

Report 13 Settembre 2012

## Proprietà del calcestruzzo: resistività

### 01 - Premessa

La resistività, o resistenza elettrica specifica è l'attitudine di un materiale a opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche.

### 02 - Resistività & calcestruzzo

Nel conglomerato cementizio la resistenza elettrica specifica varia in funzione di numerosi fattori quali la densità, il rapporto acqua/cemento (come da tabella riportata nella notazione A, il tipo di cemento, ecc. In linea di massima, a parità dei fattori intrinseci citati, la variazione di resistività è ancora strettamente connessa con il variare della condizione: da valori dell'ordine di  $10^{-3}$ , nello stato umido, a valori dell'ordine di  $10^{-11}$  nello stato asciutto.

**resistivity of concrete  
(Ohm/cm)**

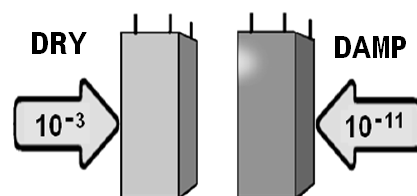


Figura 1

Nella pratica usuale, il parametro rappresentato dalla "Resistenza Elettrica Specifica del Calcestruzzo", viene però raramente considerato, nonostante rappresenti un importante elemento connesso con i processi corrosivi, sia in termini di valutazione che di prevenzione.

Per sottolinearne l'importanza è infatti sufficiente richiamare il fatto che i fenomeni di corrosione delle armature, nel conglomerato cementizio armato, sono di natura elettrochimica, con processi che contemplano il trasporto di elettroni attraverso un flusso di corrente convenzionale anodo-catodo (figura 2).

Il processo di corrosione si avvale di un mezzo elettrolitico (il calcestruzzo umido) e di un agente reattivo (l'ossigeno) attraverso una reazione catodica ed una reazione anodica, che portano alla reazione finale:

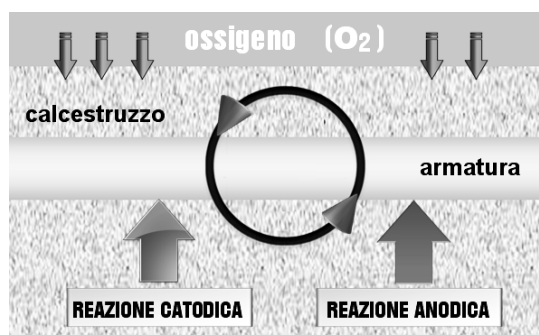
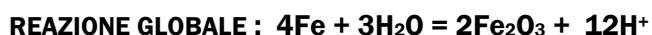
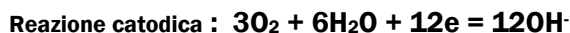


Figura 2

La sottovalutazione accennata non coinvolge gli "specialisti": numerose sperimentazioni hanno infatti evidenziato come la resistenza elettrica specifica del conglomerato possa essere messa in relazione diretta sia con la probabilità di corrosione che con la quota di corrosione dell'opera.

A titolo di autorevole esempio la relazione "La corrosione delle armature nel calcestruzzo" del Prof. P. Pedferri (Politecnico di Milano 2004) identifica la resistività come elemento specifico della corrosione, sia in termini di misura significativa che come parametro in grado di condizionare la durata del periodo di innesco e la velocità dei processi corrosivi.

### 03 - corrosione & resistenza elettrica specifica: processi e misure

L'acciaio, a contatto con il calcestruzzo sano si trova in una forma di autoprotezione o passivazione determinata dall'avvolgimento dell'armatura stessa, da parte di un film di ossido passivante, stabile a pH circa 13, tipico della pasta cementizia. Numerose circostanze possono modificare la concentrazione idrogenionica (pH), all'interfaccia armatura/matrice cementizia, sino a valori in grado di vanificare la "passivazione": carbonatazione del copriferro, presenza di cloruri, ecc.

