DURABILITÀ E SOSTENIBILITÀ DI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI CONFEZIONATI CON CENERE VOLANTE ESPOSTI A CICLI DI GELO-DISGELO

Alessandro Pasqualini, Marco Bressan, Felice Marco Liberatore

Sommario: Il calcestruzzo esposto a cicli di gelo-disgelo, con o senza la presenza di sali disgelanti, può subire ingenti danni alla matrice cementizia, con ripercussioni dirette sulla durabilità strutturale.
La normativa UNI EN 206-1 prevede specifiche classi di esposizione che contemplano tale meccanismo di degrado (XF) e fornisce, per ciascuna di esse, una serie di prescrizioni utili a garantire la necessaria durabilità.
Tra queste prescrizioni vi è l'adozione di un volume minimo di aria inglobata che eviti l'eccessivo sviluppo di tensioni interne dovute alla formazione di ghiaccio nella matrice cementizia.
Tuttavia, l'introduzione di aria riduce sensibilmente le prestazioni meccaniche del materiale, e il progettista della miscela cementizia, per tener conto di questo aspetto, è spesso costretto ad incrementare i quantitativi di cemento per poter garantire la prestazione meccanica finale.
Questo aspetto diviene tanto più penalizzante e poco sostenibile quanto maggiore risulta essere la resistenza caratteristica a compressione da conseguire per motivi strutturali.
Nel seguente lavoro viene discussa la possibilità di realizzare calcestruzzi nelle classi di esposizione XF attraverso l'impiego di un componente pozzolanico quale la cenere volante, in maniera altamente sostenibile ed in conformità alle normative vigenti. La soluzione proposta consente da un lato di limitare i contenuti di cemento ai valori minimi previsti dalla norma, con conseguenti benefici tecnologici, economici ed ambientali, e dall'altro di impiegare utilmente un sottoprodotto derivante da altre lavorazioni.

Parole chiave: cicli di gelo-disgelo; durabilità, cenere volante; HPC; resistenza; sorptivity; sostenibilità;

Biografia: **Alessandro Pasqualini** è un Ingegnere per l'Ambiente ed il Territorio presso General Admixtures S.p.A. La sua attività è rivolta prevalentemente all'ambito dei materiali cementizi, con particolare riferimento a malte e calcestruzzi. In particolare, è specializzato nell'impiego di cenere volante nelle diverse tipologie di conglomerati cementizi. Relativamente a queste attività, è Autore e Co-autore di diverse pubblicazioni scientifiche.

Marco Bressan è un Ingegnere Civile presso General Admixtures S.p.A. La sua attività è rivolta prevalentemente all'ambito dei prodotti per calcestruzzi. In particolare, è specializzato nel campo della formulazione e ottimizzazione dei processi di produzione di additivi per malte e calcestruzzi. È Autore e Co-autore di diverse pubblicazioni scientifiche.

Felice Marco Liberatore è un Ingegnere Civile. La sua attività è rivolta prevalentemente al controllo e monitoraggio delle strutture esistenti ed alla caratterizzazione dei materiali da costruzione, con particolare riferimento al calcestruzzo ed ai suoi componenti. Relativamente a queste attività, è Autore e Co-autore di diverse pubblicazioni scientifiche.

GELO-DISGELO NEI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI

Il degrado delle strutture in calcestruzzo, armato e non, derivante da una loro ripetuta esposizione a cicli di gelo-disgelo coinvolge direttamente la matrice cementizia.

A causa della sua porosità, il calcestruzzo tende ad assorbire, per capillarità, l'acqua con la quale viene a contatto. La successiva esposizione del materiale a temperature inferiori a 0 °C determina un passaggio di stato di tale acqua dallo stato liquido a quello solido. Se il grado di saturazione del calcestruzzo al momento del passaggio di stato è superiore al valore critico, l'aumento di volume che accompagna la trasformazione non può essere accolto nello spazio dato dalla porosità stessa del materiale. Ne deriva l'insorgenza di stati di tensione interni al materiale che possono determinare fessurazioni e disgregazioni della matrice cementizia e degli aggregati. L'analisi del meccanismo di degrado associato al fenomeno descritto consente di stabilire i principi essenziali da attuare per garantire una adeguata resistenza del calcestruzzo ai cicli di gelo-disgelo:

a) Introdurre pori di grande dimensione (100-300 μm) distribuiti in maniera omogenea nella matrice cementizia, in modo da fornire all'acqua il volume necessario per poter espandere liberamente durante il passaggio da liquido a solido.
b) Ridurre la permeabilità del calcestruzzo e la sua tendenza ad assorbire acqua;
c) Utilizzare aggregati non gelivi.

L'introduzione di un sistema omogeneo di microbolle con spacing di circa 250 μm, previsto dall'attuale norma UNI EN 206-1 in presenza di fenomeni di gelo-digelo (XF), comporta una serie aspetti negativi.

