



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

*Documento CERSE-POLIMI RL 1149/2010*

Modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso  
le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi e  
metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla  
costruzione ed operazione del deposito stesso – Fase 2: Il codice  
AMBER

*E. Zio, F. Cadini, J. De Santis, D. Avram, A. Cherubini*



MODELLAZIONE DEI FENOMENI DI DISPERSIONE DI CONTAMINANTI ATTRAVERSO LE  
BARRIERE PROTETTIVE DI UN DEPOSITO DI RIFIUTI RADIOATTIVI E METODOLOGIA DI  
ANALISI PROBABILISTICA DEL RISCHIO ASSOCIATO ALLA COSTRUZIONE ED OPERAZIONE  
DEL DEPOSITO STESSO – FASE 2: IL CODICE AMBER

E. Zio, F. Cadini, J. De Sanctis, D. Avram, A. Cherubini

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA



**CIRTEN**  
**CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO**  
**PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE**

***POLITECNICO DI MILANO***  
**DIPARTIMENTO DI ENERGIA**

*Modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi e metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso - Fase 2*

**Il codice AMBER**

**AUTORI**

**E. Zio, F. Cadini, J. De Sanctis, D. Avram, A. Cherubini**

-----

**CIRTEN POLIMI RL 1149-2010**

**Milano 2010**

*Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP4 punto C3 dell'AdP ENEA MSE*

**Tema 5.2.5.8 – “Nuovo Nucleare da Fissione”**

## **RINGRAZIAMENTI**

Gli autori desiderano ringraziare l'ing. Alfredo Luce e l'ing. Alberto Taglioni dell'ENEA per aver fornito suggerimenti e stimoli nelle varie fasi della stesura di questo rapporto, per le utili discussioni intercorse, per le spiegazioni ed i chiarimenti in merito ai problemi incontrati ed infine per la lettura critica del presente documento ed i miglioramenti suggeriti.



## INDICE

<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	4
<b>2. APPLICAZIONE DEL CODICE AMBER PER LA STIMA DELLA DOSE DA RILASCI DA UN DEPOSITO SUPERFICIALE</b> .....	5
2.1. <i>Il codice AMBER</i> .....	5
2.2. <i>Il deposito ed il sito</i> .....	6
2.3. <i>Applicazione del codice AMBER al modello concettuale di trasporto del contaminante attraverso il deposito</i> .....	8
2.4. <i>Applicazione del codice AMBER al modello concettuale del trasporto del contaminante nella geosfera</i> .....	13
2.4.1. <b>Modellazione del trasporto nella zona instaura</b> .....	14
2.4.2. <b>Modellazione del trasporto in falda acquifera (Zona satura)</b> .....	16
<b>3. CONCLUSIONI</b> .....	19
<b>REFERENZE</b> .....	20



## 1. INTRODUZIONE

Il presente rapporto contiene la descrizione del funzionamento del codice di larga diffusione AMBER per la stima delle dosi da rilascio di radionuclidi e della sua applicazione ad un progetto di deposito che fu oggetto di studio da parte dell'ENEA. Il lavoro si colloca nell'ambito della linea progettuale LP4 - Attività di ricerca e sviluppo relative alla caratterizzazione dei rifiuti radioattivi e alle fenomenologie di base tipiche di un deposito definitivo di rifiuti radioattivi di II categoria e temporaneo di rifiuti di III categoria, in particolare per l'obiettivo LP4-C3 *“Performance Assessment: modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi e metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso”*.

Il caso studio si intende riferito ad un deposito “chiuso”, cioè terminata la fase di riempimento del deposito ed a conclusione delle attività di sigillamento della struttura.



## 2. APPLICAZIONE DEL CODICE AMBER PER LA STIMA DELLA DOSE DA RILASCI DA UN DEPOSITO SUPERFICIALE

### 2.1. Il codice AMBER

Il codice AMBER è utilizzato per implementare ed analizzare modelli di trasporto degli inquinanti attraverso la geosfera e la biosfera, sulla base di una modellazione a compartimenti nei quali si assume che i contaminanti radioattivi siano uniformemente distribuiti. Il trasporto degli inquinanti viene simulato introducendo tra i vari compartimenti degli opportuni ratei di trasferimento, in generale funzioni del tempo. Ogni trasferimento è controllato dal compartimento “donatore” perché dipende direttamente dalla quantità di materiale presente nel compartimento dal quale il materiale si muove.

In generale, AMBER risolve un sistema di equazioni differenziali lineari del primo ordine le cui incognite sono le quantità di contaminante presenti in ogni compartimento in funzione del tempo. Ad esempio, l'evoluzione della quantità di contaminante di tipo  $N$  nell'  $i$ -esimo compartimento è data da:

$$\frac{dN_i}{dt} = \left( \sum_{j \neq i} \lambda_{ji} N_j + \lambda_M M_i + S_i(t) \right) - \left( \sum_{j \neq i} \lambda_{ij} N_i + \lambda_N N_i \right) \quad (1)$$

in cui:

- $i$  e  $j$  sono gli indici che denotano l' $i$ -esimo ed il  $j$ -esimo compartimento, dove il compartimento  $i$ -esimo è definito “donatore” (*upstream*) e quello  $j$ -esimo “accettore” (*downstream*).
- $N$  ed  $M$  sono le quantità di inquinanti  $N$  ed  $M$  presenti in un compartimento ( $M$  è il precursore di  $N$  in una catena di decadimento radioattivo), (mol);
- $S(t)$  è la sorgente esterna del contaminante  $N$  dipendente dal tempo, (mol/y);
- $\lambda_M$  e  $\lambda_N$  sono rispettivamente le costanti di decadimento radioattivo del contaminante  $M$  ed  $N$ , ( $y^{-1}$ );



- $\lambda_{ji}$  e  $\lambda_{ij}$  sono rispettivamente i ratei di trasferimento rappresentanti il guadagno e la perdita del contaminante  $N$  dal compartimento  $i$  attraverso il trasferimento dal/al compartimento  $j$ , ( $y^{-1}$ ).

