m_amte.DVA.REGISTRO UFFICIALE.I.0026983.28-11-2018

Raffineria di Milazzo S.C.p.A.

Riferimenti da citare nella risposta
Prot. 100/DIRGE/PM/ab

Milazzo, 28/11/2018

Inviata via PEC

Spett.le
Istituto Superiore per la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48
00144 ROMA

Spett.le
ARPA Sicilia
Dipartimento Provinciale Messina
Via G. La Farina, is. 105
98123 MESSINA

e p.c.

Spett.le
Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
Direzione Generale per le Valutazioni Ambientali
Via Cristoforo Colombo, 44
00147 ROMA

Oggetto: Autorizzazione Integrata Ambientale rilasciata alla Raffineria di Milazzo S.C.p.A con decreto n. DEC-MIN-0000172 del 11/05/2018 – Trasmissione dello studio sul comportamento fluidodinamico degli oli combustibili con viscosità maggiore di 12°E a 50 °C

In relazione a quanto dettato dal punto 113bis del cap. 13.9 del Parere Istruttorio Conclusivo del decreto AIA RAM in epigrafe, si invia, allegato alla presente, lo studio commissionato da ENI e condotto dal Politecnico di Milano sul comportamento fluidodinamico degli oli combustibili con viscosità maggiore di 12°E a 50 °C.

In riferimento ai contenuti dello stesso si fa presente che le caratteristiche chimico-fisiche degli oli combustibili e dei suoli ove insistono i serbatoi di stoccaggio atmosferico della Raffineria di Milazzo rientrano nelle assunzioni fatte ai cap. 5.1 e 5.2 dello studio.

Distinti saluti
Raffineria di Milazzo S.C.p.A.
Il Direttore Generale
Ing. Pietro Maugeri

Allegato c.s.

Raffineria di Milazzo S.C.p.A.
Società Consortile per Azioni con Sede legale in Milazzo (ME) 98057 Contrada Mangiavacca
Capitale Sociale € 171.143.000,00 interamente versato
Codice Fiscale, Partita IVA e C.C.I.A.A. di Messina: 04966251003 R.E.A. N. 171213
Casella Postale N. 178, Telefax: 090 9232200, Telefono: 090 9232.1 (sel. passante)
PEC: raffineriadimilazzo@legalmail.it

FUORIUSCITA DI OLII AD ALTA VISCOSITÀ DA SERBATOI

Modellazione fluidodinamica multifase

CMIC Politecnico di Milano - ENI

A. Cuoci, T. Faravelli, A. Frassoldati, M. Mehl
CRECK Modeling Lab @ Politecnico di Milano

L'attività in oggetto ha avuto come obiettivo quello di studiare, attraverso delle simulazioni fluidodinamiche, la perdita di olii ad alta viscosità da serbatoi industriali attraverso fessure accidentali presenti sul fondo degli stessi. In particolare, l'interesse principale si è rivolto alla stima dei tempi di evoluzione della perdita all'interno del terreno in funzione delle caratteristiche degli olii (principalmente viscosità e densità) e delle caratteristiche del terreno sottostante (considerato come mezzo poroso e caratterizzato da una assegnata permeabilità). Una successiva fase del lavoro terrà conto delle dimensioni e della forma delle fessure, del battente di liquido, nonché di fuoriuscite da fessure laterali dei serbatoi.

La ricerca è stata suddivisa nelle seguenti attività:

1. Definizione di un opportuno modello fluidodinamico in gravo di descrivere, ad un costo computazionale relativamente ridotto, le perdite di olii pesanti dal fondo di serbatoi industriali all'interno del terreno sottostante, modellato come un mezzo poroso isotropico
2. Implementazione del modello fluidodinamico all'interno del framework open-source OpenFOAM
3. Messa a punto dei parametri numerici del modello (scelta del passo temporale ottimale, discretizzazioni spaziali, individuazione delle tolleranze assolute e relative, ecc.) e analisi di sensitività alla viscosità dell'olio e alla permeabilità del terreno e individuazione dei parametri fisici di maggiore importanza per l'evoluzione temporale e spaziale della perdita
4. Applicazione del modello a una coppia di olii newtoniani di interesse per ENI e caratterizzati dal punto di vista reologico dalla *Stazione Sperimentale dei Combustibili* di INNOVHUB.

Questo documento riassume l'attività svolta.

Sommario

1. Introduzione 7
2. Definizione del modello fluidodinamico 8
2.1. Definizione dello scenario tipo 9
2.2. Descrizione della metodologia VOF (Volume of Fluid) 12
2.3. Trattamento del terreno come mezzo poroso 18
2.4. Profilo termico all'interno del terreno 19
3. Implementazione in OpenFOAM 20
3.1. OpenFOAM 20
3.2. Il solver porousInterFoam 21
3.3. Creazione di un fluido newtoniano a viscosità variabile 21
3.4. Schemi numerici adottati 22
4. Test preliminari e analisi di sensitività 22
4.1. Condizioni isoterme: sensitività alla viscosità e alla permeabilità del terreno 23
4.2. Condizioni isoterme: sensitività al battente di liquido 24
4.3. Condizioni isoterme: stima short-cut della portata volumetrica dello sversamento 25
4.4. Condizioni non isoterme: sensitività alla permeabilità del terreno 26
4.5. Adimensionalizzazione dei profili temporali di penetrazione della perdita nel terreno 27
4.6. Analogia permeabilità-viscosità 27
5. Applicazione del modello ai campioni di olio forniti da ENI 28
5.1. Descrizione/caratterizzazione degli olii di riferimento 28
5.2. Individuazione/caratterizzazione di terreni di riferimento 30
5.3. Evoluzione temporale dei profili di penetrazione in tre diverse tipologie di terreno: olio 2096 31
5.4. Evoluzione temporale dei profili di penetrazione in tre diverse tipologie di terreno: olio 2094 31
5.5. Confronto relativo tra olio 2096 e olio 2094 31
5.6. Fitting dei profili ed estrapolazione nel tempo 32
6. Serbatoi su soletta in calcestruzzo 33
7. Conclusioni 34
8. Riferimenti bibliografici 35
9. Lista delle Tabelle 37

10. Lista delle Figure 42

1. Introduzione

Lo scopo dell'attività presentata in questo documento è la determinazione dell'evoluzione dell'impregnazione di un suolo contaminato dalla fuoriuscita incontrollata di oli di viscosità medio/alta da serbatoi di stoccaggio. Il lavoro complessivo ha un ampio respiro dovendo analizzare diversi tipi di possibili fessurazioni, sia per forma, che per dimensione, che per posizione (sul fondo o laterale), diversi tipi di olio, differenti conformazioni del suolo. Questo primo rapporto si riferisce ai primi due mesi di attività, durante i quali è stato definito l'approccio modellistico da utilizzare, il tipo di discretizzazione del campo di indagine, come descrivere il terreno, sulla base di alcune assunzioni e delle informazioni reperibili, lo sviluppo del codice di calcolo di tipo fluidodinamico computazionale (CFD) e i risultati preliminari in alcune configurazioni base. Occorre sottolineare come i tempi di calcolo richiesti per un'analisi così accurata sono piuttosto elevati, anche per un codice completamente parallelizzato come quello messo a punto, andando da giorni a settimane a secondo dell'esempio investigato. Da ultimo è importante mettere in evidenza che i tempi relativamente stretti non hanno consentito un'indagine dettagliata riguardanti le assunzioni fatte e descritte in seguito, nonché una convalida del modello nei confronti di dati sperimentali di laboratorio. Queste ulteriori attività sono state programmate e saranno parte dei successivi sviluppi. Così come è in corso di sviluppo presso la *Stazione Sperimentale dei Combustibili* di INNOVHUB la messa a punto di un impiantino di laboratorio in grado di fornire misure di impregnazione di surrogati di suoli diversi, al fine di verificare l'attendibilità dei modelli proposti.

In particolare, questa prima parte del lavoro si riferisce a possibili perdite determinatesi per fratturazioni alla base del serbatoio, condizionate quindi fortemente dalla sovrappressione dovuta al battente di olio contenuto nel serbatoio stesso e considerato costante. Tale assunzione risulta da un lato ragionevole, data la continua immissione/estrazione di olio e dall'altro ovviamente conservativa, in quanto la pressione agente risulta sempre massima. Si è ipotizzato la presenza di una fessura di forma circolare sul fondo di un serbatoio di forma cilindrica. La fessura è stata immaginata esattamente al centro del serbatoio. Tali ipotesi semplificative hanno un importante vantaggio dal punto di vista computazionale: consentono infatti di adottare una descrizione bi-dimensionale (2D) con simmetria cilindrica. I suoli sono stati definiti sempre attraverso la loro permeabilità, il cui valore è stato ricavato da correlazioni di letteratura, come descritto successivamente. Le proprietà degli oli, con particolare riferimento alla loro viscosità, funzione della temperatura, sono state misurate presso *Stazione Sperimentale dei Combustibili* di INNOVHUB.

La dispersione di oli nel terreno è oggetto di attenzione a causa del potenziale inquinante con contaminazione dei terreni e delle eventuali falde acquifere sotterranee.

Dal punto di vista concettuale, l'infiltrazione di oli nel suolo è il risultato di tre forze motrici: la forza di gravità, l'eventuale pressione dovuta a un battente sovrastante e, infine, la capillarità (Miller, 1977), il cui effetto relativo dipende dal tipo di olio e di suolo nonché dalle condizioni al contorno, in particolare dalla presenza (serbatoio) o meno (pozza) di una significativa quantità di olio posto superiormente alla

zona di rilascio. Contestualmente la possibile evaporazione dell'olio può parzialmente ridurre tempi e quantità di infiltrazione.

Dato il tipo di problema, la presenza di un battente di oltre 10 metri e le scale temporali decisamente diverse, in questa prima parte dell'attività si è assunto trascurabile l'effetto di capillarità. Tale assunzione verrà successivamente investigata, anche se la letteratura sembra supportare la semplificazione introdotta (Kao & Hunt, 2001). Inoltre, con lo scopo di semplificare il problema e considerando che gli oli investigati sono sufficientemente pesanti, si è trascurato il contributo evaporativo. In questo caso, l'assunzione è conservativa (in quanto la perdita di composti leggeri determina in generale un incremento della viscosità con conseguente riduzione dell'infiltrazione) e quindi non verrà successivamente investigata.

2. Definizione del modello fluidodinamico

La descrizione fluidodinamica della perdita di olio all'interno del terreno richiede l'adozione di un cosiddetto *modello a due fluidi*. Nel modello a due fluidi, la fase liquida (nel presente studio l'olio all'interno del serbatoio in grado di penetrare nel terreno a causa di eventuali fessure sul fondo del serbatoio stesso) e la fase gassosa (ovvero l'aria che circonda il serbatoio e quella presente all'interno del terreno) vengono descritte mediante equazioni di conservazione in forma Euleriana. Tale modello prende perciò l'appellativo di modello Euleriano-Euleriano (in cui ogni fase viene considerata come un continuo) e quindi è capace di risolvere qualsiasi tipo di flusso, sia esso disperso, intermedio o separato, in quanto la topologia del flusso non ha bisogno di essere prescritta *a priori*. La perdita di informazioni dovuta al processo di mediazione operato dal modello comporta l'utilizzo di termini addizionali nell'equazione di bilancio di quantità di moto mediata. Il modello a due fluidi, per definizione, è di tipo *two-way coupling* ed è quindi, tra tutti i metodi, il più adatto a descrivere i fenomeni in cui la fase dispersa è elevata, in particolar modo nelle applicazioni ingegneristiche.

Nel modello a due fluidi la posizione dell'interfaccia tra i due fluidi è calcolata come parte della soluzione della procedura di calcolo, poiché il metodo utilizzato è di tipo Euleriano-Euleriano completo. Le tecniche più comunemente utilizzate a questo scopo sono tre (rappresentate in **Figura 1**):

- *tracciamento dell'interfaccia*: l'interfaccia viene descritta come la linea interpolante di una serie di marker particles immerse nel fluido, la posizione delle quali viene calcolata ad ogni intervallo di tempo;
- *griglia mobile*: la griglia di calcolo viene mossa in modo da seguire l'interfaccia oppure può essere eseguito un re-meshing del dominio ad ogni iterazione della procedura risolutiva;
- *tracciamento del volume*: l'interfaccia non è definita come un contorno netto, bensì i due fluidi sono tracciati attraverso una funzione indicatrice, che in ogni cella dia indicazione della presenza di uno o dell'altro fluido.

I primi due metodi preservano la netta posizione dell'interfaccia, allo scopo di ottenere una maggior precisione nel calcolo della soluzione nelle celle limitrofe e delle forze scambiate attraverso di essa. Il metodo di tracciamento dell'interfaccia ha inoltre il vantaggio di poter utilizzare una diversa risoluzione per interfaccia e campo di moto. E' comunque consigliabile non sceglierle troppo differenti, in modo da risolvere adeguatamente i moti che influenzano la superficie libera. Per contro, con entrambi i metodi è complicato trattare grandi deformazioni e ancor più i casi di rottura dell'interfaccia o di compenetrazione tra più interfacce. Inoltre il metodo di tracciamento dell'interfaccia ha il grave svantaggio di non garantire la conservazione del volume di ogni fluido, caratteristica che invece può essere ottenuta utilizzando gli altri due metodi con opportuni accorgimenti (Vitucci, 2013).

Nei metodi a tracciamento del volume uno dei maggiori problemi da affrontare riguarda la corretta convezione dell'interfaccia, evitando di diffonderla e introdurre effetti non fisici. Nel caso particolare di utilizzo della *frazione di volume* γ come indicatore, è necessario che essa rimanga confinata tra 0 e 1. I metodi di tipo **Volume-Of-Fluid (VOF)** usano schemi convettivi che ricostruiscono l'interfaccia a partire dalle frazioni di volume prima di farla avanzare. Per quanto riguarda la tensione superficiale, i primi due metodi (tracciamento dell'interfaccia e griglia mobile), preservando la forma netta dell'interfaccia, ne calcolano gli effetti direttamente. Il metodo a tracciamento del volume, invece, ricorre ad algoritmi più complessi. Nell'approccio considerato nella presente indagine viene impiegata la formulazione di tipo *Continuum Surface Force (CSF)* proposta da Brackbill et al. (Brackbill, Kothe, & Zemach, 1992).

Nel presente lavoro si è scelto di utilizzare il metodo a tracciamento di volume VOF, con indicatore la frazione di volume della fase liquida (ovvero l'olio).

2.1. Definizione dello scenario tipo

L'analisi fluidodinamica oggetto della presente relazione è stata condotta su uno scenario tipico secondo quanto riportato in **Figura 2** e sintetizzato nel seguito.

Si è innanzitutto ipotizzata la presenza di una fessura di forma circolare sul fondo di un serbatoio di forma cilindrica. La fessura è stata immaginata esattamente al centro del serbatoio. Tali ipotesi semplificative hanno un importante vantaggio dal punto di vista computazionale: consentono infatti di adottare una descrizione bi-dimensionale (2D) con simmetria cilindrica. La riduzione dei tempi di calcolo, rispetto ad una simulazione tridimensionale (a parità di accuratezza, ovvero di dimensione caratteristica delle celle di calcolo adottate) risulta significativa, pari almeno ad un ordine di grandezza. L'impatto delle assunzioni prese in considerazione sui risultati selle simulazioni e sui risultati finali dell'attività è minimo: in particolare, l'aver posizionato la fessura esattamente sull'asse del serbatoio, piuttosto che in una posizione diversa, non conduce ad una dinamica di penetrazione della perdita all'interno del terreno diversa, secondo quanto dimostrato da alcune simulazioni preliminari bi-dimensionali (condotte su una simmetria planare per semplicità). Solo nel caso di un terreno estremamente permeabile (paragonabile

a sabbia grossolana) e fessura in prossimità del bordo del fondo del serbatoio è possibile registrare una dipendenza dell'evoluzione dello sversamento dalla posizione della fessura. Si tratta tuttavia di casi di scarso interesse, dal momento che è difficile immaginare la costruzione di un serbatoio industriale su un terreno sabbioso. Si segnala inoltre che aver posizionato la perdita nella zona centrale della base del serbatoio corrisponde ad una situazione tendenzialmente più critica in quanto di più difficile individuazione, rispetto ad una localizzata vicino al perimetro esterno, anche attraverso ispezioni visive o strumentali condotte esternamente al serbatoio. Anche la forma della fessura non è particolarmente importante nella determinazione della velocità di penetrazione dell'olio all'interno del terreno. Come è facile immaginare, di maggiore importanza è invece l'area della fessura (ovvero il diametro della stessa nel caso di fessura circolare).

La massa di olio all'interno del serbatoio non è stata modellata direttamente, ma sulla superficie che rappresenta la fessura si è imposto un valore di pressione coerente con il battente di liquido di interesse. Si è ritenuto cioè che le dimensioni del serbatoio (paragonate a quella della fessura) e i tempi caratteristici di penetrazione (ovvero di fuoriuscita dell'olio) fossero sufficientemente grandi da rendere superflua la descrizione della dinamica dell'olio all'interno del serbatoio stesso. In altri termini, dal momento che anche nelle condizioni peggiori (cioè quelle di massima fuoriuscita dell'olio dal pozzo) le velocità dell'olio all'interno del serbatoio rimangono estremamente piccole (frazioni di millimetri al secondo), si può semplificare la descrizione dell'olio nel serbatoio immaginando che questo sia in condizioni statiche. Anche in questo caso il risparmio in termini di tempo di calcolo risulta estremamente significativo.

Il terreno è stato modellato come un pezzo poroso isotropico, a permeabilità assegnata, eventualmente variabile con la profondità. A causa delle limitate informazioni relative ai terreni di interesse, non è stato possibile ricostruire eventuali comportamenti anisotropici degli stessi. Inoltre, sempre a causa della scarsa caratterizzazione dei terreni, non è stato possibile stimarne i fattori di resistenza inerziale, che sono stati assunti per semplicità pari a zero. E' tuttavia ragionevole, viste le piccolissime velocità di penetrazione degli olii all'interno del terreno, che tale semplificazione abbia un impatto trascurabile sulle simulazioni.

In una prima fase si è immaginato un terreno a temperatura costante e uniforme. Successivamente, tale ipotesi è stata rimossa e si è invece imposto un profilo termico variabile con la profondità, secondo quanto descritto nel paragrafo 2.4. L'introduzione di un profilo termico consente di descrivere con maggiore fedeltà le condizioni del terreno al di sotto dei serbatoi oggetti di indagine. In effetti, gli olii ad alta viscosità contenuti al loro interno vengono tipicamente mantenuti ad una temperatura sufficientemente più alta di quella dell'ambiente allo scopo di garantirne una minima fluidizzazione. Di conseguenza è ragionevole ipotizzare che gli strati di terreno a contatto con il fondo del serbatoio possano essere ad una temperatura elevata, paragonabile a quella a cui viene tenuto il serbatoio stesso. Scendendo lungo il terreno ci si aspetta una diminuzione progressiva della temperatura. A causa delle basse velocità di fuoriuscita dell'olio, per semplicità si è assunto che la temperatura dell'olio penetrato all'interno del terreno sia sempre uguale a quella del terreno stesso nella medesima posizione.

Per tutti gli olii studiati si è sempre assunto un comportamento Newtoniano. Le prove sperimentali effettuate presso la *Stazione Sperimentale dei Combustibili* hanno confermato questa ipotesi, anche per gli olii più pesanti e viscosi. Il modello fluidodinamico sviluppato è tuttavia estremamente flessibile e in grado di descrivere anche liquidi a comportamento reologico diverso (Bird-Carreau, Power-law, Herschel-Bulkley, Casson), purché ovviamente caratterizzati in termini di parametri fenomenologici.

La densità degli olii oggetto di indagine è stata assunta costante e pari a un valore medio, stimato ad una temperatura di circa 40-50°C, secondo le informazioni sperimentali comunicate dalla *Stazione Sperimentale dei Combustibili*. Non è stato purtroppo possibile costruire una legge di dipendenza della densità dalla temperature a causa della limitata caratterizzazione sperimentale degli olii.

Per la viscosità degli olii si è invece tenuto conto della dipendenza dalla temperatura. A differenza della densità infatti, per la viscosità si sono resi disponibili dati a sufficienza per l'individuazione di leggi semi-empiriche in grado di consentire la stima della viscosità come funzione della temperatura. Sulla base dei dati disponibili, è stato possibile osservare come la viscosità possa variare anche di due ordini di grandezza nell'intervallo di temperature di interesse (tra 15°C e 80°C). Per la densità, la variazione massima è dell'ordine del 10%, cosa che giustifica la semplificazione fatta a cui si è accennato sopra.

Grazie alla semplificazione di geometria bidimensionale a simmetria cilindrica, è stato possibile utilizzare una griglia (mesh) di calcolo completamente strutturata, costituita da celle rettangolari a passo non uniforme. In particolare, si sono utilizzati degli opportuni fattori di stretching sia lungo la direzione orizzontale, che lungo quella verticale. In prossimità della fessura, le dimensioni tipiche dei lati delle celle sono circa 1/10 del diametro della fessura, così da garantire una buona accuratezza della simulazione stessa.

In sintesi, ecco le principali assunzioni/semplificazioni comuni a tutti gli scenari simulati:

- geometria bidimensionale a simmetria cilindrica (serbatoio cilindrico, fessura circolare posizionata sull'asse del serbatoio);
- assenza di modellazione del fluido all'interno del serbatoio, ma imposizione di un battente di liquido sulla superficie della fessura;
- terreno modellato come mezzo poroso isotropico con profilo di temperatura assegnato;
- comportamento reologico degli olii assunto come Newtoniano;
- densità degli olii costante (cioè indipendente dalla temperatura);
- viscosità degli olii variabile (funzione della temperatura, secondo leggi semi-empiriche, basate su misurazione sperimentali effettuate dalla *Stazione Sperimentale dei Combustibili*);
- temperatura dell'olio nel terreno pari a quella del terreno nella stessa posizione.

