2008
Trimestrale
Anno XIII
Numero 43

ENCO JOURNAL

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Pantheon di Roma: millenaria struttura architettonica in calcestruzzo romano

"Focus - Via delle Industrie, 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV). Spedizione in abbonamento postale D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 N° 46) art. 1, comma 1 DCB TV"

Acqua, Preparati allo Scontro

Visita www.penetron.it
e utilizza gli esclusivi benefici del
Sistema Penetron® nel tuo progetto

PENETRON® ADMIX è un' esclusiva formulazione per l'impermeabilizzazione e la protezione del calcestruzzo. Aggiunto al "mix-design" in fase di confezionamento genera un processo di cristallizzazione che diventa parte integrante della struttura

DITRON s.r.l.

Distributore Esclusivo per l'Italia del "Sistema Penetron®"
Crs. Peschiera, 336/D – 10139 Torino Tel. 011 7740744 Fax. 011 7504341
sito web: www. penetron.it email: info@penetron.it

l'impronta dello stile

MANINI PREFABBRICATI

progetto grafico e illustrazione MARINI

Sede Generale:
S. Maria degli Angeli - ASSISI / PG
Tel. 075-8041018 - Fax 075-8040447
e-mail: com@manini.it
http: www.manini.it

Centri produttivi:
BASTIA UMBRA / PG
APRILIA / LT
PERUGIA
SOMAGLIA / LO

MC-MANINI PREFABBRICATI

Tel. 0422 963 771 Fax 0422 963 237 www.encosrl.it

RICERCA NUOVI PRODOTTI

Silvia Collepardi
collepardi@encosrl.it

BENI CULTURALI

Emanuela N. Croce
croce@encosrl.it

DIAGNOSTICA E PROGETTAZIONE

Francesca Simonelli
simonelli@encosrl.it

DIDATTICA EDITORIA

Mara Meneghel
info@encosrl.it

LABORATORIO CALCESTRUZZO

Antonio Borsoi
borsoi@encosrl.it

CERTIFICAZIONE MATERIALI

J. Jacob O. Olagot
olagot@encosrl.it

ASSISTENZA TECNICO-LEGALE

Roberto Troli
troli@encosrl.it

enco
Laboratorio per prove e ricerche sui materiali da costruzione

ENCO JOURNAL

enco
Società di Ricerca Software House

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE
Trimestrale - Anno XIII - Numero 43
Direttore Mario Collepardi

LA POZZOLANA

Pozzolana, materiale di origine vulcanica in prossimità di Pozzuoli impiegato dai Romani nel campo delle costruzioni, è uno dei pochi termini della lingua italiana che si è affermato, come *pizza* o *bravo*, anche nella lingua inglese. Anche in Inglese *pozzolana* o *pozzolan* indica un materiale capace di reagire con la calce trasformando una malta aerea, che indurisce molto lentamente, in una malta idraulica che può indurire molto più rapidamente ed è capace di resistere all'azione dilavante delle acque naturali. Anche nella letteratura inglese il termine *pozzolana* indica anche un materiale cementizio che può sostituire una parte del cemento Portland migliorando le proprietà del calcestruzzo ed in particolare la sua capacità di resistere agli attacchi aggressivi naturali come l'acqua di mare o terreni solfatici, e di rendere innocui gli instabili alcali-reattivi aggregati.

Accanto alla pozzolana naturale, disponibile come lava di origine vulcanica, esistono anche pozzolane artificiali quali l'antico *cocciopesto* ottenuto per macinazione dei mattoni, o le moderne scorie di alcuni processi industriali: cenere volante, loppa d'altoforno e fumo di silice.

In questo numero di *Enco Journal* sono presenti due articoli nei quali si parla di pozzolana proprio nelle due accezioni sopra menzionate:

- a pagina 8 articolo sul materiale di origine vulcanica o artificiale (cocciopesto) che, impiegato insieme alla calce, ha reso possibile costruire edifici come il Pantheon a Roma o acquedotti come quello di Pont du Gard in Francia capaci di sfidare i millenni per la loro durabilità;
- a pagina 21 articolo sul materiale artificiale (cenere volante, loppa d'altoforno e fumo di silice) in sostituzione del cemento Portland per costruire opere durabili in ambienti fortemente aggressivi.

Per quanto attine alla durabilità a lungo termine delle opere in c.a., questo problema ha assunto una notevole importanza a seguito della recente straordinaria marea a Venezia. La costruzione in corso del MOSE, in forma di barriere mobili per proteggere Venezia dal ricorrente fenomeno dell'acqua alta, viene eseguita con un calcestruzzo contenente materiale pozzolanico proprio per conferire una durabilità secolare a questa opera straordinaria.

Mario Collepardi

In copertina: Phanteon, Roma

SOMMARIO

LE ANTICHE GALLERIE
di G. Da Rios e P. Villani (pag. 6)

DAL CALCESTRUZZO ANTICO A QUELLO MODERNO
Parte II - Calcestruzzo Romano
di M. Collepardi (pag. 8)

GIOVANNI CURIONI
Profilo di un maestro e di uno storiografo
di A. Mazzè (pag. 15)

CALCESTRUZZO: DURABILITA' ANCHE IN CINA (pag. 17)

MASTER IN INGEGNERIA DEL CALCESTRUZZO (MIC) (pag. 18)

DEGRADO E DURABILITA' DI OPERE IN C.A. IN AMBIENTE MARITTIMO
di S. Collepardi e R. Troli (pag. 21)

ORIGINE E SMALTIMENTO DEI MATERIALI E RIFIUTI RADIOATTIVI
di P. Risoluti (pag. 26)

ENCO Journal
PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE
Ponzano V.to (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
FOCUS
Ponzano V.to (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

LE ANTICHE GALLERIE

Giovanni Da Rios, Paola Villani
DIIAR Politecnico di Milano
giovanni.darios@polimi.it - paola.villani@polimi.it

Se tra le prime gallerie rivestite in mattoni possiamo annoverare quella costruita in Mesopotamia dai Babilonesi per passare sotto l'Eufrate, solo più tardi a Samo nel 498 a.C. un certo Eupalinos (citato da Erodoto) progettò e fece costruire una vera e propria galleria stradale sotto il monte Kastro e nell'eseguire questi lavori Teodoro di Samo ricorse all'utilizzo di squadra e livella. Ma già in Italia era stata realizzata ottanta anni prima una galleria analoga, costruita a Roma e iniziata sotto Tarquinio Prisco e conclusa sotto Servio Tullio nel 578 a.C.: la Cloaca Massima (Fig.1), lunga 600 m, opera colossale ideata per trasportare carichi pesanti e prosciugare i bassi terreni paludosi generati dalle piene del Tevere, a Nord del Palatino.

Fig. 1 - Cloaca Maxima.

In Italia sono pochi (meno di venti) i tunnel databili all'età Romana: alcuni appartenevano alla rete stradale principale. Possiamo annoverare il traforo del Furlo nelle Marche, Donnaz in Valle d'Aosta, Pietra Pertusa, la galleria del Casale della Marcigliana presso Roma sul vecchio tracciato della Via Salaria, le cryptae dell'area del Lucrino e dell'Averno, la grotta di Cocceio e quella della Sibilla, la grotta del Seiano sul promontorio di Posillipo, la Crypta Neapolitana fra Napoli e Pozzuoli, la galleria del colle di Cuma e quelle dell'isola di Ponza, gallerie costruite per un traffico locale. Per esigenze ancora più circoscritte erano stati scavati i tunnel di San Giovanni a Pollo e le vie carrabili sotterranee di Villa Adriana e la Via Tecta a Tivoli.

Il traforo del Furlo è considerato il miglior esempio di galleria. Sul fiume Cardigliano la Via Flaminia (a 35 km da Fano e 248 km da Roma) supera l'Appennino. Il traforo è scavato nel calcare, con andamento non del tutto rettilineo ed è lungo 38 m per un'altezza e una larghezza media di 5 o 6 m (18-20 piedi romani). La Via Flaminia fu tracciata dagli Etruschi; solo successivamente Consoli e Imperatori provvidero a mantenerla agibile, rettificarne il tracciato e ricostruire i ponti etruschi con archi romani. Se molti asseriscono che i Romani furono esperti nella costruzione delle gallerie, si deve evidenziare come siano poco frequenti i tunnel posti lungo i tracciati stradali. Il nome Furlo deriva dal latino Forulus (piccolo foro). Questo tunnel era anche conosciuto come Petra Pertusa (pietra bucata), e fu così battezzato da Aurelio Vittore, Biografo dell'Imperatore Vespasiano.

Molti Imperatori come Claudio, Nerva, Traiano e Adriano hanno legato il proprio nome allo scavo e alla realizzazione di gallerie transitabili. Lo stesso Vespasiano nel 77 d.C. ha fatto apporre, all'ingresso della galleria del Furlo, un'epigrafe per ricordare come l'opera fosse stata eseguita su suo ordine. Ma già molti secoli prima la Crypta Neapolitana (grotta vecchia di Posillipo per raggiungere Napoli da Fuorigrotta), scavata nel tufo, lunga circa 700 m era adibita a uso stradale. Sotto il Duomo di Pozzuoli, già Tempio di Augusto al Rione Terra, era riportata una breve iscrizione.

Quest'opera, analogamente ad altre che recano la medesima iscrizione (Basilica di Massenzio, Pantheon, Portus Iulius, la Crypta Romana, la cosiddetta Grotta di Seiano, la Dragonara a Miseno), venne dedicata (come se fossero Numi tutelari) ai primi Consoli Romani che governarono nel periodo 509-496 a.C..

Il traforo della Crypta Neapolitana è interamente

scavato nel tufo per circa 1 km, con sezione trapezoidale e andamento rettilineo leggermente in salita verso oriente; presenta solo da questa parte un breve tratto con volta a tutto sesto in opus reticulatum; l'entrata occidentale, sul lago, era preceduta da un vestibolo ornato da colonne e statue, andato distrutto. La galleria prendeva luce e aria da sei pozzi, scavati nella collina, il più lungo dei quali era alto più di 30 m ed era abbastanza larga da permettere il passaggio di due carri. La grotta cosiddetta di Cocceio, scavata nel tufo sotto il monte Grillo presso Cuma, presenta una galleria di camminamento lunga 1.000 m e un camerone a cupola di 37 m di diametro.

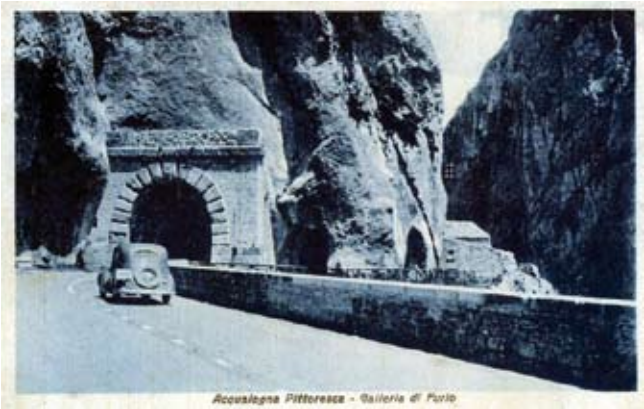


Fig. 2 - Passo Furlo anno 1949.

Presso il monte Velino in Abruzzo si trovano i resti di Alba Fucens, abitata già nel 450 a.C. dagli Equi, a Nord della Via Tiburtina Valeria. Ancora più a Nord, sulla Via Flaminia, nel territorio dei Marsi, la galleria del Fucino è la più lunga tra le opere antiche di questo genere. Ricavata in una roccia calcarea contenente argilla, sabbia e puddinga (roccia sedimentaria coerente, costituita da frammenti rocciosi arrotondati quali ciottoli e ghiaia), è lunga 5.630 m e raggiunge le dimensioni di 17.000 m se si considerano i pozzi e i cunicoli.

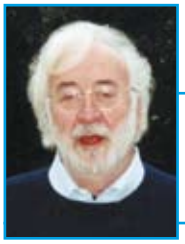
MIX DESIGN DEL CALCESTRUZZO

Edizione Enco 2008, 282 pagine, 65 €

L'unico libro disponibile per progettare la composizione dei calcestruzzi in base a:
- le prestazioni (R_{ck}, durabilità, impermeabilità, resistenza alla scasseratura, resistenza a flessione, lavorabilità);
- la disponibilità delle materie prime (cemento, additivi, tipo e granulometria dell'inerte).
Testo aggiornato alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni - (DM del 14 Gennaio 2008)

Per maggiori informazioni:
Enco Srl (tel. 0422 963771 - fax 0422 963237 - info@encosrl.it)

DAL CALCESTRUZZO ANTICO A QUELLO MODERNO



Parte II - Il Calcestruzzo Romano

Mario Collepardi
Enco srl, Ponzano Veneto (TV) - collepardi@encosrl.it - www.encosrl.it

INTRODUZIONE

Questo articolo è la seconda parte di una pubblicazione intitolata "Dal calcestruzzo antico a quello moderno" la cui prima parte (" Evoluzione dei leganti per malte e calcestruzzi") è apparsa nel giugno 2008 sul N.41 di Enco Journal.

1. LA SCOPERTA DELLA POZZOLANA

Marco Vitruvio Pollione nel suo libro, in latino, *De Architectura* scrive: «*esiste una specie di polvere chiamata "pozzolana" (n.d.t. da Pozzuoli) che per natura possiede qualità straordinarie. Si trova nella Baia di Napoli e nelle terre circostanti il Vesuvio. Questa polvere, mescolata con calce e sabbia rende la muratura talmente stabile che questa indurisce non solo negli edifici normali, ma anche sotto l'acqua*»*.

Sebbene la scoperta della pozzolana sia attribuita ai Romani sembra che già nel X secolo a.C. i Fenici e gli Israeliti abbiano utilizzato miscele di calce e pozzolana in opere idrauliche (acquedotti, serbatoi, porti, ecc.) dove l'impiego della sola calce aerea avrebbe potuto provocare un lento ma inesorabile dilavamento sulla superficie delle strutture. Secondo C. Goria ("*Evoluzione storica dei leganti e dei conglomerati: dall'empirismo alla loro conoscenza razionale*, *in Cemento: Storia, Tecnologia, Applicazioni", Ed Fratelli Fabbri Editori, Milano, 1976*) sembra che le cisterne dell'acqua potabile, fatte costruire da Re Salomone a Gerusalemme, siano state protette con un rivestimento superficiale di malta idraulica a base di calce e pozzolana artificiale in forma di mattone macinato (**cocciopesto**).

Anche i Greci secondo F. M. Lea (*"The Chemistry of cement and concrete", Chemical Publishing, London, 1971*) utilizzarono la cenere vulcanica dell'isola di Cantorino. Addirittura risale al 2000 a.C. l'impiego di calce aerea mescolata con cocciopesto in alcune costruzioni nell'isola di Creta.

Il merito dei Romani consiste nell'impiego razionale e costante della pozzolana, del tipo di quella esistente presso Pozzuoli (*pulvis puteolana*), in parziale sostituzione della sabbia normale. Essi si resero conto che, grazie alla combinazione della calce con la pozzolana, la malta diventava idraulica: era in grado, cioè, di indurire anche sotto acqua e di raggiungere una maggiore resistenza meccanica.

In questo contesto, si potrebbe definire pozzolanica una sabbia speciale capace di trasformare una malta da aerea in una **malta idraulica** nonostante il legante impiegato (calce) sia di per sé stesso aereo. Oggi noi sappiamo che questo effetto è fondamentalmente dovuto alla presenza, nella pozzolana, di silice (SiO_2) ed allumina (Al_2O_3) reattive nei confronti della calce per il loro stato amorfo e vetroso, cioè non cristallino. Ma di questa correlazione chimico-fisica i Romani non potevano certamente essere consci. Tuttavia essi erano in grado empiricamente di individuare una cava di pozzolana guidati dalla presenza di lava in prossimità dei vulcani spenti. Così pure intuirono che, laddove non esistevano giacimenti naturali di lava vulcanica in prossimità delle costruzioni in tutto l'Impero, lo stesso effetto si sarebbe potuto ottenere sostituendo la pozzolana di origine vulcanica con argilla cotta macinata in forma di mattoni o tegole finemente macinate (cocciopesto).

Oggi noi sappiamo scientificamente che la sabbia di origine vulcanica (**pozzolana naturale**) come anche il cocciopesto (**pozzolana artificiale**) hanno la capacità di reagire con la calce trasformandola in alluminati di calcio idrati (*C-A-H*) ed in particolare in un idrosilicato di

* *Il primo testo del De Architectura disponibile, scritto in latino volgare da Fra' Giovanni Sulpicio da Veroli, (Editio princeps in vulgare) è del 1486. Nel 1511 appare la stampa veneziana del libro di Vitruvio a cura di Giovanni Monsignori (Fra' Giocondo), cui seguì nel 1521la versione "translata in vulgare et affigurata" di Caesare Caesariano, Architecto Mediolanense. E'del 1832 la versione più moderna del libro Vitruviano a cura di B. Galliani, Ed. A. Dozio, Milano, cui fa riferimento la descrizione della pozzolana sopra riportata come anche di quelle nel testo che segue.*

calcio (*C-S-H*), che si forma anche nella idratazione dei moderni cementi, che è capace di produrre una maggiore resistenza meccanica rispetto alla normale malta aerea, che indurisce anche sotto acqua e che resiste all'azione dilavante dell' acqua piovana o del moto ondoso nel caso di opere marittime:

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + Al_2O_3 + H_2O \Rightarrow C\text{-}S\text{-}H^* + C\text{-}A\text{-}H^*$$

**I simboli C-S-H e C-A-H non sono formule chimiche ma piuttosto le iniziali in inglese di Calcium Hydrated Silicate e Calcium Aluminate Hydrated.*

Se la malta di calce e pozzolana è esposta all'aria una parte del $Ca(OH)_2$ si trasforma in $CaCO_3$ come avviene nell'indurimento della calce aerea per carbonatazione :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \Rightarrow CaCO_3$$

Tabella 1 - Confronto tra caratteristiche di malta aerea e malta idraulica con pozzolana.

