

2

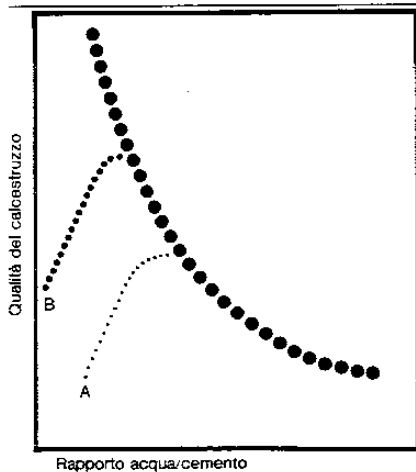
Summary

This article is the result of laboratory research carried out in order to explore the possibility to use ultra-resistant concrete in antisismic buildings. The most important aspects taken into consideration in laboratory tests on different samples are: water/cement ratio, workability of fresh concrete, quality of cement, dosing, inert and additive elements, maintenance. After standardizing the measuring systems, the authors outline not only the mechanical, static and dynamical characteristics of normal and light types of concrete, but also the adhesion characteristics of different kinds of reinforcements in the respective types of concrete. The final thesis of the research is that by a proper dosing of additives to reduce the water/cement ratio, it is possible to obtain kinds of concrete suitable for antisismic buildings, i.e. concrete with a compressive strength higher than 1000 kg/sqcm and a bending strength of 60/70 kg/sqcm, extremely safe (i.e. laboratory tests are easily reproducible in the building yard) and strongly adhesive to steel.

Introduzione

In teoria la diminuzione dell'acqua di impasto del calcestruzzo provoca un miglioramento in generale della qualità del manufatto indurito, ed in particolare della sua resistenza meccanica (fig. 1). Nella pratica, però, non è conveniente diminuire il rapporto acqua/cemento (a/c) al di sotto di un certo valore perché la lavorabilità del calcestruzzo fresco diviene così bassa che, per un dato sistema di compattazione, non è possibile mettere in opera il calcestruzzo senza introdurre cavità macroscopiche o senza provocare, addirittura, gravi difetti consistenti nei ben noti nidi di ghiaia [1]. Pertanto, in pratica, al diminuire del rapporto a/c, e per un determinato sistema di compattazione, la qualità del calcestruzzo prima aumenta, e quindi, raggiunto un massimo, diminuisce come è schematicamente mostrato dalla curva A della figura 1. Il valore del rapporto a/c corrispondente al massimo della qualità dipende dal particolare metodo di compattazione e, se si migliora quest'ultimo, per esempio passando da una vibrazione debole ad una più forte, il massimo della curva si sposta verso valori più bassi del rapporto a/c, dunque verso valori più alti della qualità del calcestruzzo (curva B della fig. 1).

Se si desidera, quindi, ottenere un calcestruzzo di qualità ottimale, si è costretti a lavorare in condizioni particolarmente difficili e critiche, cioè con un calcestruzzo rigido, per avere un basso rapporto a/c, e con un sistema di compattazione molto efficace per garantire il completo riempimento delle casseforme. Tuttavia, queste condizioni non possono essere sempre assicurate nella pratica, soprattutto nei cantieri dove le condizioni di lavoro, ed in particolare quelle riguardanti la compattazione del calcestruzzo, non sono affatto costanti e neppure controllate con sufficiente accuratezza. A differenza di quanto normalmente si verifica per il materiale prelevato per il confezionamento dei provini, la costanza di compattazione, e quindi di qualità del calcestruzzo realmente messo in opera, diminuisce sensibilmente con l'aumentare della rigidità del calcestruzzo fresco. In altre parole, quanto più asciutto è il calcestruzzo, tanto maggiore sarà la differenza tra la resistenza caratteristica nominale determinata con i provini ben vibrati, e quella «reale» del materiale presente nella struttura. La figura 2 mostra l'aspetto di tre calcestruzzi per i quali la differenza tra il valore nominale e quello reale della resistenza meccanica varia sensibilmente con la lavorabilità dell'impasto: per il calcestruzzo molto fluido la qualità non dipende molto dall'efficacia della compattazione; per il calcestruzzo molto asciutto, al contrario, la qualità del materiale varia sensibilmente con l'efficacia della vibrazione.



.... A: cls. vibrato debolmente
... B: cls. vibrato fortemente

1 influenza del rapporto a/c e della vibrazione sulla qualità del calcestruzzo.

In altre parole maggiore è la lavorabilità del calcestruzzo, più alta è l'affidabilità del materiale, nel senso che i risultati realmente ottenibili nella struttura sono meno dispersi e si avvicinano maggiormente a quelli ottenuti in laboratorio mediante la rottura dei provini. Nella realizzazione di opere in zone sismiche diviene ancor più importante l'utilizzazione di un calcestruzzo che presenti contemporaneamente questi due requisiti: ottima qualità ed alta affidabilità e, se si preferisce, basso rapporto acqua/cemento ed elevata lavorabilità. Lo scopo del presente lavoro è stato quello di studiare le composizioni di calcestruzzi capaci di conciliare le esigenze, molto spesso antitetiche, della qualità del materiale con quelle della messa in opera, al fine di soddisfare le richieste del progettista e di superare, al tempo stesso, le difficoltà esecutive incontrate dalle imprese di costruzione.

Parte sperimentale

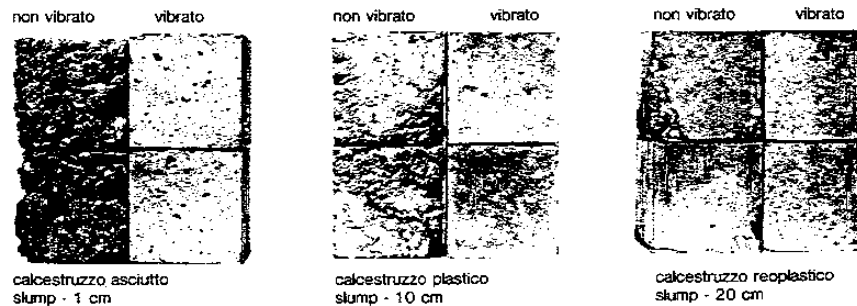
Materiali impiegati

Per la confezione dei calcestruzzi esaminati sono stati impiegati tre diversi cementi Portland, due ad alta resistenza meccanica (425), ed uno ad alta resistenza meccanica e rapido indurimento (525), le caratteristiche dei quali sono riportate in tabella 1. In particolare uno dei due cementi 425 è di tipo ferrico, e cioè presenta un contenuto trascurabile di alluminio tricalcico (C₃A). Come inerti sono stati impiegati inerti naturali alluvionali per i calcestruzzi ordinari, ed argille espanse unitamente a sabbia per i calcestruzzi leggeri; in figura 3 e 4 sono riportate le distribuzioni granulometriche dei singoli inerti e delle miscele risultanti, calcolate con il metodo di

Goldbeck e Gray [2] basato sul contenuto di vuoti dell'inerte grosso. Come additivi sono stati utilizzati due prodotti commerciali, entrambi privi di cloruro ed a base di polimeri sintetici, specifici per la produzione di calcestruzzi reoplastici [3-4], cioè, fluidi (slump >20 cm) ed al tempo non segregabili e con una capacità di bleeding inferiore a 2 · 10⁻³.

