

2010

Trimestrale  
Anno XV  
Numero 48

**ENCO**  
**JOURNAL**

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

# SVILUPPO SOSTENIBILE NELLE COSTRUZIONI

# Un diretto vincente...



www.mauromorselli.it



## SISTEMA PENETRON®

La soluzione veloce ed efficace per la realizzazione di strutture interrata a tenuta impermeabile "fin dal principio" nella fase di esecuzione dei getti.

**PENETRON  
ADMIX**

**ACCESSORI COMPLEMENTARI  
di PENETRON ADMIX**

Tecnologie specifiche per la definizione della "Vasca in Calcestruzzo Impermeabile"

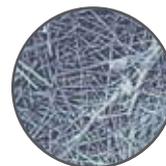


# PENETRON®

INTEGRAL CAPILLARY CONCRETE WATERPROOFING SYSTEMS

DITRON s.r.l. è sponsor ufficiale di Simona Galassi; detentrica del titolo mondiale dei "pesi mosca"

**PENETRON®**  
Sistema Integrale Capillare di Protezione  
del Calcestruzzo per Cristallizzazione



**PENETRON ITALIA s.r.l.**  
distributore esclusivo del sistema Penetron®

Corso Peschiera, 336/d - 10139 Torino - Tel. +39 011.7740744 - Fax +39 011.7504341  
Info@penetron.it - www.penetron.it



Impermeabilizzazione del Calcestruzzo per Cristallizzazione

*Consulenza alla progettazione e assistenza alla posa in opera: è il Know-how su cui poter contare...*

# l'impronta dello stile

progetto grafico e illustrazione MANINI



Sede Generale:  
S. Maria degli Angeli - ASSISI / PG  
Tel. 075-8041018 - Fax 075-8040447  
e-mail: [com@manini.it](mailto:com@manini.it)  
<http://www.manini.it>

Centri produttivi:  
BASTIA UMBRA / PG  
APRILIA / LT  
PERUGIA

SOMAGLIA / LO





**Calcestruzzi**  
Italcementi Group

*f*onisocal® *e* fonisocal® **PLUS**®

IN SINTONIA CON L'AMBIENTE



**Con FONISOCAL® e FONISOCAL PLUS® non sentire rumore è davvero naturale!**

Calcestruzzi ha dato vita a due innovativi prodotti per la realizzazione di massetti per sottofondi alleggeriti che consentono una notevole riduzione della rumorosità ambientale e il rispetto delle normative vigenti. Derivati da processi di trasformazione certificati, gli aggregati contenuti in FONISOCAL® e FONISOCAL PLUS® abbattano la propagazione sonora e contribuiscono a una maggiore tutela dell'ambiente. L'elevata fluidità di FONISOCAL PLUS® semplifica e velocizza la posa in opera riducendo i costi di realizzazione. FONISOCAL® e FONISOCAL PLUS® confermano l'impegno di Calcestruzzi per uno Sviluppo Sostenibile.

**Contattaci per conoscere Fonisocal® e Fonisocal Plus®.**

[www.calcestruzzi.it](http://www.calcestruzzi.it)

## PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Trimestrale - Anno XV - Numero 48

Direttore Mario Collepari

### SVILUPPO SOSTENIBILE NELLE COSTRUZIONI

Sullo sviluppo sostenibile, cioè quello che consente di conciliare le esigenze del mondo attuale con quelle delle future generazioni, si è già discusso nel numero 21 di *Enco Journal* del 2002. Ritorno su questo argomento tenendo conto di tre aspetti che nel frattempo sono maturati e che vengono esaminati in questo numero.

1. Uno sviluppo sostenibile deve limitare le emissioni gassose (e della CO<sub>2</sub> in particolare) nell'ambiente per evitare fenomeni di riscaldamento planetario che, secondo una buona parte degli esperti del settore, comporterebbe alcune conseguenze molto pericolose; di questo argomento si occupa in questo numero Mohan Malhotra Membro Onorario dell'*American Concrete Institute* e Scienziato Emerito del *CANMET* illustrando le problematiche correlate con la produzione di energia utilizzando combustibili fossili; questa produzione energetica coinvolge anche i materiali da costruzione (il cemento Portland in particolare) e nel prossimo numero di *Enco Journal* Mohan Malhotra ci illustrerà come mitigare gli effetti della combustione per la produzione del cemento destinato al calcestruzzo seguendo i principi di uno sviluppo sostenibile.
2. Un altro importante aspetto che riguarda lo sviluppo sostenibile coinvolge la utilizzazione di scorie provenienti da altri processi in sostituzione del cemento e/o degli aggregati; questa utilizzazione presenta un duplice vantaggio: risparmio delle materie prime del calcestruzzo ed utilizzazione delle scorie in modo vantaggioso rispetto all'allocazione a discarica con pregiudizi per l'ambiente; su questa problematica l'Università Politecnica delle Marche ha maturato una profonda esperienza per esempio nella utilizzazione delle costruzioni obsolete e demolite come aggregati per confezionare nuovi calcestruzzi; in questo numero Francesca Tittarelli ed altri ricercatori dell'Università di Ancona presentano i risultati di una ricerca finalizzata al riciclo delle sabbie di fonderia in parziale sostituzione di sabbia naturale per la produzione di malte cementizie.
3. Un terzo aspetto esaminato in questo numero di *Enco Journal* riguarda il degrado di opere in calcestruzzo: la mancata durabilità delle strutture in C.A. rappresenta anch'essa un grave pregiudizio ad uno sviluppo sostenibile delle costruzioni per le spese e i consumi di altri materiali nella riparazione delle opere degradate; di questo argomento si occupano Silvia Collepari ed altri ricercatori della Enco per presentare in questo numero il degrado del calcestruzzo in conseguenza dell'attacco solfatico con formazione di ettringite e thaumasite nella pasta di cemento che avvolge le armature metalliche e gli aggregati.

Completa questo numero di *Enco Journal* un approfondito studio sul ruolo giocato dall'acqua nella porosità delle costruzioni e del calcestruzzo in particolare: dalla condensa dell'umidità alla risalita capillare, dalla formazione del ghiaccio alla formazione di sali sulla superficie (efflorescenza) e nello strato sub-corticale (sub-florescenza) delle strutture.

Mario Collepari

In copertina: un'immagine di un ambiente fortemente inquinato simbolo di uno sviluppo non sostenibile

## SOMMARIO

RISCALDAMENTO GLOBALE ED  
EMISSIONE DEI GAS SERRA

di V.M. Malhotra

(pag. 6)

RIUTILIZZO DELLE SABBIE DI  
FONDERIA NELLE MALTE  
CEMENTIZIE

di F. Tittarelli, S. Monosi,  
M.L. Ruello e G. Moriconi

(pag. 11)

CORSI DI FORMAZIONE  
PERMANENTE ON LINE

(pag. 15)

DEGRADO DEL CALCESTRUZZO  
PER ATTACCO SOLFATICO

di S. Collepari, J.J. Ogoumah  
Olagot, F. Simonelli e R. Troli

(pag. 16)

LA FISICA DELL'ACQUA  
NELLE COSTRUZIONI

di M. Collepari

(pag. 22)

**ENCO Journal**  
PERIODICO SULLA TECNOLOGIA  
DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE  
Ponzano Vito (TV) - Via delle Industrie, 18/20  
Tel. 0422.963771 - Fax 0422.963237  
info@encosrl.it

**Direttore  
Responsabile**

MARIO COLLEPARDI

**Redazione**

ROBERTO TROLI  
SILVIA COLLEPARDI  
ANTONIO BORSOI  
J. JACOB OGOUMAH OLAGOT  
FRANCESCA SIMONELLI

**EDITORE**

ENCO SRL

Ponzano Vito (TV) - Via delle Industrie, 18/20  
Tel. 0422.963771 - Fax 0422.963237  
info@encosrl.it

**COMPOSIZIONE**

ISABELLA CAPOGNA  
ALESSANDRA GALLETTI  
MARA MENEGHEL

**Grafica e Stampa**

GRAFICHE TINTORETTO  
di Rino Lucatello & C. S.R.L.  
31050 Castrette di Villorba (TV)  
Via Verdi 45/46

Registrazione al Tribunale di Treviso n.990 26/01/1996 - Iscrizione al RNS n. 06461

# RISCALDAMENTO GLOBALE ED EMISSIONE DEI GAS SERRA



V. Mohan Malhotra

ACI Honorary Member - malhotravm@gmail.com

## INTRODUZIONE

L'International Panel on Climate Change (IPCC) formato da 600 scienziati da 40 paesi ha emesso un rapporto nel Febbraio del 2007 che ha lasciato qualche dubbio circa il riscaldamento globale. Secondo l'IPCC, il riscaldamento globale è presente ed è soprattutto dovuto all'attività umana ed è irreversibile. Esso raccomanda misure drastiche per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>, la sorgente primaria del riscaldamento globale, che è presente giornalmente nell'ambiente. Il rapporto mette in evidenza che non vi sia alcuna azione che sia stata presa per ridurre l'emissione dell'anidride carbonica CO<sub>2</sub> ed è molto probabile che la temperatura media della Terra possa aumentare di 4°C entro la fine di questo secolo. Secondo Nicholas Stern, l'ex economista capo della World Bank del Regno Unito l'innalzamento della temperatura di 4°C, ed anche oltre, avrebbe degli impatti seri sulla produzione del cibo, sulla disponibilità dell'acqua e sulle condizioni estreme degli eventi atmosferici in tutto il mondo.

## EMISSIONE DEI GAS SERRA DALLA PRODUZIONE DEL CLINKER DI CEMENTO PORTLAND

La produzione di una tonnellata di clinker di cemento Portland contribuisce ad emettere circa una tonnellata di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera insieme con altri minori emissioni di gas come NO<sub>x</sub> e CH<sub>4</sub> (metano). L'emissione totale della CO<sub>2</sub> per tonnellate di cemento può andare da circa 1.1 tonnellate di CO<sub>2</sub> se si adotta il processo per via umida a circa 0.8 tonnellate se nell'impianto vengono adoperati i precalcinatori. Circa metà della emissione della CO<sub>2</sub> è dovuta alla calcinazione del calcare e l'altra metà è dovuta alla combustione dei combustibili fossili. La produzione mondiale di clinker di cemento contribuisce per circa il 7.8% (2.8 miliardi di tonnellate) alla produzione totale di CO<sub>2</sub> nel mondo che è ammontata a 36.5 milioni di tonnellate nel 2008.

## RISCALDAMENTO GLOBALE

### Emissione delle CO<sub>2</sub> per persona per anno nei diversi paesi

L'Australia, il Canada e gli Stati Uniti sono i maggiori contribuenti alla emissione di CO<sub>2</sub> nel mondo, con emissioni di CO<sub>2</sub> stimate a circa 24 tonnellate per persona per anno, seguiti dai paesi dell'Unione Europea EU a circa 10 tonnellate come è indicato nella Tabella 1. I paesi in via di sviluppo come la Cina e l'India hanno attualmente delle emissioni basse, ma la loro rapida industrializzazione sta aumentando e farà aumentare la velocità di emissioni per persona significativamente nel prossimo futuro.

Tabella 1 - Emissione della CO<sub>2</sub> in tonnellate per persona e per emissione totale\*

PAESI	TONNELLATE per PERSONA (Ton)	EMISSIONI TOTALI (Megaton)
Australia	26.2	529
USA	24.0	7.065
Canada	23.7	758
Russia	13.5	1.938
Germania	12.3	1.015
U.K.	11.0	656
Giappone	10.6	1.355
Brasile	5.3	983
Cina	5.0	6.467
India	1.6	1.744

\* Ripreso da "Hot Topic", autori Walker e King (2008)

### Concentrazione della CO<sub>2</sub> nell'atmosfera

La concentrazione della CO<sub>2</sub> è andata aumentando nel mondo dalla rivoluzione industriale nel 1800. Al tempo della rivoluzione industriale la concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera era circa 260 ppm (parti per milioni); nel 1988 la concentrazione di CO<sub>2</sub> rilevata nelle Hawaii era

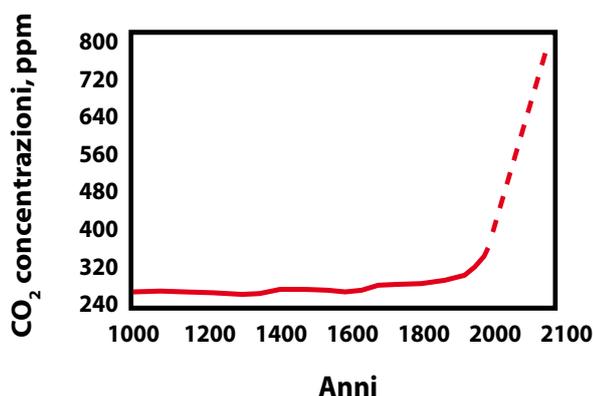


Fig. 1 - Concentrazione della CO<sub>2</sub> nell'atmosfera dal 1800.

diventata 350 ppm. Se nessuna azione è presa nei confronti del riscaldamento globale, la velocità di concentrazione nell'atmosfera andrà aumentando drammaticamente come indicato in Figura 1.

### Emissioni della CO<sub>2</sub> per categorie

Le emissioni totali di CO<sub>2</sub> nel 2007 sono state 36 miliardi di tonnellate delle quali quelle provenienti dai combustibili fossili sono circa 29 miliardi di tonnellate cioè l'81% del totale. La Tabella 2 mostra le diverse emissioni di CO<sub>2</sub>.

Tabella 2 - Emissione di CO<sub>2</sub> nel 2007  
(in miliardi di tonnellate ed in % sul totale)\*

	MILIARDI DI TONNELLATE	%
TOTALE	36	100
COMBUSTIBILI FOSSILI	29	81
Dei quali:		
- Elettricità	11.5	32
- Industria	8.0	22
- Trasporti	6.5	18
- Residenza	2.0	6
- Commercio	1.0	3
- Deforestazione	7.0	19

\* Economics for "Crowded Planet: Common Wealth", di Jeffrey D. Sachs, 2008

### Abbattimento dell'anidride carbonica

Il sequestro dell'anidride carbonica coinvolge delle tecniche che portano alla cattura delle emissioni dei gas serra che queste possano essere immagazzinate sotto terra piuttosto che essere lasciate entrare nell'atmosfera. Sfortunatamente, il sequestro dell'anidride carbonica è una tecnica molto difficile, e non è stata, allo stato attuale, dimostrato che possa avvenire con successo sebbene siano state intraprese delle ricerche da parte di al-

cune industrie nel Canada, negli Stati Uniti e negli altri paesi. Alcune nuove tecnologie sono state proposte negli Stati Uniti; tuttavia per l'immediato futuro il sequestro della CO<sub>2</sub> non è molto promettente, e non è un'opzione. Nel Luglio del 2009, l'Australia ha annunciato la messa a punto di un ente (*Institute for Carbon Capture and Storage*) con un largo mandato su questo argomento. Maggiori dettagli saranno annunciati al più presto.

### Assorbimento della CO<sub>2</sub> emessa dagli oceani

Gli oceani nel mondo hanno assorbito quasi la metà della CO<sub>2</sub> emessa durante gli ultimi 200 anni. Questa quantità ammonta a circa 118 miliardi di tonnellate per le emissioni della CO<sub>2</sub> che vanno dal 1800 in avanti. Questo è un aspetto positivo; tuttavia, vi sono anche aspetti negativi del fenomeno perché come la CO<sub>2</sub> si dissolve nell'acqua di mare, essa porta alla formazione di acidi che possono sciogliere le conchiglie e gli scheletri degli animali marini e ridurre la loro capacità a produrre delle sostanze a base di carbonato di calcio, questo a sua volta può influenzare la produttività degli oceani in termini di vita marina e scogliere.

### Innalzamento globale della temperatura e variazioni del clima

Un aumento nell'emissione della CO<sub>2</sub> influenza negativamente il clima globale. L'organizzazione internazionale sul cambio del clima (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*), incontratosi a Ginevra di recente, ha messo sull'avviso che la temperatura globale media si innalzerà tra 1.4 e 5.8°C durante i prossimi 100 anni. Solamente sette anni fa, questo Istituto aveva predetto un aumento massimo di temperatura di circa 3.5°C nello stesso periodo. E' interessante notare che temperatura media globale si è innalzata soltanto di 0.6°C negli ultimi 100 anni. Nel Luglio del 2009, i leader mondiali durante il *meeting* del G8 tenutosi in Italia si sono accordati sul porre un limite di un riscaldamento di 2°C rispetto alla temperatura nei tempi pre-industriali.

### Linearità ed ecologia

Secondo il Prof. Eric Post della Pennsylvania State University, *Globe & Mail*, Maggio 6, 2002, l'ecologia non è lineare. Essa può seguire una linea retta per un determinato periodo di tempo e quindi colpisce un punto di non ritorno, cioè esiste una soglia critica ed essa può disfarsi. Il recente collasso della massa di ghiaccio nell'Antartico è un perfetto esempio di questo concetto di soglia critica. La comunità scientifica era a conoscenza che vi era un andamento nel riscaldamento ma non poteva prevedere che più di 5 miliardi di tonnellate di ghiaccio antartico potessero disfarsi nel periodo di alcuni mesi.

**Ritiro del ghiaccio artico**

Una commissione scientifica formata da scienziati di otto paesi inclusi il Canada e gli Stati Uniti hanno di recente completato uno studio di quattro anni finalizzato allo studio del ritiro del ghiaccio artico. La commissione ha concluso che il ritiro del ghiaccio artico ed il disgelo della tundra sono un diretto risultato dell'accumulo di anidride carbonica e di altre emissioni dalle attività umane in tutto il mondo.

Il recente collasso della massa di ghiaccio, che aveva un peso di più di cinque miliardi di tonnellate, nell'Oceano Antartico è un esempio perfetto di come si possa accelerare il flusso di ghiaccio verso il mare con serie conseguenze sull'innalzamento dei livelli del mare. Questo può portare ad intensificazione potenziale delle siccità e delle inondazioni.