1. Penalizzazione della resistenza a compressione. Ogni punto percentuale di aria introdotta determina mediamente una riduzione pari a circa il 5% della resistenza meccanica.
2. La realizzazione e la messa in opera di calcestruzzi aerati necessitano di maggiori attenzioni rispetto ad un calcestruzzo tradizionale. Operazioni ordinarie quali il trasporto, il pompaggio o la vibrazione possono influire sulla stabilità del sistema di microbolle, compromettendo in parte o totalmente la futura durabilità del materiale.

Il fisiologico abbattimento delle resistenze viene affrontato incrementando i contenuti di cemento in modo da ridurre ulteriormente il rapporto a/c. Questa soluzione può implicare inconvenienti a causa degli elevati dosaggi di cemento necessari e certamente comporta inevitabili penalizzazioni in termini sostenibilità economica e ambientale. Quando le resistenze caratteristiche necessarie ai fini strutturali superano i 45÷50 N/mm^2, l'impegno di risorse materiali ed economiche diviene rilevante. Inoltre, al diminuire del rapporto a/c, aumenta la difficoltà di garantire la stabilità del sistema di microbolle, dal confezionamento alla messa in opera del materiale.

Alla luce di questo, numerosi Autori hanno proposto, per le strutture esposte a cicli di gelo-disgelo, l'impiego di miscele ad Alte Prestazioni prive di aria aggiunta. Alla base di tale proposta vi sono sostanzialmente due principi:

1. Il ridotto valore del rapporto acqua/cemento garantisce il quasi totale coinvolgimento dell'acqua di impasto nella reazione di idratazione del legante. Ne consegue che all'interno del materiale indurito non rimane acqua potenzialmente congelabile.
2. La ridotta porosità caratteristica dei calcestruzzi con basso rapporto acqua/cemento impedisce all'acqua esterna di penetrare, per capillarità, nella matrice cementizia.

La adeguata resistenza ai cicli di gelo-disgelo viene quindi garantita dalla possibilità di mantenere il materiale adeguatamente asciutto.

In **Figura 1**[1] è evidente come all'aumentare della classe di resistenza del calcestruzzo, lo *spacing* tra le microbolle di aria necessario a garantire la durabilità ai cicli gelo-disgelo possa essere incrementato, riducendo quindi il volume di aria nel materiale. Superato un certo valore di resistenza caratteristica, il materiale risulta adeguatamente resistente al fenomeno di degrado indipendentemente dal quantitativo di aria aggiunta.

RIFERIMENTI NORMATIVI

Normative europee come la BS 8500-1:2006 "Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1" forniscono, nell'ambito delle classi di esposizione XF, due alternative per garantire la durabilità strutturale (**Tabella 1**). La prima è costituita dall'impiego di additivo aerante che garantisce il classico volume minimo di aria nella matrice cementizia. La seconda è costituita dall'impiego di una calcestruzzo a maggiore resistenza meccanica (e quindi minore porosità) e senza aria aggiunta. La normativa italiana UNI 11104, così come in generale la UNI EN 206-1, pur privilegiando l'impiego di miscele opportunamente aerate, consente l'eventuale utilizzo di calcestruzzi privi di aria aggiunta a condizione che la loro resistenza al gelo-disgelo, valutata secondo la UNI 7087, sia maggiore o uguale a quella di un calcestruzzo di provata durabilità nello stesso ambiente.

CONTRIBUTO DELLA CENERE VOLANTE

La possibilità di garantire la resistenza al gelo-disgelo con miscele di calcestruzzo ad elevata resistenza incentiva l'impiego della cenere volante, per una serie di motivi.

1. Trattandosi di una aggiunta pozzolanica, essa può, anche utilizzata in parziale sostituzione del cemento, contribuire in maniera rilevante allo sviluppo delle resistenze meccaniche (**Figura 2**[2]), con evidente beneficio in termini di sostenibilità economico-ambientale.
2. La reazione pozzolanica è accompagnata da un ulteriore consumo di acqua di impasto. Per quanto detto in precedenza questo riduce il rischio di degrado dovuto ai cicli gelo-disgelo.
3. La capacità fillerizzante della cenere volante, in sinergia con il suo comportamento pozzolanico, favorisce una matrice cementizia estremamente compatta. Ne consegue una notevole riduzione della permeabilità all'acqua in pressione (**Figura 3**[3]) e dell'assorbimento capillare.
4. Incremento della resistenza del calcestruzzo nei confronti dell'aggressione da parte dei cloruri presenti nelle classi di esposizione XF2 ed XF4. La cenere volante riduce drasticamente il coefficiente di diffusione dei cloruri nella matrice cementizia con conseguente incremento dei tempi di innesco della corrosione. Inoltre, riduce la permeabilità della matrice cementizia e quindi il fenomeno di migrazione dell'acqua dall'interno del materiale verso la superficie esterna, per la maggiore concentrazione di sale in tale zona. Questo rallenta o impedisce il raggiungimento della saturazione critica superficiale e quindi riduce il degrado per gelo-disgelo. Infine, la presenza della cenere volante risulta essenziale nel contrastare gli effetti deleteri della applicazione del $CaCl_2$ come sale disgelante. Gran parte del $Ca(OH)_2$ presente nella matrice cementizia si combina con la cenere volante durante la reazione pozzolanica e non risulta quindi disponibile al $CaCl_2$ per la formazione dell'ossicloruro di calcio idrato, responsabile del degrado della matrice.

