



ASPETTI INGEGNERISTICO-CIVILI NELL'IMPIANTO DI SMALTIMENTO DI RIFIUTI RADIOATTIVI PREVISTO NEL TERRITORIO ITALIANO

A.Castellani¹ – A.Taglioni²

Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Piazza Leonardo da Vinci n.32 – 20100 Milano - Italy

ENEA – Dipartimento Fissione Nucleare
Via Anguillarese n.300 – 00123 Roma - Italy

Sommario

Vengono descritte le opere civili previste nel progetto concettuale di un impianto di smaltimento per rifiuti radioattivi di bassa e media attività sviluppato dall'ENEA, con il coordinamento tecnico del Politecnico di Milano, secondo un'opzione tecnologica alternativa a quella prospettata per il sito di Scanzano Jonico, e abbandonata a causa di una forte opposizione popolare; la soluzione ora proposta ("impianto di tipo ingegneristico"), da realizzarsi in superficie, si basa principalmente sulle prestazioni offerte dai materiali utilizzati per la sua costruzione, differendo dall'altra tipologia ("deposito di tipo geologico"), in cui l'isolamento dei rifiuti avviene in profondità all'interno di cavità naturali o artificiali.

Nell'imminenza di una ripresa delle attività nucleari, ove l'esistenza dell'impianto è condizione necessaria e irrinunciabile, si ritiene che tale soluzione debba essere perseguita, in quanto sicuramente più idonea tecnicamente e territorialmente alla realtà italiana, come del resto è stato recentemente ribadito nel rapporto di un gruppo di lavoro appositamente costituito presso il MSE, che ha successivamente stabilito le procedure per una sua localizzazione e implementazione.

L'interesse maggiore è rappresentato dalle opere relative alle strutture di deposito, che, in misura più rilevante rispetto ad ogni altra opera prevista in adiacenza, richiedono un approccio progettuale diverso da quello di tipo convenzionale.

In particolare, dovendo l'impianto possedere una plurisecolare funzionalità (per un periodo pari al tempo di decadimento delle sostanze smaltite), l'attenzione è posta sulla definizione e schematizzazione dei carichi ipotizzabili nel corrispondente orizzonte temporale, e sull'accurato studio dei conglomerati cementizi da utilizzare nella costruzione; si evidenzia come tale studio abbia condotto alla messa a punto di innovativi mix-design, e abbia suggerito, attraverso le risultanze delle indagini sperimentali svolte, utili indicazioni per il perseguimento di ulteriori potenzialità dei materiali in termini di funzionalità e durabilità.

1 PREMESSA

La presente memoria prende in rassegna gli aspetti attinenti l'ingegneria civile che si ritengono di maggior rilievo nell'elaborazione del progetto di un impianto di smaltimento per rifiuti radioattivi di bassa e media attività del tipo c.d. "ingegneristico".

Detta tipologia, che prevede lo stoccaggio dei rifiuti in locali bunkerizzati, è contrapposta ad altre correnti opzioni, per le quali lo stoccaggio può avvenire invece in gallerie o trincee artificiali, oppure in miniere o cavità geologiche.

L'esposizione fa riferimento ad un progetto concettuale elaborato, in collaborazione con il Politecnico di Milano, dalla Task Force dell'ENEA [1], a suo tempo istituita con il compito di aggiornamento dello stato dell'arte in materia di smaltimento dei rifiuti radioattivi; l'attività (oltre che progettuale, inventariale e sitologica) era finalizzata al supporto tecnico da fornire ad un apposito organo giuridico di cui si prevedeva la costituzione, e che avrebbe provveduto alla localizzazione dell'impianto in una località sufficientemente isolata dal contesto sociale (sito), nonché a progettazione esecutiva, costruzione e gestione dell'impianto stesso.

L'emergenza emozionale seguita agli attentati dell'11 settembre portò invece all'assegnazione da parte del Governo del pieno incarico alla Società SOGIN, che affrettò sia la decisione localizzativa che la scelta impiantistica, avvenute in modo difforme dagli orientamenti dell'ENEA, e poi revocate in seguito ad una forte opposizione popolare.

Successivamente, sul tema, fu costituito presso il MSE un gruppo di lavoro di esperti che definì la tipologia del progetto dell'ENEA come la più idonea al caso italiano, e produsse un rapporto tecnico sulla base del quale fu emesso un Decreto, che, propedeuticamente alla decisione governativa di ripresa delle attività di produzione di energia elettronucleare, prevedeva l'istituzione di un apposito Ente Gestore, e definiva le procedure di individuazione del sito, da attuarsi in prima battuta con autocandidature su base regionale.

In quanto segue ci si propone di illustrare la proposta progettuale dell'ENEA, nonché lo studio e le indagini sperimentali sui materiali, che hanno suggerito per essi una scelta ottimale; la progettazione è stata sviluppata a livello esecutivo per un componente modulare, del quale è stato realizzato un prototipo poi sottoposto ad una serie di prove sperimentali in scala.

L'attenzione è posta principalmente sulle opere relative alle strutture di deposito, che, in misura maggiore di ogni altra opera di natura ausiliaria prevista in adiacenza (edifici per l'accettazione dei rifiuti, laboratori per il loro trattamento e locali per il loro stoccaggio provvisorio), possiedono lo specifico interesse, specialmente laddove l'approccio richiesto differisce da quello di tipo convenzionale.

L'insieme degli studi e ricerche sui materiali, ove essenziali sono stati i contributi della società EN.CO. e dei laboratori ISMES, pur non essendosi potuto condurre più compiutamente a causa dell'interruzione dell'intera attività, ha tuttavia fornito utili indicazioni per le successive fasi di progettazione; al proposito, esse vengono sintetizzate in una proposta migliorativa del componente studiato.

Si ritiene inoltre che la soluzione studiata possa estendersi, con opportuni adattamenti e senza perdita di generalità, alla convenzionale applicazione dello smaltimento di rifiuti tossici e nocivi, la cui pericolosità può talvolta risultare comparabile a quella di gran parte dei residui delle attività nucleari.

2 GENERALITÀ SUI RIFIUTI RADIOATTIVI E IL LORO SMALTIMENTO

I rifiuti radioattivi hanno per lo più origine da attività legate alla produzione di energia elettronucleare, ivi comprendendo anche la ricerca su reattori e il ciclo del combustibile (ove parte di questo può opzionalmente essere recuperata, dopo un primo utilizzo), ma vengono anche prodotti nel corso di processi industriali o in attività mediche, sia di terapia che di ricerca, così come da attività militari, ma sono tuttavia i primi che, in termini volumetrici e di "allarme sociale", determinano la dimensione del problema del loro smaltimento.

La peculiare caratteristica delle sostanze radioattive è quella di contenere atomi (radionuclidi) che tendono a mutare la propria natura disintegrandosi e trasformandosi in specie atomiche energeticamente stabili. Il ritorno alla stabilità avviene con emissione di radiazione corpuscolare (raggi *alfa* o *beta*, arrestabili rispettivamente con schermi dell'ordine di un foglio di carta e di un sottile strato di metallo), spesso accompagnata da radiazione elettromagnetica (raggi *gamma* e raggi *x*, arrestabili con uno schermo di almeno un metro di calcestruzzo).

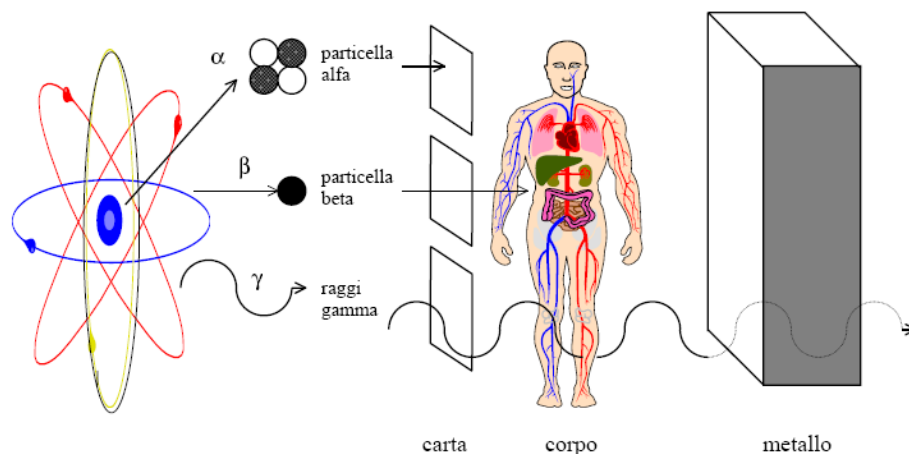


Figura1 – le principali emissioni atomiche

Questo processo di emissione, detto decadimento radioattivo, può causare danno biologico ai corpi investiti.

L'intensità della radioattività è misurata in Becquerel (Bq) e in suoi multipli (KBq, MBq, TBq), ovvero con il numero di disintegrazioni nell'unità di tempo (1 Bq = una disintegrazione al secondo), e decresce logisticamente con il tempo, per decadere a valori trascurabili in un periodo variabile da pochi secondi a centinaia di migliaia di anni, secondo la generica espressione :

$$A(t) = A(0) e^{-\lambda t}$$

ove λ è caratteristico di ciascun radionuclide.

La velocità di tale decadimento è desumibile dal cosiddetto "tempo di dimezzamento", pari a $0,693/\lambda$, che definisce il tempo nel quale di dimezza la radioattività presente in una sostanza contenente quel radionuclide.

Come per tutte le sostanze nocive (ad esempio tossiche, inquinanti, ecc.), anche per i rifiuti radioattivi lo smaltimento avviene, dipendentemente dalla tipologia del rifiuto, secondo i due classici e alternativi principi semplificativamente definiti DDD e CCC.

Nel primo caso, acronimo di “dividere-diluire-disperdere”, le sostanze, opportunamente ridotte volumetricamente e/o mescolate ad altre, perdono la loro nocività e possono essere trattate alla stregua di un rifiuto convenzionale, se non addirittura rilasciata nell’ambiente senza restrizioni.

Nel secondo caso, acronimo di “consolidare-concentrare-confinare”, si prevede che le sostanze vengano, in successione:

- omogeneizzate nel modo più funzionale alla loro movimentazione,
- raccolte e stoccate in modo tale da minimizzarne la dispersione,
- isolate dalla biosfera in condizioni di sicurezza.

Tutti i rifiuti non rilasciabili in esenzione devono quindi essere avviati ad uno smaltimento controllato, ridotti in forme solide di dimensioni standardizzate e con provate caratteristiche tecniche (resistenza a caduta, corrosione, cicli termici, ecc.); tale trasformazione avviene attraverso i cosiddetti processi di trattamento e condizionamento.

Nel corso del primo, i rifiuti vengono sottoposti a uno o più processi, che possono essere di:

- separazione (filtrazione, evaporazione, frazionamento)
- riduzione volumetrica (compattazione o supercompattazione)
- trasformazione chimica (flocculazione, incenerimento, scambio ionico, ecc,)

e nel secondo immobilizzati in una matrice solida, dopo essere stati insilati all’interno di un involucro.

I prodotti così ottenuti sono sinteticamente definiti “manufatti”, e ad essi si fa riferimento, in termini qualitativi e quantitativi, per tutto ciò che afferisce il loro successivo smaltimento.

Dal punto di vista normativo, questi possono essere classificati in base alla loro attività specifica (ovvero alla intensità di radioattività per unità di volume) o in base alla loro vita (intesa come periodo di tempo necessario per il loro decadimento a valori comparabili a quelli della radioattività del fondo naturale, comunque presente), con limiti stabiliti dalle legislazioni nazionali, secondo schemi piuttosto complessi e dipendenti dalla loro tipologia; tuttavia essi, secondo una prassi internazionalmente riconosciuta [2], ai fini dello smaltimento sono divisi nelle due principali categorie:

- a bassa-media attività (o a “vita breve”),
- ad alta attività (o “a vita lunga”),

ove i primi, che possiedono un’attività < 250 Bq/mc e un tempo di dimezzamento > 30 anni, decadono a valori di attività trascurabili in circa 300 anni.

L’operazione di confinamento avviene con modalità estremamente differenti per le due categorie, in ossequio rispettivo a due diverse impostazioni concettuali: la prima prevede che venga mantenuto per un determinato periodo di tempo la memoria dell’avvenuta operazione, la seconda prevede invece che se ne possa avere immediata “perdita di memoria”.

Ciò si traduce nel fatto che i rifiuti a vita breve devono essere posti in strutture appositamente realizzate o comunque confinati in posizione accessibile, mentre tutti gli altri rifiuti, dopo un periodo di stoccaggio provvisorio tecnicamente necessario nel caso del combustibile irraggiato, devono essere posti in cavità naturali più o meno profonde: solo a questa soluzione infatti è convenzionalmente attribuita un’efficacia per tempi infiniti, che viene esplicitamente richiamata e resa cogente in sede di classificazione normativa dei rifiuti. Spesso le due strutture di accoglimento citate sono anche definite rispettivamente come depositi artificiali e naturali.

