

GLI ADDITIVI PER L'OTTENIMENTO DI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI (AP) ED ALTE RESISTENZE (AR).

Dottor SALVATORE TAVANO - Geometra IVANO PIGNI.

1. INTRODUZIONE

Già oggi, ma maggiormente nel prossimo futuro, la richiesta di calcestruzzo ad alte prestazioni (calcestruzzo AP) ed alta resistenza (calcestruzzo AR) si farà sempre più importante. Ciò avverrà non solo perché si potranno costruire particolari opere, ma anche perché si dovrà assicurare al calcestruzzo un livello di durabilità sempre maggiore rapportato alle condizioni ambientali in progressivo peggioramento. Tale livello di durabilità, cui in passato s'era data scarsa importanza, diventa un elemento fondamentale nella progettazione e richiede necessariamente la produzione di calcestruzzi di elevate resistenze meccaniche.

A tale proposito è utile precisare cosa s'intende per calcestruzzo AP ed AR, tale definizione infatti è progressivamente cambiata nel tempo in relazione allo sviluppo della tecnologia del calcestruzzo. Oggi, come richiamato dalle Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale emesse dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, si considera il valore di $C 55 \text{ N/mm}^2$, come soglia di separazione tra calcestruzzo ordinario e calcestruzzo AP. Sono considerati calcestruzzi AP quelli con valore di resistenza caratteristica compresa tra $C 55$ e $C 75 \text{ N/mm}^2$; calcestruzzi AR quelli da $C 75$ a $C 115 \text{ N/mm}^2$.

Per comodità di trattazione divideremo il campo delle possibili resistenze a compressione in quattro livelli e precisamente: $C 55$, $C 75$, $C 85$ e $C 115$, intese come resistenze caratteristiche espresse in N/mm^2 di calcestruzzi maturati per 28 giorni. in condizioni standard. Per le classi intermedie valgono considerazioni che si possono estrapolare a partire dagli estremi.

E' molto importante sottolineare come per nessuno di questi livelli di prestazioni è previsto l'uso di materiali o tecnologie particolari come ad es. calcestruzzi polimero-impregnati, calcestruzzi autoclavati, calcestruzzi con resine epossidiche, ma solo ed esclusivamente l'impiego di materiali comuni e di facile reperibilità.

Va però ricordato che è fondamentale avere a disposizione un aggregato comune di buona qualità. L'obiettivo da raggiungere quindi è influenzato più dalla qualità dell'aggregato che dalla qualità degli altri materiali. Il risultato finale, pertanto, può variare da zona a zona in funzione dell'aggregato disponibile e ciò in misura maggiore di quanto avverrebbe con il calcestruzzo ordinario.

2. NORMATIVA

La normativa italiana (D.M. 9.1.96) non prevede di utilizzare calcestruzzi con R_{ck} di progetto $> 55 \text{ N/mm}^2$. Sono concesse deroghe (punto 5 - Parte Generale e punti 1 e 2 della Sezione I) ma servirsi di queste deroghe è tutt'altro che agevole. Utilizzare resistenze di progetto > 55 e $\leq 75 \text{ N/mm}^2$ (calcestruzzi AP) sarà possibile previa valutazione del Consiglio Superiore LL.PP., al quale dovranno essere sottoposte, caso per caso, tutte le documentazioni di progetto. Per essere autorizzati ad utilizzare calcestruzzi con $R_{ck} > 75 \text{ N/mm}^2$ occorrerà, oltre alla documentazione predetta, fornire un'adeguata modellizzazione del materiale operata in base ad una specifica documentazione teorica e sperimentale, e un'adeguata giustificazione delle

regole di calcolo adottate. E' auspicabile, così come riportato anche nelle «Linee guida sul calcestruzzo strutturale» che con le prossime versioni dei D.M. applicativi della Legge 1086/71 e Legge 64/74, l'Rck massimo di progetto passi a 115 N/mm² misurati su cubo 15x15x15. (1)

A livello internazionale, la maggior parte delle normative per l'esecuzione di strutture in cemento armato è applicabile a calcestruzzi con resistenze fino a 50-60 N/mm². Soltanto un limitato numero di normative ha esaminato la possibilità di impiegare calcestruzzi con resistenze superiori. Nella tabella 1 si è cercato di sintetizzare l'elenco di tali normative con le specifiche di resistenza massima ammessa, la forma e la dimensione dei provini utilizzati. Occorre in ogni caso ricordare che a base di tutte le normative europee si dovranno, quanto prima, utilizzare gli EUROCODICI per gran parte, basati sul CEB - Model Code 90. La norma CEB, consente di utilizzare una resistenza massima di progetto 80 N/mm² misurata su cilindro (che equivale a circa 96 N/mm² misurata su cubo).

Tabella 1

PAESE - NORMA	Rck Massime	Tipo di provini
NORVEGIA NS 3473 – 1992	105 Mpa 94 MPa	Cubi s=100 mm Cilindri 150/300 mm
OLANDA NEN 5950, 6720, 6722	105 Mpa 94 MPa	Cubi s=100 mm Cilindri 150/300 mm
FINLANDIA Rak MK B4-83/84	50 Mpa -100 MPa	Cubi s= 150 mm
CEB-FIP MC-95 Norma Europea	120 MPa	Cubi s= 150 mm
ACI 318-89 Norma Americana	Nessun Limite Spec.	Cilindri 152/304 mm
CANADA M84-1984	Nessun Limite Spec.	Cilindri 150/300 mm

3. SELEZIONE DEI MATERIALI

3.1 Cementi

Normalmente è raccomandato l'uso del cemento 42.5 Portland tipo I o II A-L e solo a partire da C 75 è richiesto l'impiego del cemento 52.5 Portland tipo I.

L'uso del 42.5 pozzolanico tipo IV-A o alla loppa tipo II A-S o II B-S non è escluso, purché la richiesta d'acqua di questi cementi non sia particolarmente elevata in rapporto al cemento Portland. A questo scopo può essere opportuno chiedere al produttore il valore di spandimento ottenibile in malta plastica a rapporto a/c 0,50 e determinato con la tavola a scosse secondo UNI 7044 - UNI EN 197 in confronto a quello del cemento Portland. Tale valore non dovrà essere inferiore a quello del cemento Portland di più del 10%.

Trattandosi di cementi destinati alla produzione di calcestruzzi AP ed AR, e quindi ad alto dosaggio, sarà gradito un basso valore del calore d'idratazione.

Indicativamente un valore accettabile del calore d'idratazione è situato intorno alle 75 cal/g a 28 d.

Un cemento resistente ai solfati (UNI 9156) è, in linea di massima, un cemento a basso calore d'idratazione. Molte norme, infatti, stabiliscono che un cemento per essere considerato resistente ai solfati abbia un tenore d'alluminato tricalcico inferiore al 6% (quando non addirittura al 3%- Norma DIN). Ne consegue che il suo calore di idratazione, controllato in primo luogo dal contenuto di C3A, sarà

particolarmente basso.

3.2 Additivi

Fin qui si sono riprese cose già note e, forse, meglio evidenziate nelle relazioni precedenti si tenterà, ora, di sviluppare con precisione il tema assegnato.

Per entrambe le categorie di calcestruzzo, è di estrema importanza l'impiego di additivi superfluidificanti (UNI 8145/80, FA-121-83) che, nel caso specifico, verranno utilizzati anche come super-riduttori d'acqua.

La prima regola che si deve seguire è quella di mantenere il rapporto acqua/cemento su valori sempre inferiori a 0,50, più bassi quanto più elevata sarà la classe di resistenza richiesta. Nel capitolo "proporzionamento delle miscele" saranno date indicazioni precise al riguardo. In questo paragrafo è importante stabilire quali caratteristiche deve avere un superfluidificante per essere impiegato nel confezionamento di calcestruzzi AP ed AR.

Tra gli additivi idonei alla produzione di calcestruzzi AP ed AR, escludendo i Ligninsolfonati (LS) per il loro effetto aerante e ritardante troppo elevato, normalmente i prodotti impiegati sono superfluidificanti a base di naftalen solfonato condensato con formaldeide (NSF), di melammina solfonata e condensata con formaldeide (MSF) o di miscele dei due.(2) (Figura 1).

Oltre a questi prodotti, oggi, sono disponibili anche molecole superfluidificanti nuove a base di esteri dell'acidopoliacrilico (CAE) o derivati policarbossilici (PC) tra cui i derivati dell'acido maleico e anche alcuni derivati vinilici. Nella figura 2A si vede una schematica rappresentazione comparativa tra la struttura molecolare di additivi CAE o PC di nuova generazione e additivi tradizionali a base di NSF (3).

Gli additivi NSF e MSF sono i prodotti più noti ed utilizzati. Si tratta di prodotti validi purché il loro grado di condensazione sia sufficientemente elevato. Il giusto grado di condensazione, valutato misurando la viscosità di soluzioni acquose (di solito al 40% di sostanza attiva) di detti additivi, deve fornire valori compresi, normalmente, tra 40 e 100 centipoises.

Da un punto di vista pratico ciò si traduce nel fatto che gli additivi «giusti» non avranno azioni collaterali negative, soprattutto per quanto concerne l'inglobamento d'aria nelle malte e nei calcestruzzi.

Rispetto ad un calcestruzzo di riferimento non additivato è tollerato un aumento dell'aria inglobata, misurato con un normale porosimetro, non superiore al 2%. E' da evitare anche un effetto collaterale ritardante non controllato. E' opportuno che eventuali azioni ritardanti, spesso necessarie, vengano ottenute attraverso l'impiego di specifici additivi ritardanti il cui dosaggio determinerà l'entità del ritardo desiderato oppure con un superfluidificante ritardante appositamente formulato dal produttore i additivo.

Il NSF possiede, normalmente, capacità disperdenti più elevate di MSF, tale caratteristica è necessaria, in modo particolare, quando occorre disperdere microparticelle come quelle del fumo di silice condensato come vedremo meglio in seguito. A questo proposito è appena il caso di descrivere il meccanismo di azione di questi superfluidificanti in confronto a quello dei più recenti polimeri. Questi ultimi agiscono attraverso un ingombro (impedimento sterico) (3) che si crea intorno ai granuli da disperdere mentre i classici superfluidificanti (MSF o NSF) trasferiscono sulle singole particelle cariche negative che respingendosi provocano la dispersione delle stesse (figure 2B e 2C). Questa capacità disperdente di tipo elettrico può

essere quantizzata attraverso misurazioni del potenziale Zeta. (Figura 3A) (4)

Altra caratteristica importante dei superfluidificanti è il loro spettro d'azione che deve essere particolarmente alto. La loro capacità di ridurre l'acqua deve essere proporzionale al dosaggio impiegato e raggiungere, se necessario, il 30% di riduzione del rapporto a/c a pari lavorabilità.

Accanto agli additivi superfluidificanti potranno essere impiegati altri additivi quali: acceleranti (UNI 7105/72), ritardanti (UNI 7104/72), aeranti (UNI 7103/72 FA 95-80), a seconda delle necessità. Attenzione però, normalmente gli acceleranti, necessari spesso solo per esigenze di rapida sformatura, deprimono le resistenze finali e quindi sono in contrasto con l'obiettivo principale. Pertanto, salvo casi particolari, non sono consigliabili.

