

# L'industria italiana del **CEMENTO**



MARIO COLLEPARDI (\*)

Il *mix-design* [1-5] è un procedimento per il calcolo della composizione del calcestruzzo (in termini di quantità di cemento, di acqua e di inerti per m<sup>3</sup> di calcestruzzo), a partire da:

a) le proprietà ingegneristiche del materiale indurito (resistenza meccanica, modulo elastico, ritiro, scorrimento viscoso, durabilità, ecc.), quali risultano dell'esigenza del progetto dell'opera;

b) le esigenze esecutive (lavorabilità, organizzazione del cantiere, modalità di getto, ecc.);

c) i materiali disponibili (tipo di cemento, di inerti e di additivi).

L'accumulo di dati consolidati in oltre un secolo di esperienza sull'impiego del calcestruzzo consente di calcolare preventivamente la composizione della miscela partendo dai requisiti tecnici richiesti.

Esistono, in sostanza, una serie di consolidate correlazioni tra le proprietà richieste da una parte (resistenza meccanica, ritiro, deformazione viscosa, durabilità, ecc.) e la composizione del calcestruzzo dall'altra (rapporto acqua/cemento, rapporto inerte/cemento, acqua di impasto, ecc.). Tali correlazioni sono esprimibili di volta in volta sotto forma di equazioni, di grafici o tabelle.

Il vantaggio del *mix-design* è paragonabile a quello derivante dall'esecuzione di un'opera partendo dal suo progetto, piuttosto che procedendo con improvvisazione.

Per seguire nell'analogia tra il progetto dell'opera ed il *mix-design*, val la pena di precisare che anche nel secondo caso vanno messi in conto, al momento di confezionare in pratica il calcestruzzo, gli inevitabili aggiustamenti al fine di correggere le deviazioni esistenti tra il calcolo teorico ed i risultati reali.

Tali correzioni saranno tanto meno importanti, quanto più precise saranno state le indicazioni sulle proprietà ingegneristiche individuate come requisiti essenziali per l'opera, e quanto più specifiche le correlazioni disponibili tra queste ultime e la composizione del calcestruzzo. Non necessariamente tutte queste correlazioni sono valide con un elevato grado di determinazione e precisione. Tuttavia, anche una correlazione generica tra una proprietà e la composizione del materiale, soprattutto se accompagnata dalla conoscenza del suo grado di incertezza, è decisamente più vantaggiosa rispetto a qualsiasi approccio puramente empirico che porta, molto spesso, o a sovradosare gli ingredienti o, ciò che è peggio, a sottostimare l'incidenza di alcuni parametri: in altre parole, con un approccio puramente empirico e grossolano, come di fatto si agisce in assenza del *mix-design*, si può arrivare a confezionare o un calcestruzzo non ottimale (giacché altre composizioni sarebbero state economicamente più vantaggiose e tecnicamente più adatte) o un

calcestruzzo inadeguato per almeno una delle prestazioni prescritte.

In questo articolo viene illustrato il principio del *mix-design* e viene presentata molto sinteticamente la classificazione dei vari tipi di *mix-design*. Per ovvie ragioni di spazio non è qui possibile descrivere i dettagli del procedimento di calcolo per i quali si rimanda alla letteratura specializzata sull'argomento [1-5].

## GLI "ELEMENTI BASE" PER IL MIX-DESIGN

Esistono fondamentalmente due tipi di *mix-design*: *semplice e complesso* [5]. Il *mix-design* è semplice quando è necessario convertire in termini di composizione del calcestruzzo i seguenti quattro indispensabili requisiti che rappresentano gli *elementi base* per ogni *mix-design*: la resistenza caratteristica ( $R_{ck}$ ), la lavorabilità ( $L$ ), il tipo di cemento ( $t_c$ ) ed il diametro massimo ( $D_{max}$ ) dell'inerte disponibile. Il *mix-design* è complesso quando, oltre ai suddetti quattro requisiti, esiste almeno un'altra caratteristica aggiuntiva (durabilità, ritiro, resistenza allo scasso, ecc.) che interessa conferire al materiale.

In Appendice è riportata, in ordine alfabetico, la lista dei simboli adottati nel presente lavoro con il loro significato.

## IL MIX-DESIGN SEMPLICE

Nella Figura 1 è schematicamente mostrato un esempio di *mix-design* semplice con il quale arrivare a fissare preliminarmente le proporzioni dei vari ingredienti del calcestruzzo.

Dalla resistenza caratteristica richiesta, si calcola la resistenza media mediante la nota equazione:

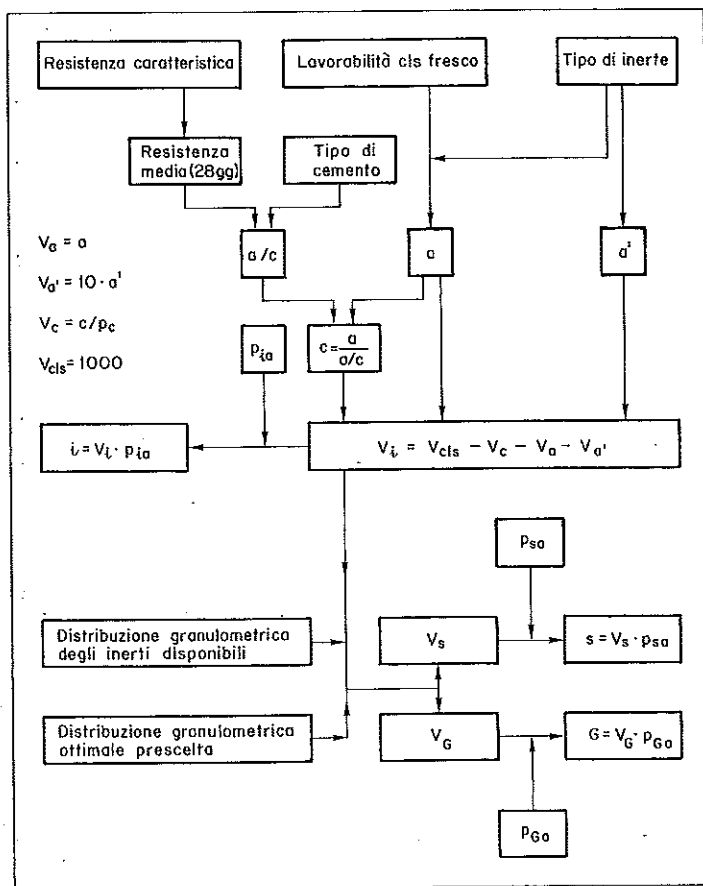
$$R_{ck} = R_{cm28} - k\delta$$

Quindi, conoscendo il tipo di cemento disponibile o prescritto (325 portland, 425 portland, ecc.), si determina il rapporto  $a/c$  che, con quel cemento, garantisce l'ottenimento della resistenza caratteristica richiesta (Fig. 2).

D'altra parte, stabilita la lavorabilità del calcestruzzo fresco sulla base delle condizioni prevedibili in cantiere (manodopera, difficoltà del getto, densità dei ferri, ecc.), come anche del tipo di inerte disponibile o prescelto (naturale o frantumato, diametro massimo), si determina sia il contenuto di acqua ( $a$ ) in kg/m<sup>3</sup> (Fig. 3), che la percentuale in volume di aria ( $a'$ ) che rimane nel calcestruzzo dopo la sua messa in opera (Fig. 4).

Ovviamente, sia per il calcolo di  $a/c$  che per quello di  $a$  ed  $a'$ , occorrono delle correlazioni (sotto forma di grafici, tabelle o equazioni analitiche) che stabiliscono un legame tra i requisiti (resistenza, lavorabilità, ecc.) da una parte, ed i parametri di composizione cercati ( $a/c$ ,  $a$ ,  $a'$ ) dall'altra.

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



A questo punto, per definire la composizione del calcestruzzo in termini di  $\text{kg/m}^3$  di acqua ( $a$ ), di cemento ( $c$ ) e di inerte ( $i$ ) si procede matematicamente come è mostrato in Fig. 1. Noti  $a/c$  ed  $a$  si calcola  $c$ , mentre il volume di inerte ( $V_i$ ) è determinato mediante un semplice bilancio sottraendo ad un  $\text{m}^3$  di calcestruzzo, il volume di acqua, di cemento e di aria:

$$V_i = V_{cls} - V_c - V_a - V_{a'}$$

dove  $V_{cls} = 1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l}$ ;  $V_c = c/p_c$ ;  $V_a = a$ ;  $V_{a'} = 10a'$ . Tenendo presente che la massa volumica del cemento ( $p_c$ ) è con buona approssimazione eguale a  $3,15 \text{ kg/l}$ , ed assumendo per la massa volumica dell'inerte ( $P_{ia}$ ) un valore di  $2,7 \text{ kg/l}$ , si può calcolare il peso dell'inerte ( $i$ ) in  $\text{kg}$  per  $1 \text{ m}^3$  di calcestruzzo:

$$i = V_i \cdot 2,7 = (1000 - c/3,15 - a - 10a') \cdot 2,7$$

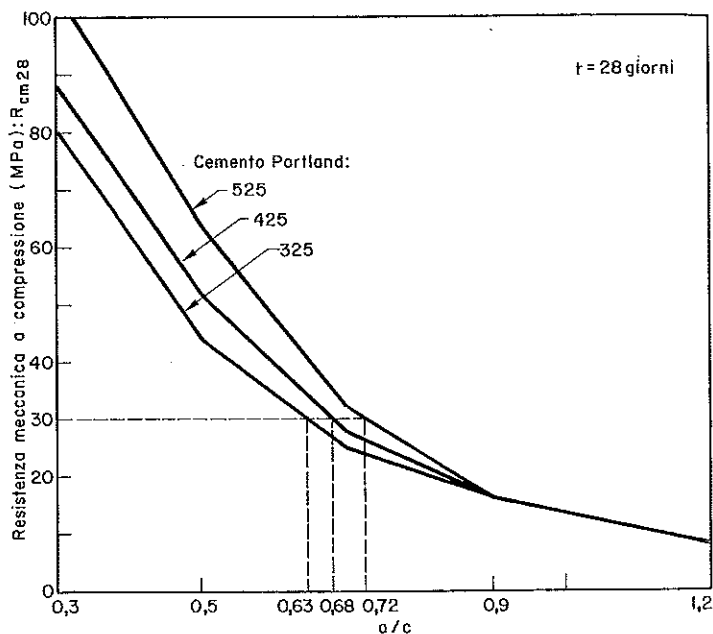


Fig. 2 - Resistenza meccanica a compressione media a 28 giorni in funzione del rapporto  $a/c$  di calcestruzzi confezionati con cemento Portland di classe 325, 425 e 525.