I rifiuti a bassa e media attività, cui ci si riferisce nel presente studio, e che, nel caso italiano rappresentano volumetricamente il 95% dei rifiuti da smaltire, sono costituiti originariamente da carta, stracci, strumenti, vestiario, filtri e soluzioni acquose o organiche, resine, fanghi chimici, rottami metallici e rivestimenti metallici del combustibile, e materiali contaminati derivanti dallo smantellamento degli impianti (“decommissioning”).

Dopo gli opportuni trattamenti, essi si presentano sottoforma di fusti metallici, da 100, 200 o 400 lt, contenenti la matrice cementizia di immobilizzo, o di cassoni, ove rifiuti solidi, eventualmente compattati, sono semplicemente insilati; per essi la matrice più usata è la malta di cemento e l’involucro può essere in acciaio o in calcestruzzo.



Figura 2 - varie tipologie di manufatti in attesa di sistemazione

I rifiuti possono anche essere costituiti da pezzi di membrane o piccoli componenti, provenienti da attività di smantellamento di impianti nucleari e lievemente attivati; considerando questi ultimi, l’inventario dei rifiuti presenti nel territorio italiano, che ammonta attualmente a circa 25.000 mc, potrà aumentare a circa 80.000 mc a seguito della demolizione degli impianti attualmente in fase di dismissione.



figura 3 – smantellamento di un componente e demolizione dell’edificio

Poiché non si può escludere in assoluto l'eventualità che le future generazioni, per loro libera scelta, possano decidere di gestire in modo da loro ritenuto più congruo i rifiuti già sistemati, negli ultimi tempi la "reversibilità", ovvero la possibilità di ripristino del sito originario a costi non superiori a quelli sino a quel momento sostenuti, è divenuto uno specifico requisito di ogni soluzione, in ottemperanza al principio secondo il quale le future generazioni non dovranno sopportare i carichi loro imposti dalle pregresse gestioni dell'energia nucleare (della quale potrebbero non avere goduto i benefici) [3].

Di ciò dovrà essere tenuto conto sia nel progetto della struttura di accoglimento, sia nelle caratteristiche di forma, dimensione e peso dei manufatti, che dovranno comunque essere recuperabili, potendosi manifestare, nel corso stesso delle operazioni di smaltimento, la necessità di eseguire operazioni ne che implicino la momentanea rimozione.

Un deposito deve assicurare il confinamento, per un tempo adeguato alla vita dei rifiuti, con l'assolvimento delle seguenti funzioni:

- schermaggio alle radiazioni
- protezione da intrusione umana alla zona dei manufatti
- impedimento alla migrazione nell'ambiente di radionuclidi,

ove tale fenomeno può essere prodotto quasi esclusivamente da acque meteoriche che percolassero la struttura.

Detto obiettivo è perseguito in modo ottimale attraverso la applicazione del concetto "multibarriera", ove i rifiuti sono circondati da mezzi fisici continui, sia artificiali che naturali, detti barriere, che, poste in serie in modo ridondante, agiscono in modo sinergico.

Le barriere sono raggruppabili in tre tipi, e sono presenti in maggiore o minore misura in ogni tipo di deposito :

- barriere chimiche o di condizionamento, formate dalla matrice solida che nei manufatti ingloba i radionuclidi all'interno di un involucro, e dall'involucro
- barriere ingegneristiche o artificiali, costituite da eventuali ulteriori riempimenti e involucri, e dall'insieme delle strutture dell'impianto
- barriere naturali, rappresentate dalla struttura geologica del sito, che forma un semispazio o uno spazio di contorno alle strutture di deposito.

In un impianto del tipo qui presentato, le zone circostanti le aree di impianto vengono recintate, ed assimilate, dal punto di vista della radioprotezione, a quella di altre installazioni nucleari; in esse vengono realizzate delle installazioni ausiliarie costituite da stazioni di condizionamento locale dei rifiuti, laboratori di analisi e controllo, sistemi remotizzati di movimentazione e controllo, edifici di servizio e amministrativi, ecc., ottenendo così quello che in genere diviene, quasi sempre a livello nazionale, il Centro di Smaltimento per i Rifiuti Radioattivi.

Al fine di uniformare il grado di sicurezza nel tempo, stanti le variabili dovute a motivi operazionali ed al periodo di decadimento dei rifiuti, l'assetto gestionale dell'impianto varia in conseguenza; generalmente il programma di sorveglianza e controllo è articolato in tre fasi, nel modo seguente:

I. fase operativa: tale fase inizia con l'arrivo all'impianto della prima quantità di rifiuti e termina con la "sigillatura" del deposito, che avviene dopo il completamento dell'ultima barriera ingegneristica; in questo periodo di tempo, dell'ordine di circa 30-40 anni, la gestione dell'impianto, dal punto di vista della sorveglianza radiologica e della vigilanza esterna, è comparabile a quella di normali installazioni nucleari (centrali di potenza, di riprocessamento, ecc.)

II. periodo di controllo istituzionale: vi è solamente una vigilanza esterna, atta ad impedire l'accesso umano, ed è operato un monitoraggio ambientale per controllare l'efficacia dei sistemi di protezione o avvertire della necessità di interventi; in genere la durata del periodo è dell'ordine di qualche centinaio di anni

III. rilascio illimitato: inizia nel momento in cui l'impatto radiologico al sito è insignificante in rapporto alla locale radioattività naturale, e pertanto ogni forma di controllo può essere sospesa, lasciando comunque delle segnalazioni sull'esistenza dell'impianto alle future generazioni

3 IL PROGETTO CONCETTUALE DELL'ENEA

L'impianto di smaltimento studiato si inserisce nel più ampio contesto di un Centro di Smaltimento, costituito da una serie di realizzazioni funzionali all'impianto stesso, secondo un tipico lay-out industriale, simile a quello delle più moderne installazioni (si citano in proposito i Centri di El Cabril in Spagna e de l'Aube in Francia); nel Centro è anche previsto un deposito temporaneo per il combustibile esaurito.

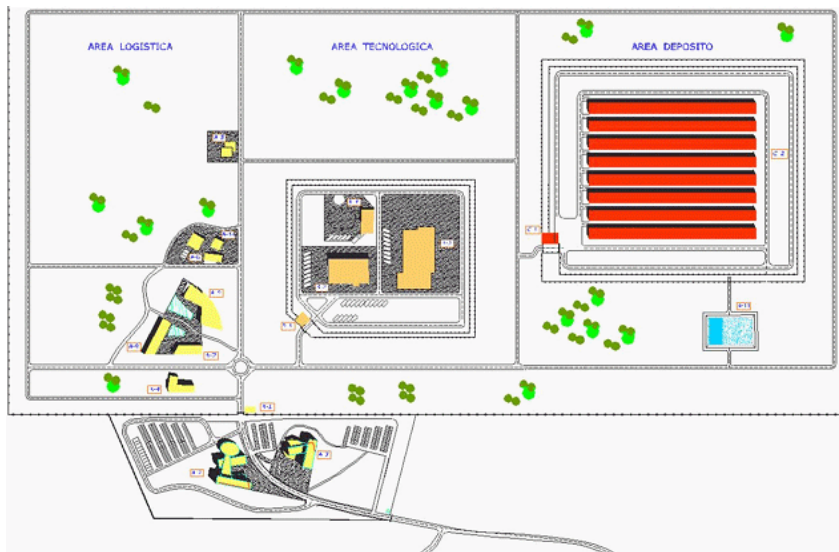


Figura 4 - Planimetria del Centro per il deposito nazionale

La tipologia dell'impianto prevede che i manufatti e gli elementi radioattivi non più necessitanti di condizionamento vengano posti all'interno di cassoni prefabbricati in calcestruzzo armato ("contenitori modulari"), e ivi immobilizzati mediante un'apposita malta cementizia ("grout"), costituendo così i cosiddetti "moduli".

I contenitori modulari hanno dimensioni in pianta di 3.05 x 2.09 m e in altezza di 1.675 m, hanno spessori di 15 cm su pareti e copertura, di 20 cm sul fondo, e sono dotati di quattro ganci per il loro sollevamento.

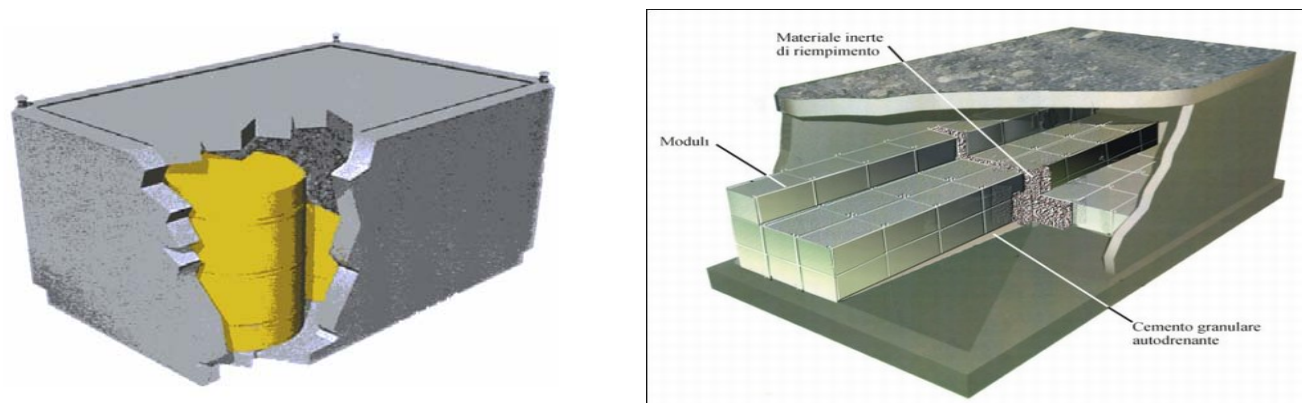


Figura5 - Modulo e vista interna di una cella

Tutti i moduli sono poi stoccati in strutture scatolari in calcestruzzo armato, definite “unità di deposito”, all’interno delle quali, mediante setti trasversali, sono ricavati uno o più locali di deposito (“celle”).

Le dimensioni esterne di ogni cella sono di 26.40 x 14.40 x 10.00 m, con un volume interno di circa 3.000 mc; in esse vengono inseriti 240 moduli, disposti su cinque strati (ciascuno di 6 file da 8 moduli).

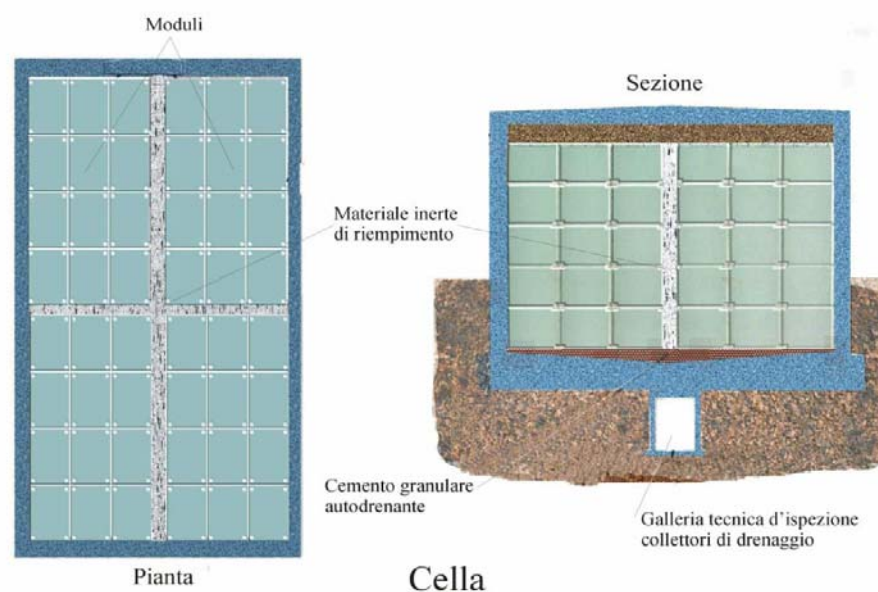


Figura 6 – Pianta e sezione trasversale di una cella

Gli spazi vuoti di ogni cella sono riempiti con materiale inerte monogranulare, fino alla copertura totale dei moduli, dei quali viene così garantita la recuperabilità. Completata tale operazione si procede alla chiusura della cella con il getto di un solettone in calcestruzzo armato ed alla sua impermeabilizzazione.

Ogni unità di deposito è costituita da nove celle allineate in successione lungo l’asse longitudinale, e dopo la chiusura di queste, essa viene ricoperta con un rilevato di materiale inerte su cui sono disposti strati alternati di sabbia, teli multistrato impermeabili e argilla; l’ultimo strato è costituito da terreno vegetale per favorire una migliore integrazione visiva della struttura nel contesto ambientale.

