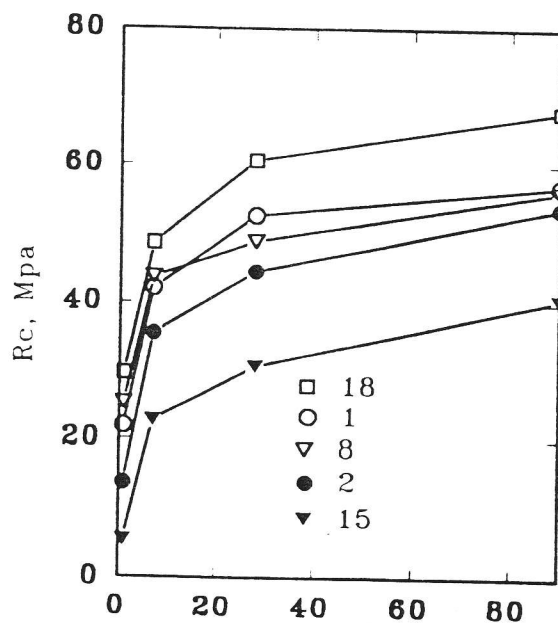


Fig. 1 - Resistenza a compressione; miscele a diverso a/c e dosaggio di cemento

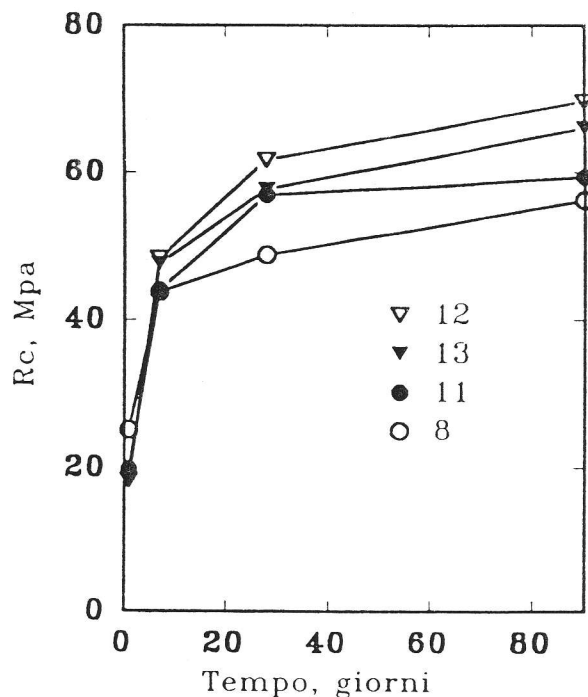


Figura 2 - Miscele con microsilice

derato inglobamento d'aria si sono dovute utilizzare dosi di aerante sensibilmente superiori a quelle indicate dal produttore dell'additivo. I dati indicano anche che le diverse miscele presentano anche variazioni piuttosto pronunciate della massa volumica del calcestruzzo.

3.2 Resistenza a compressione

I risultati di resistenza a compressione delle diverse miscele esaminate sono riporta-

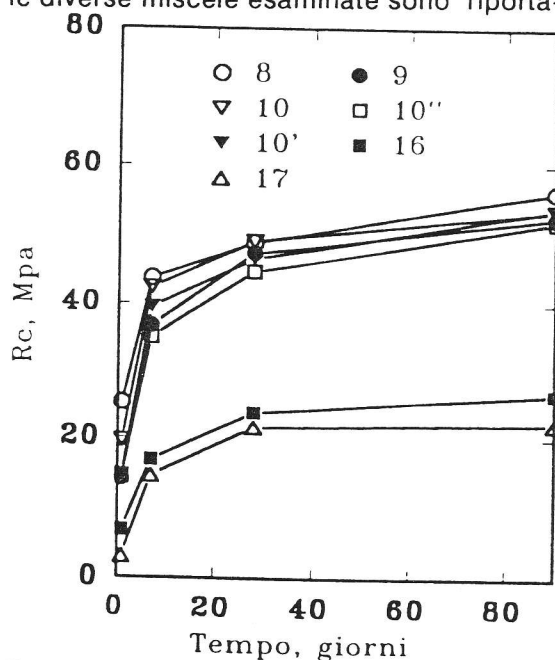


Figura 3 - Miscele con aria aggiunta e microsfere

te in Tabella 2 e nei grafici delle Fig. 1-3.