Sebbene il trasferimento tra i compartimenti sia modellizzato da equazioni differenziali di tipo lineare, questo codice può essere applicato anche nella modellazione di processi di diffusione che pure dipendono dalle quantità di materiale nei compartimenti tra i quali avviene il fenomeno diffusivo. La concentrazione di contaminante nel tempo in un compartimento è calcolata poi semplicemente dividendo le quantità di contaminanti per i volumi dei compartimenti.

Nel Paragrafo seguente il codice AMBER sarà applicato per la stima delle dosi da rilascio radioattivo, con riferimento ad un progetto concettuale di deposito superficiale oggetto di studio da parte dell'ENEA [2].

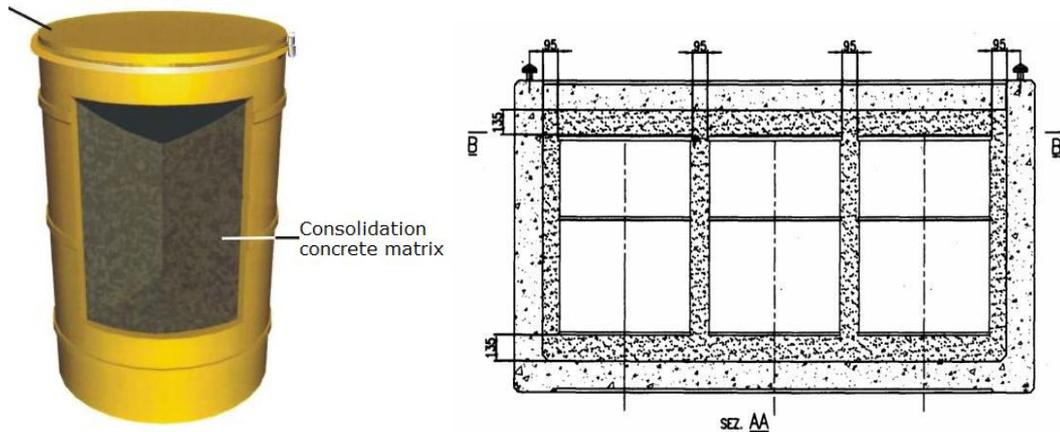
## 2.2. *Il deposito ed il sito*

Le principali strutture di contenimento del deposito superficiale oggetto di studio dell'ENEA sono i fusti (contenitori), i moduli, le celle e le unità di deposito; queste ultime costituiscono un insieme di barriere multiple atte a contenere l'infiltrazione delle acque e la migrazione dei radionuclidi [2].

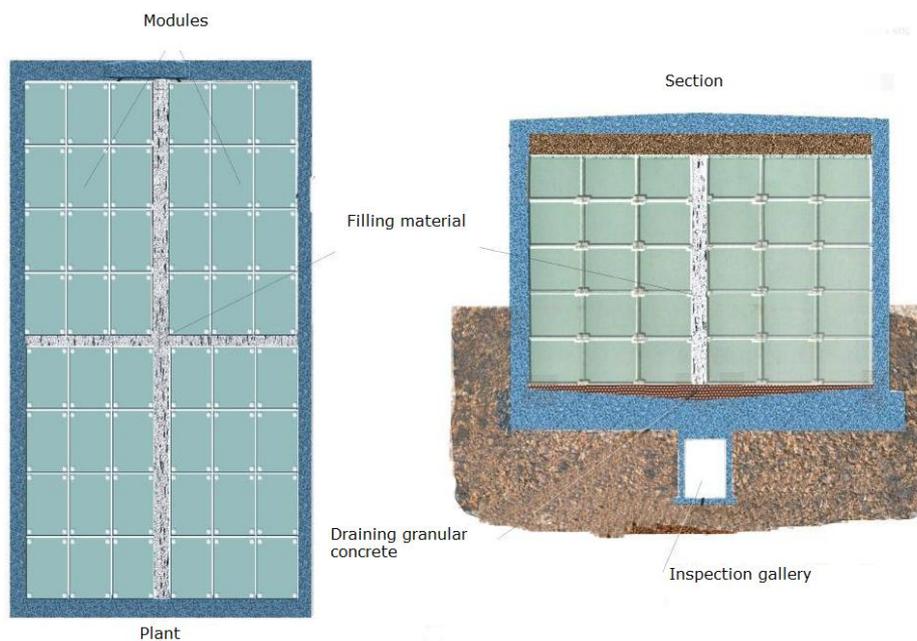
I fusti (Figura 1, sinistra) consistono in contenitori d'acciaio contenenti il rifiuto radioattivo immobilizzato in una matrice di calcestruzzo. Il diametro di un fusto è di 0.791 m e la sua altezza di 1.1 m, per una capacità volumetrica totale di circa 400 l. Il modulo, contenente 6 fusti (Figura 1, destra), è una struttura di calcestruzzo a forma di cassa rettangolare, chiusa e sigillata da un tetto di calcestruzzo; gli spazi vuoti tra un fusto e l'altro sono riempiti da un materiale speciale, per esempio: grout. Le dimensioni esterne del modulo sono: 3.05 m di lunghezza, 2.09 m di larghezza e 1.7 m di altezza, mentre le dimensioni interne sono: 2.75 m lunghezza, 1.79 m di larghezza e 1.37 m di altezza. In questo caso studio, per semplicità, è stata considerata una colonna di 5 moduli in cui ogni singolo modulo contiene un solo fusto. La colonna di 5 moduli è stata inserita in una cella di calcestruzzo ed infine, l'unità di deposito, costituita da una fila di 6 celle, è stata considerata posizionata appena sotto il naturale piano di campagna e sopra il piano di falda acquifera. Ogni



cella rappresenta un sistema isolato che può essere studiato in modo indipendente dalle altre celle del deposito (Figura 2).