L'assorbimento capillare (sorptivity) è una delle proprietà che maggiormente influenzano la resistenza di un calcestruzzo a cicli di gelo-disgelo. Una delle condizioni necessarie all'avvio del danno da gelo-disgelo è il raggiungimento del grado di saturazione critica della matrice cementizia. A partire da un generico valore iniziale, la saturazione del calcestruzzo aumenta all'aumentare del tempo di contatto con l'acqua, secondo una curva di saturazione (**Figura 4a**).

Tale curva, determinabile con la procedura indicata dalla norma ASTM C 1585-04, si compone di due tratti. Il primo, che descrive l'assorbimento iniziale, è caratterizzato da una pendenza (S_i) maggiore rispetto al secondo, che descrive l'assorbimento secondario. Bassi valori di sorptivity corrispondono a durabilità superiori ai cicli di gelo-disgelo (**Figura 4b**). Dati di letteratura indicano come i valori di sorptivity di calcestruzzi confezionati con cenere volante siano inferiori rispetto a quelli di calcestruzzi confezionati con solo cemento. In **Figura 5** viene evidenziata la relazione che intercorre tra il valore di Sorptivity iniziale e la resistenza a compressione a 28 giorni in calcestruzzi confezionati con cemento Portland CEM I 42.5 R e cenere volante tipo F [4]. A parità di resistenza a compressione a 28 giorni, il valore di sorptivity diminuisce all'aumentare del contenuto di cenere volante. Risultato simile è stato trovato dagli Autori della presente memoria in termini di penetrazione dell'acqua in pressione (**Figura 3** [3]). La **Figura 6** e la **Figura 7**, relativa ad altra sperimentazione [5], confermano quanto indicato, evidenziando come, a parità di acqua di impasto, il valore di sorptivity e di permeabilità ai cloruri tendano a diminuire in calcestruzzi contenenti volumi crescenti di cenere volante.

RICERCHE FUTURE

Con riferimento alle classi di esposizione XF secondo la UNI EN 11104, una sperimentazione appena avviata dagli Autori studierà il comportamento di calcestruzzi confezionati con cenere volante e senza aggiunta di additivo aerante in comparazione con classiche miscele aerate. Saranno eseguite prove dirette di gelo-disgelo secondo UNI 7078 ed i risultati saranno correlati a prestazioni quali le resistenze a compressione, la permeabilità all'acqua in pressione, l'assorbimento d'acqua a pressione atmosferica e la resistenza alla penetrazione allo ione cloruro. Scopo della sperimentazione è quello di verificare, in ottica di sostenibilità, la possibilità di impiegare miscele di calcestruzzo ottimizzate con cenere volante e prive di aria inglobata in ambienti soggetti a cicli di gelo-disgelo.

CONCLUSIONI

Sulla base delle considerazioni riportate nella memoria è possibile concludere quanto segue:

1. Coerentemente con quanto noto in letteratura, la normativa italiana e quella internazionale consentono, nel rispetto di determinate condizioni, di utilizzare, per le classi di esposizione XF, miscele di calcestruzzo prive di aria aggiunta. In particolare è stato verificato che calcestruzzi con resistenza caratteristica superiore a 50÷55 N/mm^2 possono risultare adeguatamente resistenti ai cicli di gelo-disgelo senza l'impiego di additivi aeranti.
2. Elevate resistenze a compressione e basse porosità della matrice cementizia sono facilmente conseguibili mediante l'utilizzo di cenere volante, anche con rilevanti ottimizzazioni nei contenuti di cemento.
3. La ridotta permeabilità delle miscele di calcestruzzo confezionate con cenere volante determina, a parità di resistenza a compressione, valori di sorptivity inferiori a quelli di calcestruzzi confezionati con solo cemento. Ne conseguono rilevanti incrementi di vita utile delle strutture esposte a cicli di gelo-disgelo.
4. Nelle classi di esposizione XF2 ed XF4 la presenza di cenere volante incrementa la resistenza delle strutture nei confronti delle aggressioni prodotte da sali disgelanti, sia in termini di corrosione delle armature che di attacco alla matrice cementizia.

L'impiego di un materiale derivante da altra produzione e la possibilità ottimizzare i contenuti di cemento non dovendone incrementare i dosaggi per compensare perdite di resistenza dovute all'aria inglobata, contribuiscono in maniera sostanziale alla sostenibilità economico-ambientale del settore.

