

IMPIEGO DI CENERE VOLANTE AD ALTI DOSAGGI IN CONFORMITÀ ALLE PRESCRIZIONI DELLA UNI EN 206

VITO ALUNNO ROSSETTI, Università di Roma

ANTONELLA FERRARO Clinica del
Calcestruzzo, Roma

MICHELE VALENTE, General Admixtures,
Ponzano Veneto (TV)

MARCO BRESSAN, General Admixtures,
Ponzano Veneto (TV)

ALESSANDRO PASQUALINI, General
Admixtures, Ponzano Veneto (TV)

SUMMARY

Concrete mixes containing fly ash additions have been studied, according to the k value concept of the UNI EN 206 and the EN 11104, aiming to get compressive strengths equal or greater than the minimum specified for the exposure classes and to evaluate the effective k value for the materials utilized.

Each mix contains the minimum cement content allowed by the 11104 for the exposure class; the mixes with fly ash contain the quantity of addition required by the rules of the k value. Besides, for each mix, larger dosages of addition have been utilized, up to 200 kg/m³, part of which cannot be taken in consideration as cement replacement.

The results show that strength classes well over the minimum required and up to C45/55 can be easily obtained and that the effective k value is equal or greater than 0.4 from 28 days on.

1. INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO

L'uso di cenere volante nel calcestruzzo è certamente vantaggioso, così come lo è nel cemento pozzolanico, per gli aspetti legati alla sostenibilità e per il suo contributo positivo alla durabilità, che si esplica a seguito della reazione pozzolanica, della capacità di ridurre il dosaggio d'acqua a pari consistenza e dei minori rischi di fessurazione termica. Non si può peraltro escludere che l'impiego di cenere, a parità di prestazioni, apporti anche benefici economici; questo aspetto evidentemente in funzione del prezzo e della qualità della cenere e delle performances richieste al calcestruzzo.

Numerosi articoli comparsi nella letteratura internazionale^[01] trattano l'impiego di elevati dosaggi di cenere e sostanziali riduzioni di cemento (HVFC).

In Europa questo approccio incontra l'ostacolo normativo. La EN 206 e la UNI 11104 prevedono per il calcestruzzo l'uso di aggiunte pozzolaniche o ad attività idraulica latente di tipo II, in particolare ceneri volanti conformi alla UNI EN 450, anche in parziale sostituzione del cemento. In tale utilizzo si deve però tener conto delle regole articolate contenute nella Norma, secondo il concetto del valore k, che limitano la riduzione del cemento.

Le ceneri infatti possono essere prese in considerazione:

- assicurando che la quantità F di cenere e quella di cemento C presenti nel calcestruzzo soddisfino la relazione $C+F \geq C_{min}$ (1)
- sostituendo al termine "rapporto acqua/cemento" il termine "rapporto acqua/(cemento + k x F)" (2)

in cui C_{min} è il minimo dosaggio di cemento ammesso per la classe di esposizione.

Il dosaggio di cenere F è limitato dalle regole:

- riduzione massima di cemento uguale o minore di: $k \times (C_{min} - 200)$
- $F/C \leq 0.33$ in massa.

È consentito un dosaggio di cenere maggiore di F; in tal caso non si può tenere conto dell'eccedenza ai fini delle (1) e (2).

Attenendosi alle precedenti regole si determinano i dosaggi limite di cenere e cemento da prendere in considerazione: ad esempio per un calcestruzzo in classe XD3 con un elevato $C_{min} = 360 \text{ kg/m}^3$ (UNI 11104), nel caso di $k = 0.2$, il dosaggio minimo di cemento è di 328 kg/m^3 (C_{min}, F) cui corrisponde un dosaggio di cenere di 108 kg/m^3 (per un contenuto d'acqua di 155 l/m^3). Dette regole verranno modificate a seguito della revisione (in corso) della EN 206, ma ciò non influirà sul significato del presente lavoro.

Numerosi Autori hanno studiato miscele ad elevato dosaggio di cenere ma senza riferimento specifico all'applicazione delle regole della UNI EN 206.

Sembra utile, alla luce di esperienze maturate in cantieri attivi al momento in Italia, valutare la possibilità di impiego della cenere nel calcestruzzo portandone il contenuto a quantità elevate, nel campo in cui parte della cenere non può essere presa in considerazione ai fini della durabilità e del dosaggio di cemento.