Gli aeranti, pur assolvendo ad una funzione più importante quale l'aumento della resistenza al gelo e disgelo, hanno anch'essi un effetto di riduzione delle resistenze meccaniche e quindi agiscono in contrasto con lo scopo fondamentale. In condizioni particolarmente aggressive (presenza di sali disgelanti), gli aeranti vanno utilizzati, valutando il loro effetto a livello di proporzionamento delle miscele.

Esiste un'alternativa all'uso dell'aerante classico che consente di raggiungere la stessa protezione del calcestruzzo aerato senza avere conseguenze macroscopiche sulle resistenze meccaniche: l'impiego di microsfere cave di materiale plastico, le quali si deformano sotto l'azione dell'acqua in fase di congelamento. (5)

Un discorso più esteso meritano, invece, i ritardanti che trovano un posto importante nel proporzionamento delle miscele per calcestruzzi AP e AR.

Il confezionamento di calcestruzzi a basso rapporto a/c, utilizzando cementi almeno di classe 42.5, con finezze di macinazione \geq a $3.500 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Blaine), comporta un decadimento della lavorabilità iniziale (slump loss) più rapido del normale. Questo decadimento è tanto più elevato quanto più alta è la temperatura del calcestruzzo. Tale aspetto può essere migliorato con l'uso, oltre che di superfluidificanti, di ritardanti con azione fluidificante. La maggior parte dei ritardanti reperibili in commercio possiede anche un'azione collaterale di fluidificante normale.

Quando il calcestruzzo è confezionato presso una centrale di betonaggio per poi essere trasportato sul cantiere, si consiglia l'aggiunta del ritardante presso la centrale di betonaggio quindi, raggiunto il cantiere, si aggiunge il superfluidificante fino all'ottenimento della lavorabilità desiderata. L'uso del ritardante, salvo che nel periodo invernale, è particolarmente raccomandato perché oltre a ridurre il problema della perdita di lavorabilità, possiede un'azione di incremento delle resistenze finali che è in sintonia con l'obiettivo primario. Per tutti i calcestruzzi AP ed AR ed in modo particolare se è impiegato ritardante, deve essere previsto un adeguato periodo di stagionatura. La cura e l'attenzione che si dovrà porre in questa fase, sarà tanto maggiore quanto più elevata è la classe di resistenza richiesta. Questo tema è importante e sarà ripreso in un capitolo specifico.

In alternativa all'uso di superfluidificanti tradizionali più ritardanti si può utilizzare una nuova generazione di superfluidificanti a base acrilica o vinilica (figura 3B) (4). Questi prodotti, che sono apparsi sul mercato di recente, prolungano la lavorabilità oltre i valori dei normali superfluidificanti e rendono superfluo l'uso di ritardanti. Attualmente il loro costo è ancora relativamente elevato ma in futuro troveranno sicuramente una loro collocazione specialmente per i calcestruzzi a più elevate prestazioni.

3.3 Aggiunte minerali con caratteristiche pozzolaniche.

Queste aggiunte rivestono una grande importanza, nella produzione di calcestruzzi AP e soprattutto AR, per il loro notevole contributo all'aumento delle resistenze finali. Le aggiunte minerali possibili sono essenzialmente due e precisamente: ceneri volanti e fumi di silice. Entrambi i materiali si presentano sottoforma di polvere e sono stoccabili e manipolabili come il cemento.

Le ceneri volanti (UNI EN 450) hanno una composizione piuttosto variabile in relazione al tipo di carbone da cui provengono ed alla percentuale di incombusto residua, Tale percentuale è un dato che è molto importante conoscere quando ci si appresta a ricercare prestazioni di resistenza superiori e soprattutto quando è richiesta una grande ripetibilità di prestazioni. Purtroppo le ceneri volanti disponibili in Italia sono quelle prodotte dalle centrali termoelettriche dell'ENEL e non sono, di norma, corredate di certificati d'analisi e ciò rende difficile lavorare con precisione. Le ceneri volanti, in altre parole richiederebbero, per un impiego corretto, di essere classificate e soprattutto omogeneizzate in modo da garantire una certa costanza di qualità. Ciò le rende più interessanti per il produttore di cemento in quanto, la cementeria, possiede le strutture per il controllo e l'omogeneizzazione di questo materiale affinché possa essere usato vantaggiosamente durante la produzione.

Il fumo di silice, proveniente dalla lavorazione delle leghe ferro-silicio o del silicio metallico, può essere considerato un prodotto tecnico di composizione abbastanza costante con tenori di silice amorfa (SiO_2) compresa tra il 92 ed il 96% con punte sino al 98%. (6)(22). Il fumo di silice, si presta ad essere usato vantaggiosamente, presso i cantieri o le centrali di betonaggio, anche sotto forma di sospensione acquosa (slurry). L'estrema finezza del fumo di silice (100 volte più fine del cemento) lo rende molto più efficace rispetto alle ceneri volanti e consente di conferire al calcestruzzo caratteristiche importanti oltre che per l'effetto pozzolanico anche per un effetto filler e quindi di densificazione della pasta cementizia che consente di diminuire la permeabilità e di aumentare in modo molto marcato il fattore di durabilità del calcestruzzo stesso. Ne consegue che il fumo di silice, in quanto materiale di un certo pregio, è preso in considerazione particolarmente per il confezionamento dei calcestruzzi appartenenti alla classe C 60 - C 115, ma non è escluso l'utilizzo anche per il C 50.

Il meccanismo di azione del fumo di silice e di altre aggiunte fu studiato da h.h. Bache che già nel 1981 (13) aveva coniato la definizione "Densified with small particles" **DSP** che è oggi generalmente utilizzata e riconosciuta (figura 4).

Qui di seguito riportiamo una tipica analisi chimica e le caratteristiche chimiche e fisiche di un fumo di silice reperibile sul mercato italiano (tabella 2)

Tabella 2 – Analisi chimica e proprietà chimiche e fisiche del fumo di silice.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO
94-98 %	0.1-0.4 %	0.05-0.3 %	0.1-0.5 %	0.1 - 0.5 %	0.2 - 0.7 %	0.1 - 0.9 %
Perd. calc.	Perd. ess.	Densità ass.	Densità app.	Superf. spec.	Aspetto:	
1.0 - 4.0 %	0.5 - 0.8 %	2.2 Kg/dm ³	0.25 Kg/dm ³	20 - 30 m ² /g	polvere grigia	

3.4 Aggregati

Come già accennato nell'introduzione gli aggregati sono di estrema importanza per la

realizzazione di calcestruzzi AP ed AR. Lo sono in misura maggiore di quanto non lo siano per i calcestruzzi ordinari. I motivi sono facilmente comprensibili e cioè mentre possiamo agire in senso migliorativo sulla pasta di cemento attraverso l'uso di additivi e di aggiunte minerali, non abbiamo alcun mezzo per migliorare un aggregato se non scegliendolo e graduandolo opportunamente. La scelta dell'aggregato dovrà seguire le raccomandazioni indicate nella norma UNI 8520 (da parte 1 a parte 22); in ogni caso sono da tenere presenti alcune considerazioni.

3.4.1. Sabbia

La curva granulometrica della sabbia deve essere indirizzata soprattutto ad una diminuzione della richiesta d'acqua. In questo senso un aumento del modulo di finezza (sabbia più grossolana) darà migliore lavorabilità e quindi migliore resistenza (possibilità di ridurre il rapporto a/c).

Una sabbia povera di parti fini non è da considerare così negativa come avviene nel calcestruzzo ordinario. I dosaggi di cemento, che sono mediamente elevati (≥ 375 kg/mc) e l'eventuale presenza di fumi di silice, annullano tutti gli svantaggi normalmente legati alla scarsità di parti fini (bleeding, separazione dell'aggregato grosso, difficoltà di pompaggio, etc.).

Naturalmente dovranno essere assenti sia particelle friabili, come ad es. la mica, sia l'argilla sia le sostanze organiche.

Si devono preparare mix design che normalmente si definiscono: "sottosabbati".

3.4.2 Aggregato grosso

La dimensione dell'aggregato grosso sembra giocare un certo ruolo per il raggiungimento della massima resistenza. Negli aggregati di diametro maggiore, diminuisce la superficie specifica e quindi diminuisce la superficie di contatto fra pasta ed aggregato. Più semplicemente, più il ciottolo è di dimensioni rilevanti più è facile che presenti delle lesioni e zone deboli. La dimensione migliore, per calcestruzzi AP sembra essere compresa tra i 12 ed i 25 mm. e per calcestruzzi AR tra 12 ed i 16 mm.. Il coefficiente di forma, poi, è molto importante: sono da scartare tutti gli aggregati che si presentano appiattiti o lanceolati perché presentano resistenze a compressione molto differenti secondo l'asse compresso. Aggregati di frantoio naturalmente puliti, e senza parti friabili migliorano l'aderenza con la pasta di cemento e pertanto sono più favorevoli. Infine la resistenza intrinseca dell'aggregato gioca un ruolo molto importante per l'ottenimento di elevate resistenze. Questa regola, se è valida per il calcestruzzo ordinario, è ancora più importante per i calcestruzzi AP ed AR. Nella tabella 3 sono visibili le resistenze a compressione medie di alcune rocce.

Tabella 3 - Resistenze medie a compressione di alcune rocce. (1)

TIPO DI ROCCIA	RESISTENZA A COMPRESSIONE
Granito	180 Mpa
Calcere	150 Mpa
Quarzite	252 Mpa
Gneiss	147 Mpa
Schisto	170 Mpa

3.5 Acqua d'impasto

Le specifiche, relative all'acqua d'impasto necessaria per il confezionare calcestruzzo ad AP ed AR, sono le stesse di quella per il calcestruzzo ordinario. L'acqua potabile è sempre idonea alla produzione dei calcestruzzi. Esistono, tuttavia, molti casi dove non si dispone d'acqua potabile e si deve impiegare un'acqua di qualità inferiore. In questi casi è consigliabile fare dei test comparativi. Si compareranno, allora, calcestruzzi confezionati con l'acqua in questione a quelli con acqua distillata. Le resistenze a 7 e 28 d, del calcestruzzo confezionato con l'acqua disponibile, non dovranno essere inferiori al 90% di quelle ottenute su calcestruzzi confezionati con acqua distillata. Meglio, in ogni caso, seguire quanto consigliato dalla UNI 7163/79 punto 5.2.3.

4. PROPORZIONAMENTO DELLE MISCELE

Il proporzionamento delle miscele per calcestruzzi AP ed AR, è determinato da vari fattori. In primo luogo, naturalmente, la classe di resistenza richiesta, ma anche le caratteristiche dei materiali a disposizione, soprattutto gli aggregati, le esigenze di impiego e di messa in opera e non ultime le condizioni climatiche. E' sempre necessario verificare in modo sperimentale, confezionando calcestruzzi di prova con i materiali effettivamente utilizzati per l'esecuzione dell'opera, quanto l'esperienza e la pratica quotidiana insegnano.

4.1 C 55

Considerando lo scarto quadratico medio che inevitabilmente si rileva su ogni serie statistica, dovremmo prevedere una resistenza media per questa classe di almeno 60 N/mm^2 a 28 d. Una volta scelta la dimensione massima dell'aggregato, si dovrà procedere alla definizione della curva granulometrica attraverso il proporzionamento percentuale delle varie classi dell'aggregato a disposizione. Trattandosi di calcestruzzi ad alto dosaggio di cemento, possiamo scegliere la curva inferiore del fuso di Fuller (norma UNI 7163 - figura 5), oppure il fascio di curve compreso tra A e B del fuso previsto dalla norma DIN 1045 (figura 6), oppure il corrispettivo determinato secondo Bolomey.