**Figura 1: Modello concettuale dei fusti (sinistra) e del modulo (destra).**



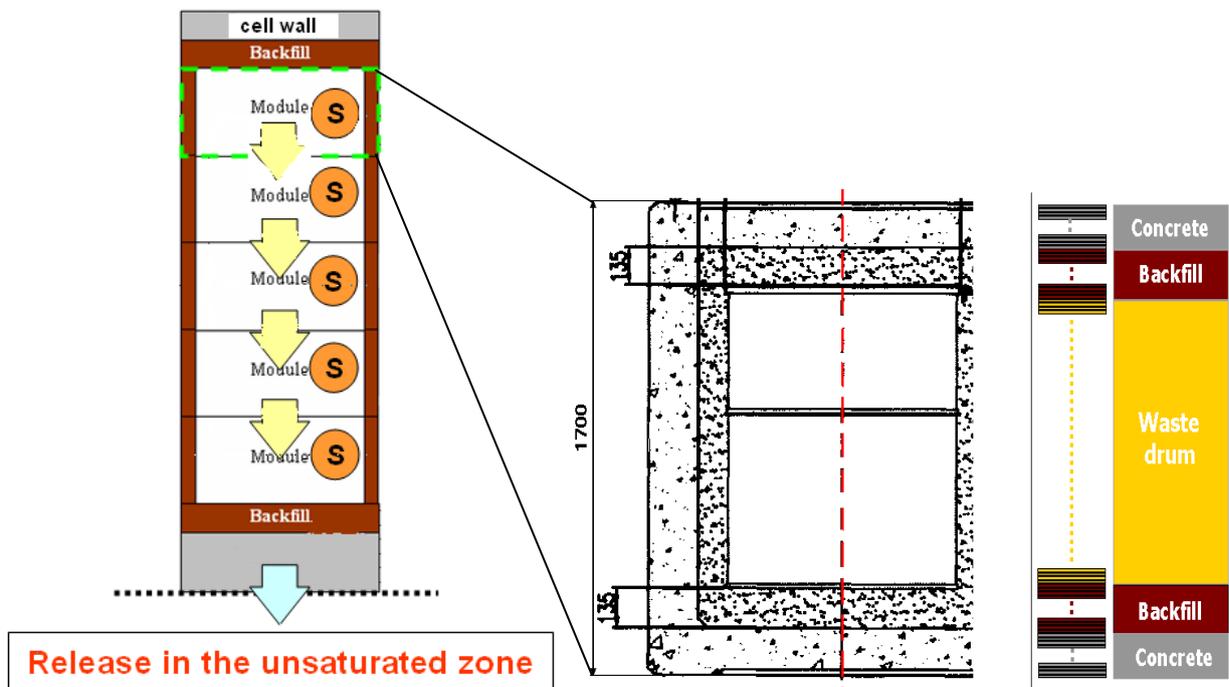
**Figure 2: Schematizzazione di una cella costituita dall'insieme di 5x6x8 moduli.**

Successivamente all'uscita dei radionuclidi dal fondo del deposito, essi migrano attraverso la zona insatura, il cui effetto principale è quello di ritardare il raggiungimento della falda acquifera (zona satura). Nel caso studio ENEA [4], questa fase del processo di migrazione avviene in uno strato di calcare altamente fratturato caratterizzato da estensivi fenomeni carsici; le proprietà idrauliche del

sito sono state stimate attraverso l'applicazione di tecniche geofisiche appropriate e di test idraulici basati su carotaggi effettuati in loco.

2.3. *Applicazione del codice AMBER al modello concettuale di trasporto del contaminante attraverso il deposito*

Considerando le ipotesi semplificative di 1) moduli identici, 2) un trasporto di massa prevalentemente verticale e 3) una simmetria nella propagazione diffusiva laterale, la stima del rilascio della quantità totale di radionuclidi nella zona insatura sotto al deposito può essere ridotta ad un problema mono-dimensionale di trasporto attraverso una colonna di 5 moduli identici (Figura 3).



**Figura 3: Schema concettuale del proposto modello a compartimenti, S = sorgente (sinistra).  
Struttura interna del modulo (destra).**