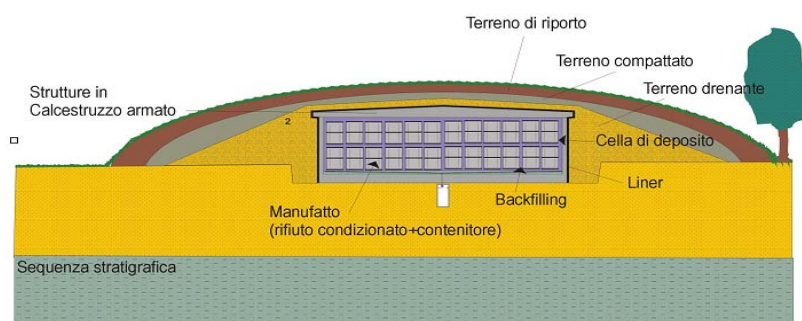


figura 7 – configurazione finale dell’impianto

Il volume totale di rifiuti assunto come dato per il dimensionamento dell’impianto di deposito ha portato ad una stima di 16.000 moduli; risulterebbero così necessarie 8 unità di deposito, in un’area di circa 10 ettari.

Eventuali aumenti del fabbisogno potrebbero essere fronteggiati con un’estensione modulare delle unità, ciascuna delle quali rappresenta un sistema indipendente, che può essere realizzato e gestito senza interferire con le altre unità già costruite o ancora da costruire.

Ogni unità, in fase di riempimento, è dotata di un sistema di copertura mobile su rotaie, necessario per impedire l’ingresso delle acque piovane e per proteggere i moduli dalle intemperie durante la loro movimentazione; questi sono sollevati da una gru a cavalletto e disposti su più strati e più file all’interno delle celle. Tutte le operazioni sono eseguite in modo remotizzato, avvalendosi di un sistema di posizionamento dei moduli di tipo matriciale, assistito da un sistema video a circuito.

Successivamente, la copertura mobile e la gru a cavalletto sono spostate lungo le vie di corsa a piano stradale e riposizionate sopra una cella successiva, per iniziare una nuova operazione di riempimento.

Le unità sono costruite tutte allo stesso livello al di sopra della falda freatica, per evitare il contatto tra le acque sotterranee e il fondo delle celle.

Al di sotto di ciascuna unità è disposta una galleria tecnica di servizio ispezionabile, utilizzata per l’alloggiamento dei sistemi di monitoraggio, dei collettori di raccolta dell’eventuale acqua di infiltrazione nelle celle e del collettore di drenaggio delle acque meteoriche raccolte dalle celle ancora vuote durante la fase pre-operazionale.

4 - ANALISI STRUTTURALI

Lo studio, elaborato dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano, si è proposto di dimostrare la fattibilità strutturale delle opere, ovvero l'adeguatezza, in termini di resistenza degli spessori ipotizzati, ponendo particolare e decisiva attenzione ad un carico di tipo intrusivo, da definire e schematizzare opportunamente, che si ritiene possibile possa verificarsi al termine della vita prevista per l'impianto (300 anni).

In detta ipotesi di fattibilità, si sono assunti i seguenti spessori per le membrature principali :

platea di fondazione	1.00 m
pareti	0.60 m
copertura	1.00 m – 2.00 m

È stata condotta un'analisi strutturale di tipo globale per valutarne l'adeguatezza dimensionale e prevedere la quantità di armatura necessaria a fronte di carichi ambientali particolarmente severi, e, successivamente, con verifiche di tipo locale, è stata valutata l'efficacia delle sezioni armate a contrastare un'azione intrusiva.

Nel modello utilizzato per l'analisi è stata introdotta un'apertura provvisoria, necessaria in fase operativa, per poter valutare le concentrazioni di tensione in prossimità ad essa ; non si sono considerate opere in c.a. accessorie, quali ad esempio i cunicoli di ispezione, in quanto non critiche per i risultati attesi.

Le metodologie di calcolo adottate ricalcano quelle utilizzate per le opere in calcestruzzo armato relative ad impianti nucleari realizzati negli anni 80, approvate dall'organo di controllo e peraltro di universale accettazione; si è fatto inoltre costante riferimento a [4], e alla letteratura tecnica in esso compendiate.

L'attività si è articolata nelle seguenti fasi:

- definizione dell'ambito progettuale, con elencazione delle normative nazionali da tenere in conto, e formulazione delle ipotesi sulle condizioni geotecniche al contorno, giustificandone l'assunzione;
- esplicitazione dei carichi agenti e delle loro combinazioni, individuando le condizioni di carico di esercizio, incidentale, ambientale severo ed estremo;
- schematizzazione della struttura e dei carichi in modello agli elementi finiti e analisi in campo elastico con applicazione codice di calcolo;
- verifica dello stato di sollecitazione;
- considerazioni sulla tipologia dei carichi di tipo intrusivo, e ipotesi sulla loro natura;
- schematizzazione di alcune azioni intrusive;
- verifica delle sollecitazioni indotte da azioni intrusive mediante schemi locali

Va sottolineata l'estrema conservatività del procedimento, in quanto analisi e verifiche non tengono conto della presenza dei rifiuti all'interno delle celle, che viceversa forniscono un considerevole contributo irrigidente ; l'assunzione è tuttavia valida al fine di dimostrare l'adeguatezza delle strutture a contrastare un certo tipo di azioni, in modo indipendente da ogni altro tipo di barriera ingegneristica presente.

Le principali risultanze dello studio sono nel seguito esposte.

a) assunzioni progettuali

Essendo il progetto architettonico proposto in modo indipendente dal sito ove esso verrà realizzato, parametri quali il tipo di terreno circostante, i carichi ambientali ed il sisma atteso sono stati assunti cautelativamente con l'involuppo delle ipotesi più sfavorevoli, che possono tuttavia rappresentare una situazione realistica nel territorio nazionale.

Per quanto concerne le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo, i valori utilizzati nelle verifiche di resistenza sono quelli risultanti da uno studio effettuato in proposito sul comportamento di un conglomerato posto in ambiente aggressivo per almeno 300 anni (di cui si tratterà al punto successivo).

La struttura è stata verificata per un insieme di eventi più severi di quelli previsti dalla normativa nazionale. In particolare per le verifiche di capacità portante e per la definizione delle possibili azioni sismiche, è stato fatto riferimento all'Eurocodice 8; l'estrapolazione a strutture di diversa tipologia, nella fattispecie ad una struttura interrata, è effettuato con l'esplicito avvallo della norma.

caratteristiche del terreno:

terreno tipo C nella accezione Eurocodice (terreno più soffice)
coefficiente di sottofondo (o di Winkler) $k = 0,6 \text{ kg/cm}^2$

caratteristiche dei materiali:

resistenza ultima del calcestruzzo a compressione	$\sigma_c = 350 \text{ kg/cm}^2$
resistenza ultima del calcestruzzo a trazione	$\sigma_t = 40 \text{ kg/cm}^2$
tensione di snervamento dell'acciaio	$\sigma_s = 4400 \text{ kg/cm}^2$

normative di riferimento:

tutta la normativa italiana ed europea vigente

carichi di servizio e incidentali

sono stati esplicitati e assunti come input :

- il peso proprio delle strutture,
- il carico di esercizio sulla platea,
- il peso del terreno che grava sulla copertura, con eventuale piantumazione,
- la spinta delle terre sulle pareti laterali
- il carico accidentale agente direttamente sul terreno di copertura,
- il carico termico in condizioni di esercizio e in condizioni impreviste,
- il carico sismico,
- il carico di un evento intrusivo.

carico sismico

il sisma è stato definito secondo l'Eurocodice 8, con una accelerazione di picco a_g pari a 0.24 g ; trattasi quindi di sisma avente tempo di ritorno pari a 475 anni (per non porre vincoli ai siti di possibile costruzione, il sito è supposto inserito nell'elenco dei comuni per i quali è obbligo il rispetto delle norme sismiche, con coefficiente di intensità 12)

combinazioni di carico e criteri di verifica delle membrature

Sono esaminati due insiemi di combinazioni di carico.

Nel primo insieme compaiono tutti i carichi, ad eccezione del carico intrusivo.

Nel secondo non compare il carico sismico, e compare il carico intrusivo, in una delle sue possibili manifestazioni.

In ogni combinazione del primo insieme, ciascun elemento strutturale deve soddisfare i requisiti di sicurezza in materia di sforzi e di deformazioni.

Nelle combinazioni del secondo deve essere soddisfatto il requisito di mantenimento della barriera anti-intrusione, più oltre definito.

b) metodologia di analisi e sintesi dei risultati

Per le combinazioni di carico che non includono il carico intrusione, è stato allestito un modello di calcolo in campo lineare elastico, adatto all'elaborazione agli elementi finiti secondo il programma di calcolo SuperSAP.

Il modello risulta costituito da 1659 nodi, collegati tra loro da 1600 elementi, di cui 1152 del tipo "shell" (secondo 16 diverse tipologie, rappresentative delle membrature in c.a.) e 448 del tipo "boundary" (rappresentativi del terreno circostante),

I vincoli degli elementi "shell" sono posti alla rotazione attorno agli assi perpendicolari alle piastre cui essi appartengono; la costante elastica degli elementi "boundary" è stata calcolata con "spalmatura" di quella relativa all'intera platea.

Le azioni sismiche messe in conto seguono il criterio denominato "statico equivalente" nell'Eurocodice 8; esse sono computate sulla base di una accelerazione pari a

$$a_g = 0.24 \times 2.5 / 3.5 = 0.17 \text{ m/sec}^2$$

ove 2.5 è l'amplificazione spettrale e 3.5 il fattore di struttura.

L'accelerazione verticale e quella orizzontale perpendicolare sono pari a:

$$a_o = a_v = 0.3 \times a_g;$$

esse sono supposte agire contemporaneamente, con il segno più sfavorevole.

Per la platea e la copertura, lo stato di sforzo è risultato essenzialmente flessionale, mentre per le pareti, accanto alla flessione, provocata dalla spinta laterale delle terre, sussiste uno stato di compressione, dovuto al peso della copertura e del terreno sopra la copertura.

Sia per la copertura che per la platea, i vincoli offerti dalle pareti sono più assimilabili ad una cerniera che ad un incastro, e pertanto la copertura, come facilmente intuibile, presenta le fibre inferiori tese, mentre la platea, essendo soggetta sostanzialmente ad una pressione rovescia, presenta le fibre superiori tese.

Si è anche osservato che le azioni pressoflessionali conseguenti al carico sismico sono solo marginalmente superiori a quelle indotte dai carichi statici.

Lo stato tensionale, riferito a materiale omogeneo e non fessurato, è stato calcolato nel centro di ciascun elemento come somma di quello derivante dallo stato membranale e di quello derivante dallo stato flessionale; è risultato ovunque che gli sforzi di compressione sono nei limiti di quelli ammissibili per il tipo di calcestruzzo e quelli di trazione sono inferiori ai limiti di prima fessurazione stabiliti dalle normative prese a riferimento.

Orientativamente è stata introdotta un'armatura corrente doppia simmetrica:

- 4 Ø 22 / m per la platea lungo l'asse minore, 4 Ø 26 / m per la platea lungo l'asse maggiore
- 4 Ø 26 / m per le pareti in direzione verticale, 3 Ø 20 / m per le pareti in direzione orizzontale
- 5 Ø 24 / m per la copertura lungo l'asse minore, 4 Ø 26 / m per la copertura lungo l'asse maggiore

Gli sforzi agenti su ciascuna sezione sono risultati contenuti all'interno dei domini di resistenza costruiti secondo Eurocodice 2.

c) verifica a carico intrusivo

La più realistica ipotesi di tentativo non intenzionale di intrusione discende da eventuali operazioni di cantiere condotte sul sito dopo il suo rilascio.

Pertanto sono stati raggruppati in modo organico tutti i possibili tipi di azione cantieristica, al fine di individuare per ciascuno di essi i casi più gravosi; in particolare sono stati studiati gli effetti dovuti a:

- perforazione
- escavazione
- esplosione ad uso civile

Allo scopo di conoscere quantitativamente e qualitativamente i carichi indotti in operazioni di perforazioni e scavo, sono stati consultati alcuni dei maggiori produttori di macchine, considerando, nell'esame delle possibilità, macchine e materiali di nuova generazione, facendo tuttavia riferimento al parco macchine attuale; infatti si è ritenuto ragionevole assumere che gli scopi di tali macchine rimangano invariati nel tempo.

Non sono state prese in considerazione macchine per infissione pali, in quanto sono chiamate ad operare tipicamente in terreni inconsistenti, e si arrestano incontrando una superficie rigida; per lo stesso motivo non sono state prese in considerazione le frese da scavo superficiale, e le macchine per fori geognostici, che non sono attrezzate per perforare le rocce.

Per quanto concerne il caso di esplosione, si è ipotizzata una esplosione in superficie, a breve distanza, mettendo in conto una tipica volata per scavi di ingegneria civile.

Il carico più gravoso di perforazione proviene dall'uso di un martello demolitore a funzionamento idraulico, generalmente più potente di quelli a funzionamento pneumatico.

I parametri che ne caratterizzano l'azione sono:

- massimo numero di colpi al minuto 264
- energia per colpo 4000 joule
- diametro della punta 135 mm

E' stato necessario quindi quantificare l'impegno richiesto ad esso per perforare la soletta di copertura, od una parete laterale, e, considerato l'impegno, giudicare se l'ostacolo potesse configurarsi come un ostacolo accidentale che non altera la normale conduzione della attività di cantiere, o se, al contrario, l'operazione richiedesse giorni di lavoro, e potesse mettere in crisi la macchina operatrice stessa; in questo caso è ragionevole ritenere che l'operazione venga interrotta e si renda necessaria una indagine sull'ostacolo incontrato nello scavo, ed in ultima analisi un ripensamento sulla opportunità di proseguire nell'operazione di scavo in quella posizione.