Fig. 1 - Schema logico per un "mix-design" semplice del calcestruzzo. Per i simboli si veda l'Appendice.

Qualora si desideri affinare il *mix-design* e calcolare le quantità di sabbia ( $s$ ) e di inerte grosso ( $G$ ) che costituiscono il quantitativo totale di inerte ( $i$ ), è necessario conoscere le caratteristiche granulometriche dei singoli inerti, per determinare il proporzionamento ottimale in base alla curva granulometrica prescelta (Fuller, Bolomey, ecc.). In sostanza per calcolare  $a$ ,  $c$ , ed  $i$  è necessario stabilire in partenza la resistenza caratteristica, la lavorabilità, il tipo di cemento e di inerte. Se invece, si vuole calcolare  $a$ ,  $c$ ,  $s$ , e  $G$  occorre conoscere anche le caratteristiche granulometriche della sabbia e dell'inerte grosso, determinate mediante le vagliature degli inerti disponibili.

#### IL MIX-DESIGN COMPLESSO

Qualora, oltre alla resistenza caratteristica, esistano altri requisiti tecnici del calcestruzzo indurito che debbano essere rispettati per l'opera progettata, il *mix-design* diviene più com-

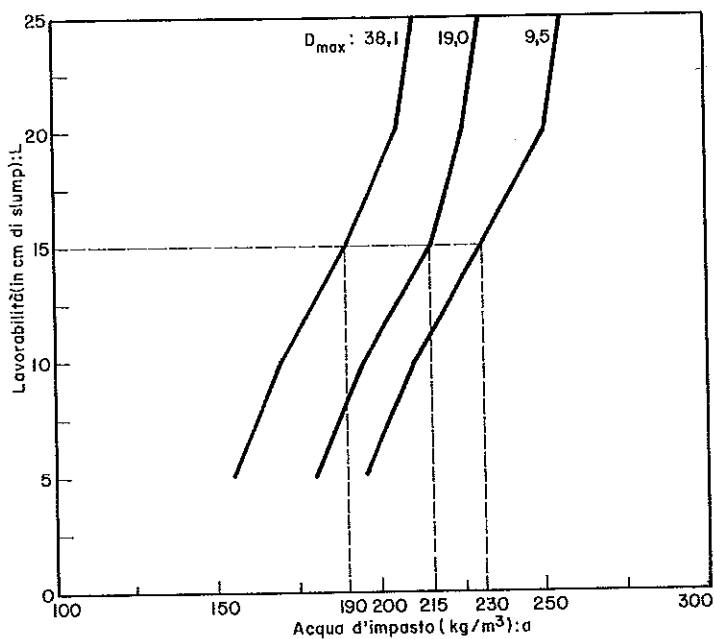


Fig. 3 - Lavorabilità in funzione dell'acqua di impasto per inerti con diverso diametro massimo ( $D_{max}$ ) espresso in mm i valori di  $a$  sono mediati da quelli ottenibili con inerti alluvionali e di frantumazione.

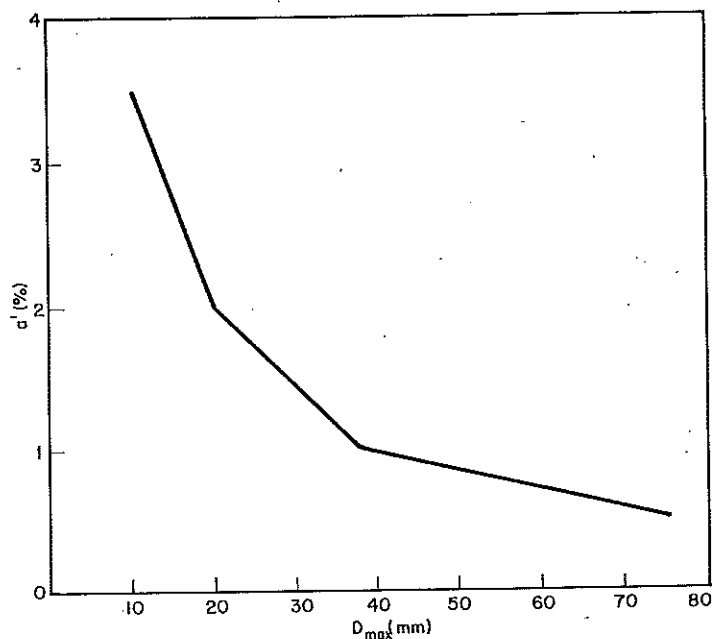


Fig. 4 - Percentuale d'aria ( $a'$ ) che rimane nel calcestruzzo compattato in funzione del diametro massimo ( $D_{max}$ ) dell'inerte.

plesso. Tuttavia, la soluzione del problema è sempre possibile, seguendo lo stesso schema logico ora enunciato, purché siano note le correlazioni tra i requisiti tecnici da una parte (durabilità, ritiro, resistenza allo scasso, ecc.) ed il rapporto  $a/c$  dall'altra.

Ovviamente, occorrerà scegliere tra i vari  $a/c$  (quello legato alla resistenza caratteristica, e quelli inerenti gli altri requisiti tecnici) il valore capace di soddisfare tutte le esigenze, tenendo presente il seguente principio fondamentale: non esiste proprietà del calcestruzzo indurito (resistenza, durabilità, ritiro, modulo elastico, ecc.) che non tragga giovamento dalla diminuzione del rapporto  $a/c$ . Ne consegue che, quanto maggiore è il numero dei vincoli imposti (in termini di proprietà tecniche richieste) tanto maggiore è la probabilità che il rapporto  $a/c$ , capace di soddisfare tutte queste esigenze, diventi inferiore al rapporto  $a/c$  capace di garantire la  $R_{ck}$  richiesta (Fig. 5).

