



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Geoscienze

Direttore Prof.ssa Cristina Stefani

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA**

**PROPRIETA' PETROFISICHE E COMPORTAMENTO
DEI MATERIALI COESIVI DI COPERTURA
DI DISCARICHE RSU
ALLE SOLLECITAZIONI TERMICHE**

Relatore: Dott. Antonio Galgaro

Correlatore: Ing. Giorgia Dalla Santa

Dott. Matteo Cultrera

Laureanda: Gioia Marcato

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

Sommario

Abstract.....	1
Abstract.....	2
Introduzione	5
1 La discarica e lo strato di copertura.....	7
1.1 La discarica.....	7
1.1.1 I rifiuti RSU.....	7
1.1.2 Componenti principali.....	10
1.1.2.1 Le barriere di contenimento	10
1.1.3 Il bilancio idrologico	12
1.1.4 Rendimento a lungo termine delle barriere impermeabili.....	15
1.1.4.1 Fattori ambientali di influenza sul rendimento a lungo termine della barriera impermeabile della copertura superficiale	15
1.1.5 Il caso studio: la discarica di Torretta di Legnago (VR).....	16
1.2 La copertura.....	19
1.2.1 Funzioni della copertura.....	19
1.2.2 Tipologie di copertura superficiale.....	20
1.2.2.1 Materiali naturali utilizzati nella copertura	20
1.2.2.2 Materiali sintetici	21
1.2.3 Componenti della copertura del caso studio.....	26
1.2.4 Criteri di progettazione e normativa di riferimento.....	34
1.2.5 Le varie fasi di “coltivazione” di una discarica.....	36
1.2.5.1 La copertura provvisoria	37
1.3 Lo strato impermeabile	38
1.3.1 Le caratteristiche richieste al materiale fine.....	38
1.3.2 La messa in opera della barriera impermeabile.....	42
1.4 Biodegradazione dei rifiuti solidi urbani	46
1.4.1 La caratterizzazione biochimica dei rifiuti	46
1.4.1.1 I processi di biodegradazione.....	47
1.4.2 I cedimenti dei rifiuti nelle discariche di RSU	49

2	Variazione delle caratteristiche di un materiale coesivo a causa delle sollecitazioni termiche.....	57
2.1	Effetto del congelamento su uno strato di materiale coesivo	58
2.1.1	La nucleazione delle lenti di ghiaccio	58
2.1.2	Il congelamento dei terreni.....	58
2.1.3	I cicli di gelo-disgelo.....	61
2.2	Effetto dell'essiccazione su uno strato di materiale coesivo	65
2.2.1	Essiccazione	65
2.2.1.1	Fessure da ritiro.....	68
2.3	Conclusioni.....	74
3	Caratterizzazione dei materiali utilizzati nella discarica studio	77
3.1	La conducibilità termica	77
3.1.1	Metodi di trasmissione di calore nei terreni	77
3.1.2	La conducibilità termica dei sedimenti	79
3.1.2.1	Variazione della conducibilità termica dei sedimenti al variare della temperatura	81
3.1.3	La conducibilità termica dell'acqua	84
3.2	Lo strato impermeabile.....	85
3.2.1	Classificazione del materiale utilizzato.....	85
3.2.2	Metodologie di analisi termica.....	97
3.2.3	Analisi di laboratorio.....	98
3.2.4	Risultati ottenuti	101
3.2.5	Discussione.....	106
3.3	Lo strato drenante	108
3.3.1	Caratterizzazione del materiale	108
3.3.2	Metodologie di analisi termica.....	110
3.3.3	Analisi di laboratorio.....	117
3.3.3.1	Prova 1 (solo ghiaia – condizioni dry).....	117
3.3.3.2	Prova 2 (ghiaia e sabbia – condizioni dry).....	123
3.3.3.3	Prova 3 (ghiaia e sabbia – condizioni wet)	128
3.3.4	Discussione.....	133

3.4	I materiali sintetici	134
3.4.1	Conducibilità termica dei geosintetici	134
3.4.2	Materiali analizzati	136
3.4.3	Metodologie di analisi termica e misure eseguite	138
3.4.4	Discussione.....	140
4	Analisi numeriche dei processi di trasporto termico nella copertura ...	141
4.1	Andamento della temperatura nel corpo rifiuti di una discarica.....	142
4.2	Influenza della temperatura dell'aria	149
4.3	Andamento della temperatura nella copertura.....	155
4.4	Simulazione numerica dell'onda termica	159
4.4.1	Il codice di calcolo utilizzato.....	159
4.4.1.1	Costruzione della mesh	160
4.4.1.2	Le condizioni iniziali	165
4.4.1.3	Assegnazione dei valori dei parametri ai materiali della copertura	168
4.4.1.4	Simulazioni in condizioni Steady-State	182
4.4.1.5	Attribuzione dei nuovi parametri termici in dipendenza dalla temperatura.....	190
4.4.1.6	Condizioni al contorno.....	191
4.4.1.7	Risultati ottenuti	192
4.4.1.8	Discussione sulle simulazioni eseguite	201
5	Conclusioni	213
6	Allegati	215
	Bibliografia	271
	Sitografia.....	276

Abstract

Il presente lavoro di tesi ha consentito la caratterizzazione termica dei materiali costituenti la copertura provvisoria di una discarica per rifiuti solidi urbani (discarica di Torretta di Legnago), dedicando particolare attenzione ad indagare il comportamento del materiale coesivo in risposta alle sollecitazioni termiche prodotte dalle variazioni della temperatura dell'aria e dal calore endogeno generato dalla biodegradazione dei rifiuti. Lo svolgimento dell'attività di ricerca è stato suddiviso in una prima fase di indagine bibliografica, per poi proseguire con numerose prove di laboratorio e di modellazione numerica agli elementi finiti mediante il software Feflow, il più diffuso software sul mercato per la modellazione del trasporto termico in mezzi porosi.

I materiali sui quali sono state condotte le analisi di laboratorio provengono dalla discarica di Torretta di Legnago (VR), sito di studio, gestita dalla società Le.Se S.p.A. Il materiale relativo alla barriera impermeabile è stato classificato mediante prove di granulometria, aerometria, diffrattometria ai raggi X, limiti di Atterberg, determinazione del contenuto organico e peso specifico dei grani. Il materiale grossolano dello strato di drenaggio del biogas è stato vagliato per poterlo classificare dal punto di vista granulometrico.

In seguito sono state condotte misurazioni dirette di conducibilità termica. Per ciascun tipo di materiale è stata utilizzata la tipologia di strumento più adatta, in modo da avere un adeguato contatto tra sonda e campione. Il materiale fine della barriera impermeabile è stato testato in diverse condizioni di temperatura, anche a temperature minori di 0°C, utilizzando lo strumento ISOMET 2114. Per il campione ghiaioso, costituente lo strato di drenaggio del biogas, è stato utilizzato lo strumento a piastra calda e anello di contenimento situato presso il laboratorio IUAV di Mestre (VE). Il campione di materiale è stato dapprima testato in condizioni dry e in seguito in condizioni wet, per osservare le differenze dei valori

di conducibilità termica nei due casi. I parametri termici ricavati dalle misure sperimentali a diverse temperature hanno consentito di ricavare la legge che ne descrive la variazione in funzione della temperatura.

Questi valori sono stati utilizzati per caratterizzare i diversi materiali nella definizione di un modello FEM, realizzato tramite il codice Feflow. Sono quindi state ottenute quattro simulazioni nelle quali la barriera impermeabile risente dell'influenza sia delle alte temperature provenienti dalla massa rifiuti sottostante, sia delle fluttuazioni stagionali dell'aria, utilizzando dati Arpav misurati nella stazione più prossima al sito studio (stazione di Castelnovo Bariano). Con la modellazione si è quindi creata la base conoscitiva per poter procedere con successive analisi di permeabilità, misurandone il valore prima e dopo aver soggetto un provino di materiale alle sollecitazioni termiche.

Abstract

The present work allowed the thermal characterization of the materials of the temporary covering of a MSW landfill (Torretta landfill), and devoted particular attention to investigating the conduct of cohesive materials in response to thermal stress caused by the change in air temperature and from endogenous heat produced by the biodegradation of waste. The research activity was divided into a first phase of bibliographical survey, and then continued with several laboratory tests and numerical finite element modeling with Feflow software, the most popular software for the modeling of the thermal transport in the porous means.

The laboratory analysis was conducted on material from the Torretta landfill (Legnaro, VR). The material of the impermeable barrier was classified through grain size tests, aerometry, X-ray diffraction, Atterberg limits, determination of organic content and specific weight of the grains. The distribution grain size curve of the coarse material was also created.

Direct measurements of thermal conductivity were made with different types of tools in order to ensure perfect contact between the probe and the samples. The fine material was tested in different conditions of temperature, even at temperatures below 0°C, using ISOMET 2114. The gravel material was tested with a specific instrument composed of a hot plate and a containment ring at the IUAV laboratory (Mestre, VE). The sample was first tested in dry condition and later in wet conditions. The thermal parameters obtained from experimental measurements at different temperature have allowed to obtain the law that describes the variation of a function of temperature. These values were used to characterize different materials in a FEM model, realized through the Feflow code. In four simulations, it was discovered that the impermeable barrier was influenced both by high temperatures from the waste mass below and by seasonal air fluctuations (Arpav data, Castelnovo Bariano Station). From this knowledge, permeability analysis can be made to determinate the variation of permeability of the barrier subject to thermal stress.

Introduzione

L'argomento delle discariche e dei relativi sistemi di copertura sono ampiamente trattati a livello scientifico, ma mancano conoscenze approfondite sulla loro caratterizzazione termica e sui processi di trasporto termico che avvengono all'interno del cap di copertura delle discariche. Per colmare questa carenza di conoscenze, si è pensato di eseguire uno studio sul comportamento dei materiali coesivi utilizzati nella realizzazione dello strato di copertura di una discarica per rifiuti solidi urbani (RSU).

Lo strato impermeabile della copertura temporanea superficiale risente sia di stress meccanici legati alle eterogeneità del materiale conferito, che possono causare assestamenti differenziali (Grisolia et al. (1995); Monassero et al. (1996); Watts e Charles (1999)), sia di sollecitazioni termiche, in particolare durante il periodo di esposizione all'aria (Hanson e Yesiller (2010)).

È noto da letteratura che i materiali coesivi sono particolarmente sensibili alle variazioni di temperatura: cicli di gelo-disgelo e cicli di bagnatura-essiccazione causano in un terreno coesivo una perdita del contenuto d'acqua e la formazione di fessure, con conseguente aumento della sua permeabilità (Campanella e Mitchell (1968), Konrad (1980)). Questo rappresenta un aspetto molto importante in quanto il Decreto Legislativo 36/2003, che rappresenta tutt'oggi la normativa guida in campo discariche, indica, per la barriera impermeabile dello strato di copertura di una discarica, una conducibilità idraulica massima pari a $k \leq 10^{-8}$ m/s. Nel caso questo strato impermeabile riportasse danni irreversibili a causa delle sollecitazioni termiche dovute all'esposizione alle fluttuazioni termiche dell'aria e alle alte temperature prodotte, all'interno del corpo di discarica, dalla biodegradazione dei rifiuti, la conducibilità idraulica potrebbe aumentare anche in maniera non trascurabile, non rispettando più i parametri limite indicati da normativa. Lo scopo

è inoltre fornire delle informazioni su quali potrebbero essere le migliori pratiche per il completamento della copertura.

