

Il calcestruzzo e il mix-design

Il calcestruzzo si ottiene miscelando in diverse proporzioni, a seconda delle caratteristiche richieste dal suo uso, degli aggregati (sabbia e ghiaia) e del cemento con acqua ed eventuali acceleranti di presa.

6.1 Gli aggregati.

Gli aggregati si distinguono, in base alla granulometria, in sabbia, con dimensioni inferiori ai 4-5 mm, e in ghiaia, con dimensioni superiori a quelle della sabbia.

Questi aggregati devono rispondere ad alcune caratteristiche per poter essere utilizzati nella composizione del calcestruzzo.

La sabbia dovrebbe essere preferibilmente silicea, a grana ruvida e con elementi di diametro assortito, senza la presenza di parti fangose o terrose.

La sabbia naturale od artificiale deve essere costituita di grani resistenti non provenienti da rocce decomposte o gessose, oltre a non contenere elementi dannosi per il calcestruzzo, come materiale organico.

La ghiaia costituisce la parte grossa dell'impasto e influenza le sue proprietà. Quindi non deve contenere impurità (fango, terriccio, polvere); è importante che abbia superfici scabre e che non sia costituita di materiale gelivo o friabile.

È importante evitare le rocce alterabili, micacee, scistose, feldspatiche, perché possono dare una lenta decomposizione del calcestruzzo.

Inoltre la ghiaia deve essere bene assortita, come si è detto costituita da materiali resistenti e non gelivi.

Il calcestruzzo a contatto con soluzioni acide, basiche o saline viene sempre intaccato, più o meno seriamente; anche oli grassi, sostanze zuccherine e altre ancora (cloruro, solfato, silice alcali-reattiva, limi argillosi, sostanze organiche, ...) possono essere dannose per il calcestruzzo.

L'influenza che queste sostanze hanno sul calcestruzzo deriva dalla loro concentrazione, ma anche dal tipo di aggregati che costituiscono il calcestruzzo, oltre che dalle condizioni ambientali in cui avviene l'attacco. Proprio per questo si raccomanda l'uso di sabbie silicee e di ghiaie analoghe, con pezzatura adatta alla realizzazione di un calcestruzzo compatto che quindi risulta meno attaccabile.

Per scegliere opportunamente gli aggregati, questi devono essere sottoposti a prove differenti a seconda della sostanza di cui si indaga la presenza [7].

6.1.1 La granulometria.

Come si è detto la granulometria degli aggregati è molto importante. Essa viene determinata per vagliatura (v. Capitolo 3).

Per ottenere un conglomerato con la massima densità possibile, la curva granulometrica completa degli aggregati dovrebbe seguire la seguente formula, proposta da Füller e Thompson:

$$P = \sqrt{\frac{d}{D_{MAX}}} \cdot 100$$

dove P è la percentuale di passante al setaccio con apertura d e D_{MAX} è il diametro massimo dell'aggregato analizzato.

Assumendo come diametro massimo per l'aggregato un valore pari a 19.1 mm, si otterrà una curva come quella in Figura 6.1.

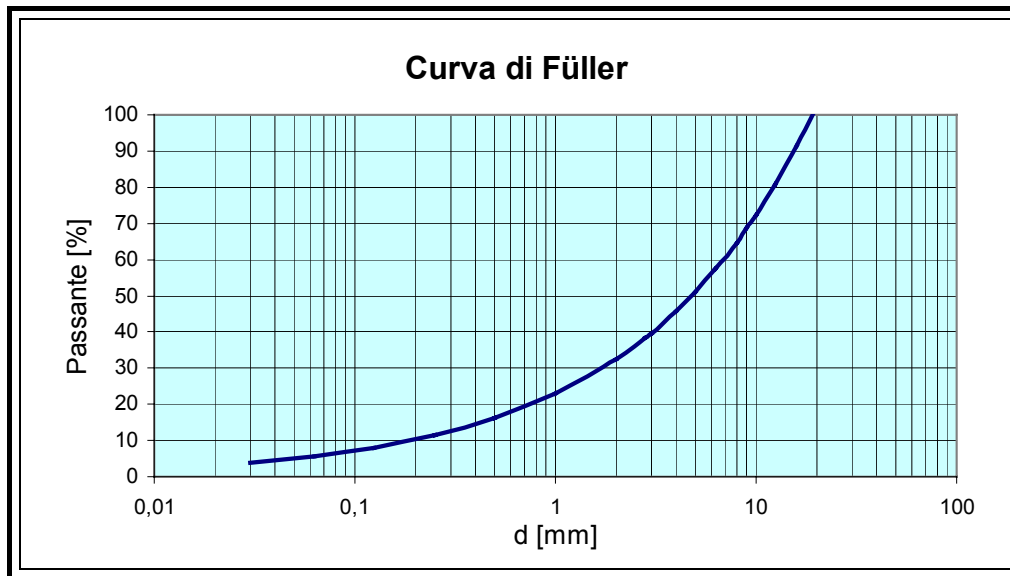


Figura 6.1 – Curva di Füller

Con questa espressione, però, si ottiene un calcestruzzo a massima densità, nel quale, cioè si raggiunge il massimo “impacchettamento” dei granuli possibile.

