



**petroleum
engineering
group**



**STUDIO DEI FENOMENI
DIFFUSIVI ATTRAVERSO LE
ROCCE DI COPERTURA DEI
GIACIMENTI ADIBITI A
STOCCAGGIO SOTTERRANEO
DEL GAS NATURALE**

Dicembre 2017



INDICE

EXECUTIVE SUMMARY

1	INTRODUZIONE	1
2	MODELLO FLUIDODINAMICO	4
2.1	Dati generali	4
2.2	Geometria	5
2.3	Proprietà petrofisiche	7
2.4	Proprietà dei fluidi	7
2.5	Parametri della roccia e di interazione roccia-fluido.....	9
2.6	Condizioni iniziali.....	12
2.7	Analisi parametriche.....	13
2.8	Risultati delle simulazioni	17
2.9	Tipologia di modello ed effetto scala	22
3	BIBLIOGRAFIA	24



EXECUTIVE SUMMARY

La presente relazione riassume i risultati dello studio condotto dal Petroleum Engineering Group del Politecnico di Torino per l'analisi e la valutazione dei possibili fenomeni diffusivi che potrebbero causare perdite di gas da un giacimento a gas attraverso la roccia di copertura.

Lo studio è stato eseguito attraverso la generazione di un modello numerico fluidodinamico che ha consentito di simulare i fenomeni di diffusione molecolare del gas. È stata definita una geometria sintetica, rappresentativa dei giacimenti impiegati per lo stoccaggio sotterraneo del gas naturale operati da STOGIT S.p.A., comprendente un livello poroso saturo in gas (giacimento), un livello impermeabile di natura argillosa saturo in acqua sovrastante il giacimento (roccia di copertura) e un ulteriore livello poroso saturo in acqua al di sopra della roccia di copertura (livello di monitoraggio).

Alcuni dei dati di input del modello (come le caratteristiche PVT del gas) sono stati definiti sulla base delle proprietà dei fluidi rinvenuti nel campo di Fiume-Treste, livello C2. Altri dati di ingresso sono stati invece definiti per analogia con le formazioni impiegate in Italia per lo stoccaggio sotterraneo del gas naturale, allo scopo di generalizzare il più possibile la valutazione e produrre risultati validi per tutti i campi di stoccaggio gestiti da STOGIT SpA.

Il modello numerico è stato impiegato per effettuare simulazioni ad una scala temporale geologica (circa 2.5 milioni di anni) in modo da valutare l'evoluzione dei fenomeni diffusivi su un arco temporale compatibile con la formazione dei giacimenti (la maggior parte dei giacimenti parzialmente esauriti convertiti allo stoccaggio del gas naturale risalgono infatti alle età Pliocenica e Pleistocenica).

I risultati di dettaglio in termini di potenziali migrazioni di gas attraverso la roccia di copertura sono stati invece valutati per un intervallo temporale molto più limitato (200 anni), verosimilmente confrontabile con la scala temporale delle attività antropiche anche future di sfruttamento dei giacimenti di idrocarburi ad uso stoccaggio sotterraneo del gas naturale.

Per l'esecuzione delle simulazioni fluidodinamiche è stato impiegato il software commerciale ECLIPSE 100 (Schlumberger™), attivando l'opzione "Diffusion", che consente di simulare la diffusione molecolare di un fluido in un altro.

Poiché il modulo implementato nel simulatore non consente di simulare e di valutare la diffusione molecolare del gas nell'acqua (che tipicamente satura le rocce di copertura), ma solo la diffusione del gas nell'olio, è stato creato un modello pseudizzato gas-olio, in cui all'olio sono state assegnate le caratteristiche PVT dell'acqua.

Sono state effettuate diverse analisi parametriche su tutti quei parametri che, oltre al tempo, possono avere un impatto sull'entità e sull'evoluzione della diffusione, ovvero:

- Spessore della roccia di copertura.
- Porosità della roccia di copertura.



- Coefficiente di diffusione molecolare.

La permeabilità della roccia di copertura è tipicamente estremamente bassa, dell'ordine di 10^{-6} mD o inferiore, e di fatto non permette il flusso dei fluidi attraverso di essa. Nella simulazione essa è stata posta pari a zero in modo da annullare qualsiasi fenomeno di trasporto del gas per convezione e/o dispersione e focalizzare l'attenzione sul solo impatto della diffusione molecolare sulle possibili perdite di gas.

Per quanto riguarda il coefficiente di diffusione, in mancanza di dati sperimentali si è fatto riferimento a valori di letteratura e sono state effettuate delle analisi parametriche. Mediante le simulazioni condotte a scala geologica si è dimostrato che non sarebbe realistico prendere in considerazione valori del coefficiente di diffusione del gas attraverso le argilliti superiori a 10^{-6} m²/giorno in quanto la diffusione del gas provocherebbe una variazione significativa della pressione originaria del giacimento, ovvero la pressione scenderebbe al di sotto del valore idrostatico a cui invece tipicamente è rinvenuto il gas.

Adottando quindi un coefficiente di diffusione molecolare del gas pari a 10^{-6} m²/giorno i risultati delle simulazioni indicano che i fenomeni diffusivi attraverso la roccia di copertura (conservativamente ipotizzate di spessore pari anche solo a un solo metro) hanno un impatto estremamente limitato e che l'entità del volume di gas che potrebbe essere perso nell'arco di 200 anni è inferiore allo 0.00015% del volume di gas inizialmente in posto nei giacimenti.

Le simulazioni effettuate hanno anche dimostrato che i risultati, se espressi in termini di frazione di gas che ha raggiunto per diffusione molecolare lo strato di monitoraggio superficiale rispetto al volume di gas inizialmente in posto in giacimento, non dipendono né dalla geometria del modello né dall'effetto scala, ovvero dal volume del giacimento stesso, e che pertanto hanno validità di carattere generale.



1 INTRODUZIONE

In fisica, chimica e biologia, la diffusione di materia (o semplicemente diffusione) è un particolare fenomeno mediante il quale si verifica trasporto di massa. Un tipico esempio di diffusione è rappresentato dalla diffusione di un gas in un altro gas o in un liquido (acqua): in questo caso si parla anche di inter-diffusione.

Esistono più meccanismi responsabili del fenomeno di diffusione; ciascun meccanismo è modellizzato utilizzando differenti modelli matematici (cioè differenti equazioni). Alcune tipologie di diffusione di materia sono:

- diffusione molecolare;
- diffusione di Knudsen;
- diffusione superficiale;
- flusso idrodinamico;
- condensazione capillare;
- flusso viscoso.

A seconda della forza spingente che determina la diffusione, questa può essere distinta in:

- diffusione ordinaria: se il trasporto di materia è determinato da un gradiente di concentrazione;
- diffusione termica: se il trasporto di materia è determinato da un gradiente di temperatura;
- diffusione per effetto della pressione: se il trasporto di materia è determinato da un gradiente di pressione;
- diffusione forzata: se il trasporto di materia è determinato da forze di diverso tipo che agiscono sulle componenti del sistema.

Dal punto di vista fisico il fenomeno più comune è quello della diffusione molecolare ordinaria che prevede un trasporto di massa dalla zona a concentrazione maggiore alle zone a concentrazione minore. Il tempo necessario affinché il trasporto raggiunga una certa entità oppure cessi del tutto (quando il sistema raggiunge condizioni di concentrazione uniforme ed è in equilibrio) dipende dalla velocità di diffusione, ovvero dal coefficiente di diffusione molecolare (D).

La diffusione ordinaria è presente quando vi è un gradiente di concentrazione diverso da zero. Se la temperatura è costante, le molecole hanno la stessa energia (parziale nel caso di inter-diffusione di gas).

Nell'ambito della matematica e dei fenomeni di trasporto il fenomeno della diffusione ordinaria è descritto dalle leggi di Fick. Tali leggi, che prendono il nome dal fisiologo tedesco Adolf Fick che per primo le sviluppò nel 1855, sono equazioni differenziali alle derivate parziali ellittiche non lineari che descrivono le variazioni di concentrazione nei



materiali in cui sono in atto fenomeni di diffusione molecolare in assenza di diffusione termica, che invece viene tenuta in conto dalla più generale legge di Soret.