La norma DIN 1045 dà anche informazioni sulla richiesta d'acqua espressa in litri per m^3 di calcestruzzo fresco in rapporto alla consistenza desiderata (in assenza di additivi fluidificanti - tabella 4).

Tabella 4 – Fabbisogno d'acqua (DIN 1045)

Valori indicativi per quantità di acqua medie del calcestruzzo fresco dipendenti dalla granulometria e consistenza del calcestruzzo.

Valori per il contenuto d'acqua w in kg per ogni m ³ di calcestruzzo fresco con consistenze K1, K2 e K3						
Setaccio secondo DIN 1045	Elevata richiesta d'acqua slump			Bassa richiesta d'acqua slump		
	3±1	7±2	13±3	3±1	7±2	13±3
	K1	K2	K3	K1	K2	K3
A 63	120±15	145±10	160±10	95±15	125±10	140±10
A 32	130±15	155±10	175±10	105±15	135±10	150±10
A 16	140±20	170±15	190±10	120±20	155±15	175±10
A 8	155±20	190±15	210±10	150±20	185±15	205±10
B 63	135±15	160±10	180±10	115±15	145±10	165±10
B 32	140±20	175±15	195±10	130±20	165±15	185±10
B 16	150±20	185±15	205±10	140±20	180±15	200±10
B 8	175±20	205±15	225±10	170±20	200±15	220±10
C 63	145±20	180±15	200±10	135±20	175±15	190±10
C 32	165±20	200±15	220±10	160±20	195±15	215±10
C 16	185±20	215±15	235±10	175±20	205±15	225±10
C 8	200±20	230±15	250±10	185±20	215±15	235±10

Sceglieremo la quantità d'acqua prevista per la consistenza K1 (equivalente alla classe di consistenza umida: slump 3 ± 1 cm) corrispondente al diametro massimo dell'aggregato prescelto; ad es. se il diametro massimo prescelto è di 16 mm l'acqua totale necessaria sarà compresa tra 140 e 120 $\text{lt/m}^3 \pm 20$ se la curva granulometrica coincide con A, mentre sarà compresa tra 150 e 140 $\text{lt/m}^3 \pm 20$ se la curva granulometrica coincide con B (figura 4). L'acqua totale (comprensiva dell'umidità dell'aggregato) potrà essere cautelativamente intorno ai $150 \text{ lt/m}^3 \pm 20$. Questo dato ci indirizzerà sul valore più corretto del dosaggio di cemento che dovremo scegliere per avere un rapporto a/c non superiore a 0,40. Esso sarà pertanto intorno ai 375 kg/m^3 .

Il presupposto di tutto il nostro mix design è il rapporto a/c 0,40. Dalle curve di Walz (figure 7 e 8), infatti, si evidenzia la relazione tra resistenze meccaniche e rapporto a/c per ogni classe di cemento.

Per ottenere la lavorabilità necessaria e desiderata, si consiglia almeno S4, a questo calcestruzzo si aggiungerà, possibilmente immediatamente prima del getto, un additivo superfluidificante concentrato al dosaggio di 1,5% sul peso del cemento.

Nel caso in cui ci siano problemi di miscelazione e trasporto di un calcestruzzo a consistenza umida, è consigliabile aggiungere all'acqua di impasto un ritardante-fluidificante in ragione di circa 0,2% sul peso del cemento. Ciò consentirà il raggiungimento di uno slump iniziale di 5 - 6 cm, che è, di norma, sufficiente per una più adeguata miscelazione. Solo in cantiere, poi, si aggiungerà il superfluidificante sino al raggiungimento della lavorabilità desiderata (normalmente slump 18 - 22 cm). Quando si dispone di un miscelatore a regime forzato, in grado di miscelare ottimamente qualsiasi calcestruzzo come in prefabbricazione, l'aggiunta del ritardante non è più necessaria o addirittura sconsigliabile.

In alternativa si può utilizzare un superfluidificante a prolungato mantenimento della fluidità della nuova generazione.

4.1.1 Esempio di composizione del C 55 - diametro massimo 16 mm:

Nella tabella che segue sono riassunte le informazioni evidenziate più sopra:

Cemento 42.5 IIA-L	kg	375	litri	121
Acqua totale	"	150		150
Aria 2%		----		20
Aggregati asciutti	"	1879		709 (Densità 2.65 kg/dm ³)
Consistenza prevista slump 3 cm ± 1				

Additivo ritardante-fluidificante « 0,750 « 0,680 (Densità 1,1)

Consistenza prevista slump 6 cm ± 1

Additivo superfluidificante « 5,625 « 4,750 (Densità 1,2)

Consistenza prevista slump 20 cm ± 3

4.2 C 75

La resistenza media che è necessario ottenere per questa classe, tenendo conto dello scarto quadratico medio, è 80 N/mm². Si tratta di un valore notevolmente elevato, sicuramente non facile da raggiungibile sino a pochi anni fa se non in casi particolari. La tecnologia di oggi consente invece di raggiungere tale valore con procedimenti di routine ovvero con una frequenza di eventi positivi molto elevata, semplicemente prendendo in considerazione alcuni accorgimenti, accompagnati dall'impiego come componente nuovo, ma di semplice uso, del fumo di silice. Normalmente, quando in una miscela interviene un'aggiunta minerale con caratteristiche pozzolaniche, nel rapporto a/c si tende a considerare l'aggiunta come cemento e pertanto si calcola il nuovo rapporto come $a/(c + s)$ dove s è la quantità in kg dell'aggiunta, nel caso particolare, di fumo di silice. Sulla base dell'esperienza pratica il rapporto $a/(c + s)$, da non superare per garantire il raggiungimento della resistenza media richiesta di 80 N/mm², è intorno a 0,33 (figura 8 - andamento tratteggiato - cemento 52.5 tipo 1). Con gli stessi criteri visti al paragrafo 4.1 determiniamo la quantità di acqua totale in base al diametro massimo dell'aggregato e del tipo di curva granulometrica di cui si dispone, con l'accortezza di aumentare questo valore di circa 10 lt/m³ per la presenza del fumo di silice nella miscela. Tornando quindi all'esempio del diametro massimo 16 mm si avrà un valore di acqua totale che cautelativamente sarà di lt 150 + 10 = 160 lt/mc. La quantità di fumo di silice rapportata al peso del cemento è valutata intorno al 10%. Il dosaggio di cemento + fumo di silice, quindi, sarà pari a 160/0.33 = 485 kg/mc di cui 440 kg. di cemento e 45 kg di fumo di silice.

4.2.1 Esempio di composizione del C 75 - diametro massimo 16 mm:

Cemento 52.5 I	Kg	440	litri	142
Fumo di silice	"	45	"	20
Acqua totale	"	160	"	160
Aria		----		20
Aggregati asciutti	"	1719	"	649 (densità 2.65 kg/dm ³)
Additivo ritardante fluidificante	"	2		1.8* (densità 1.1)
Additivo superfluidificante conc.	"	9		7.5* (densità 1.2)

Nota: (*) Questi additivi sono da aggiungere all'acqua d'impasto, assicurandosi che vi sia compatibilità tra i due prodotti (chiedere al produttore).

Consistenza prevista da 3 - 5 cm di slump

Se la lavorabilità è superiore si ridurrà l'acqua totale in modo proporzionale.
 Al momento del getto, si aggiungerà altro additivo superfluidificante sino al raggiungimento della lavorabilità desiderata (18-22 cm di slump).
 Quantità totale di superfluidificante prevista kg 15-16/m³, pari al 3–3,5%.

Nel caso in cui il calcestruzzo C 75 venga utilizzato in cantiere di prefabbricazione con miscelatore a regime forzato, valgono le stesse considerazioni del paragrafo 4.1. In alternativa ai superfluidificanti tradizionali sono disponibili, oggi, prodotti di nuova generazione a base di polimeri acrilici o vinilici il cui dosaggio d'impiego, a parità di prestazioni, è ridotto a circa la metà e che comunque garantiscono lunghi tempi di mantenimento della fluidità. (Vedi figura 3B)

4.3 C 85

La resistenza media che è necessario raggiungere, in questo caso, è \geq a 90 Nmm². Il cemento da utilizzare non può essere che il 52.5 I R. Il dosaggio di fumo di silice è ancora il 10% del peso del cemento. Il rapporto a/(c+s) dovrà essere 0,3 (figura 8) e perciò:
 $160/0,3 = 535 \text{ kg/m}^3$ di cui: 55 di fumo di silice e 480 di cemento.

4.3.1 Esempio di composizione del C 85 - diametro massimo 16 mm:

Cemento 52.5 I	Kg 480	litri 155
Fumo di silice	" 55	" 25
Acqua totale	" 160	" 160
Aria	----	20
Aggregati asciutti	" 1695	" 640 (densità 2.65 kg/dm ³)
Additivo ritardante fluidificante	" 2	1.8* (densità 1.1)
Additivo superfluidificante conc.	" 9,6	8.0* (densità 1.2)

Nota: (*) Questi additivi sono da aggiungere all'acqua d'impasto, assicurandosi che vi sia compatibilità tra i due prodotti (chiedere al produttore).

Consistenza prevista da 3 - 5 cm di slump

Al momento del getto, si aggiungerà altro additivo superfluidificante sino al raggiungimento della lavorabilità desiderata (18-22 cm di slump).
 Quantità totale di superfluidificante prevista kg 16-17/m³, pari al 3–3,5%.

4.4 C 115

La resistenza media che è necessaria, in questo caso, è \geq a 120 N/mm². Il cemento da utilizzare il 52.5 I R. Il dosaggio di fumo di silice salirà al 16% del peso del cemento (figura 8). Il rapporto a/(c+s) dovrà essere 0,28 e perciò:
 $160/0,28 = 570 \text{ kg/m}^3$ di cui: 90 di fumo di silice e 480 di cemento.

4.4.1 Esempio di composizione del C 115 - diametro massimo 16 mm:

Cemento 52.5 l	Kg	480	litri	155
Fumo di silice	"	90	"	40
Acqua totale	"	160	"	160
Aria	----			20
Aggregati asciutti	"	1650	"	625 (densità 2.65 kg/dm ³)
Additivo ritardante fluidificante	"	2		1.8* (densità 1.1)
Additivo superfluidificante conc.	"	9,6		8,0* (densità 1.2)

Nota: (*) Questi additivi sono da aggiungere all'acqua d'impasto, assicurandosi che vi sia compatibilità tra i due prodotti (chiedere al produttore).

Consistenza prevista da 3 - 5 cm di slump

Al momento del getto, si aggiungerà altro additivo superfluidificante sino al raggiungimento della lavorabilità desiderata (18-22 cm di slump).

Quantità totale di superfluidificante prevista kg 16-17 /m³, pari al 3–3,5%.

4.5 Classi di resistenza intermedie

Per le classi intermedie valgono, naturalmente, le stesse considerazioni interpolando fra i vari dosaggi indicati. Naturalmente le ricette sopra riportate sono da considerarsi indicative. In relazione ai risultati delle prove sperimentali esse potranno essere variate in modo adeguato.