Tabella 1
Caratteristiche dei cementi impiegati

	Cemento n. 1	Cemento n. 2	Cemento n. 3
CaO	63,08%	63,60%	62,92%
SiO ₂	22,25%	20,80%	21,43%
Al ₂ O ₃	3,71%	5,51%	5,31%
Fe ₂ O ₃	4,58%	2,99%	2,68%
MgO	2,46%	0,75%	1,63%
SO ₃	2,10%	2,95%	3,37%
Na ₂ O	0,08%	0,19%	0,12%
K ₂ O	0,14%	0,38%	0,14%
Res. ins.	0,10%	0,15%	0,22%
p.a.f.	1,50%	2,00%	2,22%
C ₃ S	50,2%	56,9%	44,2%
C ₂ S	25,9%	19,3%	28,1%
C ₃ A	2,1%	9,8%	9,5%
C ₄ AF	13,9%	9,8%	8,1%
Inizio presa (ore)	2 ^h 20'	3 ^h 09'	1 ^h 45'
Fine presa (ore)	4 ^h 36'	4 ^h 23'	2 ^h 40'
Blaine cm ² /g	3763	3855	5160



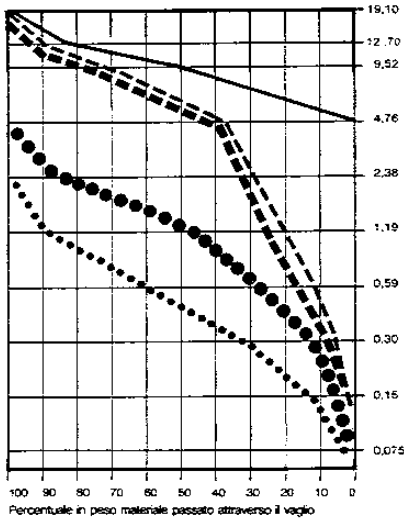
2 Aspetto del calcestruzzo in funzione della lavorabilità e della vibrazione.

Composizione dell'inerte secondo Goldbeck

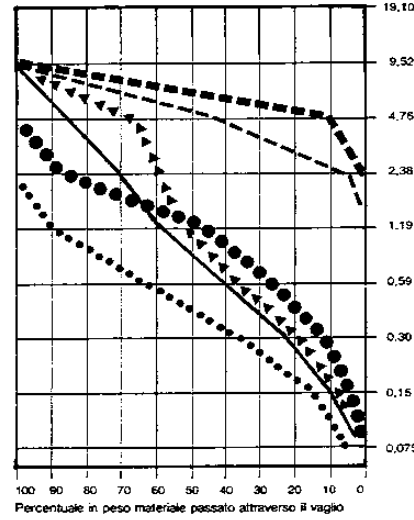
Inerte	Dosaggio cemento (kg/m ³)	
	400	500
Sabbia fine	21%	14%
Sabbia grossa	14%	21%
Griglia	65%	65%

Composizione dell'inerte secondo Goldbeck

Inerte	p.s. calcestruzzo (kg/m ³)	
	1600	1800
Sabbia fine	59%	51%
Sabbia grossa	11%	9%
Argilla espansa (400 kg/m ³)	30%	—
Argilla espansa (600 kg/m ³)	—	40%



●●● sabbia fine
●●● Sabbia grossa
— inerte risultante per il Cts con 500 kg/m³ di cemento
— inerte risultante per il Cts con 400 kg/m³ di cemento
— Griglia



●●● sabbia fine
●●● Sabbia grossa
— argilla espansa (peso in mucchio = 400 kg/m³)
— argilla espansa (peso in mucchio = 600 kg/m³)
— inerte ris. per il cts. leggero con p.s. = 1600 kg/m³
— inerte ris. per il cts. leggero con p.s. = 1800 kg/m³

Fig. 3
Curve granulometriche degli inerti per i calcestruzzi ordinari
(p.s. = □ kg/m³)

Fig. 4
Curve granulometriche degli inerti per i calcestruzzi leggeri
(p.s. = 1600-1800 kg/m³)

Confezione e stagionatura dei calcestruzzi

Sono stati confezionati 38 diversi impasti ciascuno dei quali è stato maturato sia a temperatura ambiente (20°C), che a vapore, ottenendo così un totale di 76 calcestruzzi. Il trattamento a vapore è consistito in una prestagionatura a 20°C di 4 ore, in un riscaldamento da 20°C a 70°C in 3 ore, in un trattamento a vapore

(70°C) di 6 ore, ed in un raffreddamento a temperatura ambiente in 2 ore.

Per ciascun cemento sono stati preparati impasti con un dosaggio nominale di 400 o 500 kg/m³. Il dosaggio reale di cemento, calcolato attraverso il peso specifico ed il contenuto d'aria, è riportato nella seconda colonna delle tabelle 2-7. Per ciascun dosaggio nominale di

Tabella 2
Caratteristiche dei calcestruzzi ordinari confezionati con il cemento n. 1.

Dosaggio nominale (kg/m ³)	Dosaggio effettivo (kg/m ³)	Temperatura °C	Tipo add.	Rap. a/c **	Stump (cm)	RESISTENZE MECCANICHE (kg/cm ²)								MODULO ELASTICO (kg/cm ²)10 ⁶				Peso specif. (kg/m ³)
						1 g		7 gg		28 gg		90 gg		Statico		Dinamico		
						Compr.	Fless.	Compr.	Fless.	Compr.	Fless.	Compr.	Fless.	Compr.	28 gg	90 gg	7 gg	
400	418	20	—	0,43	10	115	52	442	60	637	64	783	3,00	3,70	4,30	4,82	5,64	2500
	416	70	—	0,43	10	369	53	603	54	700	58	790	3,10	3,95	4,28	4,60	5,04	2500
	423	20	1	0,33	22	191	56	620	58	840	59	900	3,05	4,01	5,35	5,17	6,36	2562
	423	70	1	0,33	22	242	52	564	56	728	57	833	3,53	4,09	5,33	6,00	6,33	2562
	423	20	2	0,29	22,5	305	62	702	62	827	64	985	3,10	4,34	5,33	5,78	6,48	2550
	423	70	2	0,29	22,5	660	62	745	63	940	62	1045	4,01	4,73	5,83	5,90	6,60	2550
500	485	20	—	0,39	10	115	51	514	49	680	50	823	3,35	3,62	4,90	5,00	5,82	2512
	485	70	—	0,39	10	406	51	628	51	772	53	915	3,85	4,23	—	4,80	5,77	2512
	503	20	1	0,31	23	197*	54	597	67	828	69	928	3,22	4,34	5,26	5,80	6,39	2562
	503	70	1	0,31	23	294	56	555	64	805	65	847	3,80	4,80	5,29	5,92	6,50	2562
	502	20	2	0,27	22	261	70	715	74	917	78	1071	3,76	4,06	5,46	5,93	6,56	2537
	502	70	2	0,27	22	680	77	809	77	966	73	1151	4,13	5,06	5,67	5,64	6,96	2537

