

Calcestruzzo ad Alta Resistenza Aspetti Tecnologici – Mix Design

Andrea Zecchini

1 Direzione Tecnologia Qualità – Resp. Tecnologico Territoriale Zona Lazio, Calcestruzzi SpA

SOMMARIO

Studio e valutazione degli aspetti tecnologici riguardanti la progettazione di una miscela ad Alta Resistenza Rck 85 per la fornitura da parte di Calcestruzzi SpA presso il Ponte della Musica (Roma).

Verranno valutate le prove effettuate in fase di pre-qualifica nei laboratori della Calcestruzzi SpA (Laboratorio Casilino) e le verifiche durante la fase di qualifica da parte del Committente presso l'impianto di produzione .

SUMMARY

Study and evaluation of technological aspects regarding the planning of the mixture high resistance Rck 85 for the supply from Calcestruzzi SpA to Ponte della Musica (Roma).

They will estimate the tests carried out in phase of pre-qualification in the laboratories of the Calcestruzzi SpA (Casilino Laboratory) and the verifications during the phase of qualification from the customer near the plant.

1 DEFINIZIONI

Il calcestruzzo strutturale viene identificato e classificato in riferimento alle sue prestazioni allo stato indurito mediante la resistenza caratteristica Rck verificata attraverso la prova a compressione effettuata su provini cubici o cilindrici.

Le normative di riferimento sia europee (1) che quelle italiane (2) suddividono il calcestruzzo attraverso la dicitura CXY/KZ in riferimento alla resistenza a compressione su provini cilindrici (CXY) e su provini cubici (KZ).

1.1 CLASSI DI RESISTENZA

I calcestruzzi con resistenza cubica superiore a 55 MPa vengono ulteriormente suddivisi nelle seguenti categorie (3):

- Calcestruzzi con resistenza cubica inferiore a 55 MPa e con rapporto a/c minore di 0.55 (Calcestruzzo ordinario o a resistenza normale – NR)
- Calcestruzzi con resistenza cubica superiore a 55 MPa ed inferiore a 75 MPa con rapporto a/c minore di 0.45 (Calcestruzzo ad alte prestazioni – AP)
- Calcestruzzi caratterizzati da un rapporto a/c minore di 0.35 e una resistenza cubica superiore a 75 MPa ed inferiore a 115 MPa (Calcestruzzo ad alta resistenza – AR)

I calcestruzzi AR sono caratterizzati da basso rapporto in peso acqua/legante (a/l), da alto dosaggio di legante, dall'impiego di aggiunte minerali reattive verso l'idrossido di calcio (ceneri volanti, argille calcinate, pozzolane naturali, microsilice) che intervengono sulle caratteristiche fisico-meccaniche e sulla durabilità del calcestruzzo e di additivi chimici superfluidificanti.

Il dosaggio del legante varia nell'intervallo 400 - 550 Kg/m³ e rappresenta il totale del cemento Portland più le aggiunte minerali attive. Il rapporto a/l è generalmente nell'intervallo 0,25 - 0,35.

2 MISCELA - CARATTERISTICHE

Per la fornitura relativa al Ponte della Musica è stato commissionato un calcestruzzo Rck 85 con diametro massimo 16 mm, la classe di esposizione ambientale scelta per l'opera XC4 e consistenza S5.

3 ESPERIENZA CALCESTRUZZI SPA

3.1 PROVE DI PRE-QUALIFICA

Presso il laboratorio centrale della zona Lazio sono state effettuate le prime verifiche e le prime analisi di fattibilità del calcestruzzo.

I primi studi di laboratorio avevano l'obiettivo di individuare materie prime tali da assicurare il rispetto

contemporaneo dei tre requisiti fondamentali di una miscela di calcestruzzo preconfezionato ad Alta Resistenza:

- Requisito Tecnologico – il ridotto rapporto acqua / cemento
- Requisito Reologico – Adeguata Lavorabilità e idoneo mantenimento di lavorabilità
- Requisito Meccanico – Resistenza a compressione di progetto

La scelta dei componenti e dei vari dosaggi per il calcestruzzo AR è ricaduta su:

- Aggregati di natura basaltica
- Cemento tipo 52.5 R Cem I
- Additivo superfluidificante
- Aggiunte di tipo II (Fumi di silice)

descritte nel prossimo capitolo.