Per queste sue caratteristiche, quindi, il calcestruzzo risulterà poco lavorabile, richiedendo in cantiere mezzi di compattazione molto efficienti.

Bolomey propose una modifica a questa formula, con l'introduzione di un parametro funzione della lavorabilità richiesta e del tipo di aggregato disponibile.

La formula di Bolomey si presenta così:

$$P = A + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{MAX}}}$$

dove P è ancora il passante al setaccio di apertura d, D_{MAX} è la massima dimensione dell'aggregato considerato e A è il parametro funzione di aggregato e lavorabilità (v. Tabella 6.1).

Tabella 6.1 – Valori del parametro A

Tipo di aggregato	Valore di A per calcestruzzi con consistenza di:		
	Terra umida	Plastica semifluida	Fluida superfluida
Alluvionali	8	10	12
Frantumati	10	12	14

Il parametro A cresce all'aumentare della lavorabilità e anche passando da aggregati alluvionali, più tondeggianti, ad aggregati frantumati, più irregolari.

Inoltre un aumento di A fa sì che aumenti anche la quantità di fini presenti nell'aggregato.

Assumendo come diametro massimo per l'aggregato una valore pari a 19.1 mm, con un aggregato frantumato, si otterranno due curve come quelle in Figura 6.2, a seconda della lavorabilità (parametro A).

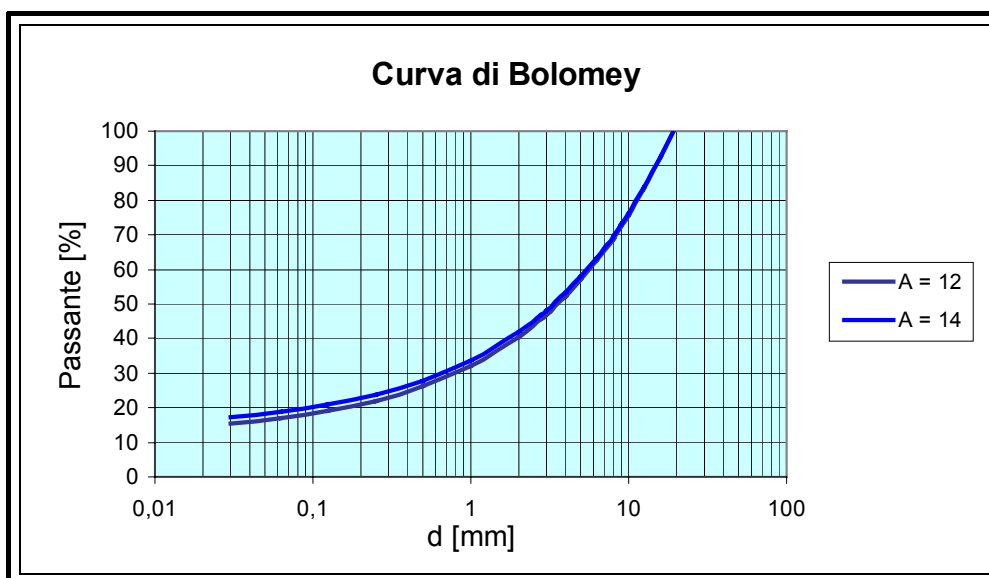


Figura 6.2 – Curva di Bolomey

Le curve di Füller e Bolomey differiscono tra loro nella quantità di fini (maggiore per quella di Bolomey) e quindi anche nella quantità di ghiaia (maggiore per quella di Füller).

In genere si utilizza la curva di Bolomey per calcestruzzi più lavorabili o che si debbano pompare.

Nella scelta del valore del diametro massimo per l'aggregato si deve tener conto di alcuni fattori:

- Il diametro massimo non deve superare il 25% della sezione minima della struttura;
- Esso non deve superare la distanza tra i ferri di armatura diminuita di 5 mm;
- Non deve inoltre superare del 30% lo spessore del copriferro.

6.1.2 La combinazione di più granulometrie.

Spesso, come in questo caso, sono fornite le granulometrie di alcune classi di aggregati e non la composizione continua (in un'unica classe da 0 mm a D_{MAX}).

Occorre quindi risalire alla combinazione ottimale di queste classi, prese in diverse percentuali, che dia la granulometria migliore per il calcestruzzo (ossia più prossima ad una delle curve teoriche viste nel paragrafo precedente).

Si è quindi proceduto partendo dalle tre classi granulometriche analizzate in precedenza (v. Capitolo 3). A partire dalla granulometria a disposizione per ognuna classe si è estesa la curva fino ai due estremi del passante (0% e 100%), in modo che tutte e tre le classi granulometriche a disposizione avessero un valore di passante (anche nullo) per tutte le aperture degli stacci utilizzati (anche di dimensioni differenti da quella della classe considerata).