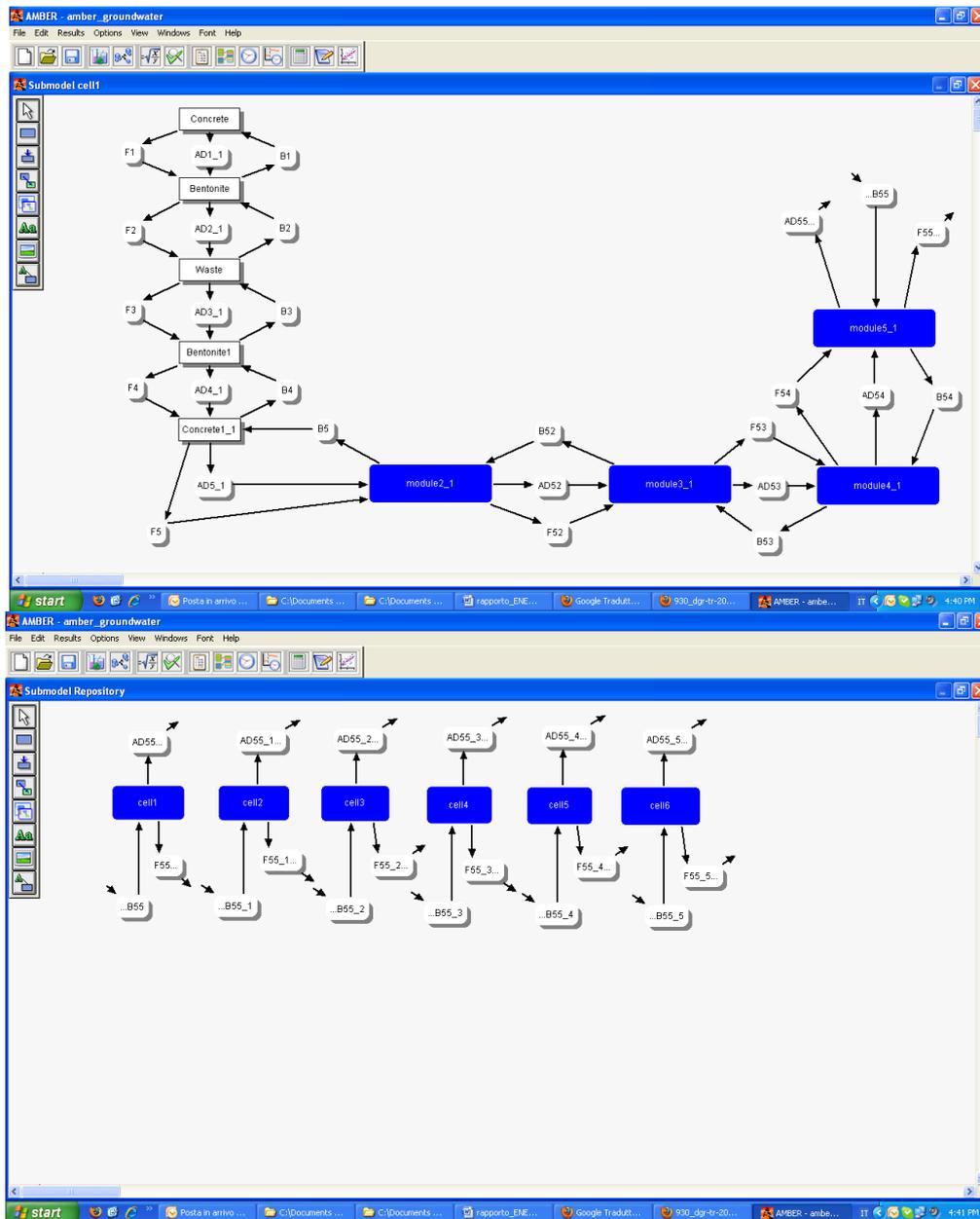
Inoltre, per semplicità e senza perdere in generalità, nel presente lavoro i) l'azione protettiva delle pareti in calcestruzzo delle celle e del materiale di riempimento dei moduli è trascurata (ipotesi conservativa) e ii) la modellizzazione riguarda il rilascio e il trasporto di un unico radionuclide, cioè

il  $^{239}\text{Pu}$ : questo particolare radionuclide è stato scelto poichè pone rischi ambientali a lungo termine a causa della sua radioattività e tossicità.

Come mostrato in Figura 4, il modulo ed il deposito sono stati modellati con il codice AMBER nel seguente modo:

1. l'unità di deposito è suddivisa in 6 compartimenti, corrispondenti alle 6 celle costituite da un insieme di 48 colonne di 5 moduli;
2. ogni colonna di 5 moduli è costituita a sua volta da un insieme di 5 compartimenti corrispondenti ai moduli;
3. infine, ogni singolo modulo è suddiviso in 5 compartimenti rappresentanti le 5 diverse barriere di contenimento, cioè il primo e l'ultimo strato di cemento, i due strati di backfill e il fusto stesso (Figura 3, sinistra);
4. ad ogni compartimento del modulo sono associati tre differenti ratei di scambio per simulare rispettivamente i fenomeni di trasporto advettivo ( $\lambda_{AD} = \textit{Advection}$ ) e di dispersione idrodinamica ( $\lambda_F = \textit{Forward}$ ,  $\lambda_B = \textit{Backward}$ );
5. il valore del coefficiente di dispersione idrodinamica dei compartimenti "donatori" è uguale a quello degli "accettori";
6. l'inventario di  $^{239}\text{Pu}$ , nel deposito è pari a  $1.6 \cdot 10^{10}$  GBq [3], uniformemente distribuito nei fusti di ogni modulo.





**Figura 4: Rappresentazione concettuale del modello a compartimenti attraverso l'utilizzo del codice AMBER. Ogni modulo è formato da una sequenza di 5 compartimenti (calcestruzzo – grout – fusto – grout – calcestruzzo) rappresentanti le barriere ingegneristiche di ogni modulo, per ogni compartimento sono associati 3 differenti ratei di scambio  $\lambda_{AD}$ ,  $\lambda_F$  e  $\lambda_B$  (in alto). Rappresentazione del deposito costituito da 6 celle (in basso).**

In base a considerazioni fisiche che derivano da una schematizzazione numerica alle differenze finite dell'Equazione di *Advection – Dispersion* (ADE) [4] è possibile esprimere  $\lambda_{AD}$  come:



$$\lambda_{AD} = \frac{q}{L\theta_w R} \quad (2)$$

in cui  $q$  è il flusso d'acqua annuale (velocità di Darcy) attraverso il compartimento donatore (m/y);  $L$  è la lunghezza del compartimento in direzione del flusso d'acqua (m);  $\theta_w$  è la porosità del mezzo preso in considerazione;  $R$  è il fattore di ritardo caratterizzante ciascun radionuclide.

I processi di diffusione e dispersione possono invece essere rappresentati nel modello a compartimenti con l'introduzione di opportuni ratei di scambio tra il compartimento donatore ed il compartimento accettore (*Forward*) e viceversa (*Backward*). A partire da una schematizzazione numerica alle differenze finite dell' ADE [4], il rateo di trasferimento diffusivo e dispersivo, *Forward*, ( $\lambda_F$ ,  $y^{-1}$ ), può essere stimato come:

$$\lambda_F = \frac{A_d D_{disp,m}}{R_U V_U \Delta_d \theta_{wU}} \quad (3)$$

in cui  $A_d$  è l'area della sezione trasversale rilevante al trasporto diffusivo e dispersivo ( $m^2$ );  $D_{disp,m}$  è il coefficiente di dispersione idrodinamica medio;  $R_U$  è il coefficiente di ritardo del radionuclide per il compartimento "donatore";  $V_U$  è il volume del compartimento "donatore" ( $m^3$ );  $\Delta_d$  è la distanza tra i punti medi del compartimento "donatore" ed il compartimento "accettore" in direzione del flusso d'acqua di percolazione (m);  $\theta_{wU}$  è la porosità del compartimento "donatore". Il valore medio del coefficiente di dispersione idrodinamica,  $D_{disp,m}$  è calcolato attraverso la seguente relazione [4]:

$$D_{disp,m} = \frac{D_{disp,U} D_{disp,D} (L_U + L_D)}{L_U D_{disp,U} + L_D D_{disp,D}} \quad (4)$$

in cui  $D_{disp,U}$  è il coefficiente effettivo di dispersione idrodinamica per il compartimento "donatore" ( $m^2/y$ );  $D_{disp,D}$  è il coefficiente effettivo di dispersione idrodinamica per il compartimento "accettore" ( $m^2/y$ ); sia  $D_{disp,U}$  che  $D_{disp,D}$  sono il risultato della somma algebrica del coefficiente di



diffusione molecolare  $D_{diff}$  ( $m^2/y$ ) e del coefficiente di dispersione meccanica  $D_{mech}$  ( $m^2/y$ );  $L_U$  è la distanza del punto medio del compartimento “donatore” dall’ interfaccia di trasferimento con il compartimento “accettore” (m) e  $L_D$  è la distanza del punto medio del compartimento “accettore” dall’ interfaccia di trasferimento con il compartimento “donatore” (m).

Il rateo di trasferimento diffusivo e dispersivo *Backward* dal compartimento “accettore” a quello “donatore” ( $\lambda_B$ ,  $y^{-1}$ ), analogamente a (3), può essere stimato come:

$$\lambda_B = \frac{A_d D_{disp,m}}{R_D V_D \Delta_d \theta_{wD}} \quad (5)$$

in cui  $R_D$  è il fattore di ritardo del radionuclide nel compartimento “accettore”;  $V_D$  è il volume del compartimento “accettore” ( $m^3$ ) e  $\theta_{wD}$  è la porosità del compartimento “accettore”.

I valori numerici dei parametri fin qui introdotti (Tabella 1) sono stati determinati sotto le seguenti ipotesi: 1) la colonna dei 5 moduli è totalmente saturata d’acqua ed è stato applicato un carico idraulico di 0.15 m , all’estremità superiore del modulo più alto, cosicchè all’estremità superiore della colonna si ha un battente idraulico di  $h(z=5 \cdot 1.7m) = 5 \cdot 1.7 + 0.15 = 8.65m$  ; 2) il battente idraulico all’estremità inferiore della colonna è assunto  $h(z=0) = 0$ ; 3) ogni modulo ha un gradiente idraulico costante di  $\Delta h / \Delta z = 1.0176$  , dove  $\Delta h = 8.65m$  e  $\Delta z = 5 \cdot 1.7m = 8.5m$  è l’altezza della colonna; 4) sono stati trascurati il decadimento radioattivo del  $^{239}Pu$  e la generazione di altri radionuclidi provenienti dalla sua catena di decadimento; 5) la migrazione del  $^{239}Pu$  avviene sotto l’ipotesi di isoterma lineare; 6) il  $^{239}Pu$  è rilasciato istantaneamente al tempo  $t = 0$ .

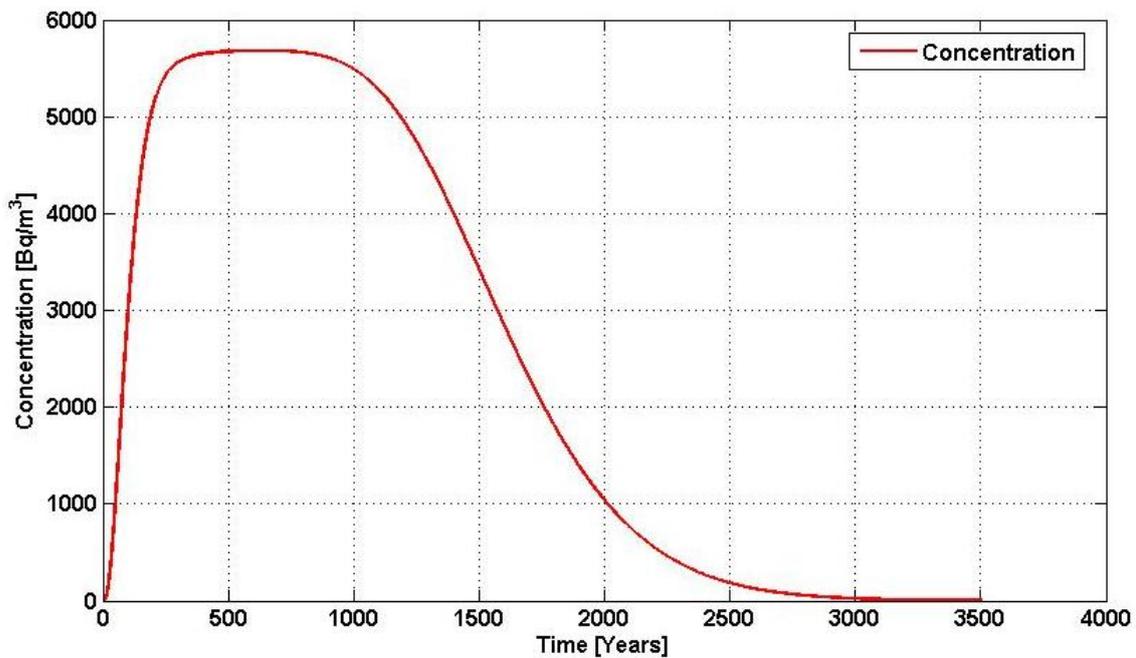
**Tabella 1: Valori dei parametri della modellazione AMBER per il deposito.**

Parametri	Calcestruzzo	Grout	Fusto
$q$ (m/s)	$6.7360 \cdot 10^{-7}$	$6.7360 \cdot 10^{-7}$	$6.7360 \cdot 10^{-7}$
$\theta_w = \theta_{wU} = \theta_{wD}$	0.35	0.05	0.35
$D_{mech}$ ( $m^2/s$ )	$1.9008 \cdot 10^{-10}$	$1.0962 \cdot 10^{-9}$	$3.7747 \cdot 10^{-9}$
$D_{diff}$ ( $m^2/s$ )	$1.0000 \cdot 10^{-9}$	$1.0000 \cdot 10^{-9}$	$1.0000 \cdot 10^{-9}$