Nella Fig. 6 è illustrato un semplice esempio relativo alla coesistenza del vincolo della durabilità accanto a quello della resistenza meccanica. Nella Fig. 6 sono riportate due curve: quella

a destra rappresenta la correlazione tra resistenza meccanica ( $R$ ) e rapporto  $a/c$ ; quella a sinistra tra durabilità ( $D$ ) e rapporto  $a/c$ . Se per esempio le esigenze progettuali dell'opera sono:

$$R > R_1 \text{ (per la resistenza meccanica)}$$

$$D > D_1 \text{ (per la durabilità)}$$

i valori del rapporto  $a/c$  capaci di soddisfare queste due diverse richieste sono:

$$a/c < (a/c)_2 \text{ (per la resistenza meccanica } R_1)$$

$$a/c < (a/c)_1 \text{ (per la durabilità } D_1)$$

È questo il caso di un *mix-design complesso* di tipo *incongruente* giacché i valori di  $a/c$  capaci di soddisfare entrambe le esigenze ( $R_1, D_1$ ) sono tra loro diversi ed in particolare risulta:

$$(a/c)_2 > (a/c)_1$$

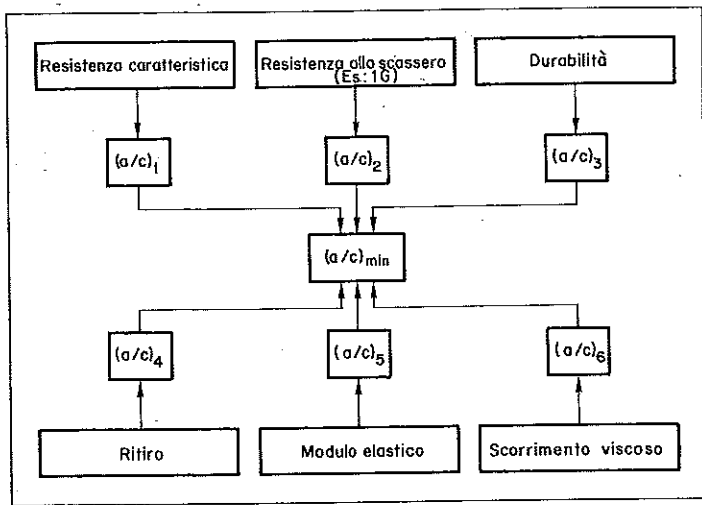


Fig. 5 - Scelta del rapporto  $a/c$  in un mix-design "complesso".

L'incongruenza è in questo caso *solubile* adottando il minore tra i due rapporti  $a/c$ . Infatti, nell'esempio specifico illustrato in Fig. 6 (*mix-design complesso incongruente solubile*) occorre scegliere il valore di  $(a/c)_1$ , capace di garantire la durabilità richiesta  $D_1$  e di assicurare nel contempo una resistenza  $R_2$  che risulterà quindi inevitabilmente maggiore di quella di progetto  $R_1$ . Se si scegliesse  $(a/c)_2$  sarebbe garantita la resistenza meccanica richiesta  $R_1$ , ma non la durabilità che risulterebbe  $D_2$  e quindi di livello inferiore a quella richiesta  $D_1$ . Pertanto, solo scegliendo un rapporto  $a/c$  inferiore o eguale ad  $(a/c)_1$  sono soddisfatte entrambe le condizioni richieste:

$$a/c < (a/c)_1 \rightarrow R > R_1; D > D_1$$

Qualora la durabilità richiesta fosse stata  $D_2$  e non  $D_1$ , allora entrambi i requisiti ( $R_1, D_2$ ) sarebbero stati soddisfatti da un unico valore del rapporto acqua/cemento:

$$a/c < (a/c)_2 \rightarrow R > R_1; D > D_1$$

In questo caso si sarebbe trattato di un *mix-design complesso congruente* in quanto entrambe le richieste ( $R_1$  e  $D_2$ ) convergono verso un unico valore del rapporto acqua/cemento,  $(a/c)_2$ .

Qualunque sia stata la scelta del rapporto  $a/c$ , vincolata dalla esigenza di una certa durabilità oltre che di una certa resistenza meccanica, si procede al calcolo della composizione del calcestruzzo seguendo il principio già illustrato in Fig. 1.

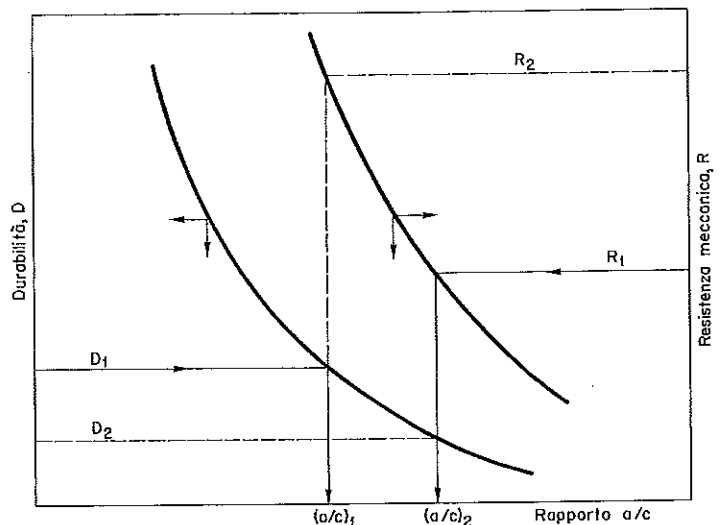


Fig. 6 - Scelta del rapporto  $a/c$  per soddisfare sia l'esigenza di resistenza meccanica  $R_1$  che quella di durabilità  $D_1$ .