* 20 = calcestruzzi stagionati a temperatura ambiente.
70 = calcestruzzi stagionati a temperatura ambiente dopo un trattamento a vapore a 70°C.
** il rapporto acqua/cemento non tiene conto dell'acqua presente nell'additivo.
* = rottura a 2 giorni.

Tabella 3
Caratteristiche dei calcestruzzi ordinari confezionati con il cemento n. 2.

Dosaggio nominale (kg/m ³)	Dosaggio effettivo (kg/m ³)	Temperatura °C	Tipo add.	Rap. a/c **	Stump (cm)	RESISTENZE MECCANICHE (kg/cm ²)								MODULO ELASTICO (kg/cm ²)10 ⁶				Peso specif. (kg/m ³)
						1 g		7 gg		28 gg		90 gg		Statico		Dinamico		
						Compr.	Fless.	Compr.	Fless.	Compr.	Fless.	Compr.	Fless.	Compr.	28 gg	90 gg	7 gg	
400	411	20	—	0,46	11	175	53	520	55	728	62	827	3,16	4,93	4,37	6,80	—	2482
	411	70	—	0,46	11	375	54	471	52	642	50	745	3,14	4,22	4,23	5,80	—	2482
	415	20	1	0,35	20,5	51	66	751	67	895	72	1113	3,42	4,80	4,80	5,90	—	2525
	415	70	1	0,35	20,5	475	63	616	64	806	67	935	3,30	4,70	4,68	6,00	—	2525
	417	20	2	0,32	21	356	68	711	68	875	72	999	3,70	—	5,35	7,86	—	2525
	417	70	2	0,32	21	586	59	704	704	835	74	944	4,44	4,65	4,56	5,45	—	2525
500	477	20	—	0,42	10,5	248	45	581	64	732	60	879	—	4,10	4,52	5,35	—	2487
	477	70	—	0,42	10,5	450	48	549	66	716	61	856	—	3,92	4,35	5,33	—	2487
	498	20	1	0,31	21	91	63	783	69	960	71	1180	—	4,08	4,05	5,80	—	2537
	498	70	1	0,31	21	570	58	761	72	900	82	1087	—	4,51	4,50	5,90	—	2537
	498	20	2	0,31	21	432	64	791	68	973	79	1071	—	4,21	4,06	6,00	—	2537
	498	70	2	0,31	21	717	74	813	82	927	79	1083	—	4,91	4,21	6,10	—	2537

* 20 = calcestruzzi stagionati a temperatura ambiente.
70 = calcestruzzi stagionati a temperatura ambiente dopo un trattamento a vapore a 70°C.
** il rapporto acqua/cemento non tiene conto dell'acqua presente nell'additivo.

Metodi di misura

Sul calcestruzzo fresco sono state effettuate misure di lavorabilità e di peso specifico — riportate nelle tabelle 2-7 — oltre che di aria inglobata e di acqua essudata. L'aria inglobata, misurata con il porosmetro, è risultata sempre compresa tra 1 e 2%, mentre l'acqua essudata misurata secondo la norma UNI 7122/72 non ha mai superato il valore di 2 cm³ per litro di calcestruzzo. La lavorabilità del calcestruzzo fresco, determinata attraverso la misura dell'abbassamento al cono di Abrams (slumps), è stata prefissata, facendo variare il rapporto a/c, a 10 cm per i calcestruzzi non additivati ed a 20-24 cm per i calcestruzzi additivati, che risultavano quindi praticamente autolivellanti. Nonostante il notevole aumento di lavorabilità, i calcestruzzi additivati presentano un rapporto a/c decisamente inferiore, tuttavia i valori di a/c riportati nella quinta colonna delle tabelle 2-7 non tengono conto dell'acqua aggiunta con l'additivo.

Indipendentemente dalla stagionatura — a temperatura ambiente o a vapore — alle scadenze di 1-7-28-90 giorni è stata misurata la resistenza meccanica a compressione per rottura dei provini 10x10x10 cm tutti ben compattati fino a costanza di peso. Ciascuno dei valori riportati nelle tabelle 2-7 è il risultato della media di tre provini. Alle stagionature di 7 e 28 giorni, e spesso di 90 giorni, è stata misurata la resistenza meccanica a flessione per applicazione del carico ai due terzi su travetti di 15x15x15 cm. I risultati di queste prove presentano una minore riproducibilità delle prove a compressione, e talvolta si è registrato una diminuzione del valore della resistenza a flessione all'aumentare della stagionatura.

Alle scadenze di 7-28-90 giorni è stato misurato il modulo elastico dinamico mediante la determinazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni [5]. È stato anche misurato il modulo elastico secante a compressione registrando le deformazioni del materiale per applicazione di un carico pari a 1/3 di quello a rottura. Su alcuni provini è stata misurata l'adesione tra ferro e calcestruzzo a 7 e 28 giorni, registrando il carico necessario allo sfaldamento di barre lisce e ad aderenza migliorata (diametro 20 mm) immerse in calcestruzzo.

Per valutare l'affidabilità del materiale sono stati preparati 50 provini 10x10x10 cm di calcestruzzo, sottoposti a diversi tempi di vibrazione, e stagionati tutti per 7 giorni a temperatura ambiente. La misura della resistenza meccanica a compressione in funzione del tempo di vibrazione, offre la possibilità di valutare l'affidabilità del materiale e cioè la dipendenza della qualità del calcestruzzo dalla cura della messa in opera.