Parametri	Calcestruzzo	Grout	Fusto
$q$ (m/s)	$6.7360 \cdot 10^{-7}$	$6.7360 \cdot 10^{-7}$	$6.7360 \cdot 10^{-7}$
$D_{disp,m}$ (m <sup>2</sup> /s)	$1.1901 \cdot 10^{-9}$	$2.0962 \cdot 10^{-9}$	$4.7747 \cdot 10^{-9}$
$R$	$4.5724 \cdot 10^3$	$2.0000 \cdot 10^5$	$8.5724 \cdot 10^3$
$L$ (m)	0.15	0.135	1.1
$L_v = L_D$ (m)	0.075	0.0675	0.55

La Figura 5 mostra la stima della concentrazione (Bq/m<sup>3</sup>) di <sup>239</sup>Pu in uscita dall'ultima barriera della colonna dei 5 moduli ottenuta mediante l'applicazione del codice AMBER al modello precedentemente descritto.



**Figura 5: Stima della concentrazione del <sup>239</sup>Pu rilasciata dalla prima cella del deposito nella zona insatura in funzione del tempo.**

#### 2.4. Applicazione del codice AMBER al modello concettuale del trasporto del contaminante nella geosfera



La Figura 6 mostra uno schema 3D di un generico processo di migrazione dei radionuclidi a causa dell'acqua di percolazione ( $i$ ) da un ipotetico deposito superficiale di scorie radioattive (R), attraverso una zona insatura di spessore  $L^U = 500$  m, sino alla falda acquifera (G) [4]. Sotto le ipotesi che nella zona insatura la migrazione dei radionuclidi avvenga prevalentemente in direzione verticale e che la diffusione laterale sia trascurabile, è possibile stimare la dose al gruppo critico attraverso un modello a compartimenti rappresentante la proiezione del deposito su un dominio mono dimensionale di trasporto e di flusso d' acqua di falda.

Per semplicità la zona insatura è suddivisa in 6 compartimenti corrispondenti alle proiezioni verticali delle 6 celle di deposito.

Quando il contaminante raggiunge la falda acquifera, la concentrazione dei radionuclidi viene diluita dall'acqua di falda. Il generico modello concettuale, ivi assunto, considera che la diluizione dei radionuclidi avvenga istantaneamente attraverso un mixing completo con l'acqua di falda ad una profondità di 500 m (Figura 6).

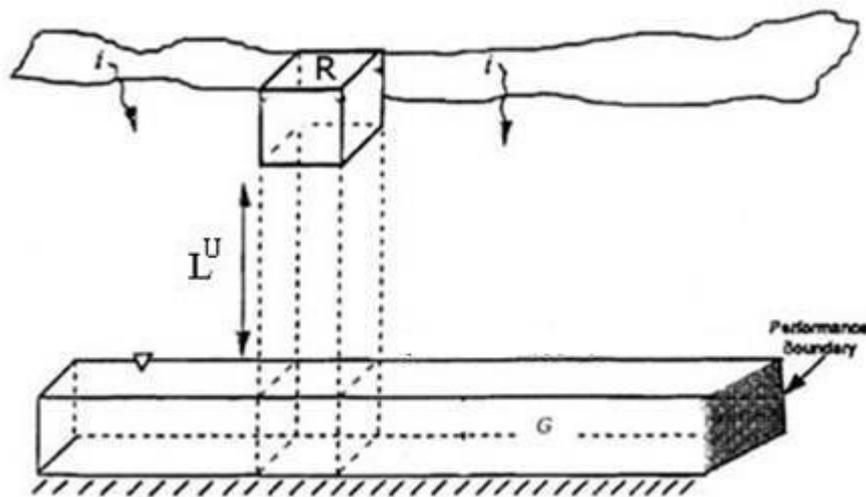


Figura 6: Generico modello concettuale del percorso di percolazione delle acque.

#### 2.4.1. Modellazione del trasporto nella zona instaura



Come accennato in precedenza, trascurando la diluizione dei radionuclidi durante il trasporto in zona insatura, l'unico effetto di tale moto è quello di ritardare uniformemente i radionuclidi nel loro percorso verso la falda acquifera.

Il tempo di attraversamento della zona insatura,  $t^U$ , per un flusso stazionario mono-dimensionale con un gradiente idraulico unitario sarebbe:

$$t^U = L^U \cdot \theta_w^U / q^U \quad (6)$$

dove  $L^U$  (L) è lo spessore della zona insatura, per esempio, la distanza tra il deposito ed il piano di falda,  $\theta_w^U$  è la porosità della zona insatura e  $q^U$  (L/T) è la velocità di Darcy.

Tuttavia, considerando che la migrazione dei radionuclidi nella zona insatura avvenga sotto l'ipotesi di isoterma lineare, il tempo di attraversamento,  $t_r^U$ , può essere più precisamente espresso come:

$$t_r^U = t^U \cdot \left[ 1 + (1 - \theta_{sed}^U) \cdot K_d^U \cdot \rho_{gr}^U / \theta_w^U \right] \quad (7)$$

dove  $\rho_{gr}^U$  (M/L<sup>3</sup>) e  $\theta_{sed}^U$  sono rispettivamente la densità di massa e la porosità totale della zona insatura, e  $K_d^U$  (L<sup>3</sup>/M) è il coefficiente di partizione per il <sup>239</sup>Pu. La Tabella 2 fornisce i valori dei parametri della zona insatura utilizzati per il presente caso studio.