3.1.1. MATERIE PRIME – AGGREGATI

Aggregato fine

I calcestruzzi ad alta resistenza hanno un quantitativo di legante cementizio superiore rispetto ai calcestruzzi ordinari l'apporto di particelle fini alla miscela richiesto alle sabbie, fondamentale per le formulazioni correnti, non è determinante per questo tipo di miscele dove la distribuzione granulometrica della sabbia non ha conseguenze sul bleeding e sulla segregazione ma bensì solo ed esclusivamente sulla richiesta d'acqua

Aggregato Grosso

La scelta dell'aggregato grosso risulta di fondamentale importanza per questo tipo di miscele dove il ridotto rapporto acqua/cemento (cc 0.30) conferisce alla matrice cementizia un livello di resistenza molto simile e a volte uguale a quello dell'aggregato stesso.

In questi casi ogni ulteriore riduzione del rapporto acqua/cemento non crea nessuna tipologia di vantaggio in termini di resistenza a compressione.

L'unica possibilità, in casi analoghi, è quella di cambiare la tipologia di aggregato con uno avente caratteristiche meccaniche migliori.

In fase di pre-qualifica della miscela, i risultati a compressione hanno precluso l'utilizzo di alcuni aggregati e quindi obbligatoriamente richiesto la loro sostituzione.

Di seguito sono stati riportati due tipologie di mix (A e B) e i relativi risultati in termini meccanici nei quali i componenti sono dosati in egual misura ma la tipologia di aggregato grosso, nel caso del mix B, è di natura basaltica (Tabella 1 – Figura 1).

Tabella 1 – Resistenze a compressione A e B

	R85 Con aggregati normali	R85 Con aggregati basaltici
3 gg	63	70.1
7 gg	78.7	84.5
14 gg	81	86.3
28 gg	81.4	87.8

Nota: I dati a compressione sono espressi in MPa

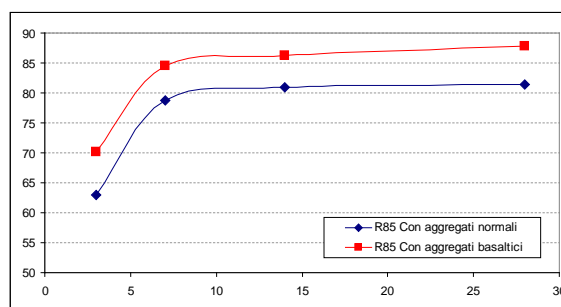


Figura 1 - Resistenze a compressione mix A e B

Come si può osservare lo sviluppo della resistenza nei calcestruzzi AR, con rapporti acqua /cemento inferiori a 0.35, risulta molto influenzato dalla natura litologica e dalle caratteristiche meccaniche dell'aggregato grosso.

La forma e la tessitura dell'aggregato grosso influenza, come l'aggregato fino, la reologia della miscela e la richiesta d'acqua. Viene preferita una tipologia di aggregato grosso con superficie frantumate perché queste generano una sorta di effetto incastro meccanico all'interno della miscela. Al contrario si preferisce evitare, anche nel caso di calcestruzzi ordinari, tipologie di aggregati con particelle aventi forme allungate, le quali potrebbero creare, in fase indurita, zone di disomogeneità con possibili piani di rottura preferenziali.

Cemento

Per questo tipo di prodotto è stato indispensabile utilizzare il cemento 52.5 R tipo Cem I in modo tale da garantire il requisito meccanico richiesto.

Aggiunte – Fumi di Silice

Il fumo di silice o microsilice è un sottoprodotto della fabbricazione di silicio e leghe ferro-silicio.

La microsilice, grazie alle sue caratteristiche, possiede svariate funzioni, le più riconosciute attualmente sono:

- Funzione "Fillerizzante"

La microsilice si presenta con particelle sferiche con dimensioni variabili tra lo 0.1 µm e 2 µm e superficie specifica (Blaine) con valori compresi tra 15000 e 25000 m²/kg, quindi con caratteristiche dimensionali 10 volte inferiori a quelle dei cementi normalmente utilizzati per la produzione di calcestruzzo.

Questo consente ai granuli di microsilice di collocarsi all'interno della matrice cementizia con la creazione di una struttura molto più compatta.

- Funzione "Pozzolonica"

Le caratteristiche mineralogiche e la composizione chimica della microsilice rendono il prodotto altamente reattivo e quindi valutabile, non solo come un'aggiunta di inerte all'interno della miscela, ma bensì un contributo al dosaggio del cemento.

L'impiego di fumo di silice costituisce un mezzo per innalzare e per conseguire la resistenza di progetto e la lavorabilità desiderata.