BIBLIOGRAFIA

1. Coppola L., "Concretum", *McGraw-Hill editor*, p. 191.
2. Valente M., Vigneri M., Bressan M., Pasqualini A., Bianchini S., Liberatore F.M., "Use of Fly Ash in Concrete: Efficiency Factors of the Supplementary Cementing Material", Second International Conference on Sustainable Construction materials and Technologies, Ancona (Italy), 2010, pp.767-776.
3. Valente M., Bressan M., Pasqualini A., Bianchini S., Liberatore F.M., Vivaldi S., "Fattori di efficienza K della cenere volante relativi alla penetrazione dei cloruri ed alla permeabilità all'acqua nell'ottica dell'incremento della vita utile delle strutture in c.a.", Giornate AICAP 2011, Padova (Italy), 2011, pp. 605-612.
4. Folagbade, S.O., "Effect of fly ash and silica fume on the sorptivity of concrete", International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), Vol. 4 No.09 September 2012, , pp. 4238-4246.
5. Nath P., Sarker P., "Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete", The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia Engineering 14 (2011) 1149–1156.

TABELLE E FIGURE

Tabella 1 – Valori limite composizionali e prestazionali di calcestruzzi resistenti a cicli di gelo-disgelo (Classi di esposizione XF) secondo UNI 11104 e BS 8500-1

Classe esposizione	Normativa	Max. rapporto acqua/cemento	Minima Resistenza a compressione	Contenuto minimo di cemento *, kg/m^3	Contenuto minimo di cemento *, %
XF1	UNI 11104	0.50	C 32/40	320	0
	BS 8500-1	0.60	C 25/30	260	3
		0.60	C 28/35	260	0
XF2	UNI 11104	0.50	C 25/30	340	3
	BS 8500-1	0.60	C 25/30	260	3
		0.55	C 32/40	280	0
XF3	UNI 11104	0.50	C 25/30	340	3
	BS 8500-1	0.60	C 25/30	260	3
		0.45	C 40/50	320	0
XF4	UNI 11104	0.45	C 28/35	360	3
	BS 8500-1	0.55	C 28/35	280	3
		0.45	C 40/50	320	0

* Diametro massimo aggregati 32 mm o 40 mm

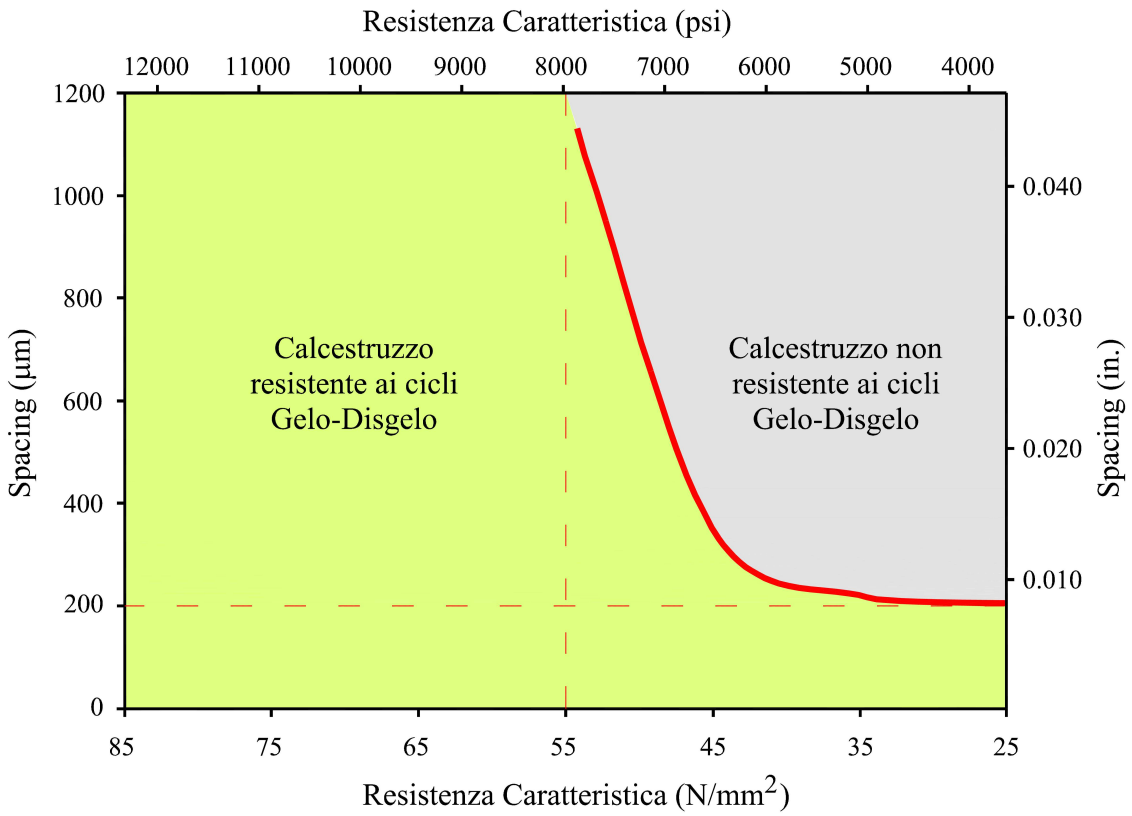

Figura 1 – Relazione tra resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo e il valore di spacing delle micro-bolle di aria necessario ad assicurare resistenza ai cicli di gelo-disgelo [1]