Casi tipici di interesse:

- elementi strutturali in classe di esposizione poco impegnativa, ai quali si richiedono per motivi strutturali resistenze significativamente più elevate di quelle previste per la classe di esposizione;

- elementi strutturali di modesto impegno strutturale, in classe di esposizione severa (ad esempio barriere di protezione stradali).

2. SIGNIFICATO DELLA RICERCA E DEFINIZIONE GENERALE DELLE MISCELE

Nel presente lavoro si sviluppa un programma relativo al primo dei due casi precedenti con riferimento alle classi di esposizione.

Il concetto alla base della sperimentazione è quello di:

- mantenere, per ciascuna delle miscele provate, il dosaggio di cemento al valore minimo C_{min} ammesso per una determinata classe di esposizione,
- tale valore C_{min} e la corrispondente classe di resistenza del calcestruzzo R_{min} , frequentemente non consentono il rispetto delle prescrizioni del capitolato per l'aspetto strutturale,
- la resistenza a compressione viene portata al valore del requisito strutturale R_s mediante aggiunta di cenere volante,
- per ognuno dei tipi di calcestruzzo si provano miscele con il dosaggio minimo di cemento ammesso dalla norma (C_{min}) e senza cenere volante, con uso di fluidificante; si procede in questo modo prescindendo dal fatto che la miscela raggiunga o meno il valore minimo di R_{min} richiesto. Queste miscele sono designate: miscele di riferimento (R),
- per ognuno dei medesimi tipi di calcestruzzo, portando il dosaggio del cemento dal valore C_{min} a $C_{min,F} = C_{min} - kx(C_{min} - 200)$, valore minimo in presenza di ceneri volanti, si realizzano miscele attraverso aggiunte modulari crescenti di cenere volante, talora anche superiori al valore di $F^* = 0.33 \times C_{min,F}$, al fine di valutare:
 - sia l'andamento della R_c in funzione del dosaggio di cenere F e la possibilità di raggiungere il valore R_s richiesto,
 - sia la variazione del valore effettivo di k al variare del rapporto F/C , caratteristico della combinazione di cenere e cemento usati.

3. MATERIALI E MISCELE

3.1. MATERIALI

Si è impiegato un cemento CEM II A/LL 42.5 R e cenere volante MICRO POZZ PFA di General Admixtures S.p.A.

L'additivo superfluidificante, è stato utilizzato con dosaggi variabili (da 0.2% a 1% in volume sul peso del legante) tali da garantire l'obiettivo di lavorabilità cercato, pari a 21 ± 2 cm.

Gli aggregati sono di tipo alluvionale; è stata impiegata la stessa curva granulometrica per le miscele di riferimento (50% di sabbia, 20% di ghiaio e 30% di ghiaia) e con D_{max} nominale di 25 cm. Nelle miscele con ceneri volanti è stata diminuita la sabbia in funzione del dosaggio di cenere aggiunta.

Per le miscele con aggiunta d'aria è stato utilizzato additivo aerante a dosaggi variabili (da 100 ml/m^3 a 400 ml/m^3) tali da garantire un contenuto d'aria aggiunta del 3% (e un contenuto totale dell'aria del 4.5-5%); i dosaggi più alti sono stati necessari per le miscele con quantitativi di cenere più elevati.

3.2. MISCELE

I tipi di calcestruzzo studiati sono elencati nella tabella seguente; dall'analisi dei requisiti minimi (relativi al rapporto a/c, classe di resistenza e dosaggio minimo di cemento) delle 17 classi di esposizione (si è esclusa la classe X0) e dal loro raggruppamento, si individuano 7 tipi di calcestruzzo (5 senz'aria e 2 con aggiunta d'aria, si veda la tabella 1).