**Leader mondiale nel riscaldamento globale**

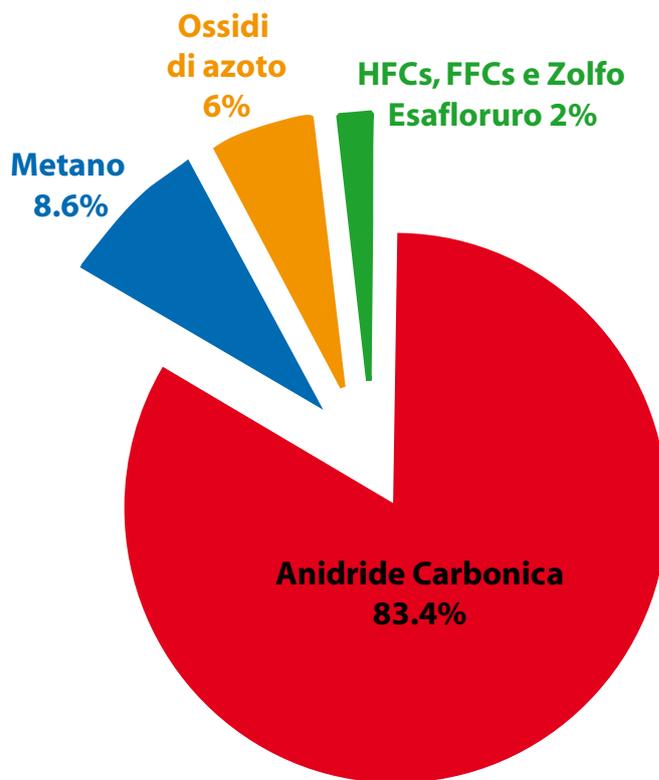
Il Nord America è il leader mondiale nel riscaldamento globale e questo fatto può essere visto attraverso le seguenti statistiche:

- Nel 1998 il Nord America possedeva il 25.8% delle emissioni globali in termini di anidride carbonica che è il gas serra per eccellenza.
- Il consumo pro capite di gasolio annuale in Nord America per i veicoli a motore è nove volte quello della media globale.
- Dal 1996 l'impatto del continente nord americano sull'ambiente, anche chiamato "impronta ecologica", è cresciuto di 4.4 volte il valor medio mondiale.
- Il consumo di combustibili in Nord America è stato stimato in 25.7 miliardi di litri per anno a causa del traffico secondo la U.N. Report, Globe and Mail, Agosto 15, 2002.
- Il Canada e gli Stati Uniti consumano il 25% dell'energia globale ogni anno malgrado essi posseggano solo il 5% della popolazione mondiale.
- Sebbene oggi le autovetture siano il 90% più pulite di

quelle disponibili nel 1970, gli autisti negli Stati Uniti ora guidano in media il doppio dei chilometri percorsi negli anni '70. Inoltre, il guadagno nell'efficienza del combustibile automobilistico è stato compensato da un ritorno indietro di 18 anni verso macchine molto pesanti come ad esempio i SUV. Tuttavia, i recenti aumenti nel prezzo del carburante ha ridotto la richiesta di SUV e le persone cominciano a guidarli di meno.

- L'energia totale nel Nord America è cresciuta del 31% tra il 1972 ed il 1977 secondo la U.N. Report, Globe and Mail, 15 Agosto 2002.
- Sebbene la dimensione di una famiglia americana sia diminuita del 16% la dimensione delle nuove case è aumentata del 48% con il risultato che è aumentato il consumo energetico.

La Figura 2 mostra le diverse percentuali di emissioni di gas serra negli Stati Uniti nel 2002.



**Fig. 2 - Emissione dei gas serra nel 2002 in USA (U.S. Environmental Protection Agency).**

**Emissioni di CO<sub>2</sub> da automobili negli Stati Uniti**

Le automobili sono le più grandi sorgenti di emissioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera, ed ogni litro di gasolio bruciato produce circa 2.5 kg di CO<sub>2</sub>. Un'auto che consuma mediamente 10.6 Km/L e che viaggia per circa 20.000 chilometri l'anno emette circa 4.7 tonnellate di CO<sub>2</sub>. Perciò 25 milioni di passeggeri (10% del numero totale delle macchine negli Stati Uniti) emette circa 120 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera. Questa quantità di CO<sub>2</sub> è circa la stessa di quel-

la emessa dalle cimiterie negli Stati Uniti. I dati sotto riportati danno un'idea dell'ordine di grandezza del problema:

N. totale di macchine nel mondo:	900 Milioni
N. totale di macchine negli U.S.A.:	250 Milioni
Popolazione negli U.S.A.:	300 Milioni
N. di macchine per i rimanenti 6 miliardi di persone:	650 Milioni

### **Emissioni di CO<sub>2</sub> e deforestazione tropicale**

La deforestazione tropicale è la seconda causa di variazione del clima seconda solo alla combustione dei combustibili fossili. Due acri e mezzo di foresta bagnata contengono circa da 120 a 300 tonnellate di carbonio. Si è stimato che un mezzo milione di acri di foresta bagnata dovrebbe mantenere un'atmosfera esente da emissioni di CO<sub>2</sub> per una quantità pari a quella emessa da un impianto termico a carbone con una potenza complessiva di 500 megawatt in cinquant'anni. A causa della deforestazione, l'Indonesia ed il Brasile si attestano alla terza e quarta potenza del mondo nella emissione di CO<sub>2</sub>. La prima e la seconda potenza sono la Cina e gli Stati Uniti.

### **Impatto potenziale del riscaldamento globale**

Attualmente non vi sono mezzi di quantificazione dell'effetto potenziale del riscaldamento globale. Diversi gruppi di ricerca coinvolti in quest'area hanno fatto diverse previsioni più o meno pessimiste. Secondo i più recenti rapporti del 2007 dell'IPCC, questi saranno gli eventi più probabili che saranno la conseguenza delle variazioni climatiche:

1. Scomparsa dei ghiacciai che alimentano i maggiori fiumi nell'Asia del Sud e del Sud-Est.
2. Fusione dei ghiacciai nell'Antartide.
3. Fusione del *permafrost* nel Nord. (Il "*permafrost*" è quella parte di terreno che non gela al di sotto di 0°C).
4. Inondazioni che minacciano le coste delle aree basse.
5. Ecosistema danneggiato che minaccia le peschiere.
6. Pericolo di serie situazioni di inquinamento
7. Aumento del pericolo di malattie da insetti.
8. Aumento della minaccia di incendi nelle foreste e inondazioni molto serie.
9. Transizione delle foreste a praterie.
10. Scarsi approvvigionamenti di acqua in Africa ed Asia.

## **ACQUA: LA PROSSIMA CRISI NEL MONDO**

### **Mancanza d'acqua**

I rapporti dell'IPCC sui cambi di clima pubblicati nel 2007 informano che il riscaldamento globale influenzerà anche molto seriamente la disponibilità di acqua nel futuro. I ghiacciai dell'Himalaia presto si fonderanno. Questo potrebbe portare ad una mancanza d'acqua per centinaia di milioni di persone. I ghiacciai che regolano il rifornimento d'acqua al Gange, Indus, Brahmaputra, Mekong, Thanklwin, Yangtze e Fiume Giallo sono ritenuti essere ridotte ad una velocità che va dai 10 ai 15 metri circa per ogni anno. E' stimato che 500 milioni di persone sul pianeta vivano in condizioni critiche a causa della mancanza d'acqua e dal 2025 il numero salirà a più

di tre miliardi. Secondo la Sachs (2008) alcune regioni del mondo saranno in grave crisi:

- La regione Sahel dell'Africa.
- Il corno d'Africa.
- L'area Israele-Palestina.
- Il Medio Oriente, Pakistan e l'Asia centrale.
- Le pianure Indo-Gangetiche.
- La pianura Nord Cinese.
- Il Sud-Ovest degli Stati Uniti e del Messico.
- I bacini Murray-Darling in Australia.

Secondo il *Pacific Institute for Studies in Development and Security* la scarsità d'acqua salirà nei prossimi anni attraverso il Sud-Ovest e il Nord-Ovest degli Stati Uniti. Questi sono anche già avvenuti in India, Cina ed Africa. Come risultato, alcuni impianti industriali hanno dovuto chiudere oppure hanno dovuto interrompere la produzione. Per esempio nel 2004 nello stato di Kerala a Sud-Est dell'India, la Pepsi Cola e la Coca-Cola hanno dovuto chiudere gli impianti per mancanza di acqua. Ancora una volta gli Stati Uniti sono i leader mondiali nel consumo di acqua come sotto riportato:

CONTINENTE	CONSUMO DI ACQUA (litri/giorno)
NORD AMERICA	600
EUROPA	300
AFRICA	30

### **Spreco di acqua**

Malgrado la crisi dell'acqua in un futuro che non è molto lontano vi è uno spreco di acqua in tutto il mondo. Per esempio 9.5 miliardi di litri d'acqua sono utilizzati per sostenere nelle loro necessità giornaliere 4,76 miliardi di persone come previsto dalle Nazioni Unite. D'altra parte, attualmente, 9,5 miliardi di litri d'acqua sono usati per irrigare i campi da golf. Inoltre, sembra che non ci sia alcun arresto di questo andamento per le costruzioni di nuovi campi da golf specialmente in Cina, nel Sud-Est asiatico e ancora, in misura minore, in India.

### **Irrigazione dell'acqua di falda**

L'intensa irrigazione ha effetti drammatici sulle falde acquifere. Per esempio, il numero dei buchi che pompano acqua d'irrigazione in India erano 10.000 nel 1960 e sono arrivati a 20 milioni nel 2007; questo ha provocato un'abbattimento nelle falde d'acqua da 100 a 150 metri in alcuni luoghi.

**CHRYSO® FLEXÓ**

**Il sistema flessibile per i pannelli a Taglio Termico  
di nuova generazione**

**CHRYSO**

LA CHIMICA AL SERVIZIO DEI  
MATERIALI DA COSTRUZIONE

[www.chrysoitalia.com](http://www.chrysoitalia.com)

**CHRYSO ITALIA SPA**  
24040 Lallio (BG) Italy · Telefono +39 035 693331 · Fax +39 035 693684

pozzi.giulio@chry.it - 02.2009-007

# RIUTILIZZO DELLE SABBIE DI FONDERIA NELLE MALTE CEMENTIZIE



*Francesca Tittarelli, Saveria Monosi,  
Maria Letizia Ruello e Giacomo Moriconi*

*Univ. Politecnica delle Marche*

*f.tittarelli@univpm.it - s.monosi@univpm.it*

*m.l.ruello@univpm.it - g.moriconi@univpm.it*



## INTRODUZIONE

La sabbia di fonderia esausta è un prodotto di scarto nell'industria della fusione di materiali ferrosi e non ferrosi, dove viene apprezzata da secoli nella formatura per le sue proprietà di conducibilità termica. Le caratteristiche delle sabbie di fonderia dipendono in larga misura dal tipo di fusione adottata e dal settore industriale di provenienza. Le fonderie riciclano e riusano più volte con successo la stessa sabbia. Quando tale recupero non è ulteriormente ripetibile, la sabbia esausta va a costituire il rifiuto di maggiore entità della fonderia e prende il nome di UFS (*Used Foundry Sand*).

La pratica più diffusa di smaltimento è quella del conferimento in discarica. Tale procedura tuttavia presenta una duplice implicazione ambientale, dovuta sia alla sottrazione di nuova materia prima che alla saturazione delle discariche esistenti (1). Spesso, inoltre, la discarica disposta ad accogliere le USF è molto distante dalla fonderia, con alti costi economici ed ambientali dovuti al trasporto. Il materiale di per sé è classificato come non pericoloso, aprendo con ciò la strada a molti possibili riutilizzi in diversi settori industriali: cemento, laterizi, calcestruzzo, conglomerati per edilizia, vetro e asfalto (2). Tuttavia, la produzione giornaliera di grandi quantitativi di UFS implica ugualmente costi elevati di trasporto qualora l'impianto di destinazione sia distante dalla fonderia. In tal senso, l'impiego delle UFS nelle malte cementizie e nel calcestruzzo potrebbe essere una soluzione interessante in virtù del numero elevato di tali impianti territorialmente ben distribuiti. Negli ultimi anni sono state condotte numerose ricerche per riutilizzare nel calcestruzzo materiali riciclati e scarti industriali. Tuttavia ancora la percentuale di utilizzo di questi materiali nel calcestruzzo non ha raggiunto il livello auspicabile ed ambientalmente sostenibile.

Sebbene le UFS siano state ampiamente studiate come costituente per materiali a bassa resistenza (3, 4), la possibilità di un loro utilizzo nelle malte cementizie e nel calcestruzzo non ha avuto sufficiente attenzione (5, 6). Il presente studio ha preso in considerazione gli effetti dell'impiego di UFS, proveniente da una fonderia italiana, come parziale sostituzione della sabbia comunemente utilizzata nel confezionamento di malte cementizie.

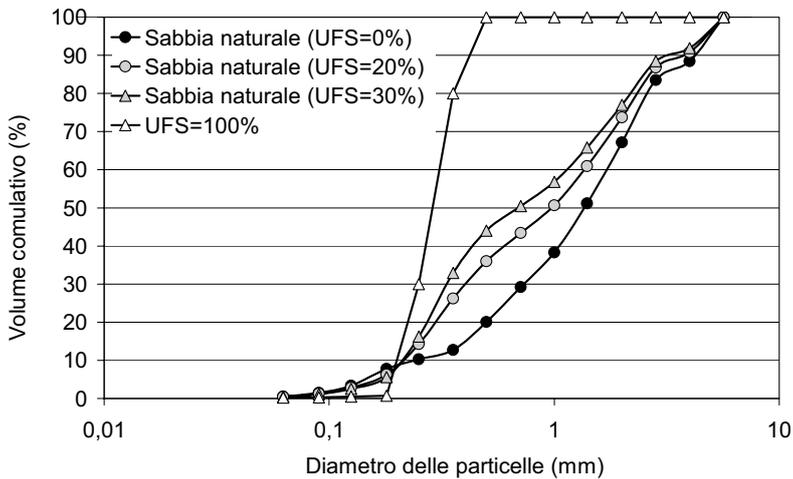
## PARTE SPERIMENTALE

È stato impiegato un cemento commerciale al calcare tipo CEM II/A-L 42,5 R secondo la norma europea EN-197/1. La finezza Blaine del cemento è risultata di 0,415 m<sup>2</sup>/g e la sua densità di 3050 kg/m<sup>3</sup>. La sua composizione chimica è riportata in Tabella 1. La sabbia naturale impiegata come aggregato aveva un diametro massimo di 5 mm, massa volumica di 2620 kg/m<sup>3</sup> ed assorbimento d'acqua di 2,5 %. La distribuzione granulometrica della sabbia è riportata in Figura 1. L'UFS utilizzata era una sabbia esausta tal quale proveniente da una fonderia italiana.

**Tabella 1 - Analisi chimica del cemento.**

OSSIDI	(%)
SiO <sub>2</sub>	29.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.80
TiO <sub>2</sub>	0.09
CaO	59.25
MgO	1.15
SO <sub>3</sub>	3.25
K <sub>2</sub> O	0.79
Na <sub>2</sub> O	0.26
L.O.I.	11.62

Miscele di malta cementizia, con rapporto cemento/sabbia di 1:3 (in peso) e rapporto acqua/cemento (a/c) di 0,5, sono state preparate con percentuali di 0, 20 e 30% in peso di sostituzione dell'aggregato fine con UFS. Le malte contenenti UFS in parziale sostituzione della sabbia naturale hanno mostrato, allo stato fresco, caratteristiche simili alla miscela di riferimento, fatta eccezione per una leggera diminuzione della lavorabilità nel caso di sostituzione al 30%. Per ogni miscela, realizzata secondo la norma UNI EN 1015-2, sono stati confezionati provini prismatici (40x40x160 mm), stagionati a umido per due giorni e quindi maturati all'aria a temperatura ambiente per un mese. Per la sostituzione al 20% è stato



**Fig. 1 - Distribuzione granulometrica della UFS, della sabbia naturale (UFS=0%) e della sabbia naturale sostituita da UFS in percentuale del 20% e del 30% in peso.**

analizzato anche l'effetto del lavaggio preventivo della sabbia (W-UFS). La W-UFS è stata ottenuta miscelando UFS con acqua di rubinetto (acqua: UFS = 5:1 in peso) per 24 ore con un agitatore meccanico. La UFS è stata separata dall'acqua per centrifugazione e ulteriormente lavata in acqua di rubinetto corrente usando un setaccio (dimensioni della maglia 63  $\mu\text{m}$ ) per rimuovere anche le particelle più fini. Prima dell'uso la W-UFS è stata essiccata a 90°C fino a peso costante. L'acqua di lavaggio, risultante dalla centrifugazione, è stata analizzata e quindi utilizzata per confezionare paste cementizie con  $a/c = 0,4$ , allo scopo di studiare, per mezzo dell'analisi termogravimetrica, l'effetto degli ioni solubili, rilasciati in acqua dalla UFS, sulla cinetica di idratazione del cemento.

La caratterizzazione chimico-fisica della UFS è stata effettuata determinando il contenuto e l'adsorbimento di acqua, la densità specifica e la densità apparente. La distribuzione granulometrica è stata ottenuta per mezzo di setacciatura. L'analisi diffrattometrica ai raggi X è stata condotta sia sulla sabbia UFS tal quale sia sulla sua frazione fine inferiore a 75  $\mu\text{m}$ . La concentrazione di metalli pesanti nell'acqua di lavaggio della UFS è stata analizzata in spettrofotometria di emissione atomica al plasma (ICP Perkin Elmer OPTIMA 3200 XL).

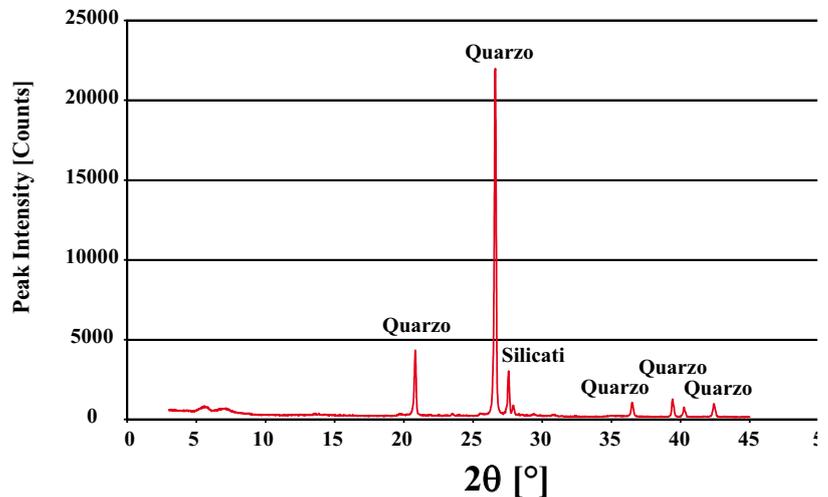
Le resistenze meccaniche a compressione ed a flessione delle malte sono state determinate secondo la norma UNI EN 1015-11 per differenti tempi di maturazione.