Qualsiasi grandezza scalare immersa in un fluido che si muove con velocità $-\nabla D$ è sottoposta a un moto browniano, ovvero a una diffusione spaziale e temporale nel fluido stesso. Detta C la grandezza che si diffonde, la legge che regola questa diffusione è:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \nabla D \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \quad (1)$$

La prima legge di Fick descrive la diffusione nello spazio in condizioni stazionarie:

$$\vec{J} = -\nabla(DC) \quad (2)$$

dove J è il flusso della specie diffondente (dimensionalmente $[L]^{-2} [T]^{-1}$), la divergenza esprime la derivata spaziale, D è la diffusività o coefficiente di diffusione (dimensionalmente $[L]^2 [T]^{-1}$) e C è la concentrazione della specie diffondente (dimensionalmente $[L]^{-3}$): il segno negativo esprime la migrazione da una concentrazione più alta a una più bassa. Sviluppando il gradiente si ottiene:

$$\vec{J} = -D \nabla C - C \nabla D = -D \nabla C - C \vec{v} \quad (3)$$

dove v è la velocità della specie. Se la diffusione è isotropa, l'equazione si riduce a:

$$\vec{J} = -D \nabla C \quad (4)$$

In condizioni monodimensionali l'eq. (4) si riduce a:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (5)$$

dove x è la coordinata spaziale misurata in maniera normale rispetto alla sezione attraverso cui avviene la diffusione.

Il fenomeno della diffusione molecolare è stato descritto in molti articoli di letteratura (Goodall e Quigley, 1977; Desaulniers et al., 1982, 1986; Crooks e Quigley, 1984; Quigley e Rowe, 1986; Quigley et al., 1987; Johnson et al., 1989; Manassero e Shackelford, 1994) nell'ambito dei fenomeni che governano la migrazione degli inquinanti attraverso barriere minerali quali, ad esempio, rivestimenti di argilla compattata per depositi di sostanze inquinanti. Gli studi pubblicati hanno sviluppato in particolare gli aspetti riguardanti la definizione del fenomeno di trasporto per diffusione attraverso i mezzi porosi, l'importanza relativa dei vari parametri che intervengono nelle equazioni che descrivono la migrazione degli inquinanti ed il significato delle varie ipotesi adottate nei modelli di calcolo per il dimensionamento delle barriere minerali.

Tra le pubblicazioni scientifiche dedicate ai metodi di laboratorio per la misura del coefficiente di diffusione D si ricorda quella di Shackelford e Daniel (1991) in cui vengono

trattati metodo delle semi-celle, il metodo stazionario, il metodo della colonna filtrante e il metodo del serbatoio singolo o della diffusione semplice, tutti indicati nel caso di inquinanti solubili. La stima del valore del coefficiente D può essere effettuata sia attraverso la misura della diminuzione nel tempo della concentrazione dell'inquinante nel serbatoio posto idraulicamente a monte del campione di terreno sia attraverso il profilo di concentrazione lungo il campione stesso alla fine della prova; i valori di D ottenuti mediante i profili di concentrazione sono ritenuti mediamente più attendibili. Nel caso di terreni saturi i valori del coefficiente di diffusione (D) sono compresi tra 10^{-6} cm²/s ($8.6 \cdot 10^{-6}$ m²/giorno) e 10^{-5} cm²/s ($8.6 \cdot 10^{-5}$ m²/giorno) per la maggior parte degli inquinanti solubili; sulla base di una ragionevole stima, il coefficiente di diffusione per inquinanti non reattivi (ad esempio il cloro Cl⁻) risulta pari a $5 \cdot 10^{-6}$ cm²/s, ovvero $4.3 \cdot 10^{-5}$ m²/giorno (Shackelford, 1991; Shackelford e Daniel, 1991).

Manassero et al. (1996) hanno condotto una serie di esperimenti in laboratorio per valutare la diffusione di inquinanti specifici quali una soluzione di bromuro di potassio attraverso argilla naturale prelevata in superficie (argilla di Pianfei). Le prove hanno consentito di stimare un intervallo di variazione di D compreso tra $1.6 \cdot 10^{-6}$ cm²/s ($1.4 \cdot 10^{-5}$ m²/giorno) e $1.4 \cdot 10^{-5}$ cm²/s ($1.2 \cdot 10^{-4}$ m²/giorno), con un valore medio pari a $7.1 \cdot 10^{-6}$ cm²/s, ovvero $6.1 \cdot 10^{-5}$ m²/giorno.

Il fenomeno che si intende valutare nel presente studio è la possibile diffusione di un gas (essenzialmente metano) presente in un giacimento sotterraneo attraverso una roccia di copertura argillosa satura in acqua per effetto di un gradiente di concentrazione (diffusione molecolare ordinaria). Il fenomeno prevede dunque il passaggio del gas dallo stato libero (in giacimento) allo stato liquido (in soluzione nella roccia di copertura satura di acqua) e la successiva diffusione in fase acquosa attraverso la roccia di copertura stessa fino agli strati geologici più superficiali e, potenzialmente, fino all'atmosfera.

Nel modello proposto la concentrazione del gas al di sotto della roccia di copertura del giacimento rimane costante per tutte le simulazioni effettuate vista l'entità del volume di gas originariamente in posto (condizione al contorno a monte); la concentrazione di gas al di sopra della roccia di copertura (condizione al contorno a valle) è stata inizialmente posta pari a zero. Il fenomeno di trasporto è stato simulato in condizioni transitorie su scala geologica. Il modello è stato predisposto in modo tale che lo strato superficiale di monitoraggio al di sopra della barriera (*cap rock*) fosse sufficientemente potente da mantenere la concentrazione di gas praticamente trascurabile anche alla fine dell'arco temporale geologico simulato. In altri termini, il sistema non raggiunge mai condizioni di concentrazione uniforme e quindi di equilibrio.

2 MODELLO FLUIDODINAMICO

Al fine di valutare la possibile diffusione molecolare del gas contenuto in un giacimento convertito allo stoccaggio del gas naturale, è stato messo a punto un modello numerico fluidodinamico impiegando il software commerciale Eclipse 100 (Schlumberger™), ampiamente impiegato nell'industria petrolifera per la modellizzazione dinamica dei giacimenti di idrocarburi.

Il modello costruito è di tipo sintetico. Sono state implementate due diverse tipologie di modello in termini di geometria: cartesiana e radiale. Considerata la simmetria del problema e l'obiettivo dello studio, ovvero la valutazione dei possibili fenomeni di diffusione molecolare del gas dal giacimento verso l'alto (attraverso la roccia di copertura), è stato definito un modello monodimensionale in direzione verticale.

La dimensione areale del modello è stata fatta variare opportunamente durante una serie di analisi dedicate in modo da valutare l'impatto dell'effetto scala sui risultati delle simulazioni.

2.1 Dati generali

Il modello descrive tre distinti strati geologici (livelli), così definiti dall'alto verso il basso:

1. livello sabbioso, poroso e permeabile, di monitoraggio saturo in acqua (regione 1);
2. livello argilloso saturo in acqua rappresentante la roccia di copertura (regione 2);
3. livello sabbioso, poroso e permeabile, mineralizzato a gas rappresentante il giacimento (regione 3).

La fig. 1 riporta una vista in sezione del modello (non in scala) con l'identificazione dei tre livelli/regioni.

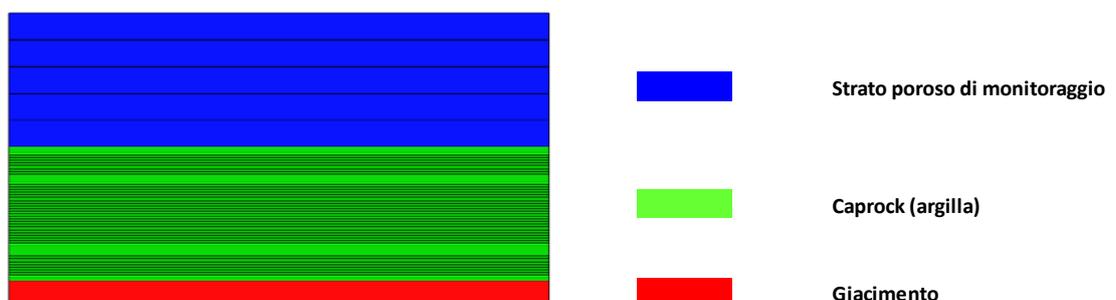


Fig. 1 – Vista in sezione del modello dinamico (non in scala).