2.2. Descrizione della metodologia VOF (Volume of Fluid)

Il metodo VOF (Volume of Fluid) è stato presentato per la prima volta da Hirt e Nichols (Hirt & Nichols, 1981) e dalla sua introduzione è diventato una delle tecniche standard (o comunque di maggior successo) per la modellazione fluidodinamica dei flussi multifase. Il metodo VOF si basa sulla definizione di un cosiddetto *indicatore*, che consente di sapere se una cella di calcolo è occupata da una fase o dall'altra o da una miscela di entrambe e in che proporzione. Esistono diverse modalità che possono essere prese in considerazione per formulare matematicamente il metodo VOF. Nel seguito si farà riferimento al modello VOF proposto da Ubbink (Ubbink, 1997) e Rusche (Rusche, 2002), e descritto in dettaglio da Berberovic et al. (Berberovic, Van Hinsberg, Jakirlic, Roisman, & Tropea, 2009). La scelta è stata fatta dal momento che tale modello, per le sue caratteristiche e la sua formulazione, è quello che meglio si adatta ad una implementazione all'interno del framework open-source OpenFOAM (Weller, Tabor, Jasak, & Fureby, 1998).

Nel metodo VOF convenzionale (Hirt & Nichols, 1981) si introduce una equazione di trasporto dedicata alla cosiddetta funzione indicatore, che rappresenta la frazione volumetrica di una delle due fasi presente all'interno della cella di calcolo in cui è stato suddiviso il dominio computazionale:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \mathbf{v}) = 0 \tag{2}$$

Tale equazione viene risolta assieme all'equazione di continuità (o conservazione della massa) e all'equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}\mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{f} \tag{4}$$

Nelle equazioni sopra riportate, $\mathbf{v}$ rappresenta il vettore velocità condiviso dalle due fasi, γ è la funzione indicatore, $\mathbf{T}$ è il tensore degli sforzi viscosi, ρ è la densità, p la pressione e $\mathbf{f}$ le forze esterne per unità di massa. In particolare:

$$\mathbf{T} = 2\mu \mathbf{S} - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I} \tag{5}$$

dove μ è la viscosità, $\mathbf{I}$ la matrice identita' e $\mathbf{S}$ il tensore delle velocità di deformazione:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) \tag{6}$$

Nel contesto del metodo VOF, le forze esterne $\mathbf{f}$ includono la gravità e la tensione superficiale all'interfaccia di separazione tra le due fasi.

La frazione γ può assumere valori compresi all'interno dell'intervallo $0 - 1$. Tipicamente, si assume che $\gamma = 0$ indichi la presenza si sola fase gassosa, mentre $\gamma = 1$ la presenza di sola fase liquida. Le celle in prossimità dell'interfaccia di separazione possono assumere valori intermedi, pari alla frazione

volumetrica della fase liquida (nel caso in cui la convenzione riportata sopra sia stata presa in considerazione). Di conseguenza, ci si aspetta di trovare gradienti di γ solo nelle zone in prossimità delle interfacce.

Il punto chiave della metodologia VOF consiste nel considerare la miscela dei due fluidi come un unico fluido all'interno di tutto il dominio di calcolo. Le proprietà di tale fluido vengono calcolate come media pesata sulla frazione volumetrica dei due fluidi (gassoso e liquido):

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_l \gamma + \rho_g (1-\gamma) \\ \mu &= \mu_l \gamma + \mu_g (1-\gamma) \end{aligned} \tag{7}$$

dove i pedici l e g indicano rispettivamente le proprietà della fase liquida e della fase gassosa. Ovviamente, nelle regioni occupate da uno solo dei due fluidi, le proprietà della miscela saranno identiche a quelle dell'unico fluido presente. Soltanto in corrispondenza dell'interfaccia, ovvero in quelle celle di calcolo dove la variabile indicatore γ assume valori intermedi tra 0 e 1 si avranno proprietà medie.

Uno degli aspetti di maggiore criticità nelle simulazioni basate sulla tecnica VOF è rappresentata dalla conservazione della massa, ovvero dalla conservazione della variabile γ. Questo è particolarmente importante nei casi in cui esiste una differenza molto significativa nelle densità delle due fasi, dal momento che piccoli errori nella frazione volumetrica possono portare a significativi errori nella valutazione delle proprietà fisiche della miscela. Dunque, il calcolo accurato della frazione γ è uno degli elementi chiave per la corretta applicazione del metodo VOF. In particolare, solo se γ è ben calcolato è possibile stimare in maniera appropriata la curvatura dell'interfaccia, necessaria per la determinazione della tensione superficiale e del corrispondente gradiente di pressione attraverso l'interfaccia. La regione occupata dall'interfaccia tra le due fasi è tipicamente "spalmata" su più celle di calcolo ed è quindi estremamente sensitiva alla mesh di calcolo e alla sua risoluzione spaziale.

Assicurare il calcolo accurato della variabile γ non è in generale un'operazione semplice e diversi approcci sono disponibili in letteratura. Per una panoramica più generale si può far riferimento a (Berberovic, Van Hinsberg, Jakirlic, Roisman, & Tropea, 2009). Inoltre, la stessa definizione di velocità con cui l'interfaccia viene fatta muovere è di per sé ambigua, dal momento che non è possibile trarre conclusioni sulla misura secondo cui la velocità di ciascuna delle due fasi contribuisca alla velocità effettiva della miscela liquido/gas.

Allo scopo di limitare le difficoltà numeriche segnalate sopra, nel presente studio sì è fatto riferimento all'approccio proposto da Rusche (Rusche, 2002), che si basa su una formulazione convenzionale per due fluidi immiscibili nel contesto dei volumi finiti. Secondo tale approccio, all'interno dell'equazione di trasporto per la variabile γ si introduce un termine convettivo addizionale (che nasce dalla modellazione della velocità come media pesata delle velocità liquida e gassosa), in modo da garantire la minima dissipazione numerica a cavallo dell'interfaccia:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \mathbf{v}_{\boldsymbol{l}}) = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(1-\gamma) + \nabla \cdot \Big((1-\gamma)\mathbf{v}_{\boldsymbol{g}}\Big) = 0 \tag{9}$$

Assumendo che i contributi delle velocità liquida e gassosa all'evoluzione dell'interfaccia siano proporzionali alle corrispondenti frazioni volumetriche, definendo quindi la velocità del fluido efficace come media pesata:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\boldsymbol{l}}\gamma + \mathbf{v}_{\boldsymbol{g}}(1-\gamma) \tag{10}$$

L'equazione (8) può essere riscritta come un'equazione di trasporto per la frazione volumetrica γ:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \mathbf{v}) + \nabla \cdot \big(\mathbf{v}_{\boldsymbol{r}}\gamma(1-\gamma)\big) = 0 \tag{11}$$

dove $\mathbf{v}_{\boldsymbol{r}} = \mathbf{v}_{\boldsymbol{l}} - \mathbf{v}_{\boldsymbol{g}}$ è la cosiddetta *velocità di compressione* (*compression velocity*). L'ultima equazione, se confrontata con l'equazione convenzionale (2), presenta un termine addizionale, chiamato appunto *compression term*, che ha la funzione di comprimere l'interfaccia, cioè di renderla più definita e meno distribuita. Ovviamente, tale termine addizionale rappresenta un contributo artificiale, non presente nella versione convenzionale VOF, che deriva dall'accoppiamento della tecnica VOF con la tecnica Euleriana a due fluidi. Il termine di compressione è particolarmente efficace nel rendere l'interfaccia meglio definita, rendendo superfluo o comunque non necessario l'uso di schemi speciali per la discretizzazione del termine convettivo, come ad esempio il metodo CICSAM (Berberovic, Van Hinsberg, Jakirlic, Roisman, & Tropea, 2009). Da una semplice analisi di tale termine, si comprende facilmente come esso risulti attivo solo in corrispondenza dell'interfaccia, dove cioè il valore di γ è intermedio tra 0 e 1. Esso dunque non modifica la soluzione nelle regioni dove è presente una sola delle due fasi. Si tratta inoltre di un termine fisicamente *consistente*, nel senso che per griglie di calcolo sempre più accurate (ovvero celle di calcolo sempre più piccole), lo spessore dell'interfaccia tende al valore teorico (ovvero nullo), in corrispondenza del quale il termine di compressione diventa identicamente uguale a zero, a causa dell'annullamento della velocità relativa.

Il vantaggio della formulazione proposta è dunque nella possibilità di descrivere l'interfaccia in maniera molto più accurata. La diffusione numerica che inevitabilmente viene introdotta attraverso la discretizzazione dei termini convettivi, può essere controllata e minimizzata attraverso la corretta discretizzazione spaziale del termine di compressione.

Le equazioni di conservazione della quantità di moto sono state opportunamente modificate allo scopo di tenere in considerazione gli effetti della tensione superficiale. Quest'ultima infatti genera un gradiente di pressione addizionale che può essere tradotto in termini di forza per unità di volume attraverso il modello *CSF (Continuum Surface Force)* (Berberovic, Van Hinsberg, Jakirlic, Roisman, & Tropea, 2009):

$$\mathbf{f}_{\boldsymbol{\sigma}} = \sigma\kappa\nabla\gamma \tag{12}$$

dove κ è la curvatura media dell'interfaccia, determinata dall'espressione:

$$\kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \gamma}{|\nabla \gamma|} \right) \tag{13}$$

L'equazione sopra riportata è valida solo per i casi con tensione superficiale costante. Nel caso di tensione superficiale variabile (ad esempio a causa di temperatura non uniforme) verrebbero a generarsi degli ulteriori sforzi all'interfaccia, associati ai gradienti di tensione superficiale stessa. Nel presente lavoro, tali contributi addizionali non sono stati considerati, principalmente per il fatto che nei problemi tipo simulati il contributo dovuto alla tensione superficiale ha un ruolo limitato a causa delle basse curvature della fase liquida all'interno del terreno. Dal momento che il contributo relativo ai gradienti di tensione superficiale è secondario rispetto al contributo legato alla tensione superficiale, si è ritenuto che trascurarlo non portasse a errori significativi. Si aggiunge anche il fatto che sulla base dei dati in nostro possesso non avremmo comunque potuto includere tale contributo in maniera adeguata per la mancanza di informazioni circa la dipendenza della tensione superficiale dalla temperatura per gli olii investigati.

Entrambi i fluidi (olio e aria) sono stati considerati Newtoniani. Allo scopo di semplificare la definizione delle condizioni al contorno, si è introdotta una pressione modificata, definita come:

$$p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \tag{14}$$

dove $\mathbf{x}$ è il vettore posizione. Di conseguenza, le equazioni di conservazione della quantità di moto sono state riscritte nel modo seguente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}\mathbf{v}) - \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) - \nabla \mathbf{v} \cdot \nabla \mu = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \sigma \kappa \nabla \gamma \tag{15}$$

Le forze dovute al gradiente di pressione e alla gravità sono chiaramente tenute in considerazione attraverso i primi due termini a destra dell'equazione (15). In conclusione, il modello fluidodinamico adottato nel presente lavoro prevede la risoluzione dell'equazione di continuità (3), dell'equazione per il trasporto della frazione volumetrica (11) e delle equazioni per il trasporto della quantità di moto (15). E' tuttavia necessario introdurre anche un opportuno modello di chiusura per quantificare la velocità relativa o di compressione $\mathbf{v_r}$. Allo scopo di assicurare che tale velocità non vada ad alterare la soluzione (si ricorda che si tratta comunque di un termine artificiale), $\mathbf{v_r}$ deve agire solo in direzione perpendicolare all'interfaccia. Inoltre, da un'analisi dell'equazione (15) è evidente che solo i valori di $\mathbf{v_r}$ sulle facce delle celle di calcolo sono necessari. Un corretto modello per la descrizione del termine di compressione è di fondamentale importanza per l'efficacia della metodologia proposta. In particolare, la velocità relativa sulle facce delle celle viene descritta secondo la formula seguente:

$$v_{r,f} = n_f \, min\left[C_\gamma \frac{|\phi|}{|\boldsymbol{S_f}|}, max\left(\frac{|\phi|}{|\boldsymbol{S_f}|} \right) \right] \tag{16}$$

dove ϕ è il flusso volumetrico sulla faccia, n_f è la normale alla faccia, calcolata nel modo seguente:

$$n_f = \frac{(\nabla\gamma)_f}{\left|(\nabla\gamma)_f + \delta_n\right|} \cdot \boldsymbol{S_f} \tag{17}$$

Nella normalizzazione presente nella formula sopra riportata, viene utilizzato un fattore di stabilizzazione δ_n, che tiene conto della eventuale non uniformità della griglia di calcolo:

$$\delta_n = \frac{\varepsilon}{\left(\frac{\sum_N V_i}{N}\right)^{1/3}} \tag{18}$$

dove N è il numero di celle computazionali e ε è un parametro numerico assunto pari a 10^{-8}.

Il modello corrispondente all'equazione (16) è relativamente semplice e robusto. In particolare, nel momento in cui si dovesse registrare un movimento del fluido dal lato gas in prossimità dell'interfaccia, la velocità relativa diventerebbe simile alla velocità della fase liquida. Se invece le velocità delle due fasi dovessero avere lo stesso ordine di grandezza, l'intensità della compressione dell'interfaccia sarebbe controllata dalla costante C_γ: se $C_\gamma = 0$ non ci sarebbe nessuna compressione, se $C_\gamma = 1$ la compressione sarebbe in forma conservativa, mentre per $C_\gamma > 1$ si avrebbe una compressione incrementata (Jasak, 2006). Si tenga conto inoltre che per ragioni di stabilità numerica, il flusso volumetrico nell'equazione (16) non viene stimato utilizzando la velocità interpolata sulla faccia, ma viene determinato come un flusso volumetrico conservativo sulla base dell'algoritmo di accoppiamento pressione-velocità disponibile in OpenFOAM (OpenCFD, OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox, User Guide, 2016).

Allo scopo di assicurare la stabilità dell'algoritmo numerico proposto, i calcoli vengono portati avanti utilizzando una tecnica di time-step adattivo, che viene scelto all'inizio di ciascun avanzamento temporale sulla base del numero di Courant, definito come:

$$Co = \frac{\mathbf{v_f} \cdot \boldsymbol{S_f}}{\boldsymbol{d} \cdot \boldsymbol{S_f}} \Delta t \tag{19}$$

dove $\boldsymbol{d}$ è il vettore che separa i centroidi delle due celle separate dalla faccia f e Δt è il time step. Sulla base dei valori di $\mathbf{v_f}$ e Δt dell'istante di tempo precedente, è possibile stimare un massimo numero di Courant locale Co^0. Il nuovo time step viene quindi valutato come:

$$\Delta t_t^n = \min\left\{\frac{Co_{max}}{Co^0}\Delta t^0, \left(1 + \lambda_1 \frac{Co_{max}}{Co^0}\right)\Delta t^0, \lambda_2 \Delta t^0, \Delta t_{max}\right\} \tag{20}$$

dove Δt_{max} e Co_{max} sono i valori massimi, definiti dall'utente, che possono essere assunti dal time step e dal numero di Courant, rispettivamente. Secondo la formula sopra riportata, il nuovo time step diminuisce se $Co^0 > Co_{max}$ e aumenta nel caso contrario. Allo scopo di evitare oscillazioni che possono portare a instabilità numeriche, l'incremento del time step viene limitato utilizzando dei fattori di smorzamento (damping factors) λ_1 e λ_2, scelti dall'utente. All'inizio della simulazione, si parte con un time step Δt_{init} molto piccolo (per ragioni di sicurezza), che però potrebbe portare a valori

eccessivamente piccoli del massimo numero di Courant locale e quindi a un nuovo time step troppo grande per partire con la simulazione. Dunque, all'inizio dei calcoli si preferisce calcolare un valore intermedio per il time step iniziale:

$$\Delta t_{init}^{*} = \min\left\{\frac{Co_{max}}{Co^{0}}\Delta t_{init}, \Delta t_{max}\right\} \tag{21}$$

Questo valore intermedio viene quindi utilizzato come Δt^{0} all'interno dell'equazione (20), in modo tale da dar luogo a un valore di Co^{0} per il primo time step sufficientemente vicino al valore Co_{max} definito dall'utente.

Nei metodi VOF la convergenza e la stabilità della soluzione sono estremamente sensitive all'equazione scelta per il trasporto della frazione γ. In generale, allo scopo di limitare possibili difficoltà numeriche, si preferisce utilizzare degli schemi di discretizzazione bounded per i termini convettivi e un'attenta scelta del passo temporale, come già sottolineato in precedenza. In particolare, nella maggior parte dei casi, soprattutto quando vengono utilizzate mesh non strutturate e irregolari, conviene suddividere il time step in un certo numero n_{sc} di sottopassi (subcycles):

$$\Delta t_{sc} = \frac{\Delta t}{n_{sc}} \tag{22}$$

La frazione γ viene aggiornata all'interno di ciascun sottopasso attraverso la soluzione della corrispondente equazione di trasporto. Al termine di ciascun sottopasso ovviamente il corrispondente flusso massivo $F_{sc,i}$ attraverso le facce delle celle viene ugualmente aggiornato. In particolare, il flusso massivo totale F corrispondente al time step globale Δt, necessario all'interno dell'equazione di trasporto della quantità di moto, viene ottenuto come:

$$F = \rho \mathbf{v}_{\boldsymbol{f}} \cdot \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{f}} = \sum_{i=1}^{n_{sc}} \frac{\Delta t_{sc}}{\Delta t} F_{sc,i} \tag{23}$$

Oltre a fornire una descrizione più accurata della variabile γ, l'algoritmo sopra proposto consente anche l'uso di un time step globale maggiore per la soluzione delle altre equazioni di trasporto, portando quindi complessivamente ad una accelerazione dell'intera simulazione.

Allo scopo di garantire un opportuno accoppiamento tra la velocità e la pressione, è necessario adattare ed estendere l'algoritmo PISO presente in OpenFOAM al metodo VOF, andando a derivare una nuova equazione per la pressione. Il punto di partenza è rappresentato dall'equazione di trasporto della quantità di moto (qui ripetuta per comodità):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}\mathbf{v}) - \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) - \nabla \mathbf{v} \cdot \nabla \mu = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \sigma \kappa \nabla \gamma \tag{24}$$

E' possibile ottenerne la versione discretizzata secondo la tecnica dei volumi finiti:

$$[a_P^v]\mathbf{v}_{\boldsymbol{P}} = \mathbf{H}(\mathbf{v}) - \nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \sigma \kappa \nabla \gamma \tag{25}$$

Nell'equazione sopra riportata, $\mathbf{v}_{\boldsymbol{P}}$ indica la velocità nei centroidi delle celle, $[a_P^v]$ i contributi diagonali relativi alla matrice corrispondente alla discretizzazione ai volumi finiti dell'equazione di quantità di moto e l'operatore $\mathbf{H}(\mathbf{v})$ i coefficienti fuori diagonale. Per maggiori dettagli relativi alla procedura di discretizzazione delle equazioni e' possibile far riferimento a (Weller, Tabor, Jasak, & Fureby, 1998) e (OpenCFD, OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox, Programmer's Guide, 2016).

In particolare, la velocità $\mathbf{v}_{\boldsymbol{P}}$ nei centroidi delle celle è pari a: :

$$\mathbf{v}_{\boldsymbol{P}} = [a_P^v]^{-1}\{[\mathbf{H}(\mathbf{v}) - \mathbf{g}\cdot\mathbf{x}\nabla\rho + \sigma\kappa\nabla\gamma] - \nabla p_d\} \tag{26}$$

Sostituendo questa velocità all'interno dell'equazione di continuità, è possibile assemblare un'equazione di Poisson per la pressione p_d:

$$\nabla\cdot\{[a_P^v]^{-1}\nabla p_d\} = \nabla\cdot\{[a_P^v]^{-1}[\mathbf{H}(\mathbf{v}) - \mathbf{g}\cdot\mathbf{x}\nabla\rho + \sigma\kappa\nabla\gamma]\} \tag{27}$$

I flussi che garantiscono l'equazione di continuità sono infine dati da:

$$F = -[a_P^v]^{-1}\boldsymbol{S_f}\cdot\nabla p_d + [a_P^v]^{-1}\boldsymbol{S_f}\cdot[\mathrm{H}(\mathrm{v}) - \mathbf{g}\cdot\mathbf{x}\nabla\rho + \sigma\kappa\nabla\gamma] \tag{28}$$

2.3. Trattamento del terreno come mezzo poroso

Come già sottolineato in precedenza, il terreno è stato modellato come un pozzo poroso. Dal punto di vista fluidodinamico, la dinamica di un fluido all'interno di un mezzo poroso è descritta ancora dall'equazione di continuità (3) e da una equazione di conservazione della quantità di moto che include un termine addizionale che tenga conto delle resistenze supplementari introdotte dal mezzo poroso stesso sul flusso del fluido. In particolare, il termine addizionale è costituito da due parti: un termine di natura viscosa (chiamato anche di Darcy) e un termine inerziale:

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^{3} D_{ij}\mu v_j + \sum_{j=1}^{3} C_{ij}\frac{1}{2}\rho|\mathbf{v}|v_j\right) \tag{29}$$

dove S_i è il componente i-esimo del termine sorgente, $|\mathbf{v}|$ è il modulo della velocità e $\boldsymbol{D}$ e $\boldsymbol{C}$ sono dei tensori che caratterizzano il mezzo poroso dal punto di vista delle perdite viscose e inerziali, rispettivamente. Il termine sorgente S_i (negativo) offre un contributo supplementare al gradiente di pressione nella cella, creando una perdita di pressione proporzionale alla velocità del fluido (o al quadrato della stessa) in ciascuna cella. Nell'ambito del presente studio si è assunto un terreno omogeneo e isotropo, dal momento che non si avevano a disposizione informazioni sufficienti per determinarne eventuali caratteristiche anisotropiche. In tali condizioni, le matrici $\boldsymbol{D}$ e $\boldsymbol{C}$ diventano semplicemente delle matrici diagonali con elementi pari a $\frac{1}{\alpha}$ e C_2, rispettivamente:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v_i + C_2\frac{1}{2}\rho|\mathbf{v}|v_i\right) \tag{30}$$

dove α è definito come la permeabilità del mezzo e C_2 il suo fattore di resistenza inerziale. Il fattore di resistenza inerziale è stato assunto pari a zero, per mancanza di una caratterizzazione dei terreni di interesse. Tale semplificazione non comporta però errori significativi, dal momento che il flusso dell'olio all'interno del terreno risulta essere sempre laminare e in tali condizioni il fattore C_2 può essere assunto pari a zero.

2.4. Profilo termico all'interno del terreno

Il suolo risente sia delle variazioni stagionali di temperatura che di quelle giornaliere, seppure in maniera più attenuata rispetto all'atmosfera. Procedendo in profondità si riducono gradualmente le escursioni giornaliere, fino ad azzerarsi a profondità prossime a 1 m. Per quanto riguarda le escursioni stagionali, in un suolo di ambiente temperato le escursioni termiche stagionali si riducono fortemente dopo 5 m e praticamente si annullano dopo i 10 m di profondità (Florides & Kalogirou, 2005). A tali profondità la temperatura è pari alla temperatura media annua della atmosfera soprastante. Queste profondità caratteristiche alle quali si annullano le variazioni giornaliere e stagionali variano con il tipo di terreno, come descritto da Kalogirou e Florides (Kalogirou & G., 2004).