*La depassivazione dell'armatura coincide con l'inizio dell'attività elettrochimica nel sistema, che procede fintantoché vi sia presenza di umidità e disponibilità di ossigeno. L'armatura d'acciaio si comporta come una pila, in cui coesistono zone anodiche dove il metallo viene ossidato e zone catodiche dove si hanno le reazioni di riduzione di ossigeno e acqua.*

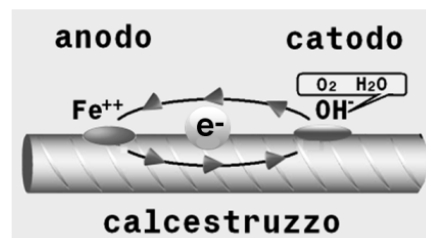


Figura 3

Il passaggio di corrente avviene per trasporto di elettroni nel corpo del metallo, e per trasporto di specie ioniche nella soluzione che permea le porosità del calcestruzzo. Questo flusso di corrente è accompagnato da una variazione del potenziale elettrico tra diverse zone dell'armatura d'acciaio: le zone anodiche saranno caratterizzate da valori di potenziale minori (più negativi) mentre quelle catodiche avranno potenziali maggiori.

Nel contesto richiamato la misura della resistenza elettrica specifica del calcestruzzo può fornire informazioni importanti in ordine alla condizione conservativa e/o degenerativa di una struttura in conglomerato cementizio armato (figura 4). Misure combinate di resistività e potenziale possono fornire ulteriori informazioni sulle condizioni di corrosione delle armature d'acciaio.



Figura 4

Il responso ottenuto dall'indagine inerente la resistenza elettrica specifica del calcestruzzo, specie se effettuata attraverso accurate mappature, permette infatti l'individuazione di eventuali "zone di attenzione" necessitanti di verifiche di correlazione quali misure di spessore di copriferro, determinazione della profondità di carbonatazione, verifica del contenuto di cloruri, ecc., determinanti ai fini di una diagnostica affidabile della corrosione che tenga conto anche gli ulteriori fattori di variabilità, riconducibili alle caratteristiche del conglomerato cementizio, alle caratteristiche superficiali dell'armatura d'acciaio, all'ambiente di esposizione, ecc.

Secondo le specifiche ASTM sono da considerare non affette da corrosione (con una probabilità del 90%), le aree dove il potenziale letto sia meno negativo di -200mV, mentre con la stessa probabilità le zone con potenziali più negativi di -350mV corrispondono a siti anodici dove la corrosione è attiva.



Successive revisioni, nate da accurate esperienze, protratte nel tempo, da parte di vari operatori qualificati, suggeriscono che il valore corrispondente alla depassivazione dell'acciaio (innesco del fenomeno corrosivo) sia di circa -240mV, che è diventato quindi il valore soglia adottato dall' "American Federal Highways Administration".



La corretta interpretazione delle misure richiede comunque una analisi "esperta", in grado di correlare correttamente le variabili caratteristiche, della relazione di indagine.

## 04 - come incrementare la resistività e ridurre la corrosione

La copiosa letteratura tecnica, confermata da innumerevoli esperienze applicative ormai pluridecennali, individua nei microsilicati, altrimenti detti silica fume (MICROPLUS, nella forma più specializzata), la risposta più adeguata, se non l'unica, per il problema di incrementare, con la resistenza elettrica specifica dei calcestruzzi, la resistenza degli stessi alla corrosione e, in altre parole, la loro durabilità complessiva.

La trattazione della tecnologia dei microsilicati e, nella fattispecie dei calcestruzzi con microsilicati, esula dagli scopi e dagli spazi della presente relazione. Alcune "note essenziali" sono comunque riportate nel paragrafo 6.



Per ulteriori informazioni si rimanda allo specifico organismo istituzionale "Silica Fume Association", ai documenti reperibili nell'archivio tecnico del sito [www.azichem.it](http://www.azichem.it).

L'analisi della letteratura tecnica citata conferma che queste particolari "aggiunte minerali", specificatamente contemplate anche dalle norme più recenti (\*), opportunamente inserite nel calcestruzzo, rappresentano un mezzo estremamente efficace per conseguire, con drastiche riduzioni della porosità e della permeabilità, anche significativi incrementi della resistenza elettrica specifica del calcestruzzo stesso, con positive influenze sia in ordine ai tempi di innesco e di propagazione della corrosione che in termini di effettivi prolungamenti della durata di vita utile delle opere.