A tal proposito si è calcolata la profondità di penetrazione della punta nel calcestruzzo in seguito ad un singolo colpo, assimilando l'effetto di questo a quello di un proiettile di massa equivalente a quella della punta e di velocità in corrispondenza calcolata; per fare ciò si sono utilizzate la formula NRDC, ove il valore risultante è inoltre funzione della resistenza a trazione del calcestruzzo e della forma e dimensione del proiettile.

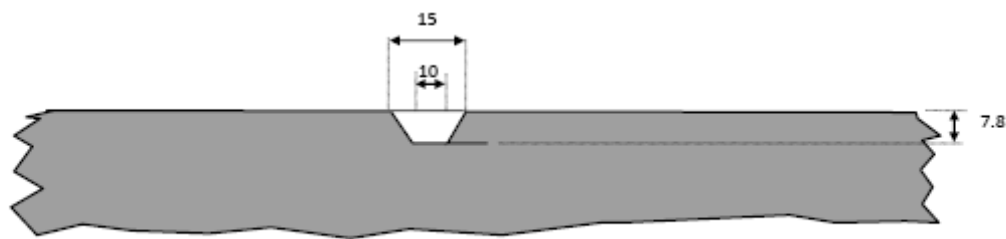


Figura 8 - impronta di un colpo singolo

Dal valore calcolato si è potuto ipotizzare il massimo volume del detrito prodotto, quantificato in circa 2 cmc ; poiché la perforazione di una soletta di un metro di spessore, secondo un profilo usuale, richiede almeno la demolizione di 0.60 mc di materiale, ne discende che occorrono almeno 300.000 colpi per effettuarla, e pertanto, pur considerando una frequenza di 200 colpi al minuto, la durata dell'operazione sarebbe quindi dell'ordine di qualche ora.

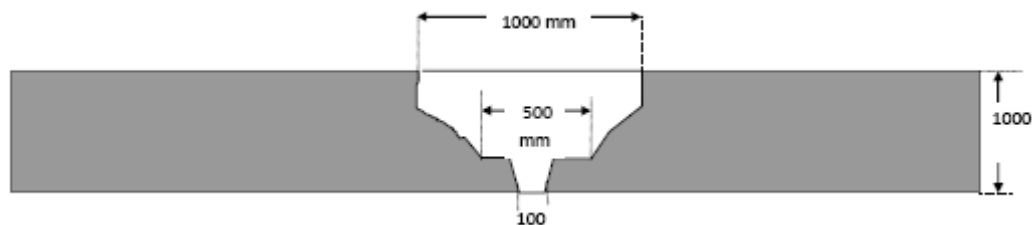


Figura 9 - ipotetico profili di avanzamento

La condotta a termine dell'operazione non potrebbe quindi configurarsi come atto accidentale bensì deliberato.

Analoghe considerazioni possono farsi per le pareti laterali, ove, a fronte di un minor spessore (60 cm), la disposizione dell'ostacolo implica una disposizione non ottimale dell'attrezzo, ed una conseguente minor efficienza.

L'azione più gravosa di escavazione si ha nel caso di operazione di scavo in cantiere stradale, e viene indotta da un bulldozer, attrezzato con benna (le cui dimensioni non sono critiche nel calcolo), avente le seguenti caratteristiche :

peso 49 t
area d'appoggio 4,10 mq

Il calcolo di resistenza è effettuato in riferimento alle condizioni di equilibrio della zolla estratta, la cui forma, nel caso di terreno incoerente o roccia coerente, è stata desunta da bibliografia basata su analisi sperimentali,

Il dente può penetrare per una profondità H pari a qualche decina di mm, in dipendenza della forma dei denti stessi. La resistenza di trazione del calcestruzzo consente che la zolla estratta abbia una dimensione verticale maggiore di H, (profondità di penetrazione del dente), e sia cioè $H+H_1 > H$.

La resistenza a taglio è definita dallo sforzo unitario τ ,

ove $\tau = \sigma \times \text{tg}(\vartheta) \approx \tau + 1.4 \sigma$.

La forma della scaglia è definita dall'equilibrio delle forze. è stato verificato che, ove la draga interferisca con la armatura, questa è in quantità adeguata per resistere alla azione di trascinamento T, comunque sia corta la dimensione L, e pertanto la macchina non è in grado di avanzare.

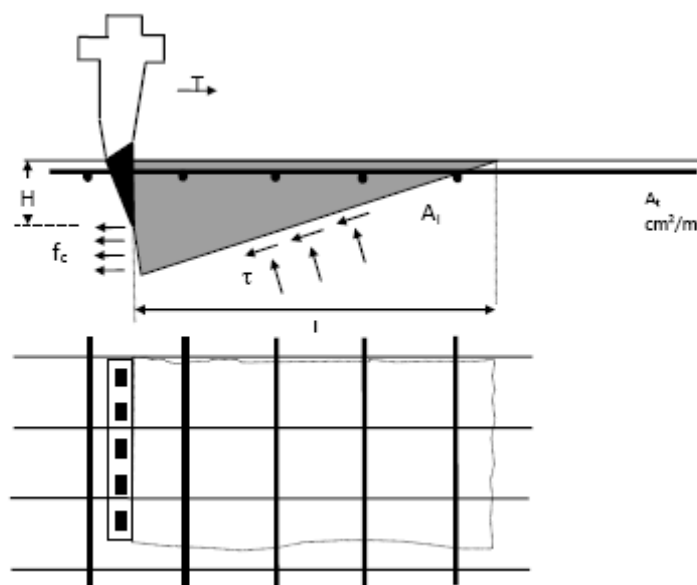


Figura 10 - schematizzazione dell'azione di scavo

L'analisi degli effetti di un'esplosione è sviluppata a partire da risultati sperimentali, riportati nella letteratura tecnica, per i quali un'esplosione nel terreno causa un movimento delle particelle di questo, che assumono una velocità che dipende in misura diretta dal peso e dal tipo dell'esplosivo ed in misura inversa dalla distanza dal punto ove lo scoppio avviene.

È stato anche dimostrato che per ogni tipo di terreno esiste un limite superiore alla velocità che le sue particelle possono assumere, e pertanto viene assunto come limite di verifica il massimo valore tra questi (450 mm/sec), che compete alle argille compatte ; secondo le correlazioni sperimentali tale valore potrebbe essere causato, ad esempio, da una carica di tritolo di 400 kg, posta a 25 m di distanza dall'ostacolo investito (valori al di fuori di qualsiasi applicazione industriale oggi concepibile).

Gli effetti sulle strutture sono stati studiati in due condizioni distinte :

- la parete assume la medesima velocità del terreno e si plasticizza
- il terreno si comporta linearmente nel transitorio

Nel primo caso (schema locale con calcolo del bilancio energetico) è stato quantificato lo spostamento in fase plastica della parete investita, da cui discende l'ampiezza della cricca provocata, mentre nel secondo caso (schema globale con calcolo agli elementi finiti) è stata calcolata ed applicata all'intera struttura la massima pressione trasmessa dal terreno e si sono ricavate quindi le sollecitazioni nelle membrature.

Nell'analisi effettuata con lo schema locale si è ipotizzato che la parete subisca lo stesso impulso di velocità subito dalla particella di terreno, su tutta la sua altezza : considerando la pressione uniforme sulla superficie, è stato possibile effettuare il calcolo su una striscia di parete di larghezza unitaria.

Il metodo seguito, suggerito da più di una trattazione classica, si basa sull'equivalenza dell'energia trasmessa, calcolata in termini di impulso, con l'energia di deformazione della membratura investita.

Essendo risultato uno spostamento residuo pari ad 1.1 mm, si è potuto concludere che, nella ipotesi più realistica di comportamento della struttura, non sussistono problemi di cricche, né di comportamento oltre i limiti di duttilità della parete.

Nello schema globale il calcolo è stato effettuato mediante un modello di calcolo ABAQUS, in regime dinamico, non-lineare, ove, salvo il diverso procedimento matematico, il modello ricalca quello allestito per l'analisi sismica : in totale il numero di elementi è 5340, il numero di nodi è 2693, per numero di gradi di libertà totale di 16158.

La struttura risulta soggetta ai carichi statici derivanti dal peso proprio della struttura, dal carico di esercizio sulla platea, e dalle pressioni in copertura e sul bordo esterno della platea, dovute al terreno. I vincoli al modello sono costituiti dal terreno sottostante, mentre, conservativamente, il terreno sul retro della parte caricata è supposto non fornire alcuna rigidità ; il terreno ai due lati ortogonali non fornisce alcuna rigidità, ma è soggetto ad un transitorio di pressione pari alla metà di quello agente sulla parete lunga, che si sovrappone alla pressione statica.

È stata assunta come eccitazione un transitorio di pressione ad andamento sinusoidale decrescente, agente uniformemente sulla parete longitudinale .

Le pressioni, variabili nel tempo, sono state applicate uniformemente distribuite sulla parete longitudinale e su quella trasversale; anche il terreno sovrastante la copertura, che agisce come massa inerziale, è supposto soggetto all'impulso di pressione.

La analisi è stata estesa per una durata di tempo di circa 0.8 secondi, pari al doppio del primo periodo proprio della struttura; essa ha fornito spostamenti e sforzi ad ogni istante di integrazione e le mappe degli sforzi in involuppo.

Gli effetti più importanti risultano localizzati sulla parete direttamente caricata, come nell'analisi precedente, ma questa è inserita in uno schema che offre le condizioni al contorno più corrette.

I massimi spostamenti si verificano dopo il transitorio di pressione, e il risultato saliente è che l'impulso è assorbito dalla struttura in campo elastico; gli elementi più sollecitati appartengono alla parete direttamente caricata, con una distribuzione dei momenti flettenti massimi agli estremi inferiore e superiore.

5 - STUDIO DELLE CARATTERISTICHE DEI CONGLOMERATI E PROVE SU CAMPIONI

Nel caso delle barriere di un deposito di rifiuti radioattivi, è necessario dimostrare una durabilità delle caratteristiche meccaniche e di impermeabilità di almeno 300 anni.

Attualmente la durabilità delle opere in calcestruzzo armato, per opere di tipo convenzionale, è valutata in 100 anni (non fosse altro che per l'età delle opere attualmente esaminabili, risalendo l' "invenzione" del calcestruzzo armato a non più tardi di un secolo fa).

È stato pertanto condotto uno studio per individuare ed analizzare le possibili cause di perdita di integrità da parte dei materiali, integrando le risultanze di precedenti ricerche ([5],[6],[7],[8]), e quindi proporre per ciascuna di esse il relativo rimedio, mediante opportune prescrizioni progettuali e adeguate modalità operative.

Lo studio si è articolato nei seguenti passi :

- identificazione dei potenziali rischi di degrado del materiale, al fine di prevenirne il decorso e garantire almeno 300 anni di integrità strutturale e prestazionale (rischi "esterni") ;
- analisi dei limiti intrinseci del materiale, che tendono ad inficiare le prestazioni richieste (rischi "interni");
- prescrizioni progettuali, in corrispondenza a ciascuno dei fattori di rischio evidenziati

Queste ultime sono state fornite in termini di :

- tipo di legante
- caratteristiche degli inerti
- rapporto acqua/cemento
- tempo di stagionatura

Con l'involuppo delle prescrizioni fornite si è ottenuto un mix-design di riferimento, e sono state quindi suggerite le modalità ottimali di messa in opera .

a) Analisi delle cause di degrado e rimedi proposti

I potenziali rischi di degrado sono in relazione con l'ingresso all'interno del materiale di alcuni specifici agenti aggressivi ambientali (CO_2 , $SO_4^{=}$, ecc.) che possono interagire negativamente con i componenti della struttura (ferri di armatura, matrice cementizia, aggregati lapidei) e provocarne il dissesto.

In assenza di specifiche informazioni sulle condizioni microclimatiche ed ambientali relative al sito, conservativamente sono stati presi in considerazione tutti i probabili meccanismi di degrado rispetto a due siti indicati dall'ENEA; le situazioni ipotizzate, tuttavia, data la loro conservatività, molto probabilmente rappresentano l'input progettuale più severo sui potenziali siti del territorio nazionale.

Nel dettaglio, si sono analizzate le conseguenze che potrebbero aversi nel conglomerato per effetto dei seguenti fenomeni :

- formazione di ghiaccio (A)
- attacco solfatico (B)
- corrosione dei ferri di armatura (C)
- reazione alcali-silice (D)

Sono stati individuati i due possibili percorsi attraverso i quali l'ingresso degli agenti aggressivi ambientali (quasi tutti veicolati dall'acqua) può esplicarsi :

- la microstruttura porosa tipica della matrice cementizia (E)
- le microfessure di origine termica (F) e di origine igrometrica (G)

Analizzando singolarmente, dal punto di vista chimico e fisico i fattori sopra elencati, in corrispondenza a ciascuno di essi è stato richiesto al conglomerato uno specifico requisito, e suggerite le prescrizioni atte ad ottenerlo, come così sintetizzato :

(A) resistenza alla formazione del ghiaccio :

- * aggregati lapidei non gelivi
- * matrice cementizia confezionata con rapporto a/c non superiore a 0.55,

(B) resistenza all'attacco solfatico :

- * rapporto a/c non superiore a 0.50 (per attacco solfatico esterno)
- * impiego di cemento d'altoforno (per attacco solfatico interno).