2.2 Geometria

Dal punto di vista geometrico è stato adottato un grid monodimensionale in direzione verticale. Arealmente il grid risulta pertanto costituito da una sola cella. La fig. 2 riporta una vista in pianta del modello nel caso di geometria cartesiana, mentre nella fig. 3 è riportata la vista in pianta nel caso di modello radiale.

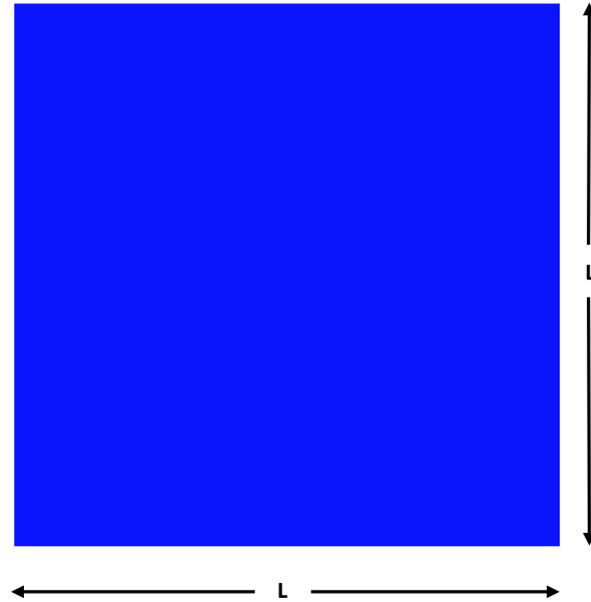


Fig. 2 – Vista in pianta del modello dinamico (modello cartesiano).

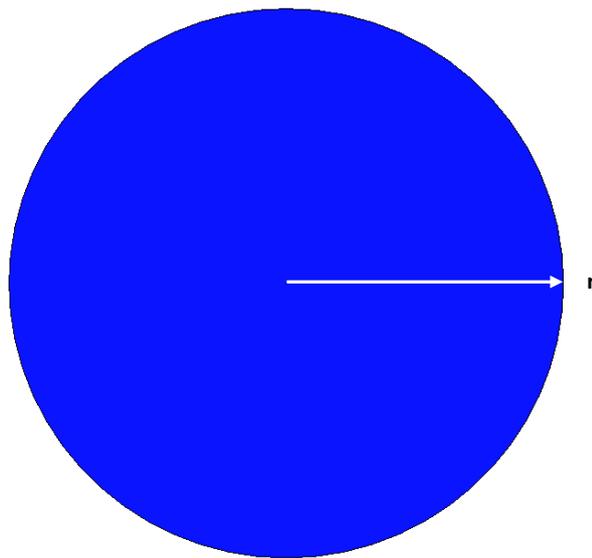


Fig. 3 – Vista in pianta del modello dinamico (modello radiale).



La dimensione areale del modello è stata fatta variare sia nel caso di geometria cartesiana sia nel caso di geometria radiale per valutare l'impatto dell'effetto scala sui risultati delle simulazioni. In particolare sono stati considerati i seguenti scenari di simulazione:

- caso A (base): geometria cartesiana con $L = 2000$ m;
- caso B: geometria cartesiana con $L = 100$ m;
- caso C: geometria radiale con $r = 1000$ m;
- caso D: geometria radiale con $r = 50$ m.

La scelta dei valori di L e di r nei vari scenari analizzati è stata effettuata per valutare la rappresentatività dei risultati sia a scala di giacimento (casi A e C) sia a scala di pozzo (casi B e D).

In direzione verticale sono stati definiti in modo differenziato dei sottolivelli (*layers*) per descrivere i 3 livelli geologici considerati (regioni 1, 2 e 3). In particolare, il livello poroso basale rappresentante il giacimento (regione 3) è stato definito con un unico *layer* di spessore (dz) pari a 10 m alla profondità (*top*) di 1001 m TVDss.

La roccia di copertura (regione 2) è stata definita immediatamente al di sopra del giacimento con uno spessore variabile tra 1 e 5 m. Il numero di *layers* (Nz) che descrivono la *cap rock* risulta variabile tra 10 e 50 mentre lo spessore di ogni *layer* è stato assegnato uniformemente pari a 0.1 m in tutti gli scenari di simulazione.

Lo strato poroso di monitoraggio (regione 1) si sviluppa a partire dal *top* della roccia di copertura (posizionato ad una profondità variabile tra 996 e 1000 m) fino alla superficie (0 m TVDss). Il livello è descritto da 5 *layers* con spessore variabile tra 199.2 e 200 m.

La tabella 1 riporta uno schema riepilogativo con le caratteristiche geometriche relative a ciascuna regione.

Tab. 1 – Grid del modello dinamico

Livello (Regione)	Profondità top	Nz	dz
	[m TVDss]	[-]	[m]
1	0	5	199.2÷200
2	996÷1000	10÷50	0.1
3	1001	1	10



2.3 Proprietà petrofisiche

Il modello dinamico è stato popolato con proprietà petrofisiche rappresentative delle litologie considerate (sabbie per le regioni 1 e 3, argilla per la regione 2).

Le proprietà petrofisiche (porosità, permeabilità e saturazione in acqua irriducibile, S_{wi}) relative a ciascun livello sono riepilogate nella tabella 2.

Vista la natura monodimensionale del modello la permeabilità assegnata è quella verticale. Si fa notare che nel caso della regione 2 (roccia di copertura) la permeabilità è stata posta pari a zero in modo da annullare qualsiasi fenomeno di trasporto del gas per convezione e/o dispersione e focalizzare l'attenzione sul solo impatto della diffusione molecolare sulle possibili perdite di gas.

Tab. 2 – Proprietà petrofisiche

Livello (Regione)	Porosità	Permeabilità	S_{wi}
	[%]	[mD]	[%]
1	20	100	25
2	5÷25	0	90
3	20	100	20

2.4 Proprietà dei fluidi

Le proprietà PVT del gas sono state mutate direttamente dallo studio di giacimento del livello C2 del campo di Fiume-Treste e dal relativo modello dinamico definito e calibrato dal Politecnico di Torino nel 2007 (CAMPO DI SAN SALVO Concessione Fiume Treste – Livello C2 – “MODELLO STATICO ED ANALISI DEL COMPORTAMENTO DINAMICO PER L’OTTIMIZZAZIONE DELLA GESTIONE OPERATIVA” – Gennaio 2007).

Il gas originario risulta costituito per circa il 99% da metano, con una densità riferita a quella dell’aria (*gas gravity*, GG) pari a 0.618.

La temperatura di giacimento è pari a 49°C.

I valori del fattore di volume (B_g) e della viscosità del gas in funzione della pressione sono stati estratti dal modello dinamico del livello C2 – Fiume-Treste. Il loro andamento è mostrato nella fig. 4.

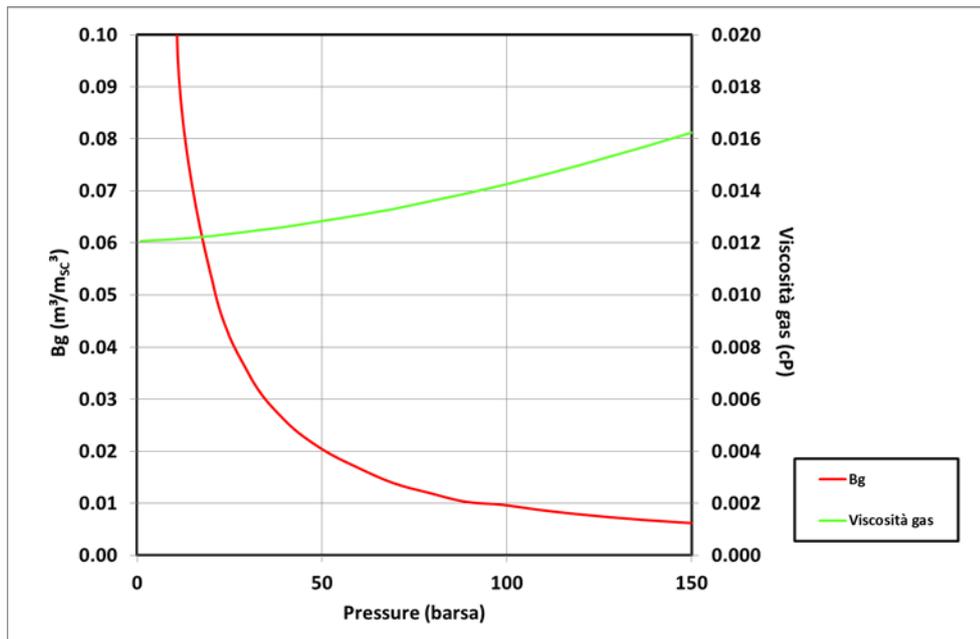


Fig. 4 – Andamento del fattore di volume (B_g) e della viscosità del gas in funzione della pressione.

