

SEMINARIO AICAP-MAC: «MANUTENZIONE E RIPARAZIONE DEI PONTI: CRITERI PER LA DURABILITÀ»

Treviso, 30 Settembre - 2 Ottobre 1982

Alcuni aspetti della tecnologia del calcestruzzo riguardanti la degradazione e la riparazione dei ponti

PROF. MARIO COLLEPARDI (*)

1. PROPORZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO

1.1. Introduzione

Il proporzionamento del calcestruzzo, o mix-design, consiste nello stabilire le proporzioni dei diversi ingredienti del conglomerato sulla base di un compromesso tecnico-economico che tenga conto, da una parte, delle caratteristiche (resistenza meccanica, permeabilità, durabilità, creep, ritiro, ecc.) degli elementi strutturali, e dall'altra, delle condizioni operative esistenti in cantiere o in prefabbricazione [1].

Dalla resistenza caratteristica richiesta si fissa, in base al grado di controllo presumibilmente esistente, la resistenza media. Quindi, tenendo anche conto delle condizioni ambientali nelle quali si trova l'opera, oltre che della durabilità richiesta per il materiale, si stabilisce il rapporto acqua/cemento, scegliendo il valore più basso tra quelli deducibili in base alla resistenza meccanica o alla durabilità. Se è previsto che la temperatura dell'ambiente nel quale l'opera sarà in esercizio potrà scendere frequentemente al di sotto di 0°C è necessario prevedere l'inglobamento di un certo quantitativo di aria. Se, invece la temperatura durante l'esecuzione del lavoro dovesse risultare troppo bassa si dovrà prevedere l'impiego di un additivo accelerante, soprattutto se una determinata resistenza meccanica dovrà essere raggiunta alle brevi stagionature.

Stabilita la lavorabilità dell'impasto richiesto, sulla base delle condizioni operative in cantiere o in prefabbricazione, si fissa il volume di acqua di impasto tenendo anche conto del tipo di inerte disponibile.

Dal rapporto acqua/cemento, e dal contenuto di acqua di impasto, si calcola prima il contenuto di cemento, e quindi il rapporto inerte/cemento tenendo conto del diametro massimo dell'inerte grosso e della finezza della sabbia.

Non di rado il rapporto acqua/cemento stabilito per raggiungere una certa resistenza meccanica comporta un quantitativo di acqua di impasto che si rivela però insufficiente a raggiungere, con gli inerti disponibili, la lavorabilità richiesta dalle condizioni operative esistenti in prefabbricazione, e soprattutto in cantiere. In tal caso, per soddisfare le esigenze antitetiche del progettista e dell'impresa, si impiega un additivo fluidificante o superfluidificante, tenendo presente che a pari lavorabilità si può ridurre l'acqua di impasto di circa il 5% con il primo e di circa il 25% con il secondo. D'altra parte, l'impiego di un additivo superfluidificante, e quindi il possibile ottenimento di un calce-

struzzo fluido, può portare ad una diversa organizzazione di lavoro nel trasporto e nella messa in opera del calcestruzzo, sia in un cantiere che in un impianto di prefabbricazione.

Per poter definire con esattezza la composizione dei diversi ingredienti, secondo il processo di mix-design sopra illustrato, è necessario ovviamente avere a disposizione grafici o tabelle sperimentali che mostrino come varia una determinata grandezza in funzione della composizione. Per esempio, per stabilire il rapporto acqua/cemento in base alla resistenza meccanica è necessario conoscere come questa aumenta al diminuire del rapporto a/c. Esistono in proposito dei grafici e delle tabelle i cui dati sono mediati dai valori ottenuti con i diversi tipi di cemento e nel seguito sarà dato un esempio sull'uso di questi dati. Tuttavia, i risultati di un mix-design saranno tanto più accurati quanto più i grafici o le tabelle saranno stati sperimentalmente ricavati con il cemento e gli inerti che si prevede di impiegare realmente.

In ogni caso, è sempre consigliabile verificare, con un impasto sperimentale, se le caratteristiche del calcestruzzo progettato sono realmente ottenute o se è necessario apportare qualche correzione nella composizione dell'impasto.

In letteratura [2-8] sono segnalati diversi metodi di mix-design in relazione anche ai diversi tipi di calcestruzzo (ordinario, leggero, ad alta resistenza, con aria inglobata, ecc.). Nel seguito è presentato, con le necessarie modifiche ed adattamenti, il metodo suggerito dall'American Concrete Institute (ACI) per il calcestruzzo ordinario [2] che è forse quello più largamente adottato e raccomandato dalle diverse organizzazioni pubbliche o private operanti nel settore del calcestruzzo.

1.2. La lavorabilità

Occorre stabilire la lavorabilità dell'impasto in base al tipo di costruzione ed al metodo di compattazione disponibile.

Per strutture molto armate, e laddove non si possa garantire un'accurata vibrazione del calcestruzzo in ogni zona della struttura, è consigliabile aumentare la lavorabilità fino ad arrivare ad un calcestruzzo con uno slump di 20-24 cm. In ogni caso il criterio da adottare per la scelta della lavorabilità è quello di aumentare lo slump quanto più difficile si presenta il lavoro (sezioni sottili, alta percentuale di ferri di armatura) e quanto meno qualificata è la manodopera. Val la pena di precisare che, a causa della perdita di lavorabilità durante il trasporto, lo slump deve intendersi misurato al momento della messa in opera e non subito dopo il mescolamento dell'impasto.

(*) Professore di Tecnologia dei Materiali e Chimica Applicata, Dipartimento di Scienza dei Materiali, Facoltà di Ingegneria, Ancona.

La precisazione della lavorabilità dell'impasto, indipendentemente dall'adozione del procedimento del mix-design, è di fondamentale importanza per la caratterizzazione del calcestruzzo. La mancanza di precisazione della lavorabilità da parte del progettista, può portare a notevoli inconvenienti e ad imbarazzanti contestazioni. Si pensi, per esempio, di aver ordinato un calcestruzzo con una R_{hk} di 300 kg/cm² senza aver precisato la lavorabilità. Se il calcestruzzo al momento della consegna si presenta meno lavorabile di quanto — a giudizio dell'impresa — avrebbe dovuto essere per la difficoltà del getto, si sarà costretti ad aggiunte d'acqua, con conseguenti penalizzazioni nella resistenza caratteristica del calcestruzzo. E' obbiettivamente difficile in queste condizioni contestare al confezionatore la minor resistenza meccanica causata da una aggiunta di acqua effettuata in cantiere per ottenere la lavorabilità precisata.

E' bene sapere che una maggiore lavorabilità — a parità di resistenza meccanica — se significa sempre un maggior costo del calcestruzzo in betoniera, significa anche un minor costo del calcestruzzo messo in opera per la proporzionale riduzione dei tempi di getto e di costipazione.

