

GIORNALE aicap

REDAZIONE

Vivetta BIANCONI, Roberta MASIELLO

aicap

Associazione Italiana Calcestruzzo Armato e Precompresso
00187 Roma, Via Barberini, 68 - tel. 06/42740448; fax 06/42010760
sito web: www.associazioneaicap.it
E-mail: info@associazioneaicap.it

CONSIGLIO DIRETTIVO

Luca SANPAOLESI *Presidente*
Marcello MAURO *Vice Presidente*
Marco MENEGOTTO *Vice Presidente*
Sergio TREMI PROIETTI *Segretario*
Francesco CURCIO *Tesoriere*
Claudio CECCOLI
Gabriele DEL MESE
Giuseppe MANCINI
Agostino MARIONI
Piero MARRO
Antonio MIGLIACCI
Piero POZZATI
Cesare PREVEDINI
Giuseppe TRAINI
Michele VALENTE
Emanuele F. RADOGNA *Past President*

REVISORI DEI CONTI

Raffaello BARTELLETTI, Gabriele DI CHIARA, Paolo SPINELLI

SOCI ONORARI

Yves GUYON, Pierluigi NERVI, Hubert RUSCH, Giuseppe GRANDORI, Fritz LEONHARDT, Guido OBERTI, Aleksej A. GVOZDEV, Piero LOCATELLI, Yves SAILLARD, Alessandro DEI POLI, Ulrich FINSTERWALDER, Nicolas ESQUILLAN, Fernando PICCININI, Roger LACROIX, Francesco PERRI, Julio FERRY BORGES, Riccardo MORANDI, Giulio PIZZETTI, Giorgio MACCHI, René WALTHER, Silvano ZORZI, Carlo CESTELLI GUIDI, Franco LEVI, Francesco MARTINEZ Y CABRERA, Elio GIANGRECO, Theodosios P. TASSIOS, Andrea CHIARUGI

SOCI SOSTENITORI

A.I.T.E.C. (Roma), ALGA S.p.A. (Milano), A.P.P.I. (Milano), BOVIAR s.r.l. (Lainate), BUZZI UNICEM S.p.A. (Casale Monferrato), CALCESTRUZZI S.p.A. (Ravenna), CENTRO SUD PREFABBRICATI S.p.A. (Roma), C.M.C. (Ravenna), COLABETON S.p.A. (Gubbio), DEGUSSA CC ITALIA S.p.A. (Treviso), DYWIDAG S.p.A. (Milano), MAPEI S.p.A. (Milano), ONOFRE ENGINEERING s.r.l. (Roma), PROCOM s.r.l. (Nerviano - MI), SIDERURGICA LATINA MARTIN S.p.A. (Ceprano), SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (Roma), TECNO IN s.r.l. (Napoli), TENSACCIAI S.p.A. (Milano), TESIT PRECOMPRESSIONE s.r.l. (Milano), TTM TENSION TECHNOLOGY s.r.l. (Nerviano - MI)

PRESIDENTE ONORARIO

Carlo CESTELLI GUIDI

GIORNALE aicap

N. 10 - OTTOBRE 2006

Allegato a "l'industria italiana del Cemento"

Contenitori in calcestruzzo armato per rifiuti nocivi

ing. Alberto Taglioni*, prof. Alberto Castellani**, prof. Mario Collepari***, ing. Rita Pellegrini****, ing. Enrico Pizzigalli****

Sommario

È richiamato il fenomeno del leakage, ovvero percolamento di acqua attraverso una barriera di calcestruzzo, ed il fenomeno di leakability (lisciviazione), ovvero trasporto di materiale da parte dell'acqua che percola. Entrambi i fenomeni possono essere causati dal dilavamento meteorico nel lungo periodo. L'obiettivo è quello di realizzare barriere cementizie in grado di minimizzare la dispersione nella biosfera di agenti nocivi all'ambiente e all'uomo. È parte della attività sperimentale svolta da ENEA, rivolta alla caratterizzazione di materiali cementiti idonei alle funzioni di confinamento, nell'ambito dello studio di un deposito definitivo di rifiuti radioattivi a bassa attività.

I conglomerati cementizi impermeabili e ad alta durabilità, studiati per l'isolamento di rifiuti radioattivi a vita breve, trovano una più ampia applicazione all'isolamento di rifiuti "pericolosi" in genere, quali quelli tossici e medicali. È riportata una rassegna di tali rifiuti, le norme che ne regolamentano la eventuale dispersione e i requisiti di confinamento.

La ricerca verte su aspetti delle proprietà del calcestruzzo che prove su prototipi sono in grado di mettere in evidenza, e che prove standard, su campioni di dimensioni ridotte, non sono in grado. Un contributo scientifico importante è la segnalazione dei limiti della prova di leakage secondo ANSI /ANS, -16.1-1986, effettuata su una lastra di calcestruzzo di dimensioni 300x300 mm, rispetto a prove di leakage su prototipo. I limiti sono stabiliti dal processo di costruzione. In particolare è misurata la tenuta idraulica in corrispondenza a giunti freddi (o giunti di costruzione).

Mediante una indagine sonica, è fornita una misura dettagliata della omogeneità che può raggiungere una parete in una condizione limite, nella quale mediante il ricorso a superfluidificanti il getto del calcestruzzo non è stato seguito da vibrazione meccanica.

Sono infine proposte delle specifiche di realizzazione di un sistema modulare per lo smaltimento dei rifiuti, imperniato su un involucro esterno in calcestruzzo e su una malta cementizia per l'immobilizzo dei rifiuti al suo interno.

Premessa

Lo smaltimento dei residui definiti "pericolosi", secondo la classificazione adottata nel sistema legislativo italiano (decreto n. 22 del 5/2/97), e dei rifiuti nucleari, può avvenire secondo due metodologie indicate simbolicamente DDD e CCC. La prima si basa sul principio "dividi-diluisci-disperdi", in base al quale la sostanza, opportunamente ridotta volumetricamente o mescolata ad altre, perde la sua nocività e può essere trattata alla stregua di un rifiuto convenzionale, se non addirittura rilasciata nell'ambiente senza restrizioni.

La seconda metodologia, la cui abbreviazione significa "concentra-consolida-confina", prevede che la sostanza sia isolata allo stato solido nella maniera più funzionale alla movimentazione e allo stoccaggio in sicurezza. Nell'articolo si discute sulla seconda metodologia. Per questa, il più importante fenomeno naturale che può comportare il contatto dei rifiuti con l'ambiente è rappresentato dalle precipitazioni meteoriche, per effetto delle

quali il rifiuto può essere permeato dall'acqua.

L'acqua di percolazione può trascinare sostanze organiche, sali, acidi organici ed inorganici, cloruri, oli, ioni metallici ed altre componenti tossiche eventualmente presenti nei rifiuti. Le caratteristiche del percolato dipendono ovviamente da quelle dei rifiuti permeati. Giunta sul fondo dell'ambiente di stoccaggio o della discarica, l'acqua acquisisce pressione e preme sulle barriere esistenti; una minima discontinuità nell'impermeabilizzazione rappresenta una via di fuga di acque contaminate verso le falde sotterranee, con conseguenze sull'ambiente.