Per l'acqua di formazione è stata assunta una densità pari a 1050 kg/m^3 . Il fattore di volume dell'acqua risulta pari a 1.012, mentre la viscosità è pari a 0.6 cP. La compressibilità dell'acqua impiegata nel modello dinamico è pari a $4.7 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$.

La solubilità del gas (metano) in acqua in funzione della pressione è stata definita attraverso la correlazione di Katz. Gli andamenti del fattore di volume (B_w), della viscosità dell'acqua e del rapporto di solubilità (R_{sw}) sono rappresentati graficamente nella fig. 5.

Si fa notare che il software impiegato (Eclipse 100) non consente di simulare la diffusione molecolare del gas nell'acqua ma solo la diffusione del gas nell'olio. È stato pertanto creato un modello pseudizzato gas-olio, in cui all'olio sono state assegnate le caratteristiche PVT dell'acqua.

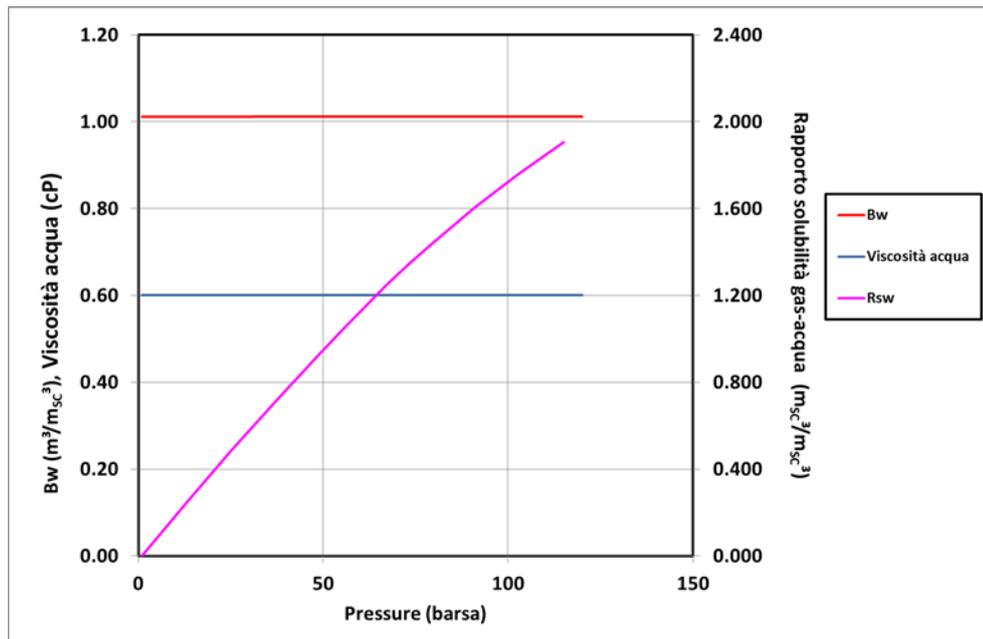


Fig. 5 – Andamento del fattore di volume (B_w), della viscosità dell'acqua e del rapporto di solubilità del gas in acqua (R_{sw}) in funzione della pressione.

2.5 Parametri della roccia e di interazione roccia-fluido

Le curve di permeabilità relativa sono state assunte per analogia con formazioni similari a quelle modellizzate. Sono state generate delle curve normalizzate [definite in un generico intervallo 0÷1] attraverso la nota formulazione di Corey, assumendo un esponente della funzione analitica pari a 3 sia per il gas (N_g) sia per l'acqua (N_w):

$$k_{r,g} = k_{r,g \max} \cdot (S_g - S_{g,cr}) / (1 - S_{wi} - S_{g,cr})^{N_g}$$

dove:

$k_{r,g \max}$: permeabilità relativa al gas massima ($S_g = 1 - S_{wi}$)

S_g : saturazione in gas

S_{wi} : saturazione in acqua irriducibile

$S_{g,cr}$: saturazione critica in gas

N_g : esponente di Corey per il gas

$$k_{r,w} = k_{r,w @ S_{g,cr}} \cdot (S_w - S_{wi}) / (1 - S_{wi} - S_{g,cr})^{N_w}$$

dove:

$k_{r,w @ S_{g,cr}}$: permeabilità relativa all'acqua in condizioni residuali

S_w : saturazione in acqua



S_{wi} : saturazione in acqua irriducibile

$S_{g,cr}$: saturazione critica in gas

N_w : esponente di Corey per l'acqua

Le curve sono state poi scalate per ciascun livello/regione sulla base degli *end points* riepilogati in tabella 3.

Tab. 3 – End points delle curve di permeabilità relativa

Livello (Regione)	S_{wi}	$S_{g,cr}$	$k_{r,g \max}$
	[%]	[%]	[-]
1	25	10	0.95
2	90	5	0.95
3	20	10	0.95

Le curve normalizzate di permeabilità relativa al gas e all'acqua adottate nel modello dinamico del giacimento sono mostrate nella fig. 6 (curve normalizzate) e nella fig. 7 (curve scalate con $S_{wi} = 20\%$ e $S_{g,cr} = 10\%$).

Le pressioni capillari sono state assunte trascurabili nei livelli porosi (giacimento e livello di monitoraggio). Nel caso della roccia di copertura è stata invece assegnata una curva di pressione capillare ($p_{c,g-w}$) che tenesse conto delle forze capillari che agiscono normalmente in un mezzo di natura argillosa (fig. 8).

Si fa notare che nel modello pseudizzato adottato in fase di simulazione le curve di permeabilità relativa all'acqua e i relativi *end points* sono stati assegnati alla fase olio. Per lo stesso motivo, la curva di pressione capillare è stata definita nel sistema gas-olio.

La compressibilità della roccia, c_M , è stata assunta pari a $5.8 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$.

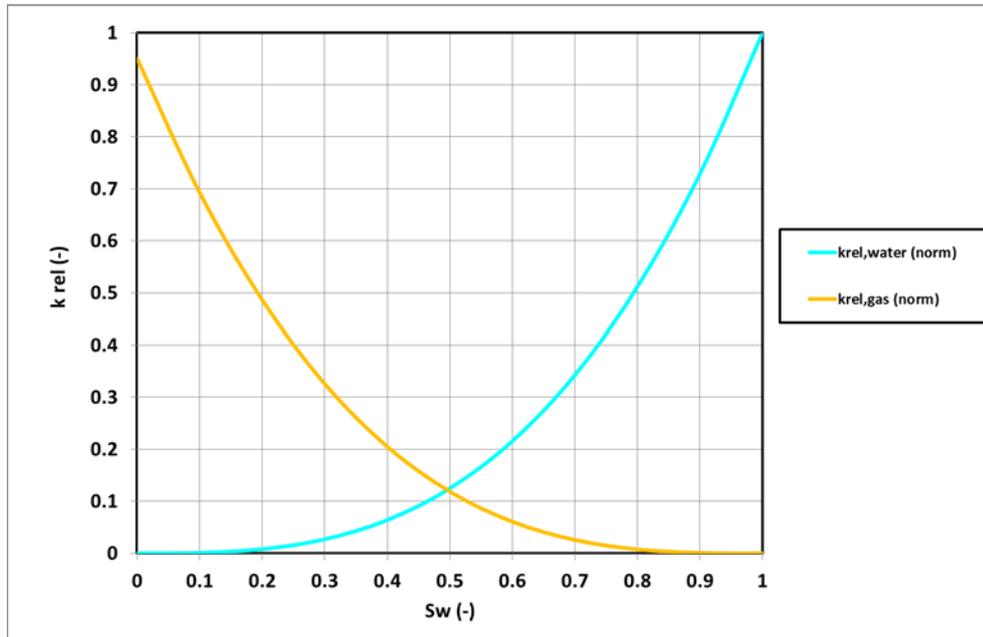


Fig. 6 – Curve di permeabilità relativa gas/acqua (normalizzate).