1.3. Il diametro massimo dell'inerte

Occorre fissare per l'inerte grosso il diametro massimo più alto possibile, nei limiti dei dati riportati in Tabella 1 e della disponibilità degli aggregati.

TABELLA 1
DIAMETRO MASSIMO DEI VARI TIPI DI COSTRUZIONE [1]

Sezione minima della struttura (cm)	Diametro massimo dell'inerte (mm)			
	Muri, travi e pilastri armati	Muri non armati	Solette	
			molto armate	poco armate o non armate
5,5-12,5	12,5-19	19	19-25	19-37
15-27,5	19-37,5	37,5	37,5	37,5-75
30-72,5	25-75	75	37,5-75	75
> 75	37,5-75	150	37,5-75	75-150

1.4. L'acqua di impasto

Occorre stabilire, in base alla lavorabilità ed al diametro massimo prescelti, il contenuto di acqua di impasto. La Tabella 2 suggerisce il volume di acqua di impasto approssimativamente necessario per calcestruzzi normali e per quelli contenenti aria inglobata. Il valore letto in Tabella 2 dovrà essere corretto per l'umidità presente negli inerti e pertanto occorre conoscere l'umidità e l'assorbimento d'acqua degli inerti saturi a superficie asciutta. I valori dell'acqua di impasto riportati in Tabella 2 possono essere assunti come valori medi che debbono essere aumentati o diminuiti di 10 litri a seconda che si tratti di inerti spigolosi o tondeggianti.

TABELLA 2

CONTENUTI DI ACQUA APPROSSIMATIVAMENTE RICHIESTI PER OTTENERE UNA CERTA LAVORABILITA', TENENDO PRESENTE IL DIAMETRO MASSIMO DELL'INERTE

Lavorabilità				Acqua di impasto in l/m ³ in dipendenza del diametro massimo							
Descrizione del calcestruzzo	Slump (cm)	VeBe (sec)	Fattore di compatt.	10 mm	15 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	75 mm	150 mm
				Calcestruzzi senza additivo aerante							
Asciuttissimo	—	32-18	—	170	160	150	140	130	125	115	100
Molto rigido	—	18-10	0,70	180	170	160	150	140	135	125	110
Rigido	0-2,5	10-5	0,75	190	180	170	160	150	140	135	120
Semiplastico	2,5-5	5-3	0,85	200	195	190	180	165	155	145	130
Plastico	7,5-10	3-0	0,91	220	215	210	200	180	175	160	140
Fluidico	15-17,5	—	0,95	240	230	220	210	200	185	175	155
Superfluidico	20-24	—	0,97	255	245	230	220	210	195	185	165
Aria intrappolata (% in volume)				3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Calcestruzzi con additivo aerante											
Asciuttissimo	—	32-18	—	160	150	140	130	120	115	110	95
Molto rigido	—	18-10	0,70	170	160	150	140	130	125	115	100
Rigido	0-2,5	10-5	0,74	180	170	160	150	140	130	125	110
Semiplastico	2,5-5	5-3	0,85	190	185	180	160	150	140	135	120
Plastico	7,5-10	3-0	0,91	210	200	200	180	160	160	150	130
Fluidico	15-17,5	—	0,95	225	215	210	190	180	170	160	140
Superfluidico	20-24	—	0,97	240	230	220	205	190	180	170	150
Aria inglobata (% in volume)				8	7	6	5	4,5	4	3,5	3

I valori di acqua di impasto riportati in Tabella 3 debbono essere diminuiti mediamente del 5% se si impiega un additivo fluidificante, e del 25% se si impiega un additivo superfluidificante. Le reali diminuzioni di-

TABELLA 3

STIMA APPROSSIMATIVA DELLO SCARTO QUADRATICO MEDIO δ IN DIVERSE CONDIZIONI DI LAVORO

Grado di controllo	Descrizione	δ (kg/cm ²)
Eccellente	In laboratorio.	20-30
Buono	Proporzionamento per pesata. Inerte in curva granulometrica controllata mediante impiego di più inerti ben frazionati. Controllo dell'umidità degli inerti. Impiego di additivi. Costante supervisione.	30-40
Discreto	Proporzionamento per pesata. Impiego di soli due inerti. Aggiunta d'acqua a giudizio dell'operatore. Controlli occasionali. Impiego di additivi.	40-60
Mediocre	Proporzionamento a volume. Due soli inerti. Aggiunta d'acqua a giudizio dell'operatore. Controlli occasionali.	60-80
Scadente	Proporzionamento a volume. Un solo inerte. Nessun controllo.	70-100

pendono ovviamente dal particolare tipo di additivo e dal suo dosaggio, e queste possono essere facilmente determinate confezionando impasti con e senza additivo di pari lavorabilità e misurando l'acqua di impasto.

1.5. Il rapporto acqua/cemento

A) Occorre, in base alla resistenza meccanica, fissare il rapporto a/c. Il dosaggio di cemento potrà poi essere calcolato dal contenuto di acqua e dal rapporto acqua/cemento. In generale, il criterio per fissare il rapporto a/c è basato sulla resistenza meccanica. La fig. 1 fornisce i valori indicativi del rapporto acqua/cemento per raggiungere alle diverse stagionature determinate resistenze meccaniche a compressione. I valori di resistenza meccanica riportati in fig. 1 sono i valori medi ottenuti utilizzando un numero considerevole di cementi e di inerti disponibili nel nostro Paese.

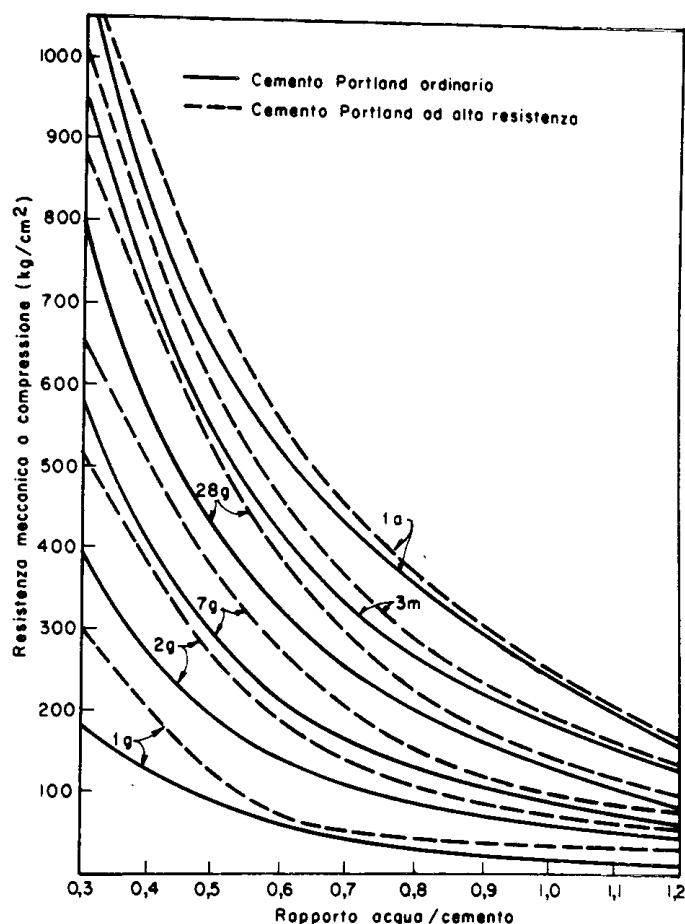
La fig. 1 si riferisce alla resistenza meccanica R_{bm} ; il mix-design deve, invece, tener conto della resistenza meccanica caratteristica R_{bk} . Questa è definita con la equazione:

$$R_{bk} = R_{bm} - K \delta$$

dove δ è lo scarto quadratico medio, K è il fattore di probabilità. Secondo la normativa europea la resistenza meccanica caratteristica viene ad essere quel valore che è superato dal 95% dei provini. Essa sarà ovviamente tanto più vicina alla resistenza media quanto più piccoli sono i valori di K e di δ .

Per costruzioni con meno di 1500 m³ di calcestruzzo il valore del prodotto $K \delta$ è assunto uguale a 35 kg/cm² [9].

Per costruzioni con meno di 1500 m³ di calcestruzzo il valore di K può essere assunto uguale a 1,4 [9]. In questo caso il valore di δ può essere approssimativamente previsto al livello qualitativo del mescolamento e del controllo che sarà effettuato sul cantiere o sull'impianto di prefabbricazione. La Tabella 3 fornisce alcuni



1 - Influenza del rapporto a/c sulla resistenza meccanica media.

valori indicativi di δ in relazione alla qualità del lavoro eseguito per calcestruzzi con una resistenza meccanica a compressione media di 350 kg/cm².

Il controllo per la misura sperimentale di δ è riferito ad una miscela omogenea e va eseguito con una frequenza non minore di un controllo ogni 1500 m³ di calcestruzzo.

Per ogni giorno di getto di miscela omogenea va effettuato almeno un prelievo e complessivamente almeno 15 prelievi sui 1500 m³.

Sia per le costruzioni con più di 1500 m³ che per quelle con meno di 1500 m³ rimane l'obbligo che il valore della resistenza a compressione di qualsiasi prelievo sia superiore alla resistenza caratteristica diminuita di 35 kg/cm².

Nel fissare il rapporto a/c, oltre alla resistenza caratteristica, che riguarda la struttura in esercizio, occorre tenere conto della resistenza meccanica che, per ragioni esecutive, deve essere raggiunta al momento della scasseratura o del taglio dei trefoli. Anche questo valore di a/c può essere calcolato mediante la fig. 1. Il valore di a/c prescelto sarà ovviamente il minore tra quello derivante dalla resistenza caratteristica e quello derivante da ragioni esecutive.

B) Nel fissare il rapporto a/c, oltre alla resistenza meccanica, occorre tener conto della durabilità del calcestruzzo in relazione alle condizioni aggressive dell'ambiente. La Tabella 4 suggerisce i valori del rapporto a/c approssimativamente sufficienti a garantire bassa permeabilità della pasta cementizia e quindi una buona durabilità del calcestruzzo. Le aggressioni prese

MASSIMO RAPPORTO ACQUA/CEMENTO CONSENTITO DAL GRADO DI AGGRESSIONE DELL'AMBIENTE E DAL TIPO DI STRUTTURA

Tipo di struttura	Condizioni ambientali (1)					
	Ampie escursioni termiche o frequenti cicli di gelo e disgelo (solo calcestruzzo con additivi aeranti)			Piccole escursioni termiche. Raramente sotto 0°C, scarse le piogge e i periodi di clima arido		
	All'aria	In vicinanza del bagnasciuga o in prossimità dell'acqua		All'aria	In vicinanza del bagnasciuga o in prossimità dell'acqua	
		acqua potabile	acqua del mare o ambienti solfatici (2)		acqua potabile	acqua del mare o ambienti solfatici (2)
1. Sezioni sottili, parapetti, davanzali, strutture ornamentali ed architettoniche, tubazioni, e tutte le strutture armate con un copriferro inferiore a 25 mm	0,50	0,45	0,40 (3)	0,55	0,50	0,40 (3)
2. Sezioni di spessore intermedio, travi, pilastri, banchine, muri di riporto	0,55	0,50	0,45 (3)	(4)	0,55	0,45 (3)
3. Strutture di notevole spessore	0,60	0,50	0,45 (3)	(4)	0,55	0,45 (3)
4. Getti sott'acqua	—	0,45	0,45	—	0,45	0,45
5. Lastre poggiate su terreno	0,55	—	—	(4)	—	—
6. Strutture protette, interrattate o per interni	(4)	—	—	(4)	—	—
7. Strutture che saranno protette ma che possono rimanere esposte ai cicli di gelo e disgelo per alcuni anni prima di essere protette	0,55	—	—	(4)	—	—

(1) Si dovrebbero usare calcestruzzi contenenti additivi aeranti in tutte le condizioni ambientali sotto 0°C.

(2) Acque o terreni con un tenore di solfati superiore allo 0,2%.

(3) Con cementi resistenti ai solfati si può aumentare il rapporto a/c di 0,05.

(4) Il rapporto a/c dovrebbe essere scelto in base alla resistenza meccanica.

in considerazione nella Tabella 4 sono dovute al solfato ed ai cicli di gelo-disgelo.

Nella Tabella 4 i pericoli dell'aggressione, e quindi i relativi rapporti a/c suggeriti, sono stati valutati tenendo conto del tipo di struttura, e di possibili alternative all'impiego del cemento Portland normale.

C) Nella scelta definitiva dal rapporto a/c si dovrà prendere in esame il valore più piccolo tra quelli deducibili dalla resistenza meccanica o dalla durabilità.

Si può pensare di fissare il rapporto a/c anche in base ad altre proprietà del calcestruzzo, quali per esempio la permeabilità, il ritiro, il fluage, la resistenza meccanica a flessione, ecc.

1.6. L'inerte grosso

Occorre calcolare la quantità di aggregato grosso per volume unitario di calcestruzzo. La Tabella 5 mostra i valori di b/b_0 dell'inerte grosso in relazione al suo diametro massimo ed al modulo di finezza della sabbia.