La procedura di aggiunta degli additivi è definita considerando una probabile mescolazione e successivo trasporto con autobetoniera. L'aggiunta di additivo superfluidificante immediatamente prima del getto, qualora fosse necessario, richiede un'ulteriore mescolazione di circa 5'.

L'uso del ritardante può essere necessario, come già detto, solo se i tempi che intercorrono tra la miscelazione e la posa sono superiori ai 15-20' o se la temperatura è particolarmente elevata.

Nel confezionamento dei calcestruzzi AP ed AR, specialmente per le classi C ≥ 75 , l'uso di alti dosaggi di cemento + fumo di silice può dare agli impasti un aspetto di eccessiva viscosità. Se non si verificano fenomeni collaterali impreveduti, questo eccesso di viscosità non dà problemi durante la messa in opera, salvo che per il pompaggio in condizioni difficili. In questo caso si osserva un aumento importante della pressione di lavoro delle pompe ed al limite occorrerà prevedere metodi alternativi di messa in opera.

Un modo molto interessante di mantenere lavorabilità all'impasto anche per tempi molto lunghi è quello di prevedere, quando la lavorabilità ancora non è eccessivamente ridotta, l'aggiunta di altro additivo superfluidificante. Si tratta cioè di suddividere in più parti successive l'intero dosaggio di additivo previsto.

5. STOCCAGGIO, MISCELAZIONE, TRASPORTO, MESSA IN OPERA E STAGIONATURA

Le procedure trattate in questo capitolo non si differenziano per il calcestruzzo AP o AR da quelle relative al calcestruzzo ordinario. Sono necessarie solo alcune puntualizzazioni.

Mantenere il rapporto a/c, sui valori minimi possibili, in rapporto alle condizioni di messa in opera è buona regola per tutti i calcestruzzi. Per il calcestruzzo AP e

soprattutto per l'AR ciò può dare dei problemi particolarmente per quanto riguarda la caduta di lavorabilità. Anche per questo problema l'uso di additivi superfluidificanti di nuova generazione a base di polimeri acrilici, vinilici od altri, può portare alcuni importanti vantaggi. Essendo inoltre il dosaggio di cemento molto alto, si ha notevole sviluppo di calore dall'interno che può peggiorare ulteriormente il problema. Sono pertanto consigliate e da applicare tutte le raccomandazioni usate normalmente per i getti con climi caldi.

5.1 Stoccaggio

Lo stoccaggio dei materiali non richiede particolari attenzioni. E' opportuno mantenere la temperatura, specialmente per il cemento, su valori più bassi possibili prima della pesata (max 60 - 70°C).

Naturalmente si raccomanda per gli aggregati uno stoccaggio ad umidità più uniforme possibile vista l'importanza del controllo del rapporto a/c.

Un discorso a parte va fatto per il fumo di silice che, a meno che non venga impiegato sotto forma di additivo in sacchetti prepesati, deve essere stoccato in silos di adeguata capacità, predisposti con alcuni accorgimenti per facilitare le operazioni di carico e scarico. Innanzi tutto, va tenuto presente che il fumo di silice ha una densità apparente di circa 250 kg/m³; le quantità che si possono trasportare sono perciò limitate. Il trasporto può avvenire o con camion cipollati (gli stessi impiegati per il cemento) di capacità intorno ai 36 mc oppure in autobotti speciali, con unico scomparto, ideate per il trasporto di materiali polverulenti leggeri, di circa 56 mc di capacità. Nel primo caso la quantità max trasportabile è di circa 8.500 kg, nel secondo di circa 13.000 kg. I silos di stoccaggio, dovranno avere una capacità di almeno 70 mc se non di 100 per assicurare una scorta adeguata in caso di bisogno. La forma del silo sarà quella classica, ma con un cono di scarico di maggior pendenza per favorire lo scivolamento del materiale verso la valvola di scarico. Il fumo di silice a causa della sua notevole leggerezza e finezza tende a aderire alle pareti e ad impaccarsi. E' consigliabile, quindi, dotare il cono di scarico di numerosi fori per l'ingresso di aria compressa a circa 1 atm. per favorire il riempimento della coclea. Quest'ultima deve essere di diametro superiore a quella del cemento, ma con velocità di rotazione più bassa in modo da evitare l'eccessiva compattazione del materiale. E' buona norma inoltre che la pendenza della coclea per il trasporto del fumo di silice sia inferiore ai 45°.

La pesata del fumo di silice si esegue con la bilancia del cemento come pesata cumulativa.

L'uso di silice fumes densificata, semplifica, le operazioni di manipolazione di questo prodotto (carico - scarico - dosaggio ecc.). Bisogna ricordare, però, che è piuttosto difficile disperdere la silice fumes negli impasti di calcestruzzo, in modo particolare, quando il diametro massimo dell'aggregato è inferiore ai 32 mm.

Una soluzione radicale per tutti i problemi di manipolazione, che si è rivelata migliorativa anche per la resa del prodotto, consiste nell'uso di fumo di silice predisposto in acqua (slurry). Questo prodotto è disponibile in cisternette da 1.200 - 1.400 kg o sfuso in autobotte come un normale additivo liquido. E' necessario incrementare i dosaggi di questo prodotto, in quanto la concentrazione della silice fumes predisposta è normalmente intorno al 50% di materiale solido. La maggior dispersione permette, tuttavia, di ridurre leggermente il dosaggio rispetto al valore di sostanza secca in essa contenuta (es.: un dosaggio di fumo di silice in polvere del

10% corrisponde ad un dosaggio sotto forma di slurry, non del 20%, ma del 15 - 18%). Per quanto riguarda l'acqua d'impasto, questa sarà misurata con conta litri oppure pesata in modo accurato per controllare che il rapporto a/c sia sui valori desiderati. Analogamente l'umidità della sabbia richiederà un controllo continuo ed accurato per evitare spiacevoli conseguenze.

Attenzione! se si usa silice fumes sotto forma di slurry: tenere conto dell'acqua in esso contenuta! L'elevato calore sviluppato, consiglia l'uso d'acqua fredda o meglio di ghiaccio, ma ciò presuppone l'installazione di un impianto adeguato accanto alla centrale. In determinati casi, particolarmente importanti, si può ricorrere all'iniezione di azoto liquido nell'impasto ottenendo così riduzioni di temperatura di 15 - 20°C.

5.2 Miscelazione e trasporto.

L'esperienza fatta finora insegna che i calcestruzzi AP ed AR si possono miscelare sia in mescolatori a regime forzato ad asse verticale od orizzontale, sia in mescolatori a gravità. E' possibile utilizzare normali autobetoniere, purché siano in buono stato e avendo l'accortezza di ridurre il volume di carico per assicurare una più efficace miscelazione (normalmente intorno ai 5 - 6 mc max).

I parametri che occorre controllare per assicurare un'efficace miscelazione sono il tempo e la velocità di rotazione del mescolatore. Va tenuto presente che una volta raggiunta la lavorabilità e l'omogeneità desiderate non è consigliabile prolungare la mescolazione perché si favorirebbe la perdita di lavorabilità. Durante il trasporto, è opportuno tenere l'autobetoniera ferma e non in rotazione anche se a bassa velocità. Ricordiamo che le autobetoniere sono buoni miscelatori solo quando la lavorabilità è di almeno di 5 - 8 cm di slump. L'aggiunta del superfluidificante alla fine dell'impasto o meglio immediatamente prima del getto, oltre a risolvere i problemi di perdita di lavorabilità dovuti al trasporto, consente di ovviare alle inevitabili attese delle autobetoniere sul cantiere dovute a problemi di organizzazione dei getti.

Come già detto questo problema può essere in parte superato dall'uso di nuovi additivi superfluidificanti che, aggiunti in centrale mantengono il calcestruzzo lavorabile per tempi più lunghi di quelli ottenibili con i superfluidificanti tradizionali. L'uso dell'additivo ritardante, oltre a prolungare il tempo di lavorabilità, consente la rivibrazione del calcestruzzo già gettato e l'omogeneizzazione del getto all'interno della cassaforma. La rivibrazione è un artificio importante anche perché migliora il faccia a vista, consente di eliminare le «lenti» d'acqua che accidentalmente si possono formare al di sotto dei ferri d'armatura ed elimina le microfessure da ritiro precoce.

5.3 Messa in opera e stagionatura

La preparazione dei casseri destinati a ricevere il calcestruzzo AP ed AR, deve essere particolarmente accurata e veloce per evitare tempi morti al momento dell'arrivo dell'autobetoniera. Le attrezzature per la vibrazione e la compattazione del calcestruzzo devono essere surdimensionate per ridurre al minimo i tempi di assestamento. I vibratorii più adatti per l'assestamento dei calcestruzzi AP ed AR sono quelli ad ago. E' necessario assicurare la compattazione totale del calcestruzzo perché eventuali vuoti penalizzano le resistenze in misura ancora maggiore di quanto avviene con il calcestruzzo ordinario. La maggior viscosità e coesione dei calcestruzzi AP ed AR si oppone, peraltro, alle conseguenze negative derivanti da un

eccesso di vibrazione.

La stagionatura è il processo che assicura il mantenimento all'interno del calcestruzzo di un sufficiente grado di umidità tale da consentire, durante l'idratazione del cemento, il massimo sviluppo delle resistenze e la massima riduzione della porosità. Una buona stagionatura è pertanto essenziale per la riuscita di tutte le qualità potenziali conferite al calcestruzzo durante il proporzionamento della miscela. A livello di calcestruzzi AP ed AR questa procedura è ancora più importante e decisiva per il successo dell'opera.

A causa del basso rapporto a/c, è particolarmente raccomandata la stagionatura con acqua o con stuoie bagnate in continuazione, questo specialmente per $C > 75$, dove il rapporto a/c è certamente inferiore a 0,40. In ogni caso non è accettabile un'interruzione della bagnatura se nel frattempo la superficie del calcestruzzo si asciuga anche parzialmente. La temperatura, durante la stagionatura, è importante che non sia, nei limiti del possibile, troppo elevata perché favorisce la disidratazione del calcestruzzo. E' opportuno, pertanto, proteggere il calcestruzzo dai raggi solari diretti e dal vento specialmente se la sua velocità è superiore ai 2 m/s.

I film antievaporanti (curing compound) trattengono l'umidità originale del calcestruzzo, ma non aggiungono acqua e pertanto sono consigliabili solo laddove una bagnatura continua non è possibile.

Ricordiamo infine che per tutti i controlli di laboratorio bisogna seguire procedure particolarmente strette e rigorose. E' opportuno, pertanto dotare il laboratorio di tutte le attrezzature e del personale necessario a tali controlli che dovranno essere estesi oltre che al calcestruzzo finito a tutte le materie prime per prevenire variazioni eccessive nella qualità del calcestruzzo.