In questo modo si sono ottenute le seguenti curve granulometriche estese:

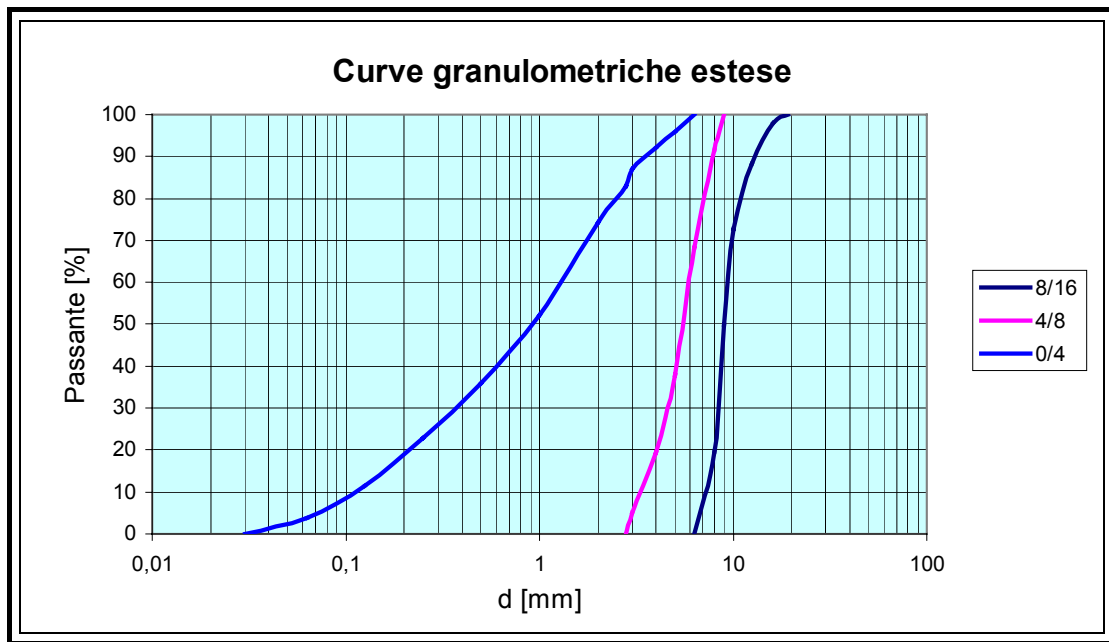


Figura 6.3 – Curve granulometriche estese

Fatto questo è stato sufficiente elaborare tutte le possibili combinazioni delle tre classi e moltiplicare per le varie percentuali le tre granulometria di base.

In seguito, prendendo a riferimento la curva di Bolomey con parametro $A = 14$ (aggregato frantumato, per calcestruzzo con consistenza fluida superfluida), si è potuto valutare tra tutte le possibili combinazioni quella che presentava la minore distanza dalla curva ideale.

Per calcolare questo errore si è fatto ricorso ai minimi quadrati:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{teoricoi})^2}{n - 1}$$

dove E è l'errore, ossia la distanza della curva granulometrica considerata da quella teorica, P_i è il passante al setaccio i per quella combinazione delle tre classi, $P_{teoricoi}$ è il passante al setaccio i secondo la curva granulometrica di Bolomey, n è il numero di setacci utilizzati.

Da questa analisi è risultato che la composizione delle tre classi granulometriche di partenza che più si avvicina alla curva di Bolomey è la seguente:

Tabella 6.2 – Composizione ottimale

Classe granulometrica [mm]	Percentuale [%]
0/4	45
4/8	10
8/16	45

Ossia si ha una percentuale di sabbia del 45% e una percentuale di ghiaia del 55%.