Infine, allo scopo di studiare l'effetto degli ioni solubili della UFS sulla cinetica di idratazione del cemento, è stato determinato mediante analisi termogravimetrica dopo 2, 5 e 24 ore di idratazione, il contenuto di idrossido di calcio nelle paste cementizie con  $a/c = 0,4$ , confezionate sia con l'acqua di lavaggio della UFS che con acqua di

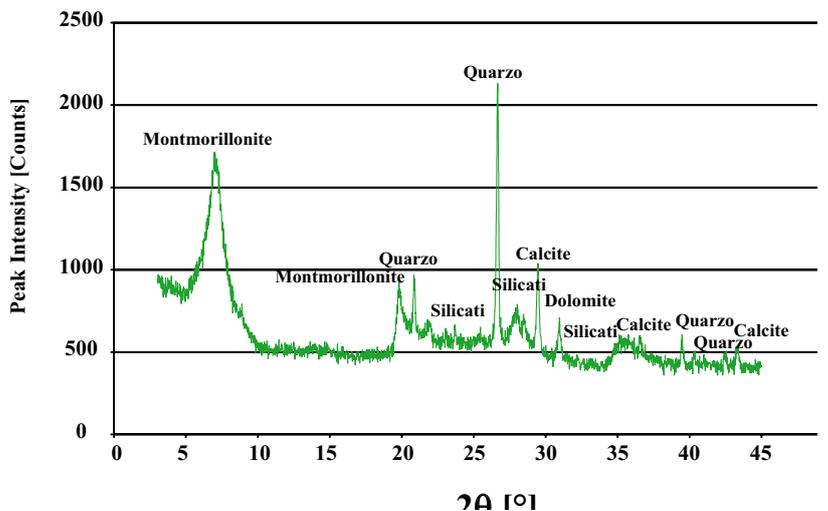
rubinetto come riferimento. Per ogni tempo di maturazione, l'idratazione è stata bloccata rimuovendo l'acqua libera per mezzo di acetone e tenendo la polvere risultante in un essiccatore sotto vuoto fino al momento dell'analisi.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

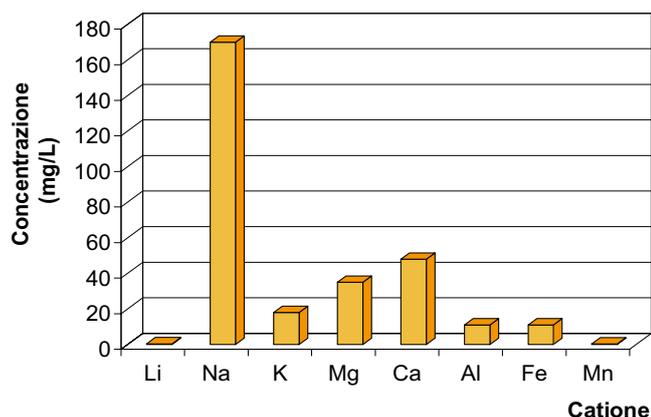
La distribuzione granulometrica della UFS è riportata in Figura 1. Nella stessa figura sono anche riportate per confronto le distribuzioni ottenute per la sabbia naturale e per quella parzialmente sostituita con UFS alle percentuali di sostituzione del 20% e del 30% in peso di sabbia. La UFS appare, sulla base della distribuzione granulometrica, più fine della sabbia naturale. Il 50% delle particelle presenta un diametro inferiore a 0,3 mm ( $V_{50} = 0,3$  mm), mentre il 90% ha dimensioni inferiori a 0,4 mm ( $V_{90} = 0,4$  mm).



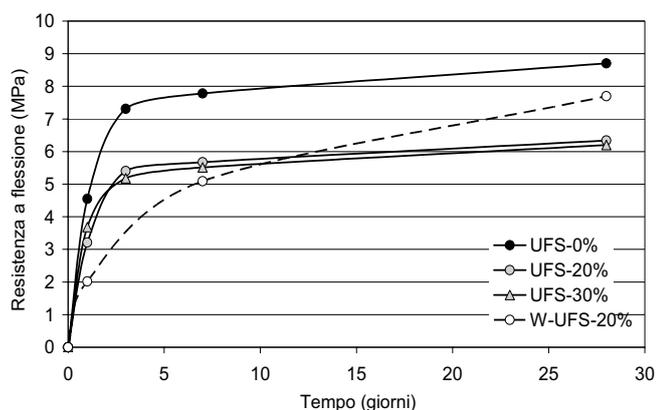
**Fig. 2a - Diffrattogramma ai raggi X della UFS tal quale.**



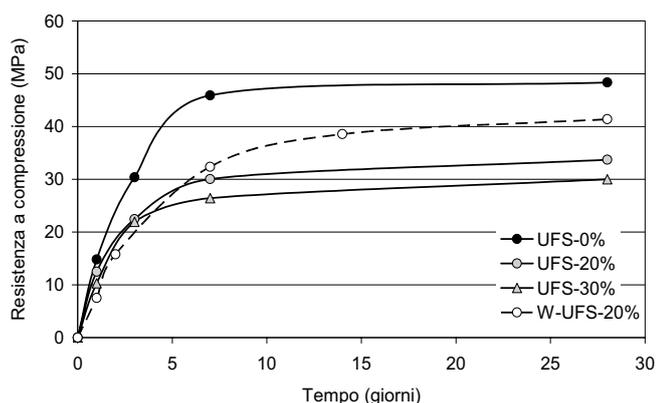
**Fig. 2b - Diffrattogramma ai raggi X della frazione di UFS passante a 75  $\mu\text{m}$ .**



**Fig. 3 - Concentrazione (mg/l) dei cationi solubili nell'acqua di lavaggio della UFS.**



**Fig. 4a - Andamento nel tempo della resistenza a flessione della malta confezionata con sabbia parzialmente sostituita con UFS alle percentuali in peso di 0-20-30 % e da W-UFS al dosaggio del 20%.**



**Fig. 4b - Andamento nel tempo della resistenza a compressione della malta confezionata con sabbia parzialmente sostituita con UFS alle percentuali in peso di 0-20-30 % e da W-UFS al dosaggio del 20%.**

L'analisi diffrattometrica ai raggi X mostra che la UFS, così come ricevuta, è costituita principalmente da quarzo con silicati naturali come costituenti minoritari (Figura 2a). La stessa analisi eseguita sulla frazione fine inferiore a 75

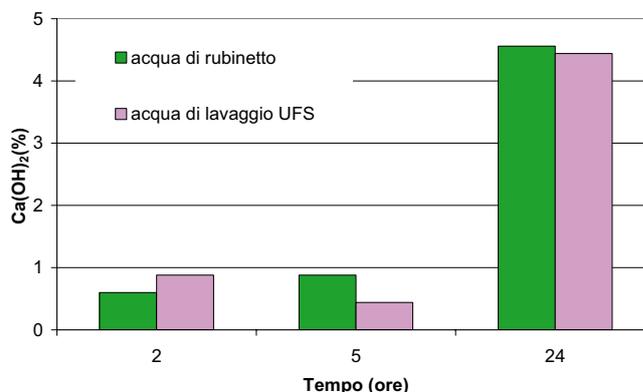
µm (Figura 2b) rileva anche la presenza di carbonati (calcite e dolomite) e di montmorillonite, probabilmente originata dalla bentonite utilizzata nella preparazione della forma. Il contenuto di acqua della UFS è risultato pari a 0,73% mentre il suo assorbimento di acqua è pari a 5,4%. La densità specifica misurata è di 1,45 g/cm<sup>3</sup> mentre quella relativa apparente è di 2,04 g/cm<sup>3</sup>.

Infine l'acqua di lavaggio della UFS, analizzata all'ICP, ha mostrato un contenuto relativamente elevato di ioni alcalini. I cationi più abbondanti sono, in ordine decrescente di abbondanza, Sodio, Calcio, Magnesio, Potassio, Ferro e Alluminio (Figura 3).

L'andamento nel tempo della resistenza meccanica a flessione ed a compressione della malta confezionata con sabbia parzialmente sostituita da UFS con diversi dosaggi di sostituzione, e da W-UFS al dosaggio del 20% in peso, è mostrato rispettivamente nelle Figure 4a e 4b (ogni valore rappresenta la media aritmetica di tre misure).

I risultati mostrano che la presenza di UFS produce una notevole riduzione della resistenza meccanica a flessione ed a compressione della malta cementizia, in funzione del livello di sostituzione della sabbia naturale (circa il 30% per la resistenza a flessione e il 40% per quella a compressione per i tempi di maturazione più lunghi). Tuttavia, se viene utilizzata UFS preventivamente lavata (W-UFS), questi effetti indesiderabili risultano attenuati. Dopo una iniziale riduzione della velocità di sviluppo della resistenza, la malta confezionata con W-UFS raggiunge valori di resistenza finale che risultano penalizzati solo del 10% rispetto a quelli ottenuti con la malta di riferimento priva di UFS. Probabilmente la W-UFS risulta depurata dall'azione di lavaggio sia delle particelle più fini, che diminuiscono le prestazioni meccaniche della malta, sia dei cationi alcalini, rilevati dall'analisi chimica dell'acqua di lavaggio (Figura 3), e capaci di indurre qualche effetto accelerante nel primo periodo di maturazione (7).

Il contenuto di idrossido di calcio a 2, 5 e 24 ore di idratazione, ottenuto per analisi termogravimetrica delle paste cementizie preparate con acqua di lavaggio della UFS, è mostrato in Figura 5 in confronto con quello delle paste realizzate con acqua di rubinetto come riferimento. Si può



**Fig. 5 - Contenuto di idrossido di calcio nelle paste cementizie confezionate con acqua di rubinetto o con acqua di lavaggio di UFS dopo 2, 5 e 24 ore di idratazione.**

notare un iniziale effetto accelerante dell'idratazione, prodotto dagli ioni alcalini solubili presenti nella UFS, messo in evidenza dal contenuto di idrossido di calcio, proporzionale al grado d'idratazione.

### CONCLUSIONI

I risultati ottenuti mostrano che l'aggiunta di UFS tal quale in sostituzione della sabbia naturale diminuisce le prestazioni meccaniche della malta. La UFS contiene piccole quantità di montmorillonite, probabilmente responsabile della riduzione di resistenza, e un elevato tenore di ioni alcalini solubili, capaci di indurre un effetto accelerante iniziale dell'idratazione della pasta di cemento.

Quando si utilizza sabbia di fonderia preventivamente lavata (W-UFS), l'iniziale effetto accelerante dell'idratazione scompare e le prestazioni meccaniche a lungo tempo risultano parzialmente recuperate.

### BIBLIOGRAFIA

1. EPA 329/03: Technical Bulletin No. 23, 'Guidelines for the classification and disposal of used foundry sand (UFS)', September 2003.
2. Ministero dell'ambiente, Decreto 5 febbraio 1998, (Supplemento ordinario alla Gazzetta ufficiale 16 aprile 1998 n. 88).
3. Siddique, R., Noumowec, A., Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength, materials and concrete, Resources, Conservation and Recycling, 53 (2008), pp 27-35.
4. Bakis, R., Koyuncu, H., Demirbas, A., "An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures", Waste Management & Research, 24 (3), (2006), pp. 269-274.
5. Siddique, R., de Schutter, G., Noumowec, A., "Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete", Construction and Building Materials, 23 (2009), pp 976-980.
6. Naik, T. R., Kraus, R. N., Chun Y.M., Ramme B.W., and Shiw S. S., "Properties of Field Manufactured Cast-Concrete Products Utilizing Recycled Materials", Journal of Materials in Civil Engineering, 15(4), (2003), pp. 400-407.
7. Collepardi M, The New Concrete, Grafiche Tintoretto, (2006), p. 186.

# MAURIZIO SIMONI

si è Diplomato in **Tecnico del Calcestruzzo**  
dei corsi on-line organizzati da Enco.





Laboratorio prove materiali autorizzato dal **Ministero delle Infrastrutture e Trasporti**  
Ente iscritto all'Albo dei Laboratori MURST, **Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica**  
Diretto dal Prof. Mario Collepari, Honorary Member of the **American Concrete Institute**

## Corsi di formazione permanente online

Sono iniziati i primi due **CORSI TELEMATICI ENCO** per il conseguimento del diploma di **TECNICO DEL CALCESTRUZZO**.

Senza spese di trasferta e soggiorno: è possibile frequentare i Corsi comodamente da casa

Senza obblighi di orari: il corso può essere frequentato nell'arco di un mese decidendo quali e quante lezioni seguire per giorno

E' possibile comunicare con i docenti tramite e-mail per avere chiarimenti, e suggerimenti.

Se si desidera conseguire il diploma di **TECNICO DEL CALCESTRUZZO** occorre:

a) frequentare i corsi: **TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO** e **CALCESTRUZZI SPECIALI**;

b) per ciascun corso sostenere un esame *on-line* preliminare in data da concordare;

c) per ciascun corso sostenere un esame diretto finale in data e sede da concordare.

Per entrambi gli esami è possibile consultare il materiale didattico e normativo così come avviene nella usuale attività professionale. In caso di insuccesso il test *on-line* e l'esame finale sono ripetibili.

### PROGRAMMI

I Programmi dei Corsi di **Tecnologia del calcestruzzo** e di **Calcestruzzi speciali** sono disponibili sul sito [www.encosrl.it](http://www.encosrl.it) cliccando su **CORSI ON LINE**.

### MATERIALE DIDATTICO

*Materiale didattico*: agli iscritti al primo corso verrà recapitato il libro **Il Nuovo Calcestruzzo** (V Edizione di M. Collepari, S. Collepari e R. Trolì) con gli allegati sulle *Norme Tecniche per le Costruzioni*, la *Circolare Ministeriale Esplicativa delle Norme*, il software *Easy&Quick* per le prescrizioni di capitolato sulle opere in CA e CAP, e il video sul "Degrado del calcestruzzo".

### COSTI

*Costo del primo corso*: € 350,000 iva esclusa. - *Costo del secondo corso*: € 200,000 iva esclusa.

### ISCRIZIONE AI CORSI

Si può effettuare l'iscrizione e il pagamento via Internet al sito [www.encoshop.com](http://www.encoshop.com) sezione **CORSI ON LINE** nella fase di completamento dell'ordine (precisazione dei dati dell'acquirente: nome e cognome, ragione sociale, carta di credito, ecc.) andare alla voce **TIPOLOGIA** (in rosso) scegliere l'opzione **CORSI ON LINE** per iscriversi al corso e completare il pagamento, oppure mandare una e-mail con tutti i dati all'indirizzo [info@encosrl.it](mailto:info@encosrl.it).

Per maggiori informazioni: [www.encosrl.it](http://www.encosrl.it) oppure Enco Srl – Via delle Industrie 18/20 – 31050 Ponzano Veneto (TV) – Tel. 0422 96 37 71 – Fax 0422 96 32 37 – [info@encosrl.it](mailto:info@encosrl.it)

# DEGRADO DEL CALCESTRUZZO PER ATTACCO SOLFATICO



S. Collepari, J. Jacob Ogoumah Olagot,  
Francesca Simonelli, Roberto Troli

Enco - Engineering Concrete, Ponzano Veneto (TV)  
info@encosrl.it



## INTRODUZIONE

Il degrado del calcestruzzo contribuisce in modo determinante alla riduzione di un progresso sostenibile nelle costruzioni per il consumo di energia e risorse destinate al restauro delle strutture degradate. Esistono diversi meccanismi di degrado che possono coinvolgere la corrosione delle armature metalliche, la reazione alcali-silice degli aggregati, l'attacco chimico o fisico (formazione di ghiaccio) della pasta cementizia. Tra i vari attacchi chimici che aggrediscono e distruggono la pasta di cemento, con conseguenze devastanti per il calcestruzzo, si distingue per i suoi effetti distruttivi l'attacco solfatico che è l'oggetto di questo articolo.

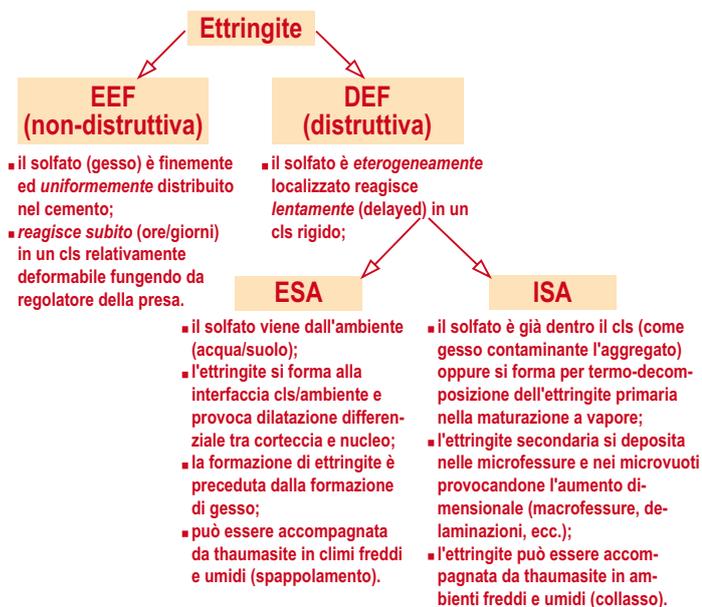


Fig. 1 - Schematizzazione dei processi di formazione dell'ettringite: non-distruttiva ed utile per la regolazione della presa (EEF); distruttiva e dannosa per il dissesto delle strutture in calcestruzzo (DEF).

## ATTACCO DEI SOLFATI

L'attacco solfatico consiste nella interazione tra lo ione  $SO_4^{=}$  ed i prodotti presenti nella matrice cementizia:  $Ca(OH)_2$  (calce d'idrolisi),  $C-S-H$  (silicato di calcio idrato responsabile dell'indurimento) e  $C-A-H$  (alluminato di calcio idrato responsabile della presa).