(\*) = UNI EN 206-1 " Calcestruzzo: specificazione, prestazione, produzione e conformità" punto 5.1.6.

Sono ampiamente accertati gli effetti positivi della corretta addizione di microsilicati selezionati (MICROPLUS) a calcestruzzi specificatamente progettati (\*), anche in relazione al parametro rappresentato dalla resistenza elettrica specifica che, per addizioni di microsilicati dell'ordine del 10% in peso, rispetto al peso del cemento, determina incrementi di resistività di circa il 500% (figura 5).

(\*) La considerazione riferita ai calcestruzzi è da considerarsi sicuramente e provatamente estensibile anche a malte e betoncini progettati e confezionati con modalità riferite agli stessi parametri tecnologici.

MSC = microsilica concrete / OPC = ordinary Portland cement

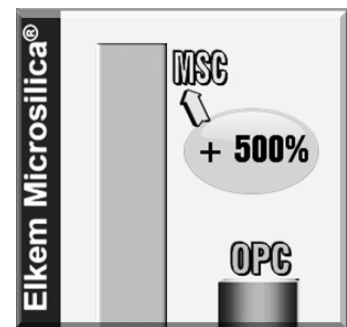


Figura x5

In particolare, così come è possibile evincere dal diagramma di Tuutti, riportato a lato (figura 6), quando lo stato di protezione passivante dell'acciaio viene ad essere vanificato, a causa di processi carbonatativi intervenuti, e/o della presenza di cloruri, la corrosione è praticamente possibile. La sua attivazione quantitativa e la sua velocità, dipendono da numerosi parametri fra i quali, giocano un ruolo importante la temperatura, la resistenza elettrica specifica, e la velocità di trasporto dell'ossigeno dall'esterno.

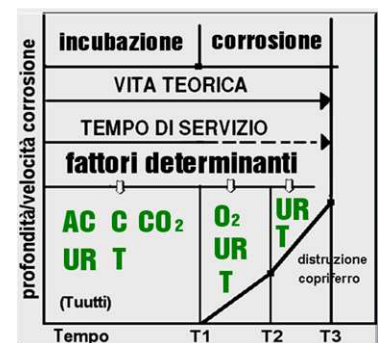


Figura 6

Nei calcestruzzi addizionati con microsilicati (silica fume), la resistenza elettrica specifica, oltre a risultare nettamente più elevata, rispetto al calcestruzzo di riferimento, cresce esponenzialmente in funzione del tenore dei microsilicati stessi.

Ulteriori modificazioni introdotte dall'uso dei microsilicati, svolgono funzioni positivamente orientate al conseguimento di elevati livelli di resistenza alla corrosione e di durabilità complessiva. A titolo di esempio si richiamano gli effetti della drastica riduzione della permeabilità, determinata dai microsilicati (figura 7), che costituiscono un importante presidio nei confronti della penetrazione d'acqua all'interfaccia critica e del trasporto dell'ossigeno dall'esterno.

MSC = microsilica concrete / OPC = ordinary Portland cement

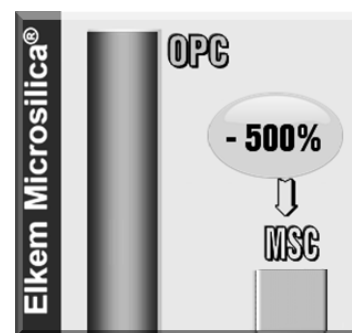


Figura 7

Sulla base delle esperienze e delle acquisizioni terotecnologiche in ordine all'efficacia dell'azione anticorrosiva esercitata dai microsilicati è possibile trarre alcune conclusioni.

La "superpozzolanicità" peculiare dei microsilicati, unitamente all'elevatissima finezza delle particelle, consentono di ottenere una "pasta cementizia" stabile, compatta e intrinsecamente impermeabile, in grado di assicurare prestazioni di protezione anticorrosiva del tipo esemplificato nella figura 8, derivanti da elevati incrementi della resistività elettrica, della resistenza alla penetrazione dei cloruri, della drastica riduzione dei processi carbonatativi.