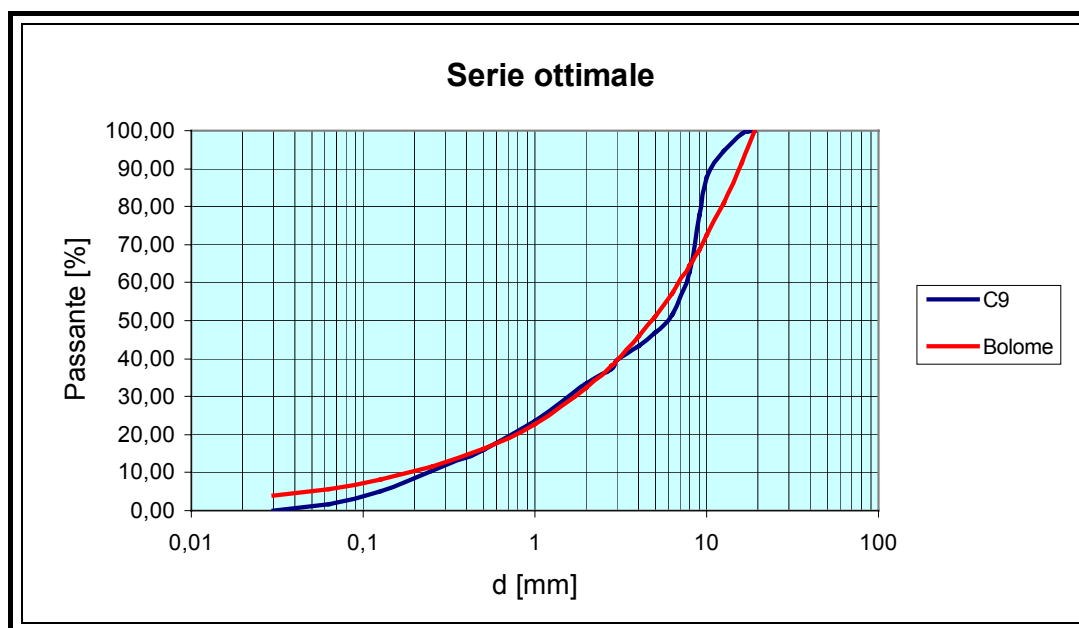


Figura 6.4 – Curva granulometrica ideale

6.2 L'acqua e il mix-design.

L'acqua è un elemento importante nel confezionamento del calcestruzzo. Senza di essa non è possibile l'indurimento, ma un eccesso di acqua determina una riduzione delle caratteristiche di resistenza meccanica del calcestruzzo stesso.

Per questi motivi l'acqua è uno degli elementi di cui si deve tenere conto nel mix-design.

Il mix-design è il progetto della miscela: permette di valutare il dosaggio dei singoli elementi che entrano a far parte del calcestruzzo, sulla base delle caratteristiche che quest'ultimo deve avere.

I principi fondamentali del mix-design sono due, due regole di base entrambe legate alla quantità di acqua impiegata per il confezionamento del calcestruzzo.

6.2.1 La regola di Lyse.

La regola di Lyse fa riferimento alla quantità di acqua necessaria al confezionamento di calcestruzzi con differente consistenza [1].

Le classi di consistenza cui si fa riferimento corrispondono ad un intervallo di lavorabilità espressa per mezzo dello *slump*.

Prima di definire le classi di consistenza di riferimento è importante definire la lavorabilità.

La lavorabilità è la caratteristica che indica la capacità del calcestruzzo fresco a muoversi e a compattarsi. Essa influenza le prestazioni del calcestruzzo in servizio.

Per misurare la lavorabilità si utilizza generalmente lo *slump* test, che consiste nel misurare l'abbassamento del calcestruzzo sformato da un tronco di cono metallico (il cono di Abrams) rispetto all'altezza dello stesso calcestruzzo costipato in modo standardizzato all'interno di un cono alto 300 mm.



Figura 6.5 – Calcestruzzi a classe di consistenza crescente da destra a sinistra accanto al cono di Abrams

La scelta della lavorabilità appropriata per l’opera da realizzare è funzione del tipo di struttura e della tecnica costruttiva che si intende utilizzare (per alcuni esempi v. Tabella 6.3).

Tabella 6.3 – Classe di consistenza richiesta per alcune tipologie strutturali

Classe di consistenza	Slump [mm]	Applicazioni
S1 (terra umida)	10-40	Pavimenti messi in opera con vibro-finitrice
S2 (plastica)	50-90	Strutture circolari (silos, ciminiere) messe in opera con casseri rampanti
S3 (semi-fluida)	100-150	Strutture non armate o poco armate o con pendenza
S4 (fluida)	160-210	Strutture mediamente armate
S5 (super-fluida)	> 210	Strutture fortemente armate, di ridotta sezione e/o complessa geometria

In generale si può dire che una maggiore lavorabilità garantisce una esecuzione più affidabile, rapida e soprattutto semplice.

La regola di Lyse si può enunciare in due modi differenti e tra loro complementari:

- Per un dato diametro massimo dell'aggregato, maggiore è la classe di consistenza richiesta per il calcestruzzo fresco, maggiore deve essere la quantità di acqua nell'impasto;
- Per una data classe di consistenza del calcestruzzo, maggiore è il diametro massimo dell'aggregato, minore è la richiesta d'acqua per conseguire la consistenza prefissata.

Questi enunciati si chiariscono da soli osservando i dati di richiesta d'acqua proposti nella Tabella 6.4.

Tabella 6.4 – Richiesta d'acqua in funzione del diametro massimo dell'aggregato e della classe di consistenza

Diametro [mm]	Richiesta d'acqua [kg/m ³]				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

Questi valori di acqua di impasto subiscono delle variazioni a seconda che l'aggregato si di derivazione alluvionale o di frantumazione:

- Se l'aggregato è di derivazione alluvionale, con grani tondeggianti, questi valori vanno ridotti di 10 kg/m³;
- Se l'aggregato deriva da frantumazione, i valori vanno aumentati di 10 kg/m³.

6.2.2 La legge di Abrams.

La legge di Abrams risale al 1918 e lega tra loro il rapporto acqua/cemento con la resistenza meccanica [1].