CARATTERISTICA	MALTA ANTICA A BASE DI:	
	Calce	Calce-Pozzolana
Prodotto responsabile dell' indurimento	$CaCO_3$	C-S-H (+$CaCO_3$ solo in presenza d'aria)
Presenza di aria (CO_2)	Indispensabile per l'indurimento	Non necessaria per l'indurimento
Velocità di indurimento (v)	v_1	$v_2 > v_1$
Grado finale di indurimento (R_c = resistenza meccanica a compressione)	Mediocre (R_c = 2-4 N/mm^2)	Accettabile (R_c = 10-20 N/mm^2)
Comportamento in servizio nell'esposizione all'acqua	Mediocre	Ottimo
Durabilità di opere idrauliche (acquedotti) e marittime (porti)	Mediocre	Ottima

Nella Tabella 1 sono mostrate comparativamente le prestazioni della malta a base di calce con e senza pozzolana.

Dopo la scoperta delle malte idrauliche a base di calce e pozzolana, iniziò l'uso della calce per produrre il cosiddetto calcestruzzo romano mescolando calce, sabbia pozzolanica, acqua e rottami di mattoni o più frequentemente di pietra, come è mostrato nel successivo paragrafo.

2. IL CALCESTRUZZO DEI ROMANI

Le murature in calcestruzzo sono state ampiamente costruite nell'antichità e sono citate nelle opere di Plinio il Vecchio (*Storia Naturale*) e di Vitruvio (*De Architectura*). Il calcestruzzo (denominato ***opus caementitium***) era costituito da rottami di pietra o mattoni, mescolati con calce, acqua e pozzolana vulcanica o cocciopesto in sostituzione parziale o totale della comune sabbia fluviale.

Il rottame di pietra usato per confezionare il calcestruzzo, veniva indicato in latino, anche da Livio e Cicerone, con il termine di ***caementum*** dal verbo latino ***caedere*** che significa "tagliare in pezzi", da cui deriva anche l'italiano "incido" (cioè "taglio dentro"). Val la pena di segnalare, secondo C. Goria ("*Evoluzione storica dei leganti e dei conglomerati: dall'empirismo alla loro conoscenza razionale", in Cemento: Storia, Tecnologia, Applicazioni, Ed Fratelli Fabbri Editori, Milano, 1976*), la curiosa trasformazione etimologica di caementum che, divenuto ***cementum*** nel passaggio dal latino classico a quello volgare, conservò originariamente il significato di "rottame di pietra", per poi assumere, attraverso un tipico processo di sineddoche, il significato di tutto il conglomerato formato, cioè, da acqua, legante, sabbia e rottame di pietra, cioè quello che oggi è definito "calcestruzzo". In sostanza si indicò a lungo, fino al Medioevo, con il termine "cemento" quello che oggi è correttamente indicato con il nome di "calcestruzzo". Solo alla fine del diciottesimo secolo, i vocaboli italiani "cemento" e "calcestruzzo" assunsero l'attuale corretto significato di polvere legante e di conglomerato. Ma ancor oggi i due termini si confondono e con "cemento" si indica non già la polvere ma piuttosto il calcestruzzo: è come se si confondesse la farina con il pane.

Per gli amanti della glottologia può essere interessante conoscere l'etimologia di "calcestruzzo": esso deriva dal latino ***calcis structio***, cioè struttura a base di calce; divenne poi "***calcestrutto***" ed infine "calcestruzzo". Anche il vocabolo inglese molto noto ed elegante di ***concrete*** (cioè calcestruzzo) viene dal latino ***concretum***, ma presenta, rispetto al nostro "calcestruzzo", una origine etimologica meno sofferta e più lineare. Cicerone scriveva infatti *concretum corpus ex elementis* che significa "corpo composto di elementi diversi" che include appunto il significato di "conglomerato", talvolta usato in italiano in luogo del vocabolo "calcestruzzo".

Nella maggior parte delle opere dei Romani, il calcestruzzo fu in realtà impiegato come riempimento tra i paramenti esterni in mattoni o in pietra che fungevano come casseforme permanenti (Fig. 1). Infatti, nelle antiche costruzioni in calcestruzzo lo spazio tra i paramenti in mattoni o in pietre squadrate, che fungevano da casseri

permanenti, veniva rapidamente riempito di malta nella quale venivano poi conficcati a mano, più o meno regolarmente, l'aggregato grosso (caementum) in forma di pietra in pezzi (Fig. 1) o di rottami di mattone (Fig. 2).

Fig. 1 - Esempio di calcestruzzo romano con rottame di pietra bianca (caementum) gettato tra paramenti in mattoni come casseri permanenti (Pantheon a Roma).

La scoperta della pozzolana segnò un rivoluzionario progresso nelle antiche costruzioni in calcestruzzo. Scrive Vitruvio nel capitolo VI del secondo dei suoi dieci libri sull'Architettura che la pozzolana di Baia o di Cuma "*fa gagliarda non solo ogni specie di costruzione ma particolarmente quelle che si fanno in mare sott'acqua*".

La capacità del calcestruzzo di calce-pozzolana non solo di indurire all'interno di casseforme impenetrabili all'aria, ma anche e soprattutto sott'acqua, era ben nota a Vitruvio che, nel capitolo XII del quinto libro, a proposito delle costruzioni dei porti, scriveva: "*Queste costruzioni nell'acqua così sembrano doversi fare: si prenda l'arena da quelle regioni che da Cuma si estendono fino al promontorio di Minerva* ("pozzolana" n.d.t.) *e si adoperi in modo che nella miscela due parti di arena corrispondono ad una di calce. Indi nel luogo, che sarà stato stabilito, si calino dentro l'acqua cassoni senza fondo formati con travicelli e legami in legno rovere, e fortemente si fissino con ritegni: di poi con rastrelli si eguagli e si spurghi quella parte di fondo di mare che rimane dentro i medesimi, indi vi si gettino cementi* ("rottami di pietre" n.d.a.) *mescolati con la miscela formata come di sopra si è scritto, fintantoché venga riempito di costruzione il vuoto interno dei calcestruzzi*".

Fig. 2 - Esempio di calcestruzzo romano con aggregato grosso in forma di rottami in pietra e laterizi gettato tra due paramenti in mattoni (Pompei).

Con la caduta dell'Impero Romano, soprattutto lontano da Roma, iniziò un lento ma inesorabile declino nelle qualità delle costruzioni e si è molto discusso fino alla metà del diciottesimo secolo su quale fosse il segreto che i Romani possedevano per la produzione del loro durabile calcestruzzo. In realtà il segreto, tutt'altro che nascosto, era rintracciabile tra le righe delle opere di Vitruvio. E' già stato menzionato il brano di Vitruvio sull'importanza dell'impiego delle pozzolane, ma vale la pena ancora di citare altri brani tutti presi dal secondo dei suoi dieci libri, quello dedicato alle caratteristiche dei materiali, per garantire il successo nella costruzione.

A proposito della sabbia Vitruvio scriveva: "*Nelle costruzioni fatte con cementi* (nota: con rottame di pietra, cioè nelle costruzioni in calcestruzzo) *devesi in primo luogo aver cura di trovar l'arena che sia atta al mescolamento della materia e che non sia commista alla terra…… Fra tutte sarà ottima quella, che sfregata colle mani, cigola; quella ch'è terrosa manca d'asperità; però se sparsa sopra una bianca veste, poi scossa e scrollata non lascerà macchia né terra attaccata sarà pure idonea…. La sabbia marina poi ha questo di più, che i muri quando sarà tirato sopra di quelli l'intonaco, trasudando e salsedine, si dissolvono"* (e per questo nel primo libro Vitruvio consiglia di lavare con acqua fluviale la sabbia marina). Non sono questi preziosi suggerimenti per i materiali destinati alle costruzioni durabili?

A proposito della calce scriveva Vitruvio: "*Avendo spiegato i diversi generi dell'arena, si dee porre in opera tutta la diligenza intorno alla calce affinché sia cotta di pietra bianca o di selce; e quella che sarà di pietra più compatta e più dura sarà utile nella fabbricazione* (del calcestruzzo) *quella di pietra porosa nell'intonacato*". Val la pena di sottolineare che le indicazioni sulla compattezza e sul colore bianco della pietra da cuocere indirizzassero gli addetti alla cottura del calcare per produrre la calce (*calcis coctores*) verso la scelta di una pietra che oggi noi sappiamo essere di calcare puro, e quindi verso un alto contenuto di CaO nel prodotto della cottura e verso un'elevata grassezza della calce spenta, $Ca(OH)_2$; al contrario la presenza di impurità, che rendevano il calcare poroso e colorato, finivano con il diminuire il contenuto di CaO nella pietra cotta e, quindi, con l'aumentare la magrezza della calce spenta. E per non lasciare dubbi sulla qualità della calce Vitruvio suggerisce ancora: "*Quando poi sarà fatta la macerazione* ("spegnimento" n.d.t.) *e diligentemente preparata per l'opera, si prenda un'ascia, e come si fende il legname, così si faccia alla calce macerata nella vasca: se coll'ascia si incontreranno sassolini* (n.d.t. : noi oggi sappiamo che i "sassolini"

erano in realtà dovuti ad un eccesso di cottura del CaO) *non sarà ben macinata; se si estrarrà fuori il ferro asciutto e netto indicherà essere la calce magra e secca; se poi rimarrà attaccata intorno al ferro a guisa di glutine, indicherà essere grassa e ben macerata, e sarà ciò prova più che sufficiente per crederla ben preparata*".

Ed, inoltre, a proposito delle proporzioni nelle malte Vitruvio suggeriva: "*Quando la calce sarà estinta, allora si mescoli alla materia in guisa che, se l'arena fosse fossile, si confondono tre parti di questa ed una calce. Se sarà fluviale o marina una di questa con due di arena e così vi sarà giusta proporzione del miscuglio. E se nella fluviale o marina si aggiungerà una terza parte di mattone pesto e vagliato, ciò formerà la composizione della materia ancora migliore per l'uso*". Per la confezione del calcestruzzo Vitruvio suggerisce: pezzi di tufo con una malta costituita da pozzolana (2 parti) e calce (1 parte); per i pavimenti: 3 parti di rottami di mattoni ed una parte di calce oppure cinque parti di pietra frantumata (per dimensione contenibile in una mano) con due parti di calce; oppure ancora: due parti di pietra frantumata con una parte di cocciopesto ed una parte di calce.

Ed, infine, a proposito della messa in opera, sia Vitruvio che Plinio il Vecchio, nella sua "*Storia naturale*", raccomandano di battere e costipare tanto le malte degli intonaci quanto i calcestruzzi soprattutto nelle fondazioni con l'uso di mazze di ferro , la qualcosa evidenzia quanto fosse importante, per la buona riuscita della costruzione, la completa compattazione del conglomerato e l'impiego della minore quantità di acqua possibile.

Il declino della qualità nelle costruzioni iniziata con la caduta dell'impero Romano e proseguito per tutto il Medioevo può essere spiegato non già sulla base di un segreto non tramandato ma piuttosto per aver disatteso le raccomandazioni di Vitruvio. Ed infatti le fornaci di calce inizialmente molto curate nei dettagli costruttivi furono sostituite da rudimentali forni di campagna che generavano molto materiale non cotto nella calce; furono sempre più impiegate sabbie sporche ed inquinate da argilla; si abbandonò l'uso della pozzolana vulcanica e del cocciopesto; ed infine si trascurò la tecnica di costipare adeguatamente malte e calcestruzzi confezionati con poca acqua.

3. ESEMPI DI COSTRUZIONI IN CALCESTRUZZO ROMANO

Di seguito sono illustrati due esempi di costruzioni romane in calcestruzzo entrambi caratterizzati dalla durabilità. Si tratta), di un'opera dell'ingegneria idraulica (l'Acquedotto di Nimes in Francia) e di una costruzione architettonica (il Pantheon di Roma).

3.1 Pont Du Gard a Nimes

Pont du Gard a Nimes, in Francia, l'antica *Nemansis* dei Romani, faceva parte di un acquedotto che portava l'acqua dalla sorgente di Uzès fino alla città di Nimes per oltre 50 Km per lo più attraversando zone interrate.

Sono due gli aspetti che più colpiscono questa opera dell'ingegneria idraulica ed architettonica (Fig. 3) al tempo stesso costruita da Marco Vipsanio Agrippa all'epoca dell'imperatore Augusto (2-19 d.C.):

1) la incredibile precisione nella pendenza dell'acquedotto che doveva trasportare per gravità l'acqua da Uzés a Nimes per 50 km contando solo su un dislivello di 17 m, pari cioè ad una pendenza di 1 m ogni 3 km, cioè dello 0,3‰. Per la realizzazione di questo obiettivo gli ingegneri Romani attraversarono colline scavando in sotterraneo e costruirono il ponte che attraversava il fiume Gard al fine di mantenere quella minima pendenza dello 0,3‰ capace di garantire il flusso dell'acqua per gravità;
2) la bellezza artistica del ponte che presenta un'altezza di 49 m per una lunghezza di 273 m; il ponte attraversa il fiume con 4 arcate al piano inferiore (con una luce di 24,5 m ed uno spessore di oltre 6,36 m per resistere alla corrente del fiume), sette arcate al piano intermedio (con uno spessore minore di 4,54 m) e 35 arcate nel piano superiore (con uno spessore ancora minore di 3,06 m) sopra le quali scorre l'acquedotto vero e proprio (Fig. 4).

Fig. 3 - Vista del Pont du Gard a Nimes.

Pont du Gard è un altro esempio di capolavoro ingegneristico ed architettonico costruito per durare a lungo. Non subì, infatti, degrado grazie all'impiego di malta pozzolanica che rivestiva la superficie interna dell'acquedotto. Tuttavia nel Medioevo fu impropriamente utilizzato come ponte stradale, per il quale non era stato costruito, e si verificarono preoccupanti fessure alla base del secondo piano di archi. Il dissesto fu riparato nel XVIII secolo riportando il monumento alla sua architettura originale ed affiancandolo con un ponte stradale senza modificare l'aspetto del *Pont du Gard* come costruito dai Romani.

Fig. 4 - L'acquedotto sul Pont du Gard.

3.2 Il Pantheon di Roma

Oltre ad essere un capolavoro dell'architettura mondiale, per la bellezza della forma, l'arditezza della tecnica costruttiva, l'illuminazione straordinaria all'interno del monumento, è la costruzione dell'antica Roma conservatasi più intatta fino ai giorni nostri (Fig. 5).

Fig. 5 - Vista frontale del Pantheon, Roma.

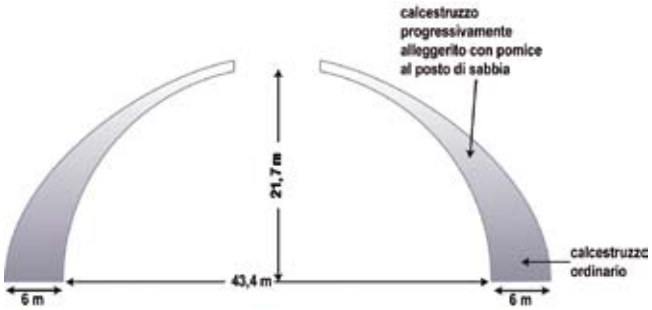


Fig. 6 - Sezione della cupola del Pantheon.

Non è possibile citare al mondo un'opera in calcestruzzo più durabile del Pantheon. Fu costruito in soli 7 anni con Adriano Imperatore dal 118 al 125 d.C. edificando una cupola semisferica (Fig. 6) su una precedente costruzione eseguita circa un secolo prima da Marco Agrippa (Fig. 7) figlio di Lucio, come appare scritto sul frontone del portico.