**Tabella 2: Valori dei parametri per la zona insatura.**

Parametro	Valore	Parametro	Valore
$L^U$ (m)	500	$\rho_{gr}^U$ (kg/m <sup>3</sup> )	$2.5 \cdot 10^3$
$\theta_w^U$	0.1	$K_d^U$ (m <sup>3</sup> /kg)	5
$\theta_{sed}^U$	0.4	$q$ (m/y)	0.62
$t^U$ (y)	80	$t_r^U$ (y)	86



In conclusione il solo rateo di trasferimento da un compartimento della zona insatura ad uno della falda può essere espresso semplicemente come:  $\lambda_{ij} = 1/t_r^U$  [4].

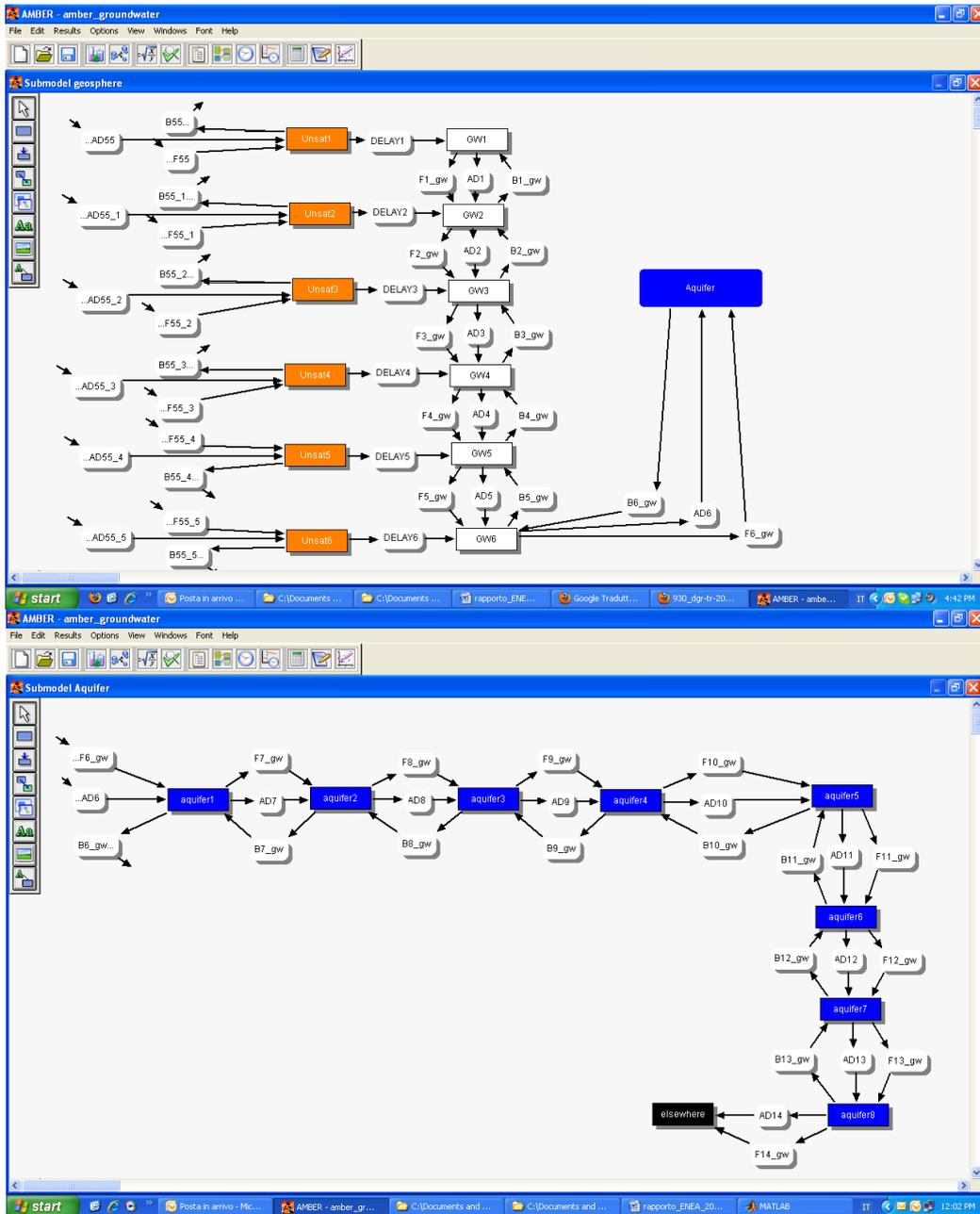
#### 2.4.2. Modellazione del trasporto in falda acquifera (Zona satura)

Le dimensioni della falda acquifera sono: 242.2 m di lunghezza, 213.3 m di larghezza e 5 m di profondità [4], ed include sia la proiezione del deposito, sia il pozzo di osservazione della dose al gruppo critico (situato a circa 138.4 m a valle dalla fine del deposito, tipica distanza di riferimento nelle performance assessment).

La falda acquifera è stata modellata con il codice AMBER (Figura 7) nel seguente modo:

1. il piano di falda è suddiviso in 14 compartimenti allineati in un vettore mono-dimensionale;
2. ad ogni compartimento sono assegnati la stessa lunghezza  $L^S$ , volume  $V^S$  e porosità  $\theta_w^S$ ,
3. i fenomeni di diffusione molecolare sono trascurati;
4. il mezzo poroso rappresentante la falda acquifera è assunto omogeneo, con densità di massa  $\rho_{gr}^S$ ,
5. sono assegnati un gradiente costante ed una velocità di Darcy,  $q^S$ , costante;
6. ad ogni compartimento del modulo sono associati tre ratei di scambio per simulare rispettivamente i fenomeni di trasporto advettivo ( $\lambda_{AD} = Advection$ ) e di dispersione idrodinamica ( $\lambda_F = Forward$ ,  $\lambda_B = Backward$ );
7. il coefficiente di dispersione meccanica  $D_{mech}^S$  è assunto uguale per i compartimenti “donatori” e per quelli “accettori”
8. la migrazione avviene sotto la condizione di isoterma lineare con coefficiente di partizione  $K_d^S$ .