Rifiuti pericolosi e rifiuti radioattivi richiedono pertanto di essere racchiusi in un contenitore del quale sia qualificata la capacità di tenuta, ovvero che garantisca un leakage limitato. Nel seguito questo contenitore è denominato *contenitore modulare*, o semplicemente *modulo*. In alternativa, possono essere condizionati in matrici di materiale opportuno, in grado di offrire precise caratteristiche di resistenza alla lisciviazione (o leachability). Nel seguito questa matrice è denominata *grout*. Si realizza infine una doppia barriera, funzionalmente indipendente l'una dall'altra, qualora il materiale condizionato in matrici resistenti sia racchiuso in contenitori a tenuta.

Con quest'ultimo obiettivo si è mosso il presente studio. Presuppone che per particolari tipologie di rifiuti pericolosi, compresa una categoria di rifiuti nucleari (a bassa e media attività), siano costruiti dei moduli in conglomerato cementizio, eventualmente armato, e che l'immobilizzo al loro interno sia affidato ad una idonea malta cementizia (*grout*).

Il manufatto così ottenuto è destinato allo stoccaggio in appositi spazi, più o meno protetti e accessibili, nel seguito *deposito*. Al sistema dovrà essere assicurata una ben definita durata funzionale, pari al tempo necessario alla perdita di pericolosità dei rifiuti, ("tempo di decadimento" nel caso di rifiuti radioattivi).

Per varie categorie di rifiuti, la durata funzionale è di alcuni secoli, tale da poter ipotizzare la perdita di memoria, nel lungo periodo, circa la esistenza del deposito. Per i conglomerati che costituiscono le barriere, ciò si traduce in una plurisecolare durabilità ad agenti atmosferici aggressivi, nella configurazione originaria, ovvero senza ipotizzare interventi correttivi nel tempo.

I rifiuti pericolosi

La più generale definizione di "rifiuti" è sostanze o oggetti che derivano da attività umane o da cicli naturali, delle quali il detentore si disfi, sia che abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi. Vengono classificati secondo l'origine, in **rifiuti urbani** e **rifiuti speciali**, e, secondo le caratteristiche in **rifiuti pericolosi** e **non pericolosi**.

Fanno parte dei rifiuti urbani:

- rifiuti domestici anche ingombranti e rifiuti provenienti dalla pulizia delle strade;
- rifiuti di qualunque natura o provenienza, giacenti sulle strade ed aree pubbliche;
- rifiuti vegetali provenienti da aree verdi, quali giardini, parchi e aree cimiteriali.

Fanno parte dei rifiuti speciali:

- i rifiuti provenienti da lavorazione industriale e da attività commerciali;
- i rifiuti derivanti dall'attività di recupero e smaltimento di rifiuti, i fanghi prodotti da trattamenti delle acque e dalla depurazione delle acque reflue e da abbattimento di fumi;
- i rifiuti derivanti da attività sanitarie;

* ENEA

** Politecnico di Milano

*** EN.CO. srl

**** CESI-Ismes

- i macchinari e le apparecchiature deteriorati ed obsoleti;
- i veicoli a motore, rimorchi e simili fuori uso e loro parti.

I rifiuti urbani pericolosi sono costituiti da tutta quella serie di rifiuti che, pur avendo un'origine civile, contengono al loro interno un'elevata dose di sostanze pericolose e che quindi devono essere gestiti diversamente dal flusso dei rifiuti urbani "normali". Tra, i principali sono i medicinali scaduti e le pile.

I rifiuti speciali pericolosi sono quei rifiuti generati dalle attività produttive che contengono al loro interno un'elevata dose di sostanze inquinanti. Per questo motivo occorre renderli innocui, cioè trattarli in modo da ridurne drasticamente la pericolosità. Nella normativa precedente rispetto a quella in vigore attualmente, tali rifiuti erano definiti come rifiuti tossico nocivi. Sono genericamente elencati:

- derivati dalla raffinazione del petrolio;
- prodotti di processi chimici;
- residuati della industria fotografica, metallurgica, conciaria e tessile;
- oli esauriti, solventi;
- scorie di impianti di trattamento dei rifiuti;
- residuati di ricerca medica e veterinaria.

Una categoria separata sono le sostanze radioattive, che possono provenire da impianti nucleari, istituti di ricerca e ospedali. Sono considerate nocive in quanto l'esposizione prolungata alle radiazioni ionizzanti può nuocere agli organismi viventi e, dal punto di vista normativo, è per essi previsto, prima dello smaltimento e comunque di ogni tipo di stoccaggio provvisorio, il cosiddetto "condizionamento", vale a dire la cementificazione o la solidificazione in manufatti standardizzati.

I rifiuti radioattivi possono avere un livello di attività più o meno elevato; quelli a maggiore attività, (o "a vita lunga"), prodotti dalle centrali nucleari, possono essere vetrificati (cioè conglobati in una matrice vetrosa) e sigillati in contenitori di acciaio, mentre la maggior parte (a bassa e media attività, o "a vita breve") viene, condizionata in fusti metallici di varie dimensioni; essi devono essere detenuti dal produttore, sino all'avviamento ad apposito impianto di smaltimento, generalmente nazionale.

Considerazioni sulla quantità di rifiuti

La figura seguente, tratta dal testo di Watts, riporta i quantitativi di materiale prodotti nel mondo occidentale, che non possono essere dispersi nel suolo, nell'aria o nell'acqua.

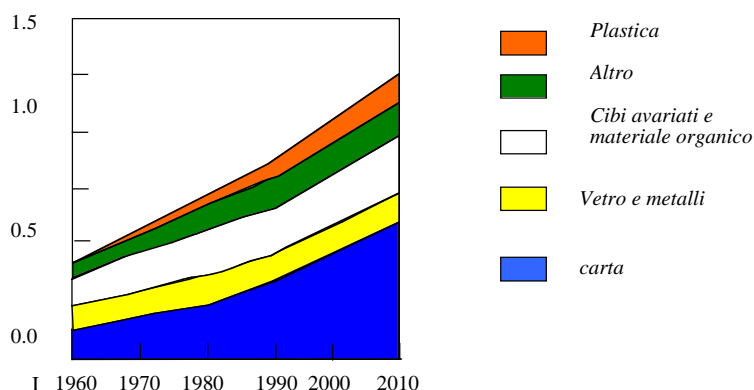


Fig. 1 - Rifiuto non-radioattivo, espresso in tonnellate/anno, pro capite, nei Paesi occidentali.

I rifiuti pericolosi rappresentano una frazione marginale del totale che risulta dal grafico.

Per meglio capire l'ordine di grandezza del problema in Italia, si riportano i dati ufficiali dei rifiuti prodotti in una provincia industriale del Nord Italia, la

provincia di Varese. Sono espressi in tonnellate, e si riferiscono agli anni dal 1998 al 2001. Opportunamente estrapolati possono fornire una attendibile quantificazione su base nazionale.