Microstruttura e zona di transizione

Nei calcestruzzi ordinari, quindi con rapporto a/c compreso tra 0.45 e 0.65, la microstruttura della matrice è caratterizzata da un'elevata porosità e da una zona di transizione con l'aggregato di circa 50µm. La zona di transizione si presenta con una porosità, una densità ed una morfologia completamente differente dalla matrice cementizia indisturbata (Figura 2).

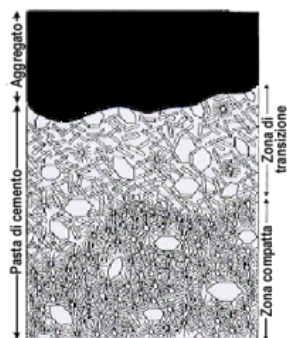


Figura 2 – Schema della zona di transizione (4)

Le differenze morfologiche e di densità comportano una “difettosità” all’interno della zona di interfaccia e questa causa un difficile trasferimento delle tensioni dalla pasta di cemento all’aggregato, la conseguenza di ciò è la scarsa influenza delle caratteristiche degli aggregati sulle proprietà della matrice legante.

Nei calcestruzzi AR la zona di interfaccia è praticamente nulla e le proprietà meccaniche dell’aggregato sono molto simili a quelle della pasta di cemento, questo comporta un migliore trasferimento delle tensioni tra matrice e aggregato, quindi un comportamento molto più elasto-lineare anche fino a tensioni molto vicine al carico di rottura.

L'utilizzo della microsilice comporta un aumento della durabilità dell'opera perché l'eliminazione totale o parziale della zona di transizione non permette agli elementi “dannosi” per il calcestruzzo di permeare all'interno dello stesso.

3.1.2. MISCELE DI PROVA

Qui di seguito sono elencate alcune prove effettuate nei laboratori Calcestruzzi SpA durante la progettazione dell'Rck 85 per la fornitura presso il Ponte della Musica.

Le miscele sono denominate A – B – C – D di seguito sono elencati i costituenti.

Tabella 2 – Componenti miscele

Componenti	UM	Miscele			
		A	B	C	D
Cemento 52.5 R Cem I	kg	530	530	480	530
Microsilice	kg			50	40
Sabbia	kg	526	654	745	630
Aggregato Grosso Ordinario	kg			908	
Aggregato Grosso Basaltico	kg	1140	1054		990
Add. Superfluidificante	Lt	8	6.9	7.2	10.6
Add. SRA	Lt			4.8	
Add. Espansivo	kg				20
MV Teorica	kg/mc	2382	2411	2364	2386

Per ogni singola miscela sono state verificate le caratteristiche reologiche attraverso la misurazione dell'abbassamento al cono di Abrams (UNI EN 12350-2) a intervalli prestabiliti (Tabella 3 – Figura 3).

Tabella 3 – Consistenza delle miscele

	Miscele			
	A	B	C	D
Slump a t 0	180	270	180	260
Slump a t 30	0	230	170	240
Slump a t 60	0	180	140	210

Nota: I dati sono espressi in mm di abbassamento

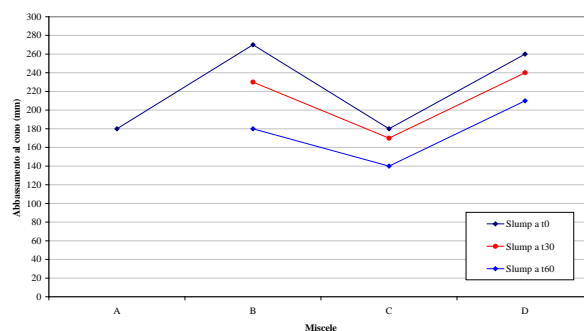


Figura 3 – Valutazione della consistenza (UNI EN 12350:2)

Successivamente sono state verificate le resistenze a compressione (UNI EN 12390-3) rispettivamente dopo 3, 7 e 28 giorni di maturazione alle condizioni standard (Tabella 4 – Figura 4).

Tabella 4 – Resistenze a Compressione delle miscele

	Miscele			
	A	B	C	D
Resistenza a Compressione	3 gg 78	80.5	63	71.3
Resistenza a Compressione	7 gg 80	82.3	78.7	86.8
Resistenza a Compressione	28 gg 84.6	86.5	81.4	106.3
Rapporto A/C eq	0.340	0.330	0.317	0.316

Nota: I dati sono espressi MPa.