Il valore di b/b_0 indica il rapporto tra il volume solido di inerte grosso riferito al volume unitario di calcestruzzo (b) ed il volume solido di inerte grosso riferito al volume unitario in mucchio di inerte compattato (b_0). Il valore di b_0 è calcolabile dal peso specifico in mucchio (p'_m) e dal peso specifico apparente (p'_a) dello stesso inerte saturo e a superficie asciutta.

$$b_0 = \frac{p'_m}{p'_a}$$

TABELLA 5

VALORI SUGGERITI DI b/b_0 PER L'INERTE GROSSO

Diametro massimo (mm)	Valori di b/b_0 per i seguenti moduli di finezza della sabbia				
	2,40	2,60	2,80	2,90	3,00
9,5	0,45	0,44	0,42	0,41	0,40
12,5	0,55	0,53	0,51	0,50	0,49
19	0,65	0,63	0,61	0,60	0,59
25	0,70	0,68	0,66	0,65	0,64
37,5	0,76	0,74	0,72	0,71	0,70
50	0,79	0,77	0,75	0,74	0,73
75	0,84	0,82	0,80	0,79	0,78
150	0,90	0,88	0,86	0,85	0,84

I valori di b/b_0 sono stati dedotti sperimentalmente per produrre calcestruzzi mediamente lavorabili. Per calcestruzzi meno lavorabili i valori di b/b_0 possono essere aumentati del 10%.

Pertanto misurando sperimentalmente p'_m e p'_a e calcolando b_0 , si può determinare, mediante la Tabella 5, il volume solido (b) occupato dall'inerte grosso in 1 m³ di calcestruzzo. Si può osservare che il rapporto b/b_0 , aumenta con il diametro massimo dell'inerte e con la finezza della sabbia. Ciò significa che per un certo valore di b_0 il volume di inerte grosso aumenta all'aumentare del suo diametro massimo e della finezza della sabbia.

Per determinare b occorre conoscere anche il modulo di finezza della sabbia e quindi la sua distribuzione granulometrica.

1.7. La sabbia

A) Calcolare il volume e quindi, attraverso il peso specifico (2,6-2,7 kg/l), la quantità di sabbia. Il calcolo del volume di sabbia avviene per differenza tra il volume di 1 m³ di calcestruzzo e quello di acqua, di cemento, di inerte grosso e di aria (Tabella 2) presenti in 1 m³ di conglomerato. Tutti questi dati sono già espressi in volume, ad eccezione del cemento, e pertanto dal peso specifico di quest'ultimo (circa 3,15 kg/l) si risale al volume di cemento per m³ di calcestruzzo.

B) D'altra parte, noti i volumi d'aria, di acqua e di cemento, si può calcolare per differenza il volume di inerte, inclusa la sabbia, necessario a completare 1 m³ di calcestruzzo. Si può quindi procedere a stabilire il rapporto inerte grosso/sabbia, o più in generale la composizione degli inerti, con un metodo grafico o numerico, dopo aver scelto una delle curve granulometriche ottimali (Fuller, Bolomey, ecc.).

2. DURABILITA' DEL CALCESTRUZZO

2.1. Degradazione delle strutture in calcestruzzo

La degradazione delle strutture in calcestruzzo è un problema di enorme importanza dal punto di vista sociale ed economico. Infatti, oltre agli aspetti drammatici connessi con la sicurezza della vita umana nei casi eccezionali in cui la degradazione è così avanzata da provocare il collasso delle strutture, esiste, anche nei casi di minor gravità, il problema del danno economico derivante dall'interruzione del servizio e dalla riparazione dell'opera [10].

Negli Stati Uniti d'America la Federal Highway Administration ha riscontrato che esistono oltre 100.000 ponti « strutturalmente carenti o funzionalmente obsoleti » per la riparazione dei quali l'American Association of State Highways & Transportation Officials ha stimato un costo di circa 25 miliardi di dollari [11].

La velocità di degradazione delle strutture ha raggiunto attualmente un ritmo impressionante. Dal 1977, dopo il crollo disastroso di alcune dighe, il Corps of Engineers negli Stati Uniti è stato incaricato di ispezionare 9.000 dighe sospettate di essere potenzialmente pericolose. Attualmente, sulle prime 3.948 dighe ispezionate, 988 sono state trovate insicure e per 58 di queste è stata dichiarata l'emergenza richiedendosi una riparazione immediata [12]. Nel caso dei ponti la velocità di degradazione è particolarmente elevata, sia perché esistono delle condizioni aggressive mediamente più severe che in altre opere civili, sia perché, a parità di degradazione del materiale, la funzionalità e la sicurezza dei ponti può essere compromessa più rapidamente e più seriamente che in altre strutture. Anche tenendo conto di queste condizioni, può essere sorprendente sapere che negli Stati Uniti la velocità di degradazione dei ponti è del 50% superiore a quella di costruzione [11]. Ciò significa, in altre parole, che mentre si stanno costruendo due nuovi ponti, tre di quelli vecchi si stanno degradando.

In mancanza di dati statistici estesi a tutto il mondo è difficile stabilire se la velocità di degradazione

delle strutture in calcestruzzo è oggi superiore che in passato. E' certo, tuttavia, che esistono almeno due condizioni in favore di questa ipotesi. La prima riguarda una maggiore concentrazione di agenti aggressivi di origine industriale che, sommandosi a quelli naturali (si pensi per esempio all'acqua del mare), determinano una più sfavorevole situazione nei confronti di tutti i materiali da costruzione, calcestruzzo compreso.

La seconda condizione concerne il peggioramento nella qualità del lavoro umano in relazione anche alle tecniche costruttive divenute nel frattempo più sofisticate. Secondo la Weiskopf & Pickworth, una delle più grosse società americane nel campo dell'ingegneria civile, gli architetti ed i progettisti dovrebbero ormai rendersi conto che la qualità della manodopera sui cantieri non è più buona come una volta e dovrebbero conseguentemente regolarsi per semplificare il lavoro. Venti anni fa sarebbe stato sufficiente inviare un solo ispettore sui cantieri una volta alla settimana; oggi occorrerebbero due o tre uomini per controllare ogni giorno il cantiere, ma difficilmente il committente accetterebbe il maggior aggravio di costi che ne deriva [12].

2.2. Durabilità del materiale e della struttura

La durabilità del calcestruzzo è la capacità del materiale di durare nel tempo resistendo alle azioni aggressive dell'ambiente. In linea di massima, per un calcestruzzo di buona qualità ed in assenza di aggressioni, le proprietà del materiale dovrebbero migliorare, sia pure lentamente, a tempi più lunghi, a causa del continuo processo di reazione tra l'acqua ed il cemento.