Tabella 1: quantitativi in una provincia industriale

RIFIUTI SPECIALI	1998	1999	2000	2001
Pericolosi	52366	68152	70564	136149
Non pericolosi	722539	903964	970728	1038870
Totale pericolosi e non pericolosi	774905	972116	1041292	1175019
Incremento percentuale	25%	26%	7%	13%

Si può evincere che la tendenza della produzione è in costante aumento, e l'incidenza percentuale di rifiuti pericolosi è in sensibile crescita.

L'esperienza nucleare

È da tempo in atto una ricerca di soluzioni per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività attualmente presenti sul territorio nazionale, sotto forma di fusti metallici cementati internamente. Nell'ambito della ricerca è stata sviluppata una sperimentazione, condotta da ENEA (che si è avvalsa della collaborazione del Politecnico di Milano per gli aspetti strutturali e gestionali, di EN.CO. per lo studio dei materiali, e di CESI-ISMES per le prove in oggetto). Fa riferimento ad una soluzione, sviluppata a livello concettuale dall'ENEA stessa, che propone una tipologia di impianto di tipo "ingegneristico", in contrapposto all'opzione di tipo "geologico".

I rifiuti radioattivi sono racchiusi in fusti, che a loro volta sono immobilizzati mediante un'apposita malta cementizia ("grout"), all'interno di un cassone in calcestruzzo armato, detto "modulo", figura 2. I moduli sono stoccati in

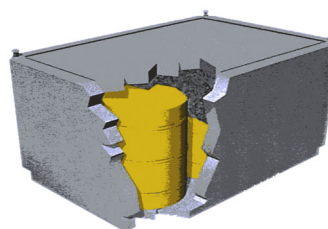


Fig. 2 - Contenitore modulare.

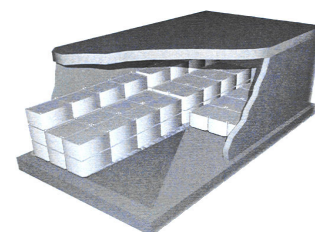


Fig. 3 - Unità di deposito.

strutture scatolari in calcestruzzo armato, definite "unità di deposito", illustrato in figura 3.

Successivamente, come illustrato in figura 4, le unità di deposito saranno coperte ed interrate, e l'intero sistema dovrà essere idoneo al contenimento dei radionuclidi per un tempo pari almeno al decadimento della loro radioattività, stimato in 300 anni, al termine dei quali esso è destinato alla "perdita di memoria".

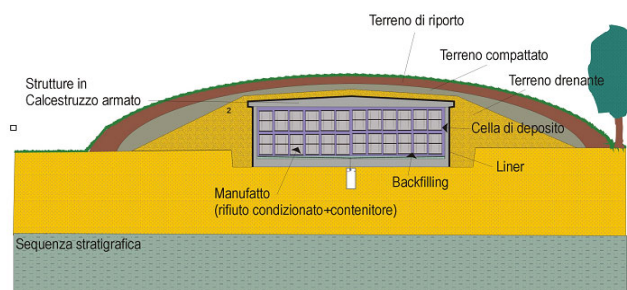


Fig. 4 - Configurazione finale dell'impianto.

In tale contesto, il contenitore modulare si configura quindi come sottosistema di un più generale sistema "multibarriera" alla migrazione dei radionuclidi, ove le barriere sono poste in serie, con funzione ridondante: internamente ad esso si hanno la matrice cementizia e l'involucro metallico dei fusti, esternamente le pareti delle celle ed eventuali ulteriori rivestimenti e/o terreni compattati.

Scelta del materiale e progetto dei contenitori

Le miscele studiate, ottimizzate per ridurre il leakage, sono in tabella 2, espresse in kg/m³:

Tabella 2: Miscela ottimizzata per minimizzare il leakage

	calcestruzzo	grout
Cemento CEM III/B 42.5	345	300
Cenere volante di Fusina	100	50
Fumo di silice	30	30
Ghiaia cava Canzian	745	
Sabbia cava Canzian	980	
Combinato 0-8 mm		1530
Calcare macinato		300
Viscosizzante	11,88	
Superfluidificante	5,89	
Additivo superfluidificante acrilico		18,27
Acqua	144	144

Data la notevole quantità di armatura (pareti di 15 cm, doppiamente armate con f 12 ogni 15 cm nelle due direzioni), si è prospettato il problema della lavorabilità della miscela, resa critica da tale addensamento d'armatura. La congestione delle armature del contenitore e i ridotti spazi per il grout hanno comportato difficoltà di vibrazione durante il getto, e pertanto è stato previsto l'uso di superfluidificanti.

Lisciviazione e percolamento

La lisciviazione è l'asporto selettivo di particelle che avviene nel materiale a seguito di un moto di filtrazione di acqua. Quanto un tale moto possa trascinare materiale condizionato in una apposita matrice dipende dalle carat-

teristiche della matrice stessa. Nella presente trattazione si prescinde da tale aspetto, e si presuppone che, se esiste moto di filtrazione, esistono le condizioni per una lisciviazione. La ricerca si è quindi limitata alla misura dei parametri che regolano un possibile moto di filtrazione nella parete di calcestruzzo. "Leakage", inteso come percolamento a valle dello strato attraversato, e lisciviazione quindi si identificano nella serie di prove.

In una schematizzazione teorica, un moto di filtrazione di acqua si sviluppa in due tempi: nel primo l'acqua permea il calcestruzzo saturandolo, e in un secondo tempo, se si mantiene il battente di pressione, si instaura un flusso di acqua.

Le prove sono articolate in due gruppi: 1) ricerca di un calcestruzzo che garantisca un leakage contenuto, Tabella 2, e 2) la misura del leakage su un contenitore realizzato con il materiale prescelto. Il contenitore ha le dimensioni indicate nella figura 5.

La prima attività ha fatto riferimento alla norma ANSI /ANS -16.1-1986: la prova di leakage è effettuata misurando lo spessore di penetrazione del fronte umido su una lastra di calcestruzzo non preventivamente saturato. La lastra ha dimensioni 300 x 300 x 120 mm, ed il gradiente di pressione¹ è stato pari a 0.58 bar/cm. Sono state esaminate diverse miscele. Nelle prove, la misura dello spessore x attraversato dal fronte umido è stata correlata mediante la formula:

$$x \propto \sqrt{t}$$

ove, e t è il tempo.

Le prove hanno permesso di stabilire che gli spessori di imbibimento attesi in una lastra di calcestruzzo omogenea e priva di difetti sono minimi, in una ampia categoria di calcestruzzi caratterizzati da rapporto acqua/cemento inferiore a 0.5. Un aumento della pressione dell'acqua non cambia l'ordine di grandezza dello spessore, a meno che non siano presenti cricche. Minimi sono in conseguenza le perdite di liquido (leakage), e la lisciviazione del calcestruzzo da parte del trasporto d'acqua, (leachability).

La attività ha identificato una miscela di calcestruzzo in grado di minimizzare leakage e leachability, pur mantenendo elevate prestazioni in termini di resistenza e durabilità. Come era previsto, in tutta la attività si è constatato che le quattro proprietà sono positivamente correlate tra loro, ed il miglioramento di una di queste è associato generalmente con il miglioramento delle prestazioni nell'ambito delle rimanenti proprietà.