Per rappresentare l'assetto termodinamico dello strato impermeabile durante il periodo di esposizione in questa configurazione provvisoria, è stato creato un modello numerico di supporto mediante Feflow, uno dei software più avanzati per la modellazione 2D e 3D del trasporto di massa e calore in un mezzo poroso. La caratterizzazione dei materiali costituenti la copertura provvisoria rappresentati nel modello avviene attraverso la definizione di diversi parametri (conducibilità idraulica, conducibilità termica, etc.). Questi sono stati ottenuti da apposite analisi di laboratorio. È stato quindi individuato nella discarica di RSU di Torretta di Legnago (VR) un adeguato caso studio, da cui sono stati prelevati campioni di diversi materiali. In particolare sono stati classificati il materiale ghiaioso e il materiale fine. Sono state condotte prove di conducibilità termica sul materiale coesivo mediante la strumentazione portatile ISOMET 2114, secondo procedure standard (CEI EN 61010), in diverse condizioni di temperatura. Al contrario la conducibilità termica del materiale più grossolano, che costituisce il livello di drenaggio del biogas, sottostante il livello di copertura argillosa impermeabile, è stata misurata per la prima volta mediante lo strumento a piastra calda e anello di guardia presso il laboratorio IUAV con sede a Mestre (VE), appositamente modificato.

Sono state quindi create varie simulazioni considerando le diverse condizioni di sollecitazioni termiche alle quali è sottoposta la copertura temporanea a seconda delle variazioni stagionali e della fase di biodegradazione del corpo rifiuti. Il modello agli elementi finiti consente di conoscere l'effettiva distribuzione della temperatura all'interno della copertura temporanea.

1 La discarica e lo strato di copertura

1.1 La discarica

L'articolo 2 comma 1 lettera g) del Decreto Legislativo del 13 gennaio 2003 numero 36, definisce la discarica come un'area adibita allo smaltimento dei rifiuti mediante operazioni di deposito sul suolo o nel suolo. Vi sono tre categorie di discariche (Decreto Legislativo 36/2003):

a) discarica per rifiuti inerti

I rifiuti inerti sono rifiuti solidi che non subiscono alcuna trasformazione fisica, chimica o biologica significativa; i rifiuti inerti non si dissolvono, non bruciano ne' sono soggetti ad altre reazioni fisiche o chimiche, non sono biodegradabili e, in caso di contatto con altre materie, non comportano effetti nocivi tali da provocare inquinamento ambientale o danno alla salute umana;

b) discarica per rifiuti non pericolosi

I rifiuti non pericolosi sono tutti quei rifiuti che per provenienza o per le loro caratteristiche non rientrano tra i rifiuti contemplati nell'articolo 7, comma 4, del Decreto Legislativo n. 22 del 1997, e successive modificazioni.

c) discarica per rifiuti pericolosi

I rifiuti pericolosi vengono definiti nell'articolo 7, comma 4, del Decreto Legislativo n. 22 del 1997, e successive modificazioni.

1.1.1 I rifiuti RSU

Nel presente lavoro di tesi la discarica caso studio è una discarica per RSU. Con l'acronimo RSU si intende i rifiuti solidi urbani.

In genere i prodotti per i quali non è possibile né il riuso né il riciclo possono venire utilizzati per ricavarne energia tramite sistemi a freddo o a caldo, come la bio-

ossidazione (aerobica o anaerobica), la gassificazione, la pirolisi e l'incenerimento, oppure possono essere destinati allo smaltimento definitivo in discarica. In Figura 1.1 viene rappresentato il ciclo di trattamento dei rifiuti solidi urbani prima del conferimento in discarica. Secondo il decreto legislativo n.22 del 1997, articolo 7, comma 2, i rifiuti solidi urbani si dividono in:

- a) rifiuti domestici, anche ingombranti, provenienti da locali e luoghi adibiti ad uso di civile abitazione;
- b) rifiuti non pericolosi provenienti da locali e luoghi adibiti ad usi diversi da quelli di cui alla lettera a);
- c) i rifiuti provenienti dallo spazzamento delle strade;
- d) i rifiuti di qualunque natura o provenienza, giacenti sulle strade ed aree pubbliche o sulle strade ed aree private comunque soggette ad uso pubblico o sulle spiagge marittime e lacuali e sulle rive dei corsi d'acqua;
- e) i rifiuti vegetali provenienti da aree verdi, quali giardini, parchi e aree cimiteriali;
- f) i rifiuti provenienti da esumazioni ed estumulazioni, nonché gli altri rifiuti provenienti da attività cimiteriale diversi da quelli di cui alle lettere b), c) ed e).

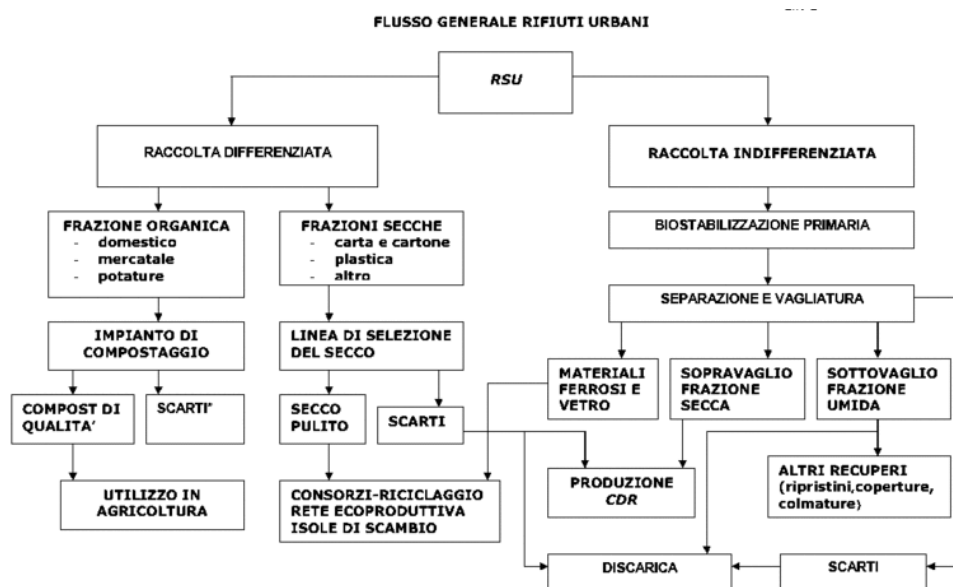


Figura 1.1 schema riassuntivo le modalità e le filiere per il trattamento dei rifiuti solidi urbani secondo le attuali politiche di gestione in Italia (fonte: wikipedia).

Maggiore è la qualità della raccolta differenziata, cioè minore è la presenza di materiale estraneo, minore sarà lo scarto da avviare in discarica (o all'inceneritore). Da un punto di vista ideale il ricorso alle discariche indifferenziate dovrebbe essere limitato al minimo indispensabile, per tutti i problemi correlati all'inquinamento ambientale.

In Figura 1.2 e in Figura 1.3 è raffigurato il momento del conferimento dei rifiuti solidi urbani presso la discarica caso studio.



Figura 1.2 scarico dei rifiuti (foto scattata presso la discarica di Torretta di Legnago, Verona).



Figura 1.3 compattatore in azione (foto scattata presso la discarica di Torretta di Legnago, Verona).

1.1.2 Componenti principali

1.1.2.1 Le barriere di contenimento

Una discarica è costituita da una barriera di fondo, da sponde laterali e da una barriera di copertura superficiale, tra le quali è contenuta la massa rifiuti. È importante sottolineare che all'interno del corpo rifiuti si attivano i naturali processi di decomposizione aerobica e anaerobica, che producono grandi quantità di biogas e liquame (percolato) altamente inquinanti per il terreno e le falde acquifere. Per questo motivo una discarica a norma deve necessariamente essere dotata di un sistema di drenaggio e raccolta del percolato e di captazione del biogas. Non esistono riferimenti normativi che regolino in maniera specifica le modalità di realizzazione ed i requisiti di progetto per le barriere da realizzarsi nell'ambito dei progetti di bonifica, quindi generalmente si fa riferimento al Decreto Legislativo 36/2003.

La barriera di fondo, avendo il compito di fungere da adeguato supporto meccanico alla massa di rifiuti, di raccogliere biogas e percolato, è quindi dotata di adeguati sistemi di raccolta e drenaggio.

Anche le sponde hanno il compito di garantire il drenaggio del percolato e di evitare la migrazione laterale del biogas. È importante ricordare che la stabilità delle sponde risulta assai precaria per l'accoppiamento di numerosi materiali sintetici (geomembrane, geotessili, georeti) con materiali naturali (argilla). È quindi necessario conoscere la resistenza tangenziale d'attrito presente al contatto tra geomembrana e argilla. Una volta conosciuta la resistenza tangenziale d'attrito è possibile passare alla creazione dei versanti della discarica con l'opportuna pendenza e nel caso con utilizzo di materiali sintetici ad aderenza migliorata. Nella seguente tabella (Tabella 1.1) sono illustrate le caratteristiche dei sistemi di isolamento di fondo e laterale dei vari tipi di discarica.

Elemento	Rifiuti inerti	Rifiuti non pericolosi	Rifiuti pericolosi
Spessore barriera geologica (m)	≥ 1	≥ 1	≥ 5
Conducibilità idraulica k (m/s)	$\leq 10^{-7}$	$\leq 10^{-9}$	$\leq 10^{-9}$
Spessore minimo eventuale barriera creata artificialmente (m)	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 0.5
Conducibilità idraulica massima eventuale barriera creata artificialmente (m/s)	$\leq 5 \cdot 10^{-8}$	$\leq 5 \cdot 10^{-10}$	$\leq 10^{-10}$
Rivestimento impermeabile artificiale	—	Richiesto	Richiesto
Spessore strato minerale drenante al di sopra del rivestimento impermeabile (m)	—	≥ 0.5	≥ 0.5
Protezione rivestimento artificiale e/so sistema di barriera di confinamento	—	Richiesto	Richiesto
Franco rispetto alla minima soggiacenza della falda in un acquifero non confinato - U o al tetto dell'acquifero confinato - C (m)	1.5 (U e C)	1.5 (C), 2 (U)	1.5 (C), 2 (U)

Tabella 1.1 Caratteristiche della struttura di impermeabilizzazione di fondo e laterale secondo il D. Lgs. 13 gennaio 2003, n. 36. La tenuta del sistema di isolamento deve essere considerata nei termini riportati nelle prime due righe della tabella. Nel caso la barriera non possieda tali caratteristiche, e quindi debba essere completata artificialmente, è possibile applicare un criterio di equivalenza per il quale è indicato comunque uno spessore minimo riportato nella terza riga. Applicando quest'ultima condizione viene ricavato in quarta riga il valore massimo che può avere uno spessore minimo di barriera creata artificialmente. L'esigenza di un rivestimento artificiale (ad esempio geomembrana) viene indicata in quinta riga. Particolari soluzioni progettuali che permettano garanzie equivalenti possono essere previste per le sponde (parti laterali del confinamento) anche con spessore inferiore a 0.5 m, purché approvate dall'Ente territoriale competente.

La barriera di copertura, trattata nel dettaglio nei paragrafi successivi, ha, dal canto suo, la funzione di evitare la migrazione di biogas, di impedire o ridurre le infiltrazioni di acqua piovana e di fornire supporto per gli interventi di chiusura finale. Il pacchetto di copertura superficiale composto dal basso verso l'alto da uno strato di regolarizzazione, un geotessile tessuto, uno strato di captazione e drenaggio del biogas, un geotessile nontessuto, uno strato spesso almeno 0.50 m di materiale fine impermeabile, un geotessile nontessuto, uno strato di drenaggio delle acque meteoriche, un geotessile tessuto e per finire uno strato di terreno naturale del quale i primi 0.20-0.30 m atti all'inerbimento. Sono inoltre presenti tubature per la raccolta del biogas e del percolato, due prodotti generati dal processo di biodegradazione.

Le caratteristiche prestazionali sono riportate in Tabella 1.2.