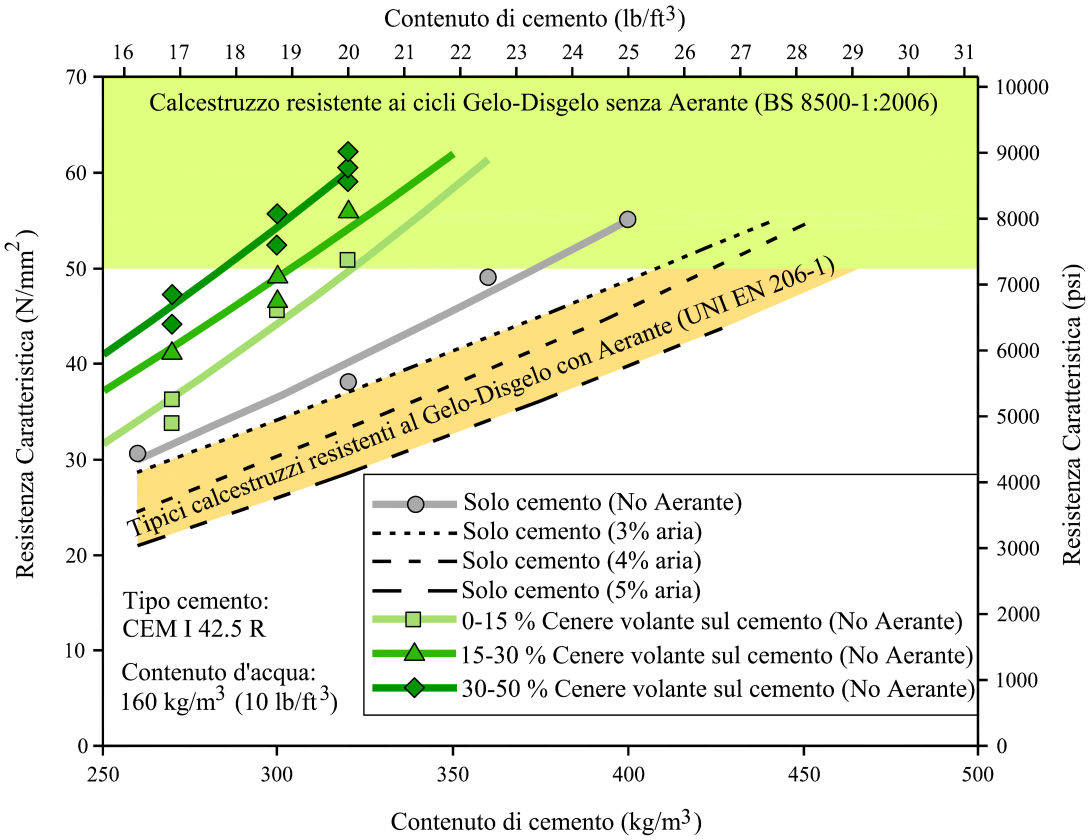

Figura 2 – Contributo della cenere volante allo sviluppo meccanico delle resistenze con significativa ottimizzazione dei contenuti di cemento [2].