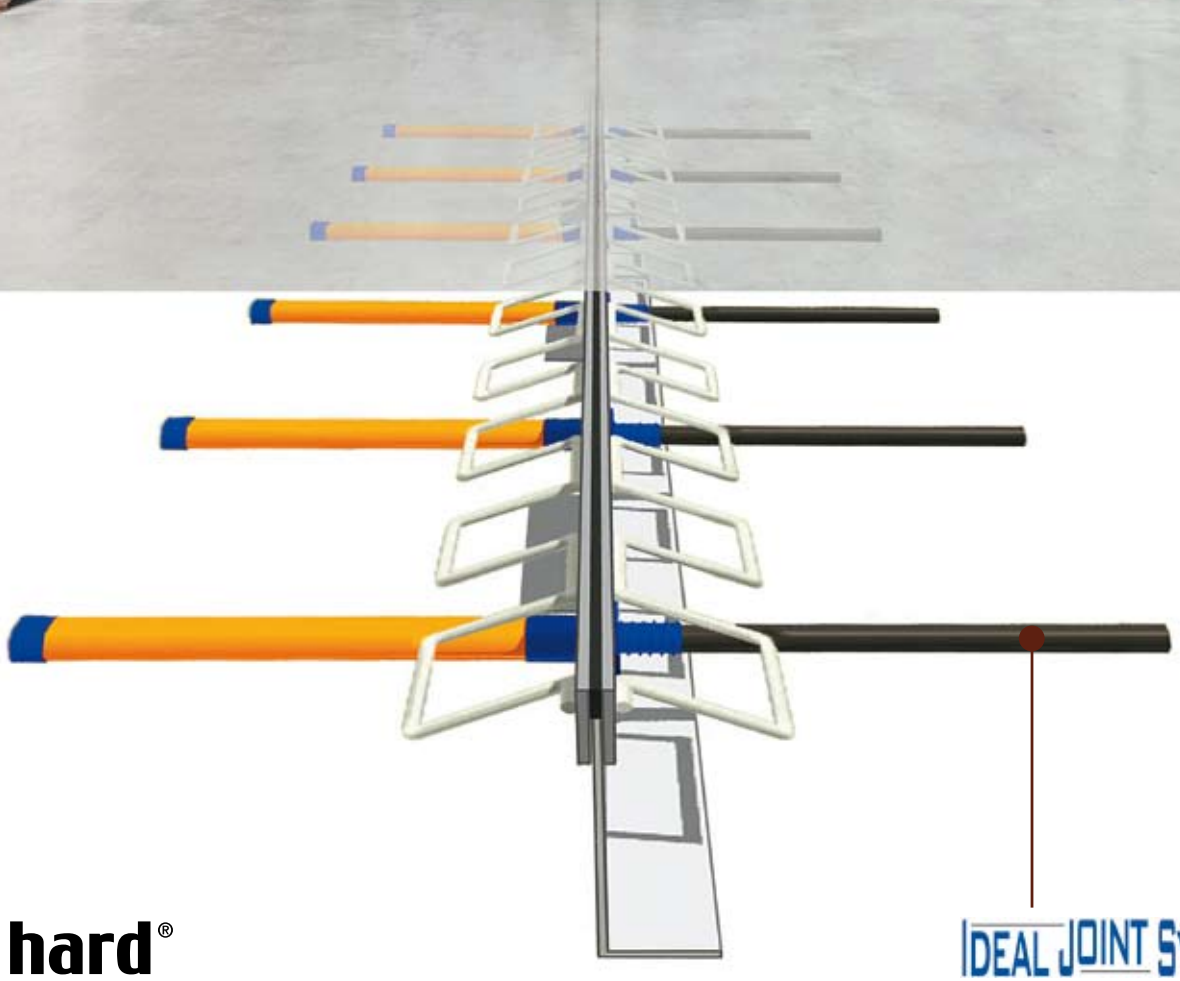
L'arditezza della costruzione sta soprattutto nella cupola in calcestruzzo del diametro record di 43,3 m (più grande di quello della cupola della Basilica di San Pietro) costruita con sabbia ordinaria ed inerti leggeri naturali (pomice) legati con calce e pozzolana. La cupola, che poggia su una struttura circolare in mattoni spessa 6 m, è stata realizzata gettando entro casseforme in legno un calcestruzzo sempre più leggero con massa volumica decrescente dal basso verso l'alto grazie al diverso rapporto pomice/sabbia. Nella parte bassa si conficcavano nella malta pezzi di travertino o mattone successivamente battuti con mazze metalliche mentre nella parte più alta si impiegavano anche anfore vuote per alleggerire - unitamente all'impiego della pomice- il calcestruzzo. Ciò ha consentito, tra l'altro, di realizzare l'ardito progetto di costruire una struttura perfettamente semi-sferica (essendo l'altezza della cupola terra uguale a 21,7 m, cioè metà del diametro) con lo spessore della cupola che si riduce da 6 a 1,2 m in corrispondenza dell'apertura circola (oculus) con diametro di 8,7 m nella sommità (Fig. 8).

Fig. 7 - Bassorilievo di M. V. Agrippa.

4. DURABILITÀ DELLE COSTRUZIONI DEI ROMANI

Attraverso l'analisi di due grandi costruzioni appartenenti all'ingegneria idraulica (come l'acquedotto sul Pont du Gard) e all'architettura (come il Pantheon) si evidenza che i Romani, abilissimi architetti e costruttori, non trascurarono di impiegare materiali pozzolanici, naturali come le pozzolane di origine vulcanica, o artificiali, come il cocciopesto, per assicurare una lunga durabilità alle loro opere straordinarie.

Fig. 8 - Vista interna della cupola del Pantheon nel centro della quale fu costruita un'apertura circolare (oculus) capace di illuminare tutto il tempio.



idealhard®
the best solution for your concrete floor

IDEAL JOINT SYSTEM®
giunto di costruzione – construction joint

La riuscita ottimale di una pavimentazione in calcestruzzo ha origine nelle soluzioni strutturali adottate, e si completa con un'idonea protezione superficiale.

Ideal Joint System è l'unico sistema brevettato per giunti di costruzione studiato per offrire al progettista un sistema sicuro per riprendere il trasferimento dei carichi tra le piastre in calcestruzzo con una semplice ed economica applicazione in opera. Grazie al sistema brevettato Ideal Joint System si eliminano sin dalla fase di progetto i rischi di danneggiamento e i conseguenti costi di ripristino. La gamma Ideal Joint System si compone di giunti adatti ad ogni vostra esigenza di progettazione.

Ideal Hard è un'esclusiva soluzione chimica incolore che incrementa la resistenza delle superfici in calcestruzzo soggette ad intenso traffico veicolare quali: magazzini, centri logistici, stabilimenti produttivi, hub aeroportuali.
IDEAL HARD penetra in profondità nelle superfici in calcestruzzo per sigillarle, densificarle, indurirle e renderle meno permeabili all'acqua. I pavimenti trattati con IDEAL HARD si mantengono più a lungo, costano meno in manutenzione e garantiscono la caratteristica antipolvere per moltissimi anni. (Garanzia antipolvere 10 ANNI).

La vostra abilità di progettisti e la tecnologia **Ideal Work**: l'unione fa la forza.

Sistema di Qualità
Aziendale Certificato

Ideal WORK S.r.l.
Via Kennedy, 52 31030 Vallà di Riese Pio X (TV) Italia Tel. (+39) 0423 4535 - Fax. (+39) 0423 748429
www.idealwork.it info@idealwork.it

longrine 04 90 14 48 48 - (9558 - 11/07)
pozzi.giulio@tin.it 01/08

Un disarmante vegetale per i calcestruzzi estetici e architettonici.

Soluzione della ricerca **CHRYSO®** sui disarmanti di origine vegetale in emulsione, **CHRYSO®Dem Ekla 12** consente di coniugare prestazione tecnica, estetica, rispetto dell'utilizzatore e dell'ambiente. **CHRYSO®Dem Ekla 12** fornisce i seguenti vantaggi:

- finiture di grande qualità
- facilità d'impiego e ottimizzazione dei consumi
- protezione delle casseforme
- utilizzo senza rischi per l'applicatore e l'ambiente.

CHRYSO®Dem Ekla 12 è la soluzione ideale per il disarmo dei vostri calcestruzzi estetici ed architettonici.

CHRYSO: abbiamo le soluzioni per costruire il futuro che immaginate.

CHRYSO ITALIA SPA - Via Madonna - 24040 Lallio (BG) Italy - Tel. +39 035 69 33 31 - Fax +39 035 69 36 84 - info@ chrysoitalia.com

CHRYSO

LA CHIMICA AL SERVIZIO DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

www.chrysoitalia.com

GIOVANNI CURIONI

Profilo di un maestro e di uno storiografo

Prof. Angela Mazzé
Storia dell'Arte moderna, Università degli Studi di Palermo
mazze@unipa.it

Giovanni Curioni

Per gli allievi ingegneri del secolo scorso, le biblioteche della Facoltà di Ingegneria e di Architettura, dei collezionisti e dei bibliofili di testi scientifici, possedere qualche esemplare della produzione storiografica di Giovanni Curioni equivale ad un segno di peculiare distinzione culturale.

Chi scrive non ha avuto l'onore di conoscere (fino ad oggi) i suoi testi. Il "ritrovamento" bibliografico acquista, quindi, il sapore di una iconica scoperta "archeologica" la cui atemporalità spiega, da sola, la valenza culturale dei contenuti e del metodo espositivo che a fatica, a nostro parere, possono essere definiti entrambi obsoleti.

L'indirizzo umanistico ha veicolato la sottoscritta all'indagine storico-artistica "inoculata" dalla curiosità di altro.

Il recente approccio storico con "altro" (che non ha riguardato arte figurativa, plastica o architettonica) è stato rivolto ad una ricerca correlata alle malte (1). Questa esperienza ha agito da volano per far la conoscenza con studiosi di oggi e di ieri. Se il calendario scandisce inesorabilmente il fluire del tempo e tenta di disintegrare (talvolta) le erculee colonne della memoria scientifica, la qualità della cultura tecnologica rimane immutata. E ciò, a nostro parere, è accaduto al Curioni (2), prototipo della risorsa scientifica nel campo accademico. La sua vocazione didattica (e dottrinale) ha scongiurato di far erigere le barriere dell'incomunicabilità anche tra i profani delle discipline ingegneristiche.

La stesura metodologica del Curioni è intellegibile nella sua fruizione tecnico-scientifica. Alla *concinnitas* della scrittura si adegua la *soliditas* dei contenuti, la *pulchritudo* degli argomenti esaminati. Un'offerta metodologica gestita sulla storia della tecnica e della ricerca costantemente tenuta, quest'ultima, sotto riscontro.

Diciassette anni di militanza professionale e didattica hanno contribuito certamente a canalizzare dentro gli argini dell'indagine sperimentale, analitica e tecnica il magistrale impegno didattico del Curioni, il quale fu sempre vocato alla divulgazione delle invenzioni tecnologiche. Egli interpreta la coesione "modulare" dell'ingegnere-architetto: *ésprit de finesse ed ésprit de geometrie ne connotano la spiritualità intellettuale*.

Come si legge sui frontespizi dei suoi libri, Curioni è «Ingegnere, Architetto e Dottore aggregato al Collegio della Facoltà di Scienze fisiche e matematiche della R. Università di Torino, addetto al personale insegnante delle Scuole d'applicazione per gli Ingegneri e dell'Istituto Tecnico di Torino, Professore titolare di geometria pratica e costruzioni nel R. Istituto industriale e professionale di Torino, Membro ordinario presidente della Società reale d'Agricoltura, Industriale e Commercio. Membro effettivo, presidente della Società degli Ingegneri e degl'Industriali di Torino, Socio onorario dell'Associazione di conferenze di Matematiche pure ed applicate di Napoli. Professore di Costruzioni civili, stradali ed idrauliche nella R. Scuola d'applicazione per gli Ingegneri».

Persino l'abilità espositiva delle pratiche manuali rende meno ostico l'apprendimento delle discipline afferenti alla scienza delle costruzioni.

I procedimenti teorici, correlati ai risultati delle ricerche sperimentali sui materiali e sui prototipi, sono commisurati alla metodologia della ricerca applicata alla direzione ed alla operatività .

L'ambizioso programma bibliografico, condotto con metodicità e consapevolezza didascalica, ha fornito all'utenza scientifica (ed accademica), un'imponente ricchezza di idee e di concetti, di norme e di postulati orientati tutti ad un obiettivo: lo studio dei materiali per la progettazione edilizia basato sul rispetto dell'ambiente e del paesaggio, dell'economia e soprattutto della regola d'arte.

La cultura globalizzante del Curioni schiude il panorama delle discipline-base per la formazione dell'ingegnere edile, civile, meccanico ed idraulico. La sua fisionomia si distingue, altresì, per l'imprenditorialità calibratamente rivolta alle novità tecnologiche.

Le parole tuttavia non bastano: è indispensabile rubricare i contenuti della scrittura anamnestico-scientifica di Curioni per focalizzare le peculiarità meccaniche, tecniche e strutturali dei contenuti basate sulla norma, sul metodo e sulle innovazioni tecnologiche.

L'equa distribuzione delle competenze teoriche e tecniche, indirizzate individualmente (e universalmente) ai professionisti ed agli operatori dell'edilizia, della meccanica e dell'idraulica, schiude la finestra sul variegato panorama della esperienza e della competenza (e/o della professionalità) alle quali l'A. riconosce individualmente il valore deontologico.

Maestro ed esteta della scrittura scientifica e tecnologica, il Curioni rimane, a nostro parere, l'icona della divulgazione sperimentale nel campo dell'ingegneria tecnica. Il battesimo storiografico reca la data del 1862, anno della pubblicazione del *Corso di geometria pratica*, una poderosa ricerca che consta di 17 tavole comprensive di 190 figure. La pratica disciplinare della ricerca storiografica affronta il problema correlato alle «operazioni di tracciamento e di misura <che> costituiscono l'oggetto della Geometria pratica applicata all'arte del Costruttore, la quale abbraccia un complesso di problemi geometrici, le cui soluzioni attentamente deve studiare chiunque voglia apprendere e professare l'arte di costruire» (p. 5).

Trascorso un lustro, prende l'avvio la collana parcellizzata in sei tomi e recante il titolo *Arte di fabbricare*, una magistrale clonazione lessicale desunta da Francesco Milizia (3), il quale definisce Arte di fabbricare «l'arte di eseguire ogni sorta di edifici e di mettere in opera i differenti materiali convenienti alla lor costruzione. L'arte di fabbricare è distinta dall'architettura, e dalla scienza della costruzione. L'arte di fabbricare è nata dal bisogno, l'architettura dal piacere, la scienza della costruzione dall'uno e dall'altro, e dall'applicazione del calcolo».

Arte e non tecnica, è il titolo che campeggia come premessa e presentazione a tutti i sei volumi. Arte intesa come τεχή, ossia come capacità intellettuale, pratica e manuale, arte del fabbricare ma anche capacità di apprendere e di elaborare modelli e manufatti utili, belli e funzionali.

La raccolta ha anche il sottotitolo *Corso completo di istituzioni teorico-pratiche per gli ingegneri, per gli architetti, pei periti in costruzione e pei periti misuratori.* Alla tipologia del professionista il Curioni associa quella del perito, un attributo con il quale il trattatista emiliano Giuseppe Antonio Alberti (4) associa «un titolo che significa molto, perché significa un uomo ornato d'intelligenza, di dottrina, d'esperienza». La collana, che si compone di sei volumi, (interamente curata dall'editore torinese Augusto Federico Negro) si avvale dell'indispensabile corredo grafico (tavole e disegni) che in alcune ristampe risultano invece indicati come Appendice.

Il primo volume, *Materiali da costruzione e analisi dei loro prezzi*, pubblicato nel 1867, è come recita il sottotitolo, un «lavoro ad uso degli ingegneri, degli architetti, dei misuratori, degli imprenditori e di quanti si trovano applicati alla sorveglianza ed all'esecuzione di costruzioni civili, stradali ed idrauliche, utile agli studenti delle Scuole di Applicazione per gli ingegneri e dei Corsi tecnici per i periti in costruzione». Il volume è corredato di 15 tavole che includono 62 disegni.

Traspare, tra le righe della premessa, la deontologia del professionista e l'etica del Maestro: «i materiali da costruzione grandemente contribuiscono, secondo che sono di buona o di cattiva qualità, alla lunga durata ed al rapido deperimento degli edifici in cui vengono impiegati, e lo studio delle loro proprietà è senza dubbio di un'importanza somma per chi vuol apprendere le numerose dottrine sull'arte di fabbricare».

Curioni conferma la lezione del Milizia che recita (5): «Le varietà dell'arte del fabbricare provennero dalla varietà dei materiali messi in opera. Siccome i differenti generi di costruzione furono i primi modelli dell'architettura, così le differenti specie di pietre, di legni, e d'altri materiali furon le prime cause dell'arte di fabbricare».

La premessa del Curioni è una sorta di *memento* indirizzato non solo agli ingegneri, agli architetti, ai «periti in costruzione», agli «imprenditori» ma «persino agli stessi operai <i quali> devono ben conoscere i pregi e i difetti di tutti quei materiali che destinano a realizzare i loro progetti e che impiegano nell'esecuzione dei loro lavori, le alterazioni a cui possono andare soggetti ed il modo di comportarsi

sotto le azioni delle molteplici cause di distruzione a cui possono trovarsi esposti dopo il loro impiego» (p. 5).

Secondo una pertinente metodologia tecnica (e scientifica) il Curioni illustra il percorso didattico ed esplicativo: «…nell'intento di fare un lavoro utile nella pratica, alla prima parte, che tratta della qualità, dei difetti della preparazione e degli impieghi dei materiali da costruzione, una seconda … la quale abbraccia le norme per instituire le analisi dei loro prezzi» (p. 6).

E non solo: anche l'estrazione dei materiali costituisce uno dei capitoli chiave di tutto l'assunto tecnico. Ai costruttori, infine, ai quali è delegato il compito di «dover fabbricare con solidità, celerità ed economia» e realizzare un «lavoro utile nella pratica» (p. 6), il Curioni associa la sezione correlata alle «norme per istituire l'analisi …dei prezzi».

A tutti gli esperti, dunque, sono infatti indirizzate specificatamente le notizie storiche, le nozioni, i consigli pratici, le formule matematiche, i grafici esemplificativi atti a perfezionare l'esposizione lessicale di pertinenza.