Elemento	Rifiuti inerti	Rifiuti non pericolosi	Rifiuti pericolosi
Spessore ricopertura superiore (m)	≥ 1	≥ 1	≥ 1
Spessore strato di drenaggio (m)	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 0.5
Conducibilità idraulica strato minerale impermeabile (m/s)	bassa	$\leq 10^{-8}$	$\leq 10^{-8}$
Spessore strato minerale impermeabile (m)	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 0.5
Rivestimento impermeabile artificiale	-----	-----	Richiesto
Spessore strato di drenaggio dei gas e rottura capillare (m)	-----	≥ 0.5	≥ 0.5
Strato di regolarizzazione	Richiesto	Richiesto	Richiesto

Tabella 1.2 Caratteristiche della struttura di impermeabilizzazione superficiale secondo il D. Lgs. 13 gennaio 2003, n. 36. La tenuta del sistema di isolamento deve essere considerata nei termini riportati nelle prime due righe della tabella. Nel caso la barriera non possieda tali caratteristiche, e quindi debba essere completata artificialmente, è possibile applicare un criterio di equivalenza per il quale è indicato comunque uno spessore minimo riportato nella terza riga. Applicando quest'ultima condizione viene ricavato in quarta riga il valore massimo che può avere uno spessore minimo di barriera creata artificialmente. L'esigenza di un rivestimento artificiale (ad esempio geomembrana) viene indicata in quinta riga. Particolari soluzioni progettuali che permettano garanzie equivalenti possono essere previste per le sponde (parti laterali del confinamento) anche con spessore inferiore a 0.5 m, purché approvate dall'Ente territoriale competente.

1.1.3 Il bilancio idrologico

Come si osserva in Figura 1.4, la conoscenza del bilancio idrogeologico di una discarica è importante perché permette di conoscere quali sono i fattori idrici in entrata e in uscita dal sistema discarica, dai quali dipende la quantità di percolato prodotto: un'eccessiva infiltrazione d'acqua attraverso il corpo discarica fino alla massa dei rifiuti, causa un'abbondante produzione di percolato (Figura 1.5). La perdita di percolato dal fondo della discarica può produrre un'area contaminata a forma di pennacchio (plume) più o meno allungato in direzione dei deflussi prevalenti di falda.

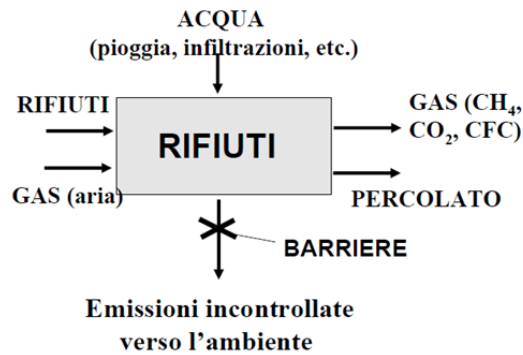


Figura 1.4 bilancio di massa generale di una discarica (materiale didattico).

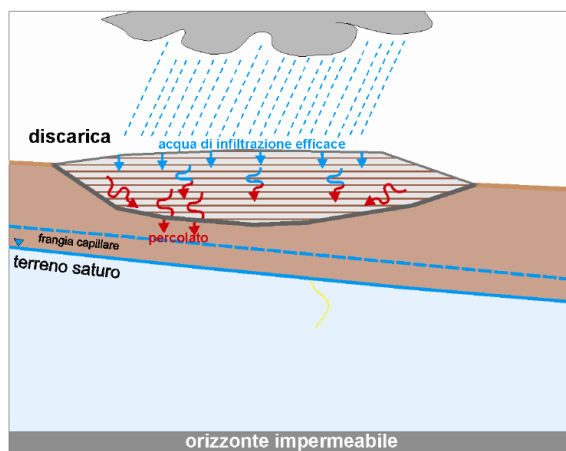


Figura 1.5 l'infiltrazione dell'acqua meteorica fino alla massa dei rifiuti causa la produzione del percolato (materiale didattico: Rifiuti).

Nel bilancio rappresentato in Figura 1.6 rientrano tre tipi di fattori:

- fattori incontrollabili: pioggia;
- fattori eliminabili: ruscellamento superficiale dall'esterno, infiltrazioni;
- fattori controllabili: ruscellamento sulla superficie dello scarico, evapotraspirazione, umidità dei rifiuti.

$$L_r = L = P - R - E - T + (\Delta U_s + \Delta U_w)$$

dove L =percolato, P =precipitazioni, R =ruscellamento verso esterno, T =traspirazione, ΔU_s = umidità del suolo e ΔU_w =umidità dei rifiuti.

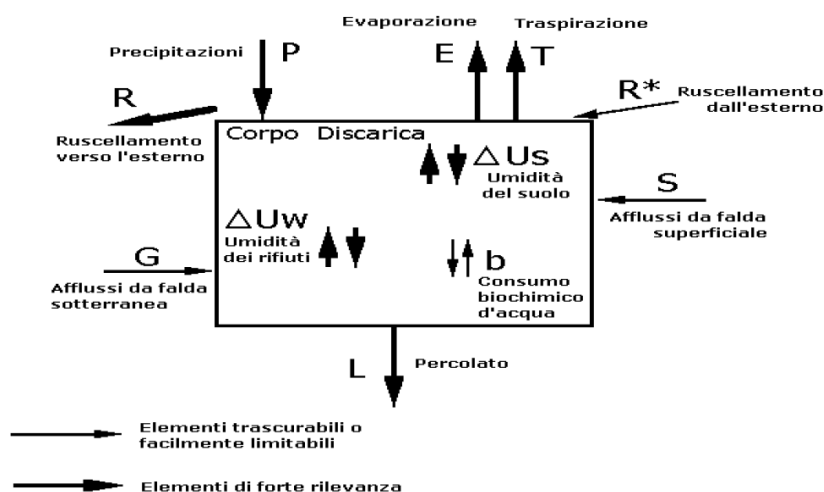


Figura 1.6 fattori del bilancio idrologico del sistema discarica.

Per controllare il bilancio idrologico ed evitare un eccessivo conferimento d'acqua di infiltrazione alla massa dei rifiuti, è necessario costruire un adeguato pacchetto di copertura superficiale composto da diversi strati, ognuno dei quali caratterizzato da una particolare conducibilità idraulica indicata in normativa. Nella Figura 1.7 è raffigurato il bilancio idrologico dello strato di copertura.

Il flusso percolante nei rifiuti P_5 corrisponde all'equazione sottostante:

$$P_5 = P_1 - \sum dS_n - \sum D_n + \sum I_n + C_4$$

dove P = precipitazione; I = intercettazione; E = evaporazione; T = traspirazione; P_n = infiltrazione laterale; D_n = drenaggio laterale dello strato n .

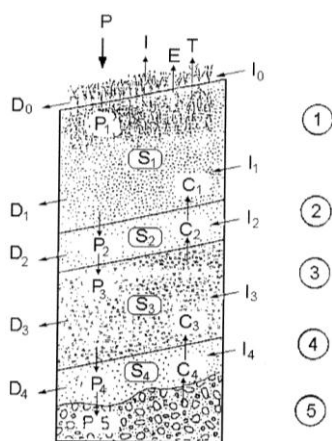


Figura 1.7 bilancio idrico di un sistema di copertura. 1) terreno vegetale; 2) strato di drenaggio; 3) barriera a bassa permeabilità; 4) strato di drenaggio del biogas; 5) rifiuti (fonte: Sistemi barriera).

1.1.4 Rendimento a lungo termine delle barriere impermeabili

È importante sottolineare il fatto che una discarica, una volta realizzata, rimane in funzione per tempi lunghi, anche superiori ai 30 anni. Molte ricerche sono state effettuate per analizzare il mantenimento delle caratteristiche dei materiali che costituiscono le barriere a lungo termine.

1.1.4.1 Fattori ambientali di influenza sul rendimento a lungo termine della barriera impermeabile della copertura superficiale

Il rendimento della barriera impermeabile del cap superficiale risente di numerosi fattori, tra i quali riveste notevole importanza il cedimento dei rifiuti, dovuto ai processi di decomposizione e compattazione, concentrato in particolare nel primo periodo dal loro collocamento, che causa numerosi dissesti strutturali. Altri fattori che possono influenzare il rendimento della barriera superficiale sono i fenomeni atmosferici e i fattori ambientali come pioggia, erosione, insolazione, variazioni di temperatura, etc.. Per questo nella copertura definitiva è presente uno strato di terreno spesso un metro con funzione di protezione.

Ampliamente discussi nei capitoli seguenti, sono i cicli di gelo/disgelo a cui potrebbe essere soggetta la barriera. Essi causano la variazione strutturale dell'argilla, con conseguente formazione di crepe e fessure. Come conseguenza inevitabile si ha un forte aumento della conducibilità idraulica e perdita di resistenza. Per proteggere la barriera da questi cicli termici sarebbe opportuno realizzare nel minor tempo possibile l'intero pacchetto di copertura superficiale di spessore non minore della profondità di penetrazione locale del gelo, evitando così di lasciare lo strato impermeabile esposto per troppo tempo alle variazioni termiche dell'aria. Questa soluzione non è di possibile applicazione in quanto la sequenza di creazione del pacchetto di copertura superficiale prevede l'esposizione per almeno un anno dello strato impermeabile (sottoparagrafo 1.2.5.1). Lo scopo di

questa tesi è proprio quello di analizzare l'influenza delle variazioni climatiche, unite al calore endogeno prodotto durante la biodegradazione dei rifiuti, a cui è sottoposta la barriera impermeabile.

1.1.5 Il caso studio: la discarica di Torretta di Legnago (VR)

Il caso studio considerato è la discarica di Torretta di Legnago (VR). Sono state condotte numerose prove di laboratorio su materiali gentilmente fornitoci dalla società Le.Se S.p.A. appartenenti allo strato di copertura della discarica in esame. Il Sistema Integrato di Trattamento e Smaltimento Rifiuti di Torretta di Legnago è un impianto complesso per lo smaltimento e il trattamento di Rifiuti Non Pericolosi.

La discarica fu attivata nel 1982 e copriva un'area di 250 m circa di lunghezza e 50 m circa di larghezza in un tratto di alveo abbandonato del fiume Tartaro, ai confini tra i Comuni di Legnago (VR) e di Bergantino (RO). Negli anni successivi l'iniziale configurazione subì numerosi lavori di risagomatura. Nel 1991, con la delibera n. 6672, fu approvato il progetto di ampliamento verso est della discarica in alveo per circa 1.110 m di lunghezza. Successivamente, venne ulteriormente ampliata con annesso un impianto di selezione e compostaggio. Nel 2001 fu predisposto il progetto definitivo di un ampliamento fuori alveo denominato Settore C, che comprende anche interventi di adeguamento dei connessi impianti di selezione meccanica e compostaggio. Il progetto venne approvato dalla Giunta regionale del Veneto con delibera n. 2863 nell'anno 2002, ai sensi degli artt. 12 e 23 della legge regionale 26/03/1999, n.10. Nel 2009 la Giunta Regionale legittima i lavori di ampliamento della discarica attraverso la realizzazione di tre nuovi lotti (D, E e F) e la ribaulatura dell'esistente lotto C.

Oggi le zone dell'ex alveo del fiume Tartaro adibite a discarica sono in fase di bonifica, in quanto il pacchetto di copertura non rientra nei canoni fissati dal decreto legislativo 36/2003. La bonifica consiste nella rimozione del cap di copertura, dei rifiuti e dei primi 20 cm dello strato di fondo. Quest'enorme quantità di materiale escavato viene conferita nei nuovi lotti in costruzione, costituendo essa stessa

materiale di rifiuto. Anche per questo con il Decreto del Segretario Regionale Ambiente e Territorio n.16 del 2010 la discarica di Torretta è stata classificata nella sottocategoria di cui all'art.7 lettera c), comma 1, del DM 03/08/2005, ossia “Discariche per rifiuti con elevato contenuto sia di rifiuti organici o biodegradabili che di rifiuti inorganici, con recupero di biogas”. Dal 2002 la concessione della costruzione e della gestione dei lavori è affidata alla Società Legnago Servizi Spa (Le.Se S.p.A). Nel 2010 la concessione è stata prorogata.