Discussione dei risultati

Resistenza meccanica a compressione

Il trattamento a vapore, rispetto alla stagionatura a temperatura ambiente, provoca un forte incremento della resistenza meccanica a 1 giorno. Tuttavia l'effetto dipende sensibilmente dal tipo di cemento: nel caso dei calcestruzzi non additivati, l'incremento a 1 giorno è di circa il 100% con i cementi n. 2 e 3 (Tab. 3-4), mentre è di oltre il 200% per il cemento n. 1 (Tab. 2), e cioè per il cemento Portland di tipo ferrico. Inoltre, con questo cemento, l'incremento di resistenza che si ottiene con il trattamento a vapore, sebbene diminuisca progressivamente con l'aumentare del tempo, si mantiene anche alle lunghe stagionature (90 giorni). Al contrario, per gli altri due cementi, sia con gli inerti ordinari che con quelli leggeri, già dopo 7 giorni i calcestruzzi stagionati a temperatura ambiente presentano, quasi sempre, una resistenza a compressione superiore a quella dei corrispondenti calcestruzzi stagionati a vapore. Sulla base dei dati riportati in letteratura [5] questo comportamento è da ritenersi normale, mentre è piuttosto eccezionale quello del calcestruzzo ottenuto con il cemento di tipo ferrico. In figura 5 è mostrato, a titolo di esempio, l'effetto del trattamento termico sulla resistenza meccanica di due calcestruzzi, entrambi non additivati, e preparati con i due diversi cementi Portland 425. Questi risultati indicano quale sia l'importanza della scelta del cemento per sfruttare al massimo l'incremento di resistenze meccaniche conseguibile con il trattamento a vapore.

L'aggiunta degli additivi oltre ad aumentare la lavorabilità del calcestruzzo, provoca un notevole incremento della resistenza meccanica. L'effetto dipende, tuttavia, dal tipo di additivo e dal tipo di cemento al quale l'additivo stesso viene aggiunto. Nel caso del calcestruzzo preparato con il cemento ferrico (Tab. 2) l'additivo n. 2, di tipo accelerante, provoca un maggior incremento dell'additivo n. 1 sia nei calcestruzzi stagionati a temperatura ambiente che in quelli trattati a vapore, sia alle brevi che alle lunghe stagionature. Con l'additivo n. 2, per esempio, è possibile ottenere oltre 600 kg/cm² a 1 giorno e oltre 1000 kg/cm² a 90 giorni nei calcestruzzi trattati a vapore, con un incremento di circa il 70% a 1 giorno e di circa il 30% a 90 giorni, rispetto ai corrispondenti calcestruzzi non additivati. L'incremento è particolarmente rilevante soprattutto in relazione al fatto che i calcestruzzi non additivati presentano una lavorabilità notevolmente inferiore.

A: Cemento Portland ferrico

Nel caso del cemento Portland 425 n. 2 (Tab. 3) l'incremento di resistenze ottenibili con l'additivo n. 2 è maggiore di quello ottenibile con l'additivo n. 1 solo alle brevi stagionature, mentre tra 7 e 90 giorni le resistenze meccaniche che si ottengono con i due additivi sono praticamente paragonabili, potendosi, in

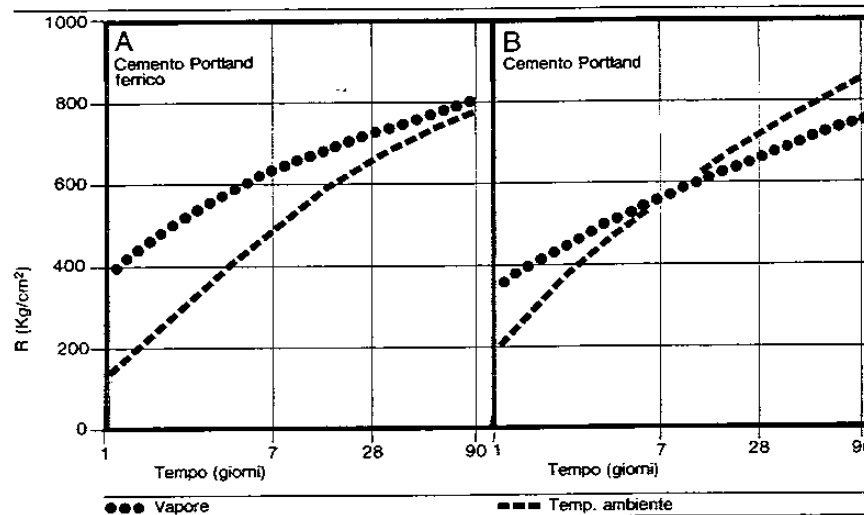


Fig. 5
Influenza del tipo di cemento sull'andamento della resistenza a compressione (R_c) di calcestruzzi stagionati a temperatura ambiente e trattati a vapore. (A = cemento n. 1, B = cemento n. 2).

entrambi i casi, arrivare, dopo 90 giorni, a circa 1000 kg/cm², con un dosaggio di 400 kg/m³, ed a circa 1100 kg/cm² con un dosaggio di cemento di 500 kg/m³. Nel caso del cemento Portland 525 n. 3 (Tab. 4), invece, l'incremento di resistenza meccanica provocato dall'aggiunta dei due additivi è dello stesso ordine di grandezza a 1 giorno, mentre risulta più alto con l'additivo n. 1 alle lunghe stagionature, soprattutto nei calcestruzzi stagionati a temperatura ambiente: a 90 giorni, per esempio, la resistenza meccanica del calcestruzzo contenente l'additivo n. 1 e stagionato a 20°C supera i 1200 kg/cm², con un dosaggio di cemento di 400 kg/cm³, e i 300 kg/cm², con un dosaggio di cemento di 500 kg/m³. Questi risultati indicano che nella scelta di un additivo occorre tener conto anche del tipo di cemento, oltre che del tipo di stagionatura, senza trascurare il fatto che un additivo — come quello n. 1 — apparentemente meno efficace con un certo cemento — come quello n. 1 — presenta però il vantaggio di un più agevole trasporto del calcestruzzo, soprattutto in climi caldi, a causa della più lenta perdita di lavorabilità.

È degno di nota, infine, che con taluni cementi è possibile abolire completamente il trattamento a vapore e ottenere le stesse resistenze meccaniche mediante l'aggiunta di additivo: ciò risulta, per esempio, vero quando si aggiunge l'additivo n. 2 al cemento n. 2 e soprattutto a quello n. 3. Nel caso, invece, del cemento n. 1 che, come si è detto, è particolarmente «avvantaggiato» dal trattamento a vapore, l'aggiunta di additivo può provocare una riduzione del trattamento a vapore, ma non una sua completa eliminazione. L'effetto degli additivi sui calcestruzzi leggeri confezionati con argilla espansa (Tab. 5-7) risulta alquanto inferiore a quello registrato con i calcestruzzi ordinari. Per i calcestruzzi leggeri il maggior vantaggio derivante dall'impiego di questi additivi consiste nella maggior aderenza ai ferri (punto 3.4.) e nella possibilità di ridurre drasticamente il tempo di vibrazione per la messa in opera (punto 3.3.): d'altra parte una prolungata vibrazione, necessaria al completo costipamento di un calcestruzzo non fluido dentro le casseforme, provocherebbe una segregazione dell'argilla espansa che tende ad accumularsi, per il minor peso specifico, sulla sommità della struttura.