#### IL MIX-DESIGN APERTO

Quando risultano definiti i valori dei quattro elementi base ( $R_{ck}, L, D_{max}, t_c$ ), il *mix-design* non ammette che un'unica soluzione e pertanto esso è definito "chiuso". Il *mix-design* chiuso può essere *semplice* o *complesso* a seconda che i requisiti del materiale siano identificati soltanto dai quattro elementi base o da altre proprietà (durabilità, ritiro, ecc.) in aggiunta a questi.

Talvolta, però, uno o più dei quattro elementi base non è ancora definito. In tal caso il *mix-design*, semplice o complesso che sia, è *aperto* a diverse soluzioni. Per esempio, si immagini di aver fissato la  $R_{ck}$ , il  $D_{max}$  dell'inerte e la lavorabilità ( $L$ ) del calcestruzzo, ma di non aver ancora scelto il tipo di cemento ( $t_c$ ) con cui confezionare il calcestruzzo. In questo caso, non è possibile definire il rapporto  $a/c$  giacché la  $R_{ck}$  (e quindi la corrispondente  $R_{cm28}$ ) da sola non è sufficiente ad individuare il rapporto  $a/c$  se non si fissa anche il tipo di cemento  $t_c$ . In sostanza, come è mostrato in Fig. 2, la stessa resistenza meccanica  $R_{cm28}$  (per esempio: 30 MPa) è ottenibile con diversi rapporti  $a/c$  a seconda del cemento che si impiega. Nella Fig. 7 è mostrato lo schema di un *mix-design aperto* a  $n$  soluzioni dove  $n$  è il numero dei cementi disponibili. Se per esempio  $n$  è 3, in quanto sono disponibili tre cementi Portland (325Pt, 425Pt e 525Pt), si dovranno calcolare tre diversi rapporti  $a/c$ , e quindi tre diversi valori di  $c$  e di  $i$ : in sostanza si procederà a tre distinti *mix-design* uno per ogni tipo di cemento.

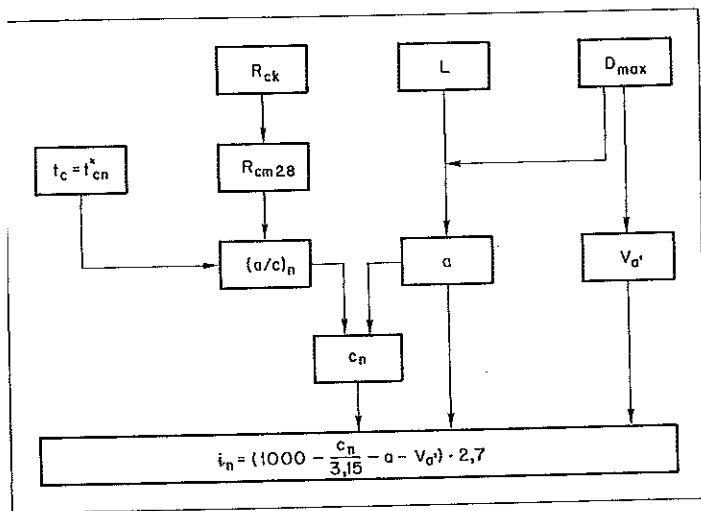


Fig. 7 - Schema di mix-design semplice aperto.

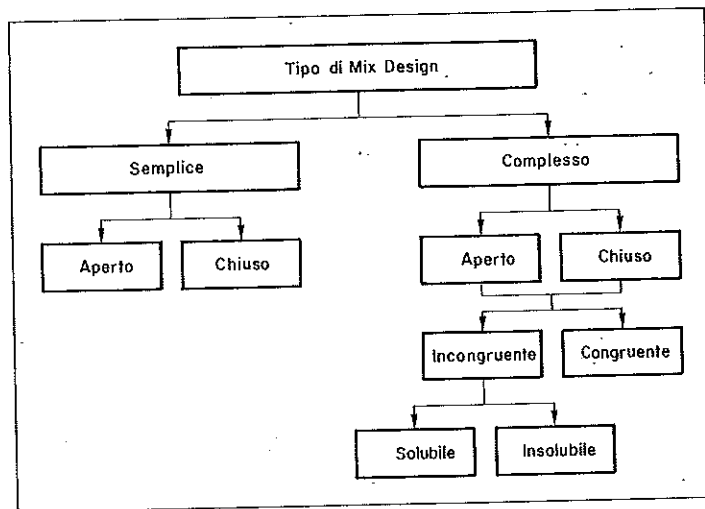


Fig. 8 - Classificazione dei vari tipi di mix-design.

#### VARI TIPI DI MIX-DESIGN

Nella Fig. 8 sono schematicamente mostrate le varie categorie di *mix-design* che si possono presentare nell'ambito dei due tipi fondamentali: semplice e complesso. Di seguito sono date le definizioni dei vari tipi di *mix-design*.