Dal 2000 nella discarica di Torretta viene conferito solo rifiuto secco, il quale proviene dalla raccolta differenziata RSU, mentre una piccola parte è costituita da rifiuto speciale proveniente dai resti di lavorazioni di riciclo. Oggigiorno vengono conferite in tale discarica ben 150 tonn/giorno, corrispondenti all'incirca a 200 m³/giorno.

La configurazione attuale dei lotti di discarica, nell'insieme, presenta un volume utile complessivo di 3.622.973 m³ (per la determinazione di tale valore sono stati sommati i volumi netti del secondo tratto in alveo, dei sei lotti di cui è costituita la discarica di Torretta, e non del primo tratto in alveo) (dati tratti dalla Relazione tecnico-illustrativa).

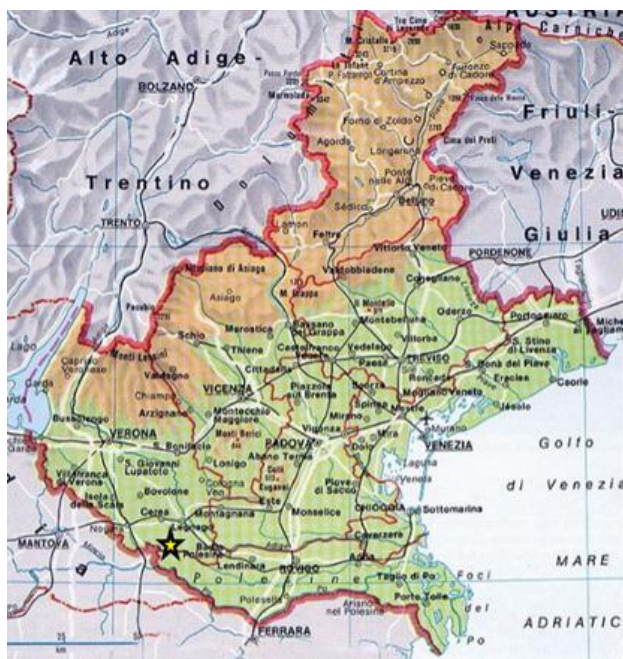


Figura 1.8 la stella rappresenta l'ubicazione della discarica di Torretta di Legnago (VR).



Figura 1.9 discarica di Torretta di Legnago (Google Maps).

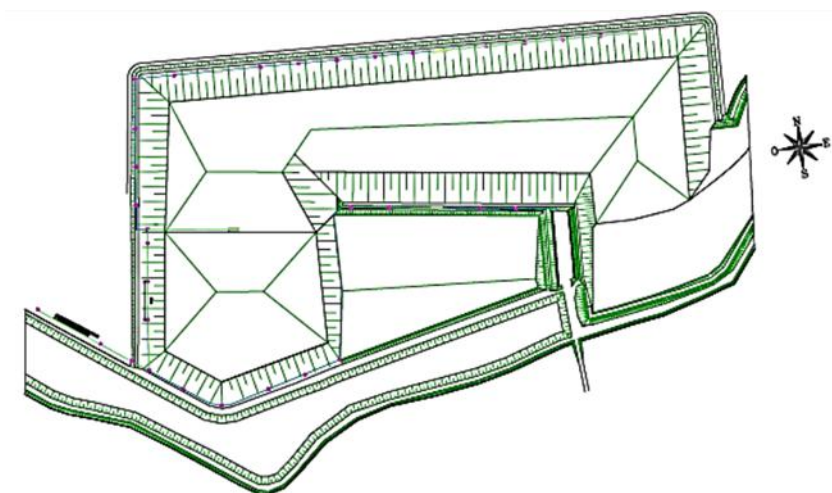


Figura 1.10 planimetria della discarica di Torretta di Legnago (VR). Scala 1:100 (Legnago Servizi S.p.A.).



Figura 1.11 lotto completato della discarica di Torretta (foto scattata in loco).

Il caso studio esaminato ha permesso di effettuare una serie di esperimenti sul materiale effettivamente utilizzato nella struttura di copertura delle discariche, al

fine di individuare le proprietà termiche e di modellare la propagazione dell'onda termica al suo interno.

1.2 La copertura

1.2.1 Funzioni della copertura

Il progetto della copertura di una discarica deve garantire la salute e la sicurezza, l'estetica, e l'uso del sito dopo la chiusura, uniti ai requisiti di permeabilità, compressibilità e resistenza. Nel dettaglio il pacchetto multistrato superficiale riveste molteplici scopi quali:

- impedire l'infiltrazione delle acque meteoriche attraverso il suolo contaminato per evitare la diffusione degli inquinanti attraverso il suolo e verso la falda;
- controllare lo scivolamento dell'acqua sulla superficie della discarica;
- resistere all'erosione;
- controllare l'emissione di odori;
- minimizzare la produzione di percolato, limitando l'infiltrazione delle acque;
- controllare il flusso di biogas;
- isolare i rifiuti dall'ambiente esterno e dalle persone che ne potrebbero venire a contatto;
- rendere indisponibili i rifiuti per gli uccelli, insetti e ratti;
- evitare che il vento possa disperdere le frazioni leggere quali plastica, carta e polveri;
- controllare ed opportunamente indirizzare il flusso del biogas formatosi in seguito ai processi di degradazione anaerobica;
- minimizzare potenziali incendi per evitare le emissioni e danneggiare i componenti della discarica;
- consentire la crescita vegetazionale.

Per ciò che concerne il problema della presenza di biogas, secondo gli studiosi Boeckx e Van Cleemput (1999) le emissioni di metano (CH_4) da discarica raggiungono valori tra i 10 e i 70 Tg/anno. Per ovviare ad una dannosa emissione in atmosfera di tale gas, lo strato di copertura di una discarica ha il compito di ridurre notevolmente le sue emissioni e in taluni casi addirittura di assorbirlo completamente. Una considerevole frazione di metano, infatti, può venire ossidata dal suolo di copertura prima di raggiungere l'atmosfera.

1.2.2 Tipologie di copertura superficiale

Le coperture superficiali si dividono in tre gruppi a seconda del grado di impermeabilizzazione:

- coperture completamente impermeabili (a valvola chiusa);
- coperture semi-permeabili (a valvola semi-aperta);
- coperture nelle quali avviene il lavaggio dell'interno della discarica da parte delle acque meteoriche (flushing bioreactor = a valvola aperta), più utilizzate in altri paesi, quali Stati Uniti.

La scelta del tipo di copertura dipende principalmente dalle esigenze d'acqua per la degradazione dei rifiuti e dalla forma fisica e qualità dei rifiuti ivi presenti (rifiuti tal quali, pretrattati biologicamente o termicamente).

1.2.2.1 Materiali naturali utilizzati nella copertura

Nel pacchetto di copertura di una discarica vengono impiegati materiali di origine naturale. Ogni materiale utilizzato deve possedere caratteristiche compatibili con la destinazione d'uso finale. Ad esempio se la copertura ha una destinazione d'uso ad aree verdi, va verificato il valore di pH del terreno vegetale utilizzato in superficie, in quanto ambienti troppo acidi risultano dannosi per lo sviluppo vegetazionale (i valori ottimali sono compresi tra 6.5 e 7.5). Il terreno inoltre dovrebbe contenere una percentuale di materia organica compresa tra il 5 e il 20%.

Altri materiali utilizzati nei sistemi barriera sono le miscele di sabbia e bentonite (proporzioni di bentonite variabili tra il 5 e il 15%), che godono di un elevato grado di flessibilità, consentendo di aumentare o di ridurre la permeabilità del sistema trattato semplicemente variando il dosaggio di bentonite. Queste miscele però non sono efficienti a lungo termine in quanto il percolato riduce la capacità rigonfiante della bentonite stessa. La sabbia viene inoltre usata per proteggere meccanicamente i manti impermeabili sintetici e per costruire strati filtranti sul fondo della discarica. L'efficienza di un letto di sabbia dipende dalla porosità, dalla dimensione e dalla forma dei grani. Si consiglia di non utilizzare sabbie calcaree, onde evitare la loro solubilizzazione a contatto con il percolato. La ghiaia è utilizzata invece per la sua funzione di filtrazione e drenaggio. Ogni materiale impiegato, qualunque sia la sua origine, dev'essere privo di clasti spigolosi che potrebbero danneggiare i geosintetici utilizzati per il drenaggio delle acque meteoriche o per l'impermeabilizzazione. Ponendo l'attenzione sulla barriera di protezione impermeabile, normalmente per quest'ultima vengono scelti materiali fini come l'argilla per la sua bassa permeabilità.

1.2.2.2 Materiali sintetici

I materiali sintetici trovano ampio impiego nel settore dell'ingegneria civile, edile, stradale, idraulica e ambientale per le loro molteplici funzioni:

-separazione: vengono utilizzati principalmente geotessili e geocompositi per evitare che un terreno compenetri e si mischi con un altro;

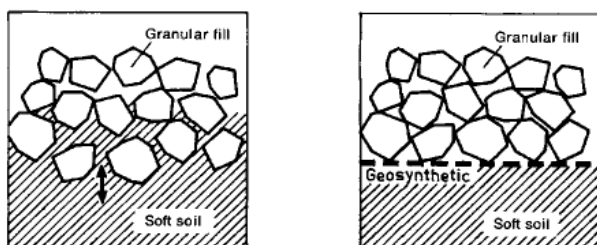


Figura 1.12 geosintetici usati come separatori.

- filtrazione: due materiali con diversa distribuzione granulometrica vengono separati da geosintetici che fungono da filtro bloccando le particelle fini, ma consentendo all'acqua di muoversi attraverso il suolo. Lo scopo è quello di prevenire l'erosione del suolo e la rimozione della frazione fine. I geosintetici che principalmente assolvono a questa funzione sono i geotessili e i geocompositi;
- rinforzo: geotessili e geogriglie vengono usati per aumentare la resistenza a trazione;
- drenaggio: l'obiettivo di un geosintetico è quello di consentire ad un fluido di fluire attraverso terreni meno permeabili;
- controllo dell'erosione;
- contenimento dei liquidi e del gas.






<div>  Ottimo </div> <div>  Buono </div> <div>  Discreto </div> <div>  Cattivo </div> <div>  Non applicabile </div>										
	Impermeabilizzazione	Filtrazione Percolato	Drenaggio Percolato	Rinforzo	Protezione Meccanica	Separazione	Controllo Erosione	Filtrazione Acqua	Drenaggio Acqua	Raccolta Biogas
<i>Materiali Naturali</i>										
BT - Sabbia / bentonite										
CL - Argilla										
SD - Sabbia										
GV - Ghiaia										
ST - Ciottoli										
<i>Materiali Sintetici</i>										
GM - Geomembrana										
GT - Geotessile										
GN - Georete										
GG - Geogriglia										
GM - Geomat										
GC - Geocomposto										
a. geotessile + geomat										
b. geotessile + bentonite										
c. geotessile + georete										

Tabella 1.3 funzione dei vari materiali utilizzati per la realizzazione del cap di copertura in funzione delle prestazioni richieste.

I geosintetici si suddividono in due famiglie principali: permeabili e impermeabili (EN ISO 10318, 2000), suddivise in ulteriori sottocategorie: geotessili, geocompositi bentonitici e geomembrane (polimeriche, elastomeriche, termoplastiche o bituminose). Vengono impiegati vari materiali polimerici quali polipropilene PP, polipropilene ad alta o bassa densità (HDPE-LDPE), poliestere,

polietilene, poliammide PA. Ogni geosintetico è dotato di particolari caratteristiche fisiche, chimiche, meccaniche, idrauliche, di resistenza e di degradazione.