(C) protezione dalla corrosione :

- * rapporto a/c non superiore a 0.60

- * spessore di copriferro in calcestruzzo non inferiore a 50 mm
- (D) protezione dalla reazione alcali-silice :
 - * aggregati non alcali-reattivi (privi di silice amorfa o mal cristallizzata)
 - * cemento con un tenore in alcali non superiore allo 0.60%
- (E) diminuzione di porosità e permeabilità della matrice cementizia :
 - * $a/c \leq 0.55$ e tempo di stagionatura umida di almeno 4 settimane
 - * $a/c \leq 0.50$ e tempo di stagionatura umida di almeno 2 settimane
- (F) attenuazione della contrazione di origine termica
 - * calore di idratazione a 3 giorni non superiore a 145 kJ/kg
 - * riduzione del dosaggio di cemento
 - * scelta di un cemento con il minor calore di idratazione unitario
- (G) riduzione fessurazione di ritiro igrometrico :
 - * aggregati con pezzatura elevata (almeno pari a 32 mm)
 - * dosaggio di cemento < 360 kg/mc
 - * prolungamento della stagionatura umida per almeno 2 settimane

b) Criteri progettuali e realizzativi

L'analisi svolta ha fornito una configurazione prescrittiva, valevole sia per le strutture in c.a che per il grout di riempimento, mentre sono invece diverse le modalità applicative, che sono state specificate in ciascuno dei due casi.

L'involuppo delle prescrizioni risultanti dall'analisi è il seguente :

- * rapporto $a/c \leq 0.50$
- * stagionatura umida ≥ 2 settimane
- * aggregati lapidei non gelivi, non alcali-reattivi, con diametro max ≥ 32 mm
- * cemento con un tenore di alcali $\leq 0.60\%$
- * cemento con calore di idratazione a 3 gg ≤ 145 kJ/kg;
- * dosaggio di cemento 360 kg/mc;
- * copriferro ≥ 50 mm;
- * aria in microbolle: 4% per aggregato lapideo con diametro max di 32 mm.

Al fine di assicurare che il calcestruzzo possa riempire con la massima affidabilità le cassature predisposte per la realizzazione dell'impianto è necessario che sia prevista una consistenza superfluida al momento del getto, ottenibile mediante un additivo superfluidificante, con dosaggio pari all'1% sulla massa del cemento.

In linea di massima la composizione del calcestruzzo in grado di soddisfare i requisiti elencati è così individuabile:

- | | |
|---|------------------|
| • cemento III/B 32.5R ($\text{Na}_2\text{O} \leq 0.60\%$; $q_3 \leq 145$ kJ/kg) | 360 kg/mc |
| • acqua | 180 kg/mc |
| • aggregato lapideo (non gelivo e non alcali-reattivo) | 1700 kg/mc |
| • cenere volante | 100 kg/mc |
| • additivo aerante (q.b. per 4% di aria) | ~ 0.2 kg/mc |
| • additivo superfluidificante (q.b. per classe di consistenza S5) | ~ 3.6 kg/mc |

Al calcestruzzo così definito, occorre fissare i seguenti vincoli nelle prestazioni:

- | | |
|--|-----------------------------|
| • classe di consistenza (superfluida) | S5 |
| • classe di resistenza (R_{ck} derivante da $a/c \leq 0.50$) | ≥ 35 N/mm ² |
| • penetrazione all'acqua secondo ISO DIS 7031 | ≤ 20 mm |
| • classe di esposizione | 2b + 5b |
| • riscaldamento in condizioni adiabatiche | $\leq 20^\circ\text{C}$ |

Per il grout la principale differenza consiste nella impossibilità di impiegare aggregati lapidei grossi per assicurare la penetrazione; pertanto, è opportuno adottare, anche per esso, i seguenti vincoli:

- cemento a basso calore di idratazione ($q_3 \leq 145$ kJ/kg)
- cemento a basso tenore di alcali ($\text{Na}_2\text{O} \leq 0.60\%$);
- dosaggio di cemento ≤ 360 kg/mc;
- sabbia non geliva e non alcali-reattiva:

Se si adotta un rapporto a/c non superiore a 0.50, ne consegue che l'acqua di impasto non deve superare 180 kg/mc, ed è pertanto necessario operare con additivo superfluidificante

Da prove preliminari di laboratorio è stata elaborata la seguente composizione per la produzione di un grout fluido in fase plastica (spandimento alla tavola a scosse senza colpi ≥ 160):

- | | |
|--|------------|
| • cemento CEM III/B 32.5R
($\text{Na}_2\text{O} \leq 0.60\%$; $q_3 \leq 145$ kJ/kg) | 360 kg/mc |
| • acqua | 180 kg/mc |
| • cenere volante | 345 kg/mc |
| • sabbia fine (0-2 mm) | 100 kg/mc |
| • sabbia grossa (2-4 mm) | 1180 kg/mc |
| • additivo aerante (q.b. per aria $\geq 10\%$) | 0.2 kg/mc |
| • additivo superfluidificante a base acrilica | 28 kg/mc |

Le prescrizioni tecniche del grout, oltre le caratteristiche composizionali sopra riportate, devono prevedere:

- | | |
|---|-----------------------------|
| • spandimento alla tavola scossa (senza colpi) | ≥ 160 |
| • resistenza meccanica a compressione (28 giorni) | ≥ 25 N/mm ² |
| • riscaldamento in condizioni adiabatiche | $\leq 20^\circ\text{C}$ |

I problemi relativi alla messa in opera riguardano fondamentalmente le difficoltà nel rimuovere ogni difetto derivante da incompleta compattazione. Da un punto di vista pratico la presenza di eventuali difetti di costipazione del conglomerato in opera (macrovuoti) avrebbe conseguenze negative sulla durabilità delle strutture paragonabili a quelle derivanti da una eccessiva porosità capillare della matrice cementizia. Pertanto, si richiede che, analogamente a quanto si verifica nella confezione dei provini destinati al controllo della R_{ck} , anche il calcestruzzo messo in opera all'interno delle casseforme sia compattato fino a rifiuto, cioè fino a quando, pur prolungando la compattazione, non si registri un ulteriore assestamento del conglomerato. L'impiego di un calcestruzzo a consistenza superfluida certamente riduce il rischio di incompleta costipazione. Tuttavia, è necessario definire un criterio per la prescrizione ed il controllo di un'adeguata compattazione del calcestruzzo in opera. Poiché un difetto di costipazione si ripercuote in una diminuzione della massa volumica del conglomerato in opera, si può adottare la misura di questa grandezza come criterio di prescrizione e di controllo. A tal fine

è necessario che una qualunque porzione di calcestruzzo eventualmente prelevata dalle strutture (mediante carotaggio) presenti una massa volumica almeno eguale al 99% del corrispondente valore preliminarmente misurato sui provini compattati a rifiuto.

La stagionatura umida è di vitale importanza per assicurare una ridotta porosità del conglomerato e quindi un'adeguata durabilità; in pratica, subito dopo la scasseratura delle strutture occorre applicare acqua nebulizzata, oppure proteggere la superficie con teli impermeabili, oppure applicare idonei agenti stagionanti.

c) prove su campioni

Una conferma della bontà delle precedenti considerazioni teoriche presentate è stata ottenuta per via sperimentale, con il superamento di prove accelerate nel tempo su campioni di calcestruzzo lasciati stagionare in ambiente chimicamente aggressivo.

Per l'approvvigionamento dei materiali sono state proposte quattro potenziali regioni sul territorio nazionale dove realizzare le strutture per il condizionamento dei rifiuti radioattivi, ed in queste aree sono state individuate quattro cave di aggregati, ove si sono effettuati i prelevamenti necessari all'approntamento dei campioni da analizzare; inoltre, si è proceduto all'individuazione dei possibili cementi e ceneri volanti, disponibili in queste regioni o in regioni limitrofe, da impiegare per il confezionamento del calcestruzzo.

Sono state condotte le seguenti prove:

Prove su aggregati (UNI 8520)

- * Esame petrografico, diffrattometrico e termogravimetrico
- * Analisi granulometrica
- * Degradabilità mediante solfati
- * Determinazione del contenuto di solfati
- * Determinazione del contenuto di cloruri solubili in acqua
- * Determinazione della massa volumica e dell'assorbimento degli aggregati fini
- * Determinazione colorimetrica di sostanze organiche
- * Equivalente di sabbia e valore di blu
- * Determinazione della massa volumica
- * Determinazione dell'assorbimento degli aggregati grossi
- * Determinazione della potenziale reattività degli aggregati in presenza di alcali

Prove su cementi

- * determinazione del contenuto di alcali (minore di 0.60);
- * determinazione del calore di idratazione a 3 giorni (inferiore a 145 kJ/kg);
- * determinazione delle resistenze meccaniche a compressione

Prove su calcestruzzo allo stato fresco

- * consistenza mediante misura dello slump
- * massa volumica
- * contenuto di aria

Prove su grout allo stato fresco

- * spandimento alla tavola a scosse (senza colpi);
- * massa volumica
- * contenuto di aria
- * acqua essudata.

Prova di tipo termico

Si è proceduto a confezionare un cilindro di calcestruzzo (diametro 70 cm, altezza 70 cm) isolato termicamente mediante adeguati spessori di poliuretano espanso. Questa prova ha avuto l'obiettivo di riprodurre la situazione termica del cuore della platea delle strutture in oggetto, cioè della zona che si troverà nelle condizioni di massimo riscaldamento. Al fine di stabilire i gradienti termici che si innescano tra "cuore" e superficie a contatto con l'esterno, sono state rilevate in continuo e per 7 giorni le temperature mediante l'impiego di termocoppie.

Prove su calcestruzzo allo stato indurito

- * resistenza meccanica a compressione, flessione e trazione indiretta dopo 1, 7, 28, 60, 90, 180 gg, 1, 2, 3 anni su provini stagionati a 20°C ed U.R.=95%
- * ritiro igrometrico fino a 3 anni su provini stagionati per 15 gg in camera umida e successivamente esposti ad ambiente con U.R.=50% e T=20°C;
- * deformazione viscosa fino ad 1 anno su provini caricati con uno sforzo di compressione pari ad 1/3 del carico di rottura dopo 28 gg di stagionatura in camera umida;
- * impermeabilità secondo norma ISO DIS 7031 su provini stagionati per 28 giorni, 180 gg, 1, 2 e 3 anni in ambiente con U.R.=95% e su provini esposti all'aria;
- * valutazione della durabilità all'attacco solfatico mediante misura della perdita di massa, della resistenza a compressione e diffrattometria dei raggi X su provini immersi in una soluzione satura di solfato di calcio (gesso) per 3 anni;
- * valutazione del fronte di avanzamento dello ione cloruro per immersione di provini di calcestruzzo in acqua di mare per 3 anni;
- * valutazione del fronte di avanzamento della CO₂ in provini esposti all'aria naturale e ad un'atmosfera ricca di CO₂ (30% in vol.).

Prove su grout allo stato indurito

- * resistenza meccanica a compressione, flessione e trazione indiretta dopo 1, 7, 28, 60, 90, 180 gg, 1, 2, 3 anni su provini stagionati a 20°C ed U.R.=95% (UNI 6132) e su provini conservati all'aria (U.R.=65%, T= 15-20°C);
- * ritiro igrometrico fino a 3 anni su provini stagionati per 15 gg in camera umida e successivamente esposti ad ambiente con U.R.=50% e T=20°C;
- * impermeabilità secondo norma ISO DIS 7031 su provini stagionati per 28 giorni, 180 gg, 1, 2 e 3 anni in ambiente con U.R.=95% e su provini esposti all'aria.

Poiché già si riteneva che, per i conglomerati messi in opera, le prestazioni più significative sarebbero state quelle di protezione dalle acque meteoriche, sono state effettuate prove di penetrazione acquosa che, opportunamente diagrammate, hanno fornito, per estrapolazione, indicazioni sul comportamento del materiale in un orizzonte temporale plurisecolare.

Le prove sono state effettuate su lastre di calcestruzzo e di grout di dimensioni 300×300 mm, e spessore 120 mm, non preventivamente saturato, su cui agiva un battente d'acqua pari a 7 bar; le prove sono state poi ripetute aggiungendo fumo di silice nel confezionamento dei campioni.