Tabella 1: Tipi di calcestruzzo risultanti dal raggruppamento delle caratteristiche delle classi di esposizione

Classe Esp.	Requisiti minimi, UNI 11104			Tipi Cls
	a/c max	Rck Min	Cmin	
X0	-	C15	-	
XC1	0.60	C30	300	Tipo 1
XC2	0.60	C30	300	
XC3	0.55	C35	320	Tipo 2
XC4	0.50	C40	340	
XS1	0.50	C40	340	Tipo 3
XS2	0.45	C45	360	
XS3	0.45	C45	360	
XD1	0.55	C35	320	Tipo 2
XD2	0.50	C40	340	Tipo 3
XD3	0.45	C45	360	Tipo 4
XF1	0.50	C40	320	Tipo 5
XF2	0.50	C30	340	Tipo 3A*
XF3	0.50	C30	340	
XF4	0.45	C35	360	Tipo 4A*
XA1	0.55	C35	320	Tipo 2
XA2	0.50	C40	340	Tipo 3
XA3	0.45	C45	360	Tipo 4

* 3A e 4A miscele con aria (contenuto minimo in aria 3%, UNI 11104)

Nella tabella 2 sono riportate le caratteristiche delle 22 miscele di calcestruzzo utilizzate nella nostra ricerca. Si osserva che:

- i valori di dosaggio minimo di cemento $C_{min,F}$ e i rapporti acqua/cemento determinati considerando $k = 0.2$ soddisfano i valori limite della UNI 11104 e le regole della UNI EN 206-1,
- rispetto alle miscele di riferimento sono state effettuate aggiunte progressive di cenere con lo scopo di ottenere le resistenze più elevate richieste.

Il dosaggio d'acqua nelle miscele base, è quello risultato necessario per assicurare la consistenza voluta.

Tabella 2: mix per i vari tipi di calcestruzzo, con e senza cenere volante

N° Prova	Classe Esp.	Tipo cls	N° Livello	Classe di Resist.	Cemento kg/m ³	FA kg/m ³	A l/m ³	a/(c+kx F^*)	F/c
1	XC1, XC2	1	R	C25/30	300	0	165	0.55	
2			1	C25/30	280	30	165	0.58	0.11
3			2	C28/35	280	50	160	0.55	0.18
4			3	C32/40	280	100	155	0.52	0.36
5	XC3, XD1, XA1	2	R	C28/35	320	0	165	0.52	
6			1	C28/35	296	30	165	0.55	0.10
7			2	C32/40	296	50	160	0.52	0.17
8			3	C35/45	296	100	155	0.49	0.34
9	XC4, XS1, XD2, XA2	3	R	C32/40	340	0	165	0.49	
10			1	C32/40	312	50	160	0.50	0.16
11			2	C35/45	312	100	155	0.47	0.32
12			3	C40/50	312	150	150	0.45	0.48
13	XS2, XS3, XD3, XA3	4	R	C35/45	360	0	160	0.44	
14			1	C35/45	328	100	155	0.45	0.30
15			2	C40/50	328	150	150	0.43	0.46
16			3	C45/55	328	200	145	0.42	0.61
17	XF2, XF3	3A	R	C25/30	340	0	165	0.49	
18			1	C25/30	312	50	160	0.50	0.16
19	XF4	4A	R	C28/35	360	0	160	0.44	
20			1	C28/35	328	100	155	0.45	0.30
21	XF1	5	R	C32/40	320	0	160	0.50	
22			1	C32/40	296	75	155	0.50	0.25

* il rapporto $a/(c+k \times F)$ è stato calcolato, nei casi di cenere volante superiore a F^* , non considerando la quantità eccedente, nel rispetto dei requisiti normativi

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati di resistenza a compressione (Tabella 3) ottenuti nel corso delle prove, indicano che l'obiettivo di raggiungere resistenze superiori ai valori limite per la durabilità (peraltro entro il limite di C45/55 indicato dalle NTC, per calcestruzzi che non richiedono apposita sperimentazione, par 4.1), mantenendo il cemento al dosaggio minimo e aggiungendo cenere, è facilmente raggiungibile.

Il dosaggio d'acqua delle miscele con aggiunta di quantità elevate di ceneri volanti è quello necessario a garantire la consistenza voluta (S4); è da notare il fatto che la riduzione del dosaggio d'acqua è progressiva all'aumentare della cenere, anche fino a dosaggi molto elevati (miscele 4); inoltre, le miscele con 150 e 200 kg/m³ di cenere mostravano (a pari consistenza e pari dosaggio di additivo) una certa "collosità". Tale situazione è comunque agevolmente superabile attraverso l'utilizzo di idonei additivi superfluidificanti.

4.1. RESISTENZA A COMPRESSIONE

I dati ottenuti nella presente ricerca sono numerosi, ma da un tipo di calcestruzzo all'altro le indicazioni sono del tutto simili, confermando comportamenti omogenei, ripetibili e affidabili.