6 PROPRIETA' DEL CALCESTRUZZO INDURITO AD ALTE PRESTAZIONI

6.1 Resistenze meccaniche

Le resistenze a compressione dei calcestruzzi AP ed AR sono misurate come per il calcestruzzo ordinario su cubi normalmente di 15 cm di spigolo o su provini cilindrici di 10 x 20 o 15 x 30 cm. Le resistenze dei provini cubici e cilindrici sono correlate tra loro dalla relazione $R_{cub} = 1.18 R_{cil}$, valida anche per calcestruzzi ordinari con $R'_{ck} > 25 \text{ N/mm}^2$; come per il calcestruzzo ordinario la resistenza a compressione è funzione del rapporto a/c, ma con una differenza importante nel campo dei bassi rapporti a/c, come dimostrano le fig. 7 (andamento tratteggiato) e 8, intorno al valore di 0,40 nel calcestruzzo ordinario si registra un flesso, mentre nei calcestruzzi AP ed AR, a causa della presenza del superfluidificante e del fumo di silice, il flesso è assente e le resistenze crescono ulteriormente in modo inversamente proporzionale ad a/c. Come per il calcestruzzo ordinario la resistenza a compressione f'_c può essere correlata alle altre proprietà meccaniche. Lasciamo ad altri il commento di queste caratteristiche. (7)(8)(9)

Prima di passare oltre va, comunque, commentato il comportamento post rottura. Se si confrontano calcestruzzi di resistenze comprese tra 25 e 83 N/mm^2 si ha, secondo una ricerca ACI, per i calcestruzzi AP, (ma la considerazione è perfettamente valida anche per i calcestruzzi AR) che la parte ascendente della curva, è molto più lineare che per il calcestruzzo ordinario e la deformazione allo sforzo massimo è maggiore. La pendenza della parte discendente diventa più ripida denunciando un comportamento più fragile rispetto al calcestruzzo ordinario. Altra caratteristica

importante da verificare è la "proprietà di adesione": le proprietà di adesione del calcestruzzo comprendono l'adesione della pasta all'aggregato, ai ferri d'armatura, alle fibre ed al calcestruzzo vecchio. I calcestruzzi AP ed AR, specialmente se contengono il fumo di silice, mostrano proprietà di adesione superiori al calcestruzzo ordinario. Alcuni autori hanno studiato la zona di contatto tra la pasta di cemento e gli aggregati, definita: "aureola". Questa zona, di solito, è un punto di debolezza ed è disponibile per la propagazione della frattura. Nel calcestruzzo che contiene fumo di silice lo spessore di questa zona risulta drasticamente ridotto. Giorv e collaboratori realizzando un progetto per investigare il comportamento di adesione del calcestruzzo AP nei confronti dei ferri d'armatura (pull-out test) hanno realizzato ed esaminato numerosi calcestruzzi a differente livello di resistenza con e senza fumo di silice. La conclusione, ormai provata è che l'aggiunta di fumo di silice produce un aumento della resistenza allo sfilamento. Bache ha eseguito altre prove di pull-out utilizzando barre sottili (6 mm di diametro) annegate per 60 mm in provini di malta ad alta resistenza. I valori di resistenza allo sfilamento raggiungono 9 KN contro i 2 KN di una malta normale. Prove sperimentali, condotte in Italia, hanno dimostrato: che malte speciali, modificate con fumo di silice, hanno valori di pull-out, misurati su barre da 20 mm di diametro ad aderenza migliorata, di circa 10 N/mm² a 28 gg. contro 8 N/mm² circa per malte AP (80 N/mm²) ma senza fumo di silice. Ricordiamo, inoltre, che barre a aderenza migliorata annegate in calcestruzzi con resistenza di 40-45 N/mm² danno valori di pull-out intorno a 6 N/mm². Anche l'ancoraggio alle fibre è molto elevato, come ormai dimostrato da numerosi studi. (10)(11)(12)(13)

6.2 Ritiro e fluage

A causa del notevole dosaggio di cemento il potenziale ritiro del calcestruzzo AP sembra essere lievemente superiore a quello del calcestruzzo ordinario a pari rapporto a/c. A lunghe stagionature, tuttavia, non si sono viste differenze sostanziali tra i due calcestruzzi. L'uso dei superfluidificanti nel calcestruzzo AP ed AR, contribuisce a tenere basso il contenuto di acqua totale per m³, che è uno dei parametri che influenzano l'entità del ritiro. Il fluage diminuisce nei calcestruzzi AP ed AR, rispetto ai calcestruzzi ordinari. (7)

6.3 Resistenza all'abrasione-erosione

Calcestruzzi con bassi rapporti a/c e contenenti fumi di silice e superfluidificanti, presentano una elevata resistenza alla abrasione-erosione. I risultati sono riportati da Holland e sono stati successivamente confermati da Berra, Ferrara e Tavano. (15)(16)(17)

6.4 Durabilità

E' questo il campo in cui senza ombra di dubbio i calcestruzzi AP ed AR esprimono tutta la loro reale potenzialità.

6.4.1 Permeabilità

Il basso rapporto a/c necessario per la produzione di calcestruzzi AP ed AR, la presenza di superfluidificante che consente di mettere in opera calcestruzzi fluidi e di facile assestamento ed infine l'eventuale presenza dei fumi di silice che occlude tutti i pori capillari della pasta cementizia, rendono il calcestruzzo AP praticamente impermeabile. Già calcestruzzi con rapporto a/c pari a 0,50, se contengono fumi di

silice, presentano una profondità di penetrazione dell'acqua inferiore ad 1 cm (misurata secondo DIN 1048 parte 1). Ne consegue che quando il rapporto a/c scende sotto questi valori ed il contenuto di fumi di silice è almeno il 10% del peso del cemento, la profondità di penetrazione diventa praticamente nulla. Esprimendo questo concetto in termini di coefficiente di permeabilità, si può affermare che esso è inferiore a 10^{-14} m/s, in pratica non misurabile.

6.4.2 Resistenza al gelo

A causa della bassissima porosità, nei calcestruzzi AP ed AR diminuisce il contenuto d'acqua congelabile. Ne consegue, un marcato miglioramento della resistenza al gelo cui si somma il contributo dovuto alla maggiore resistenza a trazione del conglomerato cementizio. L'eventuale inglobamento d'aria ottenuto per mezzo di additivi aeranti sarebbe pertanto superfluo. Prove di resistenza al gelo condotte da Berra e Tavano (8) dimostrano che la caduta di modulo elastico su provini di malta non aerata ad alta resistenza, dopo 400 cicli di gelo e disgelo, secondo UNI 7087/72, è inferiore al 20% del valore iniziale.

La situazione è più complicata, quando si è in presenza di sali disgelanti. Essi provocano nel calcestruzzo normale, dopo un determinato numero di cicli, il cosiddetto "scaling" ovvero una scagliatura superficiale del calcestruzzo che si può misurare come diminuzione di peso o di volume di campioni sottoposti a prova. Anche i calcestruzzi AP ed AR sembrano sensibili allo "scaling" come il calcestruzzo normale. Il fenomeno si verifica solo dopo un numero più elevato di cicli (circa 100). E' pertanto consigliabile, in questi casi, che il calcestruzzo sia opportunamente aerato in quanto resiste meglio allo "scaling". Per evitare gli effetti collaterali negativi degli additivi aeranti in termini di perdita di resistenza, si può suggerire l'uso di microsferiche cave. Esse realizzano il sistema di vuoti, che è necessario all'ottenimento di una buona resistenza ai cicli di gelo e disgelo in presenza di sali disgelanti, senza deprimere le resistenze meccaniche in modo notevole. (5)

6.4.3 Resistenza agli agenti chimici (resistenza chimica)

Il fattore chiave che governa la velocità di deterioramento di un calcestruzzo esposto agli attacchi chimici è la sua permeabilità. Poiché i calcestruzzi AP ed AR sono, anche, dei calcestruzzi a bassissima permeabilità, se ne deduce che l'eventuale degrado si manifesterà in tempi più lunghi. La presenza poi dei fumi di silice sembra essere molto promettente per migliorare ulteriormente la resistenza chimica. In modo particolare sembrano essere migliorate la resistenza ai solfati e la reazione alcali aggregato. Alcuni studi (18) hanno dimostrato che un calcestruzzo AP con il 15% di fumo di silice, resiste molto bene a diversi tipi d'attacco (tabella 5).

Tabella 5 – Tempo in giorni necessario per misurare una perdita di peso del 20%

Soluzione	1% HCl	5% Acido acetico	1% Acido Lattico	1% H ₂ SO ₄
Cls con 15% di SF a/(c+s)=0,33	63	168	182	(*)
Cls di riferimento a/c=0,33	39	48	110	105

(*) Perdita in peso del 20% alla fine della prova (182 giorni)

Soluzione	5% (NH ₄) ₂ SO ₄	5% Na ₂ SO ₄
Cls con 15% di SF a/(c+s)=0,33	120	Nessuna perdita di peso
Cls di riferimento a/c=0,33	120	Nessuna perdita di peso

6.4.4 Corrosione delle armature

Anche il problema di una buona protezione delle armature dalla corrosione può essere risolto, come per gli attacchi chimici, riducendo la permeabilità del calcestruzzo (in questo caso del copriferro) e quindi operando con calcestruzzi AP ed AR. Com'è noto, dato che la corrosione è, innescata dalla presenza di cloruri e dalla profondità di carbonatazione (19) e poiché una bassa permeabilità riduce sia la penetrazione dei cloruri che l'avanzamento del fronte di carbonatazione, se ne deduce che nei calcestruzzi AP ed AR, è ridotto il tempo d'innescamento. La seconda fase della corrosione, è la velocità di propagazione del fenomeno legata alla disponibilità d'ossigeno nelle vicinanze dei ferri ed alla conducibilità elettrica del calcestruzzo. Per quanto concerne il trasporto d'ossigeno dall'esterno, sembra che in un calcestruzzo a bassa permeabilità, questo, diminuisca, (20) mentre per ciò che concerne la conducibilità elettrica si è visto come la presenza dei fumi di silice faccia diminuire la conducibilità e quindi aumentare la resistività del calcestruzzo in modo notevole (figura 9). Si ha dunque minor passaggio di corrente nell'elettrolita calcestruzzo, e di conseguenza, un minor rischio di corrosione delle armature. (19)

7 CONSIDERAZIONI ECONOMICHE

Essendo il calcestruzzo AP un prodotto della tecnologia moderna che richiede: l'impiego di materie prime selezionate, un maggior dosaggio di cemento di classe almeno 42.5, l'uso per lo meno di additivi superfluidificanti oltre che di fumo di silice. Il costo di questo calcestruzzo, è ovvio, sarà superiore a quello del calcestruzzo ordinario. Inoltre, si devono aggiungere i maggiori costi necessari ad effettuare i più stretti controlli sia di laboratorio sia sul campo richiesti da questo tipo di calcestruzzo. Le maggiori prestazioni, offerte da tale materiale in termini di resistenze meccaniche e di durabilità, sono proporzionate al maggior costo del prodotto? Quali risparmi si possono prevedere, in fase progettuale, che consentano di recuperare i maggiori costi di questo calcestruzzo? Ci sono casi dove le prestazioni del calcestruzzo AP sono assolutamente necessarie e quindi i maggiori costi passano in secondo ordine?. Sono queste, delle valutazioni che lasciamo al progettista, che oggi può disporre di nuovi materiali che nella stragrande maggioranza dei casi non sono, ancora, convenientemente sfruttati. Scopo di questa relazione, è proprio quello di consentire una maggiore conoscenza di questi calcestruzzi al fine di una loro

applicazione più ampia.