Nella Fig. 1 sono riportate le curve di sviluppo di resistenza a compressione per i calcestruzzi senza aggiunte, con rapporto acqua/cemento variabile e dosaggio di cemento variabile. I risultati confermano che

CAMPIONE	Coeff. Darcy cm/s	Profondità cm	E inizio a	E finale MPa
1	6,8 E-11		35800	36500
2	8 E-10		35200	32200
8	1,5 E-10		34000	28100
9	2,7 E-10		33100	35000
10	2 E-11		33500	21700
10'	-	14	32200	24000
10''	-	15	30700	32600
11	-	4	36200	3200
12	-	4	34500	7800
13	-	3	34000	3100
15	6 E-9		28200	11000
16	8,1 E-9		26000	22800
17	3 E-9		25100	26000
18	-	2	36800	35800

Tabella 3 - Moduli elastici, permeabilità e permeazione d'acqua

la variabile più importante è il rapporto acqua/cemento; assai meno significativo appare il dosaggio di cemento, anche se la miscela a dosaggio di cemento molto elevato sembra leggermente svantaggiata a brevi stagionature.

Nel grafico di Fig. 2 sono riportati i valori di resistenza a compressione nel tempo per le miscele a diverso contenuto di silice: si può rilevare che alla stagionatura di un giorno la miscela priva di silice è quella che dà la massima resistenza, mentre a 7 giorni le miscele additivate danno i valori superiori; si può anche osservare che le differenze si accentuano col progredire della stagionatura; un'aggiunta del 10% di microsilice in peso rispetto al cemento

ha evidenziato un decremento del 28% dopo 1 giorno di maturazione ed un incremento del 24% a 90 giorni rispetto all'impasto di riferimento. Quantità di silica fume minori danno effetti all'incirca proporzionali al dosaggio di aggiunta. Il prodotto predosato che dà un apporto del 9% rispetto al peso del cemento ha un effetto equivalente a quello dell'aggiunta introdotta direttamente.

Nel grafico di fig. 3 sono riportati i valori di resistenza a compressione nel tempo per le miscele contenenti aria aggiunta e microsfele. I risultati indicano che rispetto al campione di riferimento 8, la riduzione di resistenza associata all'aggiunta d'aria è all'incirca proporzionale al suo dosaggio e più accentuata alle brevi stagionature (fino al 20 % per il campione 10''). L'effetto è alquanto più pronunciato per aggiunta di microsfele, anche considerando il minor volume aggiunto (al massimo 6,5 l/m³ circa, contro i 61 litri di aria della miscela 102). L'effetto depressivo delle microsfele e dell'aria sulla resistenza è anche più evidente per le miscele a rapporto acqua/cemento 0,6 (-22% e -30% rispettivamente); per la miscela 17 si può anche ipotizzare un effetto dovuto al dosaggio insolitamente elevato di aerante resosi necessario.

3.3 Permeabilità

Nella Tabella 3 sono riportati i dati di permeabilità ottenuti sulle miscele in esame mediante la prova di permeazione d'acqua sotto pressione (media di due provini). L'esame dei risultati indica che:

- a pari rapporto a/c, non si rileva una significativa influenza del dosaggio di cemento (1, 2, 8)
- il rapporto a/c è determinante ai fini della permeabilità
- l'aggiunta di silica fume riduce la permeabilità (nelle condizioni di prova non si è avuta permeazione a 240 ore; la valutazione si è effettuata spaccando i provini ed esaminando lo spessore dello strato permeato, individuato visualmente)