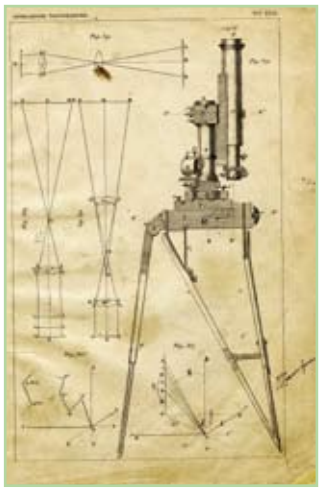
Una esemplificazione di chiarezza tecnica è fornita dalla descrizione della pozzolana «naturale o artificiale»: (6) «Le pozzolane naturali più energiche sono lave o deiezioni vulcaniche, più o meno antiche, modificate per l'azione del tempo e degli agenti naturali, e composte essenzialmente di silice, di allumina e di protossido di ferro, alle quali si uniscono accidentalmente la magnesia, la calce, la soda, la potassa, e probabilmente altri principi in quantità appena ponderabili. Le pozzolane artificiali sono costituite dalle terre cotte molto argillose, da alcune arene torrefatte, da schisti, da basalti e da grès ferruginosi, calcinati, da psamminiti schistoidi, da cenere di carbon fossile e di carbone vegetale, e talvolta anche di scorie».

Ancora più "semplice" (e peraltro comprensibile anche ai profani) è la chiara e concisa descrizione del calcestruzzo (7): «… è un miscuglio di malta idraulica con ghiaia e pietrame rotto. Questo materiale viene molto impiegato nello stabilimento di fondazioni subacquee; talora si adopera per fare delle muraglie e delle volte di getto; e ben soventi si usa nelle fabbricazioni di grossi macigni artificiali per opera di difesa nei fiumi, per scogliere nei porti, e per gettate a fondo perduto in quei luoghi in cui mancano le pietre naturali».

Tra i disegni didascalici va segnalato (per curiosità storica) il disegno 48 (Tav. XIII) raffigurante la fornace per *la cottura della pozzolana artificiale con impiego della legna o della torba o del carbon fossile come combustibile*.

Curioni si manifesta archetipo del moderno "imprenditore" della cultura accademica: egli, con la rara capacità di coniugare scienza della comunicazione e tecnologia dei materiali, ha agevolato l'approccio alla stratificata categoria degli operatori (dal capo maestro all'allievo-ingegnere).

L'anno successivo 1868 pubblica il volume intitolato *Lavori generali di architettura civile, stradale ed idraulica. Analisi dei loro prezzi*. Identico –ancora una volta - è l'indirizzo del trattato in cui è focalizzata la norma vitruviana della *solidità*. Il Curioni reitera, ancora una volta nella prefazione: «… non si hanno fabbriche ben edificate, se le opere eseguite a seconda di certe regole dirette ad ottenere disposizioni opportune. Queste regole devono essere studiate da chi vuol apprendere e praticamente professare l'arte di ben costruire, ed è indispensabile che, per quanto è nei rispettivi attributi, siano ben note agli ingegneri, agli architetti, ai periti in costruzione (8), agli imprenditori e persino agli stessi operai».



Giovanni Curioni - Tavola XXXI

Il tomo è corredato di XX tavole e 209 disegni. Interessanti, e di conseguenza, degni di essere segnalati, sono i disegni 119 (*Costruzione dei muri in calcestruzzo all'asciutto*), 120 e 121 (*Costruzione dei muri in c.s. sott'acqua*), 122 (*Costruzione di alti muri in c.s.*) e 195 (*Fondazione su platea generale di c.s.*), 201 e 202 (*Processo di fondazione ad aria compressa con cassone, e camera d'aria da adottare al camino d'estrazione per fare l'operazione per riempire il cassone di c.s.*), 206-209 (*Incamiciate in muratura di pietrame ed in c.s. da farsi alle rive dei rapidi corsi d'acqua*).

Reca l'anno 1869 il volume intitolato *Operazioni topografiche*, che nelle edizioni del 1884 e del 1894 acquisirà la titolazione *Corso di topografia* e sarà «ad uso delle Scuole Universitarie, per i periti agronomi e delle Accademie militari <e> utile agli addetti del Genio Civile e militari e al Catasto». Il Curioni non modifica tuttavia i contenuti di questo utile strumento didattico in cui, avverte, «ho cercato di esporre tutti quei quesiti pratici che ho creduto utili nelle operazioni aventi per iscopo la rappresentazione di una porzione di superficie terrestre, nelle più frequenti circostanze della pratica» (p. 5).

L'A. non trascura di aggiornare gli addetti ai lavori sui marchingegni innovativi, strumentazioni tecnologiche quali ad esempio il *clepsiclo* brevettato dal prof. I. Porro, di cui presenta l'agevolezza dell'uso e ne riproduce anche il disegno (fig. 372). Ancora più interessante e quindi degna di citazione, ne è la descrizione: «Fra tutti gli strumenti che si possono impiegare nelle operazioni di celerimensura, il *clepsiclo* del professore Porro è certamente quello che presenta maggiori vantaggi. La facilità di maneggio, la stabilità, la comodità e sicurezza nel trasporto ed i mezzi che questo strumento presenta per accertarsi dell'esattezza delle osservazioni, sono requisiti che dal lato pratico lo rendono eminentemente commendevole ed i quali valgono ad accreditarlo presso qualsiasi operatore, il quale per le operazioni planimetriche od altimetriche. Il suo uso, senza pericolo di errori e colla massima facilità permette di eliminare nelle operazioni sul terreno le misure dirette tanto fastidiose e lunghe, giacché gli ostacoli che per lungo tempo impedirono lo sviluppo dei procedimenti colla *stadia* trovansi felicemente e completamente superati in grazia dell'anellatismo e del forte ingrandimento del cannocchiale. La molteplicità degli oculari e dei fili micrometrici notevolmente contribuiscono a mantenere i risultati delle diverse operazioni nei limiti d'un'approssimazione superiore a quella che finora è stato possibile raggiungere cogli altri strumenti topografici; e le varie parti del *cleps* trovansi tutte indistintamente disposte nel modo il più razionale ed il più conveniente per arrivare speditamente a risultati sempre accettabili e buoni.

Concludendo sulla convenienza della celerimensura e sui pregi del *clepsiclo*, francamente si può asserire che la celerimensura, sia dal lato teorico che dal lato pratico, costituisce un sistema di rilievo il quale riunisce in sé tutte le doti di speditezza e di precisione, che merita di essere studiata con molta cura da chi si dedica alle operazioni di rilevamento; che minutamente deve essere spiegata in tutte le scuole d'ingegneria, non che in quelle altre d'ordine inferiore in cui si insegna l'arte di rilevare i terreni; e che il *clepsiclo* del professore Porro è attualmente il migliore degli strumenti per le operazioni di celimensura».

Nel 1879 Curioni pubblica l'*Appendice all'Arte del fabbricare*, una sorta di aggiornamento dei «moderni progressi dell'Arte edificatoria» (p. VI).

Nel sesto ed ultimo volume dell'*Appendice*, edito nel 1884, intitolato *Risultati di esperienze sulle resistenze dei materiali da costruzione e sulle loro deformazioni* l'A. reitera l'assunto dell'argomentazione pratica correlata alle «resistenza dei nuovi materiali atti alla fabbricazione e le resistenze dei materiali di nota qualità, ma provenienti da cantieri e da stabilimenti di recente impianto, od anche solo preparati o lavorati con processi ritenuti differenti da quelli generalmente usati. I produttori dei materiali, prosegue l'A., per soddisfare alle esigenze dell'arte edificatoria, e più ancora le grandi case costruttrici, gli esecutori di lavori di costruzioni civili, stradali ed idrauliche, e gli ingegneri preposti alla direzione ed all'esecuzione di queste costruzioni, hanno impellente bisogno di conoscere le resistenze dei prodotti dei loro stabilimenti e di quelle dei materiali che devono o vogliono impiegare» e da "testare" nel «laboratorio d'esperimentazione … annesso alla Scuola d'Applicazione degli Ingegneri di Torino» (pp. 5-6).

Ancora una volta il Curioni espone le fasi della enunciazione metodologica da mettere a punto: «si darà prima una descrizione e si cercherà di far conoscere l'uso della macchina colla quale le dette esperienze furono e saranno restituite. In seguito, con note successivamente numerizzate, si daranno i risultati di diverse serie di esperienze; e riportando tali risultati, si accennerà alla preparazione dei saggi ed alle disposizioni state adottate per sottoporle ad esperimento» (p. 6).

La resistenza dei materiali da sottoporre agli esperimenti di «elasticità» sono «impasti con calci e cementi, i laterizi, le pietre, i legnami ed i metalli» (p. 6).

Questa è l'ultima fatica storiografica del Maestro il quale, presumibilmente, a distanza di pochi mesi (o giorni) dalla pubblicazione dell'ulteriore fatica scientifica, conclude con il suicidio (1 febbraio 1887) l'intenso ed indiscusso onere culturale.

Ancora oggi qualsivoglia operatore è consapevole di poter trovare in ogni tomo dell'*Arte del fabbricare* tutte (o quasi tutte) le risposte pertinenti ad ogni quesito.

Da parte nostra abbiamo tentato di condurre una'analisi filologica e storica dei suoi impegnativi scritti: una più degna analisi critica da parte degli esperti, conferirà certamente una collocazione più appropriata per far fruire, con adeguato rigore accademico, gli orientamenti metodologici correlati all'indagine ed all'aggiornamento promossi dal Curioni.

NOTE

(1) Cfr. A. Mazzè, Calcestruzzo, pozzolana lava. Storiografia delle fonti, Palermo 2007.

(2) L'esaustiva scheda bio-bibliografica è reperibile nel Dizionario biografico degli italiani, Roma 1985, vol. 31, pp. 451-453, scheda a cura di B. Signorelli.

(3) Cfr. Dizionario delle belle arti del disegno, ed. cit., Bassano 1797, p. 251.

(4) Cfr. Istruzioni pratiche per l'ingegneria civile o sia perito agrimensore e perito d'acque, Venezia 174 8, p. IX.

(5) Cfr. Dizionario …cit., p. 252.

(6) G. Curioni Materiali da costruzione e analisi dei loro prezzi, Torino 1867, cap. VI, p. 107: Pozzolane e loro distinzione in naturali e artificiali.

(7) G. Curioni, Materiali da costruzione e analisi dei loro prezzi, cit., cap. IX, p. 146: Calcestruzzo e sua distinzione in grasso e magro.

(8) Va ricordato, per inciso, che F. Milizia, Dizionario… cit. definisce «costruzione… l'arte di disporre i materiali nelle fabbriche. Onde quest'arte comprende quelle del muratore, del falegname, dell'ebanista, del ferraio ecc.».

CALCESTRUZZO: DURABILITA' ANCHE IN CINA

Dal 25 al 27 Novembre 2008 si è svolto in Cina, presso l'Università di Zhejiang ad Hangzhou, una conferenza internazionale sulla durabilità delle strutture in calcestruzzo. Hanno partecipato alla conferenza oltre 150 tecnici delle Università e delle Industrie che operano nel settore del calcestruzzo in Cina.

Sono state presentate circa 40 relazioni delle quali 6 di relatori invitati dall'Europa e dal Giappone: Basheer (Gran Bretagna), Collepardi (Italia), Nilsson (Svezia), Wittmann (Germania), Ueda e Tomosawa (Giappone). La Conferenza si è conclusa con una tavola rotonda dei 6 relatori coordinata dal Prof. Wei-liang Jin della locale Università di Zhejiang.

Partecipanti alla Conferenza: in prima fila al centro gli oratori europei e giapponesi "invited speakers"

L'argomento più dibattuto in questa conferenza ha riguardato la durabilità a lungo termine (almeno 100 anni) di infrastrutture in c.a. esposte ad ambienti molto aggressivi. In particolare, sono stati presentati modelli per determinare la composizione del calcestruzzo di opere marittime e di autostrade in alta montagna.

In occasione di questa Conferenza è stato presentato l'edizione Cinese del libro "***The New Concrete***" del Prof. Mario Collepardi recentemente pubblicato in Cina con la traduzione a cura del Prof. Shuahua Liù dell'Università di Wuhuan .

RICORDO DI UN AMICO

Collegi ed amici,

Pietro Pedeferri ci ha lasciato. E' scomparso in meno di un mese dalla diagnosi del suo terribile male. Chi ha avuto la fortuna di conoscere la sua generosità e di apprezzare le sue qualità di scienziato e di artista, non può che piangere per la sua dipartita.
A sua moglie Marina e a sua figlia Maria Pia le condoglianze di Enco Journal e mie personali.

Mario Collepardi

Master in Ingegneria del Calcestruzzo (MIC)

6 Moduli con 60 lezioni tra Febbraio e Novembre 2009

CONTENUTO DEI MODULI

Primo Modulo (12 lezioni): Tecnologia del calcestruzzo in conformità alle Norme Tecniche per Costruzioni
Secondo Modulo (6 lezioni): Strutture in calcestruzzi speciali
Terzo Modulo (12 lezioni): Diagnosi del degrado e restauro delle strutture in c.a.
Quarto Modulo (12 lezioni): Mix-design del calcestruzzo preconfezionato e prefabbricato
Quinto Modulo (12 lezioni): Pavimentazioni industriali in calcestruzzo
Sesto Modulo (6 lezioni): Certificazione del processo produttivo del calcestruzzo industrializzato (FPC)

Calendario delle lezioni del MIC

Febbraio-Marzo 2009

16-17 Febbraio: Modulo 1
18 Febbraio: Modulo 2
19-20 Febbraio: Modulo 3
16-17 Marzo: Modulo 4
18-19 Marzo: Modulo 5
20 Marzo: Modulo 6

Ottobre-Novembre 2009

26-27 Ottobre: Modulo 1
28 Ottobre: Modulo 2
29-30 Ottobre: Modulo 3
16-17 Novembre: Modulo 4
18-19 Novembre: Modulo 5
20 Novembre: Modulo 6

DOCENTI DEL MIC

Mario Collepardi, già Professore del Politecnico di Milano, coordinatore del corso
Ing. Silvia Collepardi, Enco, Engineering Concrete
Geol. Emanuela Nunzia Croce, Enco, Engineering Concrete
Prof. Romeo Fratesi, Università Politecnica delle Marche
Ing. Giuseppe Marchese, Calcestruzzi SpA, Gruppo Italcementi, Bergamo
Prof. Alberto Meda, Facoltà di Ingegneria, Università di Bergamo
Prof. Giacomo Moriconi, Università Politecnica delle Marche
Ing. Francesca Simonelli, Enco, Engineering Concrete
Ing. Roberto Troli, Enco, Engineering Concrete

Sede del corso: ENCO, Ponzano Veneto (TV), Via delle Industrie 18/20

Segreteria del Corso: Mara Meneghel, Tel. 0422 963 771, Fax 0422 963 237, info@encosrl.it

ARGOMENTI TRATTATI

1° Modulo: Tecnologia del calcestruzzo in conformità alle NTC

- Cementi. Inerti. Additivi chimici ed aggiunte minerali. Calcestruzzo fresco: lavorabilità, perdita di lavorabilità, bleeding e segregazione. Calcestruzzo indurito: resistenza caratteristica, durabilità, ritiro, deformazione viscosa. Messa in opera e stagionatura del calcestruzzo. Influenza della temperatura sulle proprietà del calcestruzzo: getti in climi freddi e caldi. Maturazione a vapore. Prescrizioni di capitolato in accordo alle Norme Tecniche per le Costruzioni.

2° Modulo: Strutture in calcestruzzi speciali

- Calcestruzzi al alta resistenza meccanica, autocompattanti, leggeri, fibrorinforzati, a ritiro compensato, proiettati (Spritz Beton - Shotcrete), polimero-impregnati (PIC), a durabilità secolare, riciclati.

3° Modulo: Diagnosi del degrado e restauro delle strutture in c.a.

- Il degrado del calcestruzzo armato. Calcestruzzi speciali per il restauro. Diagnosi del degrado nelle strutture in calcestruzzo. Il restauro delle opere in calcestruzzo. Introduzione ai materiali FRP. Le fibre in carbonio, in aramide ed in vetro. Le resine epossidiche. I materiali compositi e determinazioni delle caratteristiche meccaniche. L'impiego dell'FRP nel restauro delle opere in c.a.. Calcolo del rinforzo degli elementi inflessi con il metodo agli stati limite. Esempi di applicazione degli FRP nel rinforzo strutturale. Applicazione dei rinforzi in FRP nel restauro degli edifici danneggiati dal sisma.

4° Modulo: Mix-Design del calcestruzzo preconfezionato e prefabbricato

- Lavorabilità e calcolo della perdita di lavorabilità in funzione delle condizioni ambientali, dell'umidità degli inerti e dell'impiego di additivi. Proprietà meccaniche a compressione, flessione e trazione alle brevi ed alle lunghe stagionature. Influenza della temperatura sul decorso della resistenza meccanica. Proprietà elastiche. Durabilità del calcestruzzo. Prevenzione del degrado in accordo alle Norme Europee EN 206 ed UNI 11104. Il ritiro del calcestruzzo come materiale e calcolo del ritiro nella struttura. Deformazione viscosa del calcestruzzo e calcolo dello scorrimento viscoso delle strutture in c.a. Combinazione degli inerti. Esercitazioni con il software CMD 2007 per l'elaborazione automatica del mix-design.

