
ATTI DELLE GIORNATE A.I.C.A.P. 1983

BARI 26 - 29 MAGGIO

**- Strutture bidimensionali e curve in
conglomerato cementizio**

**- La moderna tecnologia del
conglomerato cementizio**

TITOLO :

PROPORIZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO

AUTORI :

M. COLLEPARDI

Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra
Università di Ancona.

A. TRIANTAFILLIS

MAC S.p.A.
Treviso.

PROPORIZIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO

*
Mario Collepardi ed Alberto Triantafyllis **

* Dipartimento di Scienze dei Materiali
e della Terra, Facoltà di Ingegneria,
Università di Ancona

** MAC S.p.A., Treviso

SOMMARIO

Viene descritto il procedimento di "mix-design" per calcolare la composizione del calcestruzzo sulla base dei dati di progetto e della lavorabilità che si vuole ottenere, oltre che degli inerti disponibili. I dati di progetto includono: resistenza caratteristica, copriferro, distanza tra i ferri, condizioni micro-climatiche e geografiche dell'ambiente.

SUMMARY

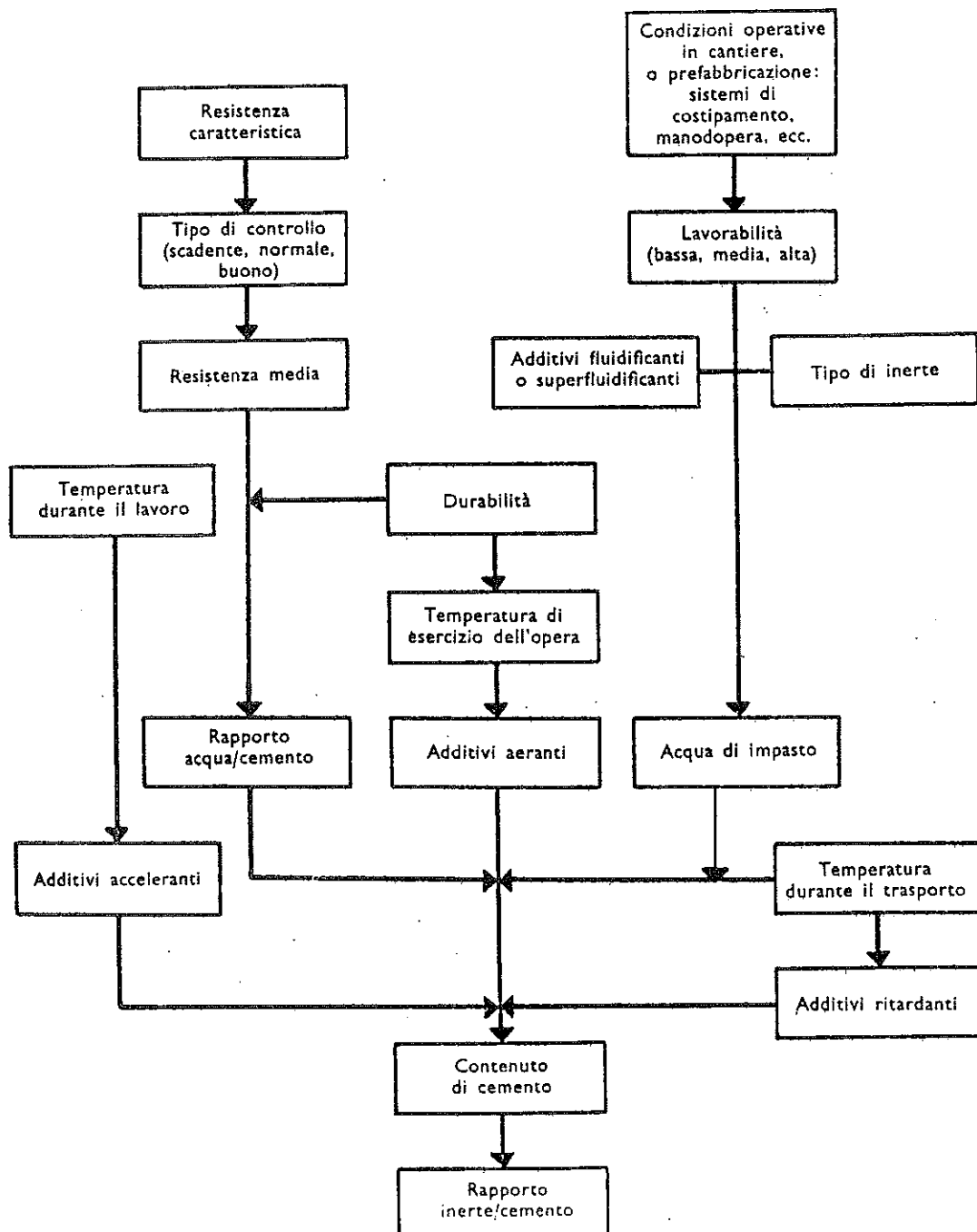
The "mix-design" method to calculate the concrete mix-proportion on the basis of design data, workability of fresh mix and available aggregates is described. The design data include: design strength, concrete cover, reinforcement density, microclimatic and geographic ambient conditions.