Nella Fig. 1 sono schematicamente mostrati i processi di formazione di ettringite, principale responsabile degli attacchi solfatici di tipo *ISA* ed *ESA*, accanto alla formazione innocua di ettringite che si forma immediatamente (*Early Ettringite Formation, EEF*) durante la regolazione della presa del cemento.

Lo ione solfato aggressivo può provenire dall'ambiente esterno o essere già presente all'interno del calcestruzzo: nel primo caso si parlerà di **attacco solfatico esterno** (*ESA, External Sulphate Attack*), nel secondo di **attacco solfatico interno** (*ISA, Internal Sulphate Attack*).

### Attacco solfatico esterno (ESA)

Tra tutti gli agenti aggressivi del calcestruzzo i solfati sono indubbiamente i più importanti sia per la frequenza con cui si può manifestare l'attacco solfatico, sia per le conseguenze estremamente negative che essi sono capaci di provocare.

L'attacco solfatico si manifesta attraverso un rigonfiamento esagerato del conglomerato. Quando il calcestruzzo è immerso in acqua potabile esso tende a rigonfiarsi di alcune centinaia di micron per metro in qualche anno (1): il rigonfiamento dovuto all'ingresso di acqua potabile nella pasta di cemento è esattamente l'opposto del fenomeno di ritiro che si manifesta, sia pure con una variazione dimensionale molto maggiore, allorché il calcestruzzo è esposto in un ambiente asciutto e l'acqua evapora dalla pasta cementizia verso l'ambiente. Il rigonfiamento che si manifesta in un calcestruzzo immerso in un'acqua solfatica come quella marina, molto maggiore di quello concernente l'immersione in acqua potabile (Fig. 2), è di tale entità che si possono verificare fessurazioni o distacchi nel

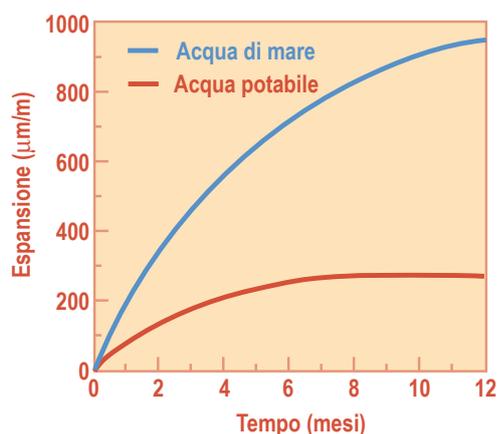


Fig. 2 - Espansione causata dall'immersione del calcestruzzo in acqua potabile (rigonfiamento "fisiologico") ed in acqua di mare (attacco solfatico).



Fig. 3 - Distruzione progressiva (da sinistra a destra) di un provino di conglomerato cementizio immerso in un ambiente solfatico: nel centro il provino si è deformato e fessurato per formazione di ettringite; a destra il provino si è "disintegrato" per formazione di thaumasite.

materiale (Fig. 3). Si potrebbe pensare di definire patologico il rigonfiamento in acqua solfatica e fisiologico quello in acqua potabile.

Occorre inoltre tener conto che un eccessivo rigonfiamento del calcestruzzo — causato dall'azione dei solfati — è condizione necessaria ma non sufficiente per provocare il degrado del calcestruzzo. Nei calcestruzzi a ritiro compensato contenenti cementi espansivi si verifica sostanzialmente lo stesso fenomeno fisico (rigonfiamento) molto spesso causato dalla stessa reazione chimica responsabile del degrado per attacco solfatico (produzione di ettringite). In questo caso, però il rigonfiamento — di entità controllata — oltre a coinvolgere uniformemente tutta la struttura, è contrastato dalla presenza di armature appositamente predisposte per trasformare l'espansione in una compressione del calcestruzzo ed in una trazione dei ferri di armatura.

Nel caso di degrado causato dall'attacco solfatico, il rigonfiamento, oltre a raggiungere valori elevati per la continua presenza di solfati, non si esplica omogeneamen-

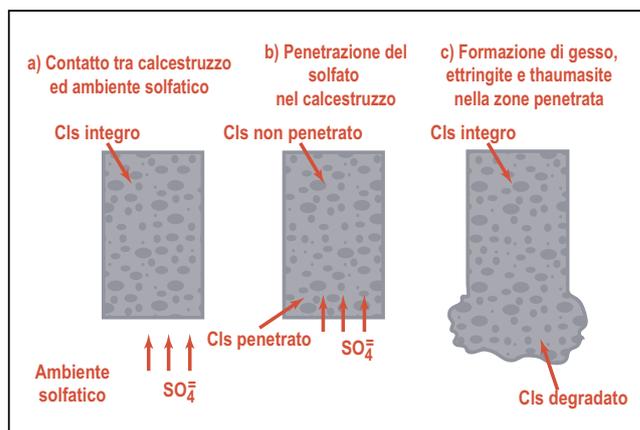
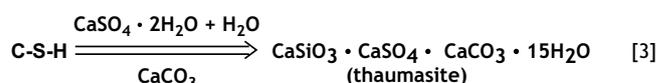
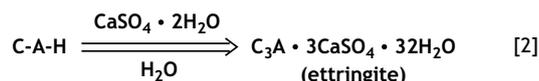
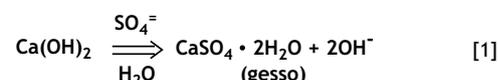


Fig. 4 - Schematizzazione della penetrazione del solfato ambientale nel calcestruzzo (cls) e conseguente degrado del materiale.

te in tutta la struttura, ma si manifesta soprattutto nelle zone corticali di calcestruzzo a contatto con i solfati provenienti dall'ambiente (Fig. 4). Inoltre, la mancanza di un adeguato contrasto nelle zone di calcestruzzo più esposte all'evaporazione consente che le dilatazioni differenziali provochino la fessurazione del materiale.

Le reazioni distruttive del calcestruzzo dovute alla presenza di solfati nell'ambiente sono fondamentalmente tre: quella che porta alla formazione di gesso bi-idrato ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), quella che provoca la formazione di ettringite ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) e quella che porta alla formazione di thaumasite ( $CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot CaSiO_3 \cdot 15H_2O$ ) secondo gli schemi sotto riportati:



L'idrossido di calcio,  $Ca(OH)_2$  (sempre presente in un calcestruzzo in quanto prodotto dalla reazione tra l'acqua di impasto ed i silicati di calcio del cemento) viene trasformato nel più voluminoso gesso bi-idrato,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , secondo la reazione [1].

Ancora maggiore è l'aumento di volume che si verifica con la reazione [2] quando un alluminato idrato di calcio,  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O^*$ , è trasformato in ettringite.

\* Il  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$  non è l'unico alluminato di calcio presente nella pasta di cemento. Altri alluminati idrati,  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$  e  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$ , o anche un solfoalluminato meno ricco in solfato,  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 10H_2O$  sono convertibili in ettringite con aumento di volume.

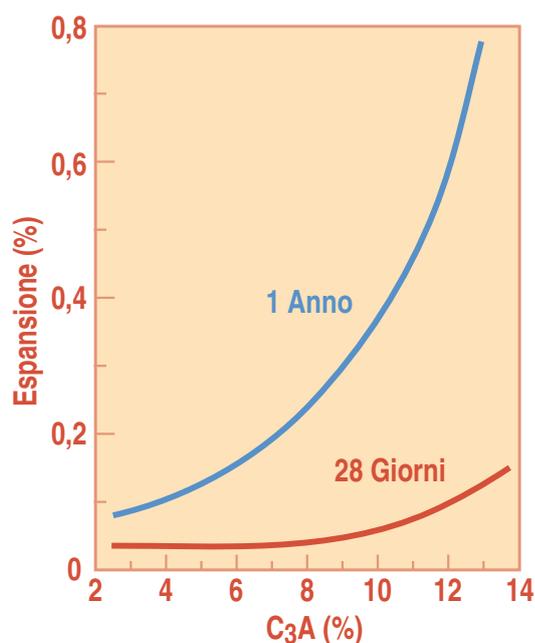


Fig. 5 - Influenza del contenuto di  $C_3A$  nel cemento sull'espansione del calcestruzzo causata dall'attacco solfatico (rapporto  $a/c = 0,60$ ).

Gli alluminati idrati presenti nella pasta cementizia all'interno di un calcestruzzo provengono fondamentalmente dall'alluminato tricalcico ( $3CaO \cdot Al_2O_3$  o più brevemente  $C_3A$ ) e dal ferro-alluminato tetracalcico ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$  o più brevemente  $C_4AF$ ) del cemento. La reazione [2] provoca, come si è detto, un maggiore aumento di volume che non la reazione [1], ed il  $C_3A$  più del  $C_4AF$  sembra contribuire alla produzione di ettringite. Da ciò deriva che il contenuto di  $C_3A$  nel cemento da impiegare è un parametro essenziale nel determinare l'attacco solfatico del calcestruzzo a parità di rapporto  $a/c$  ed a parità di condizione aggressiva dell'ambiente. La Fig. 5 mostra come aumentando il contenuto di  $C_3A$  nel cemento impiegato, aumenti l'espansione subita dal conglomerato cementizio a 28 giorni e soprattutto a un anno.

La formazione di thaumasite (2) avviene in particolari condizioni ambientali: climi freddi ( $0-5^\circ C$ ), umidi ( $UR > 95\%$ ) e ricchi di anidride carbonica ( $CO_2$ ). In queste condizioni, il gesso formatosi secondo la reazione [1] per penetrazione del solfato dell'ambiente aggressivo, reagisce con la calce, l'anidride carbonica ed il silicato di calcio idrato secondo lo schema della reazione [3]. Quando ciò avviene, l'effetto è molto devastante e comunque molto più deleterio che non quello provocato dalla formazione di ettringite: la formazione di thaumasite è accompagnata dalla disintegrazione del calcestruzzo che diviene un materiale del tutto incoerente, mentre la formazione di ettringite dà luogo a fessurazioni e distacchi di frammenti di calcestruzzo ancora duri e consistenti (Fig. 3). È probabile che l'effetto devastante sia dovuto alla somma di due processi: la scomparsa del  $C-S-H$  cui si deve l'azione consolidante e legante della matrice cementizia e la formazione espansiva della thaumasite.

Per quanto concerne l'ettringite, è di fondamentale importanza, ai fini del degrado, che il prodotto sia morfologicamente presente in forma di cristalli aghiformi minuti e poco accresciuti (spessore qualche centinaio di nm e lunghezza qualche  $\mu m$ ). Infatti solo questo tipo di ettringite, definito colloidale, è in grado di adsorbire acqua, per la sua rilevante area superficiale specifica, e quindi di provocare rigonfiamenti dirompenti nel calcestruzzo. L'ettringite ben cristallizzata, cioè con cristalli ben accresciuti (spessore di qualche nm e lunghezza qualche decina di  $\mu m$ ), non è in grado, invece, di adsorbire rilevanti quantità di acqua, per la ridotta area superficiale specifica, e quindi di provocare fenomeni espansivi degradanti.

Per eliminare i danni provocati da un attacco solfatico sul calcestruzzo occorre:

- valutare in modo quantitativo il grado dell'attacco solfatico;
- confezionare (mediante scelta delle materie prime ed opportuno proporzionamento degli ingredienti) un calcestruzzo che sia capace di resistere chimicamente all'attacco solfatico.

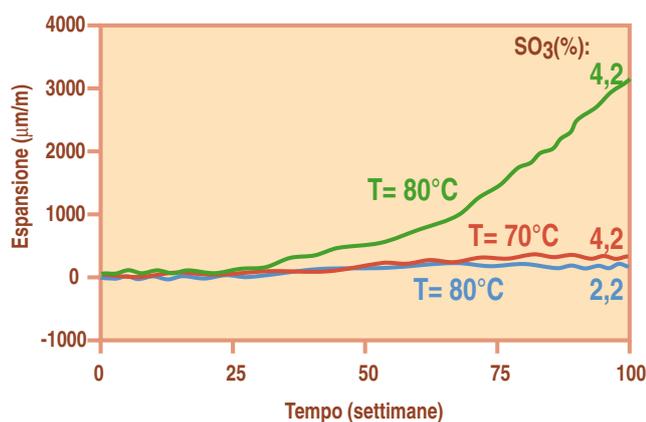
Ovviamente più severo è l'attacco dei solfati, maggiore deve essere la resistenza chimica opposta dal calcestruzzo. Per quanto riguarda la valutazione dell'attacco, il criterio adottato dalla maggior parte delle normative, inclusa quella europea EN 206, è quello di misurare la concentrazione del solfato nell'ambiente, tenendo presente che maggiore è la concentrazione di solfato più severo è l'attacco, e che, a parità di concentrazione del solfato nell'ambiente, l'aggressione è maggiore se l'ambiente è costituito dall'acqua invece che dal terreno.

#### Attacco solfatico interno (ISA)

Il degrado da ISA è un particolare **attacco solfatico in ambiente privo di solfati**. Il solfato, in questo caso, oltre che come gesso nel cemento per la regolazione della presa, può essere presente nell'aggregato in forma di gesso o anidrite ( $CaSO_4$ ) se impropriamente contaminato da impurità solfatiche naturali.

Il solfato dell'aggregato non è immediatamente disponibile. Il gesso dell'aggregato, a differenza di quello aggiunto al clinker nel mulino come regolatore della presa, si presenta in forma di particelle relativamente grosse e quindi molto più lentamente solubili nella fase acquosa; ne consegue, quindi, che la maggior parte del gesso che contamina l'aggregato non è disponibile per la formazione immediata (*EEF* acronimo di *Early Ettringite Formation*) di *ettringite primaria* (che avviene senza provocare danni perchè si trova in un calcestruzzo fresco plastico e deformabile), ma può reagire successivamente (*DEF*) per produrre *ettringite secondaria* la cui formazione localizzata è accompagnata da espansioni differenziali in una matrice rigida e quindi di natura fessurativa (2).

Esiste un'altra forma di attacco solfatico interno (ISA)



**Fig. 6 - Espansione provocata da DEF di tipo ISA in calcestruzzi con diversi tenori di  $SO_3$  nel cemento o maturati a diverse temperature (T).**

correlato con la maturazione a vapore a temperature elevate ( $>70^\circ C$ ). Questo tipo di attacco noto *tout court* come “DEF” è in realtà da classificare come “DEF di tipo ISA”: si tratta della formazione secondaria\*\* dell’ettringite che si deposita all’interno di micro-fessurazioni provocate dal processo stesso e che genera tensioni incontenibili in ambienti esterni esposti alla pioggia proprio a causa della DEF da ISA (Fig. 6).

La Fig. 6 mostra come per evitare i rischi da DEF non si debba superare il limite di  $70^\circ C$  nella stagionatura del calcestruzzo (cosa che può verificarsi nella maturazione a vapore in prefabbricazione o nella stagionatura di getti massivi in cantiere per effetto del calore di idratazione accoppiato ad un alto dosaggio di cemento) o impiegare cementi con un contenuto di gesso (regolatore della presa) che non superi il 2-3% come  $SO_3$ .

### ATTACCO DEI SOLFURI

Il solfuro ( $S^{2-}$ ) può essere presente in natura nei terreni, nelle acque di falda, di palude o di fogna. Esso può presentarsi come sale (per esempio solfuro di ferro o pirite  $FeS_2$ ) o come acido (idrogeno solforato o acido solfidrico  $H_2S$ ).

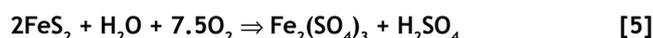
In realtà il solfuro non sembra avere di per sé un’azione aggressiva nei confronti del calcestruzzo. Tuttavia, la sua trasformazione in altri composti può provocare il deterioramento del calcestruzzo. In realtà, molto spesso la presenza del solfuro conduce alla formazione di acidi ai quali in definitiva si deve l’azione aggressiva nei confronti del conglomerato.

L’attacco dei solfuri è molto più raro di quello eserci-

\*\* La formazione di ettringite secondaria è, in questo caso, provocata dalla eccessiva temperatura della maturazione a vapore che provoca la decomposizione dell’ettringite primaria (quella legata alla regolazione della presa) in gesso ed alluminati o idrati; l’ettringite si riforma in servizio a temperatura ambiente e viene favorita dalla presenza di microfessurazioni entro le quali possono depositarsi i cristalli in un ambiente umido.

tato dal solfato. In sostanza l’attacco dei solfuri è circoscritto a due situazioni ambientali: terreni argillosi ricchi di pirite e talune acque di fognatura ricche in  $H_2S$ .

Nei terreni argillosi il solfuro è presente sotto forma di pirite, la quale in presenza di aria ed umidità può essere ossidata e dar luogo a solfati, acido solforico ed anidride carbonica che, per ragioni diverse, possono attaccare il calcestruzzo.



Purtroppo, queste reazioni chimiche possono avvenire in misura più o meno rilevante, a seconda delle particolari condizioni del terreno che favoriscono l’ingresso dell’umidità e dell’ossigeno, cosicché è estremamente difficile prevedere il grado di aggressione del calcestruzzo in base al contenuto di solfuro di un terreno. Per questo motivo, è consigliabile disporre del giudizio di un esperto per valutare il grado di attacco quando il tenore di solfuro in un terreno supera lo 0,01%. In generale, si può dire che il livello della falda d’acqua è molto importante nel condizionare l’ossidazione della pirite e quindi il suo grado di attacco acido sotto forma di acido solforico secondo le reazioni [4] e [5] e di anidride carbonica secondo la reazione [6]. Se la pirite rimane sempre sotto il livello della falda d’acqua l’ossidazione non avviene, mentre laddove il livello della falda d’acqua varia considerevolmente l’ossidazione avviene molto rapidamente.