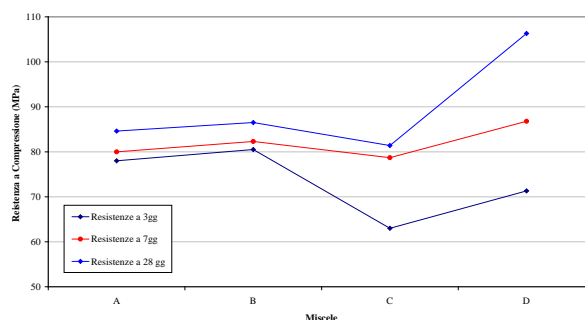


Figura 4 – Valutazione resistenze a compressione (UNI EN 12390:3)

Facendo le opportune considerazioni nei riguardi della tipologia di richiesta da parte del Committente e soprattutto in considerazione della tipologia di opera, della complessità e della densità di armatura all'interno dei piedritti, la miscela più idonea risulta la miscela D.

Un'altra considerazione da effettuare è nei riguardi della resistenza a compressione in termini di resistenza di progetto.

$$Rm_{target} = Rck + k * \sigma$$

$$Rm_{target} = 85 + (1.64 * 5) = 93.2MPa$$

Nella valutazione della resistenza di progetto è stata presa in considerazione anche la curva del calcestruzzo con il cemento tipo I 52.5R.

Come si può notare dalla Figura 5 lo sviluppo della resistenza con rapporti acqua/cemento molto bassi risente di qualsiasi piccola variazione.

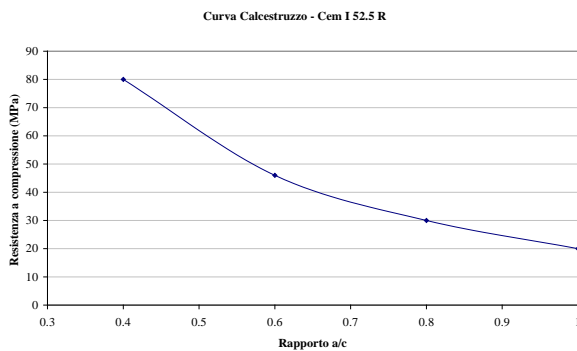


Figura 5 – Curva del calcestruzzo 52.5 R Cem tipo I

Piccole variazioni sul rapporto acqua/cemento possono creare grosse variazioni sulle resistenze, per queste motivazioni la progettazione della miscela in oggetto è stata effettuata con valori a 28 giorni di circa 100 MPa.

3.2. PRE-QUALIFICA PRESSO LABORATORIO ACCREDITATO

Nella progettazione della miscela risultava utile verificare anche alcune caratteristiche della miscela allo stato indurito, la Calcestruzzi SpA in collaborazione con un laboratorio riconosciuto dal Ministero dei Lavori Pubblici ha effettuato sulla miscela le seguenti prove :

- Verifica del Ritiro Idraulico
- Verifica del Modulo Elastico Secante a Compressione

3.2.1. RITIRO IDRAULICO

La valutazione del ritiro idraulico è stata effettuata a determinati intervalli temporali con riferimento ad un valore "zero" equivalente al tempo di fine presa del calcestruzzo.

Le contrazioni che avvengono nel calcestruzzo e che danno luogo al ritiro sono distinguibili in due differenti tipologie:

- **Il Ritiro Autogeno**
Questo è dovuto essenzialmente a motivi interni del calcestruzzo poiché avviene anche quando non sussistono variazioni igrometriche e termiche nell'ambiente di maturazione. Tale fenomeno è causato dall'idratazione del cemento, i prodotti derivati dalla reazione occupano un volume inferiore nei confronti di quelli che hanno prodotto la reazione. Questa contrazione dipende fondamentalmente dal tenore di cemento utilizzato per il confezionamento della miscela.
- **Il Ritiro Igrometrico**
Le cause che provocano il ritiro igrometrico, a differenza di quello precedentemente descritto, sono imputabili a condizioni esterne al prodotto. L'evaporazione dell'acqua contenuta nella miscela verso l'ambiente esterno provoca l'instaurarsi di contrazioni all'interno della massa di calcestruzzo. Tale fenomeno dipende esclusivamente dai fattori ambientali quali la temperatura esterna, l'umidità relativa e la velocità dell'aria nonché dal rapporto a/c poiché un eccesso di acqua libera provocherebbe un aumento del ritiro.