A titolo di esempio, nella **Figura 3** si riporta la variazione stagionale di temperatura misurata in un suolo situato nei dintorni di Belgrado (Serbia), caratterizzato da una temperatura media di circa 13 °C. Terreni situati a latitudini inferiori presentano ovviamente temperature più elevate, come ad esempio nel caso di Nicosia (Cipro) (Florides & Kalogirou, 2005), in cui il terreno ha una temperatura media superiore ai 20°C.

La **Figura 4** mostra che è possibile descrivere la dipendenza della temperatura con la profondità del terreno nel periodo estivo, ritenuto più critico per lo sversamento di olii in quanto le elevate temperature del terreno riducono la viscosità e quindi facilitano l'infiltrazione, utilizzando una legge di tipo esponenziale come suggerito dalla equazione di Kasuda et al. (Kasuda & Archenbach, 1965):

$$T(x) = T_m + (T_s - T_m)e^{-x/L} \tag{31}$$

Per lo studio effettuato nella presente indagine si è utilizzato un profilo termico derivato da quello del terreno di Belgrado, con le seguenti modifiche:

- la temperatura superficiale non è pari a 30 °C ma è pari ad 80°C, in quanto si ipotizza che il serbatoio sovrastante sia riscaldato;
- inoltre, essendo la temperatura media delle località italiane più mite rispetto a quella di Belgrado, si è cautelativamente ipotizzato che la temperatura media del terreno sia di 15 °C.

Non sono disponibili informazioni più dettagliate che permetterebbero di effettuare uno studio specifico per ogni sito di interesse, nel quale cambiano sia il terreno (conducibilità termica) sia la temperatura media annua. Si ritiene che il profilo termico utilizzato sia comunque ragionevolmente rappresentativo

della variabilità stagionale e della tipologia climatica italiana, dove la temperatura media annua varia fra i 10÷11 °C al nord, 13÷14 °C al centro e circa 16° al sud, secondo quanto riportato in **Figura 5** (Istat, 2010). A titolo di esempio, si osserva come la città di Taranto abbia una temperatura media di 16.7 °C, Livorno di 15.4 °C e Pavia di 12.4 °C (Istat, 2010).

3. Implementazione in OpenFOAM

Il modello fluidodinamico completo descritto nella sezione precedente è stato implementato all'interno del framework open-source OpenFOAM (Weller, Tabor, Jasak, & Fureby, 1998). In particolare, si è proceduto all'implementazione di un nuovo codice di calcolo (`solver`, secondo la nomenclatura OpenFOAM) chiamato `porousInterFoam`, costruito sulla base del solver `interFoam`, incluso nella versione standard di OpenFoam.

Nei paragrafi successivi verrà offerta prima di tutto una descrizione sintetica delle principali caratteristiche del framework OpenFOAM. Si andrà quindi a descrivere su un piano più tecnico l'implementazione del solver `porousInterFoam`, prestando particolare attenzione all'accoppiamento del metodo VOF con il mezzo poroso corrispondente al terreno e all'introduzione del profilo termico all'interno di quest'ultimo.

3.1. OpenFOAM

OpenFOAM, come suggerisce il nome stesso, è un software open-source, ovvero con licenza pubblica e gratuita, distribuito gratuitamente attraverso la OpenFOAM foundation. L'acronimo FOAM sta per Field Operation And Manipulation, riferendosi alla capacità di gestire strutture di dati, talvolta molto complesse, di campi scalari, vettoriali o tensoriali. OpenFOAM non è un software vero e proprio, ma piuttosto una libreria scritta in C++ che permette di creare eseguibili chiamati `applications`. Lo scopo di tale libreria è quello di risolvere equazioni differenziali alle derivate parziali attraverso l'approccio dei volumi finiti. Le potenzialità di OpenFOAM risultano quindi molto maggiori rispetto alla soluzione di problemi fluido-aerodinamici, che restano comunque l'obiettivo principale della stragrande maggioranza dei solutori già pronti in esso compresi. Le `applications` si dividono in due categorie: i `solvers` e le `utilities`. I primi servono a risolvere uno specifico problema di meccanica dei continui, mentre le seconde svolgono moltissimi compiti, relativi alla manipolazione di strutture dati, dal pre- al post-processing, alla creazione/manipolazione della mesh e altro ancora.

Il punto di forza di OpenFOAM consiste nel mettere a disposizione degli utenti tutto il codice sorgente, con la possibilità (avendo noti alcuni prerequisiti di fisica e tecniche di programmazione) di apportare modifiche a proprio piacimento, fino a crearsi dei solutori personalizzati, mantenendo però inalterata la struttura di base della libreria. In questo modo si ha dunque a disposizione qualcosa di solido e versatile al tempo stesso, potendo introdurre nuovi componenti senza apportare modifiche strutturali al codice. La struttura di OpenFOAM risulta abbastanza complessa, ma può essere schematizzata come in **Figura 6**. Si noti come, nella fase di post-processing, sia possibile l'utilizzo di software terzi come `Paraview`

(utilizzato anche in questa trattazione per la visualizzazione dei risultati), che si interfaccia con il programma attraverso la utility `paraFoam`.

Come già accennato, OpenFOAM è completamente scritto in linguaggio C++ e questo consente lo sviluppo di una programmazione ad oggetti o object-oriented. Questo consente di dichiarare tutte le grandezze fisiche e le relative operazioni in un unico oggetto, chiamato classe, in modo tale che la scrittura delle equazioni da risolvere sia analoga al linguaggio verbale e matematico usato per descriverle. Le classi costituiscono quindi dei modelli astratti che vengono invocati durante l'esecuzione per la creazione di oggetti software relativi, che saranno dotati di attributi (dati) e metodi (procedure) secondo quanto dichiarato dalla classe di appartenenza. La parte del programma che fa uso di un oggetto prende il nome di client. L'utilizzo della programmazione ad oggetti rende il codice molto più compatto e comprensibile, concentrando la dichiarazione delle classi in una parte limitata e permettendo una più facile gestione di un codice di grandi dimensioni. Fornisce inoltre un supporto naturale alla modellazione software degli oggetti del mondo reale (o astratto) da riprodurre, permettendo infine, in maniera molto semplice, di ricavare nuove classi da quelle già esistenti.

3.2. Il solver porousInterFoam

Il solver `porousInterFoam` è stato creato a partire da un solver presente nella versione standard di OpenFOAM, chiamato `interFoam`, Le principali differenze di `porousInterFoam` rispetto a `interFoam` sono le seguenti:

- introduzione del termine sorgente addizionale (30) all'interno dell'equazione di conservazione della quantità di moto per consentire la descrizione del terreno come mezzo poroso;
- introduzione di un fluido newtoniano a viscosità variabile con la temperatura;
- implementazione della velocità di compressione secondo l'approccio descritto nel paragrafo 2.2 allo scopo di migliorare la robustezza delle simulazioni, anche a fronte di differenze particolarmente significative tra le viscosità delle due fasi.

Il codice sorgente del solver `porousInterFoam` e' disponibile come allegato alla presente relazione. La sua compilazione e il suo utilizzo richiedono la versione 5.x del framework OpenFOAM, scaricabile gratuitamente al seguente indirizzo internet: https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-5.x.

3.3. Creazione di un fluido newtoniano a viscosità variabile

La libreria standard disponibile per la caratterizzazione reologica dei fluidi disponibile per il solver `interFoam` prevede solo una viscosità costante e uniforme. Si è quindi proceduto ad una estensione di tale libreria attraverso la creazione di una nuova classe di fluido Newtoniano con viscosità variabile, funzione della temperatura (secondo l'equazione (39), riportata nel paragrafo 5.1) chiamata `NewtonianThermal`, a partire dalla classe standard `Newtonian`. L'utente può definire liberamente

tramite un opportuno file di input i coefficienti A, B, C e D che caratterizzano la viscosità dell'olio secondo l'equazione (39). Anche il profilo termico lungo il terreno può essere definito dall'utente attraverso un opportuno file di input, in cui andranno indicate le variabili T_m, T_s e L, secondo l'equazione (31). Questo assicura una sufficiente flessibilità del codice di calcolo.

3.4. Schemi numerici adottati

Il successo di una simulazione VOF è fortemente dipendente dalla qualità degli schemi numerici adottati per la discretizzazione delle equazioni. Una scelta impropria rischia di compromettere seriamente l'accuratezza e la stabilità delle simulazioni.

Qui di seguito si riportano brevemente gli schemi numerici impiegati per la discretizzazione e la risoluzione di ciascuno dei termini delle equazioni di governo. La vastità di schemi utilizzabili ha portato ad una scelta degli schemi sia più comuni, sia con minori problemi dal punto di vista della convergenza (Vitucci, 2013). Per ulteriori dettagli è possibile consultare la guida del software OpenFOAM (OpenCFD, OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox, User Guide, 2016).

- derivata temporale $\frac{\partial(\cdot)}{\partial t}$: schema di Eulero implicito, primo ordine;
- gradiente $\nabla(\cdot)$: schema di Gauss, con interpolazione tra centri delle celle e centri delle facce di tipo lineare;
- convezione della quantità di moto $\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}\mathbf{v})$: schema di Gauss, con interpolazione di tipo `limitedLinear` per quantità vettoriali con coefficiente 1 per ottenere le migliori doti di convergenza numerica;
- convezione della frazione volumica $\nabla \cdot (\gamma \mathbf{v})$: schema di Gauss, con interpolazione secondo il metodo di vanLeer;
- convezione della frazione volumica γ secondo la velocita $\mathbf{v_r}$ $\nabla \cdot (\gamma \mathbf{v_r})$: schema di Gauss, con interpolazione del campo di γ secondo il metodo specifico di `interfaceCompression`; esso produce un'interfaccia ben definita, ma si possono generare correnti parassite a causa dei forti gradienti attorno ad essa;
- Laplaciano $\nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v})$: schema di Gauss, con interpolazione lineare di v e gradiente normale alla superficie $\nabla \mathbf{v}$ di tipo `corrected`;
- schemi di interpolazione: interpolazione lineare;
- gradiente normale alla superficie: `corrected`, schema di correzione esplicita non ortogonale.

4. Test preliminari e analisi di sensitività

In una prima fase dell'attività, l'attenzione è stata focalizzata su una serie di simulazioni effettuate in condizioni isoterme, su olii con densità e viscosità assegnate in un ampio intervallo di valori e terreni con

diverse permeabilità, tali da coprire il ventaglio di possibili valori di interesse per i serbatoi dell'ENI. Diversi sono gli scopi di questa fase inziale:

- messa a punto dei parametri numerici del modello (individuazione del time step ottimale, degli schemi di discretizzazione spaziale più adeguati, scelta della griglia di calcolo, ecc.);
- individuazione dei parametri fisici di maggiore impatto sulla penetrazione dell'olio all'interno della dinamica;
- individuazione dei tempi caratteristici di penetrazione dell'olio all'interno del terreno.

Nel complesso si può affermare che tali simulazioni preliminari hanno costituito da una parte una sorta di test preliminare del modello fluidodinamico complesso e dall'altra hanno preparato il campo per le analisi più complesse e complete effettuate sugli olii di interesse caratterizzati dalla *Stazione Sperimentale dei Combustibili*.

4.1. Condizioni isoterme: sensitività alla viscosità e alla permeabilità del terreno

Sulla base del modello descritto nei paragrafi precedenti, è abbastanza logico aspettarsi che i parametri di maggiore rilevanza nella determinazione della velocità' di penetrazione dell'olio all'interno del terreno siano la viscosità dell'olio e la permeabilità del terreno stesso. La prima serie di prove è stata dunque focalizzata proprio su questi due parametri. In particolare, come test preliminare si è immaginata una fessura circolare con diametro di 20 mm, un battente di liquido pari a 10 m, olii con viscosità pari a 100, 1000 e 10000 cP e terreni con permeabilità di 10^{-10}, 10^{-12} e 10^{-14} m^2. L'intervallo di valori adottati per la viscosità e la permeabilità sono stati scelti in modo tale da coprire in misura ragionevole i tipici valori che è possibile attendersi per gli olii e i terreni di interesse per ENI. In particolare, come si discuterà meglio nella sezione successiva, le viscosità dei campioni di olio forniti da ENI e caratterizzati dalla *Stazione Sperimentale dei Combustibili* cadono proprio nell'intervallo tra 100 e 10000 cP. Analogamente, si considerano terreni con permeabilità comprese nell'intervallo 10^{-10}-10^{-14} m^2, corrispondenti, secondo la **Tabella 6**, a terreni a sabbia molto fine, argillosi compatti, oppure calcare.

A titolo di esempio, in **Figura 7**, viene riportata l'evoluzione nello spazio e nel tempo della perdita di olio all'interno del terreno nel caso di viscosità pari a 1000 cP e permeabilità 10^{-10} m^2 (terreno a sabbia fine). La **Figura 7** evidenzia come inizialmente la perdita mantenga una forma semisferica. Dopo qualche ora, tuttavia, comincia a prevalere l'effetto della gravità, per cui la forma della perdita tende ad allungarsi nella direzione verticale, come è logico attendersi e come è stato osservato sperimentalmente da diversi autori (Evans, 2013) (Halmemies, Gröndahl, Nenonen, & Tuhkanen, 2003).

In **Figura 8** è invece riportata la portata volumetrica della perdita in funzione della viscosità dell'olio per le tre tipologie di terreno prese in considerazione (colonna di sinistra) oppure in funzione della permeabilità del terreno per tre diverse viscosità (colonna di destra).

Come è logico attendersi, la viscosità dell'olio gioca un ruolo significativo: si può osservare come un aumento di questa di un fattore 10 provochi una diminuzione della perdita di un fattore paragonabile,

indipendentemente dal tipo di terreno. Ad esempio, per un terreno argilloso compatto, si passa da una perdita di circa 100 l/mese per un olio poco viscoso (100 cP) ad una perdita di appena 1 l/mese per un olio a viscosità 100 volte maggiore (10000 cP). Allo stesso tempo sembra evidente che, tra i terreni considerati nello studio, quelli caratterizzati da una permeabilità molto bassa offrano un ostacolo notevole allo sversamento anche degli olii più leggeri: ad esempio, per un olio con viscosità si 100 cP, la perdita stimata è di poco più di 1 l/mese.

Dall'analisi dei profili in **Figura 8** è possibile individuare la seguente legge, in grado di restituire (una volta fissata la permeabilità del terreno) la perdita Q (in l/mese) in funzione della viscosita' μ (in cP) dell'olio:

$$log_{10}(Q) = Alog_{10}(\mu) + B \tag{32}$$

dove A e B sono i due coefficienti della correlazione, funzione della permeabilità α del terreno, i cui valori sono riportati nella **Tabella 1**.

Anche per la permeabilità del terreno è possibile ripetere un discorso analogo a quello già proposto per la viscosità. Infatti, sulla base dei profili in **Figura 8**, si individua la seguente correlazione, che restituisce la perdita Q (in l/mese) in funzione della permeabilità α (in m^2) del terreno (una volta fissata la viscosità dell'olio):

$$log_{10}(Q) = Clog_{10}(\alpha) + D \tag{33}$$

dove C e D sono i due coefficienti della correlazione, funzione della viscosità μ dell'olio, i cui valori sono riportati nella **Tabella 2**.

Anche il battente di liquido ovviamente influenza in misura significativa la perdita di olio. I grafici riportati nella mostrano appunto la perdita in funzione del battente di liquido, al variare della viscosità dell'olio e della permeabilità del terreno.

4.2. Condizioni isoterme: sensitività al battente di liquido

E' facile e logico immaginare che anche il battente di liquido abbia un ruolo significativo nel determinare la velocità di penetrazione dell'olio nel terreno. Sono dunque state effettuate ulteriori simulazioni fluidodinamiche andando a variare il battente di liquido all'interno del serbatoio, da 1 m fino a 10 m, anche in questo caso in modo tale da coprire il ventaglio di valori che tipicamente ci si potrebbe aspettare per i serbatoi oggetto della presente indagine. La Figura 9 sintetizza i risultati di tali analisi.

L'analisi dei profili riportati in **Figura 9** ha permesso di evidenziare una dipendenza lineare della perdita dal battente di liquido h (una volta fissata la viscosita' μ dell'olio e la permeabilità del terreno α), secondo una legge:

$$Q = Eh + F \tag{34}$$

dove E e F sono i due coefficienti della correlazione, funzione della viscosità dell'olio e della permeabilità del terreno, i cui valori sono riportati nella **Tabella 3**.

Sulla base dei valori riportati in **Tabella 3** e tenendo conto delle correlazioni (32) e (33), si è osservato che i coefficienti E e F non dipendono singolarmente dalla viscosita' dell'olio e dalla permeabilità del terreno, ma piuttosto dal loro rapporto (come evidenziato in **Figura 10**), secondo le seguenti leggi:

$$\begin{aligned} log_{10}(E) &= A_E log_{10}\left(\frac{\mu}{\alpha}\right) + B_E \\ log_{10}(F) &= A_F log_{10}\left(\frac{\mu}{\alpha}\right) + B_F \end{aligned} \tag{35}$$

La **Tabella 4** riporta i valori dei coefficienti che compaiono nelle correlazioni (35).

4.3. Condizioni isoterme: stima short-cut della portata volumetrica dello sversamento

Riassumendo, è dunque possibile proporre la seguente correlazione per la stima di primo tentativo della portata volumetrica della perdita di olio (espressa in l/mese) in funzione dei tre parametri principali, viscosità dell'olio μ (in cP), permeabilità del terreno α (in m^2) e battente di liquido h (in m):

$$Q = Eh + F$$

$$\begin{cases} log_{10}(E) = A_E log_{10}\left(\frac{\mu}{\alpha}\right) + B_E \\ log_{10}(F) = A_F log_{10}\left(\frac{\mu}{\alpha}\right) + B_F \end{cases} \tag{36}$$

Dal calcolo della portata dello sversamento è possibile ricostruire facilmente la profondità $z(t)$ raggiunta dall'olio all'interno del terreno, misurata a partire dal fondo del serbatoio, in funzione del tempo. Assumendo per semplicità che la perdita mantenga una forma semi-sferica, $z(t)$ puo' essere stimato come:

$$z(t) = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} Qt} \tag{37}$$

Ovviamente, dal momento che la perdita tenderà ad allungarsi in direzione verticale a causa della gravità, perdendo la forma semi-sferica, tale valore di $z(t)$ è da intendersi solo come una ragionevole stima di primo tentativo. La **Figura 11** mostra i profili temporali di massima profondità raggiunta dallo sversamento per i tre diversi tipi di terreno e le tre diverse viscosità, secondo la correlazione (37).

4.4. Condizioni non isoterme: sensitività alla permeabilità del terreno

Prima di considerare i campioni di olio forniti da ENI, si è ritenuto più opportuno effettuare uno studio preliminare su un bio-olio ben caratterizzato dal punto di vista reologico e termodinamico, disponibile nell'ambito del Progetto Europeo Residue2Heat (https://www.residue2heat.eu/). In particolare, per il bio-olio considerato, sono disponibili misure di viscosità a diverse temperature, tra 20°C e 80°C (si veda la **Figura 18**, nel paragrafo 5.1), che hanno consentito di determinare la curva viscosità-temperatura, inserita all'interno del modello fluidodinamico:

$$log_{10}(\mu) = A + \frac{B}{T} \tag{38}$$

dove la viscosità è espressa in cP, la temperatura in K, e le due costanti hanno valori $A = -8.9$ e $B = 3500$. Come riferimento è opportuno notare che, In base alla correlazione fornita, la viscosità di tale olio a 50°C è pari a 86cP, o 11.35 °E. Si è quindi definito un profilo termico all'interno del terreno, secondo la procedura descritta nel paragrafo 2.4. In particolare, si è scelta una temperatura del serbatoio pari a $T_s = 80°C$, una temperatura media del terreno pari a $T_m = 15°C$ e una lunghezza caratteristica pari a *1.5 m*. Combinando la (38) con il profilo termico (31), si ottiene la curva di viscosità in funzione dell'affondamento nel terreno riportata in **Figura 12**. Si osservi la significativa variazione di viscosità lungo il terreno: in particolare, a circa 5 m di profondità la viscosità risulta maggiore di più di due ordini di grandezza. E' logico dunque aspettarsi che, a differenza del caso isotermo analizzato nei paragrafi precedenti, la penetrazione dell'olio nel terreno incontri una resistenza via via crescente con l'affondamento a causa del significativo aumento di viscosità.

Le simulazioni fluidodinamiche sono state effettuate nell'ipotesi di una fessura circolare di 20 mm di diametro e un battente di liquido pari a 15 m. Si sono invece considerati diversi terreni a permeabilità piuttosto elevate, pari a 10^{-9}, 10^{-10} e 10^{-11} m^2 (corrispondenti a terreni sabbiosi sempre meno permeabili).

A titolo di esempio, in **Figura 13** si riporta la perdita di olio nel terreno a massima permeabilità (10^{-9} m^2) dopo circa 2 ore. Si può osservare come la forma semisferica che caratterizzava i casi isotermi studiati nelle analisi preliminari precedenti, venga rapidamente perduta per lasciar spazio a una forma maggiormente "a goccia". Questo comportamento è il risultato dell'azione della gravità, che tende a favorire il movimento della perdita verso il basso, e dell'aumento della viscosità con la profondità, dovuto al calo di temperatura. L'aumento della viscosità costituisce un ostacolo alla penetrazione verticale e, di conseguenza, all'aumentare della profondità aumenta la tendenza a muoversi in direzione orizzontale, dove non si hanno gradienti di temperatura.

I grafici in **Figura 14** riportano la profondità e il massimo diametro raggiunti dallo sversamento di bio-olio nel terreno in funzione del tempo per i tre terreni sabbiosi considerati. Come è logico aspettarsi, la velocità di penetrazione diminuisce nel tempo, a causa dell'aumento della viscosità lungo il terreno (che contribuisce ad ostacolare il flusso di olio verso il basso), e della dispersione radiale legata alla simmetria cilindrica del problema. Si è cercato anche di valutare un tempo caratteristico di velocità di penetrazione

dell'olio nel terreno, come il tempo necessario per raggiungere la profondità di 1 m. Ovviamente, tale scelta è puramente arbitraria, ma riesce a dare immediatamente un'idea di quanto velocemente l'olio stia scendendo lungo il terreno. Ovviamente, il tempo caratteristico aumenta con il diminuire della permeabilità del terreno, passando da appena 26 minuti per permeabilità pari a 10^{-9} m^2 (sabbia medio-grande), a più di 40 ore nel caso di permeabilità pari a 10^{-11} m^2 (sabbia molto fine).