La durabilità di una struttura in calcestruzzo, o in calcestruzzo armato, o in calcestruzzo precompresso, è la capacità di durare nel tempo garantendo il servizio per il quale la struttura stessa è stata progettata. La durabilità del materiale calcestruzzo è condizione necessaria ma non sufficiente per garantire la durabilità della struttura. Esistono, infatti, cause di degradazione della struttura non imputabili ad una inadeguata durabilità del materiale. La Tabella 6 riassume l'incidenza delle diverse cause (dovute al materiale, alla sua messa in opera, agli errori nella progettazione, ai sovraccarichi, ecc.) sulla degradazione delle strutture in calcestruzzo. I dati della Tabella 6, ricavati da Olazabel e Traversa [13] attraverso un'indagine effettuata su 139 strutture degradate, mettono in evidenza l'enorme importanza della qualità del calcestruzzo sulla durabilità delle strutture. Il 42% delle degradazioni rilevate sono infatti da attribuire ad un calcestruzzo non adeguatamente confezionato. Il 22% delle strutture si sono degradate per deficienze nella messa in opera del materiale.

Sommando le due cause, si può dire che circa i due terzi delle strutture degradate debbono essere ascritti ad una non corretta scelta — per la sua confezione e la sua messa in opera — del calcestruzzo impiegato.

2.3. Cause di degradazione

Le cause di degradazione del calcestruzzo possono essere divise in due categorie: quelle intrinseche del materiale, dovute cioè alla sua qualità, e quelle esterne dovute alle condizioni ambientali. E' ovvio che, perché si verifichi degradazione del calcestruzzo, è indispensabile che siano presenti entrambe le cause. In altre

CAUSE DI DEGRADAZIONE IN STRUTTURE DI CALCESTRUZZO [13]

Cause	Descrizione	Numero delle strutture	Totale	Percentuale su 139 strutture
Tecnologiche (composizione del calcestruzzo)	a) Calcestruzzo di qualità scadente.	31	58	42
	b) Attacco chimico del calcestruzzo.	12		
	c) Corrosione dei ferri dovuta a inadeguata protezione con calcestruzzo di qualità scadente.	9		
	d) Materiali (cemento, inerte, ecc.) non idonei.	6		
Costruttive (messa in opera del calcestruzzo)	a) Scarso controllo della messa in opera.	19	31	22
	b) Assenza del controllo della messa in opera o ignoranza delle tecniche esecutive.	12		
Strutturali	a) Calcolo strutturale inadeguato.	11	16	12
	b) Calcolo insufficiente per un'adeguata prestazione strutturale.	5		
Sovraccarichi	Strutture progettate per altri usi e sovraccaricate.	11	11	8
Fondazioni	Fondazioni inadeguate.	10	10	7
Accidentali	Incendio.	6	6	4
Collasso	a) Risultante da almeno due delle suddette cause.	5	7	
	b) Rottura delle strutture di collegamento.	2		

parole, anche un calcestruzzo di qualità scadente non si degrada se non esistono le condizioni aggressive dell'ambiente e, d'altra parte, un ambiente aggressivo non provoca la degradazione di un calcestruzzo adeguatamente durevole.

Mentre non si possono modificare — salvo casi eccezionali — le condizioni dell'ambiente, è sempre possibile confezionare un calcestruzzo di durabilità sufficientemente elevata da poter resistere alle aggressioni ambientali. Il problema di costruire con un calcestruzzo durevole si può risolvere, quindi, valutando, sia pure approssimativamente, le condizioni aggressive dell'ambiente e scegliendo un « livello » di adeguata durabilità per il calcestruzzo. La soluzione del problema consiste quindi in una diagnosi delle condizioni ambientali ed in una prevenzione consistente nel confezionare, gettare e stagionare adeguatamente il calcestruzzo. Se la diagnosi o la prevenzione sono errate, diviene inevitabile il ricorso ad un più costoso rimedio terapeutico, consistente nel risanamento della struttura o nell'applicazione di un rivestimento per proteggere il sottostante calcestruzzo inadeguatamente durevole.

Naturalmente la scelta di un adeguato « livello » di durabilità deve essere commisurata con il tipo di struttura. Infatti, a parità di condizioni aggressive nell'ambiente e di durevolezza nel materiale, la funzionalità della struttura può essere più o meno compromessa a seconda della sua dimensione, dello spessore di copriferro e dell'uso al quale la struttura è destinata. Così per esempio, un calcestruzzo degradato solo in superficie può presentare conseguenze negative sulla funzionalità di una lastra per pavimentazione, e nulle o

trascurabili in un pannello verticale di identiche dimensioni. D'altra parte, l'asportazione di 2-3 cm di calcestruzzo ha conseguenze trascurabili in una struttura massiccia con qualche metro di sezione e può procurare disastri in una struttura sottile con un copriferro di 2-3 cm.

TABELLA 7

CAUSE DI DEGRADAZIONE DEL CALCESTRUZZO

Cause intrinseche del materiale	Cause esterne dovute all'ambiente
<ul style="list-style-type: none"> — Composizione del calcestruzzo (rapporto a/c e rapporto inerte/cemento; qualità delle materie prime: cemento, inerti, acqua e additivi). — Lavorabilità del calcestruzzo al momento del getto. — Stagionatura del calcestruzzo dopo la sformatura. 	<ul style="list-style-type: none"> — Cause chimiche: <ul style="list-style-type: none"> — solfati, — solfuri, — anidride carbonica aggressiva, — acidi inorganici (per pH inferiori a 5 si preveda un rivestimento protettivo del cls.), — acidi organici, — sostanze organiche, — cloruri (sui ferri di armatura), — altri (sali di ammonio, magnesio ecc.). — Cause fisiche: <ul style="list-style-type: none"> — gelo-disgelo, — essiccazione (ritiro), — alte temperature. — Cause meccaniche: <ul style="list-style-type: none"> — abrasione, — erosione, — cavitazione.

Ciascuna delle due cause sopra menzionate, dovute al materiale o all'ambiente, può essere a sua volta suddivisa in altre cause, come è schematicamente mostrato in Tabella 7. Nei paragrafi che seguono saranno sinteticamente discusse le cause di degradazione dovute al materiale.

2.4. Cause di degradazione intrinseche del materiale

La durabilità del calcestruzzo dipende in gran parte dalla permeabilità del materiale. Se esso è impermeabile all'acqua, gli agenti aggressivi disciolti nell'acqua non possono penetrare nel materiale e quindi di fatto il calcestruzzo è durevole. Gli agenti aggressivi « secchi », solidi o gassosi, non penetrano nel calcestruzzo e quindi non ne compromettono la durabilità. La permeabilità, e quindi la durevolezza del calcestruzzo dipendono dalla presenza di cavità nel conglomerato. Quando queste cavità sono, per il gran numero e la notevole dimensione, collegate le une alle altre si può stabilire una porosità « continua » all'interno del materiale che rende permeabile e quindi degradabile il calcestruzzo in un ambiente aggressivo. Il problema di rendere un calcestruzzo impermeabile, e quindi durevole, consiste quindi nel realizzare una porosità « discontinua » che non consenta agli agenti aggressivi di permeare il materiale.