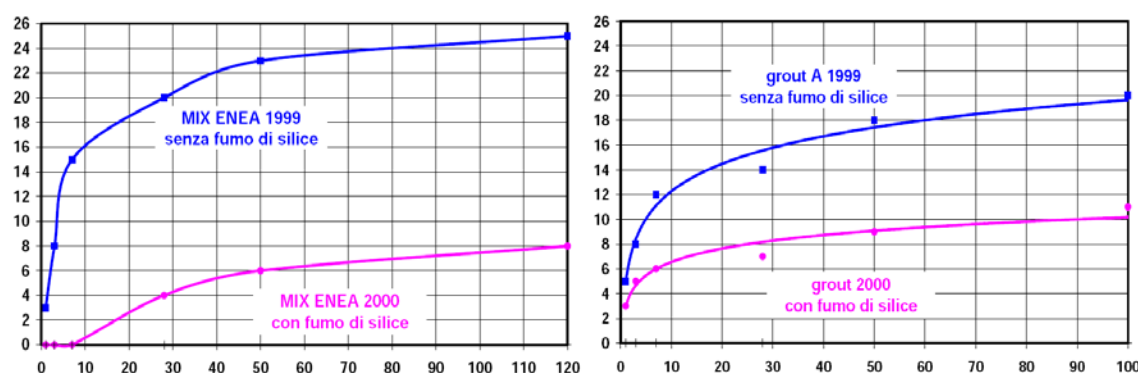


Figura 11 - diagrammazione dei risultati della prova di penetrazione dell'acqua.

Con riferimento al secondo caso, i risultati ottenuti, in un arco temporale rispettivo di 120 e 100 giorni, sono stati correlati mediante le seguenti formule:

$$\begin{aligned} \text{per il calcestruzzo} \quad & x = 0,91 (\sqrt{t} - 1,34) \\ \text{per il grout} \quad & x = 1,04 (\sqrt{t}) \end{aligned}$$

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

È stato così possibile ipotizzare la previsione riportata in Tabella 1

tempo	calcestruzzo	grout
120 giorni	8,77	11,41
1 anno	16,17	19,87
5 anni	37,66	44,43
10 anni	53,76	62,83
50 anni	121,71	140,50
100 anni	172,64	198,69
200 anni	244,65	280,99
300 anni	299,91	344,14

Tabella 1 – Estrapolazione dell'avanzamento (in mm) nel tempo del fronte umido in lastre di conglomerato

6 PROGETTAZIONE DEL MODULO DI DEPOSITO E INDAGINI SPERIMENTALI

Con riferimento alla descritta tipologia di impianto, il “modulo” si configura 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.

Nella sua progettazione si è tenuto conto che, per ogni barriera, dovevano essere minimizzati gli effetti deterioranti prodotti da tutte quelle cause (sollecitazioni statiche e dinamiche, azioni fisiche e chimiche) che avrebbero potuto aver luogo durante la vita funzionale dell'impianto; più specificatamente, dette cause non avrebbero dovuto provocare il formarsi di vie preferenziali per il percolamento di acque meteoriche con conseguente veicolamento nella biosfera di materiale contenente radionuclidi.

A valle dello studio sul comportamento a lungo termine dei conglomerati di cui si è detto, integrati dalle descritte prove di invecchiamento artificiale su campioni che hanno permesso la qualifica dei materiali, sono state definite le specifiche di costruzione dei prototipi del modulo [9], da sottoporre a indagine sperimentale, prevedendo, tuttavia, che si sarebbero potute rendere necessarie delle marginali modifiche migliorative al progetto iniziale, alla luce di problematiche che solo la messa in opera poteva evidenziare.

È stato quindi ideato un insieme di prove e controlli cui sottoporre il sistema, per confermare la bontà dei requisiti dei suoi singoli componenti, e più in generale, la sua affidabilità.

In particolare, dovendo essere garantite la non fessurabilità di tipo passante nei contenitori e nel grout, anche in seguito a forti sollecitazioni sugli stessi, ed una ridotta velocità di avanzamento di un fronte umido che potrebbe formarsi in caso di penetrazione di acque meteoriche nelle celle, si è cercato di riprodurre situazioni che mettessero alla prova l'efficacia strutturale e impermeabilizzante di materiali e struttura.

Le azioni cui sono stati sottoposti i prototipi saranno sicuramente riconducibili agli scenari incidentali di riferimento che dovranno essere stabiliti dall'Ente di Controllo per le attività nucleari.

I contenitori modulari sono stati realizzati in conformità al progetto del deposito: le dimensioni in pianta sono di 3.05 x 2.09 m e l'altezza è di 1.675 m; gli spessori sono di 15 cm su pareti e copertura, di 20 cm sul fondo; l'armatura corrente è simmetrica ed è costituita ovunque da una maglia ϕ 12/ 15 cm. Sono stati previsti quattro ganci di sollevamento, in corrispondenza dei quattro spigoli verticali, lungo la cui intera lunghezza sono ancorati.

Il dimensionamento è avvenuto in sede di progetto concettuale in modo tale da ottimizzare lo spazio interno in funzione di un certo numero di configurazioni di posizionamento e tipologia dei fusti, avendo cura di lasciare almeno 15 cm tra le superfici interna del contenitore e quella esterna dei fusti; in particolare le due configurazioni che dovrebbero essere adottate in maggior misura per lo smaltimento prevedono rispettivamente quattro fusti da 400 lt e sei fusti da 200 lt posizionati in unico strato.

Gli spessori delle pareti e del fondo sono state dimensionate mediante un calcolo statico di massima, e successivamente armati e verificati.

Le condizioni e combinazioni di carico e i criteri di verifica, in mancanza di altre prescrizioni, sono stati assunti nel rispetto della normativa italiana e in accordo con l'Eurocodice 3 (strutture in c.a.) e l'Eurocodice 8 (resistenza al sisma).

Sono stati realizzati quattro prototipi, comprensivi di cassone con parete e fondo, e quattro coperchi.

Tutti gli spessori sono stati aumentati di 1 cm in fase di realizzazione, onde facilitare le operazioni di getto, avendosi in alcuni punti una tale densità di armatura che avrebbe reso difficoltosa l'operazione, nonostante uno spinto uso di superfluidificanti.

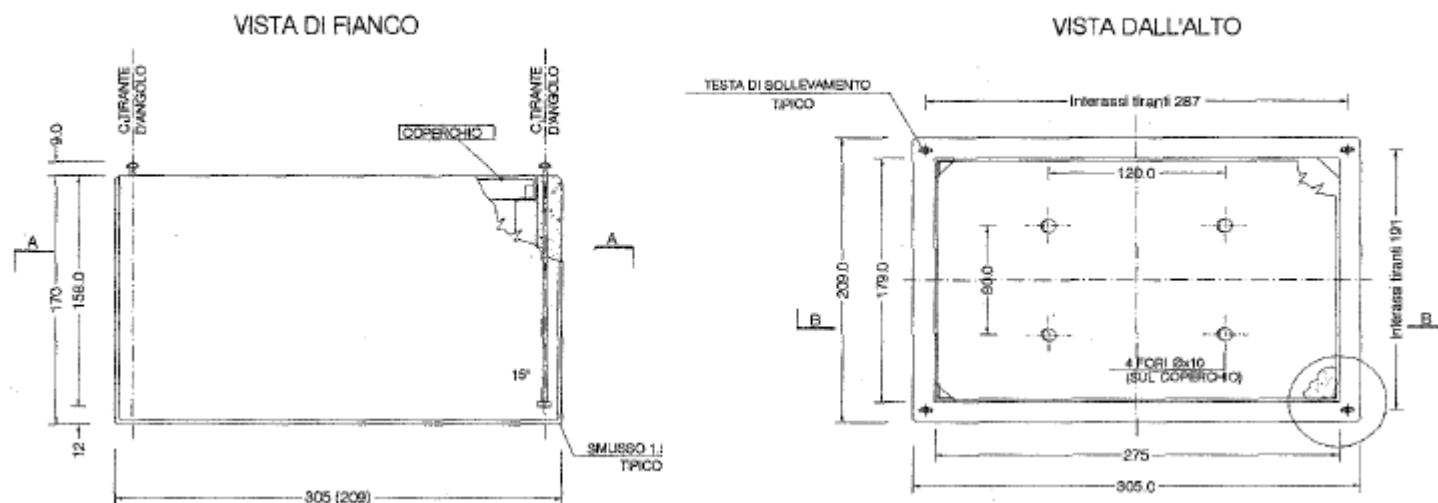


Figura 12 – Viste laterale e in pianta del contenitore modulare

Il mix-design dei materiali cementizi utilizzati è stato messo a punto compendiando le risultanze dello studio iniziale e delle successive prove di qualificazione. Le miscele studiate sono state ridefinite con opportuni aggiustamenti, dovuti anche alla comparsa nel frattempo sul mercato di nuovi additivi, e con l'adozione di una più adeguata curva granulometrica degli inerti utilizzati nel getto dei contenitori; inoltre veniva introdotto l'utilizzo del fumo di silice, di cui si era rilevato il decisivo contributo ai fini impermeabilizzanti.

Poiché nello studio dei materiali, sviluppato precedentemente la proposta progettuale definitiva, veniva fatto riferimento ad una tipologia di deposito ove non era prevista la barriera costituita dal contenitore (i fusti erano smaltiti direttamente nelle celle di deposito, ed ivi immobilizzati mediante il grout), il calcestruzzo ed il grout erano destinati a getti più voluminosi.

Si è tuttavia ritenuto che la similitudine dell'applicazione potesse consentire una continuità nelle ricerche intraprese.

Già si rilevava comunque un eccessivo conservativismo il considerare il grout esposto ad attacchi ambientali, come invece lo erano sicuramente le superfici esterne delle strutture di deposito; ciò tuttavia discendeva da una filosofia di sicurezza che prevedeva la ridondanza esaustiva di tutte le barriere poste in serie, peraltro non conseguibile ingegneristicamente in senso stretto.

Pari conservativismo ha presentato anche l'utilizzo, in strutture prefabbricate destinate ad uno stoccaggio protetto, del calcestruzzo previsto per strutture massive esposte ad agenti ambientali.

In termini di kg/mc sono stati definiti i mix-design riportati in tabella 2:

	calcestruzzo	grout
Cemento CEM III/B 42.5	345	300
Cenere volante di Fusina	100	50
Fumo di silice	30	30
Ghiaino 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

Tabella 2 – composizione di calcestruzzo e grout per il confezionamento del modulo

Le prove effettuate possono dividersi in due categorie: controlli di conformità e di misurazione prestazionale.

Nelle prove del primo tipo le operazioni sono consistite in un controllo sulla realizzazione del contenitore modulare (indagine visiva e rilievi ultrasonici) e sul confezionamento del sistema modulo (riempimento del contenitore con fusti e grout), nonché in controlli di tipo convenzionale su provini appositamente confezionati e su campioni prelevati (prove su materiali).

Le prove del secondo tipo hanno simulato delle situazioni incidentali dovute a malfunzionamenti di barriere esterne al modulo e sono più propriamente adatte a valutare la risposta del sistema in tali situazioni.

Le operazioni effettuate riproducono il presentarsi di liquido a contatto delle pareti interne del contenitore modulare (prove di penetrazione con acqua), sisma (prove su tavola vibrante) e acqua in pressione nelle cavità del grout (prova di leakage o di avanzamento del fronte umido).

A valle delle sperimentazioni condotte, e allo scopo di verificare il loro esito, due moduli sono stati sezionati secondo tre piani ortogonali, su cui sono stati eseguiti ingrandimenti locali con strumenti ottici (taglio e confronti)

La descrizione dell'attività sperimentale e le risultanze ottenute sono esposte con riferimento alla sequenza riportata in un diagramma a blocchi.



Figura 13 – Diagramma a blocchi dell'attività di prova

(A) ispezione visiva

Il rilievo della consistenza e dello stato dei getti è stato effettuato tramite un'ispezione visiva condotta sui quattro contenitori modulari sia all'esterno che all'interno e sui quattro coperchi.

(B) rilievi ultrasonici

Sono state eseguite "misure ultrasoniche dirette di velocità" e "tomografie ultrasoniche" per la determinazione della velocità delle onde di compressione nel calcestruzzo costituente le pareti, il fondo e i coperchi dei contenitori modulari.

In particolare sono state eseguite prove sui contenitori modulari 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 contenitore modulare 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 contenitore modulare) lungo 9 sezioni verticali e 1 sezione orizzontale (contenitore modulare 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.

(C) prove di penetrazione dell'acqua su due contenitori modulari vuoti

Per verificare la presenza di microlesioni e lesioni nei getti dei contenitori modulari, è stata progettata una prova che consiste nel riempire il contenitore modulare con acqua alla pressione di 0,2-0,3 atmosfere, mantenuta per un periodo di tre mesi, additivata con blue di metilene al fine di verificare da un lato direttamente le fuoriuscite d'acqua da lesioni passanti e dall'altro, in un secondo momento durante il sezionamento dei moduli, la profondità di penetrazione dell'acqua nel calcestruzzo per la presenza di cricche e punti deboli.

Allo scadere del periodo i contenitori modulari sono stati svuotati e reimpiagati per il getto del grout.