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.

Nella Tabella 1 è schematicamente mostrato un processo di mix-design con il quale arrivare a fissare le proporzioni dei vari ingredienti del calcestruzzo. 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, e quindi della durabilità richiesta per il materiale, si stabilisce il rapporto acqua/cemento, scegliendo il va-

Tabella 1 Schema di un processo per il mix-design del calcestruzzo



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

Infine, soprattutto in climi caldi, nel caso che si debba trasportare il calcestruzzo a lunga distanza, o che si debbano effettuare delle riprese di getto con calcestruzzo fresco su fresco, è necessario prevedere l'aggiunta di additivi ritardanti per evitare che si verifichi un prematuro indurimento.

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 é necessario apportare qualche correzione nella composizione dell'impasto.

Il lavoro preliminare, necessario per l'ottenimento dei grafici e delle tabelle e per la verifica sperimentale su un impasto, rappresenta un impegno trascurabile se confrontato con i vantaggi derivanti dal mix-design, soprattutto se il calcestruzzo progettato verrà impiegato per un tempo relativamente lungo, come si verifica per gli impianti di calcestruzzo preconfezionato, o per quelli di prefabbricazione, o anche per i grandi lavori di cantiere che richiedono lunghi tempi di esecuzione.

In letteratura (I-VII) 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 é presentato, con le necessarie modifiche ed adattamenti, il metodo suggerito dall'American Concrete Institute (ACI) per il calcestruzzo ordinario (I) e che é forse quello più largamente adottato e raccomandato nelle diverse organizzazioni pubbliche o private operanti nel settore del calcestruzzo.

2. LAVORABILITA'

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, é consigliabile aumentare la lavorabilità fino ad arrivare ad un calcestruzzo con slump di 20-24 cm. In ogni caso il criterio da adottare per la scelta della lavorabilità é quello di aumentare lo slump quanto più difficile si presenta il lavoro (sezioni sottili, alta percentuale di ferri d'armatura) e quanto meno qualificata é 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.

La precisazione della lavorabilità dell'impasto, indipendentemente dall'adozione del procedimento del mix-design, é di fondamentale importanza per la caratterizzazione del calcestruzzo. La mancanza di precisazione della lavorabilità da parte del progettista e/o dell'impresa nei confronti di un preconfezionatore, può portare a notevoli inconvenienti e ad imbarazzanti contestazioni. Si pensi, per esempio, di aver ordinato un calcestruzzo con una R_{bk} 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 preconfezionatore la minore resistenza meccanica causata da una aggiunta d'acqua effettuata in cantiere per ottenere la lavorabilità non 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.

3. IL DIAMETRO MASSIMO DELL'INERTE

Fissare per l'inerte grosso il diametro massimo più alto possibile, nei limiti dei dati riportati in Tabella 2 e della disponibilità degli aggregati.

Tabella 2 Diametro massimo dei vari tipi di costruzione (I).

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

4. L'ACQUA DI IMPASTO

Stabilire in base alla lavorabilità e al diametro massimo prescelti, il contenuto di acqua di impasto. La Tabella 3 suggerisce il volume d'acqua di impasto approssimativamente necessario per calcestruzzi normali e per quelli contenenti aria inglobata. Il valore letto in Tabella 3 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 3 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.

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 dipendono 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

Tabella 3 Contenuti di acqua approssimativamente richiesti per ottenere una certa lavorabilità, tenendo presente il diametro massimo dell'inerte.

Lavorabilità		Acqua di impasto in l/m ³ in dipendenza del diametro massimo.									
Descrizione	Slump (cm)	Vebe (sec)	Fattore di compatt.	Diametro (mm)							
				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
Fluidò	15-17.5	--	0.95	240	230	220	210	200	185	175	155
Superfluidò	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
Fluidò	15-17.5	--	0.95	225	215	210	190	180	170	160	140
Superfluidò	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

l'acqua di impasto.