In una seconda serie di simulazioni, si è modificata la viscosità del bio-olio, moltiplicandola per un fattore pari a 10, 100 oppure 1000, in modo tale da renderla maggiormente in linea con quella degli olii di maggiore interesse per ENI. La **Figura 15** sintetizza i risultati di tali simulazioni, per le quali possono essere ripetute considerazioni analoghe a quelle già proposte per la Figura precedente. Anche in questo caso è abbastanza logico attendersi un rapido incremento del tempo caratteristico di penetrazione con l'aumentare della viscosità.

4.5. Adimensionalizzazione dei profili temporali di penetrazione della perdita nel terreno

Dall'analisi della **Figura 14** e **Figura 15** risulta evidente come le forme dei profili della profondità e del massimo diametro raggiunti dalla perdita siano molto simili tra loro, indipendentemente dai valori di permeabilità del terreno e viscosità dell'olio. Questa osservazione suggerisce la possibilità di procedere con una adimensionalizzazione di tali profili. La scelta più semplice e logica è stata quella di utilizzare il tempo caratteristico di penetrazione definito nel paragrafo precedente come fattore di adimensionalizzazione. In altri termini, le curve proposte nella **Figura 14** e **Figura 15** sono state scalate su un nuovo tempo definito come $\tau = \frac{t}{t_{1m}}$ e riportate in **Figura 16**. E' piuttosto evidente che le nuove curve tendono a collassare su un'unica curva, a parità di permeabilità del terreno. Questo risultato è molto interessante e può essere sfruttato per limitare il numero di simulazioni da effettuare o comunque l'orizzonte temporale delle stesse. Infatti, una volta fissata la permeabilità del terreno e ottenuta la curva di profondità (o di massimo diametro nel tempo) per una assegnata viscosità, non è necessario completare le medesime curve per le altre viscosità di interesse: è sufficiente invece simularle fino al raggiungimento del tempo caratteristico di penetrazione (cioè fino al raggiungimento di 1 m di profondità). Grazie alla similitudine individuata, sarà possibile costruire la parte mancante di curva in maniera piuttosto agevole.

4.6. Analogia permeabilità-viscosità

Sempre sulla base di un'analisi qualitativa dei profili riportati nella **Figura 14** e **Figura 15**, è abbastanza evidente come la permeabilità del terreno e la viscosità dell'olio abbiano effetti opposti, ma in misura simile, sulle curve di penetrazione. In altri termini, un aumento della viscosità dell'olio è equivalente ad un abbassamento della permeabilità del terreno nella stessa misura. Già la correlazione (36) individuata

nel paragrafo 4.2, suggeriva un'osservazione di questo tipo: nelle analisi parametriche effettuate in tale paragrafo era emerso come la portata dello sversamento non dipendesse separatamente dalla viscosità e dalla permeabilità, quanto piuttosto dal loro rapporto. D'altra parte, nella legge di Darcy (utilizzata per esprimere il contributo addizionale presente nell'equazione di trasporto della quantità di moto) il termine viscoso è funzione esplicita del rapporto $\frac{\mu}{\alpha}$. Da un'analisi più quantitativa della **Figura 14** e **Figura 15**, questa analogia permeabilità-viscosità emerge in maniera netta ed evidente. A titolo di esempio, la **Figura 17** confronta le curve di penetrazione che si hanno dividendo la permeabilità di riferimento del terreno (10^{-9} m^2) di un fattore 10 con quelle che si hanno moltiplicando la viscosità di uno stesso fattore 10: le curve sono praticamente sovrapposte. La stessa cosa si ripeterebbe anche qualora si utilizzasse un fattore 100. Anche questo risultato è particolarmente interessante e utile, dal momento che consente, almeno in prima battuta, di limitare il numero di simulazioni da effettuare.

5. Applicazione del modello ai campioni di olio forniti da ENI

Una volta messo a punto e testato il modello fluidodinamico completo, quest'ultimo è stato utilizzato per effettuare le simulazioni fluidodinamiche su una serie di olii di rifermento selezionati da ENI e caratterizzati sperimentalmente in termini di densità e viscosità dalla *Stazione Sperimentale dei Combustibili*. In particolare, tra tutti i campioni forniti e analizzati, l'attenzione si è focalizzata su due olii che presentavano le caratteristiche estreme di viscosità (ovvero la massima e la minima), dal momento che quest'ultima grandezza si è rivelata quella di maggior impatto sull'evoluzione spaziale e temporale della perdita all'interno dei terreni.

Per quanto riguarda i terreni, sono state selezionate tre diverse tipologie di terreni, sufficientemente rappresentativi di potenziali terreni reali. I dettagli di tale analisi sono presentati nel paragrafo 5.2.

Le simulazioni sono state condotte secondo le stesse modalità adottate per le analisi preliminari descritte nella Sezione 4. In particolare, sono state stimate la velocità di penetrazione della perdita all'interno del terreno e il massimo diametro raggiunto dalla perdita in funzione del tempo per i due olii di riferimento e le tre diverse tipologie di terreno. Si è quindi cercato di individuare, sulla base dei risultati delle simulazioni dettagliate, delle leggi semi-empiriche (o modelli short-cut) in grado di dare una stima ragionevolmente accurata delle velocità di penetrazione della perdita nel terreno nel tempo in funzione del tipo di olio e del tipo di terreno.

5.1. Descrizione/caratterizzazione degli olii di riferimento

La **Tabella 7** sintetizza la caratterizzazione reologica e termodinamica effettuata dalla *Stazione Sperimentale dei Combustibili* sui campioni di olii pesanti forniti da ENI. In particolare, per ciascun olio è stato confermato sperimentale un comportamento di tipo Newtoniano, con una viscosità fortemente

dipendente dalla temperatura, misurata nel range compreso tra 30°C e 80°C. Dai dati riportati in **Tabella 7** è evidente come in tale intervallo la viscosità può anche variare di due ordini di grandezza. Questa osservazione giustifica l'attenzione che è stata posta nella formulazione del modello completo all'introduzione di un profilo termico all'interno del terreno. La densità è invece stata misurata solo in corrispondenza di due temperature (50°C e 65°C), mostrando delle variazioni minime (dell'ordine dell'1%). Come già sottolineato in precedenza, le informazioni relative alla densità non sono sufficienti per poter sviluppare un modello semi-empirico che consenta di calcolare la densità stessa in funzione della temperatura. Si è dunque preferito adottare una soluzione molto semplice, cioè utilizzare una densità costante pari al valore misurato a 50°C. E' tuttavia abbastanza logico aspettarsi che tale semplificazione non comporti dei significativi errori, dal momento che le variazioni reali di densità attese nell'intervallo di interesse, cioè tra 15°C e 80°C, sono in generale bel al di sotto del 10%.

Sulla base delle analisi preliminari descritte nella Sezione 4, è emerso il ruolo fondamentale giocato dalla viscosità dell'olio. Gli olii forniti da ENI e riportati nella **Tabella 7** sono quindi stati ordinati in funzione della viscosità, dal meno viscoso (olio 2094, 15.27°E @ 50°C), al più viscoso (olio 2096, 98.27°E @ 50°C). Le analisi fluidodinamiche oggetto della presente analisi sono state limitate a questi due olii con comportamento estremo: non ci sono infatti ragioni per ritenere che il comportamento degli olii rimanenti non sia intermedio rispetto a questa coppia di olii di riferimento.

Le misure di viscosità in funzione della temperatura hanno invece consentito di sviluppare delle correlazioni analitiche, inserite all'interno del modello fluidodinamico completo. In particolare, anche sulla base dell'esperienza maturata sul bio-olio (Sezione 4), si è individuata la seguente correlazione generale per esprimere la viscosità dinamica in funzione della temperatura:

$$log_{10}(\mu) = A + \frac{B}{T} + CT + DT^2 \qquad (39)$$

dove μ e' la viscosità in cP e T è la temperatura in K. I coefficienti A, B, C e D sono riportati nella **Tabella 5** per i due olii di riferimento e confrontati per comodità con il bio-olio. Il grafico in **Figura 18** riporta un confronto tra la viscosità misurata sperimentalmente e quella stimata attraverso la correlazione (39). E' evidente come l'accordo sia molto buono, indice dell'adeguatezza della correlazione e dei coefficienti individuati.

Così come già fatto per il bio-olio, anche in questo caso è stato imposto un profilo termico all'interno del terreno secondo la procedura descritta nel paragrafo 2.4. In particolare, si è scelta una temperatura del serbatoio pari a $T_s = 80°C$, una temperatura media del terreno pari a $T_m = 15°C$ e una lunghezza caratteristica pari a 1.5 m. Combinando la legge (39) con il profilo termico (31), si ottengono le curva di viscosità in funzione dell'affondamento nel terreno riportate in **Figura 19**. E' evidente come l'olio 2094 (15.27°E @ 50°C) abbia una viscosità molto simile a quella del bio-olio, sia in termini qualitativi che quantitativi. L'olio 2096 invece (98.27°E @ 50°C), a parità di temperatura, ha una viscosità maggiore di circa un ordine di grandezza. Questa differenza è molto significativa, come apparirà evidente dai risultati

delle simulazioni fluidodinamiche. Ancora una volta è evidente la significativa variazione di viscosità lungo il terreno: in particolare, a circa 5 m di profondità la viscosità risulta maggiore (per tutti gli olii) di un fattore ~150 rispetto a quella registrata sulla superficie (cioè sul fondo del serbatoio).

5.2. Individuazione/caratterizzazione di terreni di riferimento

Un aspetto critico nel calcolo della dispersione dell'olio nel suolo è la definizione delle caratteristiche di permeabilità del terreno. In questo studio sono state prese in considerazione le caratteristiche stratigrafiche rilevate in diversi siti di stoccaggio di oli combustibili ai fini di determinare scenari compatibili con le condizioni reali.

Tali analisi stratigrafiche forniscono indicazioni sulle tipologie di terreno ma non dati quantitativi sulle caratteristiche di permeabilità. È d'obbligo notare che non è facilmente possibile determinare in maniera esatta le caratteristiche di permeabilità di un terreno specifico senza specifiche analisi e, nell'ambito delle stesse tipologie di terreno (i.e. argilloso, limoso, sabbioso, ecc.), esiste una variabilità di 1-2 ordini di grandezza dipendente da granulometria, impaccamento e eventuali eterogeneità locali.

Gli studi parametrici effettuati in questo studio cercano di tenere in considerazione questo grado di incertezza focalizzandosi su caratteristiche medie tipiche e analisi parametriche dove gli indici di permeabilità sono stati perturbati all'interno delle bande di incertezza.

Le principali fonti di informazioni relative alla permeabilità dei terreni provengono da studi idrologici. In questi studi la permeabilità è definita in termini di lunghezza su tempo dove il fluido in considerazione è acqua, applicando le dovute correzioni utilizzando le grandezze fisiche dell'acqua è possibile ottenere valori caratteristici in Darcy per diverse tipologie di suolo. I valori ottenuti sono stati utilizzati come riferimento per i terreni di interesse. Questi sono sintetizzati nella **Tabella 6**.

In questa fase dell'attività l'attenzione è stata focalizzata sulle seguenti tre tipologie di terreno:

- terreno misto argilla/sabbia fine ($\alpha = 10^{-10}\ m^2$), caratterizzato da una permeabilità piuttosto elevata, considerata come un estremo al di sopra del quale è difficile immaginare la presenza di serbatoi industriali;
- terreno argilloso non strutturato ($\alpha = 10^{-11}\ m^2$)
- terreno argilloso compatto ($\alpha = 10^{-12}\ m^2$)

Successive analisi verranno estese a terreni a permeabilità minore (fino a $\alpha = 10^{-14}\ m^2$), in modo tale da offrire un quadro più completo. Studi preliminari effettuati su terreni con tali permeabilità hanno però evidenziato tempi di penetrazione (si veda la definizione riportata nel paragrafo) estremamente alti, superiori a 12 mesi, anche per l'olio 2094 a bassa viscosità.

5.3. Evoluzione temporale dei profili di penetrazione in tre diverse tipologie di terreno: olio 2096

In analogia con quanto effettuato nelle analisi preliminari sul bio-olio, anche in questo caso lo scenario tipico ha previsto una fessura circolare di diametro pari a 20 mm e un battente di liquido pari a 15 m. Tale scelta appare ragionevole se valutata in funzione degli scopi dell'analisi del presente lavoro. Un battente di 15 m, secondo le indicazioni fornite da ENI, rappresenta un valore limite, oltre il quale è difficile immaginare che un serbatoio possa operare. Analogamente una fessura accidentale di 20 mm di diametro sul fondo è considerabile come una fessura di dimensioni significative. Di conseguenza, gli scenari che ci si aspetta possano essere incontrati nella realtà saranno ragionevolmente caratterizzati da battenti di liquido inferiori e fessure di dimensioni inferiori. Le stime relative alla velocità di penetrazione della perdita che quindi corrispondono allo scenario di riferimento qui considerato possono essere considerate delle stime per eccesso.

Le immagini in **Figura 20**, **Figura 21** e **Figura 22** descrivono l'evoluzione nello spazio e nel tempo della perdita di olio 2096 nelle tre diverse tipologie di terreno. I risultati sono relativamente semplici da interpretare: maggiore è la permeabilità del terreno, maggiore è la velocità di penetrazione dell'olio all'interno dello stesso e quindi il volume di terreno contaminato dall'olio. Dalla **Figura 23** è possibile cogliere in maniera più agevole, come la perdita risponda in modo e misura diversi alla permeabilità (o tipologia) del terreno a parità di tempo. Le curve in **Figura 24** riportano infine la profondità e il massimo diametro raggiunti dalla perdita in funzione del tempo.

5.4. Evoluzione temporale dei profili di penetrazione in tre diverse tipologie di terreno: olio 2094

Per l'olio 2094 sono state ripetute le medesime simulazioni fluidodinamiche effettuate per l'olio 2096. Ovviamente, dal momento che la viscosità dell'olio 2094 è minore (di un ordine di grandezza) di quella dell'olio 2096, ci si aspetta una velocità di penetrazione della perdita nel terreno decisamente maggiore. Le immagini in **Figura 25**, **Figura 26** e **Figura 27** descrivono l'evoluzione nello spazio e nel tempo della perdita di olio 2096 nelle tre diverse tipologie di terreno. Si presti attenzione al fatto che le dimensioni delle aree riportate sono diverse rispetto a quelle nelle figure relative all'olio 2096. Le curve in **Figura 28** riportano la profondità e il massimo diametro raggiunti dalla perdita in funzione del tempo.

5.5. Confronto relativo tra olio 2096 e olio 2094

Per comodità, in **Figura 29** le curve di massima profondità raggiunta dagli olii 2096 e 2094 sono confrontate nelle tre diverse tipologie di terreni presi in considerazione. Indipendentemente dalla permeabilità del terreno, è evidente che a parità di tempo la profondità raggiunta dall'olio 2094 (meno viscoso) è circa il doppio di quella raggiunta dall'olio 2096.

In analogia con quanto già effettuato per il bio-olio nella 4, anche per gli olii 2096 e 2094 sono stati stimati i tempi caratteristici di penetrazione, definiti come il tempo necessario alla perdita per raggiungere la profondità di riferimento di 1 m (riportati in **Tabella 8**). E' facile osservare il ruolo significativo giocato dalla permeabilità del terreno: in generale per un incremento di permeabilità di un fattore 10 si registra una diminuzione di un fattore simile anche per il tempo caratteristico di penetrazione. La viscosità dell'olio ha un effetto meno marcato: infatti, nonostante la viscosità dell'olio 2096 sia circa 10 volte maggiore di quella dell'olio 2094, il rapporto tra i corrispondenti tempi caratteristici di penetrazione è pari a un fattore ~4.

5.6. Fitting dei profili ed estrapolazione nel tempo

Dall'analisi della **Figura 24** e della **Figura 28** risulta evidente come le forme dei profili della profondità e del massimo diametro raggiunti dalla perdita siano molto simili tra loro, indipendentemente dai valori di permeabilità del terreno e viscosità dell'olio. Si è dunque cercato di individuare una forma generale di correlazione analitica in grado di consentire una stima rapida e ragionevolmente accurata della profondità e del massimo diametro raggiunto dalla perdita in funzione del tempo. L'individuazione di tale correlazione è risultata piuttosto agevole. Se infatti i punti in **Figura 24** e **Figura 28** vengono riportati su una scala bi-logaritmica, questi tendono ad assumere un andamento lineare, secondo quanto riportato in **Figura 30**. In altri termini, e possibile immaginare un andamento funzionale del tipo:

$$log_{10}(y) = Alog_{10}(t) + B \tag{40}$$

dove A e B sono i due coefficienti della correlazione, t è il tempo (in settimane) e y è la profondità oppure il massimo diametro nel terreno (in cm).

I coefficienti A e B possono essere stimati attraverso una semplice regressione lineare. La **Tabella 9** e la **Tabella 10** riportano i valori di tali coefficienti, assieme all'indice R^2 che misura la qualità della regressione lineare. Come è possibile osservare, i valori di R^2 sono molti prossimi a 1 (in ogni caso sempre maggiori di 0.99), indice del fatto che la correlazione (40) è più che adeguata per descrivere le due variabili di interesse. La correlazione (40) può essere utilizzata come strumento di estrapolazione per la stima della profondità e del massimo diametro della perdita su tempi al di là di quelli simulati attraverso il modello fluidodinamico completo.

In una fase successiva del lavoro, potrebbe essere utile individuare il legame tra i coefficienti della correlazione e la viscosità dell'olio e la permeabilità del terreno, in modo tale da avere uno strumento short-cut in grado di dare una prima stima della velocità di penetrazione della perdita semplicemente conoscendo la viscosità dell'olio e la permeabilità del terreno. Per individuare tali legami è tuttavia necessario estendere il database di prove fluidodinamiche complete ad altri valori di permeabilità del terreno e di viscosità degli olii.

In **Figura 31** viene mostrato un esempio di estrapolazione sulla distanza temporale di 1 anno, effettuata sulla base della correlazione (40), secondo i coefficienti riportati in **Tabella 9** e **Tabella 10**.

6. Serbatoi su soletta in calcestruzzo

Una valutazione specifica deve essere fatta per quei serbatoi che poggiano su una soletta in calcestruzzo. Infatti la permeabilità del cemento integro è piuttosto bassa, dell'ordine di $10^{-19} \div 10^{-16}$ m^2 per cementi esenti da fessurazioni (Wang, 1997) (Reinhardt, 1997) (Claisse, 2003) (Kosmatka, 2002), variabile in funzione del rapporto acqua/cemento utilizzato e del processo di indurimento. Sulla base delle valutazioni precedentemente fatte riguardanti terreni argillosi o sabbiosi, dove le permeabilità sono decisamente superiori (da 10^{-10} a 10^{-12} m^2) è possibile assumere che la penetrazione verticale degli oli sia molto bassa. Una estrapolazione dei dati relativi a terreni argillosi porta a stimare valori di massime profondità raggiunte a un anno dall'inizio della perdita di circa 10 o 15 cm, nel caso dell'olio 2096 e 2094 rispettivamente. In questo caso, occorre però considerare che, data la rugosità delle strutture di calcestruzzo, vengono a formarsi micro-canali tra il fondo del serbatoio e la soletta stessa, anche nel caso di perfetta collocazione del serbatoio. In tali micro-canali si ha un trasporto orizzontale dell'olio, favorito dalla bassa viscosità data l'alta temperatura che si ha sul fondo dei serbatoi, che tende quindi a raggiungere in tempi ragionevolmente brevi il bordo della soletta per poi fuoriuscire nel bacino di contenimento del serbatoio stesso, ove presente. La valutazione di tale effetto richiede la messa a punto di modelli specifici, che non sono stati sviluppati in questa prima parte del progetto, ma che potranno essere proposti ove risultasse necessario.

Occorre però tenere presente che la presenza di fratturazioni (da micro a macro fessure) può modificare significativamente, anche di diversi ordini di grandezza, le permeabilità dei calcestruzzi (Wang, 1997) (Reinhardt, 1997). Tali fessurazioni possono essere causate da stress dovuti al carico e da stress termici. La presenza di micro fessurazioni, e quindi la permeabilità del cemento, è anche legata al processo di indurimento ed al rapporto acqua/cemento adottato, che influenza la dimensione dei pori. Lo sforzo dovuto al carico può indurre ulteriori fessurazioni e portare ad un incremento delle permeabilità di diversi ordini di grandezza e, in principio, rendere maggiormente anisotropo il materiale. Va inoltre considerato che se il fluido è in grado di attaccare chimicamente il materiale (Ejeh, 2009) ciò può indurre un aumento della permeabilità (Reinhardt, 1997). Inoltre, la permeabilità del cemento a fluidi organici è anche funzione del grado di umidità presente nel cemento stesso e dalla dimensione delle molecole del fluido. Molecole di grandi dimensioni, infatti, potranno utilizzare per la permeazione nel cemento solo i pori di maggiori dimensioni. Secondo dati di letteratura, la permeabilità dei cementi viene incrementata significativamente in funzione dello stress meccanico arrivando potenzialmente a raggiungere permeabilità pari a $10^{-12} \div 10^{-11}$ m^2 (Wang, 1997) (Reinhardt, 1997), ovvero dello stesso ordine di grandezza di terreni argillosi compatti o non strutturati.

Un'ultima considerazione riguarda la possibile presenza di rotture della soletta di cemento. Le forti sollecitazioni e la loro lunga vita non possono escludere la presenza di vere e proprie macro-fessure. In tal

caso il cemento non potrebbe più essere considerato un mezzo poroso, ma occorrerebbe tenere in conto la possibilità dell'olio di scorrere e raggiungere il terreno sottostante senza significative perdite di carico.