Una volta saturato l'intero spessore, il flusso è costante nel tempo, se è

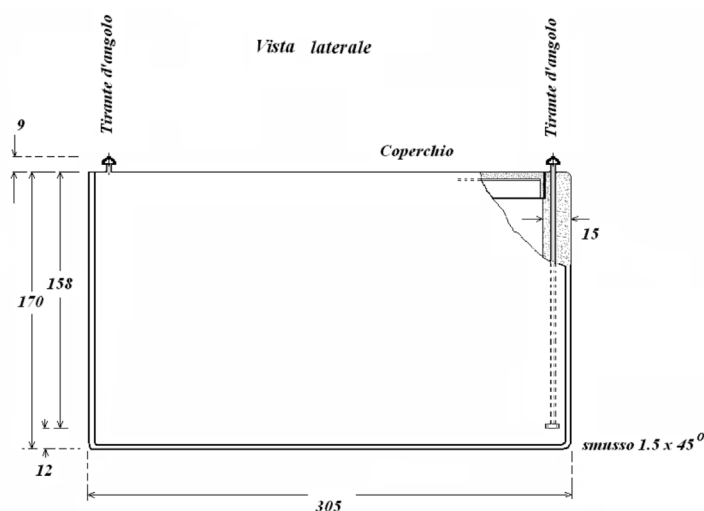


Fig. 5- Viste laterale e in pianta del contenitore modulare.

Tabella 3: ricerche sulla variazione delle proprietà del calcestruzzo nel tempo

	Data di inizio	Ambiente	Scopo
La Rochelle	1904-1911 1974 1991	marino	Resistenza delle armature alla corrosione Resistenza delle armature alla corrosione Penetrazione dello ione cloro nel calcestruzzo
St John (Canada)	1920	marino	Influenza dei dosaggi sulla tenuta in ambiente marino
Ostenda	1934	marino	Influenza dei dosaggi sulla tenuta in ambiente marino
Trondheim	1936	marino	Influenza dei dosaggi sulla tenuta in ambiente marino
Sasatami		3 amb. diversi	Influenza delle ceneri volanti ed altro sulla carbonatazione e la penetrazione dei cloruri
ENEL Cris - Politecnico di Milano	1992-1998	ambiente urbano	Aderenza ferro-calcestruzzo
ENEL Cris	1990-2005	marino	Aderenza ferro-calcestruzzo
Sakai	1982	marino	Effetto degli inibitori di corrosione e dei rivestimenti in resina epossidica
Costa ovest della Svezia	1991	marino	Resistenza al gelo e allo sfaldamento
Treat Island	1935 1961	stradale stradale	Influenza delle trappole d'aria nei cicli gelo-disgelo Idem
CANMET	1978-1994		Influenza degli additivi nella resistenza ai cicli gelo-disgelo
BHP 2000	2000	ambienti vari	Comportamento meccanico dei calcestruzzi ad alte prestazioni.

costante il battente di pressione, e quindi l'acqua permeata è direttamente proporzionale al tempo. Il flusso è regolato dalla legge di Darcy:

$$Q = \frac{dp}{dr} Ak \eta^{-1}$$

ove

k è il coefficiente di permeabilità, dipendente dal tipo di materiale,

η è la viscosità del liquido,

dp/dr è il gradiente di pressione,

r è la ascissa misurata lungo lo spessore della lastra,

A è la superficie di calcestruzzo attraversata.

La permeazione si realizza per porosità intrinseca della pasta di cemento, per quella capillare e per quella di eventuali fessure. Se esistono cricche o microcricche, quest'ultima è prevalente. In prove su piastre, è possibile misurare i contributi dei differenti fenomeni, mantenendoli separati. A parità quindi di altre condizioni, per un determinato tipo di conglomerato, k assume il valore minimo in assenza di microcricche, ed aumenta in ragione della pervietà del sistema fessurativo; da ciò consegue che per poter controllare adeguatamente il fenomeno è necessario prevenire ogni tipo di fessurazione che potrebbe manifestarsi nel lungo periodo, specialmente per attacchi di tipo ambientale.

Ai fini delle applicazioni ingegneristiche, è quindi necessario il riferimento ad una lunga durata, pari almeno alla prevista vita funzionale dell'opera perseguita, e alle condizioni ambientali previste.

Le note menzionate ai riferimenti 32-44 riportano risultati di prove di lunga durata in ambienti particolari. Ricerche del genere sono state condotte, fin dall'inizio del secolo scorso, per indagare l'attacco dei de-icing salts alle strutture da ponte, o l'attacco dei cloruri a dighe in ambiente marino. In proposito, si riportano schematicamente le indagini più significative rintracciate dalla letteratura tecnica.

Pur essendo ricerche più o meno coordinate tra loro, la varietà delle condizioni ambientali prospettabili giustifica la pluralità degli impianti sperimentali. In alcuni casi il processo di attacco è stato accelerato rispetto all'attacco naturale, consentendo così la raccolta in pochi anni di dati rappresentativi dell'attacco durante la intera vita della costruzione.

Misure di leakage

Le prove sono state effettuate dapprima su lastre di grout e di calcestruzzo non armato, in fase di qualificazione dei materiali [5], presso gli stabilimenti EN.CO. di Spresiano (TV) e, quindi presso gli stabilimenti ISMES di Seriate (BG) sugli stessi materiali posti in opera, al fine di rilevarne l'eventuale conseguente difettosità; la prova sul grout è tuttora in corso.

a) prove su lastra

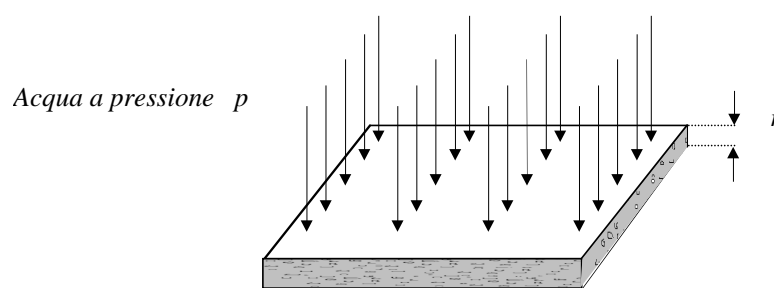


Fig. 6- Prova di leakage ANSI.

Le prove hanno rispettato i criteri espressi nel documento ANSI /ANS - 16.1-1986: esse state effettuate su lastre di conglomerato, non preventivamente saturato, di spessore 12 cm e di dimensioni 300x300 mm, sotto l'azione di un gradiente di pressione pari a 0.58 bar/cm

I risultati ottenuti, in un arco temporale di 120 giorni, sono stati correlati mediante le seguenti formule:

$$\text{per il calcestruzzo} \quad x = 0,91 (\sqrt{t} - 1,34)$$

$$\text{per il grout} \quad x = 1,04 (\sqrt{t})$$

ove x , in mm, è la profondità di penetrazione dell'acqua nel calcestruzzo; t , in giorni, è il tempo dall'inizio della esposizione.