Normalmente quando si fa riferimento al ritiro ci si riferisce al ritiro idraulico considerato come deformazione totale ottenuta dalla somma del ritiro autogeno e dal ritiro idrometrico.

Qui di seguito vengono riportati i risultati ottenuti in laboratorio sulla miscela Rck 85 (Tabella 5 – Figura 6).

Stagionatura (ore/gg)	24h	48h	3gg	6gg	7gg	14gg	28gg
Ritiro $\mu\text{m/m}$	-10	-110	-170	-230	-240	-330	-390

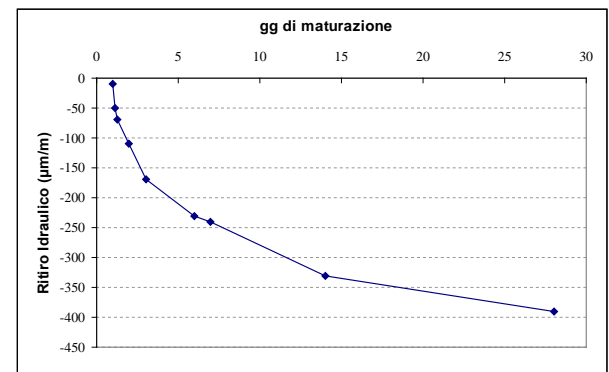


Figura 6 – Grafico del Ritiro Idraulico

Viene quindi determinato un ritiro idraulico dopo 28 giorni di maturazioni di -390 $\mu\text{m/m}$ quindi valori riconducibili a calcestruzzi ordinari.

3.2.1. MODULO ELASTICO SECANTE A COMPRESSIONE

Durante la pre-qualifica della miscela si è determinato sperimentalmente il modulo elastico sia dopo 7 giorni di maturazione e sia dopo 28 giorni di maturazione.

Il modulo elastico risulta essere un parametro fondamentale nella progettazione e nelle applicazioni strutturali. Tale proprietà, differentemente dall'acciaio, dipende da molti fattori comunque tutti riconducibili alla natura composita del calcestruzzo.

In letteratura sono presenti molte relazioni tra la resistenza a compressione e il modulo elastico secante.

Qui di seguito sono riportati i valori ottenuti dopo 7 giorni di maturazione e 28 giorni di maturazione e confrontati con la relazione presente nelle NTC del 14-01-2008.

Tabella 6 – Determinazione Modulo Elastico Secante a Compressione

	Provinci		
	1	2	Medie
Resistenza a compressione			
7gg	75.6	75.1	75
28gg	92.9	92.4	93
Modulo elastico secante DM 14-01-2008			
7gg	40363	40282	40322
28gg	42937	42867	42902
Modulo elastico secante sperimentale			
7gg	41346	41767	41557
28gg	42269	43700	42985

Nota: I dati sono espressi in MPa

Dalla tabella 6 si può verificare come esista una buona corrispondenza, soprattutto a 28 giorni di maturazione, tra il valore sperimentale e quello calcolato attraverso la correlazione presente nelle NTC del DM 14-01-2008.

4. CONCLUSIONI

La realizzazione dell'Rck 85 per il Ponte della Musica, così come per tutte le opere di eccellenza, ha richiesto un'intensa attività di laboratorio per la progettazione e la messa a punto della miscela.

Oggigiorno grazie allo sviluppo nell'industria degli additivi superfluidificanti, l'utilizzo di varie tipologie di aggiunte minerali e del progresso tecnico degli impianti risulta possibile produrre, con relativa semplicità, calcestruzzi ad Alta Resistenza con rapporti acqua / cemento inferiori a 0.35 su tutto il territorio nazionale.

La Calcestruzzi SpA, insieme al suo staff tecnico, sviluppa e asseconda le richieste dei progettisti sia in termini di prodotti ad elevate performance meccaniche, come il prodotto oggetto della seguente memoria, sia attraverso nuovi prodotti innovativi valorizzando e utilizzando materie prime seconde.

5. RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro e lo studio della miscela sono stati svolti dalla direzione tecnologia e qualità della zona Lazio ed in

particolare in collaborazione con il Geom. Giuseppe Bottoni, Geom. Franco Francucci e il Geom. Domenico Sassone.

6. BIBLIOGRAFIA

- (1) EN 206:2006
- (2) UNI EN 11104:2003
- (3) Linee Guida su calcestruzzi strutturali Alta Resistenza
Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici
Servizio Tecnico Centrale
- (4) Il Nuovo Calcestruzzo” – Mario Collepari Ed. Tintoretto