7. Conclusioni

Lo studio condotto fino ad ora, ha consentito di valutare la profondità e la larghezza raggiunta da uno rilascio incontrollato di olio idrocarburico dal fondo di un serbatoio. I risultati hanno confermato una forte dipendenza dalla viscosità dell'olio e dalle caratteristiche del terreno. Nelle condizioni peggiori, ovvero basse viscosità e alta permeabilità del terreno, l'inquinamento del suolo può raggiungere una profondità di oltre 10 metri e un diametro massimo di poco inferiore in circa sei mesi. D'altro lato, oli più viscosi e terreni poco permeabili portano nello stesso lasso di tempo ad avere una percolazione di olio di circa un metro per una larghezza di poco inferiore. E' stata individuata anche una legge che consente di estrapolare facilmente i dati a tempi superiori, ovvero di traguardare l'effetto sulla scala per esempio di un anno, riducendo in tal modo considerevolmente i tempi per le valutazioni dell'impatto del rilascio.

Occorre però sottolineare come questi risultati siano condizionati dai modelli adottati, dalle semplificazioni introdotte e soprattutto dalle assunzioni fatte sulle proprietà dei terreni.

In particolare:

- Il modello VOF, che considera il terreno come un mezzo poroso omogeneo, è sicuramente adatto a affrontare il problema in esame, ma la sua validità andrà verificata sulla base di specifici confronti con dati sperimentali, appositamente ottenuti in condizioni controllate. Nelle prossime fasi dell'attività, è già prevista una collaborazione con la *Stazione Sperimentale dei Combustibili*, a tale scopo.
- Si è trascurato l'effetto del fenomeno di diffusione dell'olio per capillarità. Questa approssimazione è molto ragionevole per il tipo di problema in esame, dove la forza di gravità e la pressione del battente di olio contenuto nel serbatoio sono molto elevati. Una verifica verrà condotta in seguito.
- La distribuzione del profilo di temperatura all'interno del terreno andrebbe verificata, oppure definite le condizioni limite da investigare, tenendo conto che tanto maggiore è la temperatura quanto minore la viscosità dell'olio con conseguente crescita della sua capacità di penetrare il terreno.
- Variazioni delle dimensioni del foro hanno un impatto considerevole sui risultati ottenuti. D'altro lato la forma della fessurazione, assunta qui circolare, sembra avere un'influenza decisamente meno importante sui risultati attesi.
- La parte del lavoro con maggior grado di incertezza è quella relativa alla caratterizzazione del terreno. I risultati infatti hanno mostrato come la permeabilità può variare di ordini di grandezza tra suoli diversi, ma anche all'interno dello stesso tipo di terreno, sulla base delle dimensioni delle particelle elementari e della possibile presenza di cammini preferenziali. Solo un'accurata valutazione

geologica può portare a stime più corrette, che tengano anche conto dell'eventuale umidità del terreno.

- La presenza di un basamento integro e continuo in calcestruzzo armato a sostegno del serbatoio limita considerevolmente la penetrazione diretta degli idrocarburi nel terreno sottostante il serbatoio stesso. Pertanto la presenza di basamenti in cemento armato sotto i serbatoi è meritevole di uno specifico approfondimento.

8. Riferimenti bibliografici

Berberovic, E., Van Hinsberg, N., Jakirlic, S., Roisman, I., & Tropea, C. (2009). Drop impact onto a liquid layer of finite thicness: Dynamics of the cavity evolution. *Physical Review E, 79*, 036306.

Brackbill, J., Kothe, D., & Zemach, C. (1992). A Continuum Method for Modeling Surface Tension. *Journal of Computational Physics, 100*, 335-354.

Claisse, P. G. (2003). In situ measurement of the intrinsic permeability of concrete. *Magazine of Concrete Research, 55*(2), 125–132.

Ejeh, S. U. (2009). Effect of Crude Oil Spill on Compressive Strength of Concrete Materials. *Journal of Applied Sciences Research, 5*(10), 1756-1761.

Evans, C. (2013). *Modelling the 2D Infiltration of Oil in Porous Media: Including vertical percolation and lateral spreading.* MA/MSc Dissertation, King's College London.

Florides, G., & Kalogirou, S. (2005). Annual ground temperature measurements at various depths. *8th REHVA World Congress - Clima 2005.* Lausanne (Switzerland).

Halmemies, S., Gröndahl, S., Nenonen, K., & Tuhkanen, T. (2003). Estimation of the Time Periods and Processes for Penetration of Selected Spilled Oils and Fuels in Different Soils in the Laboratory. *Spill Science & Technology Bulletin, 8*(5-6), 451-465.

Hirt, C., & Nichols, B. (1981). Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics, 39*(1), 201-225.

Istat. (2010). *Andamento meteo-climatico in Italia - Anni 2000-2009.*

Jasak, H. (2006). *Numerical Solution Algorithms for Compressible Flows.* Lecture Notes for University of Zagreb.

Kalogirou, S., & G., F. (2004). Measurements of Ground Temperature at Various Depths,. *Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies.* Nottingham (UK).

Kao, C., & Hunt, J. (2001). *Journal of Environmental Engineering, 127*, 162–169.

Kasuda, T., & Archenbach, P. (1965). Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States. *ASHRAE Transactions, 71*(1).

Kosmatka, S. K. (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures (14th Edition).* Portland Cement Association.

Miller, D. (1977). *Water at the Surface of the Earth - An Introduction to Ecosystem Hydrodynamics.* Academic Press.

OpenCFD. (2016). *OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox, Programmer's Guide.*

OpenCFD. (2016). *OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox, User Guide.*

Prosperetti, A. (1981). A Motion of Two Superposed Viscous Fluids. *Physics of Fluids, 24*(7), 1217-1223.

Reinhardt, H. (1997). *Penetration and Permeability of Concrete: Barriers to organic and contaminating liquids (1st Edition).* CRC Press.

Rusche, H. (2002). *Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions.* Ph.D Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.

Ubbink, O. (1997). *Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces.* Ph.D Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.

Vitucci, G. (2013). *Analisi numerica tridimensionale dell'impatto di gocce su film liquido sottile in presenza di corrente di strato limite bifase.* Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica, Politecnico di Milano.

Wang, K. J. (1997). Permeability study of cracked concrete. *Cement and Concrete Research, 27*(3), 381-393.

Weller, H., Tabor, G., Jasak, H., & Fureby, C. (1998). A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physic, 12*(6), 620-631.

9. Lista delle Tabelle

Tabella 1. Coefficienti A e B relativi alla correlazione (32) per la stima della perdita di olio nel terreno (foro circolare con 20 mm di diametro, battente di liquido pari a 10 m, condizioni isoterme). Portata Q in l/mese e viscosità μ in cP. 38

Tabella 2. Coefficienti C e D relativi alla correlazione (33) per la stima della perdita di olio nel terreno (foro circolare con 20 mm di diametro, battente di liquido pari a 10 m, condizioni isoterme). Portata Q in l/mese e permeabilità α in m^2..... 38

Tabella 3. Coefficienti E e F relativi alla correlazione (34) per la stima della perdita di olio nel terreno (foro circolare con 20 mm di diametro, condizioni isoterme). Portata Q in l/mese e battente h in m..... 38

Tabella 4. Coefficienti alla correlazione (35) per la stima della perdita di olio nel terreno (foro circolare con 20 mm di diametro, condizioni isoterme). Viscosità dell'olio in cP e permeabilità del terreno in m^2..... 39

Tabella 5. Coefficienti utilizzati nella correlazione (39) attraverso cui la viscosità dinamica viene espressa in funzione della temperatura..... 39

Tabella 6. Classificazione dei terreni sulla base dei valori medi di permeabilità..... 39

Tabella 7. Sintesi delle prove sperimentali di caratterizzazione degli olii forniti da ENI, effettuate dalla Stazione Sperimentale dei Combustibili..... 40

Tabella 8. Tempo caratteristico di penetrazione (definito come il tempo necessario per raggiungere la profondità di 1 m) per l'olio 2096 e l'olio 2094 nelle tre diverse tipologie di terreno. 41

Tabella 9. Coefficienti A e B e coefficiente di determinazione R^2 relativi alla correlazione (40) per la stima della massima profondità raggiunta dalla perdita nel tempo..... 41

Tabella 10. Coefficienti A e B e coefficiente di determinazione R^2 relativi alla correlazione (40) per la stima del massimo diametro raggiunto dalla perdita nel tempo..... 41

	A	B
Terreno misto argilloso/sabbia fine $(\boldsymbol{\alpha = 10^{-10}\ m^2})$	-0.9936	6.0536
Terreno argilloso compatto $(\boldsymbol{\alpha = 10^{-12}\ m^2})$	-0.9521	4.0136
Argilla/calcare $(\boldsymbol{\alpha = 10^{-14}\ m^2})$	-0.9596	2.2679

Tabella 1. *Coefficienti A e B relativi alla correlazione* (32) *per la stima della perdita di olio nel terreno (foro circolare con 20 mm di diametro, battente di liquido pari a 10 m, condizioni isoterme). Portata Q in l/mese e viscosità μ in cP.*

	C	D
Bassa viscosità $(\boldsymbol{\mu = 100\ cP})$	-0.9147	13.174
Media viscosità $(\boldsymbol{\mu = 1000\ cP})$	-0.9504	12.565
Alta viscosità $(\boldsymbol{\mu = 10000\ cP})$	-0.8977	11.033

Tabella 2. *Coefficienti C e D relativi alla correlazione* (33) *per la stima della perdita di olio nel terreno (foro circolare con 20 mm di diametro, battente di liquido pari a 10 m, condizioni isoterme). Portata Q in l/mese e permeabilità α in m^2.*

Viscosità [m]	Permeabilità [m^2]	E	F
100	**10^{-10}**	1156.1	98.95
1000	**10^{-10}**	117.4	5.19
10000	**10^{-10}**	11.85	2.29
100	**10^{-12}**	12.76	4.402
1000	**10^{-12}**	1.341	0.2774
10000	**10^{-12}**	0.1526	0.1247
100	**10^{-14}**	0.2131	0.4624
1000	**10^{-14}**	0.01675	0.0210
10000	**10^{-14}**	0.00267	0.0048

Tabella 3. *Coefficienti E e F relativi alla correlazione* (34) *per la stima della perdita di olio nel terreno (foro circolare con 20 mm di diametro, condizioni isoterme). Portata Q in l/mese e battente h in m.*

A_E	B_E	A_F	B_F
-0.9423	14.312	-0.6657	9.7546

Tabella 4. *Coefficienti alla correlazione (35) per la stima della perdita di olio nel terreno (foro circolare con 20 mm di diametro, condizioni isoterme). Viscosità dell'olio in cP e permeabilità del terreno in m^2.*

	A	B	C	D
Olio 2096	-47.839	10000	0.0608	0
Olio 2094	-40.38	8310	0.0518	0
Bio-olio	-8.90	3500	0	0

Tabella 5. *Coefficienti utilizzati nella correlazione* (39) *attraverso cui la viscosità dinamica viene espressa in funzione della temperatura.*

Tipo	**permeabilità (md)**		**permeabilità (m^2)**	
	min	**max**	**min**	**max**
Sabbia grossolana	10	50	10^{-8}	$5\cdot10^{-8}$
Sabbia fine	1	3	10^{-9}	$3\cdot10^{-9}$
Misto argilla/sabbia fine	0.5	2	$5\cdot10^{-10}$	$2\cdot10^{-9}$
Sabbia ultra-fine	0.5	0.5	$5\cdot10^{-10}$	$5\cdot10^{-10}$
Argilla non strutturata	0.02	0.2	$2\cdot10^{-11}$	$2\cdot10^{-10}$
Argilla compatta	0.001	0.002	10^{-12}	$2\cdot10^{-12}$
Argilla/calcare	10^{-6}	10^{-5}	10^{-15}	10^{-14}
Calcestruzzo integro	10^{-10}	10^{-7}	10^{-19}	10^{-16}
Calcestruzzo microfratturato	0.001	0.01	10^{-12}	10^{-11}

Tabella 6. *Classificazione dei terreni sulla base dei valori medi di permeabilità.*

				Denominazione Campione											
				4163 O.C. Denso BTZ	**4164 Bunker F.O. 380**	**T 3222**	**T3131**	**T3220 – BK 180**	**Livorno 124 F.O. 500 Doganale G**	**Livorno 149 BOTTOM LCF**	**Livorno 152 Residuo Atm. G**	**Taranto BTZ - serbatoio n. 3257**			**Bitume**
		Metodo	**U.d.m.**	**2094**	**2095**	**2096**	**2097**	**2098**	**2472**	**2473**	**2474**	**2476**			**3097**
Pt,. scorrimento			°C	-12	-15	3	0	-18	-9	-9	-9	-12			
T cristallizzazione			°C	29.67	38.24	47.43	44.01	38.17							
v @ T crist				387	1160	1008	541	335							
Viscosità		ISO 3104													
130	°C		mm^2/s												471.2
120	°C														815.1
100	°C														2980
80	°C			26.67	76.52	117.4	62.49	41.71	5 6.65	61,91	81.72	56.99			
70	°C			40.52	119.4	193.4	98.14	61.65	88.07	98.44	129.5	86.64			
60	°C			6 5.56	199.6	355.7	171.3	98.47	149	170.8	228.9	146.4			
50	°C			115.7	362.2	744.5	320.9	165.7	270.8	325.3	243.9	274.6			
30	°C			505.7				610.8							
Viscosità Engler		Calcolata													
50	°C		°E	15.27	47.81	98.27	42.36	21.87	35.74	42.94	32.19	36.25			
v=At^-B	A			1.00E+07	2.00E+08	4.00E+09	3.00E+08	7.00E+06	1.00E+08	3.00E+08	3.00E+06	1.00E+08			
	B			2.997	3.309	3.937	3.495	2.731	3.336	3.535	2.408	3.356			
Densità		ISO 12185											ASTM D70	Kg/m^3	
25	°C		Kg/m^3												1028
50	°C			973.6	952.6	924.6	958.4	931.7	959.3	965.7	945.2	913.1			
65	°C			963.8	949.9	915.2	948.7	921.7	950.5	956.5	935.9	904			
Composizione															
C		ASTM D5291		87	85.9	86.2	86.4	85							
H		ASTM D5291		10.2	10.5	12	10.7	11.5							
N		ASTM D5291		0.38	0.47	0.15	0.49	0.23							
S		ASTM D5291		1.43	2.92	0.97	1.97	2.98							
Tot				99.01	99.79	99.32	99.56	99.71							

Tabella 7. *Sintesi delle prove sperimentali di caratterizzazione degli olii forniti da ENI, effettuate dalla Stazione Sperimentale dei Combustibili.*

Tipo di terreno	**Tempo caratteristico (settimane)**	
	Olio 2096	**Olio 2094**
Terreno argilloso compatto	27.3	6.21
Terreno argilloso non strutturato	2.60	0.58
Terreno misto argilloso/sabbia fine	0.23	0.06

Tabella 8. *Tempo caratteristico di penetrazione (definito come il tempo necessario per raggiungere la profondità di 1 m) per l'olio 2096 e l'olio 2094 nelle tre diverse tipologie di terreno.*

	Olio 2096			**Olio 2094**		
	A	**B**	**R^2**	**A**	**B**	**R^2**
Terreno argilloso compatto	0.3686	1.471	0.9992	0.4119	1.673	0.9995
Terreno argilloso non strutturato	0.3713	1.849	0.9991	0.3783	2.089	0.9989
Terreno misto/argilloso sabbia fine	0.3371	2.215	0.9991	0.3861	2.470	0.9982

Tabella 9. *Coefficienti A e B e coefficiente di determinazione R^2 relativi alla correlazione (40) per la stima della massima profondità raggiunta dalla perdita nel tempo.*

	Olio 2096			**Olio 2094**		
	A	**B**	**R^2**	**A**	**B**	**R^2**
Terreno argilloso compatto	0.3008	1.725	0.9998	0.2958	1.883	0.9993
Terreno argilloso non strutturato	0.3342	2.022	0.9994	0.3379	2.183	0.9997
Terreno misto/argilloso sabbia fine	0.3501	2.364	0.9989	0.3378	2.525	0.9994

Tabella 10. *Coefficienti A e B e coefficiente di determinazione R^2 relativi alla correlazione (40) per la stima del massimo diametro raggiunto dalla perdita nel tempo.*

10. Lista delle Figure

Figura 1. Metodologie di individuazione dell'interfaccia (Vitucci, 2013). 45
Figura 2. Scenario tipo adottato per le simulazioni fluidodinamiche complete. Il dominio di calcolo è rappresentato dall'area rettangolare arancione. Le dimensioni del serbatoio, del foro e del terreno non sono in scala. Le lunghezze Lx e Lz sono state assunte pari a 6 m e 5 m, rispettivamente. 45
Figura 3. Variazione stagionale delle temperature di un terreno presso Belgrado (Serbia) [https://it.wikipedia.org/wiki/Propriet%C3%A0_fisiche_del_terreno]. 46
Figura 4. Variazione della temperatura del terreno situato presso Belgrado nel mese di Agosto [https://it.wikipedia.org/wiki/Propriet%C3%A0_fisiche_del_terreno]. 46
Figura 5. Temperatura media annua in Italia: Report Istat Andamento meteo-climatico in Italia Anni 2000-2009. [https://www.istat.it/it/files//2011/01/testointegrale20100401.pdf]. 46
Figura 6. Struttura di OpenFOAM [https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v4-introduction/]. 47
Figura 7. Evoluzione della perdita di un olio con viscosità pari a 1000 cP in un terreno misto argilloso-sabbia fine ($\alpha = 10 - 10\, m2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 10 m, condizioni isoterme. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 120x90 cm. La linea bianca tratteggiata rappresenta il semicerchio avente per raggio la massima profondità raggiunta dalla perdita. 47
Figura 8. Perdita di olio in funzione della viscosità per tre diverse tipologie di terreno. Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 10 m, condizioni isoterme. 48
Figura 9. Perdita di olio in funzione del battente di liquido per diverse viscosità e permeabilità del terreno. Foro circolare (20 mm di diametro), condizioni isoterme. 49
Figura 10. Coefficienti E e F relativi alla correlazione (34) per la stima della perdita di olio nel terreno (foro circolare con 20 mm di diametro, condizioni isoterme) riportati in funzione del rapporto tra viscosità dell'olio (in cP) e permeabilità del terreno (in m^2). 49
Figura 11. Profondità massima raggiunta dallo sversamento di olio in funzione del tempo sulla base della correlazione (37) (foro circolare con 20 mm di diametro, condizioni isoterme) nell'ipotesi di un battente di liquido pari a 10 m. 50
Figura 12. Profilo di viscosità per il bio-olio in funzione della coordinata spaziale misurata in direzione verticale lungo il terreno (affondamento). 50
Figura 13. Sversamento di bio-olio in un terreno sabbioso ad alta permeabilità (10^{-9} m^2) dopo circa 2 h. Foro circolare con 20 mm di diametro, condizioni isoterme, battente di liquido pari a 10 m. 51
Figura 14. Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di bio-olio in tre diverse tipologie di terreno sabbioso in funzione del tempo. 52
Figura 15. Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di bio-olio nel terreno sabbioso ad alta permeabilità (10^{-9} m^2). Allo scopo di analizzare l'impatto della viscosità del bio-olio sullo sversamento, la viscosità del bio-olio (correlazione (38)) è stata moltiplicata per un fattore 10, 100 oppure 1000. 52
Figura 16. Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di bio-olio nel terreno sabbioso ad alta permeabilità (10^{-9} m^2) riportati in funzione del tempo caratteristico di penetrazione τ. Allo scopo di analizzare

l'impatto della viscosità del bio-olio sullo sversamento, la viscosità del bio-olio (correlazione (38)) è stata moltiplicata per un fattore 10, 100 oppure 1000. 53

Figura 17. Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di bio-olio nel terreno sabbioso ad alta permeabilità (10^{-9} m^2) in funzione del tempo. Allo scopo di evidenziare l'analogia viscosità/permeabilità i valori di riferimento di queste due grandezze sono stati moltiplicati e divisi, rispettivamente, di un fattore 10. 54

Figura 18. Andamento della viscosità degli olii 2096 e 2094 con la temperatura. I simboli rappresentano i dati sperimentali (secondo le misure effettuate presso la Stazione Sperimentale dei Combustibili); le linee corrispondono invece alla correlazione (39), i cui coefficienti sono riportati nella Tabella 5. 54

Figura 19. Profili di viscosità per gli olii 2096 e 2094 in funzione della coordinata spaziale misurata in direzione verticale lungo il terreno (affondamento). 55

Figura 20. Evoluzione della perdita di olio 2096 in un terreno argilloso compatto ($\alpha = 10 - 12\ m2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 200x150 cm. 55

Figura 21. Evoluzione della perdita di olio 2096 in un terreno argilloso non strutturato ($\alpha = 10 - 11\ m2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 400x250 cm. 56

Figura 22. Evoluzione della perdita di olio 2096 in un terreno misto argilloso/sabbia fine ($\alpha = 10 - 10\ m2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 600x400 cm. 56

Figura 23. Evoluzione della perdita di olio 2096 in tre diverse tipologie di terreno. Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 600x400 cm. 57

Figura 24. Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di olio 2096 nelle tre diverse tipologie di terreno in funzione del tempo. 57

Figura 25. Evoluzione della perdita di olio 2094 in un terreno argilloso compatto ($\alpha = 10 - 12\ m2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 300x200 cm. 58

Figura 26. Evoluzione della perdita di olio 2094 in un terreno argilloso non strutturato ($\alpha = 10 - 11\ m2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 600x400 cm. 58

Figura 27. Evoluzione della perdita di olio 2094 in un terreno misto argilloso/sabbia fine ($\alpha = 10 - 10\ m2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 600x400 cm. 59

Figura 28. Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di olio 2094 nelle tre diverse tipologie di terreno in funzione del tempo. 59

Figura 29. Profondità massima raggiunta dalla perdita in funzione del tempo nelle tre diverse tipologie di terreno. Confronto tra l'olio 2096 e l'olio 2094. 60

Figura 30. Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di olio 2096 (sinistra) e olio 2094 (destra) nelle tre diverse tipologie di terreno in funzione del tempo. 61
Figura 31. Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di olio 2096 (sinistra) e olio 2094 (destra) nelle tre diverse tipologie di terreno in funzione del tempo. I simboli rappresentano i valori ottenuti attraverso le simulazioni fluidodinamiche; le linee corrispondono invece alla correlazione analitica (40). .. 62