(D) prove su campioni di materiale

Il prelievo dei campioni di calcestruzzo è stato effettuato tramite carotaggio continuo nelle pareti laterali e nel fondo del contenitore modulare n. 3, utilizzando una carotatrice ad avanzamento manuale, con raffreddamento a circolazione d'acqua, dotata di corona diamantata a parete sottile, con diametro interno di 100 mm o di 68 mm.

Sono stati prelevati in totale 9 provini, di cui tre sono stati utilizzati per la determinazione del coefficiente di permeabilità, mentre gli altri sono stati sottoposti a una prova di compressione monoassiale e a una prova di sorptivity.

Altre prove di compressione prove sono state effettuate su campioni cubici di calcestruzzo e sul grout, realizzati al momento della costruzione dei contenitori modulari e del loro riempimento.

(E) riempimento di due contenitori modulari mediante grout

Al termine della prova di riempimento con acqua, i contenitori modulari n. 2 e 4 sono stati utilizzati per effettuare una simulazione di riempimento con simulacri di fusti metallici da 400 l.

L'attività si è sviluppata secondo i seguenti punti principali:

- predisposizione dei fusti metallici mediante l'introduzione di masse in ferro e il successivo riempimento con calcestruzzo per ottenere un peso complessivo di ciascun fusto di circa 1000 Kg;
- ancoraggio ad alcuni fusti di sonde termometriche per la lettura delle temperature dopo il getto del grout;
- predisposizione dei basamenti su cui appoggiare i fusti all'interno dei contenitori modulari;
- posizionamento dei fusti all'interno dei contenitori modulari;
- confezionamento del grout;
- getto del grout e sigillatura dei moduli;
- predisposizione di 4 provini di grout durante il getto e successiva prova di compressione monoassiale;
- lettura della temperatura all'interno del modulo durante la fase di indurimento.

È stata effettuata inoltre la misura del materiale effettivamente impiegato per riempire il contenitore modulare e sigillare il tetto di copertura.

(F) Prove su tavola vibrante

Al fine di mettere in gioco l'aderenza del grout alle pareti dei contenitori modulari e a quelle dei fusti, il modulo n. 4 è stato sottoposto ad una prova sismica su tavola vibrante, mentre il modulo n. 2 non è stato sottoposto ad alcuna prova dopo il suo riempimento.

Lo scopo della prova era di assoggettare il modulo ad un'eccitazione di tipo sismico. L'eccitazione pari a 1 g è stata fornita nelle tre direzioni principali contemporaneamente. Come spettro di riferimento si è utilizzato quello fornito dalla norma IEEE/693 del 1997 con smorzamento 2%: lo spettro è stato preso uguale per le due direzioni orizzontali e pari all'80% di quello orizzontale per la direzione verticale.

Il modulo è stato appoggiato sulla tavola con l'interposizione di alcuni pannelli di legno e successivamente contenuto alla base con staffe metalliche, per consentire anche la possibilità di una rototraslazione del modulo sulla tavola stessa.

(G) taglio e confronti

Al fine di verificare l'esecuzione del getto del grout all'interno dei contenitori modulari e l'aderenza del grout alle pareti e ai fusti, i moduli 2 e 4 sono stati tagliati secondo tre piani ortogonali. Il sezionamento dei moduli è stato effettuato mediante macchina di taglio a filo diamantato.

Sono stati eseguiti ingrandimenti locali con strumenti ottici, ed è stata misurata la profondità della penetrazione dell'acqua.

I risultati sono così sintetizzabili:

(A) si sono rilevati scostamenti nelle dimensioni (esterne ed interne) dei contenitori modulari; la differenza principale e più considerevole si presenta nello spessore delle pareti, che denota una traslazione e uno spanciamiento dei casseri in fase di getto. Lo spessore nominale delle pareti di 15 cm risulta essere mediamente di 16÷16,5 cm e per tutti i quattro contenitori modulari si è notato uno scorretto posizionamento delle teste di sollevamento.

(B) vi è stata una completa rispondenza dei campioni al disegno, che ha consentito di descrivere le discontinuità a livello microscopico. Il contenitore modulare 4 ha presentato una distribuzione molto uniforme delle velocità, mentre il

contenitore modulare 2 è apparso diviso in due parti: quella inferiore con velocità più elevate, quella superiore con velocità sempre più basse. I rilievi sonici hanno confermato quanto mostrato dal rilievo visivo, a cui ben si accordano.

(C) la prova ha messo in evidenza :

- la presenza di microlesioni passanti non altrimenti visibili;
- perdite attraverso i giunti freddi formatisi durante il getto;
- perdite abbondanti, in particolare dal fondo.

Come si evidenzierà con il taglio dei moduli, l'imbibizione del calcestruzzo in alcuni punti ha raggiunto valori di almeno 60 mm.

Prendendo come riferimento le perdite dell'ultimo periodo di prova, si ottengono valori del coefficiente di permeabilità di $1,2 \cdot 10^{-7}$ cm/s per il contenitore 2 e di $4,2 \cdot 10^{-7}$ cm/s per il contenitore 4.

Confrontando questi risultati con quelli della permeabilità su provino, si evidenziava il contributo non trascurabile delle discontinuità presenti nel getto.



Figura 13 – evidenziazione del percolamento attraverso il contenitore modulare.

(D) le caratteristiche determinate denotano da una parte un calcestruzzo con buone/ottime caratteristiche meccaniche.

Facendo riferimento alle caratteristiche attese, il valore della resistenza risultava pienamente conseguito, al contrario del valore del modulo di elasticità, decisamente inferiore.

Le caratteristiche di permeabilità devono essere considerate medie e riferibili a tipologie di calcestruzzo con altre richieste prestazionali (p.e. calcestruzzi per la costruzione di dighe); il valore della capillarità risulta anch'esso superiore a quanto ipotizzato in sede di progetto.

La estrazione di provini ha consentito un controllo visivo della omogeneità del materiale, in particolare della distribuzione degli inerti.

(E) non si sono segnalati inconvenienti durante la fase di getto dei due moduli, dal momento che il getto è avvenuto con continuità e che il grout si distribuiva nel contenitore modulare e intorno ai fusti con relativa facilità.

Durante il getto sono stati confezionati quattro provini cubici con il grout, due per ciascun modulo.

Il volume di materiale impiegato è stato confrontato con il volume interno del contenitore modulare diminuito del volume dei simulacri introdotti. Durante le fasi di getto sono state monitorate le temperature raggiunte entro il grout. La escursione termica è stata limitata a 20 gradi, un valore soddisfacente in quanto sufficientemente lontano da quello in grado di indurre microcricche nella successiva fase di raffreddamento.

(F) i campioni hanno sopportato senza alcun danneggiamento di rilievo tali prove

(G) per quanto riguarda il getto del grout, le sezioni dei moduli hanno messo in evidenza i seguenti aspetti:

- il grout si è distribuito in modo omogeneo in tutto il contenitore modulare e all'intorno dei fusti;
- il getto del grout risulta essere avvenuto in modo corretto e la distribuzione degli inerti è uniforme in tutte le sezioni;
- all'interno del grout sono racchiuse una serie di bollicine d'aria generalmente con diametro 1÷3 mm; in alcuni casi le bolle raggiungono 5÷6 mm e in rari casi anche 9 mm;
- vi è una perfetta aderenza fra il grout e le pareti dei contenitori modulari e i fusti metallici;
- non risultano differenze fra le sezioni dei due moduli; quindi la prova sismica non ha provocato distacchi fra il grout e le pareti.

Per quanto riguarda invece il getto dei contenitori modulari si è potuto notare che:

- pur essendo il getto compatto, non vi è sempre una buona distribuzione degli inerti;
- sono state riscontrate tracce consistenti di blue di metilene all'interno dei getti ad una distanza di 60 mm dall'interno del contenitore modulare.

Il non soddisfacente esito della prova di penetrazione di acqua nei contenitori ha messo in evidenza la necessità di indagare sulle proprietà impermeabilizzanti del grout, che, a differenza del calcestruzzo dei contenitori stessi, non si è fessurato né in fase di getto né sotto forte sollecitazione su tavola vibrante.

Si è allora pensato che un risultato utile si sarebbe potuto ottenere, pur in tempo ridotto, integrando i già citati esiti delle prove di penetrazione acquosa effettuate durante la qualificazione dei materiali in conformità a [10], con quelli di un'ulteriore prova di durata relativamente breve, e con le conoscenze teoriche e sperimentali sui fenomeni del "leaching" e del "leakage", che ai fini dell'applicazione studiata venivano a coincidere.

Secondo le correlazioni precedentemente ricavate, non aumentando il battente e/o non formandosi microcricche, in 300 anni lo spessore permeato su membrane costituite dai due materiali studiati, sarebbe di circa 30 cm e 35 cm.

Tali risultati potevano ritenersi soddisfacenti se riferiti agli spessori delle membrane dell'unità di deposito e a quelle del grout, se colato direttamente nelle celle, pur se i provini utilizzati non tenevano conto della geometria effettiva, delle procedure di getto e riempimento, e, per il calcestruzzo, della presenza dei ferri di armatura.

Come infatti poi si è visto, il leakage verificatosi nelle prove sul contenitore modulare è dovuto prevalentemente a microcricche, ove la permeazione per porosità intrinseca del calcestruzzo è risultata mascherata e l'acqua totale permeata è risultata essere direttamente proporzionale al tempo.

La letteratura tecnica consultata (tra cui [11],[12],[13],[14],[15]) comunque confermava che, indipendentemente dalla pressione agente, 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, e che il fronte di avanzamento, con buona approssimazione, avanza con una legge temporale che non si discosta dalla proporzionalità con la radice quadrata del tempo.

La prova supplementare ha previsto il confezionamento di un modulo, ove, nello spazio che avrebbe dovuto essere occupato dai fusti, è stata posta acqua in pressione.

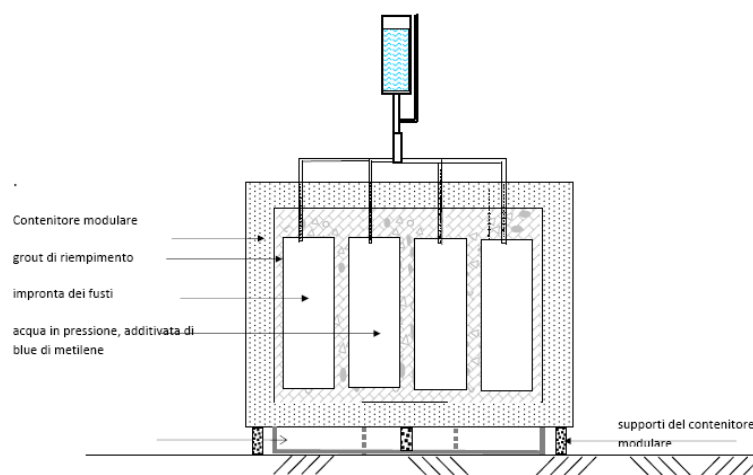


Figura 15 – Apparato per la prova di leakage sul grout

Il fatto di mettere in conto l'impronta del fusto, senza il fusto stesso, intendeva rappresentare la situazione che deve essere messa in conto prudenzialmente dopo 50 o più anni, quando in teoria l'acciaio del fusto potrebbe essere forato dalla ossidazione, ed il materiale di condizionamento potrebbe offrire un ostacolo ridotto alla permeabilità. Si tratta quindi di una condizione di danno limite, rappresentativa di uno scenario nel quale si dà affidamento nullo al condizionamento del rifiuto.

Inoltre si osservava che, coerentemente a tale assunto, ai fini radioprotezionistici la radioattività di un rifiuto condizionato è considerata concentrata al suo contorno.

Sostanzialmente, nel caso in esame veniva ripetuta la prova su lastra-campione con queste differenze:

- la pressione di prova era circa 20 volte inferiore;
- gli spessori di conglomerato erano superiori;
- le sollecitazioni provocate dal getto in scala reale avrebbero potuto provocare piccole lesioni non visibili.

Se strettamente riferiti alla precedente prova, solo quest'ultima circostanza è conservativa, tuttavia si deve considerare che, rimanendo all'interno del modulo, difficilmente potrebbe formarsi in esso un battente superiore (anche tenendo conto di eventuali sovrappressioni dovute alla formazione di gas), e l'aumento di circa il 25% valore dello spessore è ingegneristicamente ininfluenza.

Ad intervalli temporali dell'ordine dei mesi, il modulo è stato svuotato di acqua, e sul fondo e lungo le pareti sono state estratte delle carote di 30 mm di diametro, poi sottoposte ad un esame di avanzamento del fronte del liquido; il foro veniva poi sigillato mediante malta reoplastica, ed il modulo veniva nuovamente riempito per la continuazione della prova.

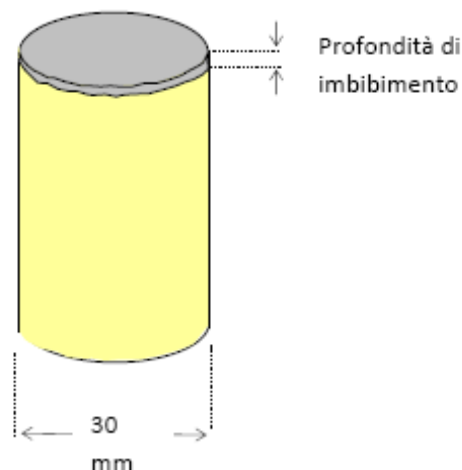


Figura 16 – Provino estratto mediante carotatura

Le rilevazioni sono state interrotte dopo un anno, nell'ambito della più generale interruzione delle attività.