Per le miscele di riferimento si osserva che adottando i dosaggi minimi di cemento secondo la UNI 11104 non è soddisfatto il requisito della classe di resistenza minima richiesta per la classe di esposizione. Le miscele di riferimento sono state realizzate con il dosaggio di cemento minimo indicato dalla classe di esposizione e con rapporti a/c inferiori al limite massimo (a volte alquanto inferiori).

Dalla relazione $R_c - a/c$ ricavata dai risultati ottenuti sulle miscele base, si è calcolato il rapporto a/c che consente di ottenere, con il cemento impiegato, il target di resistenza media di ciascuna classe: $R_{cm} = R_{ck} + 6$ MPa. Ipotizzando lo stesso dosaggio di acqua si è calcolato il dosaggio di cemento che si dovrebbe usare per ottenere la resistenza target, che è risultato maggiore da 10 a 35 kg/m³ e mediamente di circa 25 kg/m³ rispetto a quello indicato dalla UNI EN 206 per un cemento 32.5.

Vengono riportati nelle figure seguenti i valori di resistenza a compressione ai diversi tempi di stagionatura per due tipi di calcestruzzo non aerato e con il minimo (figura 1) ed il massimo (figura 2) dosaggio di cemento. Come ovvio, al crescere del dosaggio di cenere aumenta la resistenza a tutte le stagionature; gli incrementi di resistenza tra 28 e 90 giorni sono maggiori per le miscele con cenere rispetto a quelle con solo cemento: mediamente si ha per le miscele di

riferimento un incremento da 28 a 90 d pari al 14.4 %, che sale al 19.8 % per le miscele con cenere.

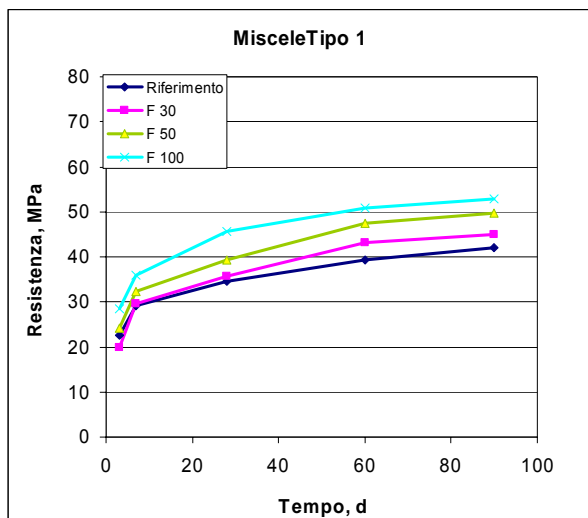


Figura 1: Calcestruzzo Tipo 1, Miscele 1-4

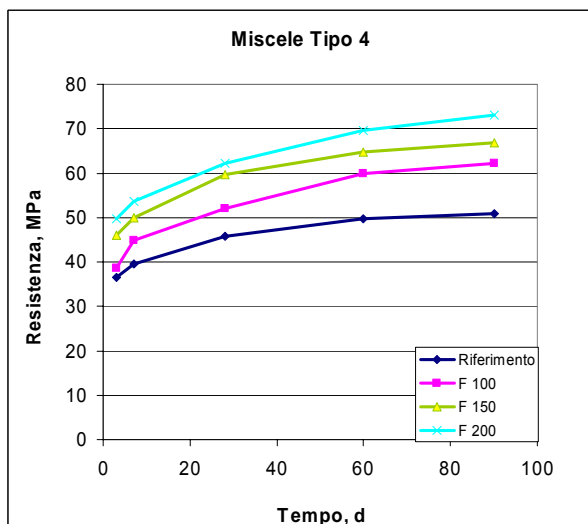


Figura 2: Calcestruzzo Tipo 4, Miscele 13-16

Va ricordato che l'aumento di resistenza è dovuto all'effetto combinato della reazione pozzolanica della cenere e della riduzione di richiesta d'acqua a pari consistenza.

Non tutte le miscele con cenere volante raggiungono la resistenza richiesta per la classe prevista, ma è evidente dai risultati ottenuti che modulando i dosaggi di cenere è possibile centrare la resistenza voluta.