Tabella 3: Avanzamento del fronte saturo, in funzione della durata di tempo

durata	x in mm
1000 giorni	27.5
30 anni	94
300 anni	296

La pressione di prova, almeno nei range sperimentati, può incidere principalmente se il calcestruzzo è fessurato generando chiusure o aperture.

Le misure di permeabilità su campioni di dimensioni ridotte ha determinato il parametro k che compare nella equazione di Darcy. I valori sono compresi tra $k = 8 \cdot 10^{-11}$ cm/s, e $k = 2.5 \cdot 10^{-10}$ cm/s. Per un provino è stata misurato un coefficiente $k = 2 \cdot 10^{-9}$ cm/s.

b) prove su contenitore

L'ottenimento di elevate prestazioni nell'ambito delle quattro proprietà è legato ad un rapporto acqua cemento contenuto, in tutte le miscele provate inferiore a 0.5 in termini di peso. A margine quindi si è prospettato il problema della lavorabilità della miscela, resa critica da due requisiti del contenitore modulare di deposito: la resistenza ad una categoria di carichi incidentali, tra i quali la caduta, ed il contenimento degli spessori delle pareti, fissato in 15 cm. I due requisiti ha portato ad un contenitore modulare con pareti armate nelle due direzioni, verticale ed orizzontale, con armatura ripartita su entrambe le superfici. In totale quindi quattro strati di armature, ϕ 12 ogni 15 cm, distribuite in una parete di 15 cm di spessore. La congestione delle armature in breve spazio ha comportato la impossibilità di vibrare la miscela durante il getto. La miscela quindi, oltre ad ottimizzare le quattro proprietà di cui sopra, prevede un uso spinto di superfluidificanti, per poter riempire convenientemente i casseri, evitando i difetti ricorrenti connessi alla congestione di armature, e all'assenza di vibrazione. Il ricorso ai superfluidificanti, come si vedrà, è uno degli aspetti critici della specifica di realizzazione dei moduli.

La difficoltà di conciliare la lavorabilità con le quattro proprietà di base (minimo leakage e leachability, ed elevate resistenza e durabilità) stabilisce una differenza tra le prove di laboratorio su lastre confezionate ad hoc, e le prove su prototipi di moduli, che incorporano difetti per le difficoltà realizzative. Queste ultime si configurano pertanto come misure della eventuale difettosità dei contenitori modulari.

Sono stati realizzati quattro campioni di contenitore modulare identici, e sono stati provati presso i laboratori Ismes di Seriate. Ciascuno dei campioni pesa circa 10 tonnellate, ed ha le dimensioni richiamate in figura 1. Le prove della seconda attività si articolano in quattro gruppi:

- 1) misure di tenuta.
- 2) Misure di omogeneità mediante ultrasuoni, e esami topografici. Avendo di mira i parametri meccanici più importanti, densità modulo elastico e porosità, le prove intendono stabilire quanto questi parametri siano distribuiti omogeneamente nella struttura, e quanto quindi una prova su un campione di calcestruzzo, come la prova ANSI, sia rappresentativa del comportamento della struttura.
- 3) Misure di corretto riempimento. Hanno lo scopo di esaminare la procedura di costruzione e di riempimento, utilizzando esami visivi e tomografici.
- 4) Misure di leakage e leachability. Hanno lo scopo di duplicare su prototipo il test di leakage effettuato su campioni di lastra, realizzata con lo stesso materiale.

Queste prove mettono in luce la suscettibilità a difetti nel passaggio da lastre della stessa miscela, prive di armatura, a prototipi di moduli completi, caratterizzati da una armatura attorno a 200 kg/m^3 .

Misure di tenuta (Giunti freddi)



Fig. 7- Una parete del modulo n. 1 con microfessurazioni superficiali evidenziate con il pennarello rosso. Trattasi di microfessurazioni di apertura sensibilmente inferiore al 0.1 mm, che interessano uno strato di profondità dell'ordine del mm.

Il rilievo visivo condotto sui quattro moduli, all'esterno e all'interno, e sui quattro coperchi ha fatto rilevare alcune categorie di difetti, ricorrenti in strutture in c.a. Occorre stabilire se abbiano rilevanza in termini di resistenza, impermeabilità e durata.

Utilizzando la nomenclatura corrente, i difetti sono catalogati come segue:
Linee di fessura: ovvero discontinuità nel getto con i lembi distanti qualche decimo di millimetro o più, senza apparente causa.

Zone di microfessurazione diffusa. Sono zone nelle quali è presente una rete di microdiscontinuità appartenenti ad uno strato ridotto che non comprende inerti ed è facilmente asportabile dal getto sottostante. In alcuni punti la profondità è stata verificata sperimentalmente, con valori attorno a $0,5 \div 1,5$ mm.

Zone con inclusioni di aria e con evidenti irregolarità superficiali.

Linee di ripresa di getto, dove si rende evidente una interruzione nelle operazioni di getto, ed una ripresa delle operazioni quando la parte primaria ha già cominciato la presa. In alcuni casi la linea di discontinuità è molto marcata.

Agli effetti delle prove di tenuta, le osservazioni più importanti sono quelle sulle riprese di getto. Il modulo è previsto senza giunto alcuno. Date le dimensioni, può essere facilmente realizzato mediante una sola pompa, che serva in sequenza le quattro pareti, ritornando ad una stessa posizione dopo qualche minuto. Tuttavia l'utilizzo di additivi mirati ad ottenere una buona fluidità pone il problema della realizzazione di giunti. Gli additivi utilizzati forniscono praticamente la consistenza di un liquido al momento della fuoriuscita dalla pompa. In dipendenza dell'additivo, il getto "fa presa", ovvero acquisisce una consistenza di solido, in tempi brevi, al limite nell'intervallo di qualche decina di minuti. Durante il getto, interruzioni di pochi minuti possono quindi realizzare una configurazione che rientra nella tipologia dei giunti di costruzione. Nei quattro campioni questa situazione si è evidenziata per motivi pratici nella realizzazione dell'ultimo tratto delle pareti. Si è ritenuto di dover registrare accuratamente la posizione di tali giunti, ma di non dover far nulla per evitarne la formazione.

Le prove hanno evidenziato che le superfici interessate da riprese di getto hanno un comportamento assimilabile a quello di superfici interessate da

cricche, quantunque esigue, misurabili da aperture attorno al centesimo di mm. Lungo tali superfici, la prova ha rilevato perdite di liquido misurabili con un coefficiente di permeabilità attorno a $9 \cdot 10^{-9}$ m/s. Importante per soppesare tale perdita è la pressione massima del liquido, attorno a 0.3 bar. Il valore di perdita risulta elevato, tale da alterare quanto può concludersi con le prove su campioni di dimensioni ridotte. I corpi di norma sulle costruzioni in c.a. riportano un capitolo sulle procedure di realizzazione di giunti di costruzione. Con riferimento ad esempio, alle norme dello American Concrete Institute delle Norme ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete (Aci 318-99) and Commentary (ACI 318R-99), i giunti di costruzione sono regolamentati nel paragrafo 6. Le specifiche al riguardo sono essenzialmente rivolte all'ottenimento di una resistenza pari alla resistenza dell'elemento strutturale realizzato in assenza di giunto. Nello stesso corpo di normativa, i dettagli di realizzazione, per l'argomento giunti di costruzione, sono regolamentati dalle Norme ACI Committee 347². Ancora le prescrizioni sono essenzialmente rivolte alla resistenza della sezione sulla quale si colloca la ripresa di getto. Nulla è detto al riguardo della tenuta del calcestruzzo in corrispondenza al giunto.