I geotessili, ampiamente utilizzati nelle discariche con funzione di filtro, oltre che di drenaggio, rinforzo, separazione e controllo dei fenomeni di erosione interna (piping), vengono classificati in:

- geotessili tessuti, che tendono ad essere più forti in tensione e usati come rinforzo nelle barriere in cui è utilizzato il limo;
- geotessili nontessuti, usati come filtro, per separare i diversi strati e come protezione aggiuntiva alle geomembrane.

L'acqua che fluisce perpendicolarmente al piano del geotessile è chiamata cross-plane flow e la facilità con cui tale flusso si sviluppa è detta permittività (permeabilità attraverso il piano). La permittività Ψ è definita come:

$$\Psi = K_n / t$$

dove Ψ = permittività (s^{-1}); K_n = conduttività idraulica normale (cm/s); t = spessore di fabbrica (del geotessile) (cm). La permittività può essere inserita nella legge di Darcy per stimare la percentuale di flusso attraverso i geotessili sotto condizioni idrauliche imposte. Se il geotessile ha una permittività inadeguata, la sua funzionalità ne risulterà in parte compromessa. L'acqua può anche fluire all'interno del piano del geotessile. La facilità con cui si verifica un flusso all'interno del piano è chiamata trasmissività θ (permeabilità nel piano). La trasmissività è definita come:

$$\theta = K_p \cdot t$$

dove θ = trasmissività (cm^2/s); K_p = conduttività idraulica nel piano (cm/s); t = spessore di fabbrica (del geotessile) (cm). Anche questo termine può essere inserito nella legge di Darcy per stimare la percentuale di flusso parallelo al geotessile in modo da studiarne le caratteristiche di drenaggio, così da progettare un adeguato drenaggio laterale usando geotessili e geocompositi.

Le caratteristiche da tenere in considerazione per valutare la resistenza del geotessile includono anche la stabilità alla luce ultravioletta, la resistenza all'abrasione, la stabilità chimica, la stabilità termica e la resistenza allo scorrimento.

Le geogriglie rientrano nella categoria dei geotessili e fungono da rinforzo ai terreni delle sponde scoscese o per creare argini di separazione nei rifiuti. Sono disponibili in una vasta gamma di carichi a rottura e godono di elevata resistenza a trazione. Le aperture consentono il drenaggio verticale.

Le georeti invece, dal canto loro, hanno funzione di drenaggio, protezione e rinforzo e sono composte da fili di polietilene (PE) o polipropilene (PP) polimerici che si intersecano ad angolo acuto. Le geocelle, invece, sono spesse reti tridimensionali costituite da strisce di foglio polimerico unite per formare delle celle interconnesse, riempite da suolo e talvolta da calcestruzzo.

Un'altra sottocategoria è composta dai geocompositi bentonitici: uno strato di argilla bentonitica sodica granulare compresa tra due geotessili (GCL). La loro conducibilità idraulica è assai bassa, generalmente minore di $5 \cdot 10^{-9}$ cm/s a causa della presenza della bentonite. L'uso della bentonite consente inoltre di far fronte ad eventuali danneggiamenti del geosintetico grazie alle sue capacità rigonfianti. Per conservare la loro integrità, il substrato di posa dev'essere privo di elementi lapidei, detriti e radici.

La terza ed ultima sottocategoria di geosintetici è costituita dalle geomembrane, manti flessibili bituminosi, se impregnati da asfalto o bitume, oppure polimerici, se composti da polimeri ed elastomeri resistenti agli attacchi chimici e biologici e di facile saldatura. Possono essere costituite da un numero elevato di materiali plastici quali polietilene clorinato, polietilene clorisolfurato, neoprene, polietilene (polietilene ad alta densità e a bassa densità) e polivinilcloruro (PVC). Le geomembrane vengono unite mediante saldatura a caldo sovrapponendo i lembi oppure per interposizione di un cordone fuso dello stesso materiale (Figura 1.13, a) e b)). Le geomembrane trovano ampio campo di applicazione grazie alla loro flessibilità, favorevole al mantenimento della funzione di contenimento dei rifiuti anche sotto moderate condizioni di deformazione. Le proprietà elastiche caratteristiche delle geomembrane includono lo sforzo elastico a rottura, la tensione di rottura, il livello di sforzo che causa il 100 o il 200% delle elongazioni, e il modulo di elasticità. Il modulo di elasticità è una misura della rigidità della

geomembrana e riflette le deformazioni che saranno indotte dagli sforzi. Al contrario la resistenza allo strappo è una misura di quanto facilmente si propaga un taglio. Le geomembrane sono caratterizzate da una bassa resistenza a trazione, che si riduce del 10-13% in corrispondenza di carichi concentrati.

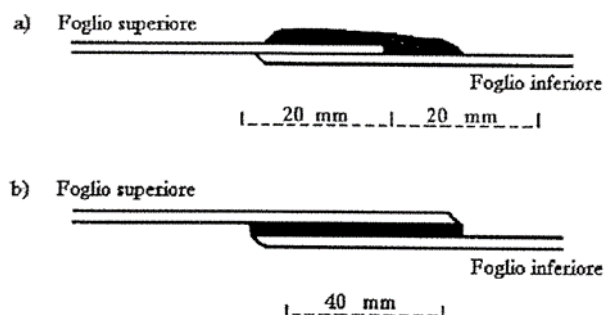


Figura 1.13 modalità di saldatura dei teli sintetici (a: a cordone sovrapposto /saldatura manuale); b: a cordone interposto (saldatura automatica)).

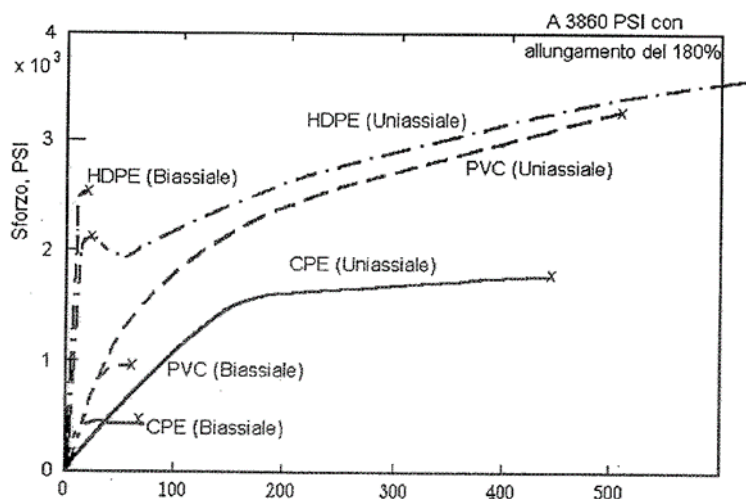


Figura 1.14 Allungamento a rottura in funzione dello sforzo per diversi tipi di geomembrane: HDPE=polietilene a alta densità; PVC=polivinilcloruro; CPE=polietileneclorosolfonato) (fonte: Sistemi barriera).

1.2.3 Componenti della copertura del caso studio

Nella discarica di Torretta di Legnago i lotti sono stati ricoperti con tre modalità diverse di copertura superficiale, che si differenziano in base al diverso numero e al diverso tipo di strati:

-Modalità di copertura superficiale 1

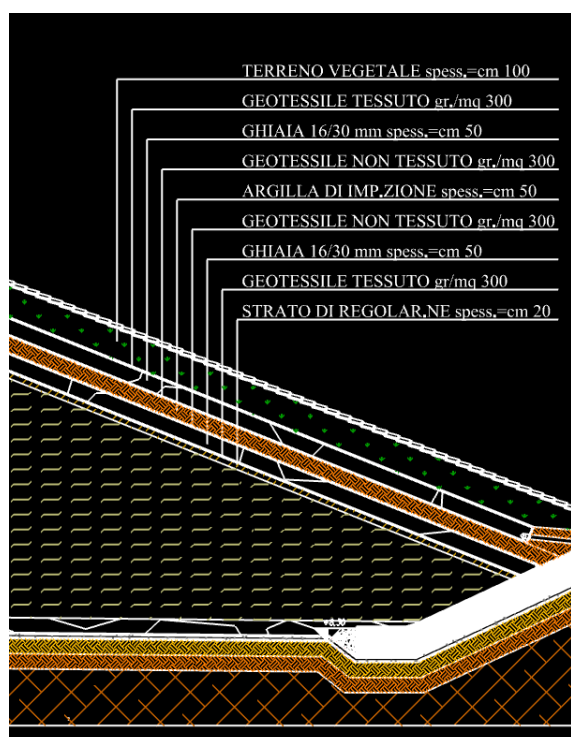


Figura 1.15 pacchetto di copertura, Lotto D (Tavola 7, Relazione di Approfondimento e contributi scientifici, Legnago Servizi Spa).

La configurazione del pacchetto di copertura a cui si fa riferimento in questa tesi è riportata nell'immagine sottostante (Figura 1.16). Come si osserva, la sequenza di strati è costituita dal basso verso l'alto da uno strato di regolarizzazione, un sottile livello di geotessile tessuto, uno strato granulare di captazione del biogas, uno strato di materiale fine impermeabile compreso tra due strati di geotessile nontessuto, uno strato di ghiaia con funzione di drenaggio delle acque meteoriche, un livello di geotessile tessuto, e uno strato superficiale di terreno vegetale. In figura gli strati

vengono rappresentati a giacitura orizzontale, mentre normalmente è richiesta una pendenza minima di 4 gradi.

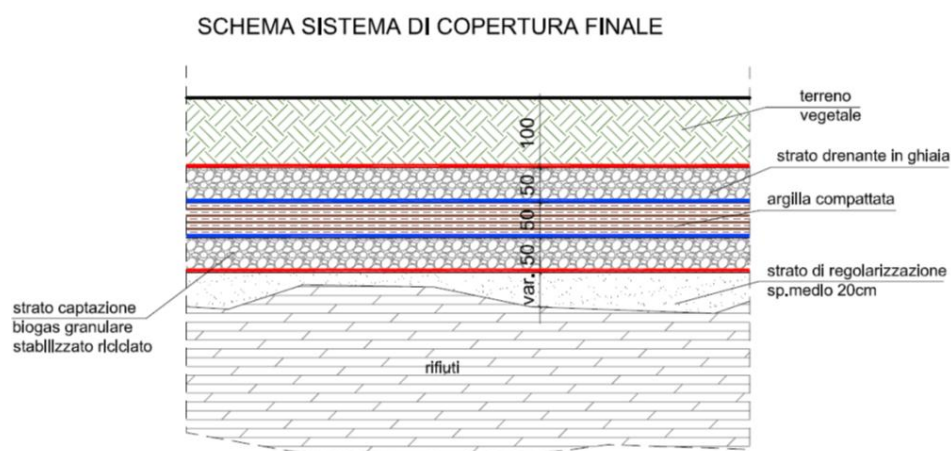


Figura 1.16 configurazione della copertura superficiale.

Lo strato di regolarizzazione, situato sopra la massa rifiuti, ha permeabilità $>10^{-6}$ m/s e spessore medio di 20 cm. Tale livello dev'essere compatibile dal punto di vista granulometrico con i sottostanti rifiuti, quindi è costituito da materiali di notevole pezzatura, così da evitare il depauperamento, nell'ambito del corpo rifiuti, delle frazioni più fini e la conseguente instabilità del piano di posa della copertura. I granuli dello strato in esame devono possedere inoltre un'adeguata resistenza meccanica per l'assorbimento delle sollecitazioni di esercizio. Per lo strato di regolarizzazione potranno quindi essere utilizzati materiali di scarto, rifiuti, tout venant.