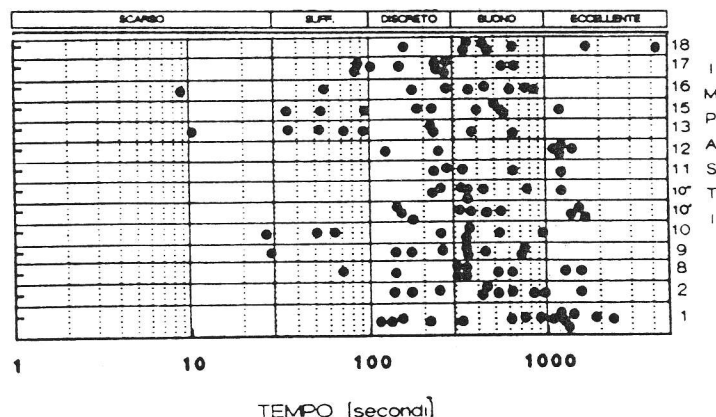


Tabella 4 - Permeabilità, metodo di Figg

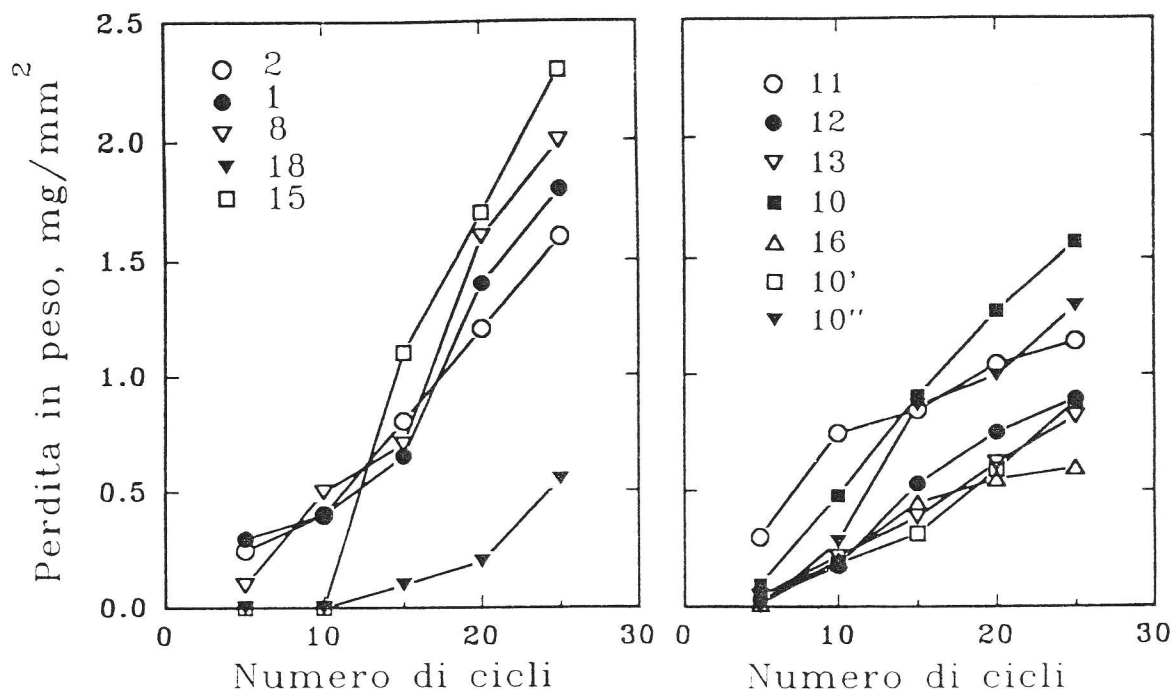


Fig. 4 - Resistenza al gelo secondo Rilem CDC 2

- l'aggiunta di aerante e di microsfele non modifica apprezzabilmente la permeabilità.

Nella tabella 4 è rappresentato il risultato delle prove eseguite mediante il metodo di Figg. E' evidente la dispersione dei risultati per ciascuna delle diverse miscele (come è del resto tipico del metodo impiegato) ed è altrettanto evidente che le indicazioni ottenute coincidono sostanzialmente con quelle ricavate con il metodo di permeabilità sotto pressione.

3.4 Resistenza al gelo

Nella Tabella 3 sono riportati i dati relativi alla misura del modulo elastico dinamico (E) ricavato dalla frequenza di risonanza secondo UNI 9771, prima e dopo 75 cicli gelo-disgelo secondo il test UNI 7087-72 (media di 2 o 3 valori).

Tenendo conto dell'incertezza delle misure di velocità degli ultrasuoni (evidente nei valori ricavati su calcestruzzo non trattato, si veda anche (4)), il test si dimostra ben selettivo in quanto alla fine del trattamento le differenze risultano molto evidenti. I risultati indicano che:

- l'influenza del rapporto a/c appare determinante in quanto sia le miscele con rapporto a/c di 0,43 che di 0,39 risultano poco danneggiate mentre la ri-

duzione di E rilevata per le miscele aventi rapporto a/c = 0,6 è alquanto maggiore;

- l'aggiunta di microsilice, sia come tale che come prodotto premiscelato e additivato sembra del tutto negativa ai fini della resistenza ai cicli di gelo-disgelo e fornisce i risultati peggiori;
- nelle condizioni di questo test le prove eseguite non evidenziano l'effetto positivo dell'inglobamento d'aria, che anzi, a pari rapporto a/c, sembra portare ad una riduzione di E;
- l'aggiunta delle microsfele ha effetti positivi sulla resistenza al gelo.