8. BIBLIOGRAFIA

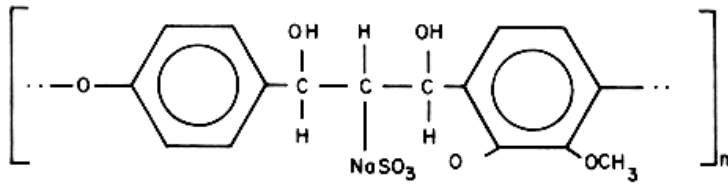
- (1) Khurana R. - "Il calcestruzzo ad alta resistenza ($C > 70$)" - Atti Master ASSIAD Firenze 16-17-18/2/1998.
- (2) Ramachandran V.S. - "Uso dei superfluidificanti nel calcestruzzo" - Il Cemento 3/1987.
- (3) Shonaka M. e altri - "Chemical Structures and Performance of New High-Range Water-Reducing and Air-Entraining Agents" Atti convegno Roma 1997 – Superfluidificanti SP 173 – 30 pag.599-614.
- (4) Vito Alunno Rossetti - "Additivi di terza generazione per calcestruzzo fluido nel tempo" - L'Edilizia" 9/10-1997
- (5) Tavano S.: «Resistenza al gelo ed ai sali disgelanti del calcestruzzo armato: nuovi orientamenti» La Prefabbricazione II-1986.
- (6) Berra M., Tavano S.: "Proprietà di miscele cementizie contenenti fumo di silice condensato" Convegno AITEC: Il Cemento e il calcestruzzo negli anni '80, Parma, Ottobre 1985
- (7) ACI JOURNAL 7-8/1984 "State of the Art Report on High-Strength Concrete" Report n° ACI 363R-84
- (8) Berra M., Tavano S.: "Malte cementizie speciali con fumo di silice" La Prefabbricazione 10-1986
- (5) Corradini G., Pajewski L. A., Scoccia G., Volpe R., Tavano S.: "Influenza di alcuni parametri sulle resistenze meccaniche e sul modulo elastico di malte modificate con fumo di silice" Seminario AICAP Calcestruzzi speciali, L'Aquila, 5-6 Ottobre 1988
- (10) Johansen R., Dahl P.A. "Silikabetongens heftegenskaper". Presented at the seminar Bruk av silika i betong. Norske Silikagens Forening, Oslo, Oct. 1983 (in Norwegian)
- (11) Carles-Gibergue A. et all. "Contact zone between cement paste and aggregate" Proc. Int. Conf. Bond in Concrete.
Edited by Bortons P. Applied Science Publishers, London, 1982, 24-33
- (12) Gjorv O.E. et all. "Effect of condensed silica fume on the steel-concrete bond" Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1986, Report BML 86.201
- (13) Bache H.H. "Densified cement/ultra-fine particle-based materials" Presented at the second international conference on superplasticizers in concrete, Ottawa, June 10-12 1981
- (14) Neville A.M. "Le proprietà del calcestruzzo" Sansoni editore Firenze 1980
- (15) Holland T.C. "Abrasion-erosion evolution of concrete mixtures for stilling basin repair, Kinzna Dam, Pennsylvania" V.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Structures Laboratory, Vickstburg, 1983, Miscellaneous Paper SL 83-16
- (16) Holland T.C. et all. "Use of silica-fume concrete to repair abrasion-erosion damage in the Kinzna Dam Stilling Basin" Publication SP-91 American Concrete Institute, 1986, II 695-708
- (17) Berra M., Ferrara G., Tavano S.: "Uso di fumi di silice nel ripristino dei danni da erosione in una galleria di deviazione del calcestruzzo" Convegno AITEC: La durabilità delle opere in calcestruzzo, Padova, Ottobre 1987.
- (18) Metha P.K.: "Chemical resistance of concrete containing latex or silica fumes as admixtures" Elkem Chemicals (1984)
- (19) Berra M., Ferrara G., Tavano S. "La corrosione delle armature del calcestruzzo.

Influenza di alcuni materiali con attività pozzolanica: fumi di silice e Ceneri volanti"
Convegno AITEC: La durabilità delle opere in calcestruzzo, Padova, Ottobre 1987

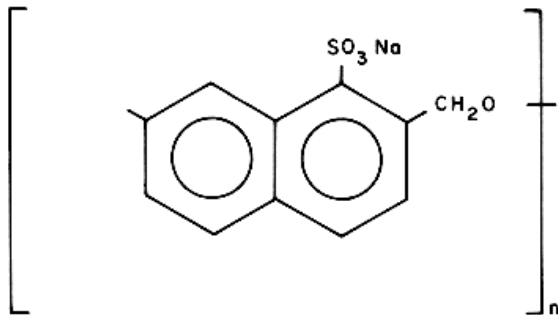
(20) Vennesland O, Fjorv O.E. "Silica Concrete Protection Against Corrosion of Embedded Steel" First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slay and Other Mineral Byproducts in Concrete, Montebello, Canada, August 1983, ACI Publication SP-79, II, 719-729.

(21) Gjorv O.E. "Durability of Concrete Containing Condensed Silica Fume" First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slay and Other Mineral Byproducts in Concrete, Montebello, Canada, August 1983, ACI Publication SP-79, II, 695-708

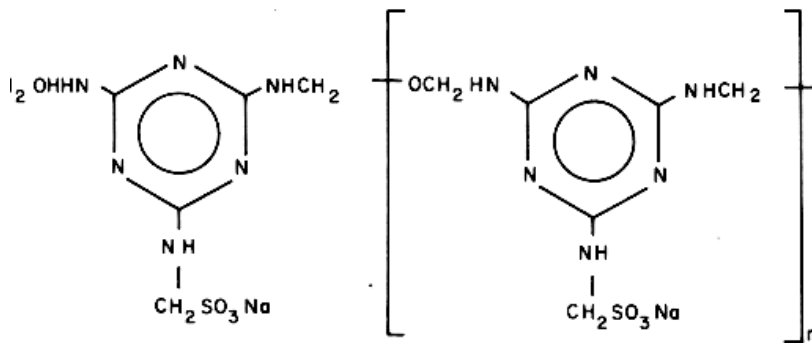
(22) Pigni I. «Fumo di silice e calcestruzzo» In Concreto 18-1997



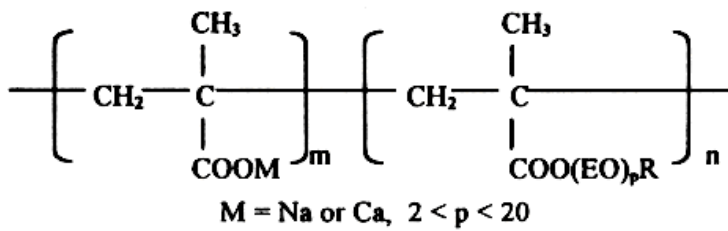
(1) *Ligninsulfonato di sodio (LS)*



(2) *Sale sodico di naftalsulfonato condensato con formaldeide (NSF)*



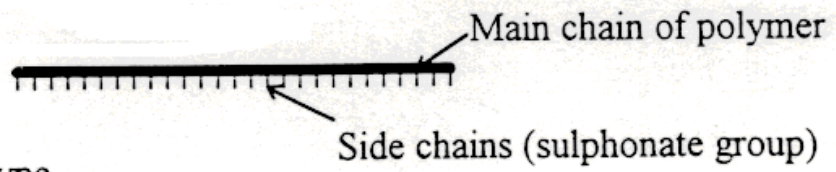
(3) *Sale sodico di melamina solfonata con formaldeide (MSF)*



(4) *Sali (di Na o Ca) dell'acido acrilico e copolimeri di esteri acrilici (CAE)*

FIGURA 1

Naphthalene sulphonate type



Polycarbonate EO type

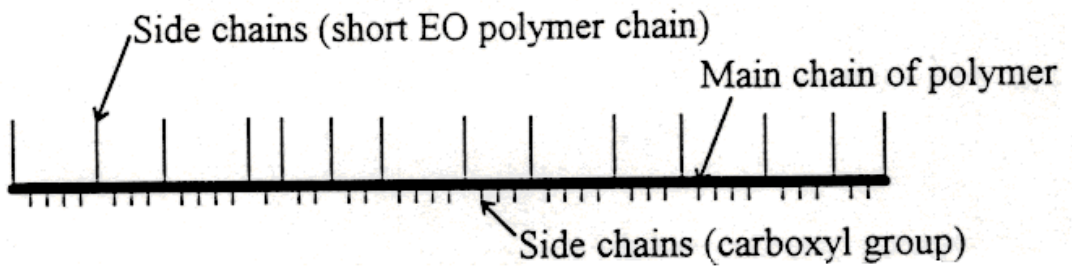


FIGURA 2A.1

Side chains
(long EO polymer chain)

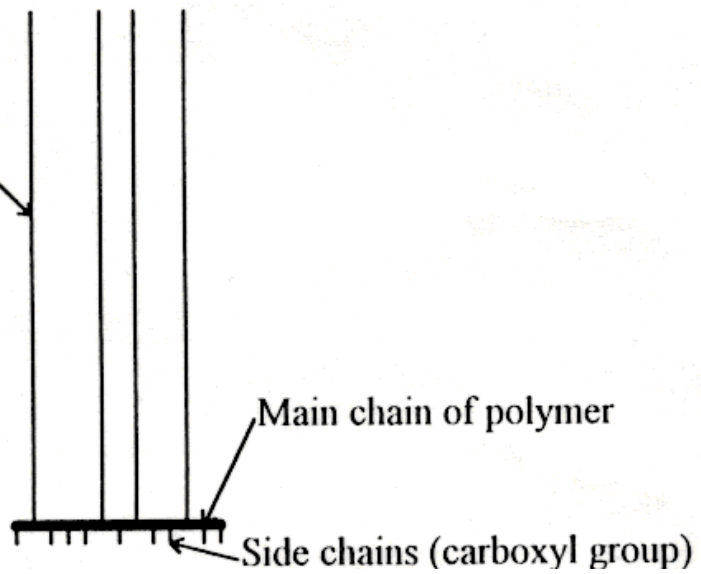


FIGURA 2A.2

Confronto tra la struttura di additivi CAE di nuova generazione e additivi tradizionali a base NSF (naftalensolfonati condensati con formaldeide).

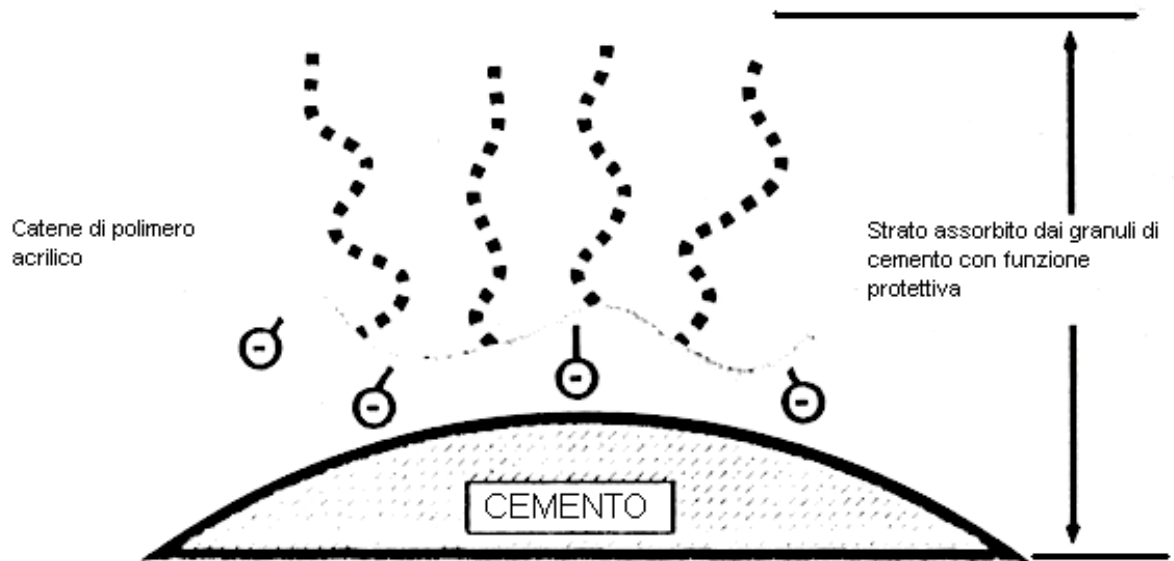


FIGURA 2B
 Schema del meccanismo d'azione di additivi CAE. Ingombro sterico.