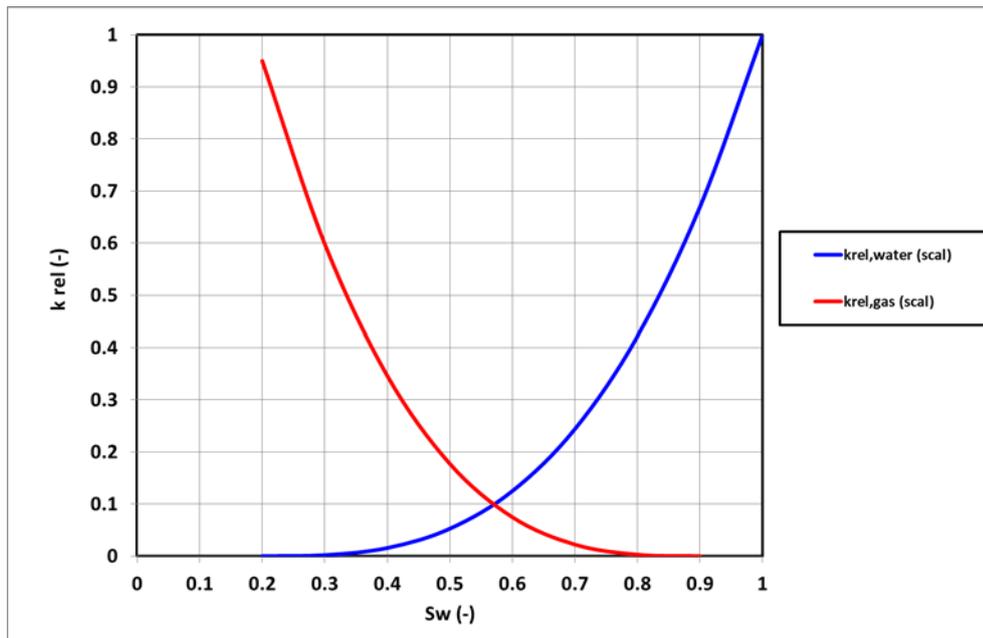


Fig. 7 – Curve di permeabilità relativa gas/acqua (scalate).

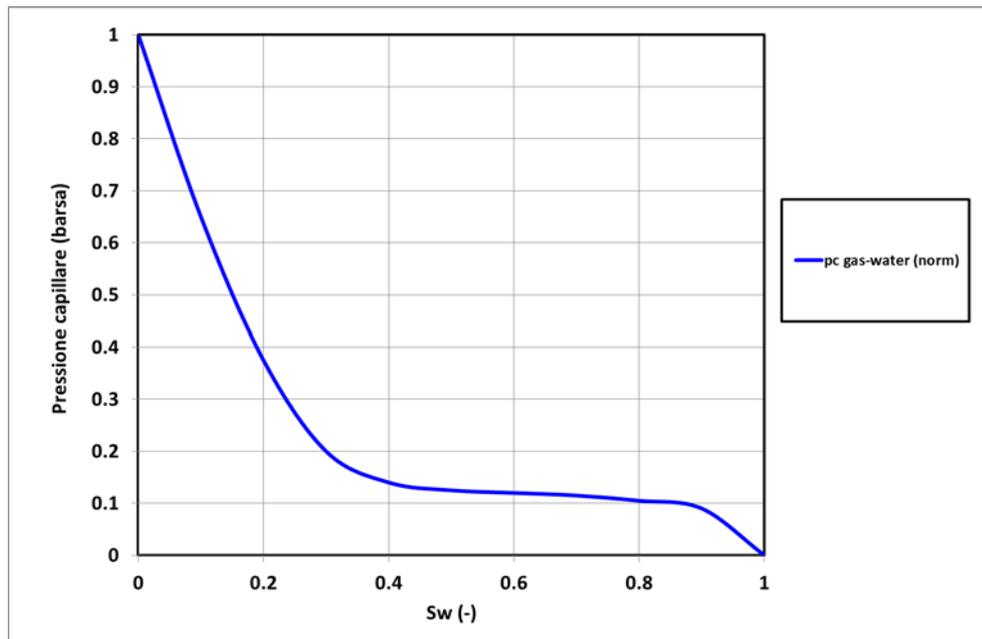


Fig. 8 – Curva di pressione capillare (roccia di copertura).

2.6 Condizioni iniziali

Il modello dinamico è stato inizializzato definendo la distribuzione iniziale dei valori di pressione e saturazione. Per quanto riguarda la pressione è stato assunto un regime idrostatico, assegnando a tutti e tre i livelli (regioni di equilibratura) una pressione iniziale (p_i) pari a 115 barsa alla profondità (*datum depth*) di 1011 m TVDss. Il *datum* scelto coincide con il *bottom* del giacimento (regione 3); a questa stessa profondità è stato definito il contatto gas-acqua iniziale del giacimento. Gli altri due livelli (regioni 1 e 2) sono stati assunti inizialmente saturi in acqua, assegnando a ciascuno di essi un contatto iniziale (GWC_i) alla profondità di 0 m TVDss.

Si fa notare che nel modello pseudizzato adottato in fase di simulazione i contatti iniziali gas-acqua sono stati assegnati come contatti gas-olio.

A seguito dell'inizializzazione è stato possibile determinare il volume di gas originariamente in posto (GOIP) nel giacimento (regione 3).

I parametri di inizializzazione (pressioni, contatti e saturazioni iniziali) assegnati nel modello e i valori di GOIP sono riepilogati per ciascun livello nella tabella 4.

Tab. 4 – Parametri di inizializzazione

Livello (Regione)	p_i	datum	GWC _i	S _g iniziale	S _w iniziale	GOIP
	[barsa]	[m TVDss]	[m TVDss]	[%]	[%]	[10 ⁶ m _{sc} ³]
1	115	1011	0	0	100	0
2	115	1011	0	0	100	0
3	115	1011	1011	80	20	777.32 (*)

(*) valore di GOIP relativo al caso base A (geometria cartesiana con $L = 2000$ m)

2.7 Analisi parametriche

In fase di simulazione sono state effettuate diverse analisi parametriche su tutti quei parametri (oltre al tempo) che possono avere un impatto sull'entità e sull'evoluzione della diffusione:

- spessore della roccia di copertura: 1, 2, 3, 5 m;
- porosità della roccia di copertura: 5, 15, 25%;
- coefficiente di diffusione molecolare 0, 10⁻⁹, 10⁻⁸, 10⁻⁷, 10⁻⁶, 10⁻⁵ m²/giorno.

Lo spessore della roccia di copertura è stato fatto variare mantenendo fissa la profondità del *bottom* della *cap rock*, ovvero del *top* del giacimento (fig. 9), in modo da mantenere invariato il regime di pressione iniziale nella zona mineralizzata a gas (regione 3).

Il coefficiente di diffusione molecolare (D) è stato assegnato nel modello attraverso la *keyword* DIFFC che consente di specificare i dati che controllano la diffusione molecolare del gas in olio, impiegato nel modello pseudizzato per descrivere l'acqua. In particolare, sono stati definiti due distinti coefficienti di diffusione (con lo stesso valore):

1. coefficiente gas-acqua per diffusione con passaggio di fase (*cross phase diffusion*) che controlla il passaggio del gas dal giacimento, in cui si trova allo stato libero, alla roccia di copertura in cui entra in soluzione nell'acqua che satura il livello;
2. coefficiente gas-acqua per diffusione senza passaggio di fase che controlla la diffusione del gas disciolto nell'acqua all'interno della roccia di copertura e all'interno del livello poroso di monitoraggio superficiale.