I risultati delle prove eseguite con la metodologia Rilem CDC2 sono riassunti nella figura 4. In ciascun grafico sono riportati i valori di perdita di massa dei provini in funzione del numero di cicli effettuati.

I due grafici raggruppano le miscele in funzione dei fattori considerati; nella fig. 4a sono riportati dati per impasti a diverso contenuto di cemento e diverso rapporto acqua/cemento, nella fig. 4b per le miscele a diverso tenore di microsilice, aria aggiunta e microsfele.

I risultati di queste prove sembrano indicare un buon accordo con quelli ottenuti secondo la metodologia UNI 7087. Infatti anche in questo caso si ottiene che:

- le miscele a rapporto a/c 0,43 e 0,39 forniscono le resistenze più elevate ai cicli gelo-disgelo secondo la metodologia Rilem. La miscela a rapporto a/c 0,6 mostra una perdita molto elevata;
- anche questa prova non indica l'ottenimento di benefici sostanziali dall'aggiunta di aria; anzi tutte le miscele contenenti aeranti hanno dato, pur con un rapporto a/c di 0,43, una minore resistenza;
- l'effetto della microsilice ai fini della resistenza ai cicli di gelo-disgelo non sembra positivo, le perdite di massa sono sempre più elevate rispetto alle miscele a pari a/c. Questo risultato appare in netto disaccordo con la maggior parte dei risultati della letteratura che indicano in genere un miglior comportamento dei calcestruzzo additivati con microsilice rispetto ai cicli gelo-disgelo. Gli autori non sono attualmente in grado di interpretare questi risultati e si riservano di effettuare nuove prove;
- il comportamento al test Rilem delle miscele a pari rapporto a/c e dosaggi di cemento fortemente diversi (311 e 490 kg/m³) appare sostanzialmente equivalente.

3.5 Prove di carbonatazione

I risultati delle misure di carbonatazione ad un anno, hanno mostrato profondità di carbonatazione da circa 0,5 a 3 mm; l'incertezza del metodo ed il modesto valore della penetrazione, dovuto alla buona qualità della maggior parte dei provini, non consente di effettuare una classifica precisa dei risultati, anche se i provini a maggior rapporto a/c sono quelli che hanno fornito valori più elevati (spessore carbonatato maggiore di 2 mm).

4. Conclusioni

I risultati ottenuti nel corso delle prove eseguite consentono in conclusione di affermare che si sono ottenute alcune indicazioni significative.

- La variabile che principalmente sembra influenzare il comportamento ai fini

della durabilità del calcestruzzo per le opere autostradali (permeabilità e resistenza ai cicli gelo disgelo) è il rapporto a/c, indipendentemente dal dosaggio di cemento. Calcestruzzi a basso rapporto acqua cemento sono risultati resistenti ai cicli gelo-disgelo anche in presenza dei sali disgelanti, meno permeabili (sia all'acqua sotto pressione che nelle condizioni del metodo Figg), e meno soggetti alla carbonatazione.

- Per le prove eseguite non sono risultati utili né l'inglobamento d'aria né l'aggiunta di microsilice.
- Le microsfele sono risultate utili nei cicli gelo disgelo secondo UNI ma si è rilevata una sensibile riduzione di resistenza.

Riferimenti bibliografici

1) V. Alunno Rossetti, G. Camomilla, S. M. Guella "La durabilità dei calcestruzzi", in: Rivista Autostrade, 6, 21 (1985)

2) J.W. Figg "Methods of measuring air and water permeability of concrete", in: Magazine of Concrete Research, 25, 85, 213-219 (1973)

3) *Materiaux et Construction* 7, 11 (1977)

3) V. Alunno Rossetti "Umidità dell'ambiente di maturazione e resistenza a compressione del calcestruzzo - Nota 2: valutazione della resistenza in sito", In *L'Industria It. del Cemento*, 9, 571 (1992)

Ringraziamento

Gli autori desiderano ringraziare per la fattiva collaborazione i Tecnici del Laboratorio Autostrade di Romagnano