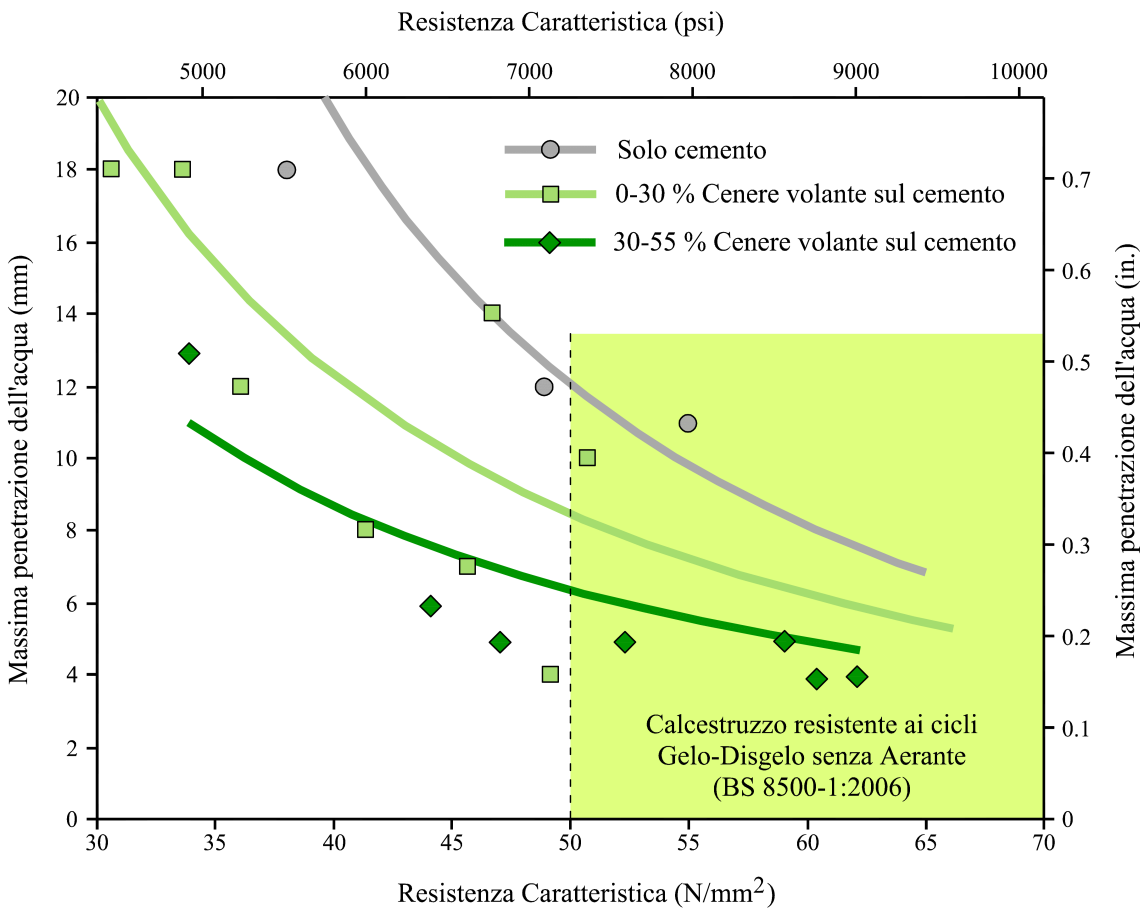

Figura 3 – Relazione tra la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo, con e senza cenere volante, e la penetrazione dell'acqua in pressione [3] (UNI EN 12390-8)