Nel calcestruzzo esistono sostanzialmente due tipi di cavità che contribuiscono alla permeabilità del materiale: i cosiddetti « pori capillari » (diametro variabile tra 0,01 e 10 μm) situati nella pasta di cemento che avvolge gli inerti, e le macrocavità di dimensione maggiore (0,1-10 mm), dovute ad una imperfetta compattazione del calcestruzzo fresco, situate tra la pasta di cemento e gli inerti.

2.5. Il rapporto acqua/cemento e la durabilità del calcestruzzo

Si supponga, per il momento, che il calcestruzzo fresco sia stato ben costipato, cosicché le uniche cavità presenti siano costituite dai « pori capillari » presenti nella pasta di cemento. Si è potuto dimostrare [14] che il volume di questi pori dipende sostanzialmente dal rapporto acqua/cemento (a/c) dell'impasto e dalla frazione (α) di cemento che ha reagito con l'acqua. Minore è il rapporto acqua/cemento, minore è la distanza tra i granuli di cemento e più densa, cioè meno

porosa, è la microstruttura derivante dall'intreccio di cristalli fibrosi prodotti per idratazione del cemento. D'altra parte, maggiore è la frazione di cemento idratato, maggiore è il numero e la lunghezza dei cristalli fibrosi e quindi minore è la porosità capillare. L'equazione (1) mostra come varia il volume (V_p) dei pori capillari (espresso in litri per 100 kg di cemento) in funzione del rapporto a/c e di α , detto anche grado di idratazione.

$$V_p = 100 \frac{a}{c} - \alpha 36,15 \quad (1)$$

Minore è il volume dei pori capillari, maggiore è la probabilità che essi siano « isolati » e quindi tali da garantire l'impermeabilità e la durabilità del calcestruzzo. La Tabella 8 riporta i rapporti acqua/cemento ed i tempi di stagionatura necessari a raggiungere queste condizioni [15]. Come si può dedurre dall'equazione (1) per ridurre la porosità capillare si può ridurre il rapporto a/c dell'impasto e far aumentare il grado di idratazione del cemento (α), cioè prolungare la stagionatura del calcestruzzo. Maggiore è il rapporto a/c, più lungo deve essere il tempo di stagionatura perché si stabilisca un valore di α che garantisca l'isolamento dei pori capillari e quindi l'impermeabilità. Così, per esempio, se il rapporto a/c è di 0,60 occorrono 6 mesi di stagionatura, cioè di conservazione del calcestruzzo in ambiente umido, per raggiungere l'impermeabilità.

Val la pena di precisare che l'influenza del rapporto a/c e del grado di idratazione sulla porosità capillare

TABELLA 8

TEMPO RICHIESTO PER L'ISOLAMENTO DEI PORI CAPILLARI E QUINDI PER OTTENERE L'IMPERMEABILITÀ DEL CALCESTRUZZO [15]

Rapporto a/c	Tempo
0,40	3 giorni
0,45	7 giorni
0,50	2 settimane
0,60	6 mesi
0,70	1 anno
0,70	impossibile

TABELLA 9

COMPOSIZIONE DI CALCESTRUZZI CON LO STESSO RAPPORTO A/C E CON DIVERSI DOSAGGI DI CEMENTO AVENTI TUTTI LA STESSA IMPERMEABILITÀ E DURABILITÀ

Diametro massimo dell'inerte (mm)	25	37	50	75
Acqua di impasto (l/m ³)	170	160	150	140
Dosaggio di cemento Portland 325 (kg/m ³)	400	380	360	330
Peso di inerte secco (kg/m ³)	1825	1865	1925	1980
Aria (l/m ³)	15	10	5	3
Additivo reoplastico Rheobuild (l/m ³)	6	5,70	5,40	5
Lavorabilità: slump (cm)	22	22	22	22
Rapporto acqua/cemento	0,42	0,42	0,42	0,42
Rapporto inerte/cemento	4,60	4,90	5,30	6,00
Resistenza meccanica a 28 gg. (kg/cm ²)	475	470	480	465
Coefficiente di permeabilità a 28 gg. (cm/sec)	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-12}$
Durabilità: espansione in ambiente solfatico (%) a 1 anno	0,01	0,01	0,01	0,01
Ritiro ($\mu\text{m}/\text{m}$) a 6 mesi	500	440	380	320
Calore di idratazione (Kcal/m ³ di cls.) sviluppato a 1 settimana	$32 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$28 \cdot 10^3$	$26 \cdot 10^3$

secondo l'equazione (1) vale per qualsiasi dosaggio di cemento.

La Tabella 9 riporta la composizione di alcuni calcestruzzi che pur con diversi dosaggi di cemento presentano esattamente le stesse caratteristiche di resistenza meccanica, di impermeabilità e di durabilità, ma con ritiri e valori di idratazione crescenti all'aumentare del contenuto di cemento.

3. ESEMPI DI APPLICAZIONE DELLE MALTE A RITIRO COMPENSATO PER IL RIPRISTINO DI PONTI DEGRADATI

3.1. Introduzione

Il ritiro dell'impasto fresco di cemento con cui si intende ripristinare strutturalmente il calcestruzzo di una costruzione degradata è una delle cause più frequenti di insuccesso, che consiste di solito nel distacco tra i due materiali o nella fessurazione del materiale ripristinante.

Per ovviare agli inconvenienti causati dal ritiro si può provocare nel conglomerato impiegato per il ripristino una espansione che, se opportunamente contrastata, provoca uno stato di compressione nel conglomerato stesso capace di annullare o di ridurre gli effetti del successivo ritiro.

Nel seguito sono discusse alcune tipiche proprietà delle malte a ritiro compensato impiegate per il ripristino delle costruzioni ammalorate.

Le malte a ritiro compensato (chiamate anche malte espansive o anti-ritiro) sono dei prodotti premiscelati pronti all'uso — contenenti cementi, inerti, agente espansivo ed additivi vari — che richiedono solamente l'aggiunta dell'acqua al momento del loro impiego. In caso di forti spessori del getto di ripristino sono solitamente impiegati inerti più grossi per la confezione di calcestruzzi a ritiro compensato.

3.2. Modalità dell'impasto

L'impasto è stato ottenuto mescolando il prodotto pronto all'uso con acqua (rapporto acqua/solido = 0,16) per 5 minuti in una comune betoniera a 20°C.