Nei calcestruzzi leggero (peso specifico $\approx 1800 \text{ kg/m}^3$) confezionato con il cemento Portland n. 2 (Tab. 5), l'incremento della resistenza meccanica provocato dall'additivo n. 2 si aggira su 19-20% a 1 giorno e sul 3-10% a 28 giorni. La massima resistenza meccanica raggiungibile è circa 450 kg/cm^2 a 1 giorno e oltre 600 kg/cm^2 a 28 giorni. Nei calcestruzzo leggero (peso specifico $\approx 1800 \text{ kg/m}^3$) confezionato con il cemento Portland n. 3 (Tab. 6) l'effetto degli additivi sulla resistenza meccanica è superiore a quello osservato con il precedente cemento: l'incremento di resistenza va da un minimo del 15% ad un massimo del 50% a 1 giorno, e da un minimo del 10% ad un massimo del 20% a 28 giorni. L'additivo n. 1 risulta efficace quanto quello n. 2 sia nella stagionatura a temperatura ambiente che nel trattamento a vapore, sia alle brevi che alle lunghe stagionature: la massima resistenza meccanica è di oltre 500 kg/cm^2 a 1 giorno e oltre 750 kg/cm^2 a 28 giorni. Se si diminuisce il peso specifico da circa 1800 a circa 1600 kg/m^3 (Tab. 7), mediante l'impiego di un'argilla espansa più leggera (400 kg/m^3 in mucchio), la massima resistenza meccanica ottenibile è di oltre 300 kg/cm^2 al giorno e di oltre 400 kg/cm^2 a 28 giorni.

Resistenza meccanica a flessione

Occorre premettere innanzitutto che, attraverso prove preliminari su calcestruzzi di eguale composizione e stagionati nelle medesime condizioni, la ripetibilità delle prove di rottura a flessione è risultata decisamente inferiore a quella delle prove di rottura a compressione. In secondo luogo, l'aumento con il tempo della resistenza a flessione risulta molto minore di quello osservato per la resistenza a compressione. Tenendo conto di questi due fatti ci si può spiegare come in non pochi casi la resistenza a flessione risulta inferiore alle stagionature più lunghe. D'altra parte, a differenza di quanto avviene per la resistenza a compressione, non si osservano sensibili incrementi della resistenza a flessione né aumentando il dosaggio di cemento da 400 a 500 kg/m^3 (Tab. 2-4), né riducendo il rapporto a/c mediante l'impiego di additivi, né prolungando la stagionatura tra 7 e 90 giorni. Per i calcestruzzi ordinari esaminati nel presente lavoro (Tab. 2-4) la resistenza a flessione va da un minimo di 45 ad un massimo di 65 kg/cm^2 per i calcestruzzi non additivati, e da un minimo di 50 ad un massimo di 80 kg/cm^2 , per i calcestruzzi additivati. Per i calcestruzzi leggeri (Tab. 5-7) la resistenza meccanica a flessione va da un minimo di 12 kg/cm^2 ad un massimo di 30 kg/cm^2 per i calcestruzzi senza additivo, e da un minimo di 24 ad un massimo di 43 kg/cm^2 per i calcestruzzi contenenti gli additivi.

Affidabilità del calcestruzzo

I risultati discussi nei precedenti paragrafi si riferiscono a calcestruzzi ben compattati nelle casseforme fino a peso costante, come normalmente si verifica nella valutazione della resistenza meccanica dei provini. Naturalmente, il calcestruzzo dentro una struttura può presentare una resistenza meccanica equivalente a quella del provino solo se è stata sottoposta in ogni sua parte ad una compattazione efficace quanto quella subita dal provino stesso. L'efficacia della compattazione dipende dall'efficienza del sistema di compattazione e dalla lavorabilità del calcestruzzo fresco: più alta è la lavorabilità del calcestruzzo fresco, maggiore è la sua affidabilità in quanto minore è la dipendenza della qualità del calcestruzzo indurito dall'efficienza del sistema di compattazione. In questo paragrafo è discussa l'influenza della lavorabilità del calcestruzzo fresco sulla resistenza a compressione del materiale stagionato dopo essere stato sottoposto ad un diverso tempo di vibrazione.

Sono stati preparati due serie di calcestruzzi, tutti con dosaggio nominale di 400 kg/m^3 di cemento Portland 425 n. 2, a tre diverse consistenze: terra umida (slump = 1 cm), plastica (slump $\approx 10 \text{ cm}$) e fluida (slump $\geq 20 \text{ cm}$). La prima serie riguarda i calcestruzzi con inerti ordinari, la seconda quelli con inerti leggeri. Le caratteristiche degli impasti sono riportate in tabella 8. I calcestruzzi a consistenza fluida presentano una composizione molto vicina a quella dei calcestruzzi a consistenza di terra umida e si differenziano solo per contenere l'additivo n. 2. Per ogni impasto sono stati preparati diversi provini dei quali, 10 sono stati messi nelle casseforme senza alcuna vibrazione, 10 sono stati vibrati al massimo per 20 sec, e 30 sono stati vibrati per tempi intermedi (5-10-20 sec).

Tabella 8
Caratteristiche dei calcestruzzi sottoposti a diversa vibrazione

Dosaggio di cemento (kg/m^3) *	a/c	Slump (cm)	Tipo di inerte	Peso specifico (kg/m^3) *
418	0,33	1	ordinario	2525
411	0,46	10	ordinario	2460
417	0,32 **	22	ordinario	2520
405	0,48	1	leggero	1780
432	0,52	8	leggero	1835
401	0,45 **	21	leggero	1750

* Peso specifico del calcestruzzo compattato al massimo fino a peso costante
** Calcestruzzi contenenti 3 litri di additivo n. 2 per quintale di cemento

Tutti i calcestruzzi sono stati stagionati per 7 giorni a temperatura ambiente e quindi sottoposti a rottura per compressione.