MSC = microsilica concrete / OPC = ordinary Portland cement

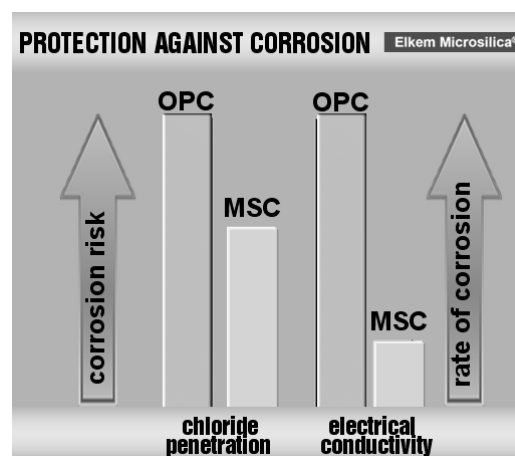


Figura 8

Le esperienze sperimentali e la pratica applicativa hanno altresì accertato che per ottenere i migliori risultati è opportuno ricorrere all'aggiunta di agenti superfluidificanti e/o riduttori d'acqua, in grado di consentire livelli di consistenza adeguati alle usuali pratiche di cantiere.

## 05 - Un Mix design indicativo per calcestruzzi ad elevata resistività

Componenti	kg/m <sup>3</sup>	note
Cemento Ptl (tipo 1)	330,00	(R 42,5)
Aggregati in curva continua mm 0/20	1830,00	(EN 12620)
Microsilicati selezionati MICROPLUS	40,00	EN 13263
Additivo superlubrificante FLUID S	5,00	1,2% C+MS
Acqua	150,00	A/C = 0,45
<b>TOTALE</b>	<b>2355,00</b>	.....

## 06 - Microsilicati : note essenziali

Definiti anche come “silica fume” o fumi di silicio condensati, i microsilicati derivano dalla riduzione delle quarziti, in forni elettrici e/o ad arco, nella produzione di leghe ferro silicio o di silicio metallico.

Durante il processo, che avviene alla temperatura di 2000° C, si sviluppa monossido di silicio (SiO), in forma gassosa che, a contatto con l'aria, si ossida, trasformandosi in **biossido di silicio amorfo (SiO<sub>2</sub>)**.

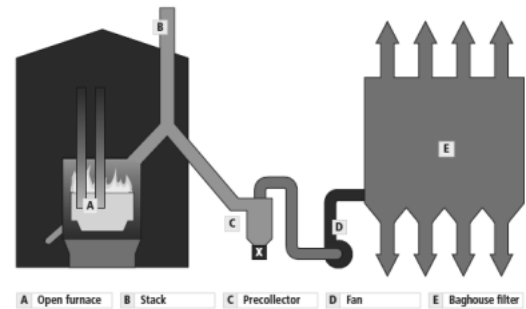


Figura 9

Opportunamente captato, mediante filtri specifici, il biossido di silicio amorfo viene sottoposto a trattamenti di selezione, depurazione e condensazione, sino a raggiungere livelli qualitativi adeguati al suo impiego come elemento essenziale e prevalente nella produzione di composti specializzati per il calcestruzzo, del tipo MICROPLUS.

In termini pratici la definizione tecnologicamente concisa, attribuita ai microsilicati, con il termine superpozzolane superfini. I prefissi, apparentemente enfaticanti, posti a precedere la dimensione (figura 10) ed il termine pozzolanico trovano completa giustificazione nelle considerazioni che seguono.

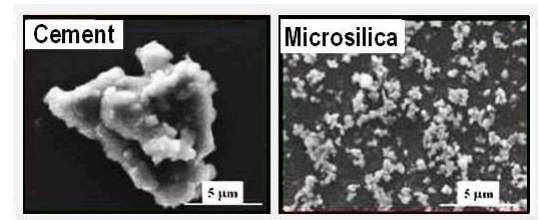


Figura 10

- **elevata purezza in SiO<sub>2</sub>: oltre il 92%; elevatissima finezza : dimensione media 0,1 micron;**
- **elevatissima superficie specifica : 20 m<sup>2</sup>/grammo;**
- **elevata idrofilia specifica;**
- **elevata reattività nei confronti dell'idrossido di calcio;**
- **forma sferica.**

Caratteristica peculiare delle pozzolane in genere, è la capacità di consumare, fissandolo in nuovi composti stabili, l'idrossido di calcio, attraverso la reazione schematizzata nella figura 11.