Situato al di sopra dello strato di regolarizzazione vi è il geotessile tessuto di massa areica pari a 300 g/m². Questo materiale ha lo scopo di separare lo strato di regolarizzazione dal sovrastante strato di rottura capillare e drenaggio del biogas, al fine di garantire la compatibilità granulometrica d'interfaccia. In taluni casi il geotessile tessuto può non venir utilizzato. Molto spesso le particelle fini del terreno soprastante il geotessile si accumulano all'interfaccia tra quest'ultimo e lo strato di captazione del biogas, formando una zona a bassissima permeabilità, con il conseguente incremento delle pressioni neutre del biogas, che non può diffondersi liberamente nello strato a ciò preposto.

Per lo strato di captazione e drenaggio del biogas, spesso 50 cm, viene utilizzato inerte a granulometria ghiaiosa con contenuto di fine (passante al vaglio 200 ASTM) < al 5% e dimensioni dei granuli comprese nell'intervallo 16-32 mm. Anche l'utilizzo di sabbie medie potrebbe costituire una buona alternativa per il drenaggio del biogas. Inoltre questo strato deve fungere da rottura capillare. È buona norma evitare l'insorgere di significative pressioni da biogas sulla copertura, pur in presenza di condizioni di stabilità. Concludendo, questo strato dev'essere costituito da un coefficiente di permeabilità minima nell'intorno di 10^{-4} m/s. Così come per lo strato di regolarizzazione, i materiali potenzialmente utilizzabili nello strato in esame devono possedere idonee caratteristiche di resilienza e di resistenza meccanica, in grado di assorbire le sollecitazioni di esercizio. Oltre che da materiale ghiaioso, anch'esso può essere costituito da materiale di scarto o da rifiuti.

Per lo strato impermeabile il decreto legislativo n.36 del 2003 fissa dei valori molto importanti: il codesto strato deve avere spessore di almeno 50 cm ed una conducibilità idraulica pari a $k \leq 10^{-8}$ m/s (paragrafo 1.3).

Lo strato impermeabile è compreso tra due fogli di geotessile nontessuto di massa areica pari a 300 g/m² con funzione di separazione.

Salendo verso il piano campagna si incontra lo strato di drenaggio ipodermico delle acque meteoriche. In genere questo strato ha spessore \geq di 50 cm ed è costituito da materiale inerte ghiaioso (frazione granulometrica di notevole diametro). Ha il compito di drenare lo strato protettivo aumentando la capacità di immagazzinamento d'acqua, e di ridurre la pressione interstiziale nella copertura migliorandone la stabilità. Nel D.Lgs 36/2003 non vi è nessuna indicazione sulla struttura, sulla permeabilità, sulla pendenza minima della copertura. La pendenza è comunque un fattore molto importante perché essa condiziona il moto interno del drenaggio. Il materiale deve garantire quindi una permeabilità minima di $1 \cdot 10^{-2}$ cm/s, verificabile attraverso metodi indiretti (analisi granulometriche) e prove in sito. Il materiale deve avere un contenuto di fine (passante al vaglio 200 ASTM) <5% e grani di dimensioni comprese tra 30-70 mm, in taluni casi tra 16-30 mm. Il parametro caratteristico più importante degli strati drenanti granulari è la

conducibilità (o permeabilità) idraulica, k , che ha le dimensioni di una velocità (m/s) e dipende principalmente dalla natura del mezzo poroso e dal fluido. Il suo campo di variazione, per miscele di sabbie e ghiaie, è compreso tra 10^{-5} e 10^{-1} m/s, come illustrato in Tabella 1.4.

k [m/s]	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Drenaggio	BUONO					POVERO			PRATICAMENTE IMPERMEABILE			
	ghiaia pulita		sabbia pulita e miscele di sabbia e ghiaia pulita			sabbia fine, limi organici e inorganici, miscele di sabbia, limo e argilla, depositi di argilla stratificati					terreni impermeabili, argille omogenee sotto la zona alterata degli agenti atmosferici	
						terreni impermeabili modificati dagli effetti della vegetazione nel tempo						

Tabella 1.4 campo di variazione del coefficiente di conducibilità idraulica per i vari tipi di terreno.

Lo strato di terreno vegetale superficiale dev'essere spesso, secondo il D.Lgs 36/2003, almeno 1.00 m (del quale i primi 30-40 cm adatti all'inerbimento), caratterizzato da terreni prevalentemente fini, ma non adatti a fornire un'adeguata tenuta idraulica. Esso consente la crescita della vegetazione, dando al sito un aspetto quanto più gradevole. La vegetazione deve comunque avere un apparato radicale di modeste dimensioni, per contribuire a limitare l'erosione e favorire la stabilità delle scarpate. Questo strato sommitale è interessato dagli afflussi meteorici, al netto della componente relativa all'evapotraspirazione (che nei nostri climi può essere maggiore del 60% del piovuto annuo) e al ruscellamento superficiale (stimabile, per i nostri climi, nell'ordine del 10% del piovuto annuo). Questo strato ha il compito di minimizzare i fenomeni erosivi del vento e dell'acqua e di contribuire alla stabilità delle scarpate. L'entità dell'erosione dipende dall'erodibilità del suolo, che dipende a sua volta dalle sue caratteristiche fisiche, e dal potere erosivo dell'acqua, cioè dall'energia cinetica della pioggia. Questi due fattori rientrano nella formula di Wischmeier, con la quale è calcolabile l'erosione (u.d.m. t/anno):

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

dove R è il potere erosivo delle piogge; K è la propensione del terreno all'erosione (calcolabile utilizzando il nomogramma di Figura 1.17); LS è la funzione della lunghezza e della pendenza della superficie interessata (determinabile grazie al diagramma riportato in Figura 1.18); C è la capacità della vegetazione di assorbire l'energia di pioggia (C=1,0 per terreno nudo; C=0,60 per prato appena seminato; C=0,40 per prato dopo due mesi dalla semina; C=0,05 per prato dopo un anno dalla semina; C=0,01 per prato pienamente sviluppato); P dipende dall'adozione di accorgimenti tendenti a limitare la velocità di ruscellamento, che assume un valore ridotto nel caso di manti antierosione in fibre vegetali intessute (geojuta) che si biodegradano completamente dopo 2 anni.

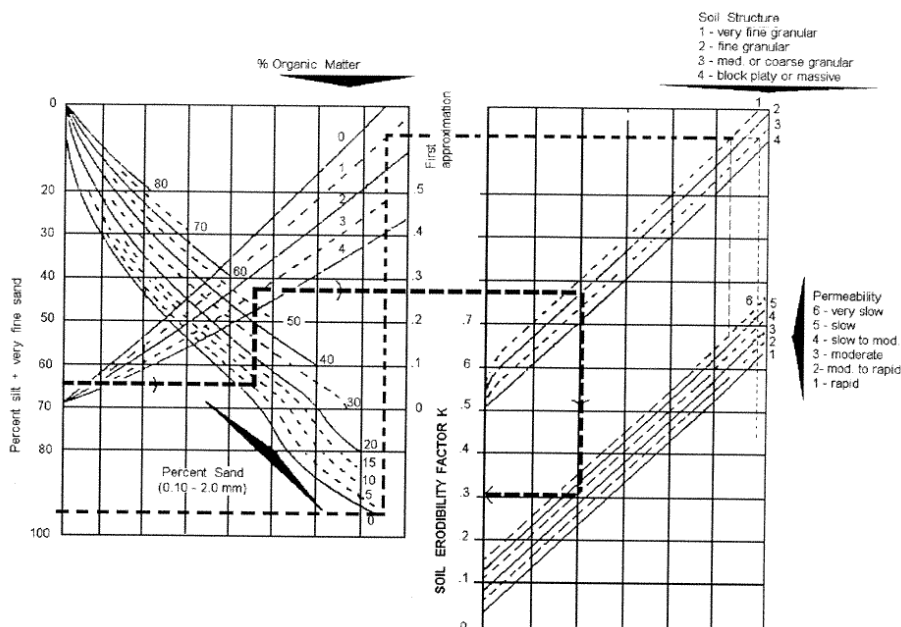


Figura 1.17 nomogramma per la stima di K nella valutazione dell'entità dell'erosione (fonte: Sistemi barriera).

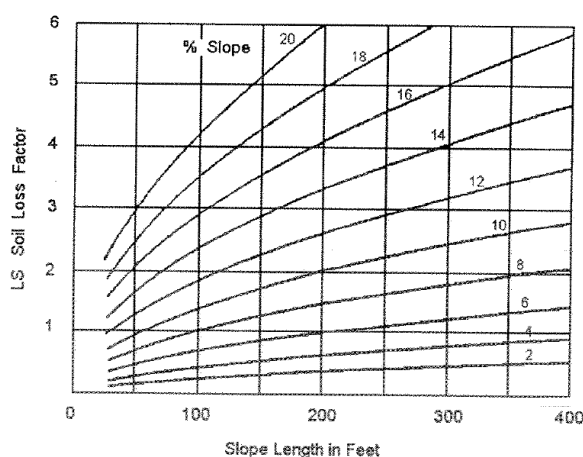


Figura 1.18 diagramma dei valori di LS in funzione della lunghezza e della pendenza della superficie interessata (fonte: Sistemi barriera).

-Modalità di copertura superficiale 2

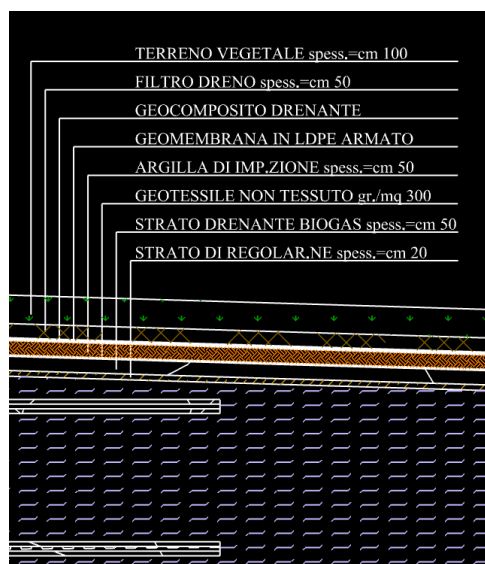


Figura 1.19 pacchetto di copertura; Lotto A-F (Tavola 7, Relazione di Approfondimento e contributi scientifici, Legnago Servizi Spa).

Nelle superfici a bassa pendenza il pacchetto di copertura può essere integrato con un filtro-dreno, sovrastante un tappeto evacuatore in geocomposito e una geomembrana in LDPE armato (Figura 1.19 e Figura 1.19). La geomembrana in LDPE armato viene disposta sopra allo strato impermeabile dopo averne opportunamente rullato e lisciato la superficie. L'aggiunta di questa geomembrana potrebbe portare inevitabilmente ad una ingente diminuzione di umidità nei rifiuti,

con conseguente interruzione e/o riduzione della degradazione biologica. L'acqua è infatti un elemento fondamentale per il processo di formazione del biogas. Per ovviare a questo, molto spesso si installano delle sonde drenanti adacquatrici che permettono di eliminare il fabbisogno di umidità della massa rifiuti.