Tabella 3: resistenza a compressione di tutte le miscele

N° Prova	Rc, MPa				
	3d	7d	28d	60d	90d
1	22.7	29.2	34.6	39.4	42.1
2	19.9	29.6	35.8	43.1	44.9
3	24.1	32.4	39.4	47.5	49.8
4	28.4	36.0	45.6	50.9	52.9
5	25.1	31.5	37.9	42.5	45.6
6	22.7	29.8	38.1	45.1	47.2
7	26.8	35.2	44.0	50.2	51.8
8	31.6	37.9	47.4	54.2	58.5
9	30.9	36.9	42.2	44.9	47.9
10	28.6	37.3	43.4	50.6	53.7
11	34.7	40.9	49.4	56.3	59.4
12	41.2	46.2	54.6	62.2	64.4
13	36.5	39.6	45.8	49.6	50.9
14	38.7	44.8	52.1	59.9	62.1
15	46.1	50.0	59.6	64.8	66.9
16	49.8	53.6	62.3	69.5	73.1
17	25.2	30.6	35.0	37.2	38.6
18	23.6	31.3	36.2	40.3	42.4
19	30.5	32.5	38.2	40.7	42.1
20	32.9	35.8	42.2	46.6	49.9
21	26.8	33.4	39.5	43.5	47.7
22	30.2	38.3	47.0	52.0	55.2

Le miscele con aria aggiunta (tipo 3A e 4A) sono state valutate separatamente. Dal confronto delle miscele di riferimento con e senza aria, si è valutata la diminuzione di resistenza dovuta all'aggiunta di aria (circa 8 MPa; ad esempio la miscela di riferimento tipo 3A ha ottenuto una resistenza a 28d di circa 35 MPa con a/c pari a 0.49, mentre in corrispondenza di tale rapporto a/c dalla curva Rc-a/c ottenuta dalle miscele di riferimento senza aria si ottiene una resistenza a 28d di poco più di 42 MPa). Questa valutazione è stata poi tenuta in conto per la determinazione del valore k per le miscele con aria. I valori ottenuti sono comparabili con quelli ottenuti per le miscele senza aria.

4.2. VALORE K EFFETTIVO

Questo parametro, nel presente contesto, rappresenta un coefficiente di equivalenza della cenere impiegata al cemento impiegato, in termini di apporto di resistenza a compressione.

Analizzando le miscele con cenere si è ricavato il valore di k effettivo nel tempo, utilizzando le curve $R_c - a/c$ delle miscele di riferimento senza cenere, alle varie stagionature.

Da dette curve, per i vari valori R_c ottenuti dalle miscele con cenere, si è ricavato il rapporto a/c corrispondente; questo è stato uguagliato al rapporto $a/(c+kF)$ e inserendo i dosaggi di acqua, cemento e cenere effettivamente utilizzati, si è ricavato k , riportato in Tabella 4.

Tabella 4: valore k di tutte le miscele

N° Prova	K				
	3d	7d	28d	60d	90d
1					
2	0.25	0.81	0.89	1.54	1.24
3	0.44	0.65	0.78	1.32	1.28
4	0.33	0.43	0.64	0.78	0.76
5					
6	0.26	0.32	0.83	1.47	1.30
7	0.39	0.66	1.00	1.37	1.27
8	0.31	0.38	0.58	0.83	1.01
9					
10	0.24	0.59	0.61	1.11	1.23
11	0.28	0.38	0.53	0.81	0.92
12	0.28	0.36	0.45	0.70	0.76
13					
14	0.28	0.43	0.51	0.89	0.96
15	0.29	0.38	0.51	0.71	0.78
16	0.21	0.30	0.38	0.60	0.72
17					
18	0.52	0.82	0.70	0.79	0.73
19					
20	0.36	0.38	0.41	0.54	0.65
21					
22	0.34	0.53	0.74	0.92	1.02

Dall'analisi dei valori ottenuti (si riportano i grafici relativi a due soli tipi di calcestruzzo, figura 3 e figura 4) si osserva che:

- il valore k , come era da aspettarsi, aumenta nel tempo; ciò è dovuto al fatto che la reazione pozzolanica della cenere è progressiva nel tempo, mentre gli incrementi di resistenza nel tempo del cemento, si riducono rapidamente. Per quattro miscele con dosaggio di cemento relativamente basso, si rileva una riduzione del k tra 60 e 90 giorni: si deve tener conto che possibili errori nella misura di resistenza a

compressione hanno un effetto amplificato sui valori di k .