Lea (3) riporta i risultati di alcune prove di campo iniziate in Germania all’inizio del secolo su calcestruzzi a contatto di terreni paludosi ove, per la presenza di pirite, si formava acido solforico ed anidride carbonica. A causa di questo tipo di attacco la pasta di cemento veniva asportata e gli inerti venivano messi a nudo. L’attacco si dimostrava meno aggressivo nei confronti dei calcestruzzi ben compattati e densi per il basso rapporto acqua/cemento e l’elevato dosaggio di cemento, mentre il tipo di cemento (Portland, pozzolanico, d’altoforno) non modificava significativamente il risultato delle prove. Qualsiasi rivestimento protettivo – a base di asfalto, bitume, catrame o resina fenolformaldeide – risultava distrutto dopo circa 7 anni. E’ probabile che una resina epossidica, non impiegata in queste prove, avrebbe potuto garantire una più lunga protezione. In ogni caso, indipendentemente dal tipo di rivestimento, i risultati migliori si ottengono quando il calcestruzzo presenta un’elevata resistenza meccanica iniziale prima dell’attacco e quando è stato sottoposto ad un’accurata stagionatura.

### Attacco aggressivo delle acque di fognatura

I calcestruzzi, ed in particolare le tubazioni in calce-

struzzo, sono largamente impiegati nelle costruzioni per fogne. In generale il comportamento del calcestruzzo è soddisfacente; tuttavia, esistono delle condizioni nelle quali si verifica un severo attacco del materiale. Le aggressioni delle acque di fogna possono essere sostanzialmente di due tipi: il primo, dovuto alla presenza di sostanze acide scaricate dalla industrie, è riconducibile ad un basso pH dell'acqua; il secondo tipo di aggressione è invece causato dalla presenza di solfuri nelle acque di fogna. In questo caso il solfuro agisce attraverso la formazione di idrogeno solforato ( $H_2S$ ) il quale può dar luogo indirettamente ad un severo attacco del calcestruzzo. Esistono in letteratura numerosi lavori sull'argomento, tra i quali quelli citati nei riferimenti (4-7).

Attacchi di calcestruzzi da parte delle acque di fogna sono stati segnalati in numerose città tra le quali Il Cairo, Melbourne, Los Angeles ed altre città dell'India, della Germania e dell'Inghilterra.

L'idrogeno solforato – dal tipico odore di uova marce – non ha di per sé un'azione aggressiva nei confronti del calcestruzzo. Tuttavia, a contatto con l'aria si trasforma in acido solforico che è capace, invece, di attaccare severamente il conglomerato. In genere, l'attacco si manifesta solo nella parte più alta della fognatura che non si trova a contatto con l'acqua. Nella parte inferiore, che si trova sotto il livello dell'acqua, l'attacco non si manifesta. Così pure l'aggressione non avviene quando la tubazione è piena d'acqua. In sostanza perché si manifesti l'aggressione debbono verificarsi tre condizioni mostrate schematicamente in Fig. 7: **a)** produzione di idrogeno solforato nelle acque di fogna; **b)** possibilità per quest'ultimo di liberarsi dall'acqua per dirigersi verso la parte superiore; **c)** ossidazione, per la presenza di aria, dell'idrogeno solforato ad acido solforico.

**a)** La produzione di idrogeno solforato nelle acque di fogna è provocata dall'azione di **batteri anaerobici** sui prodotti organici contenenti zolfo, sui solfati o su altri componenti inorganici a base di zolfo. L'effetto dei batteri è partico-

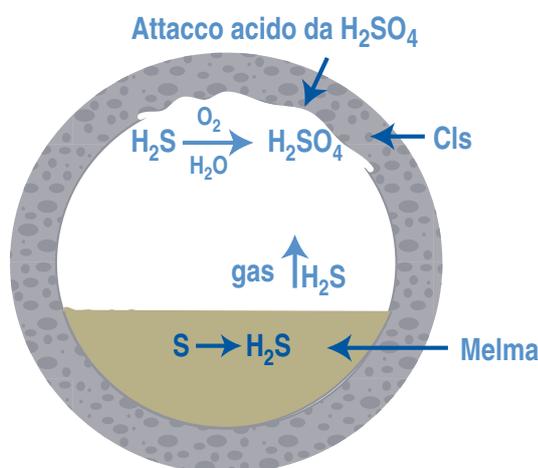


Fig. 7 - Schema di attacco acido del calcestruzzo nella volta della tubazione fognaria.

larmente efficace nella melma: così, per esempio, se l'idrogeno solforato si produce in un giorno nell'acqua, in presenza di melma occorrono solo poche ore perché esso si sviluppi. Anche la temperatura ed il pH influenzano la produzione di idrogeno solforato: l'azione dei batteri è praticamente annullata al di sotto di  $10^\circ C$ , mentre aumenta proporzionalmente con la temperatura fino a circa  $40^\circ C$ ; ciò spiega perché i maggiori problemi si siano verificati in città relativamente calde. Quando il pH è minore di 5 o maggiore di 10 la produzione di idrogeno solforato è praticamente annullata.

- b)** Lo sviluppo dell'idrogeno solforato gassoso dall'acqua verso l'aria soprastante è favorito dalla turbolenza dell'acqua e dalla lunghezza del cammino percorso.
- c)** L'ossidazione dell'idrogeno solforato liberato avviene grazie all'azione dei **batteri aerobici**. L'idrogeno solforato viene fissato dal film di umidità che bagna la volta della fognatura, dove è successivamente ossidato ad acido solforico in presenza dell'ossigeno dell'aria e dei batteri aerobici. Purtroppo, questi rimangono attivi anche nell'ambiente molto acido ( $pH = 1$ ) che viene immediatamente ad instaurarsi nella volta per la formazione di acido solforico. Inizialmente si forma una patina biancastra - dovuta alla formazione di solfato di calcio - e successivamente si ha un indebolimento della pasta cementizia che comincia a distaccarsi (Fig. 8). Segue, infine, la caduta degli inerti e ricomincia l'azione aggressiva sulla pasta di cemento sottostante. Quando si verificano le condizioni per l'aggressione, il calcestruzzo perde circa 5-10 mm di spessore per anno. Nel caso delle malte impiegate per il collegamento dei mattoni, si verifica un rigonfiamento della malta che può provocare la rottura dei laterizi.



Fig. 8 - Dilavamento superficiale del calcestruzzo esposto all'azione di acque di fogna.

I rimedi che possono essere adottati, per evitare l'aggressione del calcestruzzo da parte dell'idrogeno solforato contenuto nelle acque di fogna, possono essere rivolti a limitare o annullare la produzione di idrogeno solforato, la sua condensazione sulla volta, l'attacco chimico del

calcestruzzo da parte dell'acido solforico, cioè almeno una delle tre condizioni (*a*, *b*, *c*) sopra menzionate.

Per contrastare la produzione di idrogeno solforato si può, per esempio, trattare con cloro l'acqua di fogna. L'effetto non è tanto quello di uccidere microrganismi anaerobici, quanto quello di ossidare i solfuri a solfati in forma di sali che rimangono così nell'acqua senza liberarsi come idrogeno solforato gassoso. Anche l'iniezione di aria compressa nell'acqua di fogna favorisce il processo di ossidazione da solfuri a solfati. L'aggiunta di calce, in modo da innalzare il pH dell'acqua al di sopra di 10, è un altro utile rimedio per impedire la produzione di idrogeno solforato. Così anche le aggiunte di sali metallici capaci di formare solfuri insolubili (zinco, rame, ferro, ecc.) portano ad una riduzione dell'idrogeno solforato. L'aggiunta di sostanze tossiche per i batteri anaerobici è un altro rimedio applicabile, ma si presenta in genere piuttosto costosa. Rimane infine da segnalare la possibilità di rimuovere sistematicamente i fanghi dove l'azione dei batteri è particolarmente efficace per la produzione idrogeno solforato.

Per contrastare lo sviluppo di idrogeno solforato gassoso e la sua successiva condensazione sulla volta si può tentare di ridurre i punti di turbolenza e di asciugare – con ventilazione forzata – la volta della fognatura: in assenza del film di umidità che riveste la volta l'idrogeno solforato non viene condensato né i batteri aerobici sono in grado di proliferare.

Per limitare o annullare l'attacco chimico causato dall'acido solforico si può agire sulla composizione del calcestruzzo, ma soprattutto sulla natura del rivestimento. L'impiego di inerti calcarei in luogo di quelli silicei può allungare la vita di esercizio di una fognatura di 3-5 volte. Infatti, l'inerte calcareo, a differenza di quello siliceo, è attaccato e disciolto dall'acido solforico come la pasta di cemento. Pertanto, in un calcestruzzo con inerti calcarei l'aggressione procede più uniformemente e più lentamente perché una parte dell'acido solforico è neutralizzato dall'inerte. In un conglomerato con inerti silicei, invece, l'attacco dell'acido solforico si concentra esclusivamente sulla pasta di cemento e procede, quindi, più rapidamente. Gli inerti silicei, però, privati della pasta cementizia circostante tendono a distaccarsi dalla volta ed a cadere nell'acqua. L'impiego di cemento pozzolanico o d'altoforno in luogo del cemento Portland non modifica sostanzialmente il comportamento del calcestruzzo, mentre qualche miglioramento può essere ottenuto con il cemento sopra solfata e soprattutto con quello alluminoso (cementi, però, non previsti dalla normativa UNI EN 197 per la confezione di calcestruzzo ma solo per malte speciali). Un più basso rapporto acqua/cemento rende, ovviamente, il calcestruzzo più denso ed impermeabile e quindi più resistente all'attacco acido.

Tuttavia, se si vuole eliminare completamente l'aggressione del calcestruzzo, quando si verificano le summenzionate condizioni per l'attacco da idrogeno solforato,

è necessario applicare un rivestimento antiacido sul conglomerato. Questo può consistere di un rivestimento in polivinilcloruro o di una malta a base di resina epossidica o poliuretanic. Anche il trattamento con gas a base di tetrafluoruro di silicio ( $SiF_4$ ) secondo il *metodo Ocrat* si è rivelato molto efficace (8).

## BIBLIOGRAFIA

- (1) ACI Committee 201, "Guide to durable concrete", ACI Manual of Concrete Practice, pg. 201-1 ACI Publication, (1980);
- (2) M.Collepari, *Cement Concrete Composites*, 25, pg. 401, (2003);
- (3) F.M. Lea, *The Chemistry of Cement and Concrete*, pg. 646, Edward Arnold Publishers Ltd., London, (1970);
- (4) P.Pomeroy, F.D. Bonulus, *Sewage Works Journal*, 18, 597, (1946);
- (5) N.Strutterheim, "Corrosion of Concrete Sowers" South Africa Council for Scientific and Industrial Research, Series DR 12, (1959);
- (6) C.D. Parker, *Sewage Ind. Wastes*, 23, 447, (1951);
- (7) A.M.Douglas, *Municipal Engineering*, 91, 130, (1964);
- (8) H.Schremmer, *Zement-Kalk-Gips*, 17, 417, (1964).

**... se vuoi essere sempre  
aggiornato sulle novità...**



Enco Srl - Via delle Industrie 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV)  
Tel. 0422 96 37 71 - Fax 0422 96 32 37 - info@encosrl.it  
www.encosrl.it - www.encoshop.com

# LA FISICA DELL'ACQUA NELLE COSTRUZIONI



Mario Collepari

Enco srl, Ponzano Veneto (TV) - info@encosrl.it

## 1. PORO-MECCANICA

L'acqua, come tutti i composti chimici, è caratterizzata da una serie di proprietà fisiche, quali la tensione di vapore, la temperatura di solidificazione, quella di ebollizione, ecc..

I valori di queste proprietà possono cambiare in modo significativo se l'acqua, anziché essere contenuta in un comune recipiente di proporzioni relativamente grandi, viene a trovarsi all'interno di piccole cavità quali possono essere i pori presenti nei materiali da costruzione in calcestruzzo armato. La conseguenza più appariscente di questa variazione delle proprietà fisiche, nel passare da un comune recipiente ad un contenitore costituito da un solido poroso che presenta un sistema di pori di piccole dimensioni, è la risalita capillare dell'acqua all'interno del solido poroso, quale può essere considerata una muratura in pietra ed in calcestruzzo.

La ragione di questa variazione nelle proprietà dell'acqua risiede nel fatto che le sue molecole, allorché esse si trovano all'interno di un sistema di pori di piccole dimensioni, o tra due superfici di un solido molto vicine tra loro, risentono fortemente dell'attrazione esercitata dalle superfici del solido (1).

La scienza che studia questa particolare branca della termodinamica prende il nome di *poro-meccanica*. Per un approfondimento di questo argomento si può consultare un numero speciale della rivista *Materials and Structures* pubblicato nel 2004 dedicato integralmente alle applicazioni della poro-meccanica al comportamento dei materiali cementizi (2).

## 2. ADSORBIMENTO E ASSORBIMENTO DELL'ACQUA

Gli atomi o gli ioni situati sulla superficie di un solido si trovano in una situazione singolare rispetto a quelli situati internamente al solido. Si consideri, per esempio, una distribuzione di atomi eguali tra loro in un piano reticolare (Fig. 1). L'atomo situato sulla

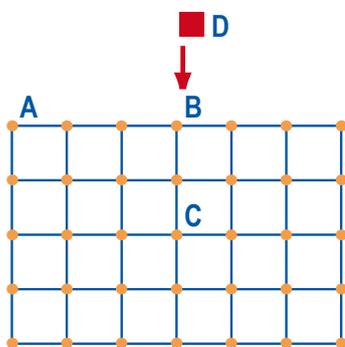


Fig. 1 – Rappresentazione schematica di un piano reticolare di atomi in un solido e di un atomo o molecola (D) allo stato di vapore che viene attratto dalla superficie del solido (adsorbimento).

superficie in *B*, ed ancor più quello allocato in *A*, non sono circondati dagli altri atomi dello stesso piano, come invece risultano essere tutti gli atomi “interni” come, per esempio, quello situato in *C*. In altre parole, gli atomi “superficiali”, come *A* e *B*, non risultano completamente “legati” con gli altri atomi. Essi si trovano, cioè, in una situazione energeticamente “inquietata” e tentano di raggiungere un equilibrio più soddisfacente legandosi anche ad atomi “estranei” quali quello situato in *D* che si trovano allo stato di vapore e pertanto presentano una certa mobilità. L'atomo (o la molecola) situato in *D* verrà pertanto attratto dagli atomi superficiali del solido, per esempio in *B*. Tale fenomeno prende il nome di **adsorbimento**.

Il fenomeno dell'adsorbimento consiste, quindi, in un'attrazione sulla superficie di un solido degli atomi o molecole che si trovano nello stato di vapore. Il termine “adsorbimento” va distinto da quello di “assorbimento” che riguarda, invece, la penetrazione di un liquido o di un vapore all'interno di un solido poroso o anche la dissoluzione di un gas in un liquido. In altre parole, l'adsorbimento è un fenomeno che riguarda solo la superficie di un solido, mentre l'assorbimento coinvolge, in modo più o meno uniforme, tutta la massa interna.

In generale si distinguono tre tipi di adsorbimento:

- *adsorbimento di Van Der Waals*: è il più generico, è dovuto a legami solido-vapore relativamente deboli, e si manifesta di solito alle basse temperature in prossimità delle temperature di condensazione del vapore;
- *adsorbimento chimico*: è dovuto a legami chimici veri e propri a causa dell'affinità di un determinato solido verso gli atomi o le molecole di un certo gas;
- *adsorbimento attivato*: è un particolare adsorbimento chimico che si manifesta solo a temperature molto alte necessarie per far avvenire una vera e propria reazione chimica tra il vapore e la superficie del solido; questo tipo di adsorbimento riguarda per lo più i fenomeni di catalisi superficiale ed è escluso dai fenomeni di interazione dell'acqua con i materiali delle murature in pietra o mattone e delle strutture in calcestruzzo.

Poiché l'adsorbimento è un fenomeno che avviene sulla superficie del solido adsorbente, ne deriva che minore è la dimensione delle particelle solide del materiale solido, cioè maggiore è la sua estensione superficiale<sup>1</sup>, maggiore risulterà la quantità di valore adsorbito per unità di peso di materiale adsorbente.

Nel caso dell'adsorbimento di acqua sulla superficie dei solidi, tipicamente presenti nelle murature e nelle strutture in calcestruzzo, si verifica quasi esclusivamente l'adsorbimento di Van Der Waals. Se la pressione del vapore acqueo a contatto con la superficie di un solido è molto bassa, le forze di attrazione della superficie del

<sup>1</sup> L'estensione superficiale viene misurata attraverso l'area superficiale specifica espressa come superficie ( $cm^2$  o  $m^2$ ) per unità di peso (in genere grammo o kg) o più raramente di volume (in genere  $cm^3$ ).

solido sono in grado di adsorbire un singolo strato di molecole di acqua (**strato mono-molecolare**). Se, però, la pressione del vapore ( $p$ ) è prossima alla pressione del vapore ( $p_0$ ) corrispondente alla condensazione del vapore per una determinata temperatura, allora lo spessore ( $t$ ) dello strato di molecole di acqua adsorbite cresce.

Per esempio, l'equazione [1] di Halsey correla lo spessore dello strato  $t$  (misurato in nm) di molecole adsorbite con il valore assoluto del logaritmo del rapporto  $p/p_0$ :

$$t = 0,43 \left( \frac{5}{|\ln p/p_0|} \right)^{1/3} \quad [1]$$

Maggiore è il rapporto  $p/p_0$ , maggiore è lo spessore dello strato di molecole adsorbite. Se si esprime lo spessore dello strato  $t$  in funzione dell'umidità relativa ( $UR = 100 p/p_0$ ) si ottengono i valori riportati nella Tabella 1.

**Tabella 1 – Spessore (t) in nm dello strato di acqua adsorbito sulla superficie di un solido in funzione dell'UR**

UR (%)	$p/p_0$	$t$ (nm)
5	0,05	0,51
20	0,20	0,63
30	0,30	0,70
40	0,40	0,76
50	0,50	0,83
60	0,60	0,92
70	0,70	1,04
80	0,80	1,21
90	0,90	1,56
100	1,00	$\infty$

### 3. CONDENSAZIONE CAPILLARE

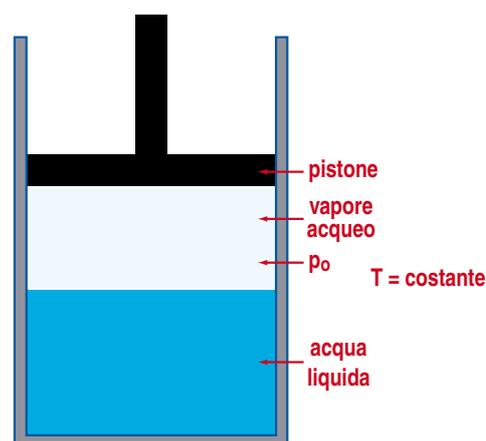
La pressione del vapore ( $p_0$ ) in equilibrio con l'acqua liquida ad una certa temperatura ( $T$ ) è denominata **tensione di vapore** (Fig. 2). Se il vapore si trova ad una pressione  $p < p_0$ , il liquido evapora finché  $p$  non raggiunge il valore di  $p_0$ .