5° Modulo: Pavimentazioni industriali in calcestruzzo

- Modello di interazione terreno-sottofondo. Classifizazione dei terreni. Resistenza a trazione per flessione: normativa per il calcolo del modulo di rottura. Resistanza a fatica e fattori di sicurezza per il progetto delle pavimentazioni. Classificazione dei carichi uniformemente distribuiti e carichi concentrati su piedritti e ruote veicolari. Dimensionamento dei giunti di contrazione: ritiro plastico e igrometrico. Esempi pratici di giunti di contrazione: calcolo dell'armatura metallica, imbarcamento dei pavimenti, barriera a vapore. Giunti di isolamento e di costruzione. Esame dei difetti nei pavimenti.

6° Modulo: Certificazione del processo produttivo del calcestruzzo industrializzato (FPC)

- Il processo produttivo del calcestruzzo preconfezionato: dal mescolamento alla posa in opera. Depositi dei componenti: tramogge, sili e cisterne. Dosatori per le materie prime: cementi, cenere volane, inerti, additivi. Impianto di produzione. La preparazione del Manuale di Controllo del Processo Produttivo in accordo con le Linee Guida sulle "famiglie" di Calcestruzzo Preconfezionato. Software per il mix design finalizzato ai tecnologi del calcestruzzo preconfezionato: dalle caratteristiche del calcestruzzo fresco ed indurito alla elaborazione delle ricette. Software per i responsabili della produzione: controllo della umidità degli inerti e correzione delle pesate; vagliatura degli inerti e loro combinazione. Software per i venditori: prescrizione del calcestruzzo in accordo alla norma UNI 11104.

Materiale didattico: copia informatica delle Norme Tecniche sulle Costruzioni (D.M. 14 Gennaio 2008) e cinque libri tutti editi da ENCO:

- Il nuovo calcestruzzo
- Mix design del calcestruzzo
- Il calcestruzzo vulnerabile
- Pavimentazioni industriali in calcestruzzo
- Controllo del processo produttivo del calcestruzzo

Materiale informatico: Software Easy & Quick 2009 per il Modulo 1, CMD 2009 per i Moduli 4 e 6.

Requisiti per la partecipazione ai Moduli del MIC

Tutti possono partecipare a uno o più Moduli del MIC; tuttavia il numero dei partecipanti è limitato. Verrà rilasciato un attestato di partecipazione per ciascun Modulo.

Requisiti per conseguire il Master in Ingegneria per il Calcestruzzo

- Si richiede una Laurea di primo o secondo livello in una delle seguenti discipline: Ingegneria, Architettura, Geologia, Fisica, Chimica, Chimica Industriale, Scienza dei Materiali.
- Per i diplomati in discipline tecniche il conseguimento del MIC è subordinato ad una preliminare valutazione del loro curriculum professionale.
- Per il conseguimento del MIC è necessario partecipare a tutti i 6 Moduli anche se la frequenza è distribuita nell'arco dei mesi tra Febbraio e Novembre: è possibile, cioè, frequentare parte dei Moduli nel periodo Febbraio-Marzo completando la frequenza nel periodo Ottobre-Novembre 2009.
- La partecipazione ad alcuni Moduli nell'anno 2008 potrà essere riconosciuta in forma di crediti a chi completerà la partecipazione dei 6 Moduli nel 2009.

Recupero dei crediti

Se il candidato al Diploma del MIC ha già frequentato nel periodo 2007-2008 corsi omologhi, in lingua italiana o inglese, presso ENCO o altri Organismi di consolidata qualificazione (come per esempio ASCI e ATECAP, AIMAT) sugli argomenti di alcuni moduli del MIC, verranno riconosciuti i relativi crediti e non è necessaria la partecipazione a questi Moduli. Rimane, tuttavia, l'obbligo dell'esame per il conseguimento del diploma in MIC secondo le modalità sopra indicate.

Diploma di Master in Ingegneria per il Calcestruzzo (MIC)

Il diploma di MIC sarà rilasciato a chi sostiene e supera un esame in date da concordare, dopo aver partecipato a tutti i 6 Moduli del corso.

Costo (IVA esclusa):

- 700 € per ciascuno dei Moduli da 12 lezioni;
- 400 € per ciascuno dei moduli da 6 lezioni;
- 350 € di supplemento per il Modulo 4 e 6 solo se si acquista il software CMD 2009;
- 3200 € partecipazione a tutto il MIC + 3500 € partecipazione a tutto il MIC (con software);

sconto del 10% per ogni partecipante in più della stessa azienda.

Servizi inclusi nel costo: bus navetta albergo-sede del corso e ritorno, 2 coffee break e 1 pranzo a buffet per ogni giorno, lezioni in aula, esercitazioni in laboratorio e di gruppo.

Alloggi: cerca la lista sul sito www.encosrl.it

DEGRADO E DURABILITA' DI OPERE IN C.A. IN AMBIENTE MARITTIMO

Silvia Collepardi e Roberto Troli
Enco srl, Ponzano Veneto (TV)
info@encosrl.it - www.encosrl.it

INTRODUZIONE: IL MODELLO OLISTICO

Secondo il modello olistico proposto da Mehta (1) un calcestruzzo ben progettato, adeguatamente compattato, e ben stagionato continua a essere sostanzialmente impermeabile e durabile finché i pori capillari interni e le micro-fessure superficiali non diventano interconnessi.

A causa di questo meccanismo, che provoca una graduale perdita della impermeabilità all'acqua del calcestruzzo, ha inizio e si propaga il danno delle strutture in C.A. a seguito della penetrazione, attraverso la porosità interconnessa, degli agenti aggressivi presenti in ambiente marittimo: l'acqua, l'aria e gli ioni cloruro (Cl^-) e solfato ($SO_4^=$),. Il degrado delle strutture in C.A. in ambiente marino coinvolge tutti e tre i componenti della struttura in C.A. (armature metalliche, pasta di cemento e aggregati lapidei) a seguito delle interazioni degli ioni aggressivi presenti nell'acqua di mare:

- lo ione Cl^- provoca la corrosione dei ferri di armatura;
- lo ione $SO_4^=$ attacca la pasta di cemento.

A causa del carattere espansivo che accompagna entrambi i processi di degrado - per la interazione dei componenti delle strutture in C.A. da una parte, e gli ioni aggressivi dall'altra - gli effetti del degrado si esplicano in forma di fessurazione sulla superficie, di espulsione di parti di calcestruzzo, di perdita di resistenza meccanica del calcestruzzo e di aumento della porosità interconnessa. Tutti questi fenomeni fanno aumentare ulteriormente la permeabilità all'acqua di mare e quindi le strutture in C.A., dopo un periodo detto "dormiente" durante il quale il degrado è nullo o trascurabile, diventano sempre più vulnerabili. Mehta definisce olistico questo processo in quanto il degrado coinvolge tutti i componenti della struttura in C.A. e ad esso contribuiscono diversi fattori quali la porosità interna, le micro-fessurazioni pre-esistenti in superficie, la presenza dell'acqua e l'esposizione agli agenti aggressivi.

A causa del carattere espansivo che accompagna entrambi i processi di degrado - per la interazione dei componenti delle strutture in C.A. da una parte, e gli ioni aggressivi dall'altra - gli effetti del degrado si esplicano in forma di fessurazione sulla superficie, di espulsione di parti di calcestruzzo, di perdita di resistenza meccanica del calcestruzzo e di aumento della porosità interconnessa. Tutti questi fenomeni fanno aumentare ulteriormente la permeabilità all'acqua di mare e quindi le strutture in C.A., dopo un periodo detto "dormiente" durante il quale il degrado è nullo o trascurabile, diventano sempre più vulnerabili. Mehta definisce olistico questo processo in quanto il degrado coinvolge tutti i componenti della struttura in C.A. e ad esso contribuiscono diversi fattori quali la porosità interna, le micro-fessurazioni pre-esistenti in superficie, la presenza dell'acqua e l'esposizione agli agenti aggressivi.

Secondo il modello olistico, anche un calcestruzzo inizialmente integro a tempi più o meno lunghi si può degradare se esistono le condizioni sopra descritte che coinvolgono l'interno del calcestruzzo più o meno poroso e l'ambiente esterno più o meno aggressivo cui la struttura in C.A. è esposta.

Un modo alternativo per rappresentare il modello olistico (2) viene presentato in questo articolo allo scopo di sottolineare l'importanza dei seguenti parametri per garantire la durabilità delle strutture in C.A.:

- il rapporto acqua/cemento (a/c) adottato per favorire la impermeabilità del calcestruzzo;
- il tipo di cemento impiegato per confezionare il conglomerato;
- lo spessore del copriferro progettato per proteggere i ferri di armatura;

La Fig. 1 presenta schematicamente l'approccio olistico per spiegare in generale il degrado delle strutture in C.A. indipendentemente della specifica presenza di agenti aggressivi. Questa rappresentazione si basa sull'esame di tre importanti fattori nel determinare il degrado delle strutture in C.A. La Fig. 1 mostra, con l'ausilio di un diagramma ternario, la coesistenza di questi tre fattori in mancanza di uno dei quali il degrado non avviene:

I) porosità interconnessa;

II) esposizione ad ambienti aggressivi;

III) presenza di acqua.

La porosità interconnessa è correlata non solo con le mi-

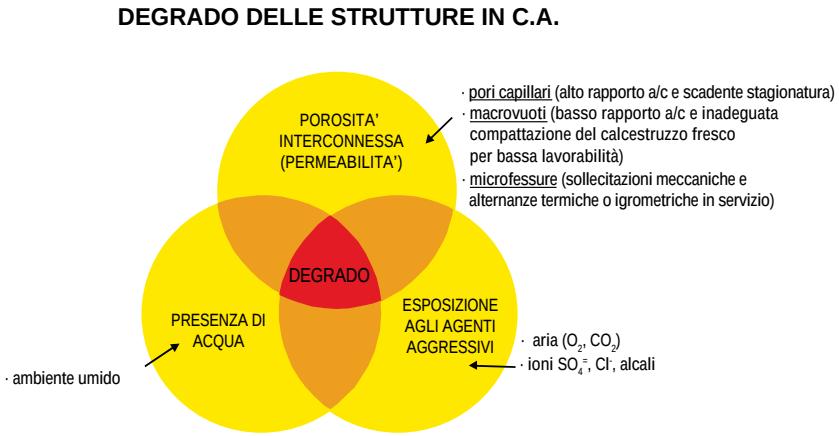


Fig. 1 - Rappresentazione ternaria del degrado di strutture in c.a.

cro-fessure provocate dalle azioni ambientali (ritiro e sollecitazioni meccaniche), ma anche con la porosità capillare della matrice cementizia (che aumenta con il rapporto a/c e con la mancanza di una stagionatura umida iniziale), e con la presenza di macrovuoti creati da una incompleta compattazione specialmente se i calcestruzzi sono poco lavorabili.

L'esposizione ad ambienti aggressivi, nel caso di un ambiente marino, è correlata con la presenza di tre agenti aggressivi: il cloruro che corrode i ferri, il solfato che distrugge la consistenza della matrice cementizia e il sodio che provoca la reazione alcali-silice.

La presenza di acqua è correlata con la penetrazione dell'acqua dall'ambiente che, soprattutto se intermittente e non continua, può provocare il degrado delle strutture in C.A.; l'acqua può essere di per sé un agente aggressivo, come avviene nei cicli di gelo-disgelo, o può concorrere al processo di meccanismi di degrado in combinazione con altri agenti aggressivi come l'anidride carbonica (CO_2) e l'ossigeno (O_2) dell'aria, gli ioni solfato e il Cl^-. Inoltre, l'acqua agisce da liquido che trasporta gli agenti aggressivi dall'ambiente verso l'interno del calcestruzzo attraverso la porosità interconnessa.

Nella Fig. 1 sono rappresentati tre cerchi con fondo giallo ciascuno dei quali rappresenta separatamente i tre fattori sopra menzionati. Ciascuna area dei tre cerchi rappresenta la situazione dove esiste solo uno tre i fattori che, se insieme, provocano il degrado. L'area arancione della Fig. 1 corrisponde alla sovrapposizione di due dei tre cerchi e indica la coesistenza di due tra i tre fattori e neppure questa neppure questa corrisponde al degrado della struttura. Solo l'area in mezzo al grafico, colorata in rosso, rappresenta un grave rischio di degrado perchè coesistono tutti e tre i fattori necessari al degrado: porosità interconnessa, ambiente aggressivo e presenza di acqua. In a senza di uno solo di questi fattori il degrado non può avvenire. Per esempio, se l'ambiente è aggressivo per la presenza di solfato e nel calcestruzzo la porosità è interconnessa e quindi il degrado non può avvenire se manca l'acqua in assenza della quale gli agenti aggressivi non possono migrare dall'ambiente verso l'interno della struttura in C.A. ancorché questa sia permeabile.

CORROSIONE DEI FERRI DI ARMATURA

Applicando i criteri generali mostrati nella Fig. 1 allo specifico degrado delle strutture in C.A. provocato dalla corrosione dei ferri di armatura si individuano i seguenti tre parametri mostrati nella Fig. 2:

- depassivazione dell'acciaio;
- diffusione dell'ossigeno dall'aria;
- presenza intermittente dell'acqua.

Di seguito sono illustrati in dettaglio questi tre parametri.

Depassivazione dell'acciaio

Prima che abbia inizio la corrosione, i ferri di armatura sono coperti in superficie da una sottilissima pellicola, impermeabile all'ossigeno e all'acqua, e per questo protettiva dell'acciaio dalla corrosione. Questo stato dell'acciaio è garantito dall'ambiente basico (PH > 11) del calcestruzzo dovuto alla formazione di calce - $Ca(OH)_2$ - che si forma per reazione del cemento con l'acqua di impasto. Questo stato dell'acciaio prende il nome di passivazione in quanto in queste condizioni la corrosione non può avvenire. Ci sono due condizioni perché il benefico stato di passivazione dell'acciaio sia distrutto e si manifesti la depassivazione:

a) presenza di cloruro;

b) abbassamento del PH al di sotto di 11.

La depassivazione può avvenire a quando i cloruri, presenti in acqua di mare, vengono in contatto con la superficie dell'acciaio dopo aver attraversato tutto il copriferro. In presenza degli ioni Cl^- la pellicola protettiva viene distrutta e l'acciaio diventa potenzialmente corrodibile.

La depassivazione può anche avvenire in assenza del cloruro per effetto dell'anidride carbonica (CO_2) penetrata

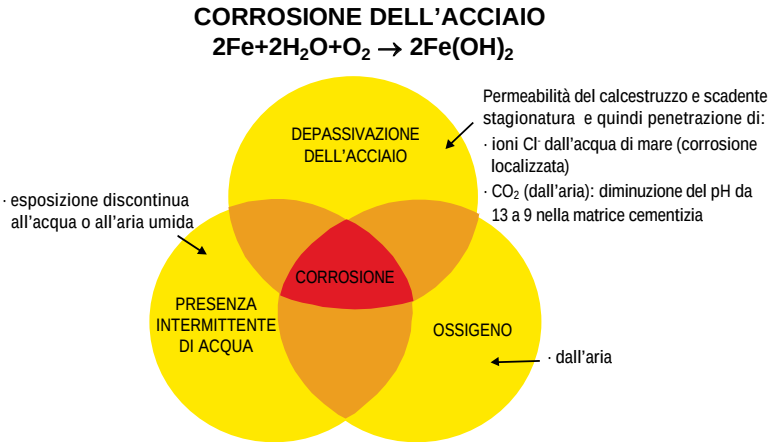


Fig. 2 - Rappresentazione ternaria della corrosione delle armature metalliche nelle strutture in c.a.

dall'aria che neutralizza la presenza della calce presente nella pasta di cemento con una reazione che prende il nome di carbonatazione:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \Longrightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad [1]$$

A seguito del processo di carbonatazione il PH scende da 13 a 9 e viene quindi a mancare il requisito (PH > 11) per la passivazione dell'acciaio. Quando l'anidride carbonica ha attraversato tutto il copriferro e il fronte della carbonatazione ha raggiunto i ferri di armatura questi sono a rischio di corrosione.

La depassivazione provocata dalla presenza del cloruro è molto più rapida e pericolosa rispetto a quella provocata dalla carbonatazione. Pertanto il rischio di corrosione delle strutture in ambiente marino è maggiore di quello delle strutture esposte genericamente all'aria. Questo diverso comportamento è dovuto al fatto che la corrosione indotta dalla presenza del cloruro è molto più incisiva e capace di provocare una localizzata riduzione della sezione (nota come pitting corrosion) delle armature metalliche. Al contrario, la corrosione indotta dalla carbonatazione procede in modo più uniforme e quindi non si verificano le pericolose riduzioni localizzate dei ferri di armatura.

Il tempo in corrispondenza del quale inizia la depassivazione dipende dalla porosità interconnessa (cioè dalla permeabilità) presente nel calcestruzzo, dallo spessore di copriferro, e dalla velocità di penetrazione della pasta cementizia dal cloruro o dall'anidride carbonica. Questo tempo è chiamato periodo dormiente o di induzione. Per prolungare il periodo di induzione, e quindi ritardare il processo di corrosione, per un tempo di almeno 50 anni, la norma europea UNI EN 206 e l'Eurocodice 2 richiedono rispettivamente queste due importanti misure:

- il rapporto acqua/cemento non deve superare 0,45 per strutture in C.A. che sono in diretto contatto con acqua di mare e 0,50 per quelle lontane dal mare o genericamente esposte all'aria umida;
- lo spessore di copriferro deve essere almeno 45 mm per strutture che sono in contatto del mare o sulla costa ed esposte al trasporto eolico della salsedine marina e 30 mm per strutture genericamente esposte all'aria umida.