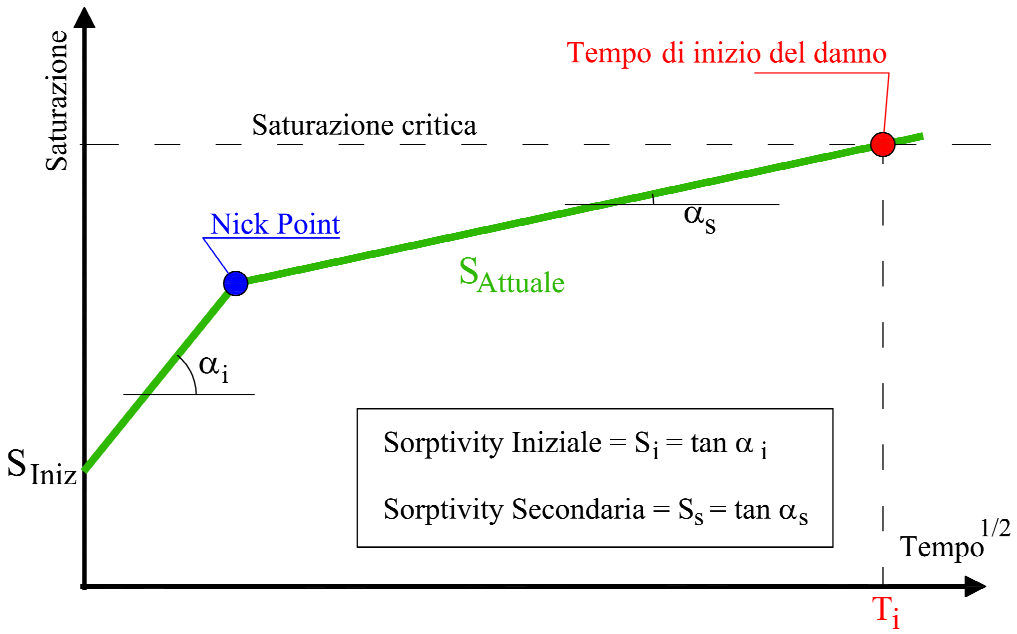

Figura 4a – Curva di saturazione del calcestruzzo

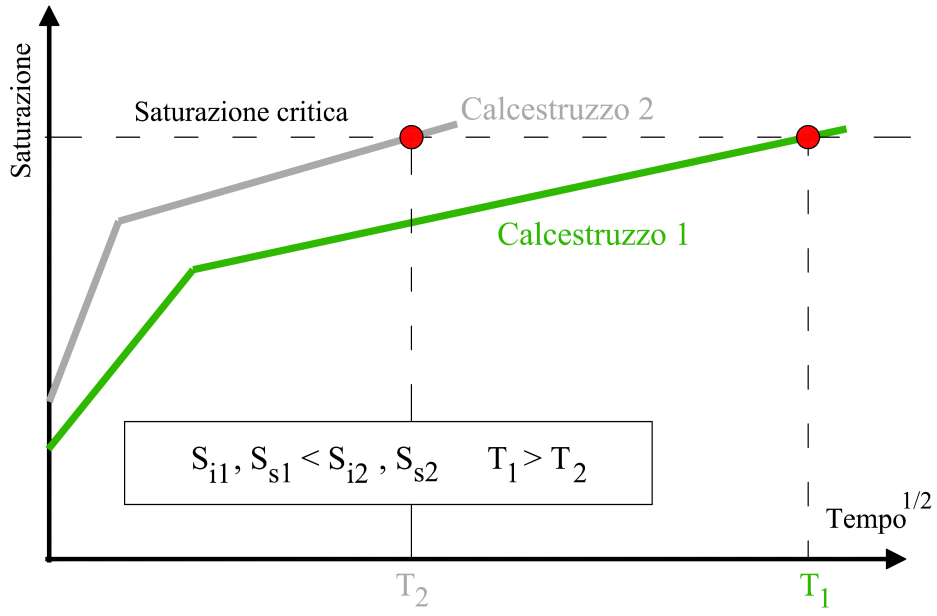

Figura 4b – Confronto tra curve di saturazione

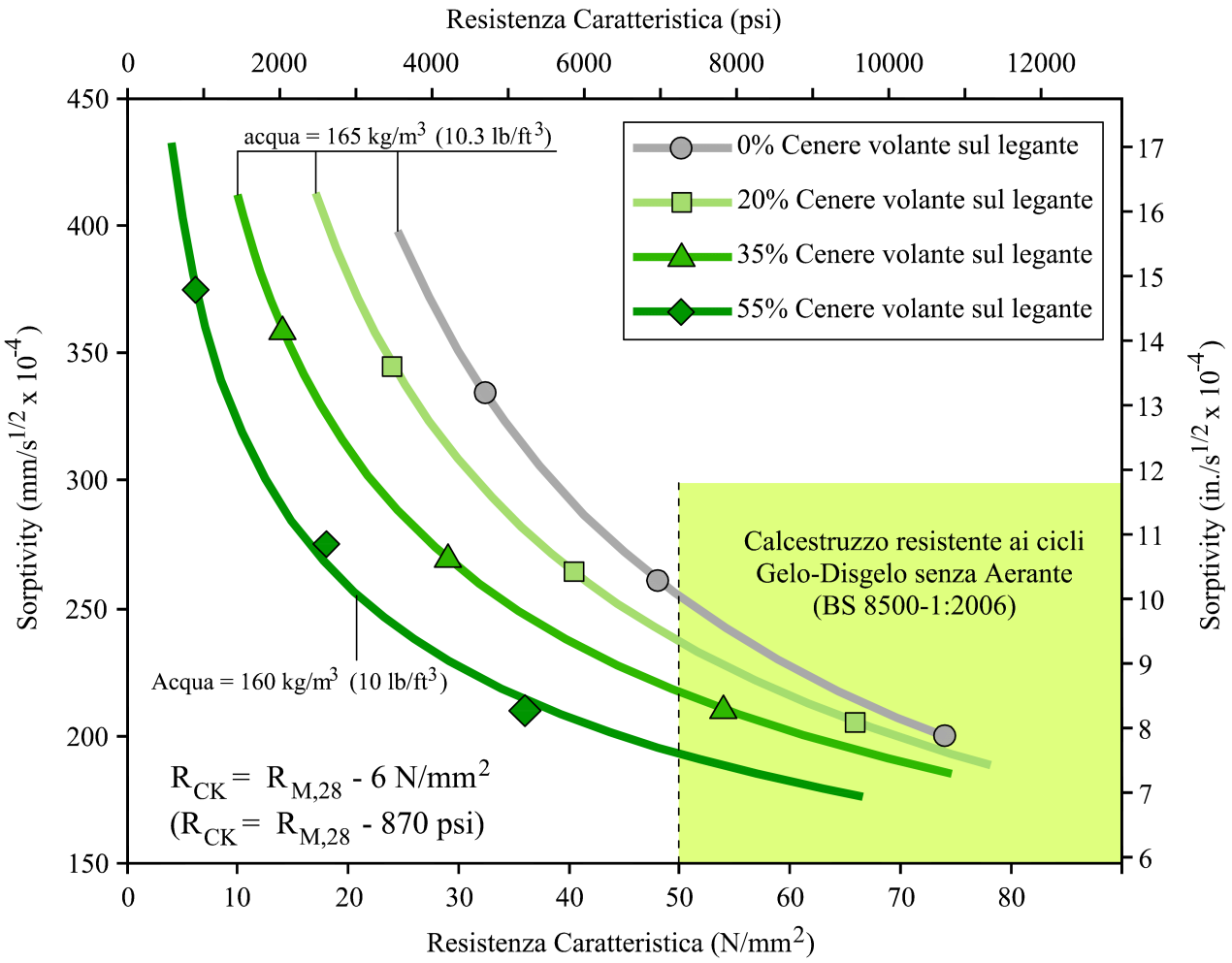

Figura 5 – Relazione tra il valore di Sorptivity iniziale e la resistenza a compressione caratteristica a 28 giorni in calcestruzzi confezionati con e senza cenere volante[4].