5. IL RAPPORTO ACQUA/CEMENTO

A) *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 indicati del rapporto a/c per raggiungere alle diverse stagionature determinate resistenze meccaniche a compressione. I valori di resistenza meccanica riportati in Fig. 1 sono 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 l'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 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 (VIII).

Per costruzioni con più di 1500 m³ di calcestruzzo il valore di K è assunto uguale a 1,4 (VIII). In questo caso il valore di δ può essere approssimativamente previsto in base al livello qualitativo del mecolamento e del controllo che sarà effettuato sul cantiere o sull'impianto di prefabbricazione. La Tabella 4 fornisce alcuni valori indicativi di δ in relazione alla qualità del lavoro eseguito per calcestruzzi con una resistenza meccanica a compressione media di 350 kg/cm².

Tabella 4 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

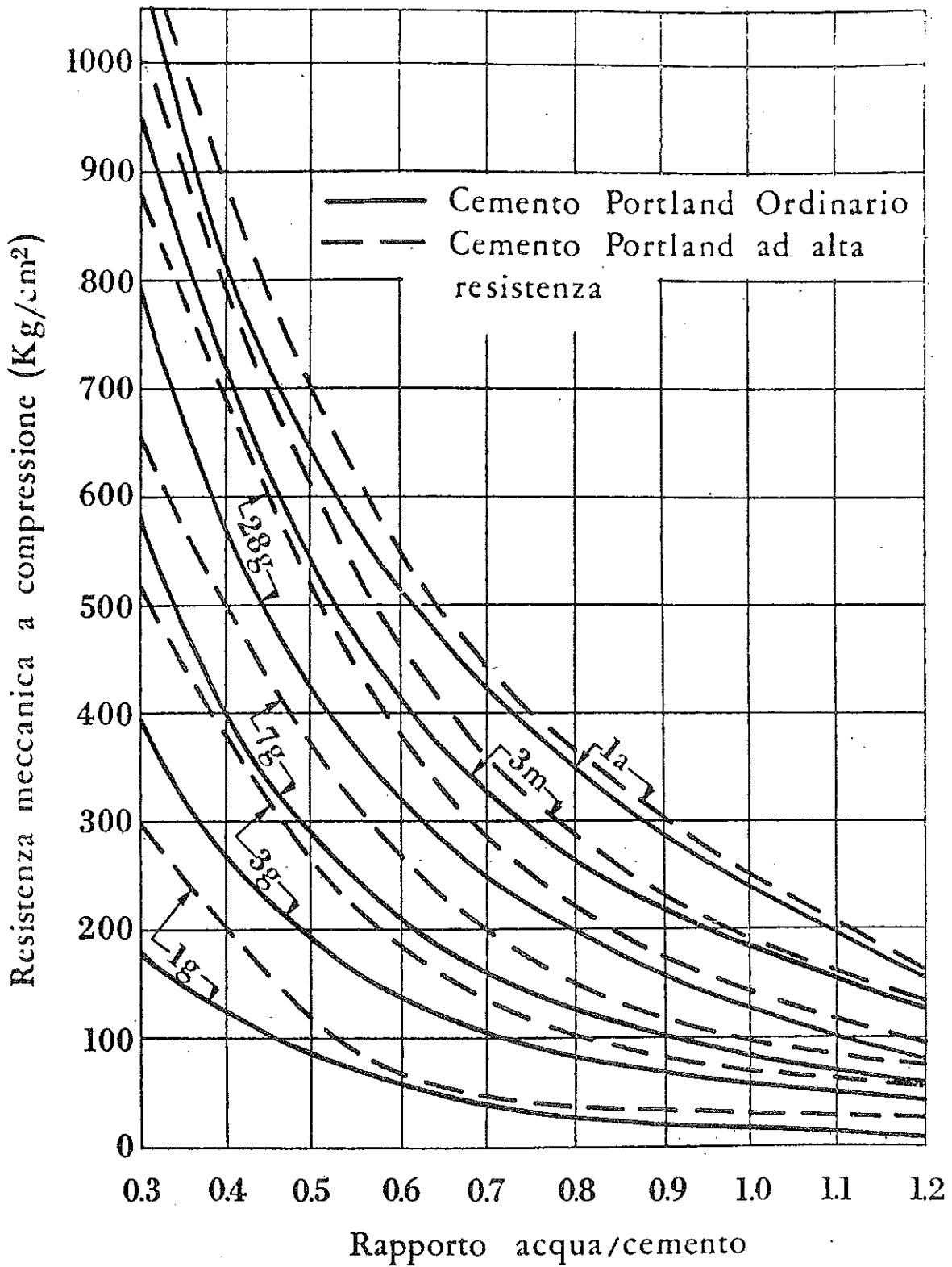


Fig. 1 Influenza del rapporto acqua/cemento sulla resistenza meccanica media.