Nelle figure 6 e 7 sono riportate le distribuzioni della resistenza meccanica dei calcestruzzi preparati alle tre diverse consistenze. Si può osservare che maggiore è la lavorabilità del calcestruzzo fresco, minore è la dispersione dei valori di resistenza meccanica. I calcestruzzi a slump 20 cm (fig. 6 c) contenenti l'additivo, rispetto ai calcestruzzi a slump 10 cm (fig. 6 b), privi di additivo, presentano non solo una maggiore

resistenza meccanica media, ma anche una minore dispersione dei valori. I calcestruzzi a slump 1 cm e 20 cm, che hanno lo stesso rapporto a/c, presentano il massimo valore di resistenza meccanica pressoché coincidente (700 kg/cm^2 per i calcestruzzi ordinari e 500 kg/cm^2 per i calcestruzzi leggeri) ed in corrispondenza della massima compattazione ottenuta con il tempo di vibrazione di 30 sec. Le maggiori differenze tra i due materiali risiedono nei provini di calcestruzzo meno compattato quale è appunto quello che può trovarsi dentro la struttura: il calcestruzzo

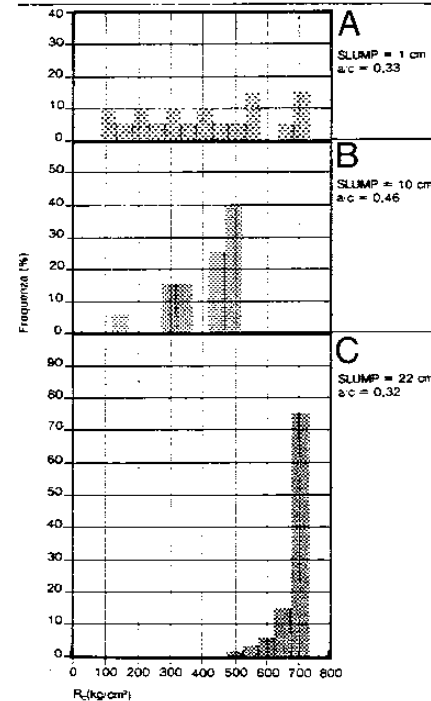


Fig. 6
Influenza della lavorabilità sulla distribuzione delle resistenze meccaniche (R_c) di calcestruzzi ordinari vibrati per tempi diversi (0-30 sec).

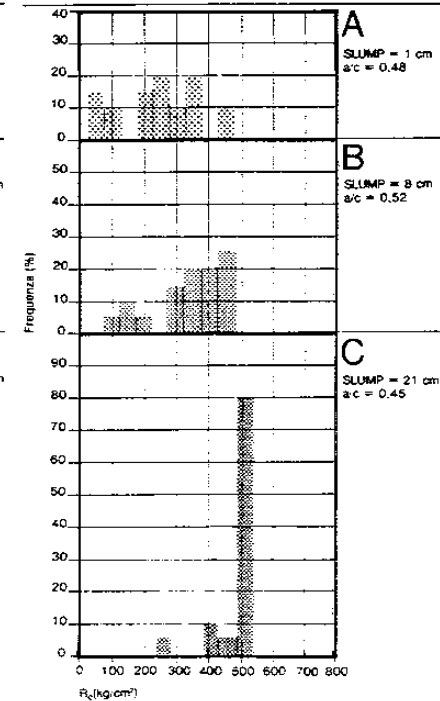


Fig. 7
Influenza della lavorabilità sulla distribuzione delle resistenze meccaniche (R_c) di calcestruzzi leggeri vibrati per tempi diversi (0-30 sec).

12

asciutto (slump = 1 cm) presenta una dispersione dei valori di resistenza meccanica (fig. 6 a) decisamente maggiore di quella rilevabile per il calcestruzzo fluido (fig. 6 c). Ciò dipende, ovviamente dal fatto che la compattazione del calcestruzzo fluido risulta egualmente efficace anche con sistemi di vibrazione poco efficienti o di minor durata.

E' degno di nota che nell'attuale normativa [6] questo tipo di dispersione dei risultati — quello cioè dipendente dalla compattazione del calcestruzzo fresco — non è tenuto in alcun conto per la valutazione degli scarti al fine di determinare la resistenza caratteristica. Infatti per la valutazione della R_{ck} si prendono in considerazione solo gli scarti derivanti dalle variazioni di composizione del calcestruzzo e non quelli dovuti alla diversa compattazione. In altre parole a parità di resistenza meccanica « nominale » — valutata, cioè, su provini ben compattati — calcestruzzi di diversa lavorabilità, e quindi di diversa resistenza meccanica « reale » dentro la struttura, risultano egualmente penalizzati nel passare dalla resistenza media a quella caratteristica, in quanto lo scarto quadratico medio non è in alcun modo correlato con le variazioni del calcestruzzo dentro la struttura, ma solo con quelle dei provini.

Adesione all'acciaio

La tabella 9 mostra i risultati delle prove di adesione a 7 e 28 giorni dei calcestruzzi alle barre di acciaio liscie o ad adesione migliorata. I risultati mostrano che l'aggiunta dell'additivo n. 2 (calcestruzzi n. 1 e 2 di Tab. 9) provoca un aumento del 200% nell'adesione alla barra liscia e di circa l'85% nell'adesione alla barra ad

adesione migliorata. Nel caso di calcestruzzi additivati l'adesione all'acciaio arriva a valori di circa 40 kg/cm² per barre liscie ed oltre i 250 kg/cm² per barre ad adesione migliorata. Occorre, inoltre, tener conto della diversa lavorabilità dei due calcestruzzi, e pertanto mentre il valore di adesione misurato con il calcestruzzo fluido (slump \approx 20 cm) è facilmente riproducibile anche nella struttura, l'adesione ottenuta con il calcestruzzo non additivato (slump = 10 cm) rappresenta il valore potenzialmente raggiungibile nella struttura solo nel caso in cui il calcestruzzo riempia accuratamente tutti gli spazi tra i ferri. Quest'aspetto del problema diviene particolarmente importante per le strutture fortemente armate nelle zone sismiche.

Il tipo di cemento (calcestruzzi n. 2 e 3) e soprattutto il dosaggio di cemento influenzano sensibilmente l'adesione all'acciaio: passando da 400 a 500 kg/m³ (calcestruzzi n. 3 e 4) l'adesione all'acciaio migliora da un minimo del 30% ad un massimo del 50%. L'impiego di un inerte leggero provoca una diminuzione di adesione all'acciaio, ma l'impiego congiunto di argilla espansa e dell'additivo riporta i valori dell'adesione all'acciaio a valori paragonabili a quelli ottenuti con inerti ordinari.