Se, d'altra parte, si tenta di aumentare la pressione abbassando per esempio il pistone della Fig. 2, il vapore condensa, ma la pressione ( $p_0$ ) rimane costante. Solo quando tutto il vapore si è condensato nel liquido, l'abbassamento del pistone farà aumentare la pressione a valori di  $p > p_0$ .

Per ogni temperatura, esiste un valore di  $p_0$ , che rappresenta la massima pressione del vapore a quella temperatura. Per esempio, alla temperatura  $T_1$ , la tensione del vapore è  $p_{01}$  (punto B nella Fig. 3). Se la pressione, alla stessa temperatura  $T_1$ , cresce fino a portarsi in A il vapore scompare per condensazione nel liquido. Se invece la pressione, alla temperatura  $T_1$ , diminuisce fino a portarsi in C, allora il liquido scompare per evaporazione. Si definisce umidità relativa (UR) il rapporto percentuale tra la generica pressione  $p_1$  del vapore e la tensione di vapore  $p_{01}$  alla temperatura  $T_1$ :

$$UR = \frac{p_1}{p_{01}} \cdot 100 \quad [2]$$

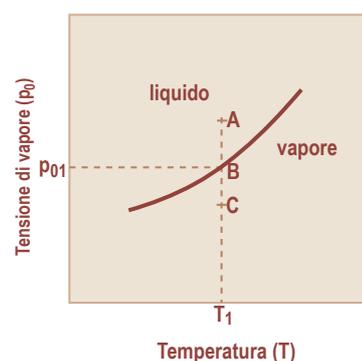
Tutta l'area al di sopra della curva della Fig. 3 rappresenta lo stato liquido, così come tutta l'area al di sotto della stessa curva rappresen-



**Fig. 2 – Equilibrio isoterma tra vapore e liquido: alla temperatura T l'acqua liquida è in equilibrio con il vapore alla pressione  $p_0$**

ta lo stato di vapore. I punti situati sulla curva della Fig. 3 rappresentano i valori di  $T$  e  $p_0$  in corrispondenza dei quali coesistono il liquido con il vapore.

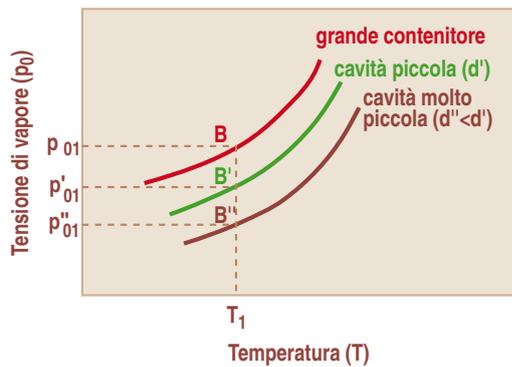
La curva della tensione di vapore dell'acqua riportata in Fig. 3 si riferisce all'equilibrio liquido-vapore quando l'acqua si trova in un grande contenitore. Se l'acqua si trova all'interno di cavità di piccolissima dimensione, quali i pori dei materiali di una struttura cementizia, la condensazione del vapore in acqua liquida ad una data temperatura si verifica ad una pressione  $p'_0$  minore di  $p_0$ , e  $p'_0$  è tanto minore di  $p_0$  quanto più piccola è la dimensione della cavità. In altre parole, in una cavità molto piccola la curva della tensione di vapore della Fig. 3 si abbassa, e l'abbassamento è tanto maggiore quanto minore è la dimensione della cavità (Fig. 4): ad una determinata temperatura  $T_1$ , la pressione del vapore in equilibrio con l'acqua liquida è  $p_{01}$  in una grande contenitore; essa diventa  $p'_{01}$  in una cavità di piccole dimensioni  $d'$ , e scende ad un valore ancora più basso  $p''_{01} < p'_{01}$  se la dimensione della cavità diminuisce ancora fino a  $d'' < d'$ .



**Fig. 3 – Equilibrio liquido-vapore**

Quando l'acqua si trova all'interno di piccole cavità, essa risente fortemente della presenza delle superfici del solido e quindi la tensione del vapore (che rappresenta, ad una determinata temperatura, la tendenza ad evaporare) diminuisce per effetto dell'attrazione esercitata dalle superfici solide sulle molecole di acqua. Più vicine sono tra loro le superfici solide, più piccola cioè è la dimensione della cavità, minore diventa la tensione di vapore dell'acqua.

Kelvin (1, 2) ha calcolato quale diventa la tensione di vapore  $p$  all'interno di un poro capillare, supposto di sezione cilindrica,



**Fig. 4 – Equilibrio liquido-vapore in un grande contenitore e in cavità di piccole dimensioni d' e d''**

avente raggio  $r_c$  attraverso l'equazione [3] nota come equazione di Kelvin:

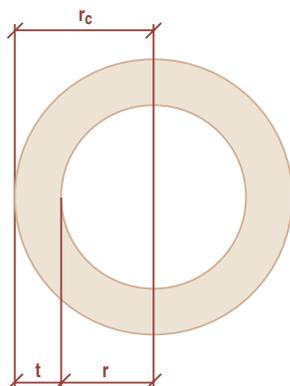
$$r_c = \left( \frac{2\sigma V}{RT} \left| \ln \frac{p}{p_0} \right| \right) \cos \Theta \quad [3]$$

dove  $p_0$  è la tensione di vapore “convenzionale” in un grande contenitore alla temperatura assoluta  $T$  (in °K),  $R$  è la cosiddetta costante universale dei gas ( $8.3 \text{ joule} \cdot \text{mole}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $\sigma$  è la tensione superficiale dell'acqua ( $72 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $V$  è il volume molare dell'acqua ( $18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mole}$ ),  $\theta$  è l'angolo di contatto tra l'acqua e la superficie del solido all'interno della cavità.

Il significato dell'equazione di Kelvin è il seguente: in un solido micro-poroso avente pori capillari di raggio variabile, il vapore condenserà alla pressione  $p$  (minore di quella “convenzionale”  $p_0$ ) in tutti i pori di raggio inferiore ad  $r_c$  correlato con il rapporto  $p/p_0$  attraverso l'equazione [3]. Oppure: aumentando continuamente la pressione del vapore da zero fino al valore di  $p$ , la condensazione capillare all'interno di un solido micro-poroso coinvolgerà progressivamente tutti i pori più piccoli di quello avente raggio  $r_c$ .

#### 4. CONDENSAZIONE CAPILLARE ED ADSORBIMENTO

Nell'equazione di Kelvin non si tiene conto che, ad un certo valore di  $p/p_0$ , il raggio effettivo del poro ( $r_c$ ) è diminuito in quanto, per effetto dell'adsorbimento del vapore acqueo, si è depositato uno strato di molecole di acqua dello spessore ( $t$ ) calcolabile con l'equazione [1] di Halsey (Fig. 5).



**Fig. 5 – Sezione di un poro di raggio  $r_c$  all'interno del quale si è depositato uno strato ( $t$ ) di acqua adsorbito che riduce il volume del poro corrispondente al raggio  $r < r_c$**

Pertanto apportando questa correzione, cioè sottraendo  $t$  ad  $r_c$ ,

l'equazione di Kelvin diventa la [4], nota con il nome di equazione di Kelvin modificata da Wheeler:

$$r = r_c - t = \left( \frac{2\sigma V}{RT} \left| \ln \frac{p}{p_0} \right| \right) \cos \Theta \quad [4]$$

Se il valore di  $t$  nella [4] è espresso attraverso la [1], l'equazione di Kelvin modificata da Wheeler diventa:

$$r_c = \left( 0,43 \frac{5}{RT} \left| \ln \frac{p}{p_0} \right| \right)^{1/3} + \left( \frac{2\sigma V}{RT} \left| \ln \frac{p}{p_0} \right| \right) \cos \Theta \quad [5]$$

Tenendo conto che l'UR vale 100 ( $p/p_0$ ), secondo l'equazione [2], assumendo un angolo di contatto  $\theta = 0^{92}$  e quindi  $\cos \theta = 1$  si può calcolare quale è il raggio ( $r_c$ ) al di sotto del quale avviene la condensazione capillare nei pori di un solido poroso. Nella Tabella 2 sono mostrati i risultati di questo calcolo alla temperatura ( $T$ ) di 20°C equivalente a 293°K. La Tabella 2 indica, per esempio, che nei pori capillari con raggio inferiore ad  $r_c = 2,37 \text{ nm}$  il vapore si condensa anche se l'UR è solo del 50%, mentre invece nei pori con raggio di 140 nm pari a  $0,14 \mu\text{m}$  la condensazione avviene con UR del 99%.

**Tabella 2 - Raggio dei pori capillari ( $r_c$ ) al di sotto dei quali avviene la condensazione del vapore per una data UR**

UR (%)	$r$ (nm)	$t$ (nm)	$r_c$ (nm)
5	0,36	0,51	0,87
10	0,46	0,56	1,02
20	0,66	0,63	1,29
30	0,89	0,70	1,58
40	1,16	0,76	1,92
50	1,54	0,83	2,37
60	2,09	0,92	3,01
70	2,99	1,04	4,03
80	4,78	1,21	5,99
90	10,12	1,56	11,68
95	20,78	1,98	22,76
99	106,04	34,07	140,11
100	$\infty$	$\infty$	$\infty$

#### 5. FORMAZIONE DEL GHIACCIO NEI MATERIALI DA COSTRUZIONE ESPOSTI ALL'ACQUA AMBIENTALE

Quando l'acqua solidifica, il suo volume aumenta del 9% e, essa riempie completamente una cavità di un solido poroso, l'incremento di volume che accompagna la formazione di ghiaccio provoca un aumento di pressione che può arrivare alla distruzione del materiale, soprattutto se il fenomeno del gelo si alterna ripetutamente a quello del disgelo.

L'abbassamento della temperatura al di sotto del punto di gelo è condizione necessaria ma non sufficiente affinché si esplichino l'azione distruttiva in un solido poroso. Infatti, un materiale poroso completamente privo di umidità non subirà ovviamente, alcun danno dall'alternarsi della temperatura intorno al punto di gelo dell'acqua.

<sup>2</sup> Cioè l'acqua bagna “completamente” il materiale da costruzione, pietra, mattone, malta, calcestruzzo.

Quale è, allora, il contenuto di umidità all'interno di un materiale poroso al di sopra del quale la formazione di ghiaccio diventa deleteria? Quale è, cioè, il grado di saturazione<sup>3</sup> critico di un materiale poroso, al di sopra del quale l'aumento di volume dell'acqua che accompagna la formazione del ghiaccio (pari al 9% di quello iniziale), può provocare la distruzione del materiale? Se si indica con  $v$  il grado di saturazione critico, esso può essere individuato con l'equazione [6]:

$$v + 0,09 \cdot v = 100 \Rightarrow v = 100/1,09 = 91,7 \quad [6]$$

In altre parole, se l'acqua riempie più del 91,7% del volume dei pori, la completa formazione del ghiaccio comporta un volume finale dell'acqua maggiore del volume dei pori: conseguentemente all'interno dei pori vengono indotte delle tensioni che possono arrivare alla rottura del materiale qualora la resistenza a trazione del materiale stesso risulti inferiore alla tensione insorta.

D'altra parte, se il volume di acqua all'interno del materiale è inferiore al 91,7%, la completa formazione di ghiaccio non arriva a far riempire le cavità e pertanto non si generano tensioni.

In realtà, sono stati registrati casi di rottura di materiali porosi anche se l'acqua in essi contenuta era mediamente anche di molto inferiore al 91,7%: la ragione di questo comportamento, apparentemente contraddittorio, è semplicemente dovuta al fatto che l'umidità nei solidi porosi può essere distribuita in modo eterogeneo, e pertanto un grado di saturazione mediamente inferiore al 91,7% non necessariamente significa che in tutte le zone esiste effettivamente lo stesso contenuto di umidità. Infatti, non si può escludere che in alcune zone il contenuto di umidità possa essere anche superiore al 91,7%, provocando così localmente una formazione di ghiaccio distruttiva per il materiale.

Per contro, si sono anche registrati fenomeni di non distruzione del materiale sebbene il grado di saturazione critico fosse uniforme e superiore al 91,7%: nel caso di un materiale meccanicamente molto resistente e poco poroso (per esempio con una porosità inferiore allo 0,5%, come si può verificare in alcune pietre compatte) anche un grado di saturazione superiore a quello critico può non essere sufficiente a distruggere il materiale; infatti, anche se i pochi pori infatti sono pieni di acqua, la formazione di ghiaccio, e la conseguente sollecitazione, può arrivare al massimo a deformare elasticamente il materiale senza però arrivare a provocarne la rottura.

Come si vede, quindi, il degrado connesso alla formazione di ghiaccio in solidi porosi non è un fenomeno facilmente inquadrabile in base alla misura del grado di saturazione determinato su un numero relativamente modesto di provini prelevati da un materiale così eterogeneo come quello presente nelle strutture in calcestruzzo.

## 6. TEORIA DELLA PRESSIONE IDRAULICA

A complicare ulteriormente il fenomeno del degrado legato alla solidificazione dell'acqua nelle strutture in calcestruzzo contribuisce anche il fatto che la cristallizzazione del ghiaccio non è ovviamente un fenomeno istantaneo: esso si verifica in realtà gradualmente e con una velocità tanto minore quanto più bassa è la velocità di raffreddamento.

Il fatto che i cristalli di ghiaccio si formino mentre ancora coesiste una parte di acqua liquida, comporta che l'aumento di volume provocato dalla formazione dei primi cristalli comprime l'acqua non ancora solidificata spingendola attraverso i canali di pori verso vie d'uscita o cavità vuote. La pressione idraulica (3,4) che così si genera in prossimità dei primi germi cristallini di ghiaccio, è tanto maggiore quanto più difficile è la fuoriuscita dell'acqua liquida non

ancora solidificata. Pertanto la probabilità che la pressione idraulica arrivi ad assumere valori così elevati da provocare la rottura del materiale solido poroso dipende, oltre che dalla resistenza a trazione del materiale stesso, anche da quei parametri che influenzano l'entità della pressione idraulica secondo la nota legge di Darcy sintetizzabile con l'equazione [7] illustrata nelle Fig. 6:

$$dV/(dt) = K \cdot A \cdot \Delta P/L \quad [7]$$

dove  $\Delta P$  è la differenza tra la pressione idraulica che si genera dove si forma il ghiaccio ( $P_1$ ) e quella atmosferica ( $P_2$ );  $L$  è il cammino che l'acqua non ancora solidificata deve percorrere fino a fuoriuscire o trovare una cavità vuota che si trova alla pressione atmosferica;  $A$  è la sezione dei pori attraverso cui l'acqua liquida viene spinta;  $dV/dt$  è il flusso dell'acqua che coincide con l'aumento di volume nel tempo determinato dalla formazione di ghiaccio, che a sua volta dipende dalla velocità con cui il ghiaccio si forma e quindi dipende dalla velocità di abbassamento della temperatura ambientale al di sotto di 0°C;  $K$ , infine, è il cosiddetto coefficiente di permeabilità che, a sua volta, dipende non tanto e non solo dalla porosità totale del materiale solido, quanto invece dalla distribuzione dimensionale dei pori: infatti, a parità di volume, un fascio di molti pori di piccola dimensione fa fluire l'acqua più lentamente che non un unico grande poro. Ciò dipende dal fatto che l'attrito che si genera tra l'acqua liquida sospinta dalla formazione del ghiaccio, e la superficie interna dei pori, aumenta all'aumentare della superficie stessa e quindi, a parità di volume, al diminuire della dimensione dei pori.

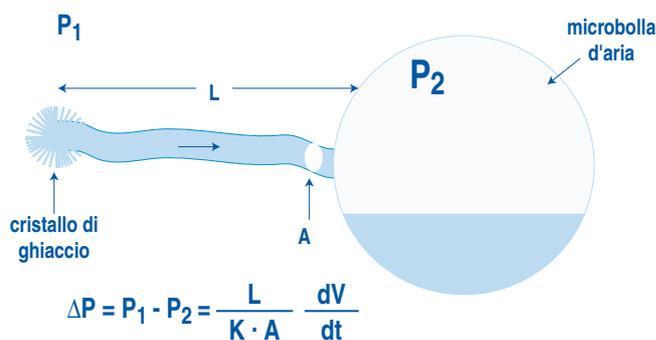


Fig. 6 – Flusso d'acqua liquida sospinta da dove si forma il ghiaccio verso la microbolla attraverso il poro capillare di sezione A.