Secondo questa legge, infatti, la resistenza meccanica ad una determinata stagionatura e ad una determinata temperatura aumenta al diminuire del rapporto acqua/cemento, secondo la seguente equazione:

$$R = \frac{K_1}{K_2^{a/c}}$$

dove R è la resistenza meccanica a compressione, K_1 e K_2 sono due costanti che dipendono dal tipo di cemento e dal tempo e dalla temperatura di stagionatura, a/c è il rapporto acqua/cemento.

Questa relazione vale a condizione che il calcestruzzo sia stato compattato al massimo (la resistenza a compressione diminuisce proporzionalmente al grado di compattazione).

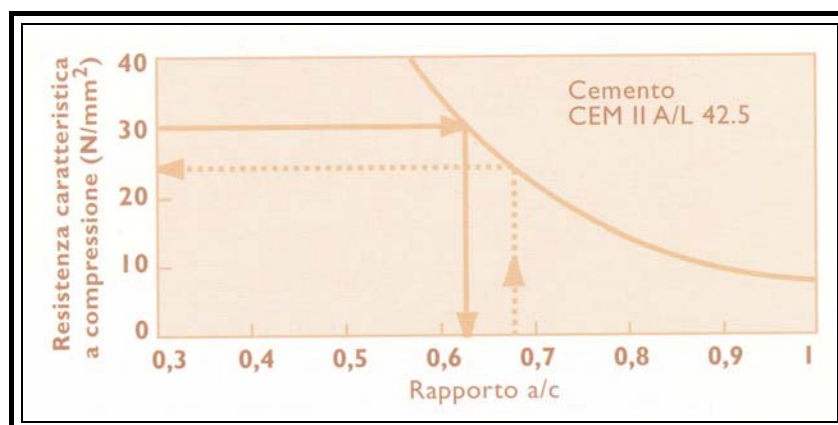


Figura 6.6 – Resistenza caratteristica in funzione del rapporto a/c

6.3 Il mix-design, ovvero il progetto della miscela.

Il mix-design è il progetto della miscela del calcestruzzo, ovvero il calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili [1].

La base di questo progetto sono alcune correlazioni sperimentali esistenti tra la composizione e le prestazioni del calcestruzzo:

- Il quantitativo di acqua (indicato con a , in kg/m^3) dipende dalla lavorabilità del cemento fresco, dal tipo di aggregato (ovvero dalla sua origine), dalla sua dimensione (massima) e dalla presenza di additivi;
- Il rapporto tra la quantità di acqua e quella di cemento che occorre adottare (indicato con a/c) dipende dalla resistenza meccanica del conglomerato indurito (R_{ck}), dal tipo e dalla classe del cemento;
- Il rapporto a/c dipende anche dalla durabilità del conglomerato indurito in relazione al grado di aggressione ambientale (classe di esposizione) cui la struttura è esposta; sempre dalla classe di esposizione dipende la necessità di impiegare un valore di aria (indicato con a') per contrastare l'eventuale formazione di ghiaccio;
- Noto il valore di a (ossia della quantità d'acqua) e calcolato il valore di c (ossia della quantità di cemento) si può calcolare il volume di aggregato (indicato con V_i) per differenza rispetto ad un volume di calcestruzzo (in genere 1 m^3);
- Il volume totale dell'aggregato viene poi suddiviso in quello dei singoli aggregati (sabbia e ghiaia) sulla base delle curve granulometriche di queste classi rispetto alla curva di riferimento (Füller o Bolomey); ottenuti i volumi delle singole classi granulometriche sarà possibile calcolare semplicemente la massa di ciascuna di queste.