Nel dettaglio la geomembrana si compone di una rete in HDPE interclusa fra due film in LDPE. Essa è dotata di buona resistenza a trazione e a lacerazione ed è in grado di contrastare il peso del terreno sovrastante, garantendo una maggiore stabilità globale al pacchetto di copertura. Inoltre deve avere una flessibilità del manto e una scabrezza della superficie in modo da permettere un discreto contatto al taglio con gli elementi sovrastanti. La membrana, grazie alla sua notevole resistenza e leggerezza, può essere presaldata in stabilimento (quindi in condizioni ambientali ideali) fino a ottenere manti di notevoli dimensioni (es. in $40 \times 100 = 4.000 \text{ m}^2$ cadauno di superficie), minimizzando le connessioni in discarica (solo il 10%). Le saldature effettuate in stabilimento realizzano linee di continuità con caratteristiche di resistenza pressoché identiche alla membrana integra. Le giunzioni avvengono per termosaldatura a doppia pista. In Tabella 1.5 sono elencate le caratteristiche minime di una geomembrana idonea all'utilizzo preposto:

Resistenza a trazione minima [EN 18492]	27 kN/m
Spessore nominale minimo [EN ISO 527-4]	0,55 mm
Allungamento massimo al carico massimo [EN ISO 527-4]	30%
Resistenza minima a punzonamento statico CBR [EN 12236]	4.300 N
Resistenza a trazione delle presaldature [UNI 8202/30]	Rottura fuori giunto
Resistenza agli U.V.	Stabilizzata
Permeabilità idraulica massima [UNI 8202/23]	$2,80 \times 10^{-14} \text{ m/s}$
Permeabilità al metano massima [ASTM D 1434]	$40 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \times \text{day})$
Resistenza alle temperature	$-30^\circ\text{C} \div 70^\circ\text{C}$

Tabella 1.5 caratteristiche di una geomembrana.

Il tappeto drenante evacuatore sovrastante è costituito dall'accoppiamento a caldo di una georete (con funzione di distribuire i carichi e di drenaggio) e di un geotessile nontessuto (con funzione filtrante). Questo tappeto evacuatore è in grado di allontanare in sicurezza il deflusso ipodermico, annullando in questo modo il battente sulla barriera impermeabile sottostante. Lo strato chiamato filtro-dreno autocatrizzante dev'essere spesso almeno 0.50 m, in terreno naturale e/o materiale simile di transizione granulometrica tra il sottostante tappeto evacuatore in geocomposito e il sovrastante strato vegetale, in grado di proteggere il sottostante livello evacuatore da possibili intasamenti, a fronte delle migrazioni di granuli fini e finissimi provenienti dal sovrastante strato vegetale, eliminando il filtro in geotessile.

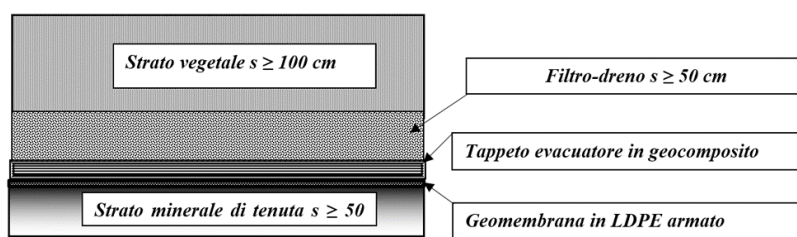


Figura 1.20 accoppiamento filtro-dreno, tappeto evacuatore in geocomposito e geomembrana in LDPE armato.

-Modalità di copertura superficiale 3

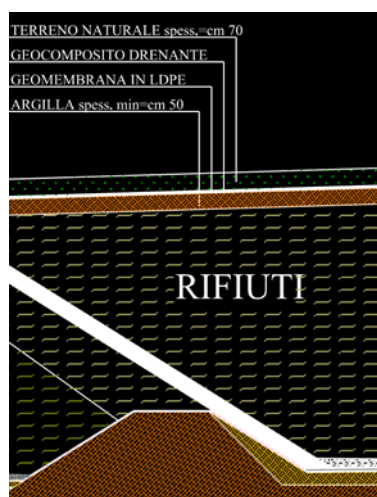


Figura 1.21 pacchetto di copertura, Lotto A (Tavola 7, Relazione di Approfondimento e contributi scientifici, Legnago Servizi Spa).

Oltre a queste configurazioni, è possibile in taluni casi osservare un pacchetto di copertura molto semplificato composto soltanto da: uno strato di argilla impermeabile sottostante dello spessore di 50 cm, una geomembrana in LDPE, un geocomposito drenante e un terreno naturale spesso ben 70 cm (Figura 1.21).

1.2.4 Criteri di progettazione e normativa di riferimento

Il pacchetto di copertura superficiale deve prima di tutto essere realizzato nel rispetto dei requisiti minimi fissati da normativa (D.Lgs. 36/2003). Esso deve necessariamente avere una permeabilità non inferiore a quella del pacchetto di base e avere un'inclinazione tale da favorire il ruscellamento e il drenaggio dell'acqua fuori dalla massa rifiuti. Inoltre, a pieno spessore e con tutte le componenti, deve avere un'estensione tale da ricoprire completamente la porzione di terreno contaminato, possibilmente con un margine di sicurezza pari a qualche metro. Inoltre dev'essere dotato di integrità strutturale, ovvero deve avere requisiti di resistenza statica e dinamica, in modo da non essere soggetto a cedimenti. Il capping dev'essere inoltre efficiente nel tempo con una manutenzione minima (i problemi più comuni a tal proposito sono la penetrazione di radici ed animali, la stabilità delle scarpate, il traffico, la subsidenza dei rifiuti).

La strato vegetale superficiale deve essere adeguato alla destinazione d'uso della copertura e per questo realizzato con un materiale (terreno vegetale, asfalto, ecc.) adeguato in termini di durabilità e resistenza agli agenti meteorici. Dev'essere progettato con una pendenza sufficiente a favorire il deflusso delle acque meteoriche.

Lo strato drenante dev'essere caratterizzato da una pendenza $>1\%$, una conducibilità idraulica $>1 \cdot 10^{-4}$ m/s (per strati drenanti naturali) e una trasmissività $>3 \cdot 10^{-5}$ m²/s (per strati drenanti geosintetici). Questo strato drenante deve essere collegato a sistemi di scarico delle acque (pozzetti, tubazioni) dimensionati in base della massima portata attesa.

Lo spessore e il materiale impiegato nello strato impermeabile debbono essere valutati in relazione alla loro funzione di barriera contro l'infiltrazione delle acque meteoriche e la conseguente probabile migrazione degli inquinanti in profondità. Inoltre nella valutazione dell'efficienza del pacchetto di copertura devono essere attentamente considerati diversi fattori quali: la variazione delle condizioni meteorologiche (fenomeni di gelo/disgelo, cicli di bagnatura ed essiccamento); la penetrazione di radici ed animali; problemi di stabilità delle scarpate della copertura; il traffico veicolare sulle strade che attraversano la copertura; l'erosione ad opera del vento e dell'acqua di ruscellamento; la mancanza di adeguati sistemi di raccolta di biogas, e quindi sollevamento della copertura; lo sprofondamento della copertura per cedimento dei rifiuti; la fessurazione dell'argilla compattata in seguito a cedimenti differenziali e rottura della geomembrana; problemi di stabilità dovuti allo scivolamento del terreno a contatto con la geomembrana; la mancanza di un adeguato drenaggio dell'acqua, che provoca la saturazione del terreno, e quindi l'instabilità del terreno di copertura; l'insufficiente spessore dello strato di protezione, e quindi vulnerabilità ai cicli gelo/disgelo; essiccamento; il punzonamento delle geomembrane in mancanza di un'adeguata separazione tra geomembrana e drenaggio; l'erosione della copertura per effetto di acqua e vento, e quindi diminuzione dello spessore di progetto.

Per questo durante la fase di progettazione è necessario tener conto della stabilità complessiva della copertura, della resistenza al punzonamento e della capacità del sistema di chiusura di sostenere le sollecitazioni dovute ai cedimenti. Per esempio la stabilità della copertura è influenzata dalla sua pendenza e dall'attrito al contatto tra la geomembrana e lo strato drenante superiore. In alcune nuove realizzazioni lo strato drenante è costituito da una georete a contatto con una geomembrana con angolo di attrito tra le due superfici variabile da 8 a 10 gradi. Questi bassi angoli di attrito possono determinare l'instabilità della copertura. La presenza di un geotessile sulla faccia superiore della geomembrana può determinare un sensibile miglioramento dell'attrito tra geomembrana e materiale drenante superiore.

Le geomembrane di copertura devono resistere alla penetrazione dovuta a macchinari, massi, radici e altri fenomeni naturali. Un geotessile posto sopra o sotto la membrana ne aumenta la resistenza al punzonamento di 3-4 volte.

1.2.5 Le varie fasi di “coltivazione” di una discarica

Per la messa in posto del pacchetto di copertura è possibile seguire due metodologie: la prima, denominata “per incrementi di strato” consiste nel posizionamento di uno strato dopo l’altro a partire dal basso, previa attesa per un certo intervallo di tempo affinché la massa rifiuti si assesti al nuovo carico di volta in volta impartito durante la costruzione completa del pacchetto; la seconda detta “per incrementi di area” consente il completamento della discarica per moduli indipendenti ed ogni componente del sistema di copertura finale viene realizzato nel medesimo momento (Figura 1.22). Durante la realizzazione con quest’ultima metodologia, si ha un più efficiente uso dei mezzi. Il materiale potrà però essere steso solo previa approvazione della superficie di imposta o dello strato precedente da parte della Direzione Lavori.

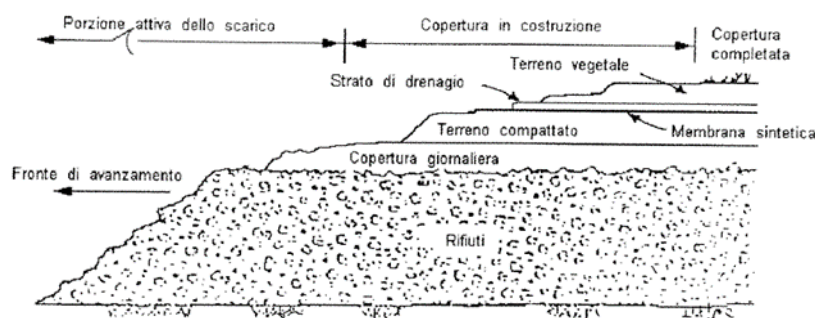


Figura 1.22 sistema di copertura finale con il metodo degli incrementi di area (fonte: Sistemi barriera).

1.2.5.1 La copertura provvisoria

Si stima che in una discarica per RSU avvengano oltre il 40% degli cedimenti ad opera della degradazione biologica dei rifiuti durante il primo anno di esercizio (cedimenti del corpo rifiuti affrontati nel sottoparagrafo 1.4.2). Facendo riferimento alla discarica di Torretta di Legnago (VR), i cedimenti totali massimi stimati risultano pari a circa 2.67 m per il Lotto C e di circa 3.71 m per i nuovi lotti di ampliamento. Se il pacchetto di copertura superficiale fosse completato entro un anno dal conferimento dei rifiuti, esso subirebbe una riduzione delle pendenze e la formazione di depressioni localizzate a seguito degli assestamenti della massa rifiuti. La sistemazione di questi avvallamenti richiederebbe quindi notevoli apporti di nuovo materiale, dispendio di ampie somme di denaro e mano d'opera. Per ovviare a ciò, si procede con la creazione di una copertura provvisoria con durata di almeno un anno dal conferimento dei rifiuti. La copertura provvisoria consiste, dal basso verso l'alto, in: strato di regolarizzazione di spessore almeno di 20 cm, geotessile tessuto, strato di drenaggio del biogas di spessore 50 cm, geotessile nontessuto, strato impermeabile, un geotessuto in HDPE. Il sottile geotessuto in HDPE funge da contenimento degli odori e da protezione, evitando il diretto contatto dello strato impermeabile con l'acqua meteorica, con gli animali e con l'uomo.