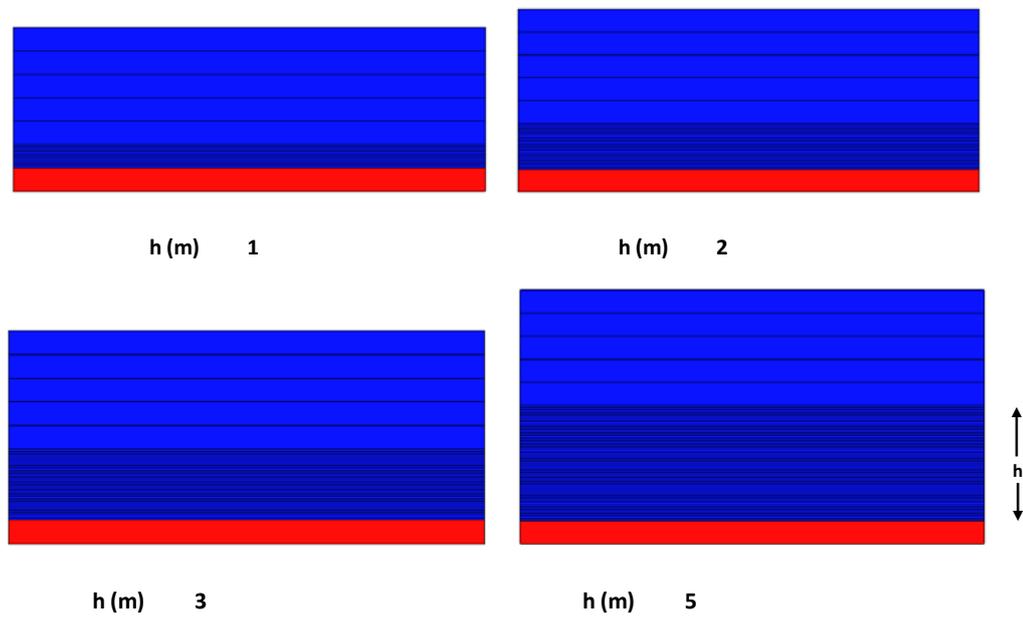


Fig. 9 – Spessore della roccia di copertura (cap rock).

La tabella 5 mostra uno schema riepilogativo con i parametri di input di tutte le simulazioni dinamiche effettuate per il caso base A (geometria cartesiana con $L = 2000$ m).

**Tab. 5 – Scenari di simulazione (caso base A)**

Scenario	Spessore roccia di copertura (h)	Porosità roccia di copertura (ϕ)	Coefficiente di diffusione
	[m]	[m TVDss]	[m ² /giorno]
A1	1	5	0
A2	1	5	10 ⁻⁹
A3	1	5	10 ⁻⁸
A4	1	5	10 ⁻⁷
A5	1	5	10 ⁻⁶
A6	1	5	10 ⁻⁵
A7	1	15	0
A8	1	15	10 ⁻⁹
A9	1	15	10 ⁻⁸
A10	1	15	10 ⁻⁷
A11	1	15	10 ⁻⁶
A12	1	15	10 ⁻⁵
A13	1	25	0
A14	1	25	10 ⁻⁹
A15	1	25	10 ⁻⁸
A16	1	25	10 ⁻⁷
A17	1	25	10 ⁻⁶
A18	1	25	10 ⁻⁵
A19	2	5	0
A20	2	5	10 ⁻⁹
A21	2	5	10 ⁻⁸
A22	2	5	10 ⁻⁷
A23	2	5	10 ⁻⁶
A24	2	5	10 ⁻⁵
A25	2	15	0
A26	2	15	10 ⁻⁹
A27	2	15	10 ⁻⁸
A28	2	15	10 ⁻⁷
A29	2	15	10 ⁻⁶
A30	2	15	10 ⁻⁵
A31	2	25	0
A32	2	25	10 ⁻⁹
A33	2	25	10 ⁻⁸



A34	2	25	10^{-7}
A35	2	25	10^{-6}
A36	2	25	10^{-5}
A37	3	5	0
A38	3	5	10^{-9}
A39	3	5	10^{-8}
A40	3	5	10^{-7}
A41	3	5	10^{-6}
A42	3	5	10^{-5}
A43	3	15	0
A44	3	15	10^{-9}
A45	3	15	10^{-8}
A46	3	15	10^{-7}
A47	3	15	10^{-6}
A48	3	15	10^{-5}
A49	3	25	0
A50	3	25	10^{-9}
A51	3	25	10^{-8}
A52	3	25	10^{-7}
A53	3	25	10^{-6}
A54	3	25	10^{-5}
A55	5	5	0
A56	5	5	10^{-9}
A57	5	5	10^{-8}
A58	5	5	10^{-7}
A59	5	5	10^{-6}
A60	5	5	10^{-5}
A61	5	15	0
A62	5	15	10^{-9}
A63	5	15	10^{-8}
A64	5	15	10^{-7}
A65	5	15	10^{-6}
A66	5	15	10^{-5}
A67	5	25	0
A68	5	25	10^{-9}
A69	5	25	10^{-8}
A70	5	25	10^{-7}
A71	5	25	10^{-6}
A72	5	25	10^{-5}

2.8 Risultati delle simulazioni

Le simulazioni sono state effettuate su una scala temporale geologica (circa 2.5 milioni di anni) in modo da valutare l'evoluzione dei fenomeni diffusivi su un arco temporale compatibile con la formazione dei giacimenti (la maggior parte dei giacimenti esauriti convertiti da Stogit S.p.A. allo stoccaggio del gas naturale risalgono infatti alle età Pliocenica e Pleistocenica). I risultati di dettaglio in termini di potenziali fughe di gas attraverso la roccia di copertura sono stati invece valutati su un intervallo temporale più ristretto, ovvero durante gli ultimi 200 anni, confrontabile con la scala temporale delle attività antropiche legate allo sfruttamento dei giacimenti impiegati per lo stoccaggio sotterraneo del gas naturale.

Allo scopo di valutare l'entità della diffusione molecolare sulle possibili perdite fisiologiche di gas dal giacimento attraverso la roccia di copertura, è stato stimato l'incremento del volume di gas che si verifica all'interno dello strato poroso di monitoraggio (Δ RGIP) rispettivamente negli ultimi 100 e 200 anni di simulazione; tale volume è stato poi rapportato al volume di gas in posto nel giacimento al termine della simulazione a scala temporale geologica (GOIP all'inizio delle attività antropiche) in modo da determinare la percentuale di gas in grado di attraversare per diffusione molecolare la roccia di copertura rispetto al volume iniziale contenuto in giacimento.

I risultati delle simulazioni fluidodinamiche in termini di Δ RGIP/GOIP in funzione del coefficiente di diffusione (per i diversi valori considerati di porosità e spessore della roccia di copertura) sono rappresentati graficamente nelle figg. 10 (risultati @ 100 anni) e 11 (risultati @ 200 anni). I risultati si riferiscono al caso base A (geometria cartesiana con $L = 2000$ m).

La tabella 6 mostra uno schema riepilogativo con i risultati in formato numerico @ 200 anni (frazione di gas che ha raggiunto per diffusione molecolare lo strato di monitoraggio superficiale dopo 200 anni).

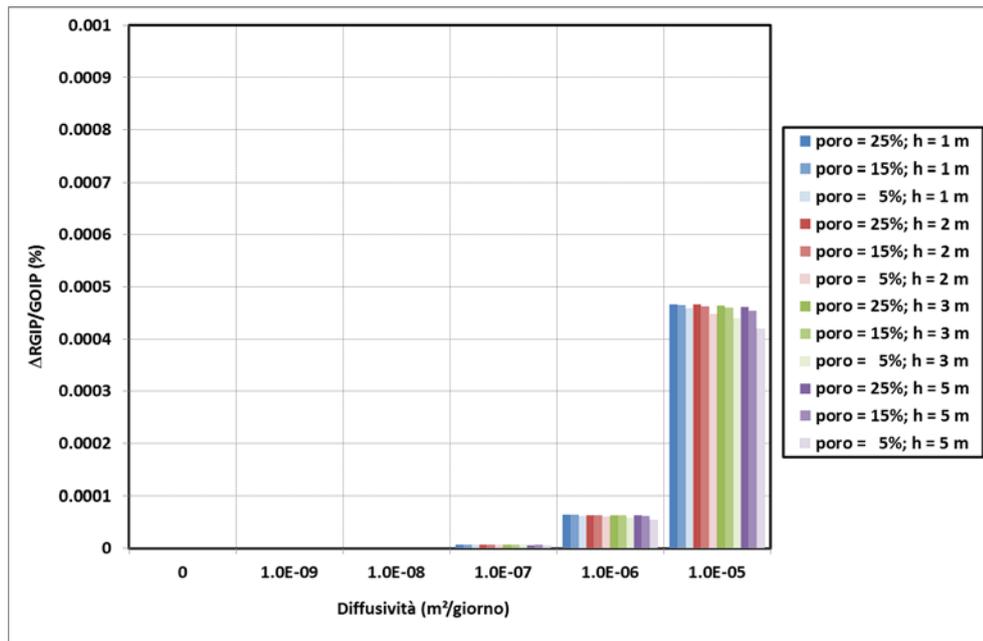


Fig. 10 – Frazione di gas che ha raggiunto per diffusione molecolare lo strato di monitoraggio superficiale dopo 100 anni (% rispetto al volume di gas inizialmente in posto in giacimento).