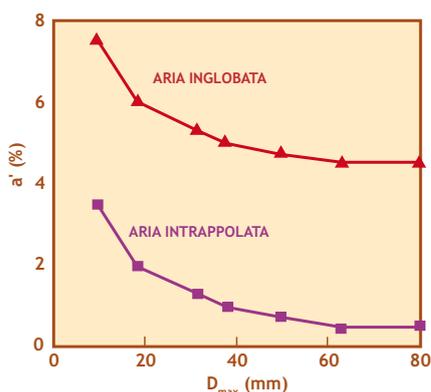
Alcune conseguenze che derivano dalla teoria della pressione idraulica sono:

- la formazione di ghiaccio provoca tanto più facilmente il degrado del materiale, quanto più rapido è l'abbassamento di temperatura al di sotto di zero: un raffreddamento molto lento di un solido poroso pieno di acqua può addirittura arrivare al miglioramento delle proprietà meccaniche del solido in quanto si verifica un riempimento consolidante del materiale poroso senza che ciò sia accompagnato dall'insorgere di una significativa pressione idraulica a causa del lento incremento di volume dell'acqua nel tempo ( $dV/dt$ );
- il degrado connesso con il fenomeno della formazione di ghiaccio dipende anche dalla dimensione degli elementi che compongono un materiale: per esempio, gli aggregati lapidei presentano una probabilità di degrado tanto maggiore quanto maggiore è la loro dimensione, perché con questa aumenta anche il cammino  $L$  che l'acqua non ancora congelata deve percorrere per trovare una via di uscita o una cavità vuota presente nella matrice cementizia;
- il degrado provocato dalla formazione di ghiaccio in una strut-

<sup>3</sup> si definisce grado di saturazione la percentuale del volume di acqua presente nelle cavità di un solido poroso rispetto al volume totale dei pori.

tura esposta alla pioggia e successivamente al congelamento, è maggiore nei materiali porosi ricchi di pori aventi dimensioni comprese generalmente tra 3 e 5 µm: infatti, i pori di dimensione più piccola di 3 µm presentano una maggiore difficoltà nel riempirsi di acqua<sup>4</sup>, mentre i pori molto più grandi di 5 µm si riempiono più facilmente d'acqua durante la pioggia, ma consentono un rapido drenaggio allorché il ghiaccio comincia a formarsi e quindi a spingere l'acqua non ancora solidificata verso vie d'uscita o cavità vuote;

- la presenza di cavità vuote, per esempio micro-bolle d'aria di 100 – 300 µm, all'interno di un materiale attraversato da una rete di pori capillari (0,1 – 10 µm), è estremamente benefica nel buon comportamento del materiale nei confronti della formazione del ghiaccio: infatti queste micro-bolle fungono da “vasi di espansione” capaci di ospitare l'acqua liquida sospinta dalla formazione di ghiaccio: cioè consentono di allentare la tensione generata dalla pressione idraulica, riducendo il cammino  $L$  che l'acqua deve percorrere per trovare una via d'uscita o una bolla d'aria a pressione atmosferica (Fig. 6);
- perché il calcestruzzo risulti resistente ai cicli di gelo-disgelo, il volume di aria inglobata deve essere tanto maggiore quanto minore è il diametro massimo ( $D_{max}$ ) dell'inerte (Fig. 7). Per esempio, in un calcestruzzo con il diametro massimo di 32 mm occorre almeno 5% in volume di aria inglobata per produrre un calcestruzzo resistente ai cicli di gelo-disgelo; se si dimezza la dimensione del diametro massimo dell'inerte, il volume di aria inglobata deve essere almeno 6,5 %.



**Fig. 7 – Influenza del diametro massimo dell'inerte ( $D_{max}$ ) sul volume di aria che rimane intrappolata nel calcestruzzo ordinario dopo compattazione a rifiuto e sul volume di aria inglobata in un calcestruzzo trattato con additivo aerante per resistere alla formazione del ghiaccio.**

## 7. SOLIDIFICAZIONE DELL'ACQUA NEI PORI DELLE COSTRUZIONI IN ASSENZA DI PIOGGIA O DI ACQUA AMBIENTALE

Ci si potrebbe chiedere quale è il comportamento dell'umidità nelle strutture in calcestruzzo in condizioni meteorologiche non piovose ed in ambienti privi di acqua liquida. Anche in queste condizioni relativamente favorevoli, come si dimostrerà, l'umidità può dar luogo alla formazione del ghiaccio se la temperatura si abbassa al di sotto di un certo valore.

<sup>4</sup> Tuttavia, i pori di dimensione minore di 3 µm presentano il fenomeno della condensazione capillare e della risalita capillare tanto più, quanto minore è la loro dimensione: pertanto questi micropori possono riempirsi d'acqua e diventare centri di formazione di ghiaccio anche in assenza di acqua liquida proveniente dall'ambiente (§7).

Si è già visto (§ 3 e 4), infatti, che l'acqua nei pori di piccolissime dimensioni (meno di 30 nm) presenta un comportamento singolare: in particolare, in un solido micro-poroso, l'umidità relativa  $UR$  in corrispondenza della quale avviene la condensazione del vapore acqueo non è del 100% (come si verifica usualmente per l'acqua situata in contenitori di dimensioni “normali”), ma è tanto minore quanto più piccola è la dimensione dei pori in accordo all'equazione [8] di Kelvin-Wheler ricavata dalla [4]:

$$\ln p/p_0 = \frac{RT}{2\sigma V \cos \Theta} (r_c - t) \quad [8]$$

In un poro di raggio  $r_c$  di 23 nm, ammettendo che l'angolo di contatto  $\theta$  sia zero gradi ed il  $\cos \theta = 1$ , il valore di  $UR = p/p_0 \cdot 100$  per il quale si verifica la formazione di acqua liquida è del 95% (Tabella 2): ciò significa che, pur in assenza di pioggia o comunque di acqua liquida nell'ambiente ma con  $UR$  del 95%, il vapore condenserà all'interno della struttura in tutti i pori di raggio inferiore a 23 nm. Ne consegue che l'acqua condensata capillarmente secondo l'equazione [8] di Kelvin-Wheler può dar luogo alla formazione di ghiaccio qualora l'abbassamento di temperatura arrivi ad un valore tale da far solidificare l'acqua.

Tuttavia il comportamento singolare dell'acqua all'interno dei sistemi micro-porosi non si esaurisce nella condensazione del vapore, ma si esplica anche nella formazione di ghiaccio: in altre parole, le molecole di acqua liquida cristallizzano a 0°C in un contenitore di grandi dimensioni; ma a temperature più basse se l'acqua si trova all'interno di un solido micro-poroso, e cioè tra le superfici molto vicine tra loro di un solido, l'abbassamento della temperatura di solidificazione ( $\Delta T$ ) è tanto maggiore quanto più vicine sono tra loro le superfici o quanto più piccolo è il raggio del micro-poro. La causa di questo singolare comportamento risiede di nuovo nella influenza delle superfici del solido, entro i cui pori sono allocate le molecole di acqua, sulla distribuzione ordinata che debbono assumere le molecole di acqua per formare i cristalli di ghiaccio: quanto più piccola è la dimensione della cavità entro cui l'acqua liquida è contenuta, tanto più difficile risulterà la formazione dei cristalli di ghiaccio.

Kubelka (4) ha calcolato, attraverso l'equazione [9] di quanto si abbassa la temperatura ( $\Delta T$ ) rispetto a 0°C in funzione della dimensione del raggio del poro:

$$\Delta T = 2 \cdot T \cdot V \cdot \sigma / (q \cdot r_c) \quad [9]$$

dove  $q$  è il calore latente molare di fusione del ghiaccio (6 KJ/mole), e  $T$  è la temperatura in °K (273°C) corrispondente al punto di gelo dell'acqua normale. Applicando l'equazione di Kubelka si può calcolare (Tabella 3) la temperatura alla quale si formano i cristalli di ghiaccio man mano che si riduce il raggio  $r_c$  dei pori capillari.

L'esame della Tabella 3, congiuntamente con quello della Tabella 2, indica quali sono i pori dove più probabilmente può congelare l'acqua liquida formatasi per condensazione capillare: in base alla Tabella 2, per esempio nei pori di raggio inferiore a 4 nm la condensa dell'umidità all'interno delle murature può avvenire anche in ambienti relativamente asciutti ( $UR = 70\%$ ); tuttavia, secondo la Tabella 3, la temperatura ambientale che occorre raggiungere per la formazione del ghiaccio, in pori con raggio minore di 4 nm, è molto bassa (-30°C) e può riguardare solo climi straordinariamente freddi; d'altra parte nei pori con raggio superiore a 100 nm, la formazione di ghiaccio avviene anche con raffreddamenti di solo -1°C, ma la condensazione del vapore in questi pori può avvenire solo in ambienti molto umidi ( $UR \approx 95\%$ ) e quindi in condizioni molto prossime alla precipitazione della pioggia: in tal caso il fenomeno della formazione di ghiaccio cessa di riguardare la cristallizzazione di acqua condensata capillarmente all'interno di strutture non esposte alle piogge o comunque in ambienti privi di acqua.

**Tabella 3 - Influenza del raggio dei pori ( $r_c$ ) in nm sull'abbassamento del punto di gelo dell'acqua liquida in un solido poroso**

$\Delta T$ (°C)	$r_c$ (nm)
- 0,1	1000
- 1	100
- 2	60
- 6	20
- 8	15
- 12	10
- 20	6
- 30	4
- 60	2
- 118	1

In sostanza, anche in ambienti relativamente asciutti, per effetto della porosità capillare le strutture in calcestruzzo possono dar luogo alla formazione di acqua liquida che successivamente, sia pure con difficoltà, può congelare; l'intervallo dimensionale dei pori maggiormente coinvolto in questo processo è di 10 – 20 nm. Infatti, nei pori di raggio inferiore a 10 nm occorrono climi straordinariamente freddi per la cristallizzazione dell'acqua ( $T < -12^\circ\text{C}$  secondo la Tabella 3); d'altra parte, al di sopra dei 20 nm occorrono climi straordinariamente umidi ( $UR$  95%) per la condensazione capillare del vapore. Va inoltre tenuto presente che il congelamento dell'acqua in questo intervallo dimensionale dei pori, ancorché poco frequente per la richiesta di diversi fattori coincidenti, è estremamente pericolosa, giacché è molto difficile per l'acqua non ancora congelata fuoriuscire o trovare una cavità vuota attraverso pori così piccoli (10 – 20 nm), cosicché la pressione idraulica che si genera in prossimità dei primi germi cristallini può raggiungere facilmente valori talmente elevati da distruggere il materiale poroso.

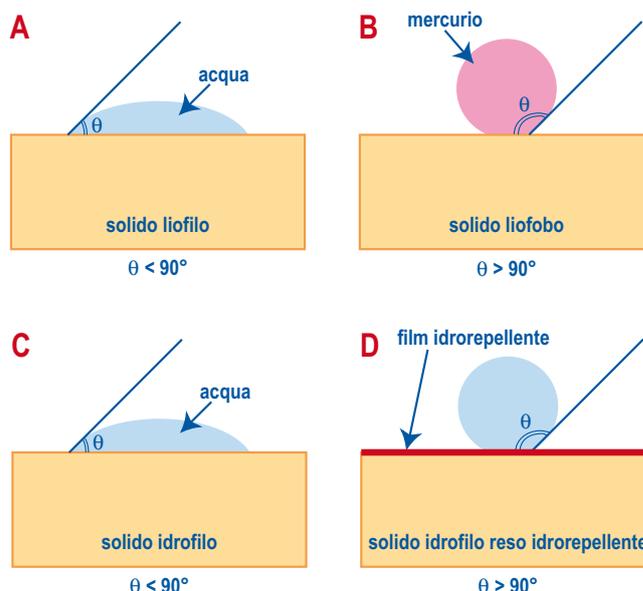
### 8. RISALITA CAPILLARE DELL'ACQUA NEI SOLIDI POROSI

Un solido nei confronti di un liquido può presentare due diversi tipi di comportamento: esso può essere *liofilo* (affine al liquido) o *liofobo* (nemico del liquido): nel caso in cui il liquido sia, in particolare, l'acqua i due termini diventano rispettivamente *idrofilo* o *idrofobo*.

Se si considera una superficie piana di solido come un mattone, una pietra, una malta o un calcestruzzo, a contatto con una goccia di un liquido come l'acqua, per la quale mostra un comportamento di idrofilia, l'angolo di contatto  $\theta$  risulterà minore di  $90^\circ$ , in quanto la goccia di acqua, per la sua affinità con il solido, tenderà a "schiacciarsi" sulla superficie per estendere al massimo il contatto con il solido (Fig. 8 A).

Se invece dell'acqua, il solido è posto in contatto con il mercurio, per il quale mostra un comportamento di liofobia, l'angolo di contatto  $\theta$  risulterà maggiore di  $90^\circ$ , in quanto la goccia di mercurio tende ad assumere una forma pressoché sferica per minimizzare il contatto con la superficie del solido (Fig. 8 B).

Vale la pena subito di precisare che il comportamento idrofilo di un solido può trasformarsi in idrofobo se la superficie del solido viene trattata con uno strato di prodotti che presenta una repulsione per l'acqua: i silani, gli stearati, i grassi, ecc. sono tipici prodotti da impiegare per rendere idrorepellente la superficie di un solido che



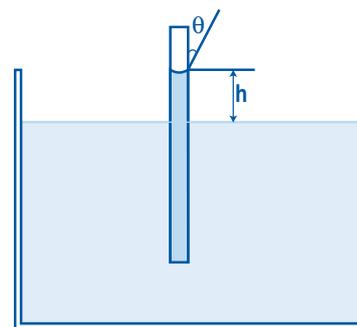
**Fig. 8 – Comportamento di un solido (per es. calcestruzzo) nei confronti dell'acqua (A), del mercurio (B) prima (C) e dopo (D) l'applicazione di un film di prodotto idrorepellente.**

di per sé sarebbe idrofilo: in tal caso l'angolo di contatto  $\theta$ , minore di  $90^\circ$  per una superficie di un solido idrofilo (Fig. 8 C), diventa maggiore di  $90^\circ$  per la superficie dello stesso solido rivestita con una pellicola di prodotto idrorepellente (Fig. 8 D).

Una conseguenza della diversa affinità di un solido per un liquido, e viceversa, consiste nel fenomeno della risalita capillare. Un liquido, che mostri affinità per le pareti interne di un tubo immerso in una vaschetta contenente il liquido stesso (come l'acqua per i pori capillari degli usuali materiali da costruzione in una armatura), risale spontaneamente all'interno del tubo (Fig. 9). E' come se esso fosse spinto da una pressione ( $P$ ) così calcolabile mediante l'equazione [10] di Washburn:

$$P = (2\sigma/r_c) \cdot \cos \theta \quad [10]$$

dove  $\sigma$  è la tensione superficiale del liquido,  $r_c$  è il raggio del tubo capillare e  $\theta$  è l'angolo di contatto.



**Fig. 9 – Risalita capillare "spontanea": si noti la concavità del menisco del liquido dentro il tubo.**

Nel caso di solidi idrofili, cioè con  $\theta$  minore di  $90^\circ$ , il  $\cos \theta$  è maggiore di zero e la pressione  $P$  risulta positiva: è come se la pressione capillare spingesse "spontaneamente" il liquido all'interno del tubo.

La pressione  $P$  che fa risalire il liquido all'interno del tubo è

tanto maggiore quanto minore è  $r_c$  (cioè quanto più piccola è la dimensione del tubo) e quanto minore è  $\theta$  (cioè quanto maggiore è l'affinità del liquido per la superficie interna del tubo). La risalita del liquido all'interno del tubo avviene finché, raggiunta un'altezza  $h$ , si stabilisce un equilibrio, espresso attraverso la equazione [11], tra la pressione capillare ( $P$ ) che "spinge" in su e la pressione idrostatica ( $m \cdot g \cdot h$ ) che "spinge" in giù:

$$m \cdot g \cdot h = (2\sigma/r_c) \cdot \cos \theta \quad [11]$$

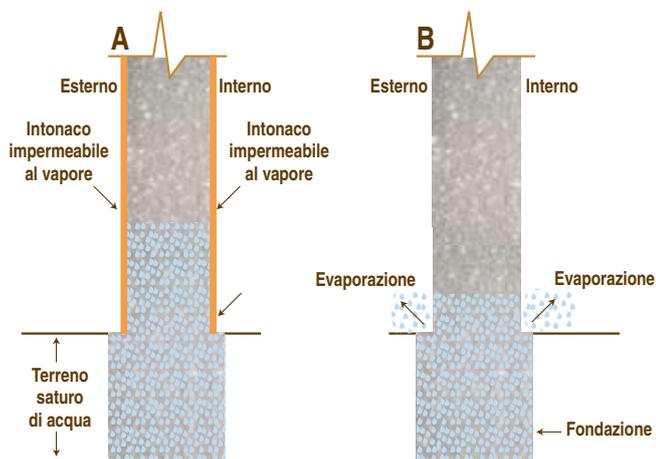
dove  $m$  è la massa volumica del liquido e  $g$  è l'accelerazione di gravità.

Nel caso di liquidi, come il mercurio, per il quale un solido non presenta affinità,  $\theta$  risulta maggiore di  $90^\circ$  e pertanto  $\cos \theta$  risulta negativo. Ne deriva che anche il valore di  $P$  risulta negativo: ciò significa in pratica, che il mercurio non risalirà "spontaneamente" all'interno del tubo, ma sarà necessario applicare una pressione  $P$  sul mercurio per vincere la repulsione del mercurio nei confronti delle superfici interne del tubo (*liofobia*). La pressione da applicare sarà in tal caso tanto maggiore quanto minore è il raggio del capillare e questo principio viene sfruttato nella porosimetria a mercurio per calcolare il raggio un poro attraverso la misura  $P$  che occorre per forzare il mercurio in un solido poroso.

## 9. RISALITA DELL'ACQUA NELLE MURATURE DALLA FONDAZIONE

La risalita capillare "spontanea" da parte dell'acqua all'interno di un materiale poroso (idrofilo) si verifica nelle murature allorché queste insistono su una fondazione umida. E' evidente, almeno in teoria, che la risalita capillare porterà, secondo la [11], l'umidità ad altezze ( $h$ ) tanto maggiori quanto minore è la dimensione dei pori presenti all'interno dei materiali.

In effetti la risalita capillare ( $h$ ) non raggiungerà mai i valori teorici previsti dall'equazione [11] in quanto una parte dell'acqua che risale può evaporare, a meno che la muratura non sia rivestita da entrambi i lati da un rivestimento superficiale impermeabile (Fig. 10).



**Fig. 10 – Risalita capillare dalla fondazione lungo la muratura: in una muratura con rivestimenti impermeabili (A) ed in una muratura priva di rivestimenti e dove può avvenire l'evaporazione nei periodi di clima asciutto (B).**

La conseguenza pratica della risalita capillare dell'umidità all'interno delle murature sono molteplici e tutte negative. Innanzi tutto si registra uno scadente *comfort* interno laddove l'umidità evapora verso gli interni degli edifici (Fig. 10B). In secondo luogo

l'acqua presente nelle murature può congelare d'inverno ed innescare un degrado del materiale in conseguenza della formazione ciclica e distruttiva del ghiaccio. Infine, se l'acqua contiene sali idrosolubili, si possono innescare fenomeni di cristallizzazione salina discussi nel §11.