L'importanza dei giunti per la tenuta delle barriere in cls. non è nuova per le opere di ritenuta idraulica: è per esempio nota e convenientemente trattata, anche nelle prescrizioni operative, nella letteratura sulle dighe.

Disomogeneità nell'ambito di uno stesso getto

La omogeneità delle caratteristiche dipende da quanto il calcestruzzo è mantenuto in movimento nella coclea, e dalla vibrazione meccanica immediatamente successiva al getto. Una condizione limite è quella nella quale sia assente la vibrazione, e si faccia conto su superfluidificanti per ovviare a tale assenza. È la condizione nella quale sono state svolte le prove.

Sono state eseguite prove sui moduli n. 2 e n. 4, con l'esecuzione di "misure dirette di velocità" per trasparenza sui 4 lati, sul fondo e sul coperchio di ciascun modulo per un totale di 856 punti di misura. Nelle zone di maggiore interesse sono inoltre state eseguite un totale di 10 tomografie soniche (5 per ogni modulo) lungo 9 sezioni verticali e 1 sezione orizzontale (modulo n. 4). La tomografia sonica è stata eseguita acquisendo i segnali ultrasonici con passo di misura ogni 5 cm. Le misure sono state eseguite in accordo alla normativa UNI 9524.

Usualmente le indagini ultrasoniche vengono effettuate in corrispondenza di punti distribuiti su linee significative di una struttura. Disponendo di misure di riferimento relative alla struttura in questione o, più semplicemente, eseguendo un'analisi differenziale, l'esame dei valori delle velocità soniche riscontrate consente l'individuazione di difetti quali vuoti, fessure, riprese di getto, distacchi, perdita di consistenza della malta cementizia. Nel nostro caso la prova è stata utilizzata per misurare il modulo elastico puntuale, ed analizzare la omogeneità del manufatto sotto l'aspetto delle proprietà meccaniche.

I valori delle velocità soniche sono molto elevati, generalmente superiori a 4000 m/s, con valori massimi di circa 4300 ± 4500 m/s in alcune zone, e valori minimi attorno a 3600 m/s. Il modulo elastico di Jung, E, è in prima approssimazione:

$$E = V^2 \mu$$

ove μ è la densità. Si ottengono quindi valori compresi tra $5 \cdot 10^4$ Mpa, e $3.24 \cdot 10^4$ Mpa, con valori ricorrenti superiori a $4 \cdot 10^4$ Mpa.

Sono anche state effettuate misure dirette su provini cilindrici estratti dalle pareti. Le carote estratte confermano il trend osservato, ma su un numero di campioni necessariamente limitato.

Le prove sono necessariamente limitate a parametri della resistenza meccanica. È tuttavia una ipotesi ragionevole che la permeabilità sia correlata positivamente alla resistenza, e che presenti quindi una disomogeneità comparabile.

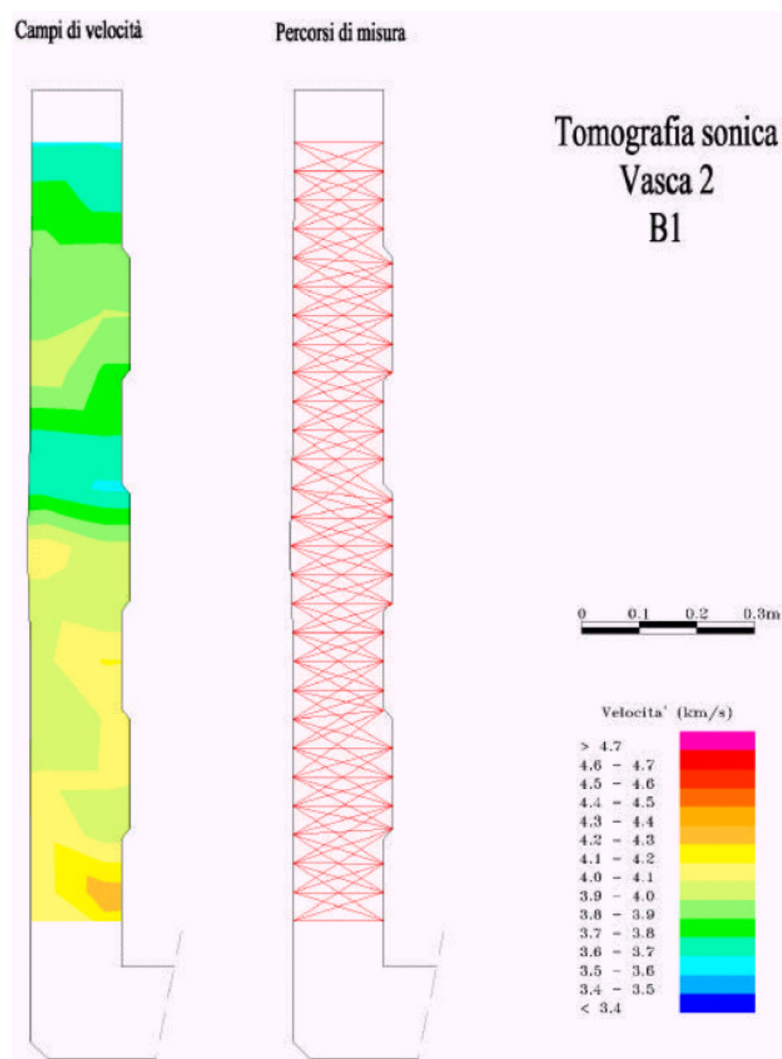


Fig. 8- Aspetto di una tomografia sonica. Mappa delle velocità di propagazione registrate, e tracciamento dei percorsi.

Prove di avanzamento del fronte umido su grout

Un contenitore modulare è stato realizzato con 3 cavità al suo interno, così come mostrato nella tavola allegata, allo scopo di predisporre un modulo per la prova di leakage. La prova si è sviluppata secondo le seguenti fasi:

- Riempimento iniziale (effettuato nel settembre 2004) con acqua additivata con blue di metilene (quantità di 5 g/l) delle cavità: la cavità 1 era alla pressione di 0,1 atm, mentre le cavità 2 e 3 alla pressione atmosferica;
- Nel gennaio 2005 le cavità sono state svuotate ed è stato effettuato un carotaggio passante dall'esterno (diametro 30 mm) per ciascuna cavità per verificare il livello di penetrazione dell'acqua all'interno del grout;
- Dopo aver sigillato i fori eseguiti, nel febbraio le cavità sono state di nuovo riempite con acqua additivata con blue di metilene: le 3 cavità sono state lasciate alla pressione atmosferica;
- Nel novembre 2005 le cavità sono state svuotate ed è stato effettuato un carotaggio per ciascuna vasca dall'esterno per verificare il livello di penetrazione dell'acqua all'interno del grout.