##### Mix-design semplice:

quando sono forniti gli elementi base di calcolo ben definiti, ed in numero eguale o inferiore al minimo di 4 ( $R_{ck}$ ,  $L$ ,  $D_{max}$ ,  $t_c$ ).

##### Mix-design semplice chiuso:

quando gli elementi base forniti sono 4 e portano ad una sola soluzione del problema e quindi ad una sola composizione del calcestruzzo, per es.:  $R_{ck}$ ,  $L$ ,  $D_{max}$ ,  $t_c \rightarrow (a, i, c)$ , come è mostrato in Fig. 1.

##### Mix-design semplice aperto:

quando gli elementi base forniti sono meno di 4 e portano a più soluzioni del problema e quindi a più composizioni del calcestruzzo; per es.  $R_{ck}$ ,  $L$ ,  $D_{max} \rightarrow 9$  possibili combinazioni di  $(a, c, i)$  a seconda del  $t_c$  scelto (Fig. 7).

##### Mix-design complesso:

quando oltre agli elementi base viene richiesto almeno un altro requisito (per esempio: la durabilità) (Fig. 5) e questo potrebbe essere in contraddizione con uno degli elementi base; per es.:  $R_{ck}$ ,  $L$ ,  $D_{max}$ ,  $t_c + D$ ;  $R_{ck}$  e  $D$  potrebbero, oppure no, richiedere un unico rapporto  $a/c$ .

##### Mix-design complesso aperto:

quando il *mix-design* è complesso e il numero degli elementi ba-

se è inferiore a 4. Per esempio:  $R_{ck}$ ,  $D_{max}$ ,  $L+D \rightarrow$  offrono varie soluzioni, ciascuna per ogni  $t_c$ .

##### Mix-design complesso chiuso:

quando il *mix-design* è complesso e gli elementi base sono 4.

##### Mix-design complesso chiuso congruente:

quando il *mix-design* è complesso-chiuso ma è possibile trovare un'unica soluzione perché gli elementi base e le proprietà aggiuntive richieste non sono tra loro in contrasto (cioè sono tra loro congruenti); per es.:  $R_{ck}$ ,  $L$ ,  $D_{max}$ ,  $t_c + D$  con  $R_{ck}$  e  $D$  che corrispondono ad un unico rapporto  $a/c$  e quindi ad un'unica composizione del calcestruzzo; per es.: nel caso illustrato in Fig. 6 con  $R_{ck} \rightarrow R_1$  e  $D = D_2$ .

##### Mix-design complesso aperto congruente:

quando il *mix-design* è complesso aperto e tra le possibili soluzioni ne esiste una o più di tipo congruente.

##### Mix-design complesso incongruente (aperto o chiuso):

quando il *mix-design* è complesso (aperto o chiuso) e gli elementi base sono in contrasto con almeno una delle proprietà aggiuntive richieste; per es.:  $R_{ck}$  e  $D$  richiedono due diversi rapporti  $a/c$ .

##### Mix-design complesso incongruente solubile:

quando il *mix-design* è di tipo complesso-incongruente (aperto o chiuso) ma si può trovare una soluzione che concili i dati contrastanti; per es.:  $R_{ck}$ ,  $L$ ,  $D_{max}$ ,  $t_c + D$  con  $R_{ck}$  e  $D$  che corrispondono a due diversi rapporti  $a/c$ : si sceglie il minore ma uno dei due dati ( $R_{ck}$  o  $D$ ) va ricalcolato, rispetto all'originale valore prescritto, sulla base del rapporto  $a/c$  prescelto; per es.: nel caso illustrato in Fig. 6 con  $R_{ck} \rightarrow R_1$  e  $D = D_1$ .

*Mix-design complesso incongruente insolubile:*  
 quando il mix-design è di tipo complesso-incongruente (aperto o chiuso) e non si può trovare alcuna soluzione che concili i dati contrastanti; per es.  $R_{ck}$ ,  $L$ ,  $D_{max}$ ,  $t_c$  + S con S (ritiro) che richiede oltre ad un  $a/c$  diverso da quello richiesto per  $R_{ck}$  anche un rapporto  $i/c$  incompatibile con il  $D_{max}$  disponibile: in questo caso occorre rinunciare ad uno dei due requisiti ( $D_{max}$  o S). Anche il mix-design semplice (chiuso o aperto), così come il mix-design complesso congruente (chiuso o aperto), può essere insolubile. In tali casi l'insolubilità nasce non dalla impossibilità di conciliare dei risultati contrastanti (ciascuno dei quali di per sé è tecnicamente conseguibile), come avviene nel caso del mix-design complesso incongruente insolubile, quanto piuttosto dai limiti imposti dalla natura stessa del calcestruzzo e dalle sue tecnologie di applicazione (es.: si richiede un calcestruzzo con una  $R_{ck}$  di 200 MPa).

#### ESEMPI DI MIX-DESIGN

Viene nel seguito descritto, a titolo di esempio, il procedimento di calcolo per un *mix-design semplice chiuso* per evidenziare soltanto che la scelta del tipo di controllo (A o B) secondo la legge n° 1086 non è, come spesso viene assunta, un'opzione indifferente ai fini della composizione e quindi del costo del calcestruzzo.

Si debba confezionare un calcestruzzo con  $R_{ck}$  di 20 MPa e lavorabilità pari a 15 cm di slump, avendo a disposizione un cemento Portland 425 e un inerte con diametro massimo di 38 mm. Si supponga, inoltre, di voler adottare il controllo di tipo B per il calcolo della resistenza caratteristica secondo la legge n° 1086.

$$R_{ck} = R_{cm28} - K\delta$$

avendo a disposizione un impianto di betonaggio, che, per le sue caratteristiche, presenta uno scarto quadratico medio ( $\delta$ ) di 7 MPa.