Non ha potuto pertanto essere diagrammata nel tempo la profondità di imbibimento del grout, che presumibilmente sarebbe avanzato con una legge temporale proporzionale alla radice quadrata del tempo; in tal caso si sarebbe meglio definita la relazione già desunta, ma con valori di pressione inferiori e decisamente più realistici per il caso in esame.

Tuttavia, essendo stata la profondità di imbibimento, dopo un anno di poco inferiore a 1 cm, si potrebbe già ritenere dimostrata l'adeguatezza del solo spessore di grout al contenimento del liquido nel lungo periodo.

Valori ancora inferiori potrebbero essere dovuti, anche se ciò non è stato dimostrato sperimentalmente, ad una troppa bassa pressione agente; in ogni caso solo un preciso input progettuale di questa (con un'analisi di incidente che prevedesse il formarsi di un determinato battente all'interfaccia del rifiuto condizionato, contemporaneamente alla massima sovrappressione gassosa di origine interna) potrà dire l'ultima parola sull'effettiva funzionalità della barriera.

7 ANALISI CRITICA E SUGGERIMENTI PER UNA NUOVA PROPOSTA PROGETTUALE

Con riferimento al "modulo" progettato e analizzato sperimentalmente, si ritiene che il giudizio finale sui risultati possa possedere validità assoluta solamente per quanto riguarda le verifiche di conformità di esecuzione; le verifiche prestazionali invece forniscono dei risultati che possono essere diversamente interpretati, e di conseguenza ritenuti o no soddisfacenti, a seconda di quanto si valutino realistiche le condizioni di prova, ideate senza tener conto di input normativi che al momento non esistono.

Ciò nondimeno tutti i dati numerici acquisiti e le considerazioni tratte in corso d'opera possiedono una loro validità in termini di conoscenza dei fenomeni [16], input per modifiche progettuali e/o di processo realizzativo, spunti per sviluppo di ulteriori ricerche [17]; in particolare è stato emblematico il variato dosaggio di additivi nel grout, resosi necessario per facilitare le operazioni di riempimento.

I controlli di conformità non hanno dato esito soddisfacente solamente per quanto riguarda il getto dei contenitori (ove la difficoltà stessa dell'operazione ha reso necessario un piccolo scostamento dimensionale), per l'evidenziazione di quelle lesioni che poi sarebbero state causa dell'insufficiente tenuta.

Per il resto il riempimento dei contenitori è avvenuto in modo regolare: durante l'operazione sono stati adottati alcuni accorgimenti che saranno sicuramente suggeriti in future specifiche operative, e le caratteristiche meccaniche dei materiali sono state sostanzialmente confermate dalle prove su campioni.

Nelle misurazioni di tipo prestazionale, sono stati in pratica riprodotti nel modulo le conseguenze dei seguenti scenari incidentali, non contemporanei tra loro:

- malfunzionamento del coperchio del contenitore, con acqua in pressione sulle pareti interne modulari;

- azione sismica tridirezionale, con conseguente induzione della massima sollecitazione attesa;
- dilavamento completo dei rifiuti condizionati in un fusto.

In tutte le prove, le condizioni al contorno sono state di tipo conservativo, e, eccetto che nella prova sismica, presuppongono comunque un precedente malfunzionamento della funzione di barriera a monte del sistema stesso.

Al fine di un giudizio, si consideri che, a livello di sistema di impianto si hanno ulteriori conservativismi dovuti a :

- la presenza di barriere a monte, che potrebbero contrastare in parte o in tutto il formarsi di un battente;
- presenza di barriere a valle, che potrebbero minimizzare o annullare le ricadute dell'incidente sull'ambiente;
- il non aver considerato le proprietà chimiche dei materiali (coefficiente di distribuzione ($K_d=0$), che pur lisciviati potrebbero trattenere i radionuclidi.

Esaminando criticamente il non soddisfacente esito delle prove di penetrazione d'acqua nei contenitori, associato alle difficoltà operazionali sorte durante la costruzione degli stessi, possono essere fatte le seguenti considerazioni:

- le maggiori lesioni messe in evidenza fin dall'esame visivo (misurabili da aperture attorno al centesimo di mm) sono quelle in corrispondenza delle riprese di getto, ovvero dei giunti di costruzione, pur essendo il contenitore progettato senza giunto alcuno
- in corrispondenza a tali linee si è avuto il maggior percolamento
- i giunti si sono formati in modo non voluto: causa la rapidità di presa conferita all'impasto dai superfluidificanti aggiunti, interruzioni "fisiologiche" di pochi minuti durante il getto creano i presupposti per la formazione del giunto

Il risultato, degno di un approfondimento per la sua novità in letteratura, assume rilevanza nella stesura delle specifiche di realizzazione del contenitore modulare. Ove nulla fosse previsto per fronteggiare il fenomeno, la vita nominale dei moduli rispetto agli scenari di incidente prospettati ne sarebbe inficiata. Si offrono peraltro più indicazioni per evitare il fenomeno: a titolo di esempio, ridurre la fluidità del getto ed allungare in conseguenza i tempi di presa, oppure stabilire una sequenza di getto tale da evitare qualsiasi interruzione di continuità.

Da un punto di vista industriale appare arduo prevedere una realizzazione su vasta scala di contenitori modulari conformi al prototipo studiato in quanto:

- risulta quantitativamente eccessiva e di complessa realizzazione la gabbia di armatura;
- le operazioni di getto sono avvenute in modo particolarmente difficoltoso (impossibilità di vibrazione) e hanno richiesto un aumento del copriferro, e quindi degli spessori di pareti e fondo, di 1.00 cm, con perdita di volume utile di circa 0.25 mc;
- si è manifestata la necessità, per quanto sopra, di uso di fluidificanti che hanno sicuramente influito in modonegativo sulle proprietà della miscela.

Tutto ciò si è tradotto nella formazione indesiderata di fessure.

Inoltre un modulo così concepito potrebbe essere già obsoleto, essendo i conglomerati migliorabili alla luce di nuovi additivi presenti oggi sul mercato.

L'onerosità della realizzazione dei contenitori modulari discende comunque dalle seguenti specifiche progettuali :

- le verifiche statiche del modulo sono avvenute a fronte di condizioni di carico troppo gravose (es.: verifica a caduta, già involupata da quella dei fusti in esso contenuti),
- è stato utilizzato, a meno del fuso granulometrico, il medesimo calcestruzzo previsto per le pareti delle unità di deposito, di spessore ben più rilevante; tale calcestruzzo è penalizzato dal fatto di dover possedere una durabilità plurisecolare a fronte di attacchi ambientali cui il modulo non è invece sottoposto.

Una soluzione innovativa e migliorativa potrebbe consistere in una nuova tipologia di modulo, avente le stesse dimensioni esterne dei moduli precedentemente studiati, ma da realizzare :

- con contenitore in calcestruzzo fibrorinforzato
- con grout di migliorate caratteristiche meccaniche e impermeabili

I vantaggi della soluzione vanno ricercati nella prevedibile diminuzione degli spessori (con aumento del volume utile), nelle diminuite specifiche realizzative, che potrebbero facilitarne la costruzione ed il riempimento anche lontano dal sito di smaltimento, e nelle caratteristiche d'insieme sicuramente superiori

Infatti in questo modo viene ottimizzata la funzionalità del sistema modulo (involucro+grout), ove le funzioni resistenti e impermeabilizzanti vengono affidate in maggior misura al grout, demandando al contenitore principalmente le funzioni di contenimento del getto e di movimentazione di insieme.

Va rilevato inoltre che un grout di caratteristiche condizionanti e resistenti superiori a quelle della matrice cementizia all'interno dei fusti, come lo è sicuramente quello sperimentato, svolge sicuramente un ruolo "diluente" della radioattività nei suoi 300 anni di vita; di tale circostanza l'Ente di Controllo (ISPRA) potrebbe forse in futuro tenere conto, nel porre i limiti alla radioattività specifica (per unità di volume) nei rifiuti smaltiti.

8-CONCLUSIONI

Attualmente ogni attività progettuale in merito ad un impianto di smaltimento per rifiuti radioattivi da realizzarsi nel territorio italiano è ferma, non essendosi ancora definito il soggetto istituzionale cui conferire l'incarico, ed inserendosi tale conferimento nel più complesso problema di ripresa delle attività nucleari.

Si ritiene tuttavia che il progetto concettuale elaborato dall'ENEA, per sua natura indipendente da ogni scelta sitologica, possieda una notevole validità tecnica, sia per quanto riguarda le opere previste che gli studi sui materiali, che qui sono stati sinteticamente illustrati.

Tale validità, del resto, è stata recentemente confermata dagli esperti del Ministero dello Sviluppo Economico, che sovrintende suddetta ripresa; ogni affinamento del progetto, dal punto di vista delle opere civili, non potrebbe in ogni caso avvenire sino a che non venga individuato il sito per la loro realizzazione.

Solo un aspetto particolare del progetto, quello cioè attinente la struttura prefabbricata che costituisce l'unità ultima di smaltimento ("modulo"), si presta per ora ad un ulteriore sviluppo e ad una ricerca finalizzata: in questo senso si ritiene che la ricerca condotta da ENEA e Politecnico di Milano (con la collaborazione delle società EN.CO. e Cesi-ISMES, che in questa sede si ringraziano per il contributo fornito) debba essere quanto prima ripresa.

L'innovatività del tema in oggetto (conglomerato cementizio impermeabilizzante ad altissima durabilità funzionale) presenta un sicuro interesse non solo per la specifica applicazione connessa al rischio nucleare e radiologico, ma anche per quanto può coinvolgere i rischi convenzionali riportabili a rifiuti tossici e nocivi, forse ingiustamente sottovalutati al confronto.

9-BIBLIOGRAFIA

- [1] ENEA – Task Force SITO – “Centro di Deposito Definitivo dei Rifiuti Radioattivi a Bassa Attività - Progetto concettuale e di sistema” – novembre 2001
- [2] IAEA – “Classification of Radioactive Wastes” - Safety Series No. 111-G-1.1, 1994
- [3] IAEA – “Fundamental Safety Principles” - Safety Standards Series No. SF-1, 2006
- [4] ACI Commitee 349 “Code requirements for nuclear safety related concrete structures” ACI Journal, 1977, 53-8
- [5] M. Collepari e L. Coppola, "Mix Design del calcestruzzo", Edizioni Enco, 1990.
- [6] L. Coppola, "Durabilità del calcestruzzo: Teoria, pratica e prescrizioni di capitolato. Parte II: Cause di degrado di tipo fisico e meccanico", Industria Italiana del Cemento, N. 675, pg 199-209, 1993.
- [7] P. Pedferri, L. Bertolini, "La durabilità del calcestruzzo armato", Mc Graw-Hill, Milano, 2000.
- [8] Walton J.C., Plansky L.E., Smith R.W., “Model for Estimation of Service Life of Concrete Barriers in Low-Level Radioactive Waste Disposal” NUREG/CR-5542, EGG-2597. Idaho National Engineering Laboratory, Idaho (1990).
- [9] ENEA – Task Force SITO – “Centro di Deposito Definitivo dei Rifiuti Radioattivi a Bassa Attività – Dimensionamento e verifica strutturale del modulo di deposito” – settembre 2002
- [10] American National Standards, "Measurements of the leachability of solidified low-level radioactive wastes by short-terms test procedure" document ANSI /ANS -16.1-1986.
- [11] Aldea C.M., Ghandehari M., Shah S.P., Karr A., "Estimation of water flow through cracked concrete", ACI Material Journal, pag. 567-575, September-October 2000,
- [12] Bear J. & Verruijt A. 1987 “ Modeling groundwater flow and pollution”. Dordrecht: D.Reidel Publishing.Co.
- [13] Berner. “Evolution of Pore Water Chemistry During Degradation Of Cement In A Radioactive Waste Repository Enviroment”, Waste Management, Vol. 12, pp. 201-219, 1992.
- [14] Roy, D.M.; Scheetz, B.E.; Wakeley, L.D.; Barnes, M.W., "Leach characterization of cement encapsulated wastes" Nucl. Chem. Waste Manag, pp. 35-42, 1982,
- [15] Garrabrants Andrew C., Sanchez Florence, and Kosson David S., “Leaching Model for a Cement Mortar Exposed to Intermittent Wetting and Drying”, ACI Journal 1317 ,Vol. 49, No. 5, May 2003
- [16] Taglioni A., Castellani A., De Stefanis P. "Hazardous-Waste Containers in Cementitious Materials: Leakage Tests on Small-Scale Specimens and on Full-Scale Prototypes", Waste Management and the Environment IV – pagg. 321-328
- [17] Taglioni A., Castellani A., Collepari M., Pellegrino R., “Indagini sperimentali su un sistema prefabbricato modulare per lo smaltimento di rifiuti radioattivi” – AICAP ottobre 2006