Tabella 9
Adesione dei calcestruzzi all'acciaio

Classe N.	Caratteristiche del calcestruzzo	Lavorabilità slump (cm)	Adesione (kg/cm ²)			
			7 giorni		28 giorni	
			Liscia	Ader. miglior.	Liscia	Ader. miglior.
1	400 kg/m ³ di cemento n. 1 senza additivo	10	12	150	13	152
2	400 kg/m ³ di cemento n. 1 con additivo n. 2	22	35	275	40	285
3	400 kg/m ³ di cemento n. 2 con additivo n. 2	21	36	207	38	255
4	500 kg/m ³ di cemento n. 2 con additivo n. 2	22	52	262	59	350
5	500 kg/m ³ di cemento n. 2 senza additivo calcestr. leggero (1800 kg/m ³)	10	4	66	6	92
6	500 kg/m ³ di cemento n. 2 con additivo n. 2 calcestr. leggero (1800 kg/m ³)	21	9	142	21	210

Modulo elastico

Nelle figure 8-11 sono diagrammati i moduli elastici, statici e dinamici, in funzione della radice quadrata della resistenza a compressione. Parte di questi dati sono già stati riportati nelle tabelle 2-7.

Dall'esame di questi dati si possono fare le seguenti considerazioni:

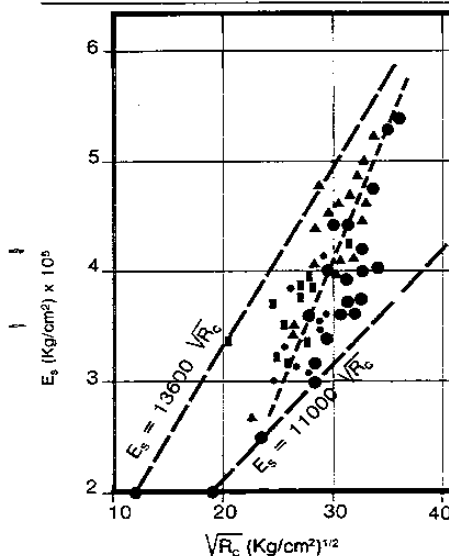
a) La grande dispersione dei punti sperimentali conferma, come già osservato dal Neville [7], che le correlazioni del tipo $E = a \cdot R$, oppure $E = a \cdot R + b$, dove a e b sono costanti, sono valide solo approssimativamente. Ciò sembra confermato dalla diversità delle equazioni proposte dai differenti organismi internazionali [7]. I punti sperimentali delle figure 8 e 9 sono compresi tra le rette $E = 13600 \cdot R$ ed $E = 11000 \cdot R$ per la correlazione tra modulo elastico statico secante e resistenza a compressione, e tra le rette $E = 22000 \cdot R$ ed $E = 16800 \cdot R$ per la correlazione tra modulo elastico dinamico e resistenza a compressione.

b) A parità di resistenza meccanica il modulo elastico dinamico risulta superiore al modulo elastico statico secante soprattutto alle brevi stagionature e ciò è in accordo con i dati della letteratura [7].

c) Nei limiti sperimentali entro i quali un'equazione del tipo $E = a \cdot R$ è valida per calcestruzzi stagionati a temperatura ambiente vale anche per i calcestruzzi stagionati dopo un trattamento a vapore (figure 8-11): quest'osservazione sembra di un certo interesse in relazione al fatto che nella normativa italiana [6] l'equazione $E_b = 18000 \cdot R_{ck}$ non è ritenuta valida per i calcestruzzi trattati a vapore.

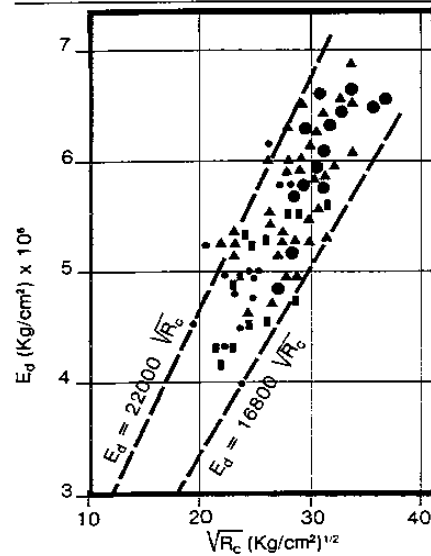
d) I dati sperimentali ottenuti nel presente lavoro (fig. 8) non sono adeguatamente descritti da un'equazione tipo $E = 18000 \cdot R$, come quella proposta dalla normativa

italiana, probabilmente perchè i valori di resistenza diagrammati si riferiscono al valore medio e non a quello caratteristico. D'altra parte, appare singolare, e comunque in disaccordo con tutti i dati della letteratura [7], il tentativo di correlare una grandezza caratteristica (R_{ck}) con una grandezza non caratteristica (E_c). Occorre, inoltre, precisare che la dispersione dei risultati diagrammati nelle figure 8 e 9, e riguardanti tutti i calcestruzzi con lo stesso inerte e stagionati nelle stesse condizioni di umidità relativa, risulta sicuramente inferiore di quella che si ottiene quando si confrontano calcestruzzi con inerti diversi e stagionati in condizioni diverse.



- temperatura ambiente senza additivo
- vapore senza additivo
- temperatura ambiente con additivo
- ▲ vapore con additivo

Fig. 8
Modulo elastico statico secante (E_s) e resistenza a compressione (R_c) per calcestruzzi ordinari.



- temperatura ambiente senza additivo
- vapore senza additivo
- temperatura ambiente con additivo
- ▲ vapore con additivo

Fig. 9
Modulo elastico dinamico (E_d) e resistenza a compressione (R_c) per calcestruzzi ordinari.

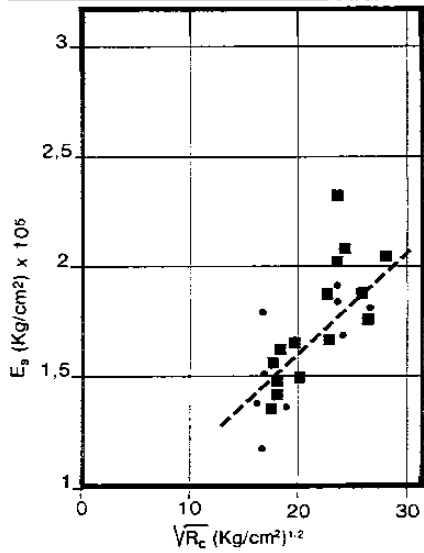
Infatti il tipo di inerte [7] e l'umidità del materiale [8] influenzano in maniera rispettivamente diversa ed opposta il modulo elastico e la resistenza meccanica. Pertanto, a prescindere dal fatto che si possono trovare equazioni più adeguate per descrivere una correlazione statistica tra modulo elastico e resistenza meccanica, occorre sottolineare che l'equazione $E'_d = 18000 \cdot R_{ck}$, come del resto anche le altre equazioni, è valida solo approssimativamente e che può essere utilizzata solo per calcolare l'ordine di grandezza del modulo elastico o della resistenza meccanica.