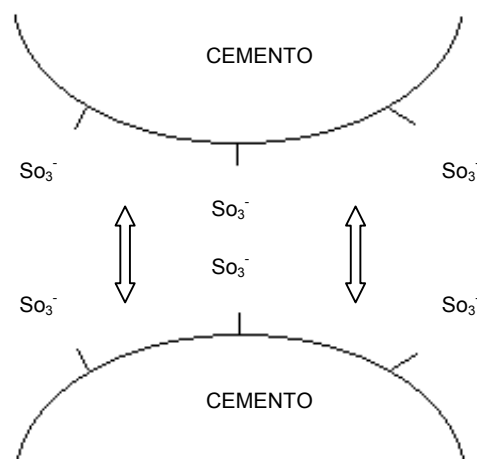


FIGURA 2C
 Schema del meccanismo di azione additivi NSF. Repulsione elettrostatica.

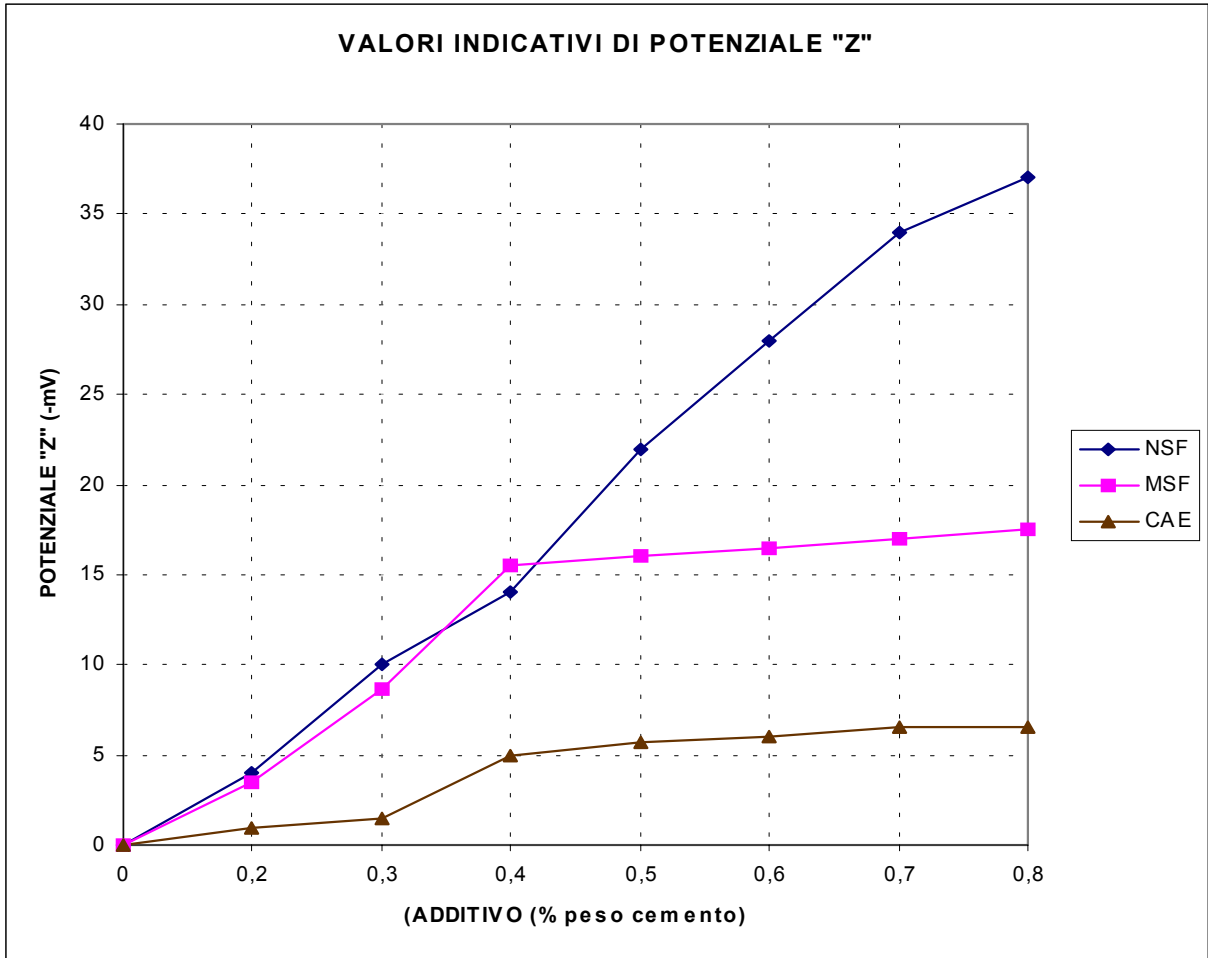


FIGURA 3A

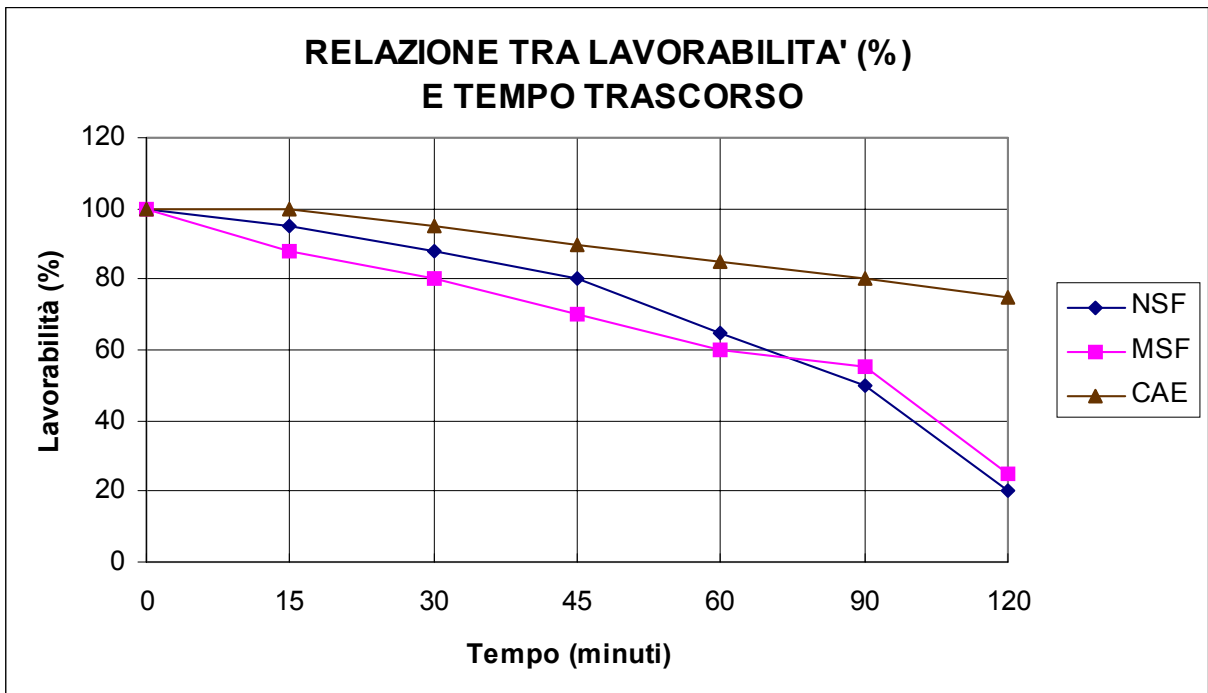


FIGURA 3B

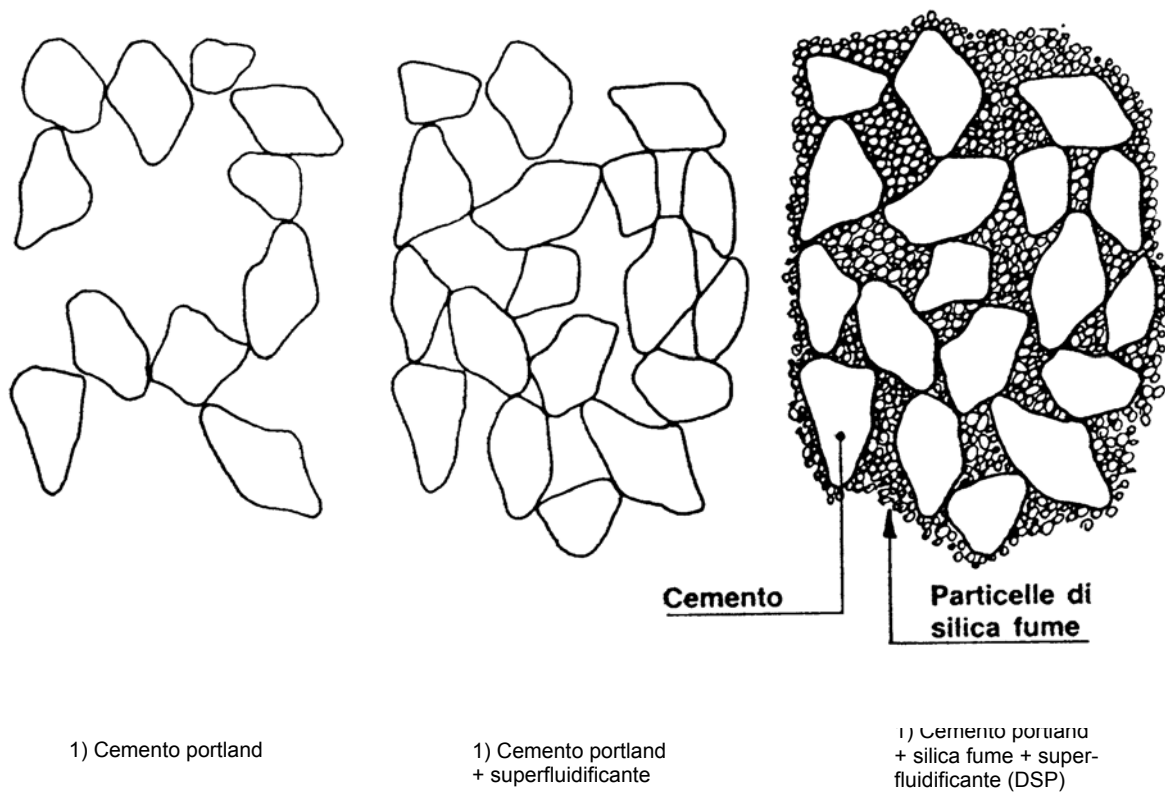


FIGURA 4
Struttura della pasta di cemento allo stato fresco.