3.3. Caratteristiche della malta fresca

L'impasto fresco si presenta estremamente fluido (spandimento 140% con 5 colpi alla tavola a scosse secondo il test ASTM C ÷ 230) e privo di acqua di bleeding (UNI 7122-72).

La fluidità consente una facile messa in opera del materiale anche con tecniche particolari (a spruzzo, per iniezione ecc.), mentre l'assenza del bleeding impedisce che l'acqua essudata si raccolga tra l'impasto fresco ed il calcestruzzo da ripristinare.

3.4. Caratteristiche della malta indurita

a) Adesione al calcestruzzo vecchio: circa 35 kg/cm² a 28 giorni.

b) Resistenza meccanica a compressione: circa 300 kg/cm² a 1 giorno e circa 900 kg/cm² a 28 giorni.

c) Resistenza meccanica a flessione: circa 60 kg/cm² a 1 giorno e oltre 120 kg/cm² a 28 giorni.

d) Pull-out: a 3 giorni 45 kg/cm² per barra di acciaio liscia e 200 kg/cm² per barra di acciaio ad aderenza migliorata; i corrispondenti valori a 28 giorni diventano: 80 kg/cm² e oltre 300 kg/cm².

e) Espansione contrastata con barra di acciaio se-

condo la norma UNI 8147: 0,1% (tra il tempo finale di presa e 24 ore).

f) Permeabilità: minore di $1 \cdot 10^{-12}$ cm/sec a 3 giorni.

g) Resistenza ai cicli di gelo-disgelo: dopo 300 cicli termici tra -20°C e +5°C il modulo elastico è diminuito meno del 5% (ASTM C-233-73).

h) Comportamento a caldo: dopo una stagionatura a temperatura ambiente di 1 giorno, il materiale è stato conservato per altri 6 giorni a 400°C. Le resistenze meccaniche a compressione od a flessione, rispetto ai materiali conservati a temperatura ambiente, risultano diminuire di circa il 15% dopo 6 giorni, ed appaiono addirittura più elevate durante i primi due giorni di trattamento a 400°C.

i) Comportamento alla fatica: dopo una stagionatura di 28 giorni il materiale è stato sottoposto a carichi variabili tra 200 kg/cm² e 500 kg/cm² di compressione con una frequenza di 500 cicli/min. Dopo oltre due milioni di cicli la prova è stata interrotta ed il materiale non presentava alcuna diminuzione della resistenza meccanica.

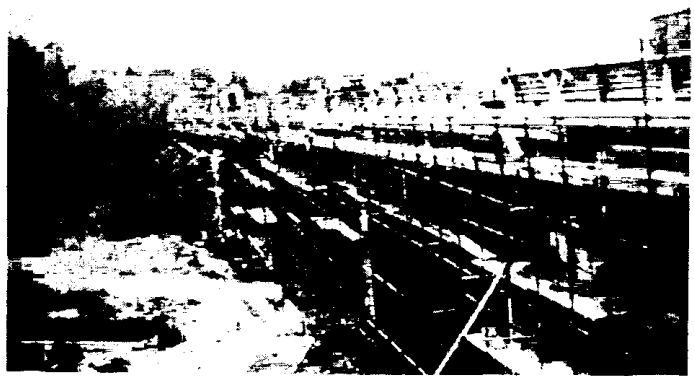
l) Modulo elastico dinamico: 350.000 kg/cm² a 7 giorni e 400.000 kg/cm² a 28 giorni.

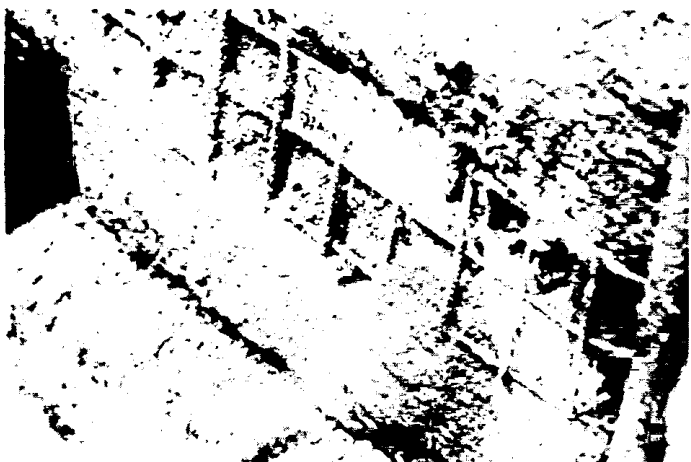
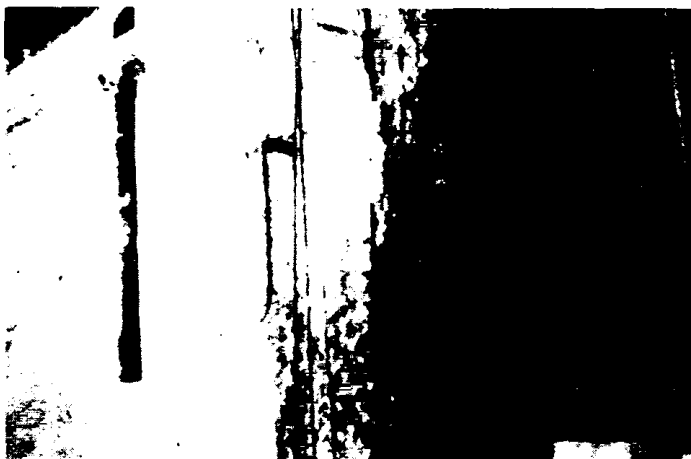
m) Modulo elastico statico con carichi pari ad un terzo del carico di rottura: 280.000 kg/cm² a 7 giorni e 320.000 kg/cm² a 28 giorni.

3.5. Esempi di applicazione delle malte a ritiro compensato

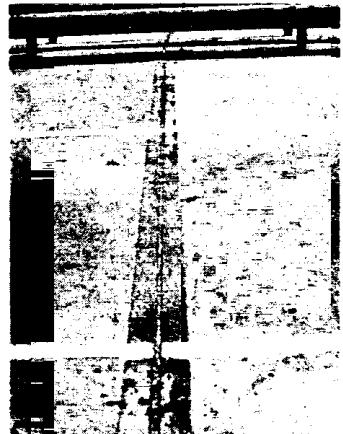
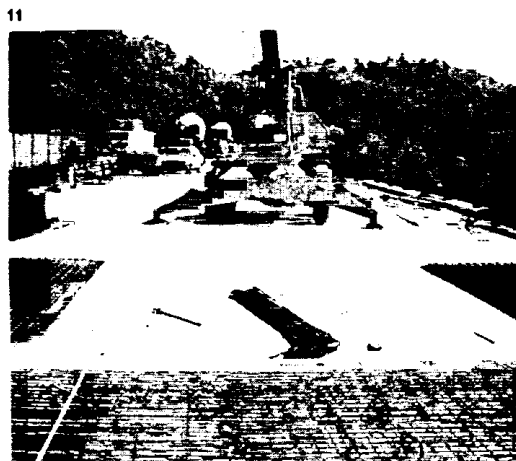
I Ponti