**Figura 7: Rappresentazione AMBER del percorso attraverso la geosfera dell'acqua di percolazione. La parte alta della figura mostra la migrazione dei radionuclidi attraverso la zona insatura ed il loro completo mixing con l'acqua di falda ad una profondità di 500 m. Nella parte bassa della figura è rappresentata la migrazione dei radionuclidi nella falda acquifera.**

La Tabella 3 riassume i valori numerici dei parametri fin qui introdotti per la modellazione della falda acquifera.

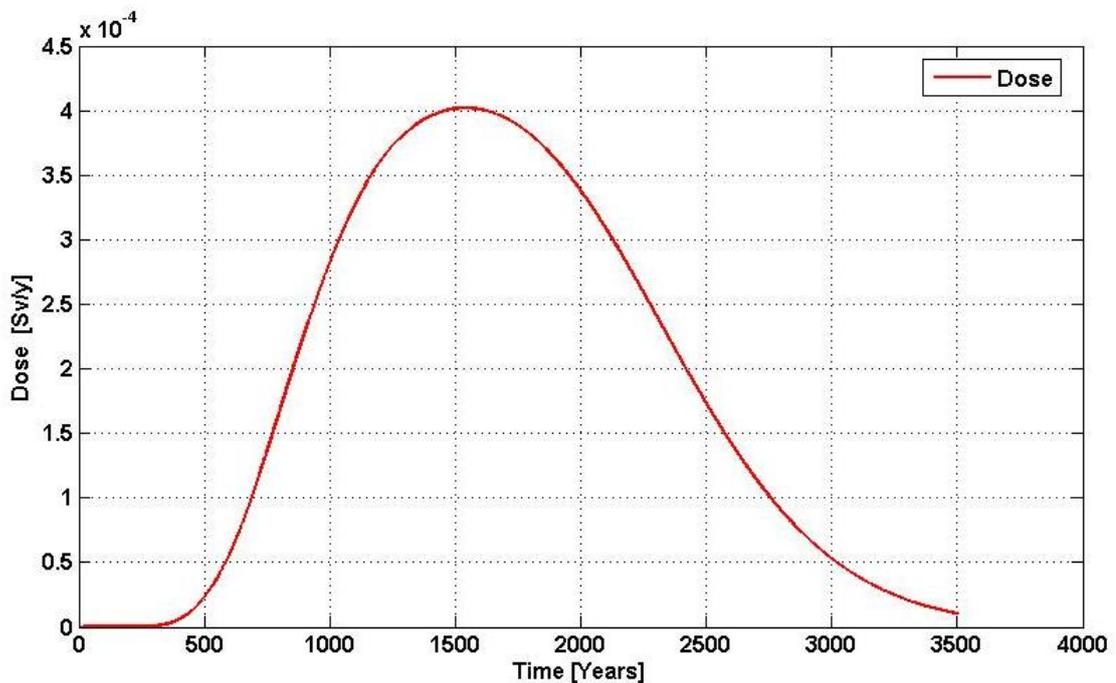
**Tabella 3: Valori dei parametri per la zona satura.**

Parametro	Valore	Parametro	Valore
$L^S$ (m)	17.3	$\rho_{gr}^S$ (kg/m <sup>3</sup> )	$2.5 \cdot 10^3$
$\theta_w^S$	0.15	$K_d^S$ (m <sup>3</sup> /kg)	0.5
$D_{mech}^S$ (m <sup>2</sup> /y)	$2.1 \cdot 10^3$	$q^S$ (m/y)	316

In base alla stima della concentrazione di <sup>239</sup>Pu nel piano di falda acquifera,  $C_{acquifer}(t)$ , l'intensità della dose finale assorbita dagli esseri umani attraverso l'ingestione d'acqua potabile può essere stimata come [4]:

$$D_w(t) = C_{acquifer}(t) \cdot ING_w \cdot DC_{ing} \quad (8)$$

dove  $ING_w = 7.3 \cdot 10^{-1}$  (m<sup>3</sup>/y) è la quantità media d'acqua potabile ingerita in un anno e  $DC_{ing} = 15.7 \cdot 10^{-9}$  (Sv/Bq) è il fattore di conversione della dose per ingestione del <sup>239</sup>Pu [4].



**Figura 8: Dose annuale al gruppo critico di <sup>239</sup>Pu in funzione del tempo, calcolata ad una distanza di 138.4 m a valle dalla fine del deposito.**

### 3. CONCLUSIONI

L'intensità della dose stimata di  $^{239}\text{Pu}$  a cui la popolazione è esposta deve essere comparata con i limiti prescritti dalla legge italiana. Il livello massimo consentito non deve essere superiore a 1 mSv/y rispetto al valore di riferimento di radioattività naturale di 2.4 mSv/y. Come è possibile evincere dalla Figura 8, la dose massima al gruppo critico, stimata attraverso la simulazione AMBER, ad una distanza di 138.4 m a valle dal deposito, è di circa 0.4 mSv/y, minore del limite imposto dall'ente regolatorio. Questo risultato conferma la ragionevolezza delle ipotesi e delle semplificazioni adottate nella performance assessment preliminare basata sul codice AMBER e presentata in questo lavoro con riferimento ad un caso studio di un deposito superficiale per i rifiuti radioattivi di categoria II.



## REFERENZE

- [1] R. Walke et al., “Deep Geologic Repository for OPG’s Low & Intermediate Level Waste”, NWMO DGR – TR – 2009 – 02.
- [2] M. Marseguerra, E. Zio, E. Patelli, F. Giacobbo, G. Ventura, G. Mingrone (2003). “Monte Carlo simulation of contaminant release from a radioactive waste deposit”. *Mathematics and Computers in Simulation*, 62, pp. 421-430.
- [3] “Inventario Nazionale dei rifiuti radioattivi”, Task Force per il sito nazionale di deposito dei materiali radioattivi, ENEA, (2000).
- [4] Quantisci FINAL REPORT TO ENEA: “Preliminary feasibility assessment for near-surface engineered LLW repositories at two sites”.