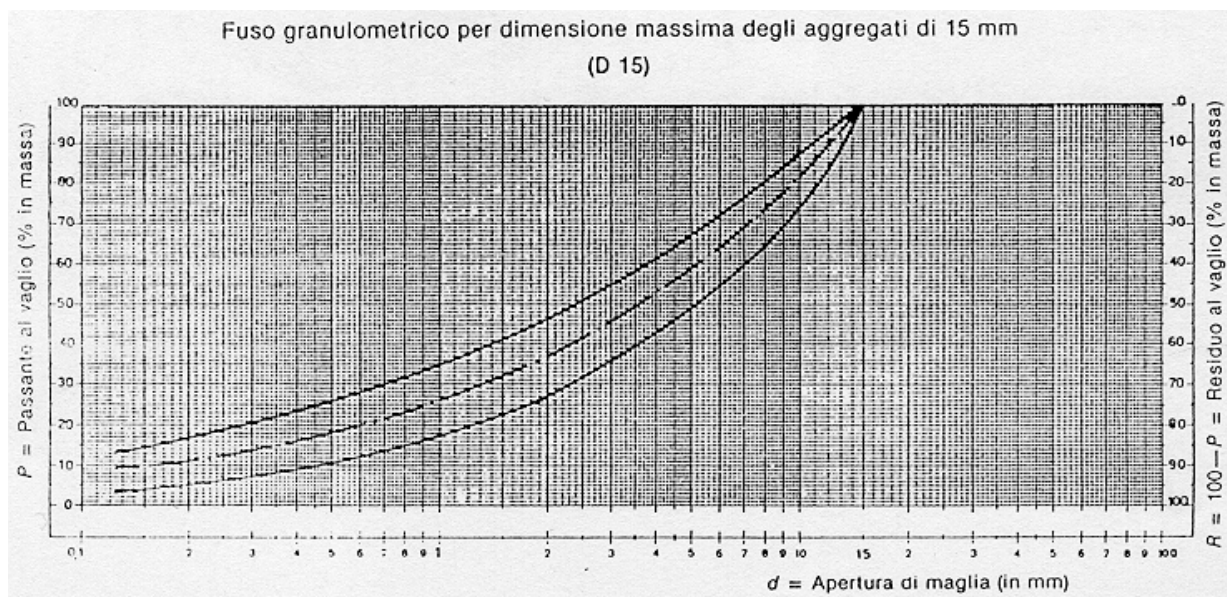


FIGURA 5
Fusi granulometrici degli aggregati

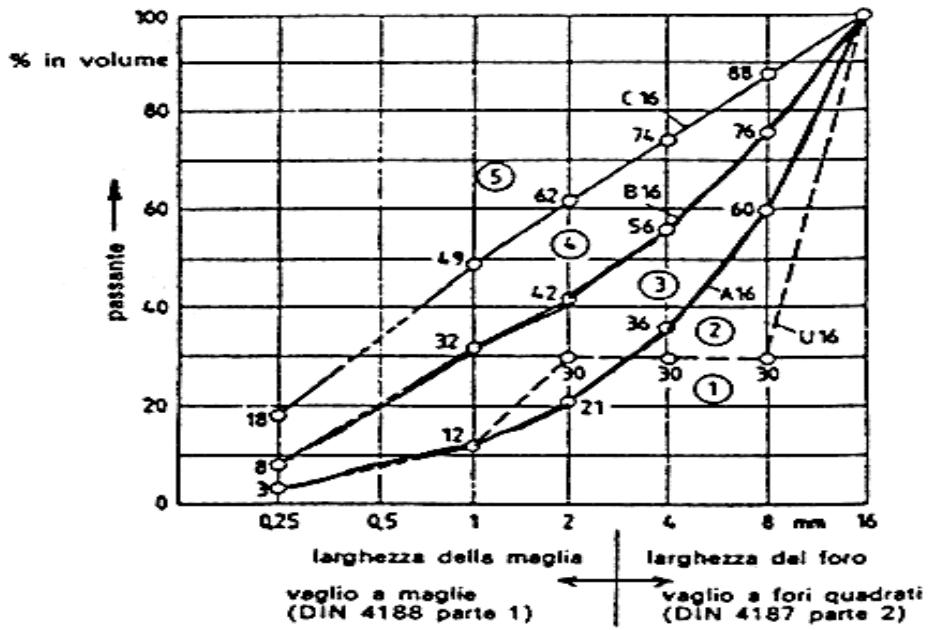


FIGURA 6
Curva granulometrica con grana grossa da 16 mm.

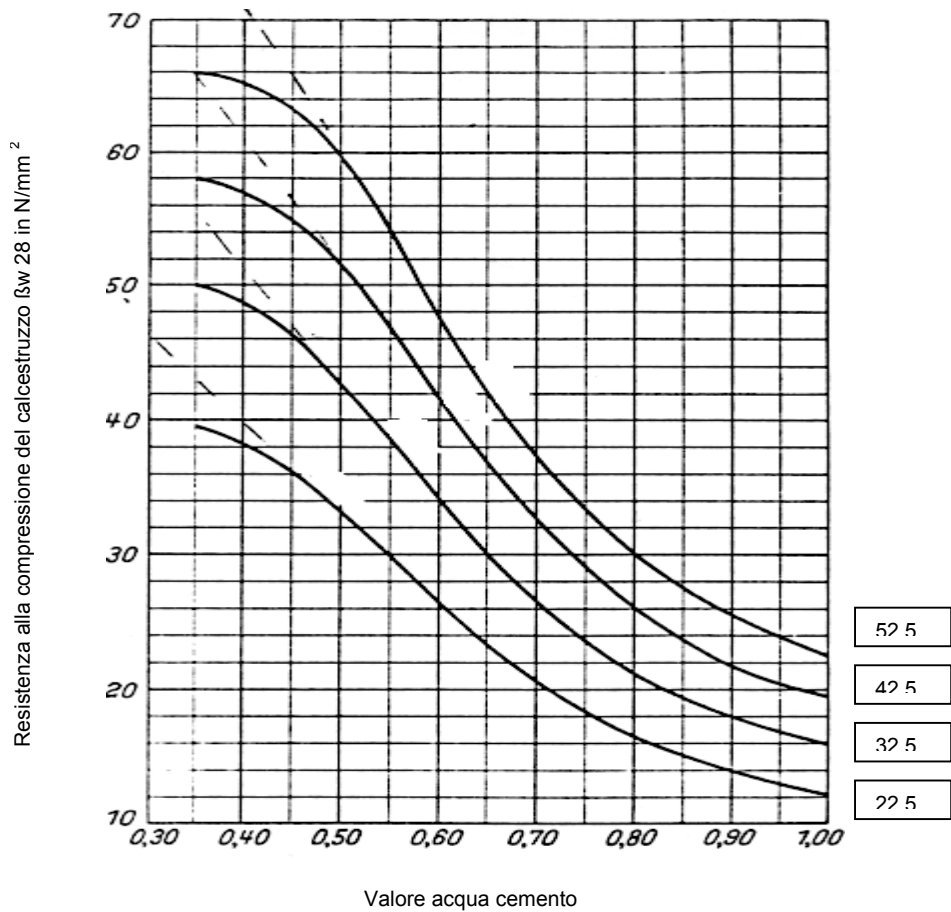


FIGURA 7
Resistenza alla compressione del calcestruzzo in funzione del rapporto a/c e della classe di resistenza del cemento secondo Walz.

FIGURA 8
 28-day compressive strength versus W/C ratio for concrete with different CSF contents. Concretes with and without water-reducing admixtures are not differentiated. Cement is standard Portland cement (SP30): strength is 28-day cube strength for a 100X100X100 mm cube. (From ref 42)

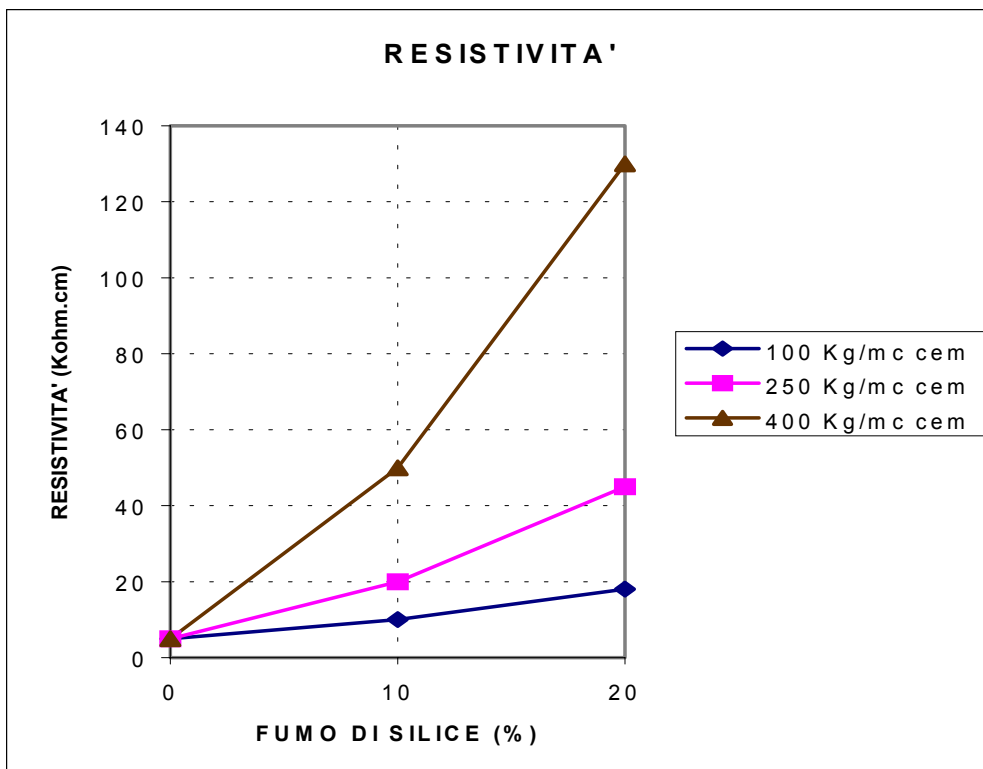
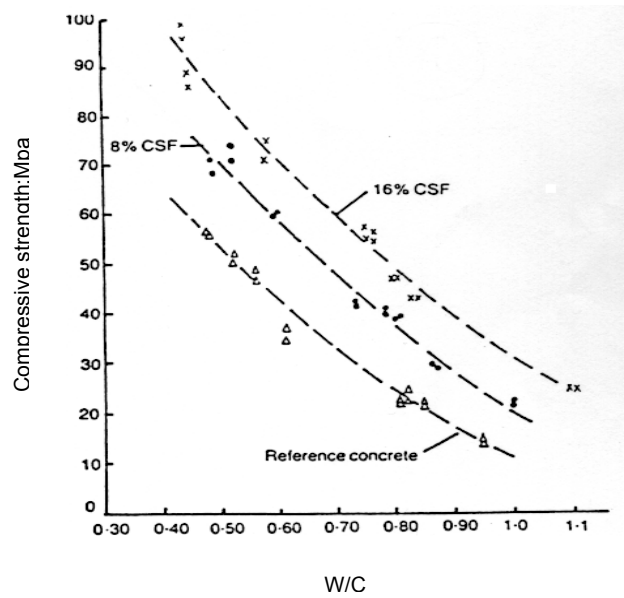


FIGURA 9