Il controllo per la misura sperimentale di δ è riferito ad una miscela omogenea e va eseguito con 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 tener 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 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 5 suggerisce i valori del rapporto a/c approssimativamente sufficienti a garantire una relativamente bassa permeabilità della pasta cementizia e quindi una buona durabilità del calcestruzzo. Le aggressioni prese in considerazione nella Tabella 5 sono dovute al solfato ad ai cicli di gelo-disgelo.

Nella Tabella 5 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 del rapporto acqua/cemento si dovrà prendere in esame il valore più piccolo tra quelli deducibili della resistenza meccanica o della 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.

6. L'INERTE GROSSO

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 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. Rarimento sotto 0 °C, scarse le piogge o i periodi di clima arido.		
	In vicinanza del bagnasciuga o in prossimità dell'acqua		All'aria	In vicinanza del bagnasciuga o in prossimità dell'acqua		All'aria
All'aria	acqua potabile	acqua del mare o ambienti solfatici (2)	acqua potabile	acqua del mare o ambienti solfatici (2)	acqua potabile	acqua del mare o ambienti solfatici (2)
1. Sezioni sottili, parapetti, avanzati, 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 riparto	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, interrate 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 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.

Pertanto misurando sperimentalmente p'_m e p'_a e calcolando b_0 , si può determinare mediante la Tabella 6, il volume solido (b) occupato dall'inerte grosso in 1 m^3 di calcestruzzo. Si può osservare che il rapporto b/b_0 , aumenta con il diametro massimo dell'inerte e con la finezza della sabbia.

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

Tabella 6 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	0,46	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%

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 m^3 di calcestruzzo e quello di acqua, di cemento, di inerte grosso e di aria (Tabella 3) presenti in 1 m^3 di conglomerato. Tutti questi dati sono già espressi in volume, ad accezione del cemento, e pertanto del peso specifico di quest'ultimo (circa 3,15 kg/l) si risale al volume di cemento per m^3 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, necessaria a completare 1 m^3 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.).

8. VERIFICA SPERIMENTALE

Il procedimento descritto richiede la determinazione sperimentale dei seguenti dati per progettare la composizione del calcestruzzo: a) peso specifico del cemento; b) peso specifico apparente, assorbimento ed umidità degli inerti; c) peso specifico in mucchio compattato o curva granulometrica dell'inerte grosso; d) analisi granulometrica per cal-

colare il modulo di finezza della sabbia; e) diametro massimo dell' inerte grosso.

Attraverso le figure e le tabelle precedentemente illustrate, o meglio attraverso analoghe figure e tabelle ricavate sperimentalmente con i materiali da impiegare, é possibile arrivare ad una composizione approssimativa del calcestruzzo. Si procede quindi a confezionare un impasto sperimentale per verificare se con l'acqua calcolata é possibile confezionare il calcestruzzo di lavorabilità prefissata come anche se il volume d'aria reale corrisponde a quello previsto. Con questi dati é possibile apportare le opportune modifiche alla composizione progettata finché, già al secondo tentativo, si arriva ad individuare l'impasto che presenta la lavorabilità ed il rapporto a/c richiesti per la resistenza meccanica e la durabilità con il minor dosaggio di cemento.

9. BIBLIOGRAFIA

- (I) ACI Committee 211, *Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete*, J. Amer. Concr. Inst., 66, 612 (1969).
- (II) L.J. Murdock, G.F. Blackledge, *Concretes Materials and Practice*, pag. 106, Edward Arnold London (1968).
- (III) T.C. Powers, *The Properties of Fresh Concrete*, pag. 202, John Wiley & Sons, Inc. New York (1968).
- (IV) F.D. Lydon, *Concrete Mix Design*, Applied Science Publishers, London (1972).
- (V) A.M. Neville, *Properties of Fresh Concrete*, pag. 561; Pitman Publishing, London (1975).
- (VI) ACI Committee 211, Subcommittee N.2, *Recommended Practice for Selecting Proportions for NO-Slump Concrete*, J. Amer. Concr. Inst., 62, 1 (1958).
- (VII) Road Research Laboratory, *Design of Concrete Mixes*, Road Note, N.4, HMSO, London (1958).
- (VIII) Legge n. 1086, Supplemento alla G.U. n. 176, pag. 130, giugno 1980.