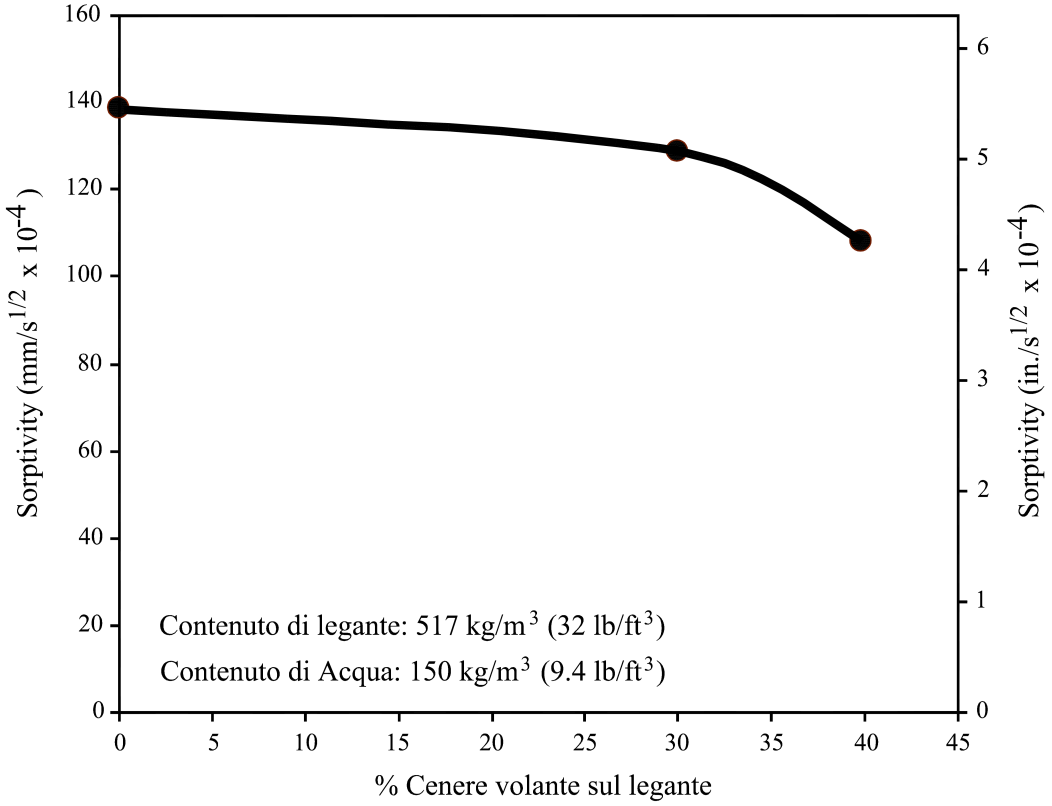

Figure 6 – Relazione tra il valore della Sorptivity iniziale e il contenuto di cenere volante nel legante [5]

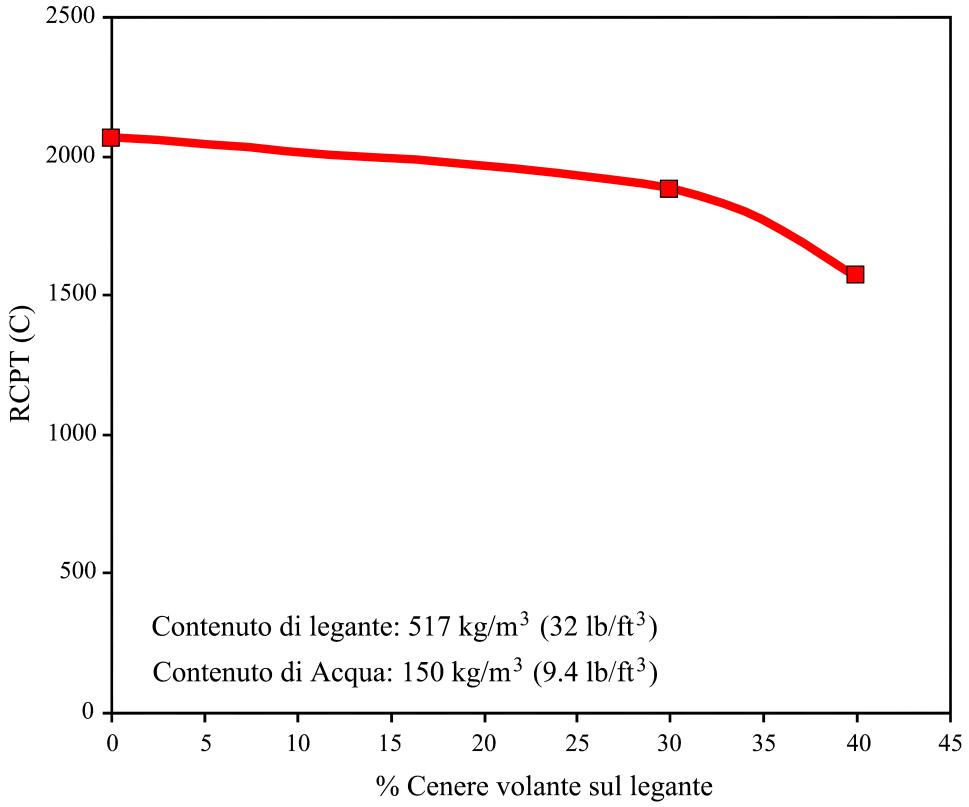

Figure 7 – Relazione tra il valore RCPT e il contenuto di cenere volante nel legante[5]