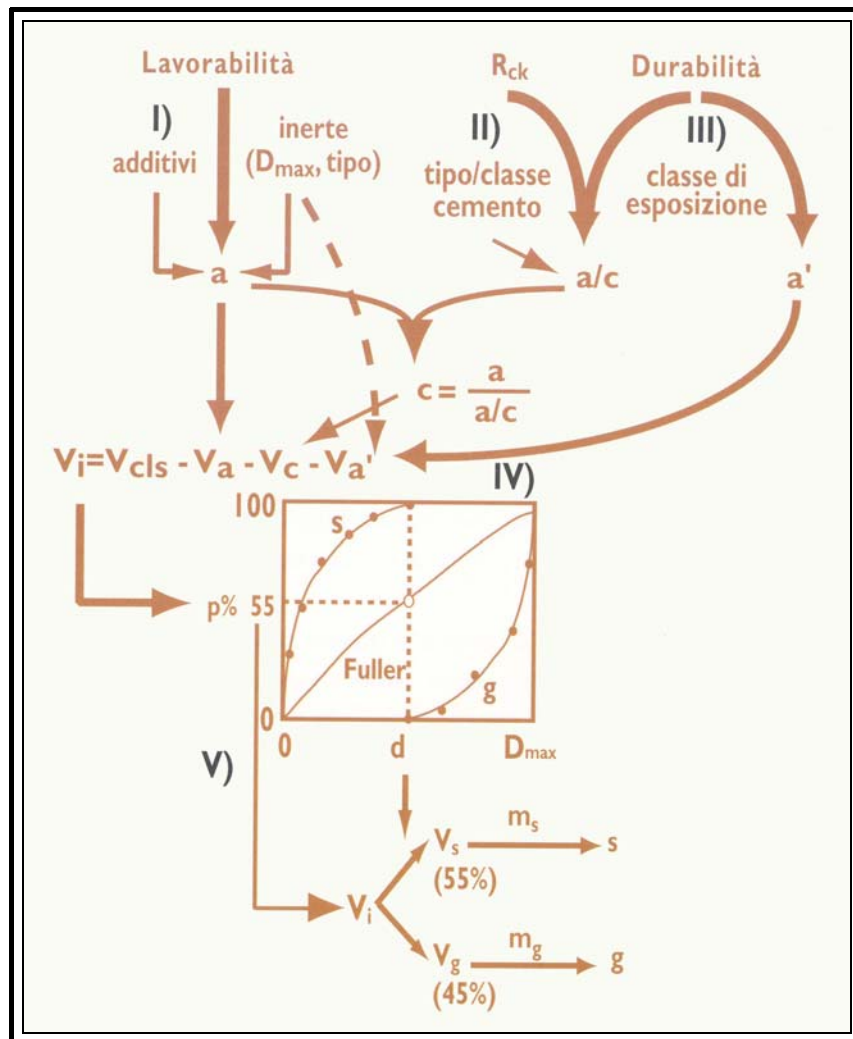


Figura 6.7 – Schematizzazione del processo di mix-design attraverso le precedenti correlazioni

6.3.1 La lavorabilità e l'acqua, gli aggregati e gli additivi.

Come già visto con la regola di Lyse, all'aumentare della lavorabilità richiesta, in termini di *slump*, occorre aumentare la quantità d'acqua nell'impasto (a).

Le curve cui fare riferimento dipendono dal diametro massimo dell'aggregato (v. Tabella 6.4). Si ricordi inoltre, che il contorno dei grani risulta influente sulla stessa quantità d'acqua: infatti, un contorno irregolare presenta un attrito maggiore rispetto ad uno tondeggiante, verso la matrice cementizia, richiedendo meno acqua per avere la stessa lavorabilità.

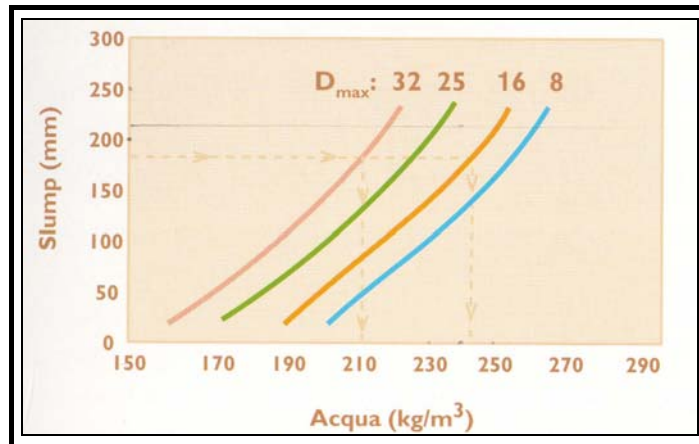


Figura 6.8 – Influenza del diametro massimo dell’aggregato sulla correlazione *slump* – acqua di impasto

L’uso di additivi può ridurre la quantità di acqua richiesta per ottenere un determinato *slump* con un dato aggregato: tale riduzione è funzione di tipo e dosaggio dell’additivo.

6.3.2 La resistenza caratteristica, il cemento e il rapporto acqua/cemento.

Come si è visto con la legge di Abrams, la resistenza caratteristica del calcestruzzo, ovvero l’ R_{ck} , aumenta al diminuire del rapporto acqua/cemento (a/c).

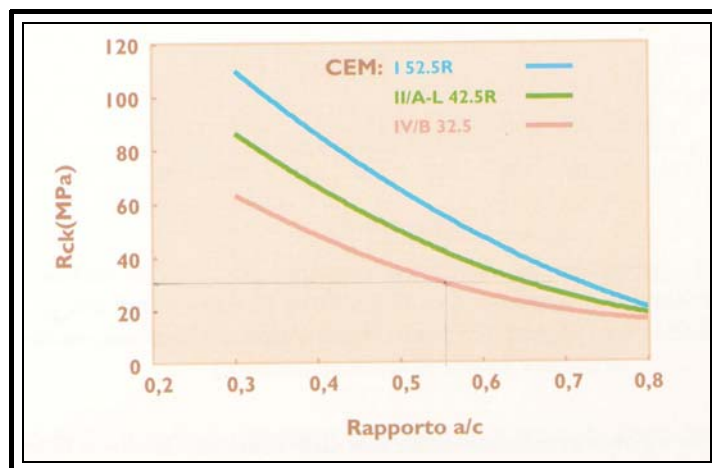


Figura 6.9 – Correlazione della R_{ck} con il rapporto a/c per tre diversi tipi di cemento

La correlazione tra la resistenza a compressione dipende però anche da altri due fattori:

- Il tipo di cemento usato;
- La classe cui appartiene il cemento utilizzato.