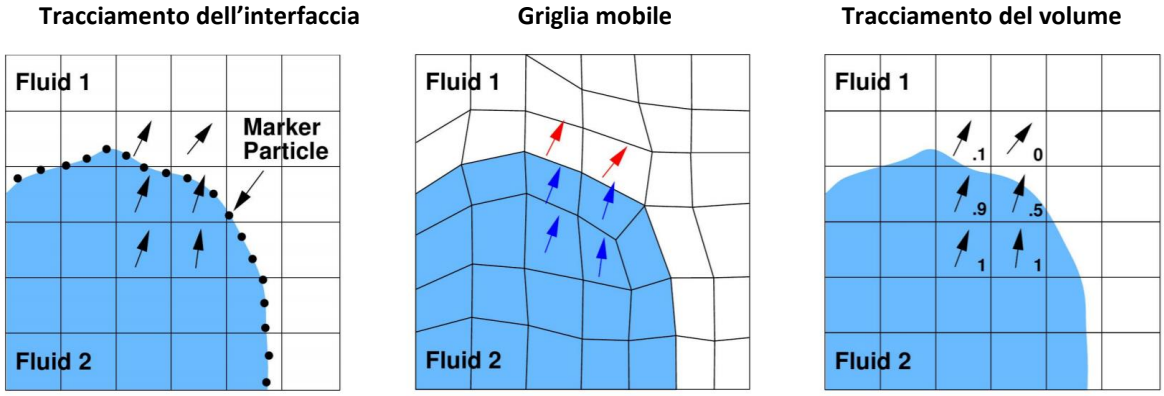


Figura 1. *Metodologie di individuazione dell'interfaccia (Vitucci, 2013).*

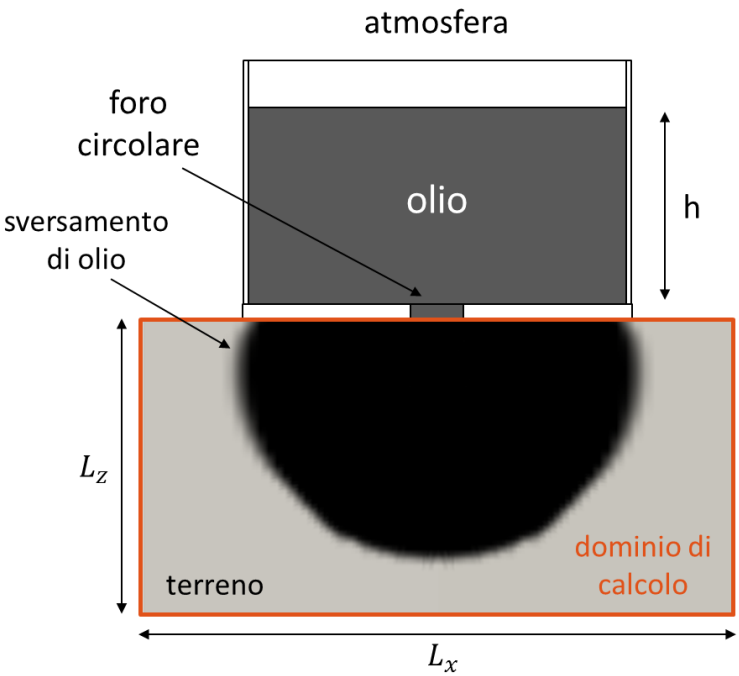


Figura 2. *Scenario tipo adottato per le simulazioni fluidodinamiche complete. Il dominio di calcolo è rappresentato dall'area rettangolare arancione. Le dimensioni del serbatoio, del foro e del terreno non sono in scala. Le lunghezze L_x e L_z sono state assunte pari a 6 m e 5 m, rispettivamente.*

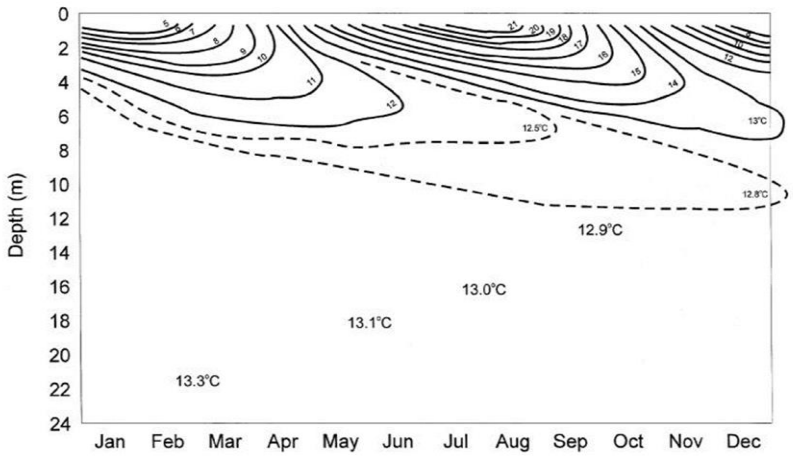


Figura 3. *Variazione stagionale delle temperature di un terreno presso Belgrado (Serbia) [https://it.wikipedia.org/wiki/Propriet%C3%A0_fisiche_del_terreno].*

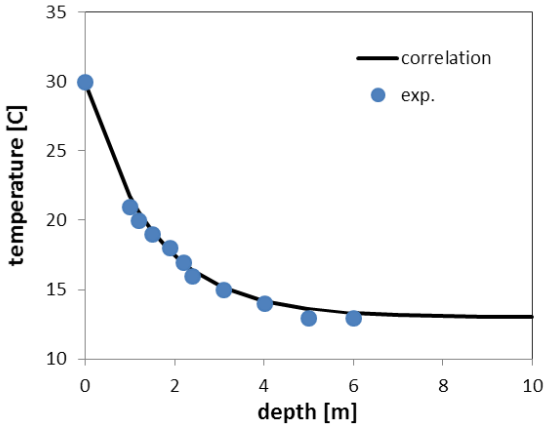


Figura 4. *Variazione della temperatura del terreno situato presso Belgrado nel mese di Agosto [https://it.wikipedia.org/wiki/Propriet%C3%A0_fisiche_del_terreno].*

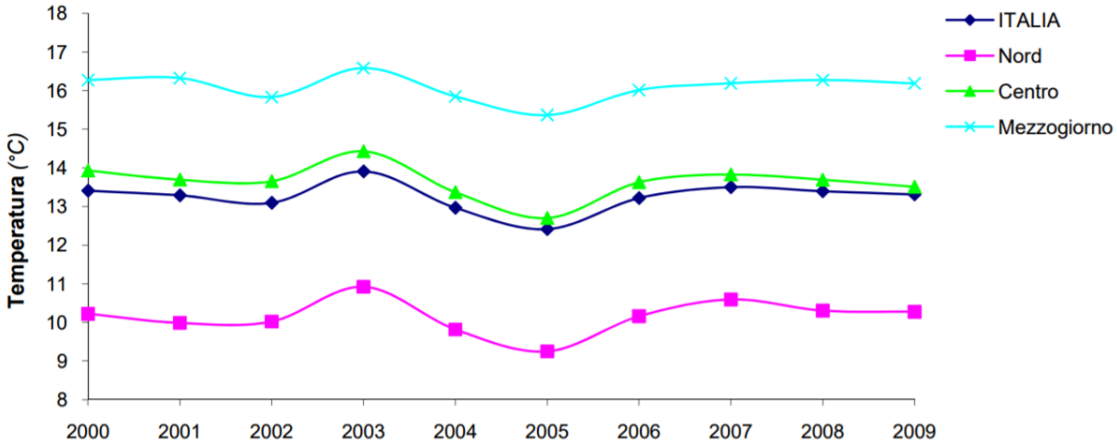


Figura 5. *Temperatura media annua in Italia: Report Istat Andamento meteo-climatico in Italia Anni 2000-2009. [https://www.istat.it/it/files//2011/01/testointegrale20100401.pdf].*

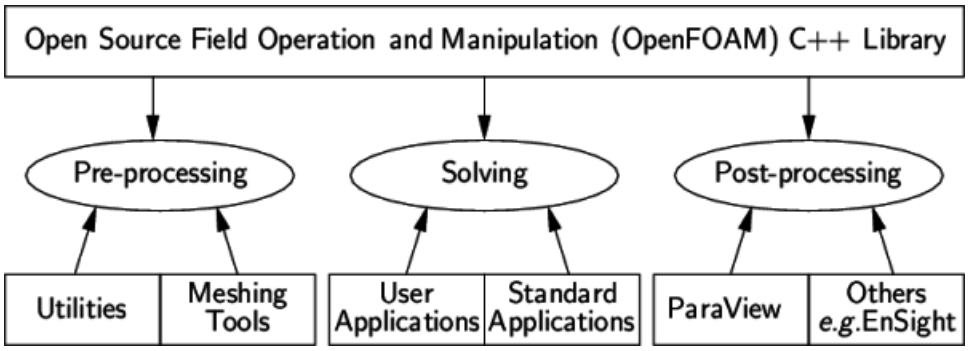


Figura 6. *Struttura di OpenFOAM [https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v4-introduction/].*

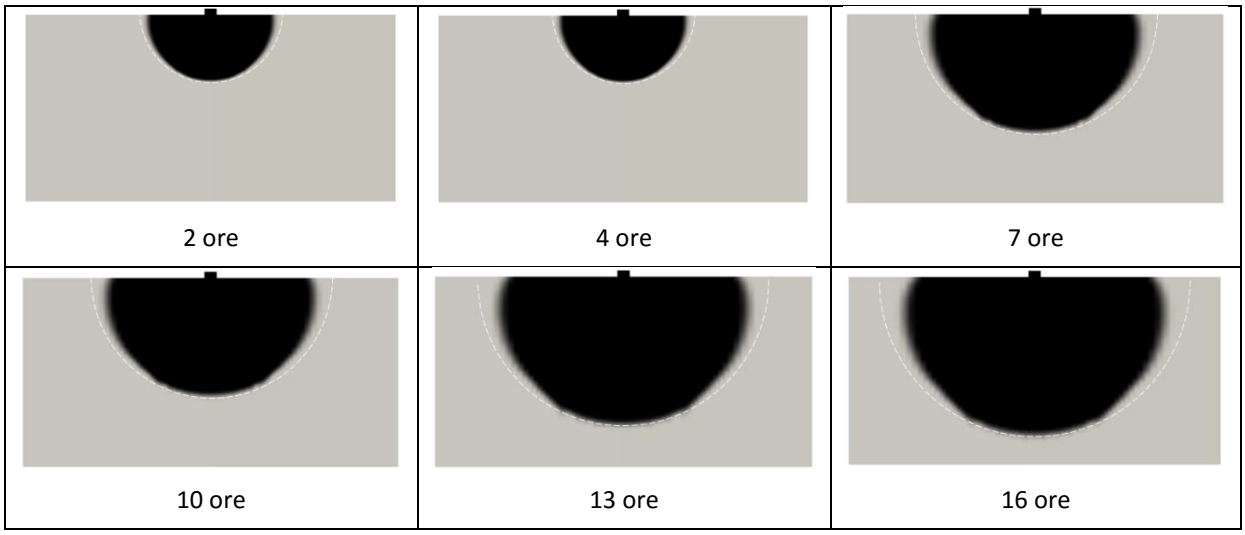


Figura 7. *Evoluzione della perdita di un olio con viscosità pari a 1000 cP in un terreno misto argilloso-sabbia fine ($\alpha = 10^{-10}\ m^2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 10 m, condizioni isoterme. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 120x90 cm. La linea bianca tratteggiata rappresenta il semicerchio avente per raggio la massima profondità raggiunta dalla perdita.*

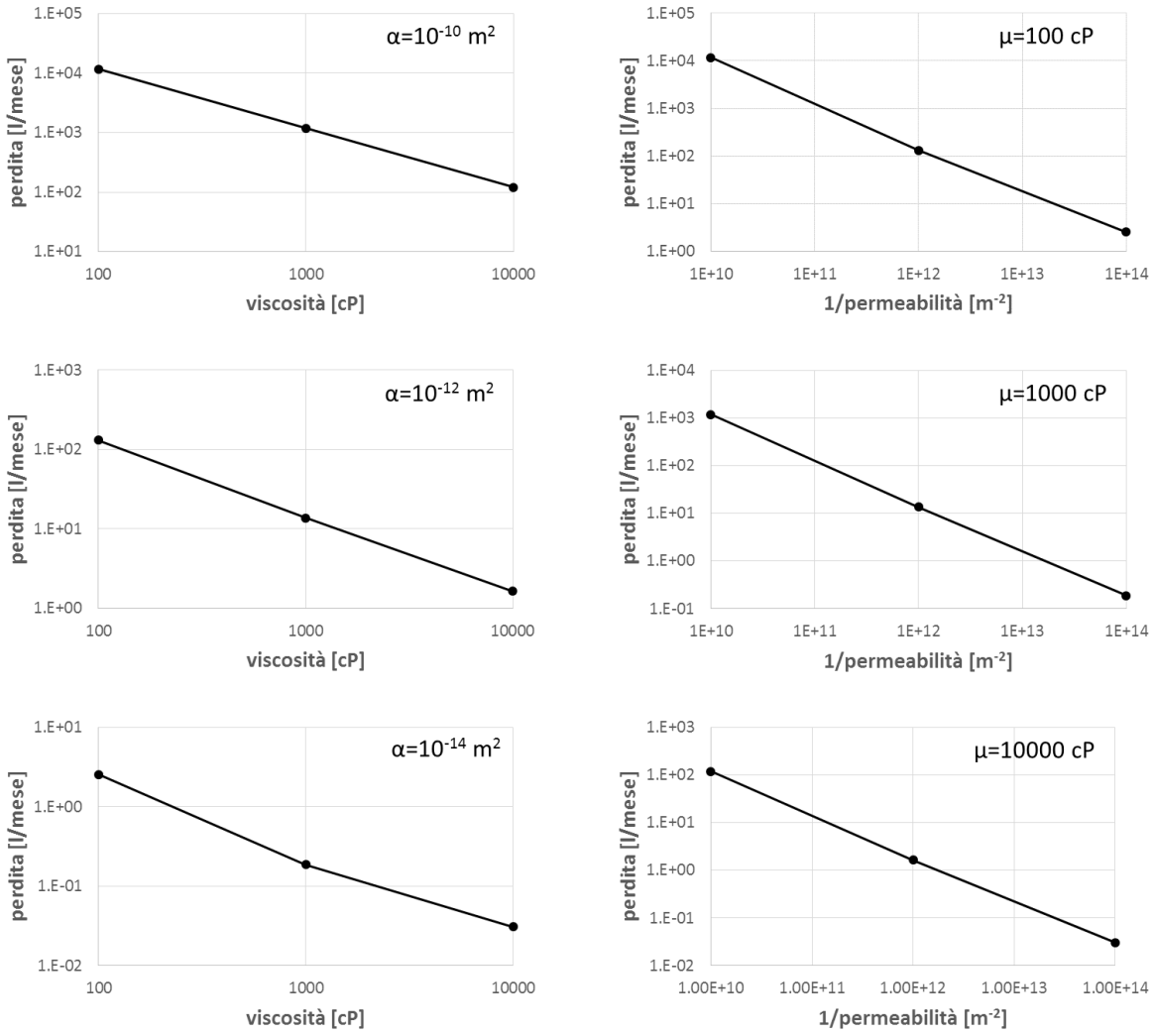


Figura 8. *Perdita di olio in funzione della viscosità per tre diverse tipologie di terreno. Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 10 m, condizioni isoterme.*

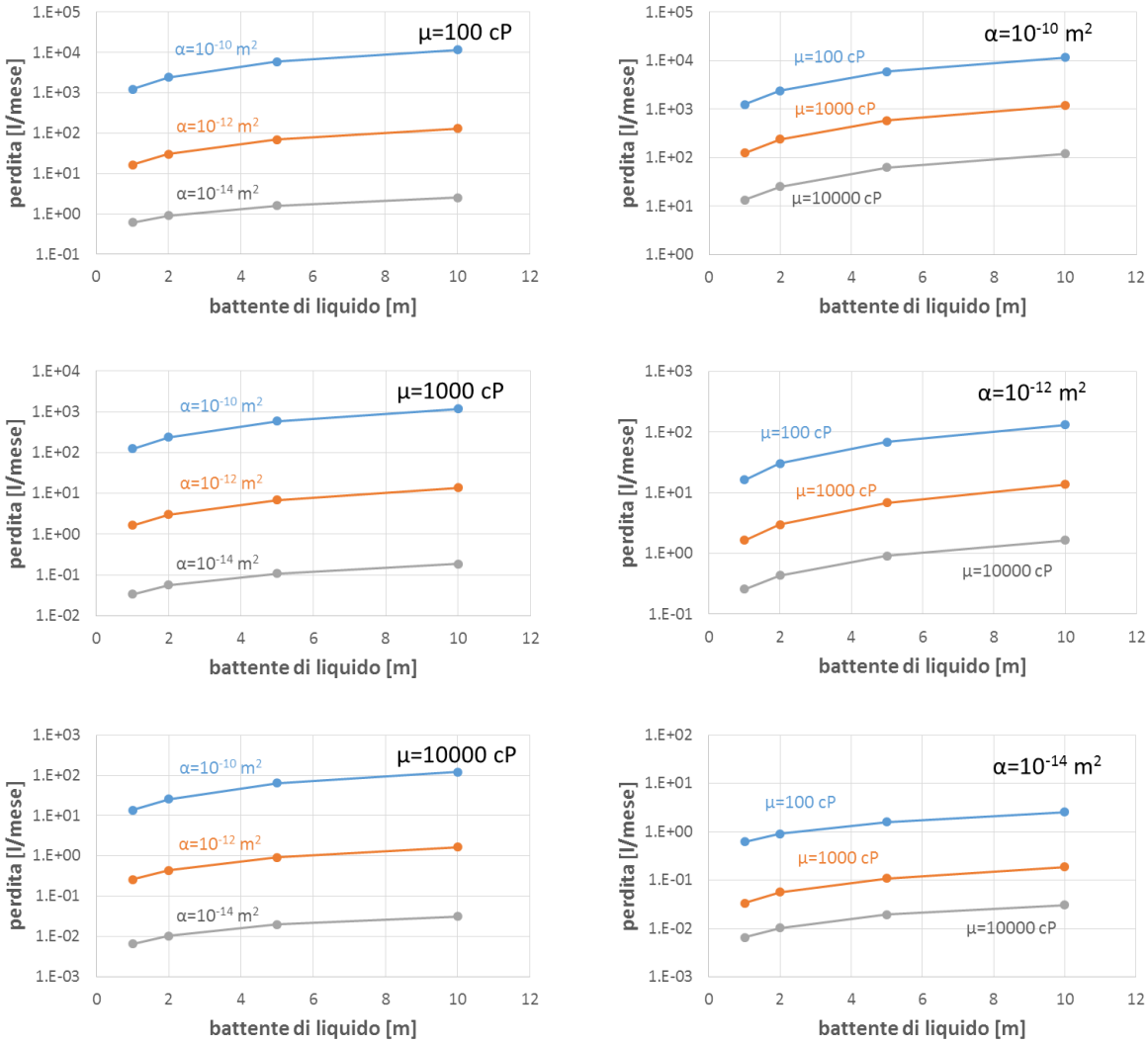


Figura 9. *Perdita di olio in funzione del battente di liquido per diverse viscosità e permeabilità del terreno. Foro circolare (20 mm di diametro), condizioni isoterme.*

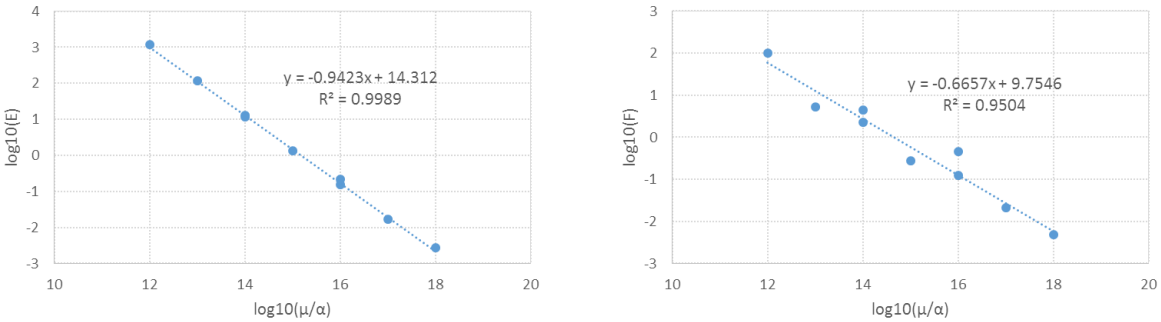


Figura 10. *Coefficienti E e F relativi alla correlazione* (34) *per la stima della perdita di olio nel terreno (foro circolare con 20 mm di diametro, condizioni isoterme) riportati in funzione del rapporto tra viscosità dell'olio (in cP) e permeabilità del terreno (in m²).*

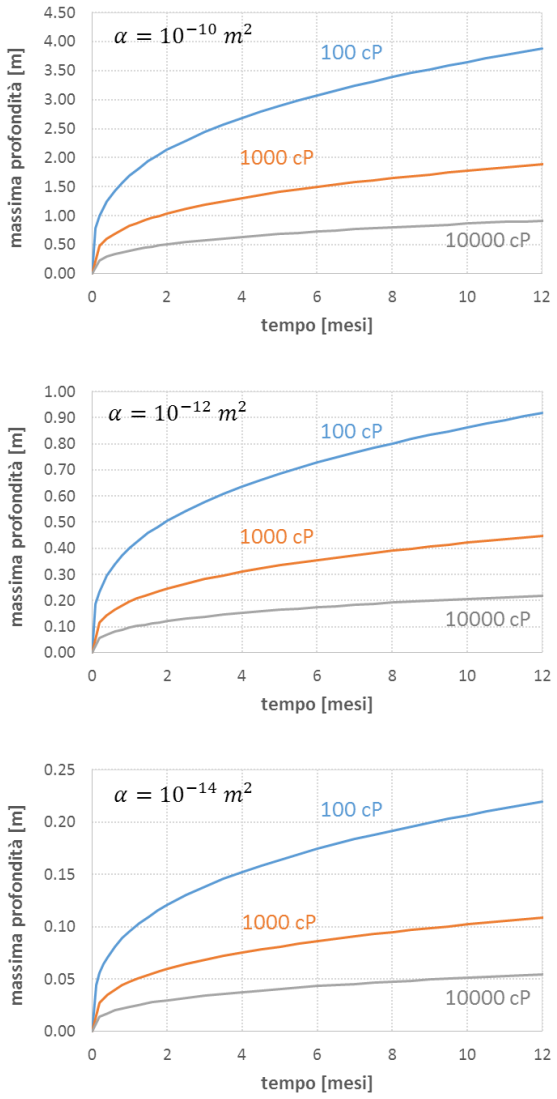


Figura 11. *Profondità massima raggiunta dallo sversamento di olio in funzione del tempo sulla base della correlazione* (37) *(foro circolare con 20 mm di diametro, condizioni isoterme) nell'ipotesi di un battente di liquido pari a 10 m.*