Diffusione dell'ossigeno dall'aria

La Fig. 2 mostra che non necessariamente la depassivazione comporta la corrosione. Infatti, anche l'ossigeno e l'acqua sono necessari per alimentare il processo di corrosione che consiste nella trasformazione del ferro metallico (Fe) in ruggine cioè in idrossido ferroso, $Fe(OH)_2$:

$$Fe + O_2 + H_2O \Longrightarrow Fe(OH)_2 \qquad [2]$$

Quindi, la velocità di corrosione dell'acciaio depassivato dipende significativamente dalla permeabilità del copriferro all'aria, e pertanto il processo di corrosione [2] avviene con una velocità che dipende dalla diffusione dell'ossigeno dall'aria ambientale.

Presenza intermittente dell'acqua

La diffusione dell'ossigeno dall'aria non può avvenire, o avviene in misura trascurabile, in un matrice cementizia i cui pori sono sempre saturi di acqua, come si verifica in strutture marine permanentemente sotto l'acqua del mare. Per questo motivo, una presenza intermittente di acqua dovuta a una esposizione discontinua all'acqua di mare (come quella che si verifica nelle zone esposte al moto ondoso, agli spruzzi di acqua, e ciclicamente alle maree) è la condizione più favorevole per l'ingresso dell'aria, e quindi dell'ossigeno, nei periodi durante i quali i pori del calcestruzzo del copriferro non sono pieni di acqua. L'ingresso dell'aria è indispensabile per alimentare la corrosione dell'acciaio secondo il processo [2]. D'altra parte, nei periodi durante i quali i pori sono pieni di acqua marina può avvenire la penetrazione degli ioni Cl^- la cui presenza è necessaria per depassivare l'acciaio ed innescare la corrosione

Prevenzione della corrosione dell'acciaio strutture in C.A. a contatto con acqua di mare

Così come il calore fluisce dalla zona più calda con maggiore temperatura a quella con temperatura più bassa, anche la diffusione del cloruro avviene sotto la spinta di un gradiente di concentrazione (C) del Cl^- che è maggiore sulla superficie delle strutture a contatto con acqua di mare ed è minore nell'acqua all'interno dei pori. In determinate condizioni (come per esempio costanza della concentrazione del Cl^- sulla superficie e della porosità della matrice cementizia) la diffusione del cloruro avviene secondo la seconda legge di Fick (3):

$$\partial C / \partial t = D\,(\partial^2 C / \partial x^2) \qquad [3]$$

dove t è il tempo impiegato dal Cl^- per attraversare lo spessore x di calcestruzzo caratterizzato da un coefficiente di diffusione D che è tanto maggiore quanto maggiore è la porosità interconnessa del calcestruzzo. Il valore di D diminuisce al diminuire del rapporto a/c e all'aumentare dal tempo di stagionatura che precede la diffusione del cloruro.

Dalla [3] si ricava la [4] che è valida se la stagionatura del calcestruzzo è sufficientemente avanzata (almeno 28 giorni) da ritenere che il valore di D non diminuisce ulteriormente durante la diffusione del cloruro:

$$x = 4 \bullet (D\,t)^{1/2} \qquad [4]$$

Secondo l'equazione [4] diagrammando i valori di x (spessore di calcestruzzo penetrato dal cloruro) in funzione della radice quadrata del tempo *t* si ottiene una retta la cui pendenza dipende dal coefficiente di diffusione *D*.

La Fig. 3 mostra l'influenza del rapporto *a/c* (che varia da 0,60 a 0,30) sulla diffusione del cloruro attraverso un calcestruzzo confezionato con 350 kg/m^3 di cemento Portland CEM I 42.5 R e stagionato per 28 giorni prima di essere immesso permanentemente in acqua di mare per circa 3 anni; si osserva che minore è il rapporto *a/c*, minore è la diffusione del cloruro. Il calcestruzzo di riferimento senza alcun additivo è stato confezionato con il rapporto a/c di 0,60. Grazie all'impiego di un additivo superfluidificante policarbossilico, dosato allo 0,8 o 1,4 % rispetto al peso del cemento, il rapporto a/c è

sceso a 0,45 o 0,30 rispettivamente. Si può quindi concludere che l'impiego di un superfluidificante per ridurre il rapporto a/c consente di rallentare l'ingresso dei cloruri nel calcestruzzo del copriferro. Nella Tabella 1, ricavata per estrapolazione dei dati a tempi molto lunghi della Fig. 3, è mostrato il tempo richiesto affinché il cloruro penetri 40 mm di copriferro. La riduzione di *a/c* fa aumentare il tempo di penetrazione in un copriferro spesso 40 mm da 7 mesi a 65 anni riducendo *a/c* da 0,60 a 0,30.

Tabella 1 - Tempo estrapolato per penetrare un copriferro di 40 mm in un calcestruzzo immerso in acqua di mare

a/c	TEMPO
0.60	7 mesi
0.45	5 anni
0.30	65 anni

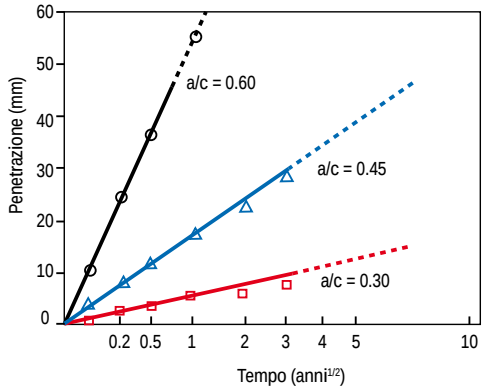


Fig. 3 - Influenza del rapporto a/c sulla penetrazione dei cloruri attraverso calcestruzzi stagionati per 28 giorni prima di essere immersi in acqua di mare.

Nella Fig. 4 è mostrata l'influenza della percentuale di materiale dotato di attività pozzolanica (in forma di cenere volante, di loppa d'altoforno o di fumo di silice) in sostituzione parziale del cemento Portland CEM I 42.5 R in calcestruzzi tutti con rapporto acqua/(cemento + pozzolana) eguale a 0,45. Tutti questi materiali fanno diminuire la penetrazione del cloruro nel calcestruzzo rispetto a quello di riferimento con 350 kg/m^3 di cemento Portland. L'impiego del 10% di fumo di silice è più efficace del 25% di cenere o di loppa nel ridurre la penetrazione del cloruro. Tuttavia, l'impiego congiunto di cenere e di loppa, entrambi in misura del 25%, è più efficace del 10% di fumo di silice molto più costoso e difficilmente reperibile. La diminuzione della penetrazione del cloruro in calcestruzzi contenenti materiali pozzolanici è attribuibile a tre fattori: il primo consiste nella riduzione della dimensione dei pori e quindi della permeabilità del calcestruzzo; il secondo viene attribuito (3) all'adsorbimento del cloruro da parte dei materiali pozzolanici; il terzo fattore è attribuito (4) all'incremento di resistività elettrica della pasta di cemento a seguito dell'aggiunta di materiale pozzolanico.

Estrapolando a tempi lunghi i valori di penetrazioni mostrati nella Fig. 4 si ricavano i tempi richiesti affinché il cloruro presente nell'acqua di mare penetri un copriferro di 40 mm in un calcestruzzo con rapporto acqua / (cemento + pozzolana) di 0,45. Questi dati, mostrati in Tabella 2, indicano che con l'impiego congiunto di cenere e loppa si arriva ad incrementare il tempo di penetrazione di un copriferro spesso 40 mm fino a 170 anni contro un tempo di 5 anni nel calcestruzzo privo di materiale pozzolanico.

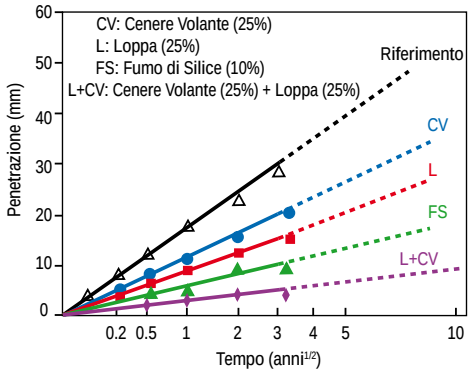


Fig. 4 - Influenza del'aggiunta di materiale pozzolanico sulla penetrazione del cloruro presente nell'acqua di mare in un **calcestruzzo con rapporto acqua /(cemento+pozzolana)** di 0.45.

Tabella 2 - Estrapolazione del tempo necessario per la penetrazione di 40 mm di calcestruzzo (a/c = 0.45; c+aggiunte minerali = 350 kg/m³)

MIX	TEMPO (ANNI)
RIFERIMENTO	5
25% CENERE VOLANTE	15
25% LOPPA	25
10% FUMO DI SILICE	65
25% CENERE VOLANTE + 25% LOPPA	170

Si può concludere che impiegando additivi superfluidificanti e aggiunte pozzolaniche si può ritardare la penetrazione del cloruro nel calcestruzzo, e quindi l'innesco della corrosione dei ferri di armatura, fino a oltre 170 anni adottando un rapporto a/c di 0,45 e un copriferro di 40 mm.

ATTACCO SOLFATICO

L'attacco del solfato (5-7) presente in acqua di mare si basa sulla formazione di gesso prodotto per reazione dello ione solfato ($SO_4^=$) con la calce, $Ca(OH)_2$, che è presente nel calcestruzzo per effetto della reazione del cemento con l'acqua di impasto. Successivamente il gesso reagisce con gli alluminati idrati C-A-H per formare ettringite ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32\ H_2O$). Entrambe le reazioni, rappresentate con i processi [5] e [6] sono caratterizzate da una forte espansione che genera un'azione dirompente capace di provocare fessure in superficie e distacchi di calcestruzzo:

$$SO_4^= + Ca(OH)_2 + H_2O \Longrightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O \qquad [5]$$

$$C\text{-}A\text{-}H + CaSO_4 \cdot 2H_2O + \text{acqua} \Longrightarrow$$

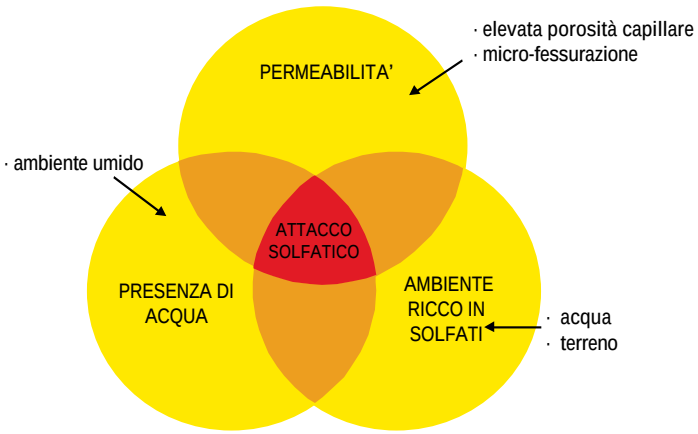


Fig. 5 - Rappresentazione ternaria dell'attacco solfatico.

$$C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O \qquad [6]$$

La Fig. 5 mostra la rappresentazione ternaria dell'attacco solfatico per la cui azione sono necessari congiuntamente i seguenti tre fattori:

- permeabilità all'acqua;
- ambiente ricco in solfati;
- presenza di acqua.

Questi tre fattori sono tutti presenti se il calcestruzzo è poroso e quindi permeabile all'acqua di mare che contiene lo ione solfato.

Per ridurre o impedire l'attacco solfatico generato dall'acqua di mare si debbono adottare le stesse misure che sono state già presentate per ridurre o impedire la corrosione dei ferri di armatura per azione del cloruro presente nell'acqua marina:

- impiego di additivi superfluidificanti per ridurre la porosità interconnessa e quindi la permeabilità all'acqua di mare attraverso la riduzione del rapporto a/c;
- impiego di cementi con cenere volante (cemento pozzolanico) o loppa (cemento d'altoforno) per ridurre la porosità interconnessa grazie alla ulteriore formazione di C-S-H e per diminuire la quantità di calce che è indispensabile per generare il gesso e quindi l'ettringite secondo le reazioni [5] e [6].

CONCLUSIONI

Un approccio olistico del degrado delle strutture in ambiente marino può essere rappresentato con una rappresentazione ternaria dei seguenti tre fattori coesistenti e tra loro correlati, che debbono:

- porosità interconnessa che include i pori capillari il cui volume cresce con il rapporto acqua/cemento, le micro-fessure in superficie provocate da sollecitazioni meccaniche, ritiro igrometrico, e gradienti termici;
- esposizione ad agenti aggressivi che nel caso dell'acqua di mare sono rappresentati dagli ioni cloruro e solfato;
- presenza di acqua che veicola gli agenti aggressivi dall'ambiente esterno all'interno del calcestruzzo attraverso la porosità interconnessa.

Quando i tre summenzionati fattori coesistono i seguenti eventi si possono manifestare in strutture in C.A. esposte all'acqua di mare:

- corrosione dei ferri di armatura provocata dalla presenza di ioni cloruro;
- attacco solfatico della pasta cementizia.

Sia la corrosione delle armature metalliche che l'attacco solfatico della pasta cementizia possono essere ridotte significativamente se si riduce la porosità interconnessa abbassando il rapporto acqua/cemento mediante l'impiego di additivi superfluidificanti. Tuttavia, con un rapporto acqua cemento di 0,45 – raccomandato dalla norme UNI EN 206 e UNI 11104 per ottenere strutture in C.A. durabili – in soli 5 anni il cloruro arriva a penetrare un copriferro spesso 45 mm.

Anche l'impiego di aggiunte pozzolaniche in forma di cenere volante, loppa d'altoforno e fumo di silice migliora ulteriormente la durabilità delle strutture in C.A. per la riduzione della penetrazione del cloruro attraverso il copriferro. Con fumo di silice in parziale sostituzione (10%) del cemento Portland (350 kg/m^3) in un calcestruzzo con rapporto *a/c* di 0,45, occorrono 65 anni affinché il copriferro spesso 45 mm sia completamente penetrato dal cloruro dell'acqua di mare e quindi le strutture in C.A. siano a rischio di corrosione dei ferri di armatura. Con la combinata aggiunta di cenere e loppa (ciascuna in sostituzione del 25% di cemento), in un calcestruzzo con rapporto acqua/cemento di 0,45 occorrono 170 anni affinché il cloruro penetri un copriferro di 40 mm e i ferri siano a rischio di corrosione.

BIBLIOGRAFIA

(1) Mehta, P.K., "Durability-Critical Issues for the Future", Concrete International, V. 19, No. 7, July, 1997, pp 27-33.
(2) Collepardi, M., "A Holistic Approach to Concrete Durability – Role of Superplasticizers" Infrastructure Regeneration and Rehabilitation. A Vision for the Next Millennium, Sheffield , pp 15-25, 1999.
(3) Tuutti, K., "Corrosion of Steel", Swedish Foundation for Concrete Research, Stockholm, Sweden, 1982.
(4) Collepardi, M., Marcialis, A., and Turriziani, R., "Penetration of Chloride Ions in Cement Pastes and in Concretes", Journal of American Ceramic Society, Vol. 55, pp. 534-535, 1972.
(5) Coppola, L., Fratesi, R., Monosi, S., Zaffaroni, P. and Collepardi, M., "Corrosion of reinforced concrete in sea water submerged structures", Proceedings of the Third International Conference on Performances of Concrete in Marine Environment, pp 127-160, New Brunswick, Canada, (1996
(6) Collepardi, M., "Damage by Delayed Ettringite Formation - A Holistic Approach and New Hypothesis", Concrete International, Vol. 21, No. 1, January 1999, pp. 69-74.
(7) Collepardi, M., "A State-of-the-Art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete" Concrete Cement and Concrete Composites, Vol. 25, Issue 4-5, May-July 2003, pp. 401-407.
(8) Borsoi, A., Collepardi,S., Coppola, L,. Troli, R., and Collepardi, M., "Sulfate Attack on Blended Portland Cements", Proceedings del Fifth CANMET/ACI International Conference on "Durability of Concrete", Barcelona, Spain, 4-9 June 2000, pp. 417-432.
(9) Neville A., "Properties of Concrete", pp.144-145, Fourth Edition, Pearson Prentice Hall, 2005.

ORIGINE E SMALTIMENTO DEI MATERIALI E RIFIUTI RADIOATTIVI

Piero Risoluti
ENEA, Dipartimento di Tecnologia Nucleare, Casaccia
piero.risoluti@casaccia.enea.it

1. ORIGINE E CARATTERISTICHE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

I rifiuti radioattivi vengono prodotti nelle varie attività connesse con la produzione elettronucleare, che includono i processi di lavorazione del combustibile nucleare, le operazioni della centrale elettronucleare e le relative attività di ricerca di base ed applicata. Sono costituiti da soluzioni liquide contenente i radionuclidi (in particolare provenienti dalle lavorazioni del combustibile o da operazioni di decontaminazione), o da solidi contaminati di varia natura e origine (residui metallici di elementi di combustibile, polveri, resine, strumenti ed apparecchiature dismesse, materiale di consumo, ecc.). Quantitativi limitati di rifiuti radioattivi, rispetto a quelli prodotti dall'industria e dalla ricerca nucleare, si generano nelle applicazioni della tecnologie nucleari in medicina, industria, agricoltura, ricerche ambientali, ecc (si tratta di materiali classificati in genere come *sorgenti*). Dopo la produzione i rifiuti radioattivi possono essere soggetti a vari trattamenti intermedi di tipo chimico e fisico diretti a ridurne il livello di attività o semplicemente il volume, come la concentrazione nel caso dei liquidi o la compattazione nel caso dei solidi.