Caratteristica peculiare dei reattivi in esame è la reazione superpozzolanica : la capacità, significativamente incrementata in termini qualitativi e quantitativi di trasformare l'idrossido di calcio in composti, i silicati di calcio idrati, stabili, insolubili, resistenti.

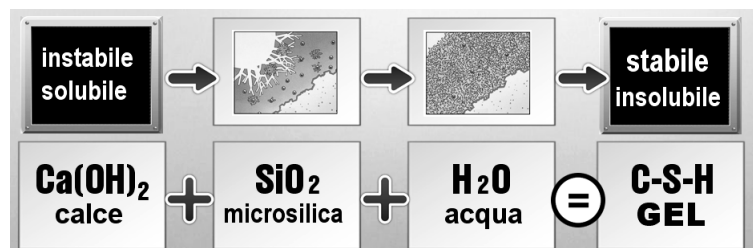


Figura 11

I microsilicati (MICROPLUS) svolgono inoltre un'azione peculiare dei filler reattivi : saturano le porosità della pasta cementizia e del conglomerato, forniscono strutture dense, stabili, impermeabili, chimicamente, meccanicamente ed elettricamente resistenti.

Una semplice indicazione dei termini quantitativi delle azioni descritte è fornita dalla seguente considerazione : in un calcestruzzo addizionato in ragione del 10% in peso, rispetto al peso del cemento, con i filler reattivi di cui trattasi, ogni granulo di cemento è "circondato e coadiuvato" da circa 100.000 particelle superpozzolaniche.

Una indicazione dei termini qualitativi delle azioni descritte è rappresentata dalla tabella “Microsilica prestazioni fondamentali”, riferita alle prestazioni conseguibili con l’aggiunta di MICROPLUS, ad un conglomerato cementizio conforme a UNI EN 206 - 1 , in ragione del 10%, in peso, rispetto al peso del cemento, rispetto alle prestazioni del calcestruzzo tal quale.

<b>MICROSILICA : PRESTAZIONI FONDAMENTALI</b>	
<b>Resistenze meccaniche</b>	<b>incrementi 50/100 %</b>
<b>Resistenza all’abrasione</b>	<b>incrementi 80/100 %</b>
<b>Resistenza alla cavitazione</b>	<b>incrementi 80/100 %</b>
<b>Resistenza al logoramento</b>	<b>incrementi 50/100 %</b>
<b>Resistenza ai cloruri</b>	<b>incrementi 50/100 %</b>
<b>Resistenza ai solfati</b>	<b>COME CEMENTI S.C.R.</b>
<b>Resistenza alle acque dilavanti</b>	<b>incrementi 300 %</b>
<b>Resistenza elettrica specifica (Resistività)</b>	<b>incrementi 500 %</b>
<b>Efficacia anticorrosiva</b>	<b>incrementi 500 %</b>
<b>Riduzione della velocità di carbonatazione</b>	<b>riduzioni 70/100 %</b>
<b>Riduzione della reazione alcali/aggregati</b>	<b>PRATICA INIBIZIONE</b>
<b>Impermeabilità intrinseca</b>	<b>incrementi 500/800 %</b>
<b>Lavorabilità e pompabilità</b>	<b>incrementi 80/100 %</b>
<b>Attitudine alla segregazione</b>	<b>PRATICA INIBIZIONE</b>
<b>Granuli reattivi per granulo di legante</b>	<b>100.000</b>

## 07 - MICROPLUS & BETONSAFE

MICROPLUS è anche un componente fondamentale del sistema BETONSAFE



**TECNOB**

TECNO B srl - Via Cadorna, 6 - 21046 Malnate (VA) - ITALY - Phone +39 0332.429830 - Fax +39 0332.429716  
E-mail: info@tecnob-srl.it - www.tecnob-srl.it - www.betonsafe.it