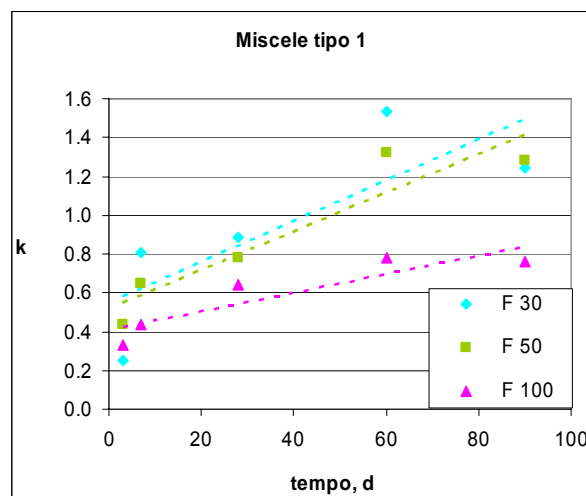


Figura 3: Andamenti di k nel tempo per le miscele del tipo 1 con diversi dosaggi di cenere

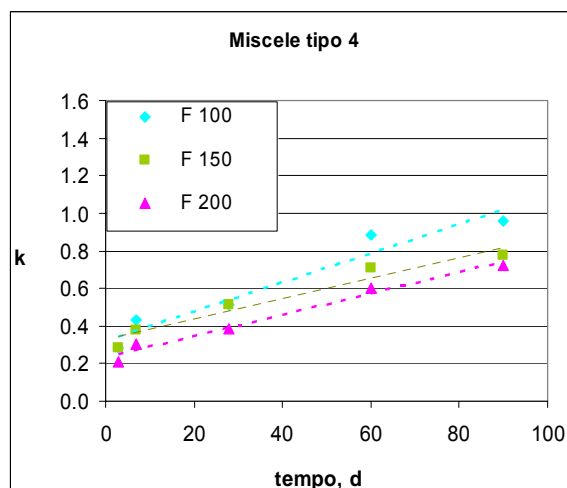


Figura 4: Andamenti di k nel tempo per le miscele del tipo 4 con diversi dosaggi di cenere

È intuitivo il fatto che la possibilità della cenere di sviluppare la reazione pozzolanica e quindi la resistenza è legata alla disponibilità dell'idrossido di calcio formato durante l'idratazione del cemento.

È quindi utile valutare la variazione di k in funzione del rapporto F/C . Tale rapporto, secondo la UNI EN 206, non può superare 0.33 mentre nel nostro caso raggiunge 0.61. Il grafico di Fig. 5 mostra i valori di k di tutte le miscele alle varie stagionature (ad eccezione di quelle aerate), in funzione del rapporto F/C ; inoltre le rette di regressione relative alle varie stagionature.

Si ricorda che i risultati presentati sono esattamente riferibili solo alle miscele dei componenti effettivamente usati nella presente ricerca.

Si osserva che:

- il valore k diminuisce con l'aumentare del rapporto F/C ,
- il valore $k = 0.2$ assegnato cautelativamente dalla UNI 11104 a questo cemento viene superato a partire da 3d da tutte le miscele.
- a tempi di stagionatura ≥ 28 d il valore k è sempre \geq di 0.4 con valori massimi che superano 1 a 60 e 90 d, ciò sta ad indicare un'efficienza reale della cenere ben maggiore di quella che le viene assegnata dalla UNI.
- il valore k a brevissima stagionatura (3 d) varia poco in funzione di F/C ; ciò dipende dal fatto che la pozzolana si attiva solo in presenza di idrossido di calcio, il quale richiede un certo tempo per formarsi nella pasta di cemento.