Lo stadio fondamentale della loro gestione è tuttavia il **condizionamento** (cioè la loro trasformazione in blocchi di materiale inerte e resistente), e come tale idoneo allo smaltimento, o deposito definitivo. Le operazioni di condizionamento avvengono di solito nello stesso impianto o sito in cui vengono generati allo stato liquido o solido, anche se non è infrequente il caso, in particolare quando si tratta di piccole produzioni, del loro trasporto in impianti di condizionamento centralizzati. Il condizionamento, inoltre, avviene di solito dopo un periodo più o meno prolungato di stoccaggio dei rifiuti prodotti, variabile a seconda delle esigenze operative o della disponibilità o meno di impianti idonei al condizionamento.

La ricerca diretta alla segregazione degli effluenti radioattivi liquidi e solidi in materiali dotati di grande stabilità fisica e chimica, cominciata agli inizi degli anni '60, quasi in concomitanza con l'avvio dei primi reattori commerciali, ha portato alla identificazione e al definitivo sviluppo di due fondamentali processi di condizionamento, la **cementazione** e la **vetrificazione**, che hanno raggiunto la piena maturità tecnologica ed industriale negli anni '80.

I due processi, che consistono nell'inglobamento dei rifiuti in matrici cementizie o vetrose, sono applicati rispettivamente per i rifiuti a **bassa attività**, detti anche a vita breve, e per quelli ad **alta attività**, o a vita lunga. Le ragioni per cui si cercò di specializzare processi e materiali così diversi vanno ricercate nella differenza, fondamentale ai fini della loro gestione e soprattutto dello smaltimento, che esiste fra le due tipologie di rifiuti.

I **rifiuti a bassa attività** sono quelli che contengono solo isotopi radioattivi a vita breve e in bassa concentrazione, cioè al di sotto di un determinato limite. I radioisotopi a vita breve decadono completamente in tempi dell'ordine dei secoli: in particolare sono considerati a vita breve i radioisotopi con tempi di decadimento (il tempo in cui il numero degli atomi radioattivi si dimezza) fino a trenta anni. In trecento anni, cioè in un periodo pari a dieci volte il loro tempo di decadimento, per una legge fisica il livello di radioattività di questi radioisotopi si abbassa di mille volte. I rifiuti a bassa attività sono pertanto quelli in cui la concentrazione iniziale di radioisotopi è tale che l'abbassamento di mille volte comporta un loro quasi completo spegnimento, o comunque il raggiungimento di un livello minimo di radioattività considerato non pericoloso per l'uomo e l'ambiente, secondo i criteri di radioprotezione stabiliti dalle Organizzazioni internazionali. (Tale limite minimo, giova ricordarlo, è sempre inferiore al valore della radiazione di fondo media della terra.) E' per questo che i trecento anni vengono presi a base per stabilire i criteri per lo smaltimento dei rifiuti a vita breve.

Quando invece nei rifiuti sono presenti isotopi a vita lunga e/o isotopi a vita breve ma in grande concentrazione, si parla di **rifiuti ad alta attività**. In questi rifiuti un esaurimento della emissione radioattiva, o la sua riduzione ai livelli di soglia considerati non pericolosi, si consegue soltanto dopo periodi che vanno dai millenni alle centinaia di migliaia di anni. Inoltre, i rifiuti ad alta attività possono essere caratterizzati da un elevato innalzamento termico, dovuto al calore dissipato dalla intensa radiazione residua:

conseguentemente, se i rifiuti sono in forma liquida possono arrivare alla spontanea ebollizione subito dopo la lori produzione. Per questo motivo un materiale cementizio, che al di sopra di una certa temperatura comincia a decomporsi, non è adeguato al condizionamento di rifiuti ad alta attività. Ed è per questo che si è presa in considerazione la loro trasformazione in blocchi di vetro, materiale com'è noto altamente resistente al calore, oltre che praticamente inattaccabile da agenti chimici anche aggressivi (si sono trovati oggetti di vetro, peraltro di qualità rudimentale, in navi antiche affondate nei mari più di duemila anni fa). Viceversa, per i rifiuti a vita lunga ma senza sviluppo di calore, come sono ad esempio quelli contenenti tracce di plutonio, in certi casi viene applicata la cementazione.

Resta da dire, per concludere questa schematica descrizione delle tipologie di rifiuti radioattivi, che quelli a bassa attività costituiscono in termini volumetrici circa il 95% dell'intera produzione. Quelli ad alta attività e/o a vita lunga contengono tuttavia nel loro 5% circa il 98% dell'inventario totale di radioattività. Per completare il quadro si deve aggiungere che attualmente diversi paesi, tra cui gli USA, non ritrattano il combustibile irraggiato per separare i prodotti di fissione ed il plutonio prodotto, ma lo smaltiscono direttamente, in speciali contenitori, per cui per loro i rifiuti ad alta attività sono costituiti dallo stesso combustibile scaricato dalle centrali.

Cementazione e vetrificazione si sono definitivamente affermati come processi di condizionamento solamente dopo che per molti anni i materiali candidati erano stati sottoposti a collaudi particolarmente severi e prolungati onde verificarne la resistenza ad agenti esterni ed il comportamento a lungo termine.

Ricordiamo alcune delle prove più comuni: cicli termici estremi e ripetuti, immersione in acqua di mare per mesi, attacco di agenti corrosivi per lunghi periodi, resistenza al fuoco, resistenza alle radiazioni, resistenza meccanica a compressione, e persino resistenza ad attacco di batteri. Anche il manufatto finale previsto (si intende con questo l'insieme costituito dal materiale di inglobamento dei rifiuti e dal suo contenitore di acciaio esterno, di varie geometrie) subisce collaudi diretti a verificarne le caratteristiche meccaniche e ad accertarne la resistenza a impatti violenti.

E' solo dopo aver superato indagini di questo tipo che il materiale selezionato come matrice di condizionamento ed il manufatto finale possono essere sottoposti a certificazione, fatto questo di importanza fondamentale per la sicurezza nucleare, che viene rilasciata da un organismo "terzo", cioè da una pubblica ed indipendente (almeno nei paesi democratici) autorità di controllo.

2. LO SMALTIMENTO

Due sono i principi che governano lo smaltimento delle scorie radioattive in un determinato sito: i manufatti condizionati vanno depositati in modo che le sostanze pericolose presenti nelle scorie non possano venire in contatto diretto o indiretto con la biosfera, cioè con il mondo animale e vegetale circostante; questo contatto deve essere escluso almeno per tutto il periodo in cui permane la pericolosità dei rifiuti. E' questo secondo punto che determina la fondamentale differenza tra il deposito definitivo per rifiuti a vita breve e quello per rifiuti a vita lunga. Come abbiamo visto, ai primi è sufficiente assicurare un periodo di isolamento dell'ordine dei trecento anni perché essi diventino radiologicamente innocui, per i secondi questo periodo può essere di decine o centinaia di migliaia di anni, in certi casi milioni di anni. Trecento anni sono un periodo che possiamo definire storico, diecimila o centomila anni sono un periodo geologico. Mentre è possibile provvedere mediante opere costruite dall'uomo ad un completo ed affidabile isolamento che duri per qualche secolo, per un isolamento che duri per periodi geologici bisogna ricorrere ad altro.

Nei due casi, ad ogni modo, l'isolamento dalla biosfera viene realizzato interponendo tra la sostanza pericolosa e l'ambiente esterno un **sistema di barriere** la cui funzione è di impedire la fuoriuscita degli isotopi radioattivi dal deposito in ogni circostanza prevedibile, incluse quelle di carattere incidentale. Siccome l'unico mezzo che può veicolare le sostanze radioattive verso l'esterno è l'acqua, attraverso un meccanismo di solubilizzazione o semplicemente di trascinamento, la funzione delle barriere del deposito è in pratica quella di prevenire che un qualsiasi mezzo acquoso, di qualsiasi origine, venga in contatto con i radionuclidi contenuti nei rifiuti condizionati, e comunque di impedire che, qualora per qualsiasi motivo questo avvenga, non ci sia rilascio alla biosfera di livelli dannosi di dose di radioattività. La prima di queste barriere è costituita dal contenitore del manufatto solido prodotto con il processo di condizionamento, il cui materiale, come abbiamo visto, viene individuato e selezionato proprio per assicurare sia la segregazione delle sostanze radioattive che la sua resistenza ad agenti fisici e chimici esterni. Di per sé, il contenitore di acciaio speciale contenente le scorie condizionate, di cui al momento della produzione vengono accuratamente controllate la tenuta e la saldatura, potrebbe essere depositato a cielo aperto ed esposto per così dire alle intemperie per molti anni senza alcun rilascio e senza subire niente di più di una certa ossidazione superficiale. Ma ovviamente non è questo che avviene: la concezione e le strutture del deposito devono essere tali da fornire barriere supplementari interposte tra il manufatto e l'ambiente esterno.

La sicurezza del deposito sia nel breve che nel lungo periodo si basa quindi sull'affidabilità di queste barriere addizionali, la cui natura dipende ovviamente da quanto a lungo dovrà essere mantenuto l'isolamento. Pertanto, è il tipo di barriere che si predispongono a differenziare radicalmente un deposito per rifiuti a vita breve da quello per rifiuti a vita lunga. Per un deposito di rifiuti a bassa attività

per il quale l'isolamento deve essere di durata secolare si usano barriere in calcestruzzo, ed il deposito si può costruire in superficie, o comunque in strati della litosfera prossimi alla superficie. Per quello ad alta attività, in cui si richiede un isolamento per periodi geologici, si usano come barriera giacimenti geologici profondi, che per le loro particolari proprietà possono dare le garanzie richieste. Sia per il **deposito superficiale** che per il **deposito geologico**, è necessario dimostrare in sede di progetto che le barriere da predisporre diano le garanzie richieste, cioè che la loro prestazione sia adeguata per mantenere i rifiuti completamente isolati dalla biosfera per tutto il periodo considerato Le barriere devono cioè, come si dice in gergo, essere sottoposte a **qualificazione**. E' la qualificazione della barriera che rende, insieme con la adeguata soluzione di arte mineraria da mettere in opera, la realizzazione del deposito geologico di gran lunga più complessa, più lunga e più costosa rispetto al deposito superficiale. La qualificazione delle barriere, costituisce il criterio che è alla base della sicurezza di un deposito.

2.1 Lo smaltimento in depositi di superficie o prossimi alla superficie

Nel caso del deposito superficiale si tratta di dimostrare che la geometria delle barriere e la natura del materiale siano adeguati. Si deve quindi non solo assicurare una configurazione del deposito che da un punto di vista costruttivo provveda a interporre tra il manufatto e l'esterno barriere di isolamento, ma soprattutto di essere certi che il materiale impiegato, cioè il calcestruzzo, conservi le proprietà per il tempo richiesto. Il calcestruzzo, rinforzato o no, ha com'è noto proprietà meccaniche, idrauliche e chimiche che ne fanno un mezzo ideale per garantire una difesa non solo da infiltrazioni acquose anche massicce (si tratta infatti di un legante idraulico), ma anche da penetrazione o impatti meccanici. Qualificare barriere in calcestruzzo significa semplicemente individuare quella formulazione del conglomerato (tipo di cemento, rapporto acqua/cemento, granulometria degli inerti, additivi, ecc.,) che sia in grado di assicurare la durabilità richiesta, e sottoporla a verifica mediante prove di vario tipo, incluse quelle cosiddette accelerate, che sono largamente usate e collaudate nella tecnologia del calcestruzzo. Così ad esempio mediante l'immersione per mesi in acqua di grandi provini si simulano gli effetti di una infiltrazione di umidità dal terreno che nella realtà può protrarsi per secoli.

Si costruiscono oggidì con questo materiale opere ben più complesse e critiche a cui si richiedono vite di progetto secolari e livelli di sicurezza estremi, come grandi ponti ed edifici. Uno dei casi più recenti è quello della copertura del nuovo padiglione del *British Museum* di Londra, il cui requisito progettuale è stato una vita di servizio (*lifetime*) minima di duecentocinquanta anni. Ma chi avesse dubbi sulla durabilità del calcestruzzo può pensare alla cupola del Pantheon, gettata all'epoca di Adriano, cioè verso il 150 dopo Cristo, e da allora mai nemmeno restaurata significativamente, la quale per di più fu costruita impiegando una malta idraulica rudimentale a base di calce e pozzolana, ben diversa come qualità da quella che si può ottenere con i cementi moderni.

Realizzare barriere in calcestruzzo con cui isolare in modo affidabile e sicuro dall'ambiente esterno i rifiuti radioattivi a vita breve, e per tutto il tempo necessario al loro decadimento, non presenta quindi problemi tecnici particolari né dal punto di vista dei materiali né tanto meno da quello dell'ingegneria costruttiva. Ed infatti centri di deposito di questo tipo ne esistono decine al mondo, praticamente in tutti i paesi, ad eccezione dell'Italia, che hanno fatto o fanno ricorso all'energia nucleare, e che quindi detengono quantitativi non trascurabili di scorie radioattive di bassa attività. Come sopra ricordato, circa il 95% delle scorie radioattive prodotte sono di questo tipo, per cui i paesi con produzione elettronucleare, anche modesta, dovranno smaltire quantitativi dell'ordine delle centinaia di migliaia di metri cubi. L'Italia, che pure non ha più produzione energetica nucleare, ne ha accumulati diverse decina di migliaia di metri cubi. Le strutture di deposito per rifiuti a vita breve sono nella grande maggioranza dei casi realizzate in superficie. Esistono anche casi di depositi in caverna, realizzati comunque con i criteri di isolamento dalla biosfera di quelli di superficie (spettacolare è il deposito svedese, collocato sotto il mar Baltico a circa un chilometro dalla costa). In Ungheria si prevede di realizzare, per i residui a media e bassa attività, un deposito in gallerie orizzontali scavate in formazioni di granito, con barriere quindi parzialmente geologiche.

Nella sua configurazione più generale, un deposito superficiale è costituito da una successione di celle in calcestruzzo armato costruite fuori terra, in cui vengono depositati i manufatti. Tra le pareti esterne delle celle (che costituiscono la barriera più esterna), ed i manufatti, che sono come abbiamo visto la prima barriera, vengono interposti materiali impermeabilizzanti, che in molti casi è ancora una malta cementizia, a costituirne un ulteriore contenimento. L'insieme realizza quindi un sistema formato da più barriere (quello classico sopra descritto ne ha tre). La loro disposizione in serie garantisce la permanenza di una linea di contenimento nel caso di indebolimento o *defaillance* della barriera antecedente. Le celle di deposito, una volta riempite con i manufatti condizionati e con il materiale impermeabilizzante frapposto tra i manufatti e le pareti esterne, diventano in pratica dei blocchi di calcestruzzo di grande dimensione e stabilità in cui tra il rifiuto radioattivo e l'ambiente esterno è frapposto uno spessore impermeabile di diversi metri e dotato di grande resistenza meccanica.

Le celle vengono infine ricoperte con strati di terreno speciale, a sua volta dotato di proprietà impermeabilizzanti e/o assorbenti (ad esempio arricchito in argilla), con lo scopo sia di fornire un'ulteriore protezione sia di ricostituire la morfologia iniziale dell'area. L'efficienza delle

barriere e dell'isolamento è infine continuamente controllata da sistemi e reti di monitoraggio ambientali, estesi in superficie e in profondità. C'è poi un'altra barriera, che non è di tipo meccanico ma che è destinata a fornire una difesa supplementare e per così dire di riserva, specie nel lungo periodo: la natura geografica del sito in cui si realizza il deposito. Questi sistemi vengono infatti collocati in siti con caratteristiche geografiche, sia fisiche che antropiche, adeguate e per quanto possibile in grado di non favorire comunque la dispersione dei rifiuti nell'ambiente anche dopo la fine del periodo di conservazione. La natura degli strati superficiali del terreno, l'idrologia superficiale e sotterranea, la climatologia locale, sono tutti elementi attentamente valutati nel corso della selezione del sito o della rosa di siti che normalmente viene preliminarmente individuata in questi casi.

Oltre alle unità di deposito vere e proprie, un centro di smaltimento di questo tipo ospita normalmente installazioni ausiliarie costituite da stazioni di condizionamento locale dei rifiuti, laboratori di analisi e controllo, sistemi remotizzati di movimentazione e trasporto, edifici di servizio e amministrativi, un centro accoglienza, locali per il personale, ecc. L'insieme si configura quindi come un vero e proprio Centro tecnologico, sede di attività tecnicamente qualificate. Alcuni dei più noti centri di questo tipo, come quelli che esistono in Francia, Spagna, Giappone, Svezia, Finlandia, sono diventati mete ricercate di visitatori, costituiti non solo da tecnici e scienziati del ramo provenienti da tutto il mondo, ma anche da gente comune desiderosa di essere informata sul deposito. E' infatti cura particolare delle autorità nazionali di quei paesi considerarli centri aperti, vere e proprie case di vetro a disposizione del pubblico, in cui capita spesso di trovare, come nei musei, scolaresche in visita.