Il primo esempio (figg. 2-8) riguarda la riparazione di un viadotto autostradale in alta montagna (fig. 2). Il calcestruzzo si presenta gravemente danneggiato per la simultanea azione dei sali disgelanti e dei cicli di gelo e disgelo (figg. 3 e 4). Dopo la rimozione del calcestruzzo ammalorato è stata applicata una rete elettrosaldata (fig. 5) e quindi, dopo la saturazione con acqua del vecchio calcestruzzo, si è proceduto all'applicazione a spruzzo di una malta reoplastica a ritiro



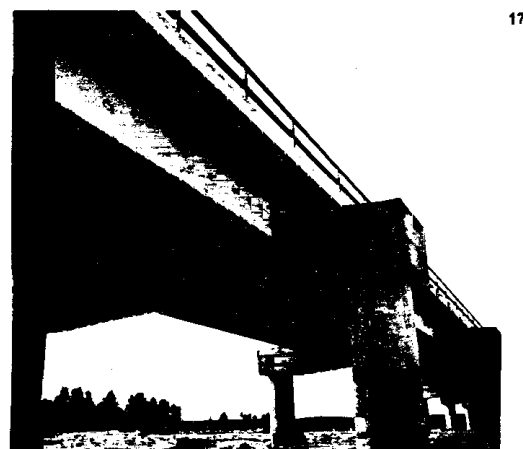
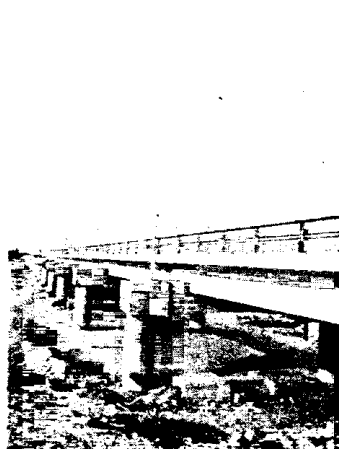


2 - Visione del cantiere; 3 - Degradazione del calcestruzzo; 4 - Ferri in vista per la degradazione del calcestruzzo; 5 - Applicazione della rete elettrosaldata; 6-7 - Applicazione a spruzzo di una malta espansiva reoplastica; 8 - Lavoro finito; 9 - Rimozione del vecchio calcestruzzo degradato; 10 - Posizionamento dei nuovi ferri di armatura; 11 - Getto del nuovo calcestruzzo reoplastico espansivo; 12 - Visione generale della nuova soletta in calcestruzzo; 13 - Particolare del giunto.





14 - Degradazioni localizzate del viadotto; 15 - Riparazione effettuata con malta espansiva reoplastica; 16 - Applicazione della vernice cementizia impermeabilizzante; 17-18 - Visione del viadotto protetto con la vernice cementizia.



compensato (figg. 6 e 7). Il lavoro richiede una attenta stagionatura umida per garantire il buon risultato finale (fig. 8).

Il secondo esempio (figg. 9-13) concerne il rifacimento integrale di una soletta di un ponte mediante rimozione del vecchio calcestruzzo degradato (fig. 9), posizionamento dei nuovi ferri di armatura (fig. 10), getto di un calcestruzzo reoplastico a ritiro compensato (fig. 11). Le figg. 12 e 13 mostrano rispettivamente una visione generale della nuova soletta ed un particolare del giunto.

Il terzo esempio infine (figg. 14-18) riguarda la riparazione di un viadotto il cui calcestruzzo presentava alcune degradazioni localizzate (fig. 14) tali da presentare i ferri scoperti. Esse sono state riparate con una malta reoplastica a ritiro compensato (fig. 15). Successivamente si è provveduto a proteggere, mediante applicazione di una vernice cementizia impermeabilizzante bianca (fig. 16), tutte le rimanenti parti delle strutture ancora apparentemente integre, al fine di salvaguardarle da un possibile attacco chimico (figg. 17 e 18).

BIBLIOGRAFIA

[1] M. COLLEPARDI, « Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo », Ed. Hoepli, Milano (1980).
 [2] ACI Committee 211, « Recommended Practice for selecting Proportions for Normal Weight Concrete », J. Americ. Concr. Inst., 66, 612 (1969).
 [3] L.J. MURDOCK, G.F. BLACKLEDGE, « Concrete Materials and Practice », pag. 106, Edward Arnold, London (1968).
 [4] T.C. POWERS, « The properties of Fresh Concrete », pag. 202, John Wiley & Son, Inc., New York (1968).
 [5] F.D. LYDON, « Concrete Mix Design », Applied Science Publishers, London (1972).
 [6] A.M. NEVILLE, « Properties of Fresh Concrete », pag. 561, Pitman Publishing, London (1975).
 [7] ACI Committee 211, Subcommittee N. 2, « Recommended Practice for Selecting Proportions for No-slump Concrete », J. Americ. Concr. Inst., 62, 1 (1965).
 [8] Road Research Laboratory, « Design of Concrete mixes », Road Note, N. 4, HMSO, London (1958).
 [9] Legge n. 1086, Supplemento alla G.U. n. 176, pag. 130, Giugno 1980.
 [10] W. McQUADE, « Why all those Buildings are collapsing », Fortune, 19, 61 (1979).
 [11] S.C. WATSON, « Zero Maintenance Expansion Joints & Bearings. A Design Goal for the Future », Federation Internationale de la Précontrainte, 8th Congress, London (1978).
 [12] W. McQUADE, « Why all those Buildings are collapsing », Fortune, 19, 65 (1979).
 [13] W.C. OLAZABEL, L. TRAVERSA, FIP Notes 70, Sept. pag. 13 (1977).
 [14] M. COLLEPARDI, « Scienza e tecnologia del calcestruzzo », pag. 139, Ed. Hoepli, Milano (1980).
 [15] T.C. POWERS, L.E. COPELAND, H.M. MANN, J. Portl. Cem. Assoc. Res. Dev. Lab., 1, 38 (1959).
 [16] M. COLLEPARDI, M. CORRADI, M. VALENTE, « Low Slump Loss Superplasticized Concrete », Transp. Res. Board, Washington, D.C. (1979).
 [17] S. ZORZI, « Rheoplastic Concrete as an Aid in the Design and Realization of Large Bridges in Unfavourable Climate Conditions », Transp. Res. Board, Washington, D.C. (1979).