Per ciascuna cavità sono stati pertanto effettuati due carotaggi:

- il primo dopo circa 4 mesi di permanenza a contatto con l'acqua;
- il secondo dopo circa 13 mesi di permanenza complessiva a contatto con l'acqua.

Dopo 13 mesi carotaggio nella cavità 1 ha messo in evidenza l'assorbimento dell'acqua fino alla separazione grout/parete del modulo, figura 10. Assorbimenti inferiori, ma qualitativamente confrontabili, sono stati osservati mediante i carotaggi nelle altre due cavità.

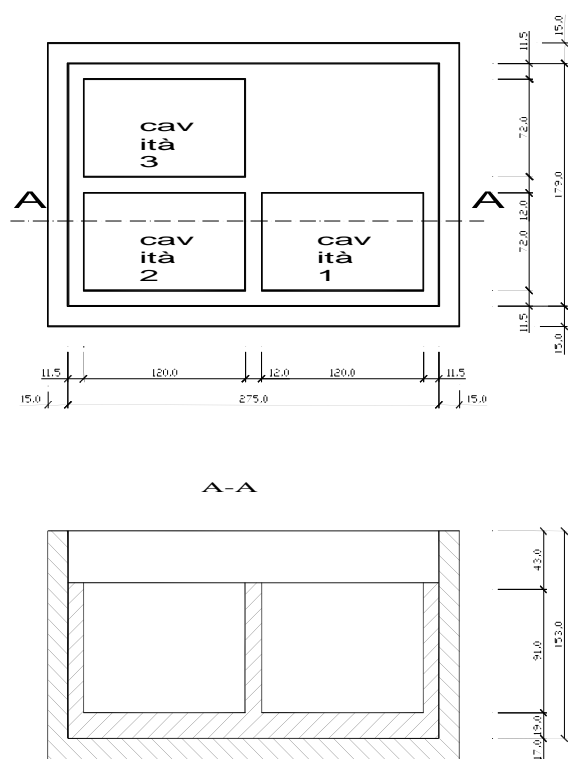


Fig. 9 - Posizione e numerazione delle cavità all'interno del contenitore modulare.

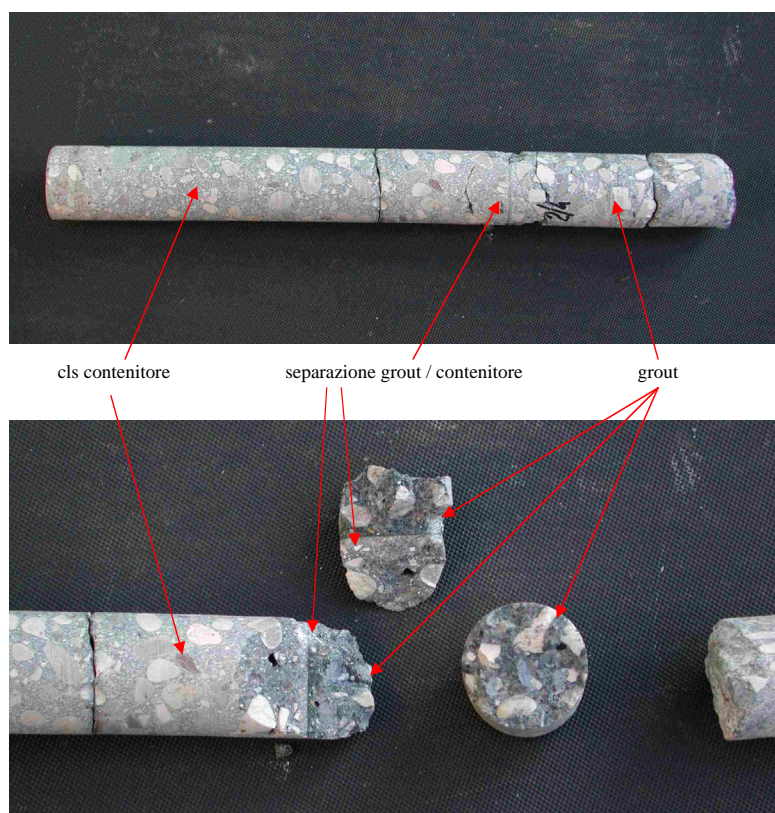


Fig. 10 - Aspetti dei campioni estratti dopo 13 mesi, dalla cavità in pressione.

Esame critico

I principali processi che portano alle variazioni della proprietà del calcestruzzo sono legati alla penetrazione di agenti atmosferici, che dipende dalla porosità della matrice di calcestruzzo. Anche il leakage dipende dalla porosità del calcestruzzo.

Nessuna prova fornisce precise informazioni sulle possibili variazioni nel tempo della porosità, tuttavia si ritiene valida la seguente congettura: "i calcestruzzi che garantiscono il leakage minimo sono quelli che offrono anche garanzie di stabilità nel tempo, e di conseguenza, se esistono condizioni perché il leakage possa manifestarsi, esse si palesano in tempi brevi (prescindendo ovviamente dall'intervento di cause meccaniche che comportino fessurazione)". Come conseguenza, per i materiali che si intendono utilizzare, caratterizzati da porosità minima, le prove che possono essere effettuate al tempo zero sono rappresentative delle caratteristiche nel tempo.

Questo suggerisce una specifica per il confinamento dei rifiuti, ritenendo ancora le barriere articolate in grout, modulo e unità di deposito.

- I rifiuti sono condizionati in una matrice di materiale opportuno, grout, in grado di offrire precise caratteristiche di resistenza alla lisciviazione (o leachability). Il grout deve garantire un completo riempimento tra un manufatto e l'altro. In tali condizioni, come solido tridimensionale privo di cavità, ha una sua consistenza meccanica intrinseca. Non deve essere armato. Racchiuso dalle pareti in c.a. del modulo, presenta la massima stabilità che si possa realizzare. Le misure di leakage e leachability effettuate all'origine possono essere estrapolate ragionevolmente nel tempo. Il grout è la principale barriera nei riguardi della lisciviazione.

- La parete del contenitore modulare ha una funzione di difesa meccanica, limitata alla "rintracciabilità"³ dell'elemento. Essa prescinde dalla difesa nei riguardi di eventi intrusivi o dalla caduta del contenitore modulare. Le richieste di armatura sono ridotte al minimo necessario per evitare la fessurazione sotto sollecitazioni termiche o di ritiro.

- Precise caratteristiche di resistenza meccanica devono essere assicurate dalle pareti della unità di deposito.

La dispersione di rifiuti richiede la presenza di acqua, senza la quale non è possibile veicolare i rifiuti dal grout all'ambiente. Lo scenario ipotizzato considera che la unità di deposito sia allagata d'acqua, per cause non precisate. Considera inoltre inefficiente la barriera offerta dalle pareti del modulo. Con queste premesse, le prove mostrano che si riesce a dimensionare un grout, nel quale condizionare i rifiuti, in modo che il tempo necessario per imbibirlo sia dell'ordine di grandezza di qualche secolo. Solo dopo la imbibizione può aver inizio la lisciviazione della matrice nella quale sono condizionati i rifiuti. Un tale intervallo di tempo è congruente con le specifiche di contenimento dei rifiuti nocivi in genere.