Si ricava pertanto, con  $K = 1,4$ , che:

$$R_{cm28} = 20 + 1,4 \cdot 7 = 30 \text{ MPa}$$

Dalla Fig. 2 si ricava che, con  $t_c = 425$  Pt ed  $R_{cm28} = 30$  MPa, necessario adottare un rapporto  $a/c$  di 0,68.

Dalla Fig. 3 si ricava che, con l'inerte di  $D_{max} = 38$  mm, occorrono  $190 \text{ kg/m}^3$  di acqua per ottenere una lavorabilità pari a 5 cm di slump.

Pertanto:

$$\frac{a}{c} = 0,68; \quad \frac{190}{c} = 0,68; \quad c = \frac{190}{0,68} = 279 \text{ kg/m}^3$$

Dalla Fig. 4 si ricava che nel calcestruzzo messo in opera rimarrà, dopo compattazione completa, un volume di aria ( $a'$ ) pari all'1% in volume.

Il volume di inerte ( $V_i$ ) nello stato in cui si trova dentro il calcestruzzo (saturato a superficie asciutta) è calcolabile per differenza tra il volume di calcestruzzo e quello degli altri ingredienti, e risulta:

$$V_i = 1000 - 279/3,15 - 190 - 10 = 711 \text{ l/m}^3$$

Assumendo per l'inerte una massa volumica apparente ( $\rho_{ia}$ ) nello stato di saturo a superficie asciutta pari a  $2,7 \text{ kg/l}$ , il quantitativo di inerte necessario risulta:

$$i = V_i \cdot \rho_{ia} = 711 \cdot 2,7 = 1921 \text{ kg/m}^3$$

Nella Tabella 1 sono riassunte le prestazioni richieste, le disponibilità dell'impianto di produzione (in termini di tipo di cemento, di inerte e di  $\delta$ ), e la composizione calcolata con il procedimento del *mix-design*.

Se lo stesso calcestruzzo dovesse essere confezionato in conformità al controllo di tipo A previsto dalla legge 1086 ( $K\delta = 3,5$  MPa) la  $R_{cm28}$  risulterebbe:

$$R_{cm28} = 20 + 3,5 = 23,5 \text{ MPa}$$

TABELLA 1

#### PRESTAZIONI, DISPONIBILITÀ E COMPOSIZIONE DEL CALCESTRUZZO PER IL CONTROLLO DI TIPO B

Prestazioni richieste dal progetto	Disponibilità dell'impianto di betonaggio	Composizione del calcestruzzo
$R_{ck} = 20 \text{ MPa}$	cemento Portland 425	$a = 190 \text{ kg/m}^3$
slump = 15 cm	inerte con $D_{max} = 38 \text{ mm}$	$c = 280 \text{ kg/m}^3$
controllo di tipo B	$\delta = 7 \text{ MPa}$	$i = 1920 \text{ kg/m}^3$

Per ottenere questa resistenza meccanica con lo stesso cemento Portland 425 è necessario adottare un rapporto  $a/c$  di 0,77, minore di quello impiegato per il controllo di tipo B (0,68).

Pertanto:

$$\frac{a}{c} = 0,77; \quad \frac{190}{c} = 0,77; \quad c = \frac{190}{0,77} = 247 \text{ kg/m}^3$$

Il volume di inerte ( $V_i$ ), calcolabile al solito per differenza tra il volume del calcestruzzo (1000 litri) e quello degli altri componenti, risulta:

$$V_i = 1000 - 247/3,15 - 190 - 10 = 721 \text{ l/m}^3$$

Assumendo per l'inerte una massa volumica apparente di 2,7 kg/l, si ottiene:

$$i = 721 \cdot 2,7 = 1948 \text{ kg/m}^3$$

Nella Tabella 2 sono riassunte le prestazioni, le disponibilità e la composizione del calcestruzzo adottando il controllo di tipo A.

Come si può vedere, ad uno stesso valore di  $R_{ck}$  (20 MPa) corrispondono di fatto due valori di resistenza meccanica media (30 e 23,5 MPa) a seconda del tipo di controllo (A o B) previsto dalla legge N° 1086. Ne consegue, pertanto, che anche la composizione del calcestruzzo, ed in particolare il dosaggio di cemento, è funzione del tipo di controllo adottato.

Val la pena anche di precisare che le altre caratteristiche del calcestruzzo quali il ritiro, lo sviluppo di calore, la deformazione viscosa, ecc. risulteranno anch'esse diverse a seconda della composizione scelta in conformità al tipo di controllo A o B prescelto. Il *mix-design* consente appunto, avvalendosi di altre correlazioni, qui non discusse per brevità, di calcolare anche queste altre importanti proprietà del calcestruzzo.

Come secondo esempio viene descritto il caso di un *mix-design semplice aperto* dove, accanto alla precisazione della  $R_{ck}$  (20 MPa), del diametro massimo (19 mm), dello *slump* (15 cm), del tipo di controllo (B), non viene precisata la classe di cemento Portland.

Si supponga di voler produrre il calcestruzzo o con cemento Portland 325 o con cemento Portland 425 in un impianto di betonaggio che, come nell'esempio precedente, presenti uno scarto quadratico medio di 7 MPa.