Sono queste le famigerate **discariche nucleari**, come troppo spesso ama definirle la grande stampa di informazione, la quale, evidentemente più incline a colpire che informare il proprio pubblico, riprende volentieri il truce frasario degli antinucleari. I controlli ed i monitoraggi ambientali che si fanno all'esterno di depositi di questo tipo servono in pratica solo a tranquillizzare la popolazione. Gli effetti radiologici all'esterno del deposito sono infatti nulli, e d'altra parte non si vede come possano rilasciare radiazioni o contaminanti blocchi di calcestruzzo in cui le sostanze radioattive, peraltro di bassa attività, sono confinate dietro diversi metri di spessore di calcestruzzo. Chi ha avuto occasione di vedere anche da lontano una vera discarica (per non parlare di chi è costretto a viverci accanto), può forse capire perché abbiamo introdotto il discorso dello smaltimento delle scorie radioattive dichiarando che nessuna attività umana si prende cura dei rifiuti prodotti come quella nucleare.

2.2 I depositi geologici

Quali sono le formazioni geologiche adatte all'isolamento dei rifiuti a vita lunga, e come si qualificano, cioè come si dimostra la loro capacità di assicurare tale isolamento per i lunghissimi periodi necessari? Devono essere innanzitutto formazioni che, per la loro natura ed origine, sono stabili ed in grado di restare inalterate per periodi che si misurano nella scala dei tempi geologici, che sono appunto dell'ordine delle centinaia di migliaia o milioni di anni. E' questo il requisito che assicura la durabilità della barriera. In secondo luogo, la roccia che funge da barriera deve essere impermeabile, e ovviamente restarlo per lo stessa scala temporale, onde evitare che un qualsiasi mezzo acquoso possa venire in contatto con i rifiuti. Hanno questi requisiti alcuni giacimenti di rocce sedimentarie di cui c'è grande abbondanza sulla Terra, come i bacini salini, specie quelli di salgemma, formatisi in processi lunghissimi per l'evaporazione di oceani, e quelli argillosi. Presentano simili requisiti di idoneità anche altri particolari tipi di rocce cristalline, come i graniti non fratturati, che sono però non altrettanto diffusi. I giacimenti salini costituiscono un mezzo che potremmo definire ideale. Essendo il sale (nella maggior parte dei casi si tratta di cloruro di sodio, lo stesso che si usa in cucina) altamente solubile, l'esistenza stessa del giacimento testimonia l'assenza di acqua da epoche geologiche, la cui scomparsa per evaporazione è infatti il fenomeno che ha permesso la formazione del giacimento. Formatosi in milioni di anni, esso è destinato a restare stabile per periodi dello stesso ordine di grandezza. Inoltre la roccia è abbastanza plastica, quindi in grado di assorbire, senza subire fratture, eventuali sollecitazioni tettoniche alla sua periferia. Anche i bacini argillosi presentano caratteristiche ugualmente favorevoli, per alcuni anzi superiori. Le argille infatti, oltre alle note caratteristiche di stabilità e impermeabilità, hanno proprietà di barriera geochimica, il che vuol dire che possono assorbire specie chimiche migranti, che nel lunghissimo periodo potrebbero fuoriuscire dal deposito.

Una volta individuato il giacimento che per composizione mineralogica, estensione, profondità e localizzazione geografica merita di essere preso in considerazione, e questo si può fare anche a tavolino se esistono carte geologiche adeguate, inizia la fase di verifica e conferma delle reale idoneità della formazione ad ospitare un deposito per rifiuti a vita lunga. E' questa, per un deposito geologico, l'attività di qualifica della barriera. Si tratta di una fase che è destinata a durare molti anni. Per quella che è l'esperienza e acquisita fino ad oggi, dai venti ai trenta. Per dimostrare l'efficienza e durabilità della barriera infatti, non ci si è limitati a studiare in laboratorio campioni dei materiali – sale, argille, graniti ed altro - estratti mediante estesi sondaggi, o a fare ricorso ai metodi geofisici di indagine, come peraltro si è sempre fatto nell'arte mineraria per lo studio dei giacimenti. Si sono invece costruiti laboratori sotterranei, vere e proprie miniere sperimentali profonde centinaia di metri, con estensioni orizzontali che possono arrivare a qualche chilometro, scavate direttamente nel mezzo da indagare. Lo scopo è quello di verificare quale sarà il comportamento della barriera naturale in presenza

dei materiali da depositare, di valutare i problemi di ingegneria mineraria connessi con la costruzione delle strutture di deposito, di verificare il livello di impermeabilità e diffusività e le proprietà chimiche e fisiche della roccia in esame.

Istallazioni di questo tipo sono state costruite sin dagli anni '80 in Belgio, Germania, Svezia e Svizzera, USA. Un laboratorio sotterraneo è in attività in Francia dal 2005. In Germania è stata scavata ed operata per oltre dieci anni una vera e propria miniera sperimentale di grande estensione in giacimenti salini che sono tra i migliori (geologicamente) esistenti al mondo.

Sulle formazioni geologiche candidate si sono raccolte tante di quelle informazioni per cui oggi costruire un deposito in profondità – tra i cinquecento ed i mille metri dalla superficie – non presenta più significative incertezze né sul piano dell'ingegneria mineraria né su quello della caratterizzazione chimica, fisica ed idrogeologica della barriera.

Ma come dimostrare che tale barriera resterà efficace anche dopo centomila anni e più? Se la scienza della terra ci dice ad esempio qual è l'età di un giacimento di salgemma o di argilla (sempre dell'ordine dei milioni di anni), il giacimento si può considerare stabile per periodi della stessa lunghezza, in quanto le sue eventuali modifiche (per esempio l'irrompere di nuovo di un oceano in un bacino continentale di salgemma) sicuramente procedono a loro volta con velocità geologiche, cioè anch'esse richiederebbero milioni di anni. Il mezzo geologico giudicato idoneo viene studiato *in situ,* mediante i laboratori sotterranei, in tutti i suoi aspetti connessi con la geochimica, con la mobilità delle varie specie chimiche costituenti i rifiuti alla trasmissione del calore, con la meccanica delle rocce e con la litografia degli strati esterni e periferici al giacimento.

Le attività sperimentali in corso nei laboratori sotterranei sopra menzionati sono dirette, oltre che allo studio del comportamento *in situ* di materiali e strutture, anche alla validazione dei modelli matematici impiegati per le analisi. Con i codici sviluppati e verificati è così possibile calcolare quale può essere, ad esempio, il movimento del plutonio nel mezzo geologico dopo diecimila, centomila o un milione di anni. Perché la barriera venga considerata idonea e qualificata, e quindi per essere autorizzata la costruzione del deposito, i calcoli devono mostrare in sede di progetto che non si ha rilascio pericoloso per un dato periodo, che nei paesi europei si estende anche al milione di anni. In USA, fino al 2005 le analisi di lungo periodo si arrestavano ai diecimila anni. Attualmente, sotto la spinta delle contestazioni di associazioni ambientaliste, questo limite è stato portato a centomila anni. Data la natura e la stabilità dei mezzi geologici, non è peraltro difficile dimostrare con i calcoli di cinetica che la migrazione eventuale dei radionuclidi attraverso la barriera geologica avviene con velocità infinitamente piccole, se ovviamente il mezzo geologico viene scelto di caratteristiche adeguate.

I depositi in profondità sono ancora nella fase di studio o di realizzazione pilota nei casi più avanzati. In USA è in esercizio dal Maggio 1999 il WIPP (*Waste Isolation Pilot Plant*), un impianto per lo smaltimento dei rifiuti a vita lunga plutoniferi prodotti nei centri del governo federale (cioè i rifiuti prodotti durante le produzioni di tipo militare). Il WIPP è praticamente il primo ed unico deposito di smaltimento geologico al mondo, anche se le sue finalità sono particolari e comunque non è destinato ai rifiuti radioattivi ad alta attività di tipo classico e di provenienza commerciale (rifiuti vetrificati o combustibile irraggiato). Secondo le attuali previsioni, il primo deposito geologico di tipo commerciale dovrebbe essere quello svedese, la cui entrata in operazione è programmata per il 2018, seguito da quello finlandese previsto più o meno nello steso periodo.

In attesa di disporre di un sito di smaltimento geologico, i paesi con importanti produzioni di combustibile irraggiato o rifiuti vetrificati si sono attrezzati con sistemi impiantistici adatti allo stoccaggio per periodi dell'ordine di qualche decennio ed oltre. Il concetto di deposito geologico ha conosciuto una evoluzione in tempi recenti, sostanzialmente lare per fronteggiare i problemi di accettabilità sociale e di consenso per la localizzazione dei depositi. In particolare, sono oggetto di discussione principalmente su due aspetti:

- la ricuperabilità dei rifiuti in un periodo transitorio definito (ad esempio qualche secolo);
- le barriere artificiali da concepire e mettere in opera per gestire il periodo transitorio.

La complessità della realizzazione di un deposito geologico ed i costi associati (che sono dell'ordine dei miliardi di Euro) sono tali da rendere difficilmente praticabile una soluzione di questo tipo per paesi che detengono quantitativi modesti di materiali ad alta attività (rifiuti a vita lunga o combustibili nucleari non ritrattati). Per questo comincia a farsi strada l'idea del ricorso ad un deposito geologico internazionale, di tipo regionale o continentale, destinato cioè ad accogliere i rifiuti a vita lunga di diversi paesi di una determinata area geografica, per i quali individualmente non sarebbe logico né giustificato destinare investimenti massicci per lo smaltimento che piccoli quantitativi di rifiuti a vita lunga. Un soluzione del genere sarebbe anche più compatibile da un punto di vista ambientale, se si considera la protezione dell'ambiente in una scala geografica più ampia di quella nazionale. garanzie di sicurezza superiori più depositi La praticabilità sociale e politica di una simile soluzione costituisce, nella presente fase storica, il problema più importante. Il deposito internazionale è tuttavia una soluzione destinata a farsi strada nel medio periodo, ed alla sua accettabilità socio-politica potrà probabilmente dare un contributo decisivo la messa in esercizio di uno dei grande depositi nazionali previsti.

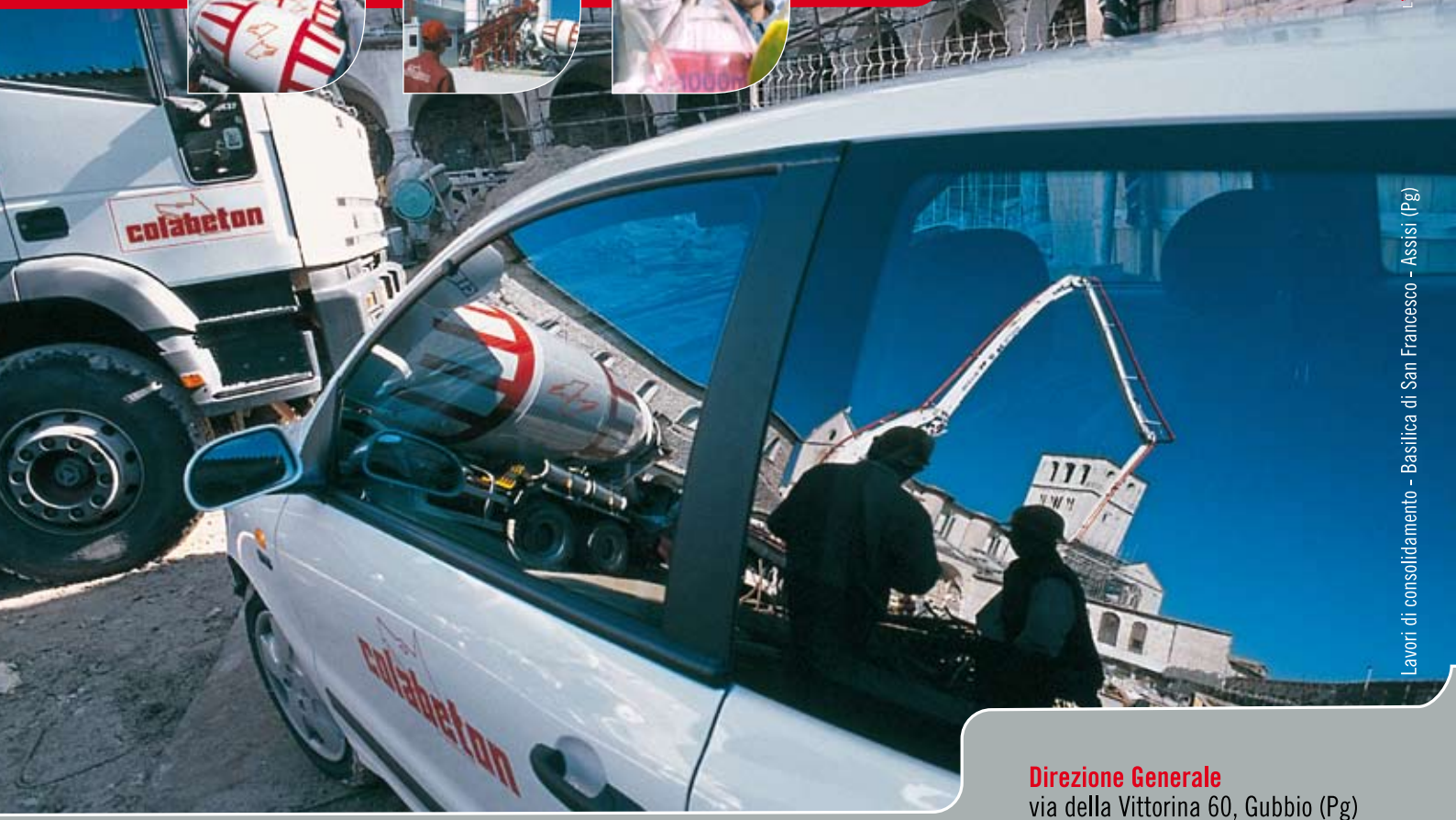
colabeton

il futuro del calcestruzzo

servizio tempestivo

assistenza in cantiere

ricerca e sviluppo



Lavori di consolidamento - Basilica di San Francesco - Assisi (Pg)

L'ArteGrafica

Colabeton progetta, realizza e distribuisce calcestruzzi durabili a prestazione garantita e una vasta gamma di prodotti speciali.
Oltre 150 impianti di betonaggio completamente informatizzati distribuiti su tutto il territorio nazionale.
Una capillare rete commerciale integrata dai laboratori di area per la ricerca e lo sviluppo dei prodotti con un servizio tecnologico centrale che è punta avanzata e base dell'innovazione tecnologica.
Tra i leader del calcestruzzo in Italia c'è Colabeton.

Direzione Generale
via della Vittorina 60, Gubbio (Pg)
t.+39 075 92401
f.+39 075 9273965

Numero Verde
800-102102

www.colabeton.it
info@colabeton.it

MuCis®
ANTICORR 280

Protezione polimero cementizia
per strutture esposte in cls armato

technology

Flessibile

Elastica

Antifessura

Autopulente

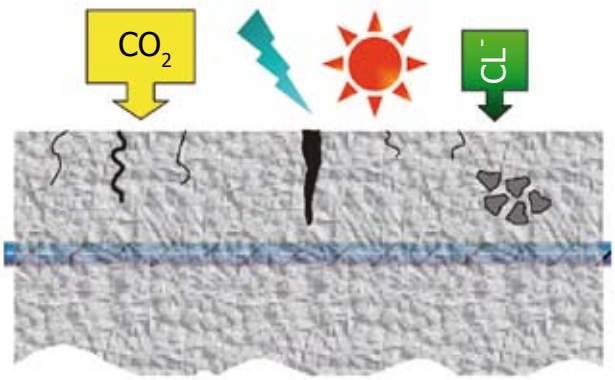
Anticorrosione

Anticarbonatazione

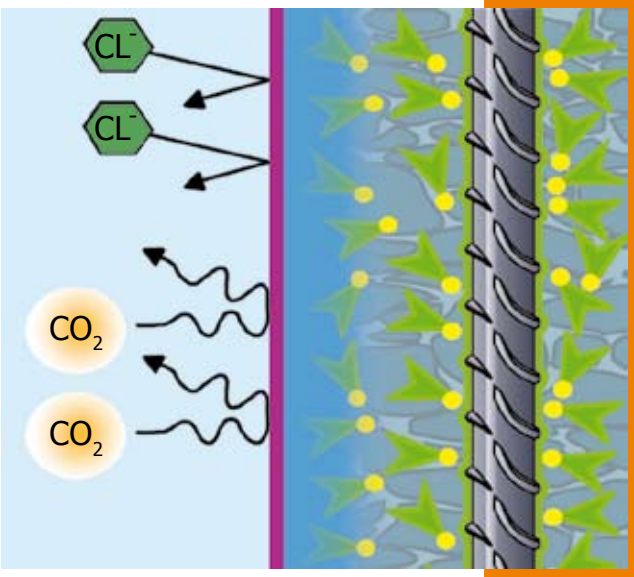
Impermeabile all'acqua

Permeabile al vapore acqueo

Colorazioni resistenti U.V.



gli agenti aggressivi



la protezione con MuCis® ANTICORR 280

TECNOCHEM ITALIANA SpA
TECNO ECO LOGIC CHEM

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