È possibile, tuttavia, raggruppare i vari cementi in tre soli gruppi, in funzione della classe di resistenza e indipendentemente dal tipo, per quanto riguarda la valutazione della correlazione tra R_{ck} e a/c :

- Una classe per i cementi di classe 52.5 e 52.5R;
- Una classe per i cementi di classe 42.5 e 42.5R;
- Una classe per i cementi di classe 32.5 e 32.5R.

6.3.3 La durabilità, l'aria inglobata e il rapporto acqua/cemento.

La normativa dà molta importanza alla durabilità, concentrando l'attenzione su tre punti:

- Classificare gli ambienti in base al loro carattere aggressivo nei confronti del calcestruzzo o della sua armatura (si individuano delle classi di esposizione);
- Adottare un rapporto acqua/cemento (indicato con a/c^*) più basso tanto maggiore è il livello di aggressione ambientale, in modo da ottenere un calcestruzzo impermeabile agli agenti aggressivi;
- Inglobare aria, sotto forma di microbolle uniformemente distribuite nella matrice cementizia, per proteggere i calcestruzzi esposti a cicli di gelo e disgelo.

Per la durabilità delle strutture è anche importante permettere al calcestruzzo di stagionare ad umido per un periodo minimo, o comunque di trascorrere un periodo in cui viene protetto dall'evaporazione. Questo periodo deve essere tanto più lungo tanto più il clima, al momento dello scasso, è asciutto e freddo.

Individuata la classe di esposizione ambientale (ma si può anche far riferimento alla resistenza a compressione e sulla base di questa valutare il conseguente rapporto) si

può individuare il rapporto acqua/cemento (a/c^*) da non superare nel confezionamento del calcestruzzo per evitare di alterare la durabilità dell'opera.

Il valore così trovato deve essere confrontato con il rapporto acqua/cemento che si era ricavato sulla base della resistenza a compressione (R_{ck}).

Ovviamente si hanno tre situazioni differenti:

- Il valore di a/c^* (che dipende dalla durabilità) coincide con il rapporto a/c (che dipende dalla R_{ck}); in questo caso la scelta è univoca;
- Il valore di a/c^* (che dipende dalla durabilità) è maggiore del rapporto a/c (che dipende dalla R_{ck}); in questo caso la scelta è per il valore di a/c , che soddisfa entrambi i vincoli;
- Il valore di a/c^* (che dipende dalla durabilità) è minore del rapporto a/c (che dipende dalla R_{ck}); in questo caso la scelta è per il valore di a/c^* , che soddisfa entrambi i vincoli.

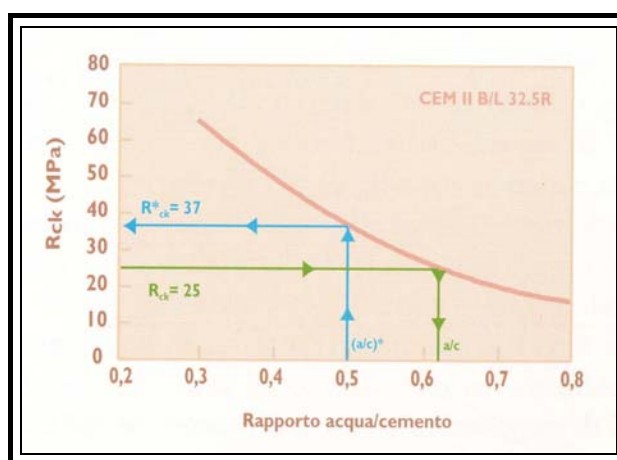


Figura 6.10 – Scelta della effettiva resistenza caratteristica per ragioni di durabilità

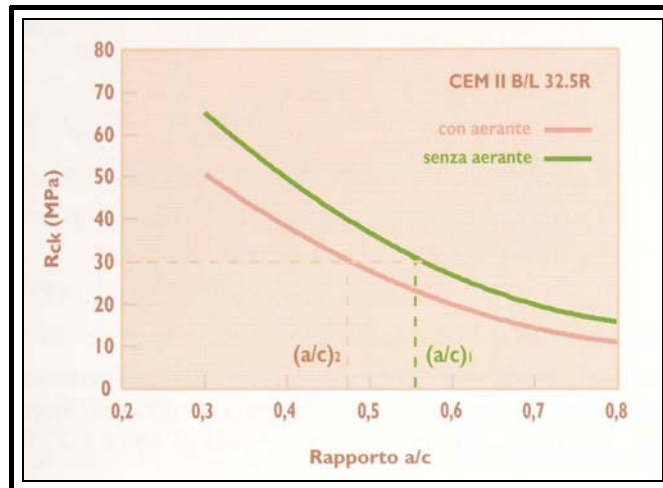


Figura 6.11 – Correlazione tra resistenza caratteristica e rapporto acqua – cemento con e senza aerante

6.3.4 Gli aggregati a disposizione.

Noti i quantitativi di acqua e il suo rapporto con il cemento, è possibile calcolare il volume totale dell'aggregato con la seguente, semplice, formula:

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

dove V_a e V_c sono i volumi di acqua e cemento e $V_{a'}$ è il volume di aria in litri, pari a 10 volte la percentuale di aria prevista nel confezionamento del calcestruzzo.