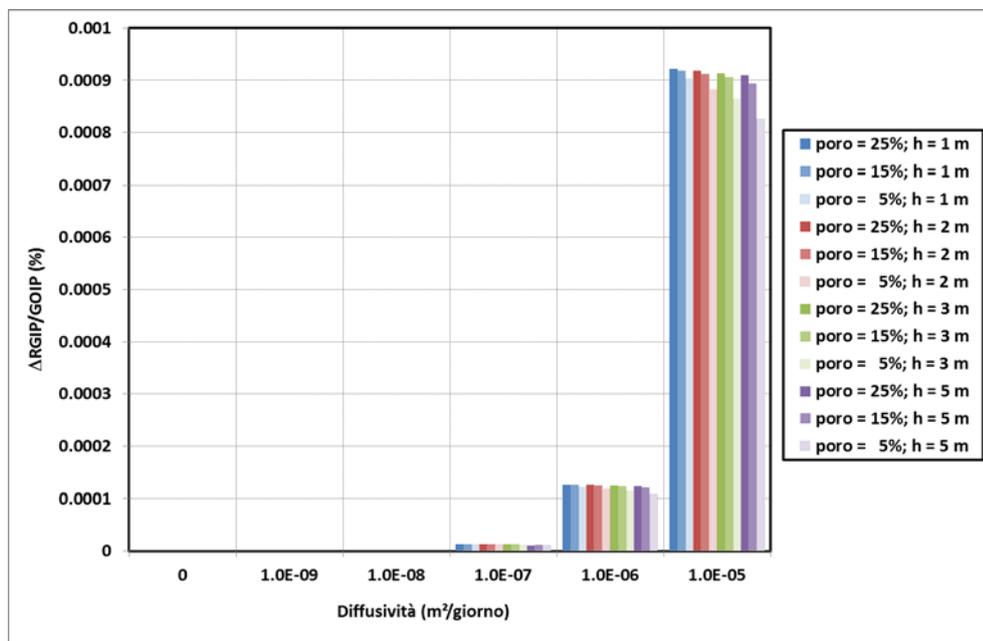


Fig. 11 – Frazione di gas che ha raggiunto per diffusione molecolare lo strato di monitoraggio superficiale dopo 200 anni (% rispetto al volume di gas inizialmente in posto in giacimento).



Tab. 6 – Risultati degli scenari di simulazione @ 200 anni (caso base A)

Scenario	GOIP giacimento @ inizio delle attività antropiche	Δ RGIP strato poroso di monitoraggio superficiale	Δ RGIP/GOIP
	[10 ⁶ msc ³]	[msc ³]	[%]
A1	777.32	0	0.00E+00
A2	777.18	0.34	4.43E-08
A3	776.87	9.77	1.26E-06
A4	775.75	97.9	1.26E-05
A5	764.84	935	1.22E-04
A6	678.36	6128	9.03E-04
A7	777.32	0	0.00E+00
A8	777.13	0.15	1.92E-08
A9	776.34	8.59	1.11E-06
A10	775.06	100.3	1.29E-05
A11	763.89	957	1.25E-04
A12	675.88	6200	9.17E-04
A13	777.32	0	0.00E+00
A14	777.12	0.09	1.22E-08
A15	776.04	7.0	9.02E-07
A16	774.38	100.7	1.30E-05
A17	763.17	961	1.26E-04
A18	674.91	6220	9.22E-04
A19	777.32	0	0.00E+00
A20	777.17	0.08	1.08E-08
A21	776.64	8.33	1.07E-06
A22	775.49	94.6	1.22E-05
A23	764.95	904	1.18E-04
A24	680.74	6008	8.83E-04
A25	777.32	0	0.00E+00
A26	777.13	0.03	4.43E-09
A27	776.02	5.72	7.37E-07
A28	774.11	99.3	1.28E-05
A29	763.07	946	1.24E-04
A30	675.93	6160	9.11E-04
A31	777.32	0	0.00E+00
A32	777.12	0.02	2.78E-09
A33	775.75	4.17	5.38E-07



A34	772.77	99.7	1.29E-05
A35	761.64	954	1.25E-04
A36	674.01	6190	9.18E-04
A37	777.32	0	0.00E+00
A38	777.17	0.01	1.72E-09
A39	776.53	6.22	8.01E-07
A40	775.25	91.5	1.18E-05
A41	765.04	876	1.15E-04
A42	682.98	5904	8.64E-04
A43	777.32	0	0.00E+00
A44	777.13	0.01	6.86E-10
A45	775.91	3.81	4.92E-07
A46	773.19	97.6	1.26E-05
A47	762.27	936	1.23E-04
A48	675.97	6120	9.05E-04
A49	777.32	0	0.00E+00
A50	777.12	0	4.28E-10
A51	775.66	2.69	3.47E-07
A52	771.29	96.75	1.25E-05
A53	760.14	947	1.25E-04
A54	673.12	6152	9.14E-04
A55	777.32	0	0.00E+00
A56	777.17	0	1.09E-11
A57	776.48	2.91	3.75E-07
A58	774.80	85.63	1.11E-05
A59	765.21	825	1.08E-04
A60	687.13	5680	8.27E-04
A61	777.32	0	0.00E+00
A62	777.13	0	4.16E-12
A63	775.86	1.65	2.12E-07
A64	771.59	91.06	1.18E-05
A65	760.73	916	1.20E-04
A66	676.04	6040	8.93E-04
A67	777.32	0	0.00E+00
A68	777.12	0	2.57E-12
A69	775.63	1.13	1.46E-07
A70	769.04	84.68	1.10E-05
A71	757.20	935	1.23E-04
A72	671.36	6104	9.09E-04

I risultati delle simulazioni indicano che i fenomeni diffusivi, ammesso che si siano verificati nel corso del tempo dopo la formazione dei giacimenti, hanno un impatto molto limitato e che l'entità del volume di gas che potrebbe essere perso in 200 anni nelle ipotesi più pessimistiche considerate (caso A18: spessore roccia di copertura pari a 1 m, porosità del 25% e coefficiente di diffusione molecolare pari a 10^{-5} m²/giorno) risulta inferiore allo 0.001% del volume di gas inizialmente in posto nel giacimento.

Lo spessore della roccia di copertura ha, come atteso, un impatto non trascurabile nel ritardare, ovvero nel ridurre a parità di intervallo temporale, l'entità delle perdite di gas per diffusione. La porosità della roccia di copertura ha invece un impatto più limitato: la porosità determina il volume di fluido (acqua) in cui il gas può potenzialmente diffondere.

L'effetto più drastico sull'entità delle perdite di gas è però legato, come ovvio, al coefficiente di diffusione molecolare, D . Si fa notare che i risultati delle simulazioni con coefficiente di diffusione molecolare pari a 10^{-5} m²/giorno (valore che compete tipicamente alle argille superficiali e non alle argilliti che costituiscono la roccia di copertura dei giacimenti) devono essere considerati non realistici in quanto la simulazione a scala temporale geologica evidenzia che una diffusione di tale entità provocherebbe una variazione significativa della pressione originaria del giacimento, ovvero la pressione scenderebbe al di sotto del valore idrostatico a cui invece tipicamente è rinvenuto il gas. A titolo di esempio, nella fig. 12 si riporta un grafico con l'evoluzione temporale della pressione media di giacimento (regione 3) nei 2.5 milioni di anni simulati per gli scenari A13÷A18 (in funzione del coefficiente di diffusione).