e) Per i calcestruzzi additivati il modulo elastico secante va da un minimo di 250.000 kg/cm² ad un massimo di circa 550.000 kg/cm² a seconda del dosaggio di

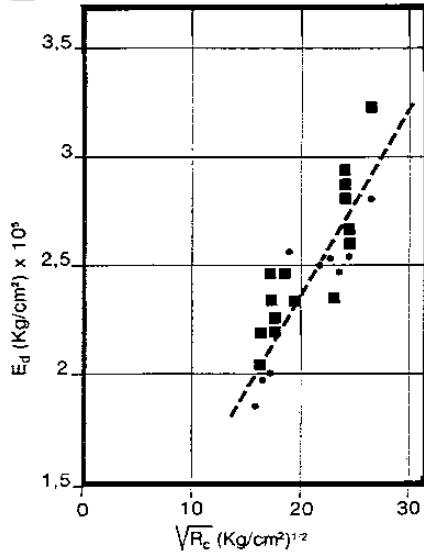
cemento e della durata della stagionatura. A parità di resistenza meccanica, il modulo elastico dei calcestruzzi additivati è mediamente eguale a quello del corrispondente calcestruzzi non contenenti l'additivo (fig. 8).

Il modulo elastico dinamico, paragonabile al modulo elastico statico tangente all'origine, risulta, per i calcestruzzi additivati, compreso tra 450.000 kg/cm² e 700.000 kg/cm² a seconda del dosaggio di cemento e della durata della stagionatura (fig. 9). Anche in questo caso, a parità di resistenza meccanica, il modulo elastico dinamico non dipende sostanzialmente dalla presenza degli additivi.

f) il modulo elastico dei calcestruzzi con inerti leggeri



● senza additivo
■ con additivo



● senza additivo
■ con additivo

Fig. 10
Modulo elastico statico secante (E_s) e resistenza a compressione (R_c) per calcestruzzi leggeri.

Fig. 11
Modulo elastico dinamico (E_d) e resistenza a compressione (R_c) per calcestruzzi leggeri.

risulta sostanzialmente inferiore di quello dei calcestruzzi ordinari: il modulo elastico secante statico va da circa 120.000 a circa 230.000 kg/cm² (fig. 10) e quello dinamico da circa 200.000 a circa 320.000 kg/cm² (fig. 11), a seconda del dosaggio, del tipo di cemento, e della stagionatura.

A parità di resistenza meccanica, il modulo elastico statico o dinamico non variano sostanzialmente con l'aggiunta di additivo.

Conclusioni

I risultati ottenuti nel presente lavoro indicano che impiegando un buon dosaggio di cemento, non inferiore a 400 kg/m³, inerti di buona qualità e ben proporzionati, additivi capaci di ridurre sensibilmente il rapporto acqua/cemento e di aumentare contemporaneamente la lavorabilità senza provocare segregazione, è possibile preparare calcestruzzi adatti per strutture antisismiche. Questi calcestruzzi risultano essere:

- ultraresistenti, e cioè con una resistenza che può superare facilmente 1000 kg/cm² a compressione e 60-70 kg/cm² a flessione (tab. 2-4);
- estremamente affidabili, e cioè tali che i risultati ottenuti sui provini in laboratorio possano essere facilmente riproducibili in qualunque parte della struttura, indipendentemente dalla difficoltà della messa in opera e dalla cura della compattazione (figure 2 e 6);
- fortemente adesivi all'acciaio, con valori di adesione che sono all'ordine di 49-60 kg/cm² per barre lisce e di 250-350 kg/cm² per quelle ad aderenza migliorata (tab. 8);
- nel caso in cui si sostituisca l'inerte naturale con argilla espansa è possibile ottenere risultati egualmente interessanti per le proprietà summenzionate: resistenza a compressione di 500-700 kg/cm² e resistenza a flessione di 30-40 kg/cm² (tab. 5-7); adesione all'acciaio di circa 20 kg/cm² per barre lisce e di circa 200 kg/cm² per barre ad aderenza migliorata (tab. 8); affidabilità paragonabile a quella dei calcestruzzi ordinari per l'elevata fluidità del conglomerato e per l'assenza di galleggiamento dei granuli di argilla espansa (fig. 7). Accanto a queste caratteristiche è possibile contare su una minor massa volumica, circa 700 kg/m³ in meno, e su un minor modulo elastico (200.000-300.000 kg/cm²). Queste ultime caratteristiche sembrano essere di un certo interesse per le strutture in zone sismiche perchè a parità di accelerazione generata dal terremoto, minor massa significa minore sollecitazione, e poiché con un minor modulo elastico del materiale si migliora la distribuzione degli sforzi e si diminuisce la frequenza fondamentale di risonanza della struttura.

Gli autori desiderano ringraziare vivamente il p.i. Vincenzo Maniscalco ed il geom. Ivano Alverà per la fattiva collaborazione nell'organizzazione delle prove sperimentali.

Bibliografia

- 1 ACI, *Manual of Concrete Practice*, Part I, (1973).
- 2 A.T. Goldbeck e J.E. Gray, *National Crushed Stone Association*, Bull. 11, pag. 31 (1953).
- 3 M. Collepardi, *Cement and Concrete Research*.
- 4 M. Collepardi e L. Massidda, *Hydraulic cement pastes: their structure and properties. Cement and Concrete Association*, pag. 256, Sheffield (1976).
- 5 R. Jones ed E.N. Gatfield, D.S.I.R. *Road Research Tech. Paper No. 34* (London H.M.S.O.) 1955.
- 6 *Norme tecniche per la esecuzione delle opere in cemento armato normale o precompresso e per le strutture metalliche*, Gazzetta Ufficiale n. 214 del 14-8-1976.
- 7 A.M. Neville, *Properties of Concrete*, Pitman Publishing, London (1975).
- 8 R.E. Davis e G.E. Troxell, *Proceedings ASTM*, 29, Part II, pag. 678 (1929).

Gli additivi utilizzati per le prove sono i superfuidificanti (o componenti per calcestruzzi reoplastici).

RHEOBUILD 561

Superfluidificante, riduttore d'acqua per confezionare calcestruzzi reoplastici a bassa perdita di lavorabilità. Esente da cloruri.

RHEOBUILD 877

Superfluidificante riduttore d'acqua per confezionare calcestruzzi reoplastici ad alta resistenza meccanica iniziale. Esente da cloruri.