## 10. EQUILIBRIO IGROMETRICO FONDAZIONE-MURATURA-AMBIENTE

La massima risalita ( $h$ ) di acqua per capillarità è ricavabile dalla equazione [11] che nella forma dell'equazione [12] è nota come legge di Jurin:

$$h = 2 \sigma \cdot \cos \theta / (r_c \cdot m \cdot g) \quad [12]$$

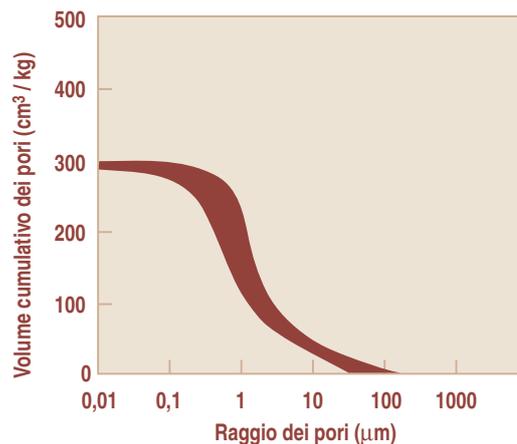
dove  $m$ , la massa volumica dell'acqua, è  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  vale  $9,81 \text{ ms}^{-2}$ , e  $\sigma$  è la tensione superficiale ed è uguale a  $72 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ . Per  $\theta = 0$  si ottiene:

$$h = 14,7 \cdot 10^{-6} / r_c \quad [13]$$

In base all'equazione [13] si deduce che in un materiale poroso costituito solo da pori con raggio capillare  $r_c$  di  $1 \mu\text{m} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  l'altezza di risalita dell'umidità dovrebbe arrivare al massimo a circa 15 m:

$$h = 14,7 \cdot 10^{-6} / 1 \cdot 10^{-6} = 14,7 \text{ m}$$

La porosità capillare di molti materiali che si trovano nelle varie costruzioni presenta una distribuzione dimensionale dei pori compresi tra 0,1 e  $10 \mu\text{m}$  (Fig. 11), e pertanto per risalita capillare l'acqua potrebbe teoricamente raggiungere un'altezza nella muratura anche oltre 15 m.



**Fig. 11 – Tipiche distribuzioni dimensionali dei pori per alcuni materiali da costruzione nelle murature.**

In effetti anche in murature costantemente insistenti su un sottofondo bagnato, difficilmente si registrano risalite capillari oltre i 2-3 m. La ragione di questa discrepanza tra teoria e realtà sta nel fatto che accanto al fenomeno della risalita capillare, coesiste, come già si è detto (Fig. 10B), quello dell'evaporazione. Inoltre la risalita capillare richiede del tempo (Fig. 12): inizialmente essa procede con una velocità lineare di circa 2 cm/ora, successivamente la cinetica di risalita è molto più lenta. Tuttavia l'aspetto cinetico del fenomeno è praticamente annullato, dopo qualche anno, laddove, le murature insistono su fondazioni che sono perennemente immerse in acqua; esso deve essere, invece, preso in considerazione laddove la bagnatura delle fondazioni è discontinua o addirittura occasionale.

Ritornando all'influenza dell'evaporazione dell'acqua (dalla parete esposta all'aria) sul contenuto residuo di umidità risalita per capillarità nella muratura, la Fig. 13 illustra quale è un tipico

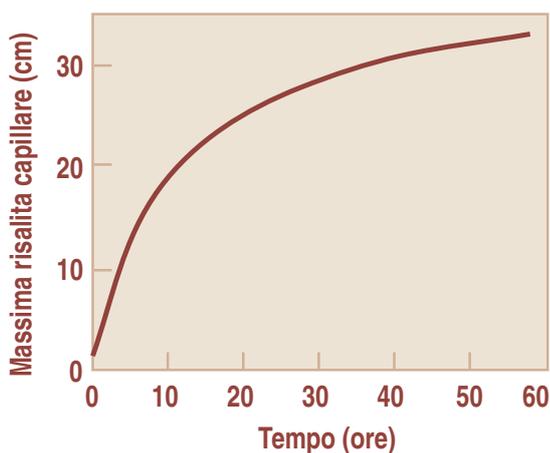


Fig. 12 – Cinetica della risalita capillare dell'acqua in una muratura.

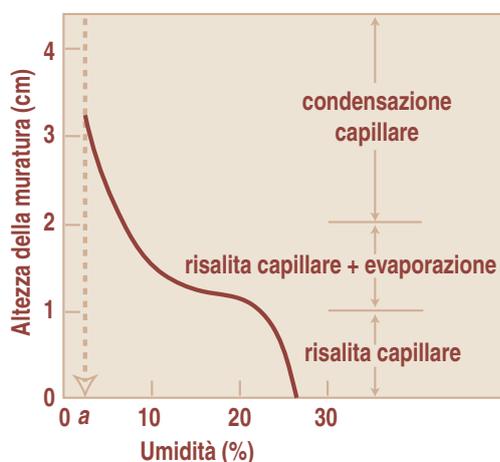


Fig. 13 – Umidità della muratura in funzione della sua altezza.

diagramma altezza-umidità in una muratura in cui coesistono la risalita capillare della fondazione e l'evaporazione dell'acqua dalla parete. Si osserva che il contenuto di acqua può raggiungere valori del 20-30% nelle zone basse della muratura fino a circa 1m. Per altezze superiori, l'evaporazione dell'acqua annulla in gran parte l'alimentazione dell'acqua per risalita capillare e si registra una diminuzione brusca del 15-20% fino a circa il 5% nella fascia di muratura tra 1 e 2m di altezza. Per altezze della muratura superiore a 2-3m, il valore dell'umidità residua (*a* sull'ascissa della Fig. 13) non è tanto dovuto alla risalita capillare, quanto invece alla condensazione capillare ed il valore di *a* (circa 2-3%) dipenderà ovviamente dall'UR ambientale e dalla dimensione dei pori in accordo alla legge Kelvin-Wheeler secondo l'equazione [5].

Ovviamente la forma precisa della curva illustrata in Fig. 13 nei vari casi specifici dipenderà dal tipo di muratura,

dalla costanza o meno di alimentazione di acqua dalla fondazione e dalle particolari condizioni micro-climatiche (vento, UR, temperatura, insolazione) che potranno favorire o meno l'evaporazione dell'acqua.

Per quanto concerne l'umidità nella muratura a parità di altezza, essa varierà solo leggermente in funzione dello spessore della muratura e tenderà ad essere leggermente inferiore verso la parete da dove avviene l'evaporazione (Fig. 14).

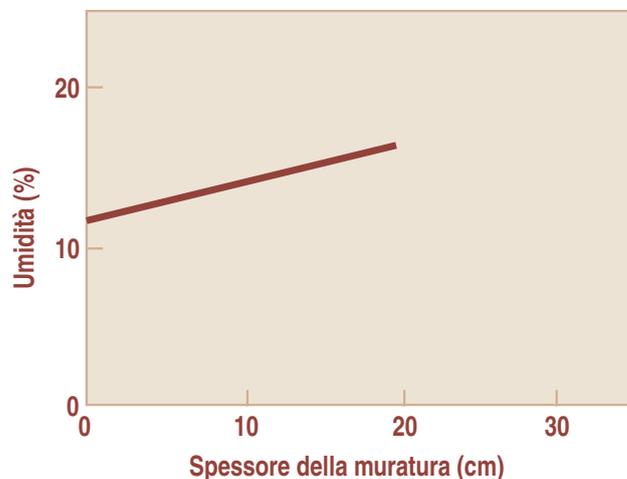


Fig. 14 – Umidità in funzione dello spessore della muratura.

## 11. EFFLORESCENZA E SUBFLORESCENZA

L'acqua che risale capillarmente dalla fondazione trascina con sé tutti i sali idrosolubili che incontra lungo il suo cammino e li deposita sotto forma di **efflorescenza** sulla superficie da cui evapora (Fig. 15 A). In talune circostanze climatiche (vento forte e bassa UR) l'evaporazione dell'acqua è così veloce che avviene ancor prima di raggiungere la superficie esterna, cosicché il deposito dei sali trascinati avviene all'interno della muratura (**sub-florescenza**), e molto spesso nella zona di confine tra zona umida e zona asciutta dove appunto l'acqua comincia a difettare (Fig. 15 B). Se il deposito dei sali anziché sulla superficie (efflorescenza) avviene all'interno della muratura (sub-florescenza), possono insorgere

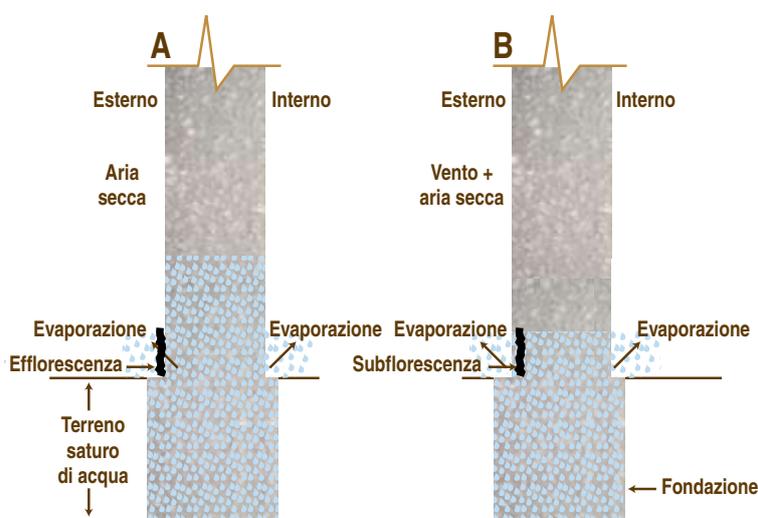


Fig. 15 – Risalita capillare di acqua contenente sali idrosolubili dalla fondazione lungo la muratura: deposito di sali cristallizzati sulla superficie (efflorescenza) o all'interno della muratura in zona corticale (sub-florescenza).

delle tensioni interne dovute alla cristallizzazione dei sali capaci di danneggiare il materiale.

Ma l'inconveniente più grave nel fenomeno di risalita capillare dell'acqua che trascina i sali idrosolubili è dovuto al fatto che alcuni di questi sali (per esempio i solfati) possono interagire negativamente -formando ettringite o thaumasite - (con altri composti situati in altre zone della muratura con i quali, in assenza di risalita capillare, i sali idrosolubili non sarebbero mai venuti in contatto. Ne consegue che le murature esposte ai fenomeni di risalita capillare sono quasi sempre maggiormente esposte al rischio di degrado: di tipo fisico (formazione di ghiaccio, sub-florescenza) o di tipo chimico (reazione di sali idrosolubili con altri elementi della muratura, solitamente pasta di cemento ricca in alluminati).

## 12. DISTRIBUZIONE DEI SALI IDROSOLUBILI NELLE MURATURE

Se, come spesso avviene, l'acqua che risale per capillarità contiene dei sali idrosolubili, la distribuzione del contenuto di questi, in funzione dell'altezza e dello spessore della muratura, sarà fortemente condizionato dal complesso fenomeno risalita capillare-evaporazione. Il contenuto totale dei sali delle murature dipenderà, invece, anche dalla concentrazione originale dei sali nell'acqua di cui la fondazione è saturata oltre che dal tipo e dalla quantità dei sali presenti nella muratura.

La distribuzione dei sali idrosolubili in funzione dell'altezza di una muratura è schematicamente mostrata in Fig. 16 (6). Nelle quote più basse (fino a 1 m circa) il tenore di sale tende ad aumentare per effetto delle umidità decrescente (Fig. 14); quindi, raggiunto un massimo di contenuto salino in corrispondenza della zona dove l'evaporazione dell'acqua è massima si registra una progressiva diminuzione del contenuto di sali nelle quote più alte dove la risalita capillare tende ad esaurirsi (Fig. 14).

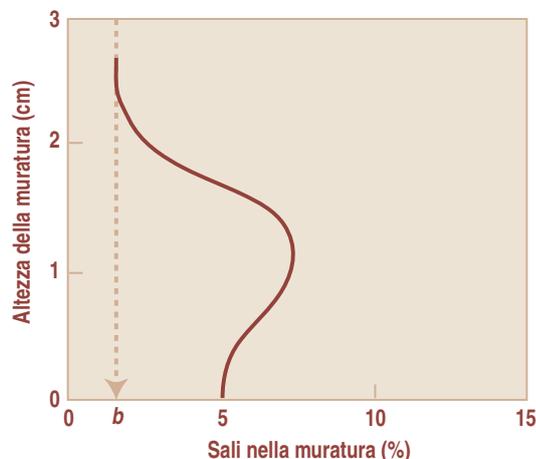


Fig. 16 – Contenuto dei sali idrosolubili nelle murature in funzione dell'altezza di una muratura.

Il contenuto di sali residuo (*b* sull'ascissa della Fig. 16) nelle quote oltre i 2-3 m, dove la risalita capillare di fatto è annullata dall'evaporazione dell'acqua, dipende sostanzialmente dalla presenza di sali idrosolubili originariamente contenuti nei materiali della muratura.

La distribuzione dei sali, ad una certa quota della muratura, in funzione dello spessore è anch'esso, al pari dell'umidità, poco variabile e tende comunque a diminuire leggermente verso le zone più interne (Fig. 17); la massima concentrazione salina si registra in prossimità della parete da dove l'acqua evapora ed il sale si deposita formando le tipiche efflorescenze superficiali. In corrispondenza

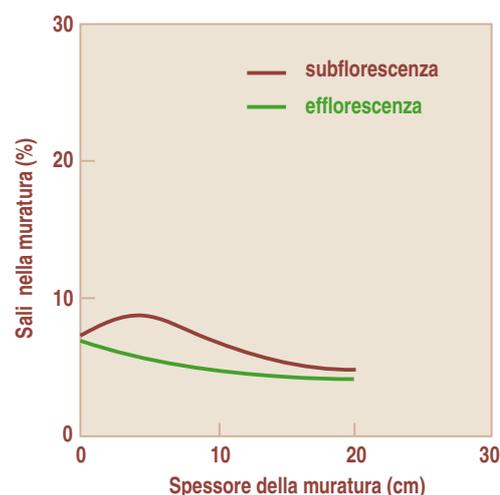


Fig. 17 – Contenuto dei sali nella muratura in funzione dello spessore.

dell'evaporazione di umidità molto elevata, la concentrazione dei sali raggiunge un massimo poco prima della parete superficiale ed il deposito dei cristalli non si verifica sulla superficie della muratura ma qualche mm o cm al di sotto di essa (sub-florescenza). Questo tipo di fenomeno, in ambienti umidi è spesso accompagnato dalla formazione di composti più idratati.

I sali solfatici anidri come per esempio  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , sono in grado di assorbire umidità per formare prodotti più idratati (per esempio:  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ).

La tensione che insorge per la formazione dei cristalli più idratati è in grado di fessurare il materiale la cui bassa resistenza a trazione non sia in grado di contrastare la pressione di cristallizzazione.

## 13. INFLUENZA DELL'ACQUA SULLE ALTERAZIONI BIOLOGICHE

Le alghe, i muschi, i licheni, ed i funghi possono insediarsi sulla superficie delle strutture umide. Inizialmente assumono una colorazione verdastria che tende progressivamente al bruno e poi al nero fino a confondersi con le croste nere prodotte per solfatazione negli ambienti inquinati da  $\text{SO}_2$ . In genere i micro-organismi scuri crescono più facilmente in corrispondenza di zone alimentate dall'acqua che, in occasione delle piogge, è scaricata in modo improprio da grondaie difettose, davanziali, ecc.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) N.K. Adam, The Physics and Chemistry of Surfaces, Oxford University Press, 3<sup>a</sup> Edizione, (1941).
- (2) O. Coussy and G. Scherer, Poromechanics of Cement-Based Materials, Special Issue of Materials and Structures, January-February, Vol. 37 - No 265, (2004);
- (3) T.C. Powers, Physical properties of cement paste, Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, S.C., National Bureau of Standards, (1960).
- (4) M. Collepardi, Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo, Editore Hoepli, Milano 3<sup>a</sup> Edizione, (1991).
- (5) P. Kubelka, "Über den schmelzpunkt in sehr engen capillaren", Z. Elektrochem, 38, 611, (1932).
- (6) G. Biscontin e G. Driussi, "Indagini sull'umidità di risalita a Venezia", Recuperare, 33, 78, (1988).

... **saperle costruire**  
**è un'arte ....**



Enco Srl - Via delle Industrie, 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV)  
Tel. 0422 963 771 - Fax 0422 963237 - [www.encosrl.it](http://www.encosrl.it) - [info@encosrl.it](mailto:info@encosrl.it)

Acquistabile tramite il sito internet [www.encosrl.it](http://www.encosrl.it) oppure telefonando al 0422 963771

sistemi



sin dagli anni '90

**Very  
High  
Durability  
Reinforced  
Concretes**

**Tecnologie, Sistemi ed Innovazioni per la  
Durabilità e Sostenibilità delle Strutture  
in CIs Armato e per la rispondenza alle  
Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni**  
D.M. 14 Gennaio 2008

## **TECNOLOGIE E SISTEMI**

Anticorrosione

Antiritiro

Rapida agibilità e funzionalità  
strutturale

Duttilità

Super resistenze  
Ingegnerizzazione delle forme

Fibrorinforzati ad alta energia  
di frattura

Stabilità fisico-chimica  
Resilienza

Resistenza al fuoco

Autocompattanti Compounds

Reoplastici  
Reodinamici  
Autocompattanti  
Impermeabili  
Fotocatalitici  
Autopulenti  
Antiradiazione  
Speciali "ad hoc"

Sostenibilità  
Durabilità  
Ecologia  
Economia

## **MARCHI REGISTRATI**

**MuCis®**

**SHRINKO-tec®**

**RAPI-tec®**

**HFE-tec®**

**REFOR-tec®**

**FIB-energy®**

**STABIL-tec®**

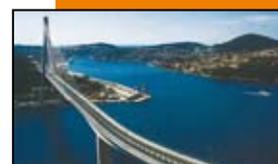
**HFE-tec® FIRE  
STABIL-tec® FIRE**

**SELF-tec®**

**Tecnos® azur  
MICROBETON® POZ**

...altri e  
la gamma completa  
degli additivi  
per calcestruzzo

**SISTEMI VHDCR®**



**technology**

**TECNOCHEM** **TECNO ECO**  
ITALIANA SPA **LOGICHEM**

Via Sorte 2/4 - 24030 Barzana (BG) Italy - Tel. +39 035 554811 - Fax +39 035 554816  
info@tecnochem.it - www.tecnochem.it