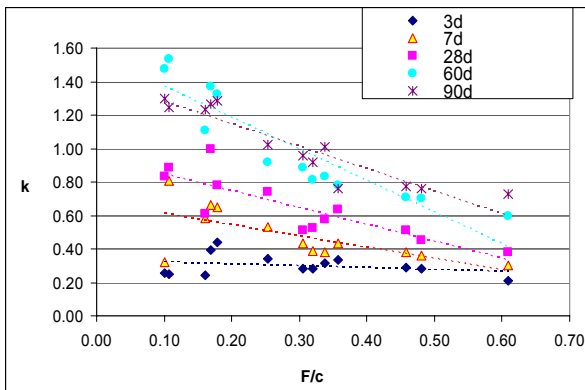


Figura 5 Valori k a varie stagionature in funzione del rapporto F/C , per tutte le miscele salvo le aerate

- la resistenza a compressione, a pari dosaggio di cemento, aumenta con l'aumento del dosaggio di cenere, mentre il valore k in genere tende a diminuire,
- i valori più alti di k si ottengono in corrispondenza dei dosaggi di cemento più bassi; in queste miscele però i rapporti F/C sono più bassi, in particolare per i tipi di calcestruzzo 1, 2 e 5, rendendo disponibili maggiori quantità di idrossido di calcio per la cenere.

Per una migliore comprensione della relazione tra F/C e k , nel grafico seguente (figura 6) vengono isolati i dati relativi a 2 tipi di calcestruzzo a 2 stagionature: si osserva come i valori di k a pari stagionatura risultano ben correlati con F/C , indipendentemente dalla composizione della miscela.

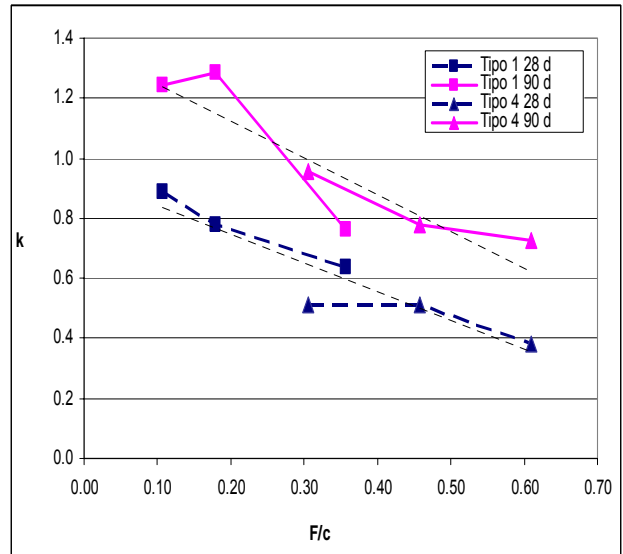


Figura 6 : valori di k a 28 e 90 d, in funzione del rapporto F/C , per 2 tipi di calcestruzzo

5. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti nella presente sperimentazione confermano le ipotesi di partenza in merito alla possibilità di utilizzare quantità di cenere superiori a quelle previste dalle regole della UNI EN 206, allo scopo di ottenere calcestruzzi che, rispondendo alle prescrizioni sui valori ammissibili di dosaggio di cemento per le varie classi di esposizione, nello stesso tempo:

- consentono, con dosaggi moderati di cemento, di raggiungere resistenze caratteristiche fino ai valori C45/55, superiori ai valori limite delle varie classi, ma richiesti per esigenze strutturali,
- consentono di ottenere resistenze richieste come valori limite superiori a quelle necessarie per gli aspetti strutturali;
- assicurano durabilità molto elevata, ridotto calore di idratazione con minore rischio di fessurazione termica e contribuiscono alla sostenibilità.

Il valore di $k = 0.2$ proposto dalla UNI 11104 per la cenere usata, in combinazione con il cemento e gli additivi impiegati, appare molto cautelativo. Le prove hanno indicato che a 28 giorni un valore $k = 0.4$ sarebbe utilizzabile per tutti i tipi di calcestruzzo indagati. La UNI EN 206, punto 5.2.5.3, consente di derogare dai valori di k proposti nella norma stessa, avvalendosi, con modalità prestabilite, di altri concetti, ad esempio quello di calcestruzzo a prestazione equivalente.

6. BIBLIOGRAFIA

- [01] V. AGGARWAL et. Al. Concrete Durability Through High Volume Fly ash Concrete (HVFC) A Literature review/ International Journal of Engineering Science and Technology Vol. 2(9), 2010, 4473-4477

Contatti con gli autori:

Prof. Vito Alunno Rossetti,

var@clinicadelcalcestruzzo.it

Antonella Ferraro: af@clinicadelcalcestruzzo.it

Michele Valente: mvalente@gageneral.com

Marco Bressan: mbressan@gageneral.com

Alessandro Pasqualini:

apasqualini@gageneral.com