Figura 12. *Profilo di viscosità per il bio-olio in funzione della coordinata spaziale misurata in direzione verticale lungo il terreno (affondamento).*

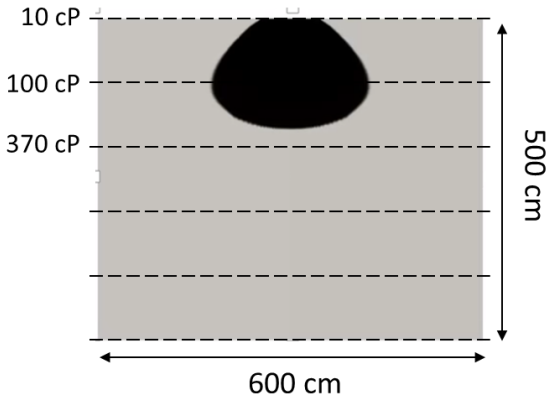


Figura 13. *Sversamento di bio-olio in un terreno sabbioso ad alta permeabilità (10^{-9} m^2) dopo circa 2 h. Foro circolare con 20 mm di diametro, condizioni isoterme, battente di liquido pari a 10 m.*

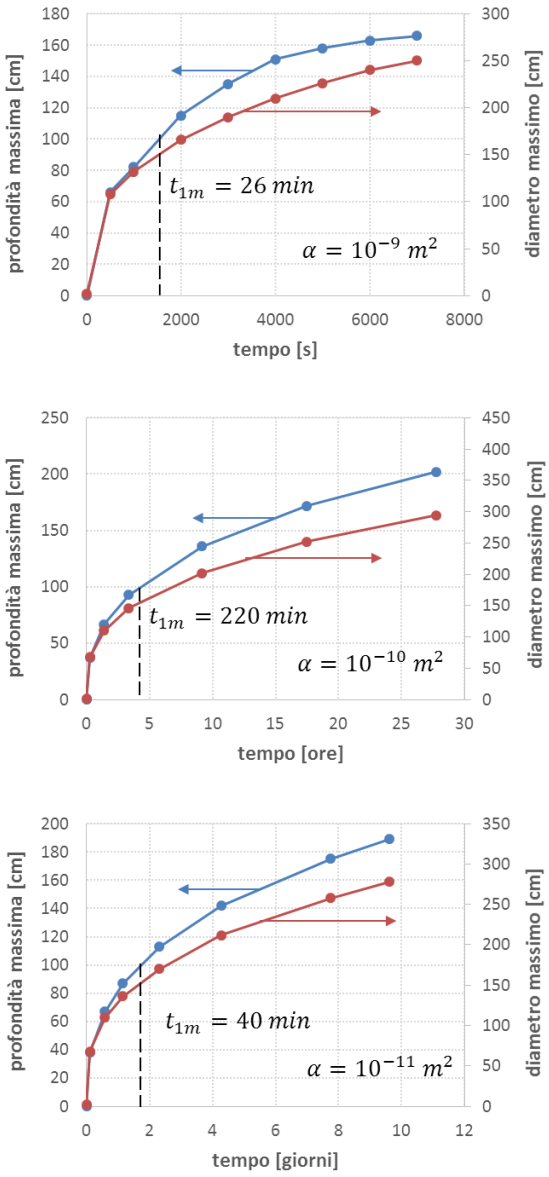


Figura 14. *Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di bio-olio in tre diverse tipologie di terreno sabbioso in funzione del tempo.*

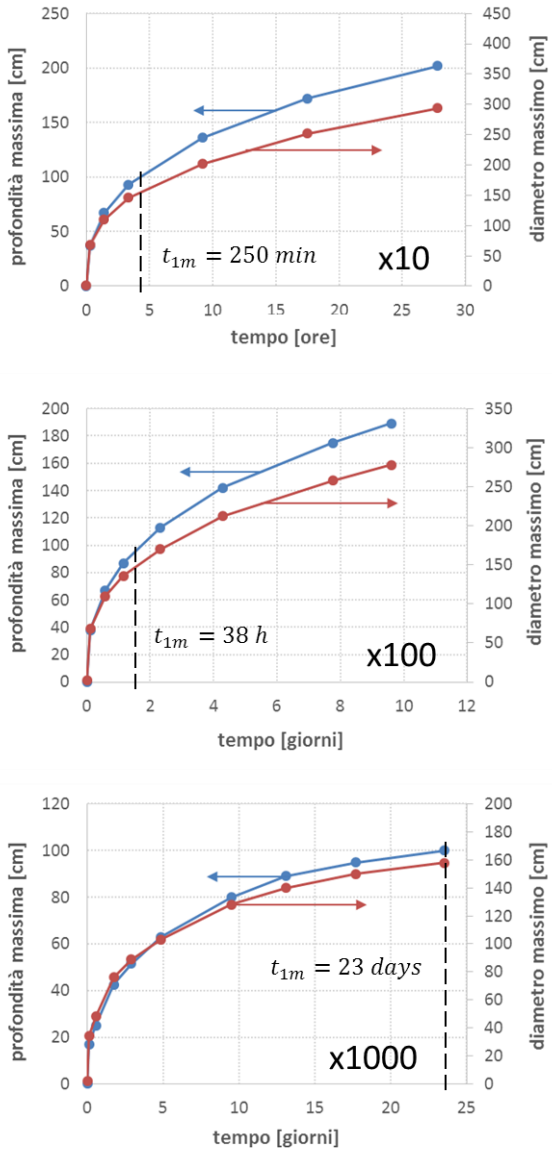


Figura 15. *Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di bio-olio nel terreno sabbioso ad alta permeabilità (10^{-9} m^2). Allo scopo di analizzare l'impatto della viscosità del bio-olio sullo sversamento, la viscosità del bio-olio (correlazione (38)) è stata moltiplicata per un fattore 10, 100 oppure 1000.*

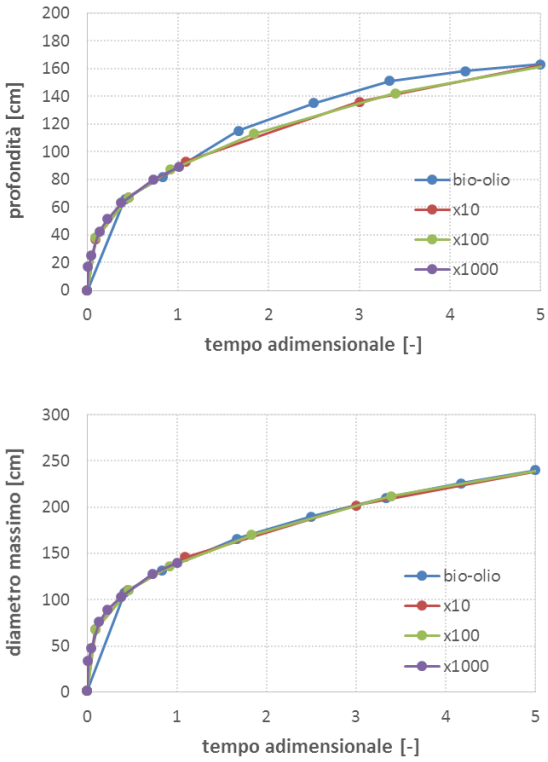


Figura 16. *Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di bio-olio nel terreno sabbioso ad alta permeabilità (10^{-9} m^2) riportati in funzione del tempo caratteristico di penetrazione τ. Allo scopo di analizzare l'impatto della viscosità del bio-olio sullo sversamento, la viscosità del bio-olio (correlazione (38)) è stata moltiplicata per un fattore 10, 100 oppure 1000.*

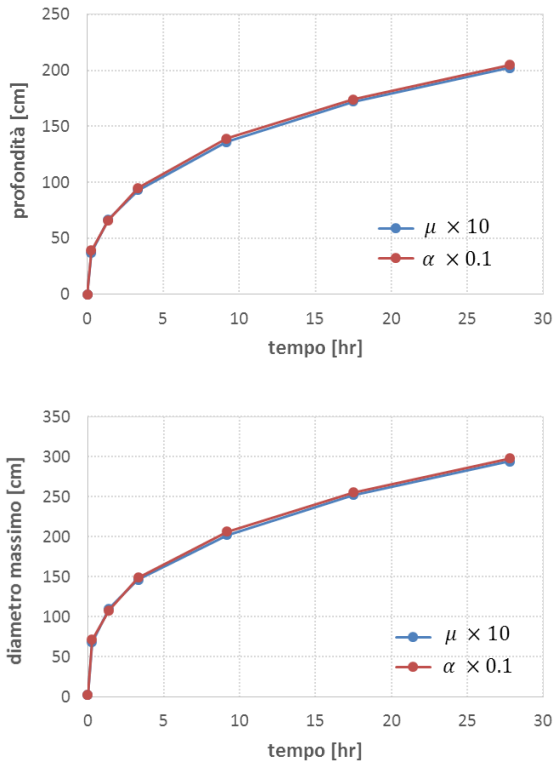


Figura 17. *Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di bio-olio nel terreno sabbioso ad alta permeabilità (10^{-9} m^2) in funzione del tempo. Allo scopo di evidenziare l'analogia viscosità/permeabilità i valori di riferimento di queste due grandezze sono stati moltiplicati e divisi, rispettivamente, di un fattore 10.*

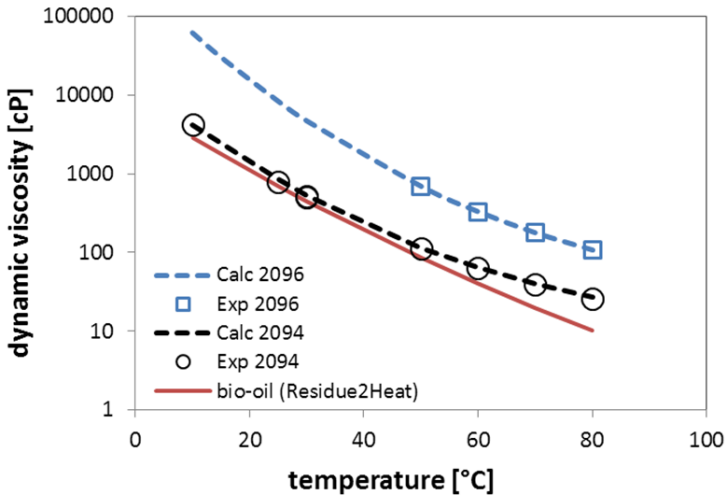


Figura 18. *Andamento della viscosità degli olii 2096 e 2094 con la temperatura. I simboli rappresentano i dati sperimentali (secondo le misure effettuate presso la Stazione Sperimentale dei Combustibili); le linee corrispondono invece alla correlazione (39), i cui coefficienti sono riportati nella Tabella 5.*

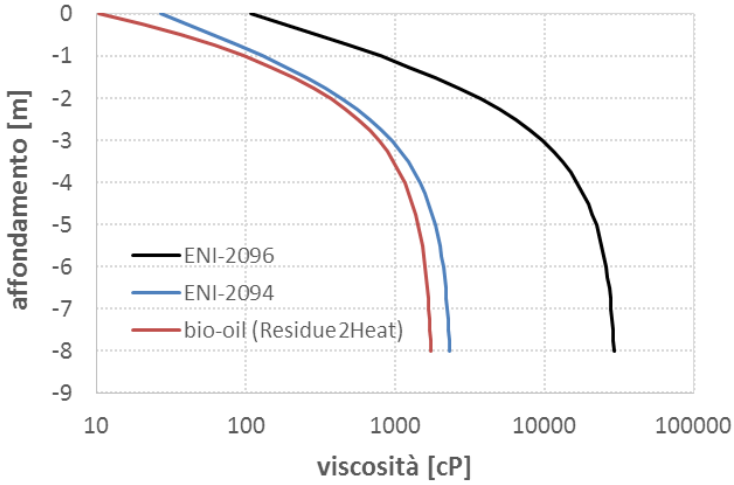


Figura 19. *Profili di viscosità per gli olii 2096 e 2094 in funzione della coordinata spaziale misurata in direzione verticale lungo il terreno (affondamento).*

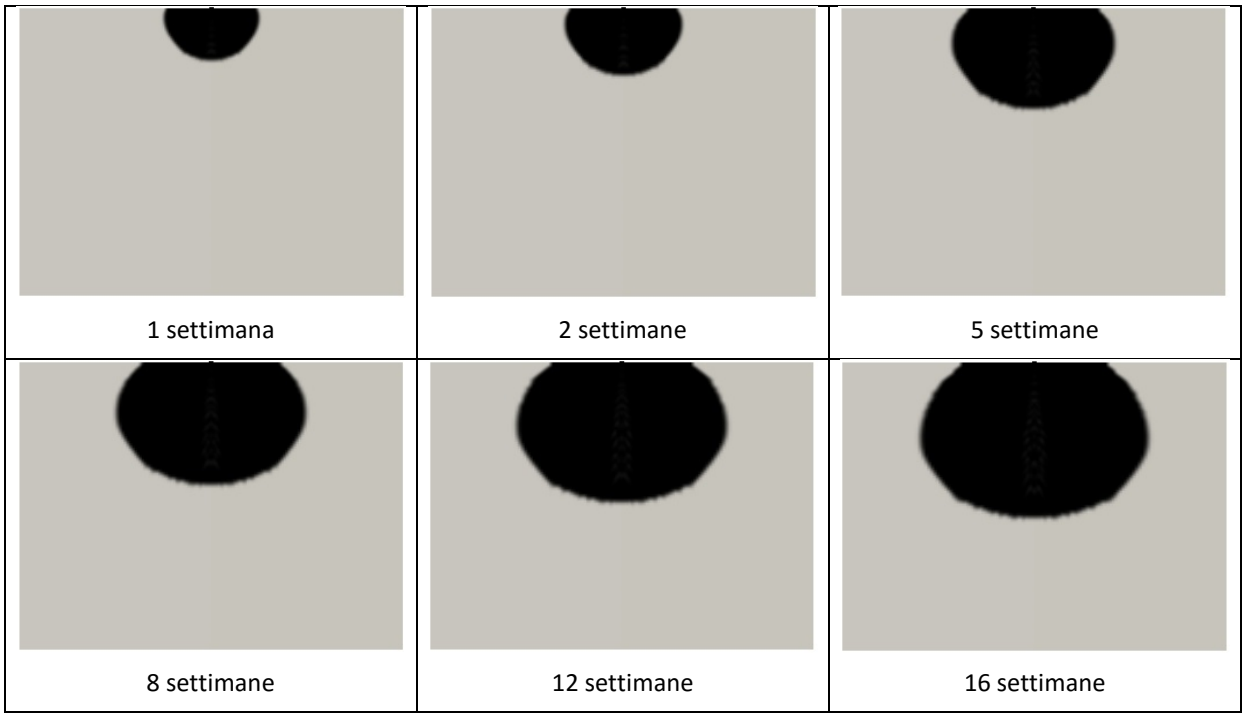


Figura 20. *Evoluzione della perdita di olio 2096 in un terreno argilloso compatto ($\alpha = 10^{-12}\ m^2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 200x150 cm.*

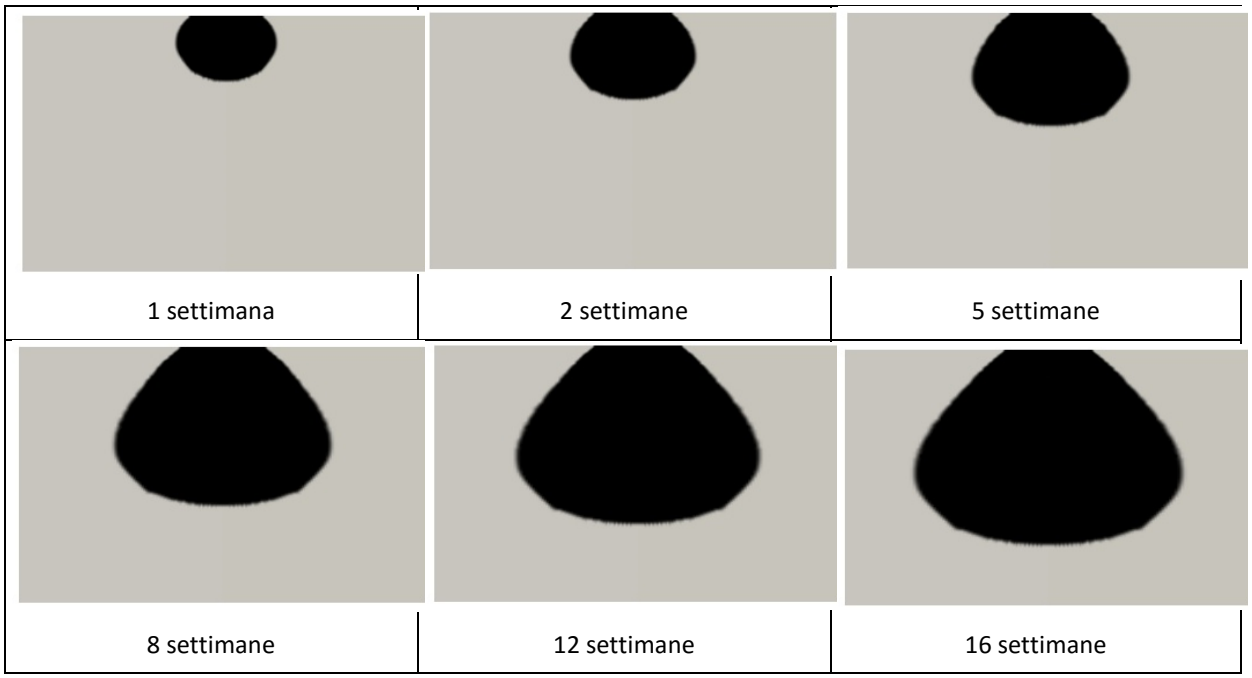


Figura 21. *Evoluzione della perdita di olio 2096 in un terreno argilloso non strutturato ($\alpha = 10^{-11}\ m^2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 400x250 cm.*

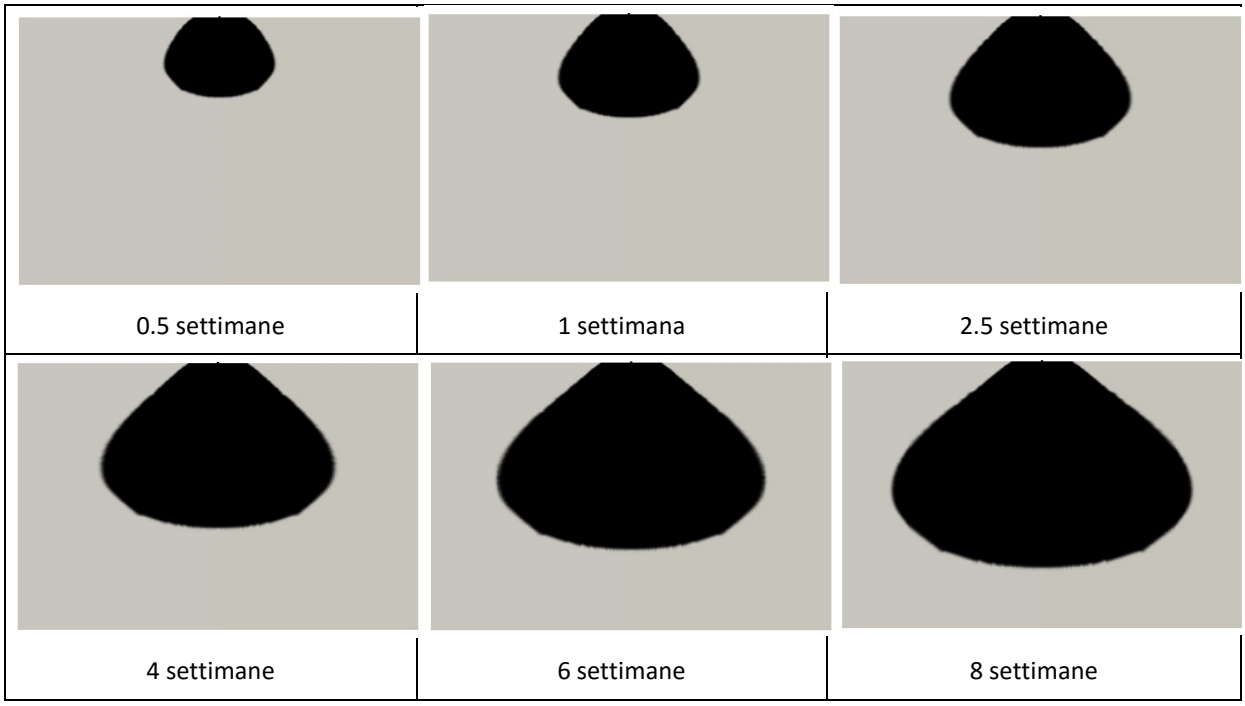


Figura 22. *Evoluzione della perdita di olio 2096 in un terreno misto argilloso/sabbia fine ($\alpha = 10^{-10}\ m^2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 600x400 cm.*

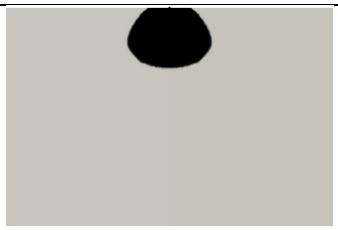
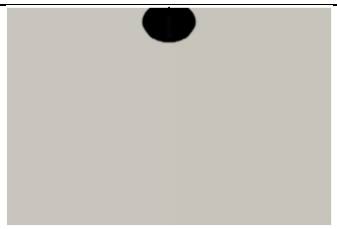
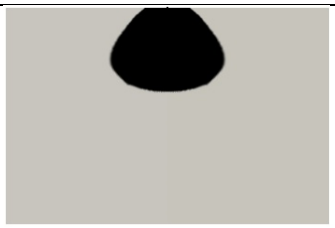
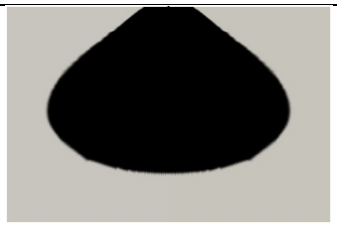
	Terreno argilloso compatto $\alpha = 10^{-12}\ \mathrm{m}^2$	Terreno argilloso non strutturato $\alpha = 10^{-11}\ \mathrm{m}^2$	Terreno argilloso/sabbia fine $\alpha = 10^{-10}\ \mathrm{m}^2$
4 settimane			
8 settimane			