Ponendo, come detto, il volume del calcestruzzo pari a 1 m^3 si avrà, più semplicemente:

$$V_i = 1000 - a - \left(\frac{c}{3.1} \right) - 10 \cdot a'$$

dove 3.1 è la massa volumica del cemento.

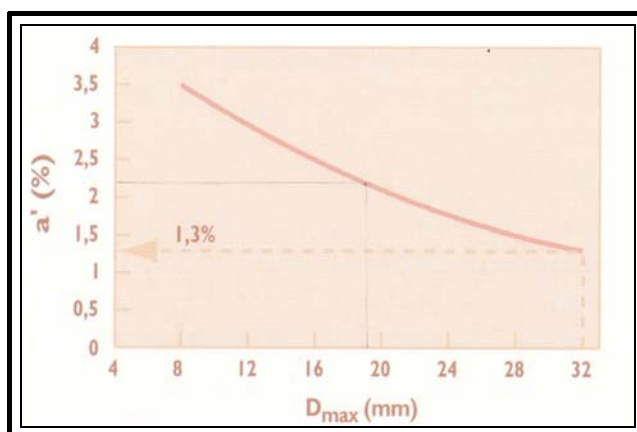


Figura 6.12 – Volume di aria intrappolata nel calcestruzzo compattato a rifiuto in funzione del diametro massimo dell'inerte

Ottenuto il volume degli aggregati occorre ora suddividerlo nei volumi di sabbia e ghiaia: per fare questo occorre conoscere le curve granulometriche della sabbia e della ghiaia oppure fare riferimento ad una curva ideale.

È possibile calcolare, note le curve granulometriche rispettive, i volumi di sabbia e ghiaia per metro cubo di calcestruzzo: moltiplicando poi per le corrispondenti masse volumiche si ottengono le masse di sabbia e ghiaia necessarie a realizzare il calcestruzzo di caratteristiche desiderate.

Questo è uno schema generale di mix-design: esso può essere approfondito per determinare altre proprietà del calcestruzzo (ad esempio il ritiro, la deformazione viscosa, il modulo elastico, ...).

6.4 Il caso esaminato.

In questo caso particolare si è proceduto al mix-design a partire dalle seguenti caratteristiche:

Tabella 6.5 – Caratteristiche di partenza per il mix-design

Caratteristica	Valore
<i>Slump</i>	S4
D _{MAX} [mm]	31.5
R _{ck} [MPa]	35

A partire da questi dati, e procedendo come prima spiegato si sono ottenuti tutti i valori necessari al calcolo delle quantità di aggregati necessarie per ottenere un calcestruzzo con le caratteristiche riportate in Tabella 6.5.

Per quanto riguarda la quantità d'acqua, sulla base di quanto indicato in Tabella 6.4, in corrispondenza del diametro massimo indicato e della classe di consistenza prescelta si avrà il seguente valore:

$$a = 210 \text{ [kg/ m}^3\text{]}$$

cui occorre aggiungere i 10 [kg/m³] previsti per gli aggregati che derivano da frantumazione, per un totale di:

$$a = 220 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Sulla base, poi, della resistenza a compressione si è potuto ricavare il rapporto acqua cemento.

Dal grafico si desume un valore pari a:

$$a/c = 0.51$$

Diventa quindi possibile calcolare la quantità di cemento necessaria per realizzare un metro cubo di calcestruzzo:

$$c = \frac{a}{a/c} = 431.37 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Proseguendo secondo lo schema proposto, con una quantità d'aria inglobata pari a:

$$a' = 1.7 \%$$

si avrà necessità di un volume di aggregati pari a:

$$V_i = 1000 - 220 - \frac{431.37}{3.1} - 10 \cdot 1.7 = 623.85 \text{ [l/m}^3\text{]}$$

Questi aggregati devono poi essere ripartiti in sabbia e ghiaia, secondo la granulometria ottimale individuata in precedenza per la discenderia di Modane (v. § 6.1.2), che prevedeva una percentuale di sabbia del 45% e una percentuale di ghiaia del 55% (ripartita per il 10% sulla classe 4/8 mm e per il restante 45% sulla classe 8/16 mm).

In questo modo, moltiplicando poi ancora per le masse volumiche degli aggregati si ottiene la massa della sabbia e della ghiaia necessarie per realizzare un metro cubo di calcestruzzo:

$$m_{\text{totale}} = 1.622 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Sarà ora possibile valutare quanto materiale sia ricavabile dallo scavo della galleria di base e quanto invece debba essere acquistato sul mercato (v. Capitolo 8).