Riferimenti

1. ENEA, Politecnico di Milano (coordinatore), Enel Hydro, sezione Ismes, ENCO, "Qualificazione di materiali e strutture per le barriere di confinamento di un deposito definitivo di rifiuti radioattivi a bassa attività", Maggio 2001.
2. ENEA - Task Force SITO, Centro di deposito definitivo di rifiuti radioattivi a bassa attività "Progetto concettuale e di sistema", Novembre 2000.
3. Decreto 9 agosto 2000, "Individuazione delle modificazioni di impianti e depositi, di processi industriali, della natura e dei quantitativi di sostanze pericolose che potrebbero costituire aggravio del preesistente livello di rischio".
4. Richard J. Watts, "Hazardous wastes; sources, pathways, receptors", John Wiley and sons, 1997.

5. IABSE Colloquium "Containment structures, risk, safety and reliability", edited by B. Simpson, London, UK, 11-12 July 1995.
6. ISO-TC 71 Draft proposal DP 9690: *Classification of environmental exposure condition for concrete and reinforced concrete structures*.
7. Barry, J. W. Baker, "Concrete structures for waste storage and disposal", Concrete International, September 2001, pp. 41-46.
8. F. de Larrard, V. Baroghel-Bouny, "Viellissement des bétons en milieu naturel: une expérimentation pour le XXI^e siècle", Bulletin des Laboratoires des Pontes et Chaussées, 225, pp. 51-65, mars-avril 2000.
9. American Concrete Institute, "Guide for durable concrete", ACI 201, 1992.
10. M. Berra, A. Castellani, D. Coronelli, "Bond in reinforced concrete and corrosion of bars", 7th Int. Conference "Structural faults and repair", Edinburgh, July 1997.
11. Castellani A. and M. Berra, "Ductility of plain concrete after 20 years", 14-th European regional seminar on Earthquake Engineering, Lion, Sept. 1995.
12. Castellani A., "Concrete Toughness after 20 years", American Society of Civil Engineering, Journal of the Structural Division, Vol. 19, N° 5, ASCE, paper N° 2930, May 1993.
13. Klieger, P. (1957). "Long-time study of cement performance in concrete. Chapter 10-Progress report on strength and elastic properties of concrete." ACI J., 54(6), 481-504.
14. Washa, G. W., and Wendt, K. F. "Fifty year properties of concrete." ACI J., 72(1), 2, (1975).
15. Washa, G. W., Saemann, J. C., and Cramer, S. M. (1989). "Fifty years properties of concrete made in 1931." ACI, Mater. J., 87(4), 367-371.
16. Withey, M. O. "Fifty year compression test of concrete." ACI J., 58(6), 695-712, (1961).
17. Sasatani T., Tori K., Kawamura M. (1995), "Five-Year Exposure Test on Long-Term Properties of Concrete Containing Fly Ash, Blast-Furnace Slag, and Silica Fume", 5th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete) Milwaukee, ACI SP 153-16, June.
18. Sakai K., Sasaki S. (1994), *Ten-Years Exposure Test of Precracked Reinforced Concrete in a Marine Environment*, 3rd International CANMET/ACI Conference on the Durability of Concrete, Nice, ACI SP 145-18, V.M. Malhotra ed.
19. Sandberg P. (1996), "Systematic collection of field data for service life prediction of concrete structures", in *Durability of Concrete in Saline environment* (Cementa, Lund), pp. 7-22.
20. Bartlett F.M., Mc Gregor J.G. (1994), "Assessment of Concrete Strength in Existing Structures", University of Alberta, Structural Engineering Report No. 198, May.
21. Diamond, Sidney, 1975. "Review of Alkali-Silica Reaction and Expansion Mechanisms: I. Alkalies in Cements and in Concrete Pore Solutions," *Cement and Concrete Research*, V. S, No.4, July, pp. 329-346.
22. Smith, Peter, 1974, "Fifteen Years of Living at Kingston with a Reactive Carbonate Rock," *Transportation Research Record*, No. 525, Transportation Research Board, pp. 23-27.
23. American National Standards, "Measurements of the leachability of solidified low-level radioactive wastes by short-terms test procedure" document ANSI /ANS -16.1-1986.
24. Min-Hong Zhang, Marcia C. Blanchette, V. Mohan Malhotra, "Leachability of trace metal element from fly ash concrete: results from column-leaching and bath-leaching test", *ACI Material Journal*, March-April 2001, pp. 126-136.
25. C.M. Aldea, M. Ghandehari, S.P. Shah, A. Karr, "Estimation of water flow through cracked concrete", *ACI Material Journal*, September-October 2000, pag. 567-575.
26. European Commission, Nuclear Science and Technology, "The performance of cementitious barriers in repositories", Document EUR 17643 EN, 1998.
27. Li, S., and Roy, D. M., "Investigation of Relations between Porosity, Pore Structure and CL Diffusion of Fly Ash and Blended Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, V. 16, No. 5, Sept. 1986, pp. 749-759.
28. Ozyildirim, C., and Halstead, W., "Resistance to Chloride Ion Penetration of Concretes Containing Fly Ash, Silica Fume, or Slag," *Permeability of Concrete*, SP-108, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1988, pp. 35-61.
29. ACI Committee 515, "A Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective, and Decorative Barrier Systems for Concrete", Reported by ACI Committee 515
30. D.J. Nausa,* , C.B. Oland a, B.R. Ellingwood b, C.J. Hookham c, H.L. Graves III d, "Summary and conclusions of a program addressing aging of nuclear power plant concrete structures", *Nuclear Engineering and Design* 194 (1999) 73-96.
31. Guerrero, A.; Hernández, M.S.; Goñi, S., "Durability of cement-based materials in simulated radioactive liquid waste effects of phosphate, sulphate and chloride ions" *J. Mater. Res.* 1998 pp. 2151-2160
32. Guerrero, A.; Hernández, M.S.; Goñi, S., "The role of the fly ash pozzolanic activity in simulated sulphate radioactive liquid waste" *Waste Management* 2000 pp. 51-58
33. Roy, D.M.; Scheetz, B.E.; Wakeley, L.D.; Barnes, M.W., "Leach characterization of cement encapsulated wastes" *Nucl. Chem. Waste Manag* 1982 pp. 35-42
34. Tunaboynu, K.a, "Safety requirements for the design of large containers for decommissioning waste", *Nuclear Engineering and Design* Vol: 159, Issue: 2-3, November 1, 1995, pp.189-195.

Note

¹ Il gradiente era stato realizzato applicando una pressione di 7 bar ad una piastra di 12 cm di spessore.

² ACI Committee 347, "Guide to Formwork for Concrete (ACI 347R-94)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1994, 33 pp. Also *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 2.

³ È una resistenza di deposito, (retriability), identificata in termini prestazionali. Deve assicurare il prelievo del materiale insilato per una manipolazione o un eventuale sfruttamento successivo.