Si ricava pertanto:

$$R_{cm28} = 20 + 1,4 \cdot 7 = 30 \text{ MPa}$$

Dalla Fig. 2 si ricava che i rapporti  $a/c$  necessari al conseguimento di questo obiettivo sono:

TABELLA 2

PRESTAZIONI, DISPONIBILITÀ E COMPOSIZIONE DEL CALCESTRUZZO PER IL CONTROLLO DI TIPO A

Prestazioni richieste dal progetto	Disponibilità dell'impianto di betonaggio	Composizione del calcestruzzo
$R_{ck} = 20 \text{ MPa}$	cemento Portland 425	$a = 190 \text{ kg/m}^3$
<i>slump</i> = 15 cm	inerte con $D_{max} = 38 \text{ mm}$	$c = 250 \text{ kg/m}^3$
controllo di tipo A	$K\delta = 3,5 \text{ MPa}$	$i = 1950 \text{ kg/m}^3$

$$\frac{a}{c} = 0,63 \text{ con } t_c = 325 \text{ Pt} \quad \frac{a}{c} = 0,68 \text{ con } t_c = 425 \text{ Pt}$$

Dalla Fig. 3 si ricava che, con l'inerte di  $D_{max} = 19 \text{ mm}$ , occorrono 215 kg/m<sup>3</sup> di acqua per ottenere lo *slump* di 15 cm.

Pertanto:

$$c = \frac{215}{0,63} = 341 \text{ kg/m}^3 \quad \text{con } 325 \text{ Pt};$$

$$c = \frac{215}{0,68} = 316 \text{ kg/m}^3 \quad \text{con } 425 \text{ Pt};$$

Poiché il volume di aria è in entrambi i casi del 2% (Fig. 4) e cioè pari a 20 l/m<sup>3</sup>, si calcola per il peso di inerte ( $i$ ):

$$i = V_i 2,7 = (1000 - 341/3,15 - 215 - 20) \cdot 2,7 = 1774 \text{ kg/m}^3 \quad \text{con } 325 \text{ Pt}$$

$$i = V_i 2,7 = (1000 - 316/3,15 - 215 - 20) \cdot 2,7 = 1795 \text{ kg/m}^3 \quad \text{con } 425 \text{ Pt}$$

Queste sono in sostanza le due composizioni alternative:

$$\begin{aligned} a &= 215 \text{ kg/m}^3 \\ c &= 340 \text{ kg/m}^3 \\ i &= 1775 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad \text{con cemento } 325 \text{ Pt}$$

$$\begin{aligned} a &= 215 \text{ kg/m}^3 \\ c &= 315 \text{ kg/m}^3 \\ i &= 1795 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad \text{con cemento } 425 \text{ Pt}$$



## BIBLIOGRAFIA

- [1] LYDON F.D.: "Concrete Mix Design", Applied Science Publisher, London 1972.
- [2] NEVILLE A.M.: "Properties of Concrete", Pitman Publishing, London, 1975.
- [3] ACI Committee 211: "Standard Practice for Selecting Pro-

portions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete," *ACI Manual of Concrete Practice 1986*, Part 1, 211, Detroit, (1986).

- [4] COLLEPARDI M.: "Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo", 2<sup>a</sup> Ed. Hoepli, Milano, 1987.
- [5] COLLEPARDI M., COPPOLA L.: "Mix-Design del Calcestruzzo", Ed. Enco, Spresiano, 1990.

## APPENDICE: lista dei simboli adottati

$a$	peso dell'acqua per m <sup>3</sup> di calcestruzzo.
$a'$	volume di aria in percentuale sul volume di calcestruzzo
$D$	condizioni dettate dalla durabilità.
$D_{max}$	diametro massimo dell'inerte.
$G$	peso di inerti grossi s.s.a. per m <sup>3</sup> di calcestruzzo.
$K$	fattore di probabilità.
$L$	lavorabilità del calcestruzzo.
$\nu_c$	massa volumica del cemento.
$\nu_{ia}$	massa volumica apparente dell'inerte s.s.a.
$\nu_{sa}$	massa volumica apparente della sabbia s.s.a.
$\nu_{Ga}$	massa volumica apparente dell'inerte grosso s.s.a.
$R$	resistenza meccanica.
$R_c$	resistenza meccanica a compressione.
$R_{cm}$	resistenza meccanica a compressione media
$R_{ck}$	resistenza caratteristica di progetto.

$R_{cm28}$	$R_{cm}$ a 28 giorni.
$s$	peso di sabbia s.s.a. per m <sup>3</sup> di calcestruzzo.
s.s.a.	inerte in condizioni di saturo a superficie asciutta.
$S$	ritiro ( <i>Shrinkage</i> , in inglese).
$t$	tempo di stagionatura.
$t_c$	tipo di cemento.
$V_a$	volume dell'acqua per m <sup>3</sup> di calcestruzzo.
$V_{a'}$	volume di aria per m <sup>3</sup> di calcestruzzo.
$V_c$	volume del cemento.
$V_{cls}$	volume del calcestruzzo.
$V_i$	volume dell'inerte (sabbia + inerte grosso).
$V_s$	volume della sabbia.
$V_G$	volume dell'inerte grosso.
$\delta$	scarto quadratico medio.
325 Pt	cemento Portland ordinario.
425 Pt	cemento Portland ad alta resistenza.
525 Pt	cemento Portland ad alta resistenza e rapido indurimento.