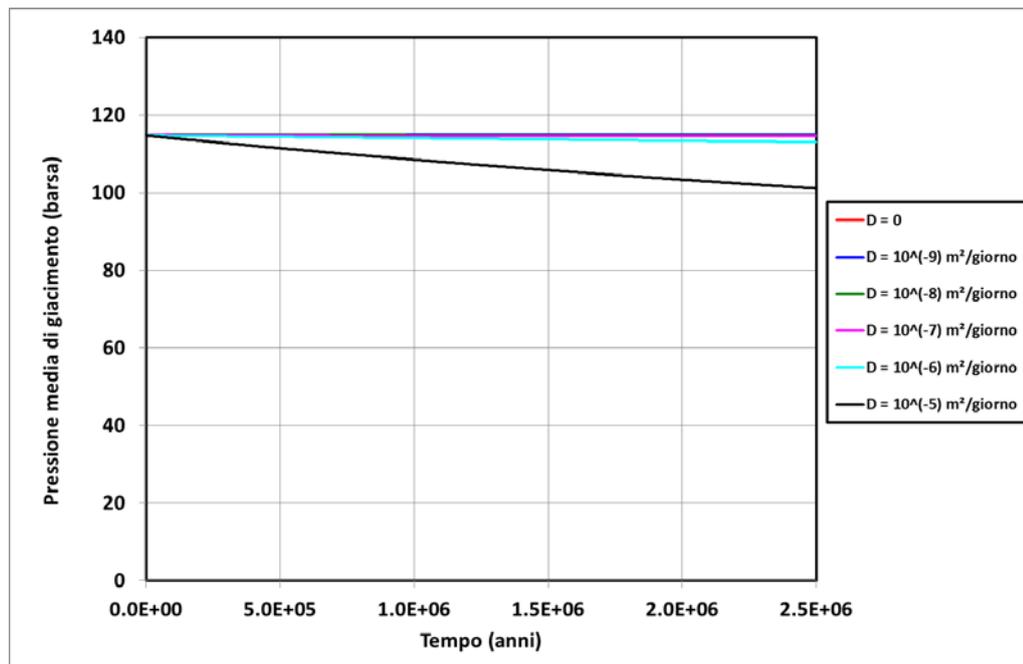


Fig. 12 – Evoluzione temporale della pressione di giacimento a scala temporale geologica in funzione del coefficiente di diffusione.

Il grafico evidenzia una *depletion* di circa 14 bar nel caso di coefficiente di diffusione molecolare pari a 10^{-5} m²/giorno. Se tale variazione di pressione fosse verosimile, nessun giacimento potrebbe trovarsi in regime di pressione idrostatica.

Sulla base di tali considerazioni si ritiene che non si debbano prendere in considerazione i risultati associati ad un coefficiente di diffusione superiore a 10^{-6} m²/giorno. Quindi la combinazione realisticamente più pessimistica (caso A17: spessore roccia di copertura pari a 1 m, porosità del 25% e coefficiente di diffusione molecolare pari a 10^{-6} m²/giorno) il volume di gas che potrebbe essere perso in 200 anni risulta inferiore allo 0.00015% del volume di gas inizialmente in posto nel giacimento.

2.9 Tipologia di modello ed effetto scala

Sono state effettuate delle simulazioni addizionali sullo scenario realisticamente più pessimista del caso Base (A17) variando sia la geometria del modello che la dimensione areale:

- caso A17 (base): geometria cartesiana con L = 2000 m;
- caso B17: geometria cartesiana con L = 100 m;
- caso C17: geometria radiale con r = 1000 m;
- caso D17: geometria radiale con r = 50 m.

La tabella 7 mostra un riepilogo dei risultati delle simulazioni addizionali in termini di Δ RGIP/GOIP @ 200 anni.

Tab. 7 – Simulazioni addizionali: geometria ed effetto scala

Scenario	Geometria	L, r	GOIP giacimento (*)	Δ RGIP strato di monitoraggio	Δ RGIP/GOIP
		[m]	[10 ⁶ m _{sc} ³]	[m _{sc} ³]	[%]
A17 (base)	cartesiana	2000	763.17	961	1.26E-04
B17	cartesiana	100	1.91	2.40	1.26E-04
C17	radiale	1000	599.39	755	1.26E-04
D17	radiale	50	1.50	1.89	1.26E-04

(*) valore di GOIP @ inizio delle attività antropiche



Le simulazioni effettuate dimostrano che i risultati, se espressi in termini di frazione di gas che ha raggiunto per diffusione molecolare lo strato di monitoraggio superficiale rispetto al volume di gas inizialmente in posto in giacimento, non dipendono né dalla geometria del modello né dall'effetto scala, ovvero dal volume del giacimento stesso, e che pertanto hanno validità di carattere generale.

3 BIBLIOGRAFIA

- Bird B. R., Stewart W. E., Lightfoot E. N., 1979: "Fenomeni di trasporto", a cura di Enzo Sebastiani, Milano, Casa editrice ambrosiana, 1979, ISBN 88-408-0051-4.
- Crank J., 1980: "The Mathematics of Diffusion", Oxford University Press (1980).
- Crooks V. E., Quigley R. M., 1984: "Saline Leachate Migration through Clay: A Comparative Laboratory and Field Investigation". *Can. Geotech. J.*, 21, no. 2, pp. 349-362.
- Desaulniers D. E., Cherry J. A., Fritz P., 1982: "Origin, Age, and Movement of Pore Water in Argillaceous Quaternary Deposits at Four Sites In Southwestern Ontario". *Journal of Hydrology*, 50, no. 1-3, pp. 231-257.
- Desaulniers D. E., Kaufman R. S., Cherry J. A., Bentley H. W., 1986: "³⁷Cl-³⁵Cl Variations in a Diffusion-Controlled Groundwater System". *GEOchimica et Cosmochimica Acta*. Oxford, England, 50, no. 8, 1757-1764.
- Goodall D. C., Quigley R. M., 1977: "Pollutant migration from Two Sanitary Landfill Sites near Sarnia, Ontario". *Can. Geotech. J.*, 14, no. 2, pp. 223-236.
- Johnson R. L., Cherry J. A., Pankow J. F., 1989: "Diffusive Contaminant Transport in Natural Clay: A Field Example and Implications for Clay-Lined Waste Disposal Sites". *J. Envir. Science and Tech.*, 23, no. 3, pp. 340-349.
- Manassero M., Shackelford C. D., 1994: "The role of diffusion in contaminant migration through soil barriers", *ITALIAN GEOTECHNICAL JOURNAL (Rivista Italiana di Geotecnica R.I.G.)*.
- Manassero M., Sani D., Pasqualini E., Shackelford C. D., 1996: "Diffusion and sorption parameters of a natural clay and a processed kaolin", *Il International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka '96, Osaka (Japan), November, 5-8, 1996*. pp. 269-274.
- Politecnico di Torino – PEG (Gennaio 2007): "CAMPO DI SAN SALVO – Concessione Fiume Treste – Livello C2: MODELLO STATICO ED ANALISI DEL COMPORTAMENTO DINAMICO PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLA GESTIONE OPERATIVA".
- Politecnico di Torino - PEG e STOGIT (Maggio 2012): "CAMPO DI SAN SALVO – Concessione Fiume Treste – Livello C2: MODELLO DINAMICO 3D".



- Quigley R. M., Rowe R. K., 1986: "Leachate Migration through Clay below a Domestic Waste Landfill, Sarnia, Ontario, Canada: Chemical Interpretation and Modelling Philosophies". Hazardous and Industrial Solid Waste Testing and Disposal, STP 933, Lorenzen et al. Eds, ASTM, Philadelphia, Pa., 93-103.
- Quigley R. M., Yanful E. K., Fernandez F., 1987: "Ion Transfer by Diffusion through Clayey Barriers". Geotechnical Practice for Waste Disposal, Special Publication No. 13, R.D. Woods, ASCE, New York, N.Y., 137-158.
- Schlumberger – Geoquest © (2014), ECLIPSE Technical Description.
- Schlumberger – Geoquest © (2014), ECLIPSE Reference Manual.
- Shackelford C. D., 1991: "Laboratory Diffusion Testing for Waste Disposal – A Review". Journal of Contaminant Hydrology, Elsevier Publ., Amsterdam, 7, pp. 177-217.
- Shackelford C. D., Daniel D. E., 1991: "Diffusion in Saturated Soil". I.: Background J. Geotech. Engng. Am. Soc. Civ. Engrs. 117, no. 3, 467-484.