Figura 23. *Evoluzione della perdita di olio 2096 in tre diverse tipologie di terreno. Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 600x400 cm.*

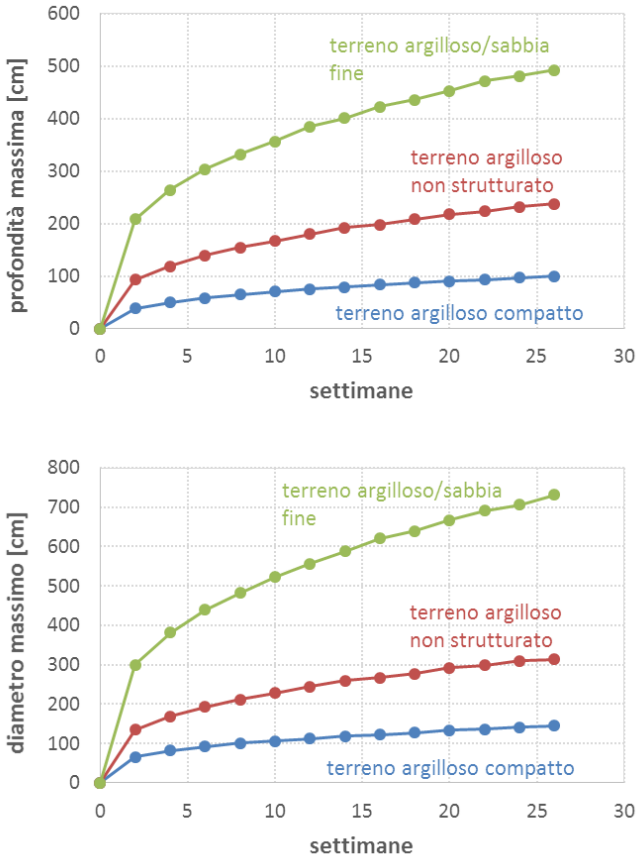


Figura 24. *Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di olio 2096 nelle tre diverse tipologie di terreno in funzione del tempo.*

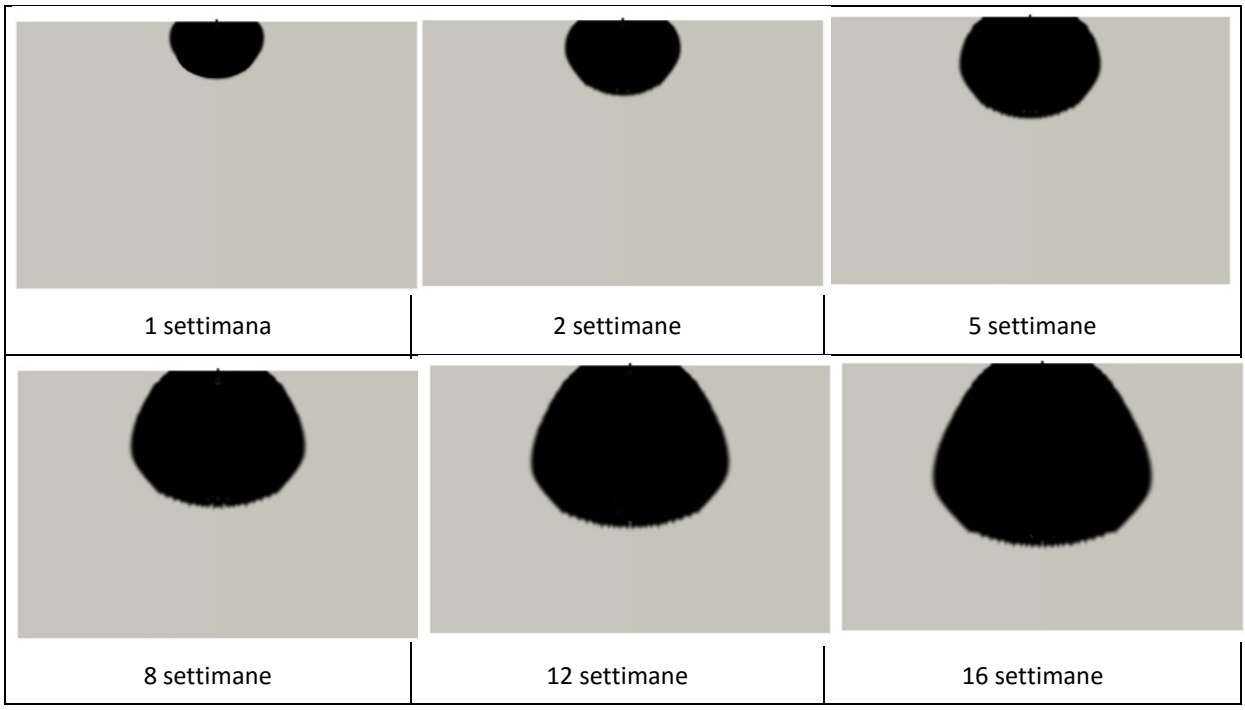


Figura 25. *Evoluzione della perdita di olio 2094 in un terreno argilloso compatto ($\alpha = 10^{-12}\ m^2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 300x200 cm.*

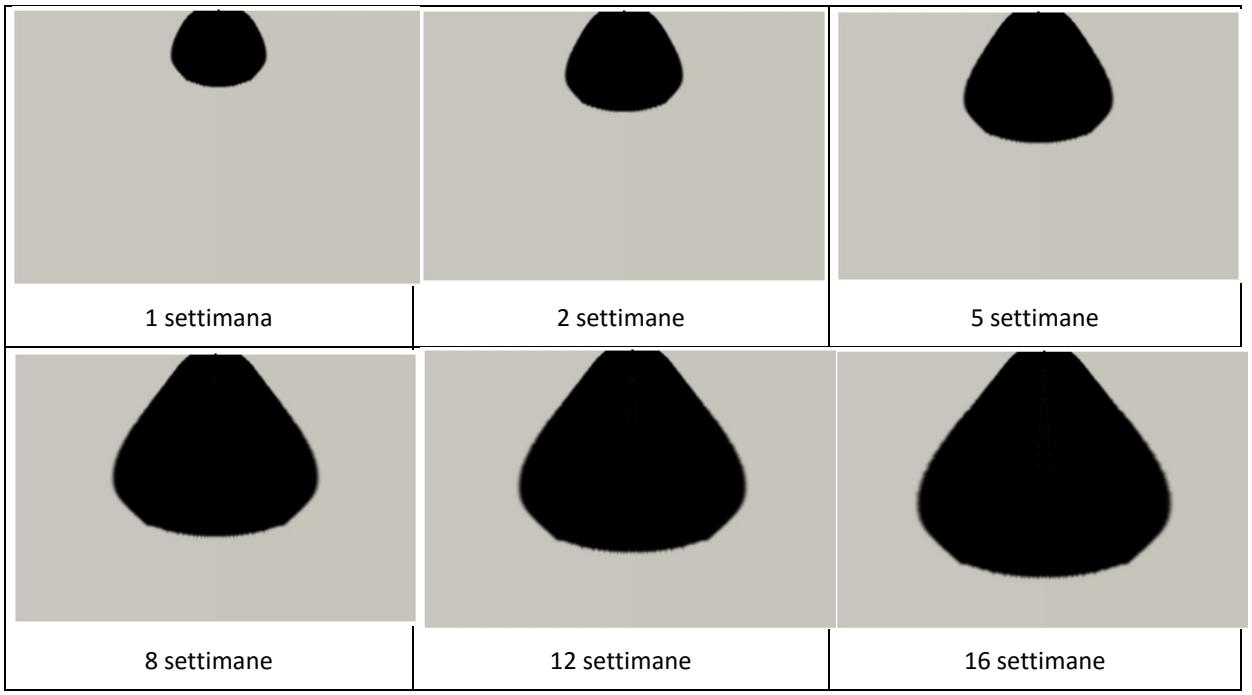


Figura 26. *Evoluzione della perdita di olio 2094 in un terreno argilloso non strutturato ($\alpha = 10^{-11}\ m^2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 600x400 cm.*

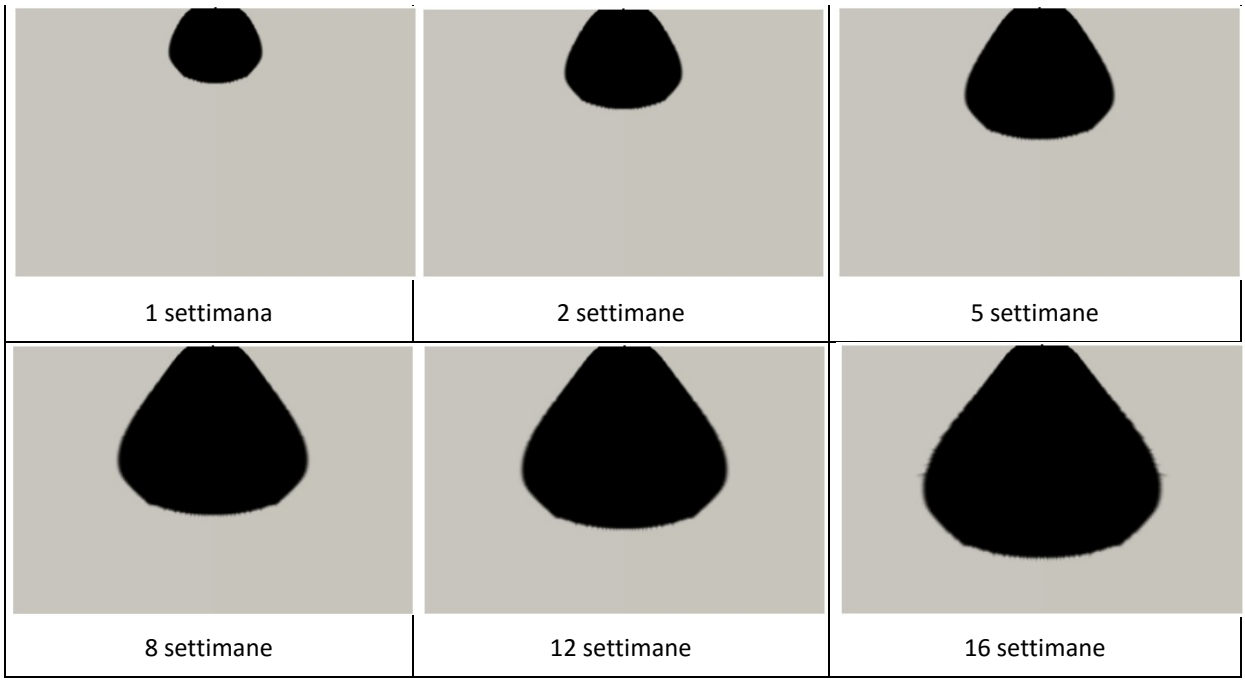


Figura 27. *Evoluzione della perdita di olio 2094 in un terreno misto argilloso/sabbia fine ($\alpha = 10^{-10}\ m^2$). Foro circolare (20 mm di diametro), battente di liquido pari a 15 m. La regione rettangolare ha dimensioni pari a 600x400 cm.*

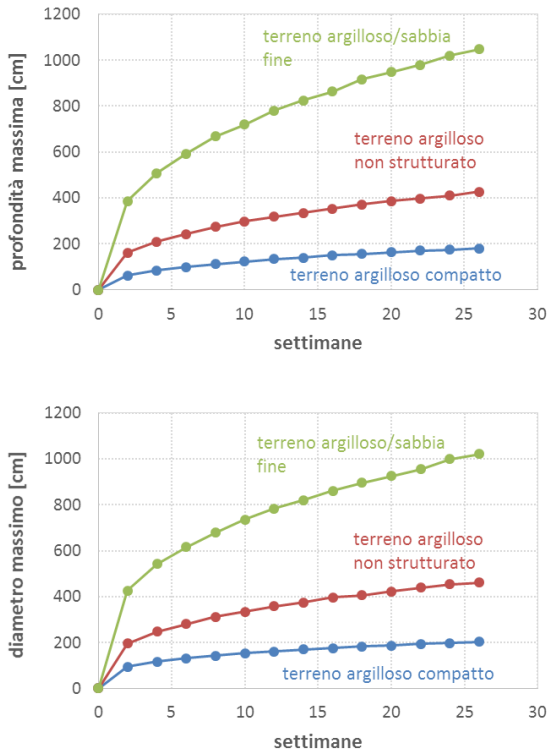


Figura 28. *Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di olio 2094 nelle tre diverse tipologie di terreno in funzione del tempo.*

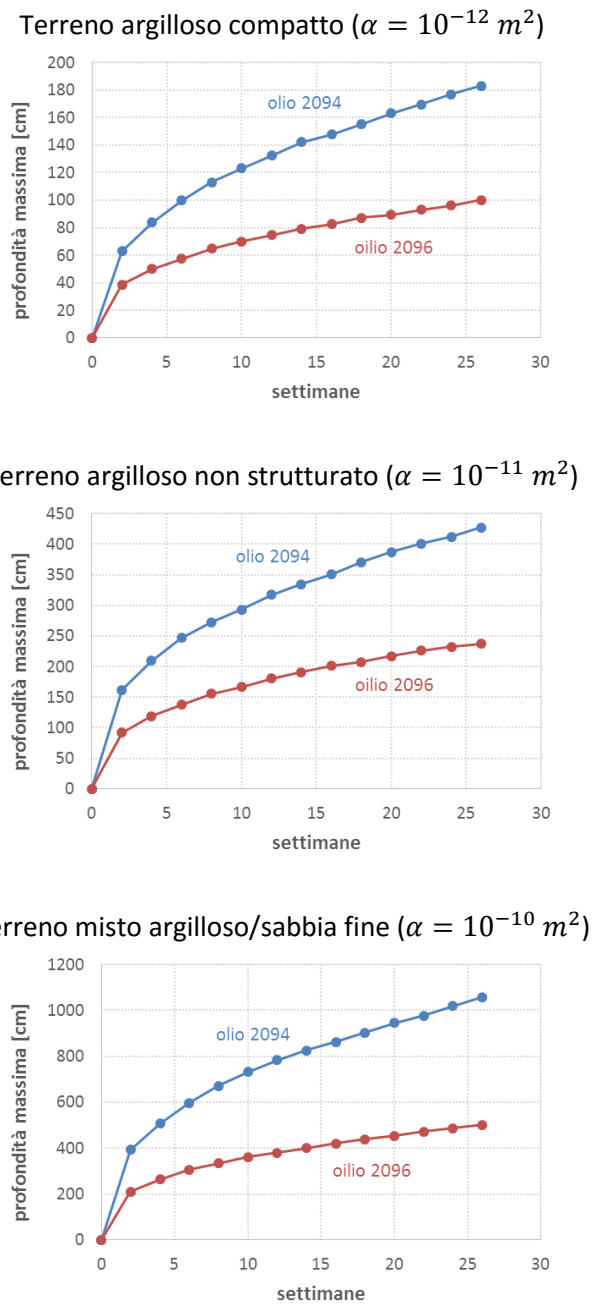


Figura 29. *Profondità massima raggiunta dalla perdita in funzione del tempo nelle tre diverse tipologie di terreno. Confronto tra l'olio 2096 e l'olio 2094.*

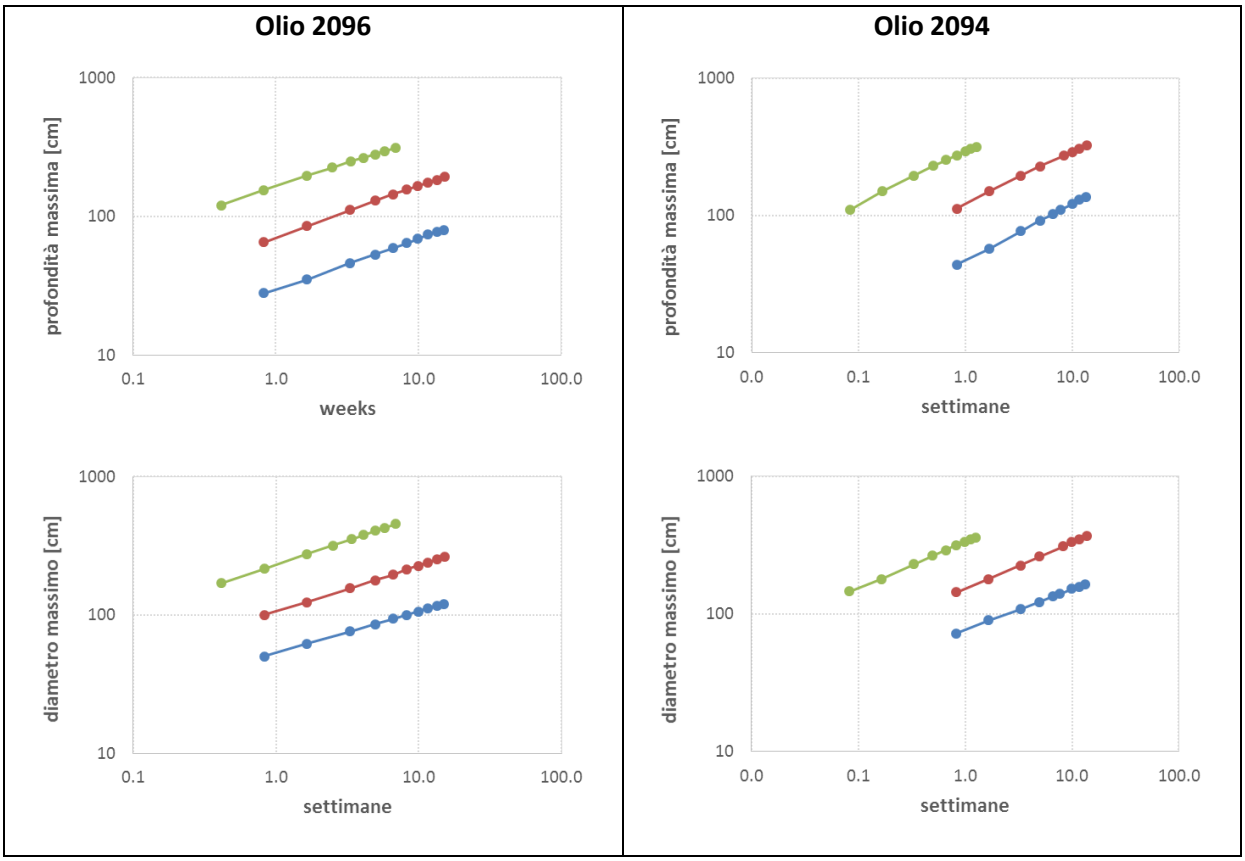


Figura 30. *Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di olio 2096 (sinistra) e olio 2094 (destra) nelle tre diverse tipologie di terreno in funzione del tempo.*

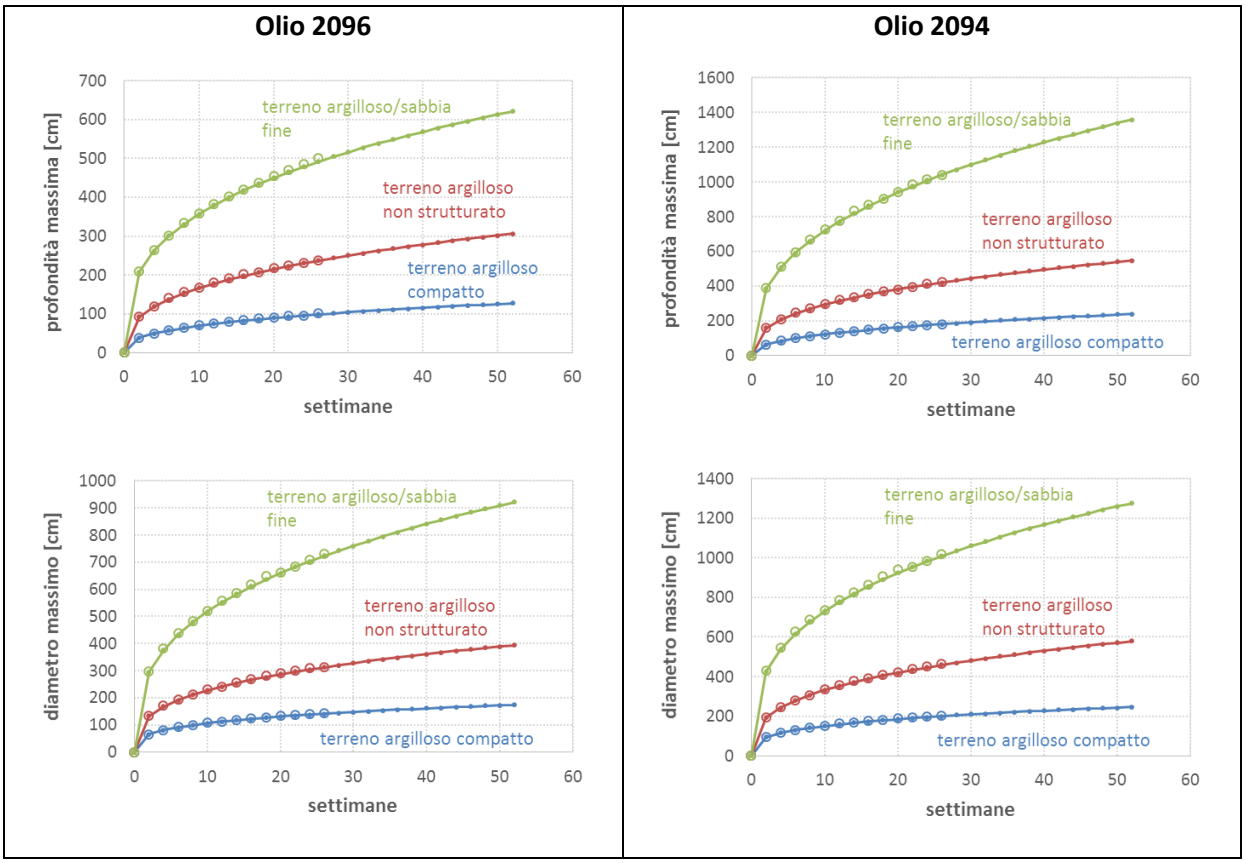


Figura 31. *Profondità e diametro massimi raggiunti dalla perdita di olio 2096 (sinistra) e olio 2094 (destra) nelle tre diverse tipologie di terreno in funzione del tempo. I simboli rappresentano i valori ottenuti attraverso le simulazioni fluidodinamiche; le linee corrispondono invece alla correlazione analitica (40).*