Seguendo questa procedura di creazione di una copertura temporanea, le prevedibili depressioni causate dai cedimenti della massa rifiuti potranno essere compensate senza eccessivi costi. Inoltre la maturazione del corpo rifiuti di almeno un anno consentirà una migliore valutazione delle correzioni da apportare alla superficie di posa degli altri strati. Si ricordi, infatti, che la sottovalutazione dei cedimenti potrebbe generare concavità nelle pendenze finali, con prevedibili conseguenze sul deflusso delle acque ipodermiche.

1.3 Lo strato impermeabile

1.3.1 Le caratteristiche richieste al materiale fine

Il materiale fine utilizzato per la barriera impermeabile delle discariche RSU in genere proviene da un impianto di frantumazione o da una cava proposta dall'Impresa e approvata dalla Direzione Lavori. È compito dell'Impresa e della Direzione Lavori stabilire mediante opportune prove se i materiali disponibili siano conformi alla presente Specifica. I risultati delle indagini dell'Impresa devono poi essere messi a disposizione del Committente. L'Impresa in seguito comunica alla Direzione Lavori, con almeno 30 giorni di anticipo sull'inizio delle operazioni di posa, i nominativi degli impianti o delle cave di prestito che intende utilizzare, e fornisce alla Direzione Lavori campioni del materiale. La Direzione Lavori ha quindi il compito di classificare e verificare l'effettiva utilizzabilità di questi campioni di materiale prescelto mediante l'attuazione di prove di laboratorio, quali analisi granulometriche tramite sedimentazione (diametro particelle <0.06 mm) e/o tramite setacciatura (diametro particelle $d \geq 0.06$ mm), limiti di Atterberg, prove di densità Proctor Standard e prove di permeabilità in apparecchio triassiale, previa compattazione.

Tenendo presente che il Decreto Legislativo indica un valore di coefficiente di permeabilità $\leq 10^{-8}$ m/s, in genere si consiglia vivamente l'utilizzo di materiali con Indice di Plasticità $10 < IP < 50$ (meglio se $10 < IP < 40$), con una percentuale di materiale fino (passante al vaglio ASTM n.200, apertura $75\mu\text{m}$) $\geq 25\%$, una percentuale di ghiaia (passante al setaccio ASTM n.4, apertura 4.76 mm) $\leq 40\%$ e aggregazioni d'argilla di dimensioni comprese nell'intervallo $25-50$ mm. Il range di indice plastico ($10 < IP < 50$ (40)) permette che il terreno sia abbastanza plastico, sufficientemente palabile e che abbia un contenuto d'acqua tale da sopportare i carichi dei diversi mezzi di compattazione. Se il terreno avesse un $IP < 10$, si avrebbe un terreno dal basso contenuto argilloso e basso contenuto d'acqua (terreno secco),

quindi poco lavorabile durante le fasi di stesa e di compattazione. Se al contrario il terreno presentasse un $IP > 50$, i mezzi di compattazione sprofonderebbero a causa del suo alto contenuto d'acqua. Facendo riferimento alla curva Proctor, in corrispondenza dell'optimum vi è il massimo stato di addensamento del terreno (contatti intergranulari fitti), quindi più basso è l'indice di plasticità, più basso è l'optimum della curva alla quale vi è il massimo addensamento delle particelle fini. Per garantire che la permeabilità della barriera abbia i valori di progetto, bisogna essere in prossimità dell'optimum o leggermente più a destra di tale punto (Figura 1.23).

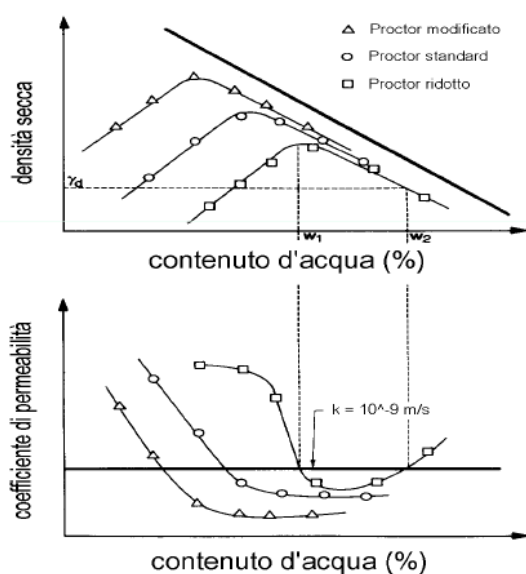


Figura 1.23 variazione della permeabilità con l'energia di compattazione.

Per ciò che riguarda la conducibilità idraulica di un terreno argilloso, essa dipende dalla configurazione strutturale ovvero dalla macro-porosità del terreno. Quest'ultima a sua volta è controllata da diversi fattori quali la composizione mineralogica, la distribuzione dei grani, la densità, i limiti di plasticità e il livello tensionale applicato. Non è però ragionevole assumere che il valore di conducibilità idraulica ottenuto dalle prove di laboratorio sia lo stesso di quello che si ha sul campo. Ad esempio nei terreni interessati da un fenomeno di percolazione, che vedono un cambiamento della struttura da dispersa a flocculata, avviene inevitabilmente una riorganizzazione delle particelle e dei pori intergranulari, e

quindi una modifica stessa della conducibilità idraulica. Il passaggio da struttura dispersa a flocculata porta inoltre a una riduzione di volume con fenomeni di ritiro e formazione di crepe o fessure nel terreno. Un esempio in tal senso è dato dalla permeazione nel terreno di una soluzione contenente NaCl: in seguito al fenomeno della consolidazione osmotica, il terreno tende a ritirarsi. La riduzione delle forze di repulsione porta ad una contrazione degli aggregati e all'incremento della resistenza al taglio al contatto tra di essi, per cui la struttura del terreno tende ad irrigidirsi (Favaretti e Moraci, 1995). Il risultato di ciò è una riduzione del volume, seppur minore dell'entità della contrazione all'interno dei singoli aggregati, che comporta la maggiore apertura dei pori e la formazione di vere e proprie fessurazioni. Di conseguenza si verifica un aumento della porosità effettiva e quindi della conducibilità idraulica, ed una diminuzione dell'indice dei vuoti. L'unico fattore che può contrastare questo aumento di porosità efficace e di permeabilità è la tensione verticale a cui può essere soggetto il terreno. Sarebbe quindi opportuno realizzare in fase di progetto dei test di conducibilità idraulica affidabili direttamente in sito, ma risultano molto più costosi e di difficile realizzazione. Come è facile intuire dal tema appena trattato, la compatibilità chimica tra il materiale argilloso e il percolato riveste un ruolo fondamentale. La rimozione di alcune sostanze chimiche sciolte nell'acqua può portare ad un incremento della conducibilità idraulica, mentre la loro precipitazione può comportare l'intasamento dei pori, la diminuzione della porosità e conseguente diminuzione della conducibilità idraulica dell'argilla.

La componente inquinata del percolato può migrare attraverso una barriera di argilla sia per convezione, grazie all'effetto di un gradiente idraulico, sia per diffusione molecolare. Quest'ultimo processo non è regolato da un gradiente idraulico (la diffusione molecolare può infatti verificarsi anche in presenza di un flusso d'acqua inverso per direzione), ma bensì da un gradiente di concentrazione chimica presente tra la zona interna alla discarica e l'ambiente circostante. Inoltre il fenomeno dell'adsorbimento consente di ritardare il rilascio di inquinante all'ambiente circostante.

La % di particelle fini (sabbie fini, limi e argille) è un dato importante, in quanto il fine governa la filtrazione e di conseguenza la permeabilità: maggiore è la % di fine in una struttura, supponiamo più o meno eterogenea, maggiori saranno le occlusioni all'interno dei pori, minori saranno gli spazi per il flusso e minore sarà la permeabilità del terreno. Dall'altra parte, per mantenere il coefficiente di permeabilità fissato da normativa, è richiesta una percentuale di ghiaia minore del 40%. Se questo indice superasse il 50-60%, la permeabilità aumenterebbe molto rapidamente, in quanto il flusso all'interno del terreno sarebbe governato dalle particelle grossolane e non da quelle fini.

Le aggregazioni delle particelle non devono superare la dimensione massima di 25-50 mm. Nel caso risultassero più grandi, dovranno necessariamente essere frantumate prima della posa in opera e della compattazione. Maggiori sono le dimensioni delle aggregazioni, maggiori saranno i pori inter-aggregati e la conducibilità complessiva.

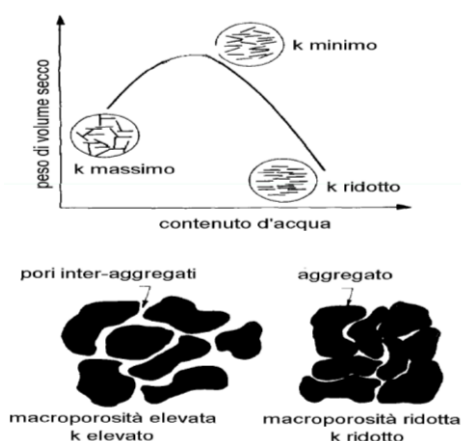


Figura 1.24 effetti della densità e del contenuto d'acqua sulla permeabilità di un'argilla compattata (Benson e Daniel, 1990).

L'argilla è un materiale dotato inoltre di duttilità, che le consente sia di adattarsi agli assestamenti della massa rifiuti su cui poggia il pacchetto di copertura della discarica, sia alle deformazioni generate dalle interazioni argilla-percolato. La duttilità è una caratteristica di fondamentale importanza per un materiale argilloso, in quanto contrasta i fenomeni di fessurazione riducendoli totalmente o in parte. Inoltre l'argilla dev'essere dotata di palabilità e di compattabilità tali da essere

messa in opera senza eccessiva difficoltà. Per questo il materiale dev'essere caratterizzato da una plasticità variabile tra bassa e media.

1.3.2 La messa in opera della barriera impermeabile

La barriera impermeabile viene creata per strati compattati successivi (ad esempio per successione di 2-3 strati). Per “compattazione” si intende la tecnica che consente di aumentare la densità dei terreni per mezzo di adeguate attrezzature meccaniche. Ha come fine quello di produrre nella terra caratteristiche tali da renderla idonea a soddisfare specifiche esigenze progettuali. In particolare si può mirare ad ottenere il miglioramento della resistenza al taglio, la riduzione della permeabilità e la diminuzione della compressibilità. La struttura di un'argilla compattata impermeabile dipende dai seguenti fattori:

- tecnica di posa;
- contenuto d'acqua e densità;
- conducibilità idraulica;
- procedura ed energia di compattazione;
- dimensioni delle aggregazioni;
- spessore dello strato;
- essiccazione.

Tali fattori sono controllabili attraverso un'accurata scelta del tipo di terreno e delle procedure di posa in opera. Come è noto un terreno è costituito da particelle solide e da vuoti intergranulari, riempiti di aria e acqua. Il meccanismo di addensamento comporta la diminuzione dello spazio intergranulare, l'aumento del numero di punti di contatto fra le particelle solide e conseguente miglioramento della resistenza al taglio. Si osserva sperimentalmente che, se l'energia di compattazione si mantiene costante, la densità secca varia al variare del contenuto d'acqua. Le particelle di terreno sono circondate da film d'acqua, il cui spessore dipende dall'umidità presente nel terreno. Quando tale film raggiunge un certo spessore, le particelle sono libere di scorrere. Nel caso di terreni a grana grossa, lo spessore di queste

specie di pellicole d'acqua è trascurabile nei confronti del diametro delle singole particelle di terreno; il fenomeno è pertanto significativo solo nei terreni a grana fine, dove l'aggiunta di piccole quantità d'acqua favorisce il processo di addensamento.

Per un determinato terreno esiste un valore di densità secca massima (definito Maximum) e un corrispondente contenuto d'acqua ottimale (definito Optimum) per ciascun livello di energia di compattazione applicata. L'obiettivo di una prova di compattazione è pertanto quello di ricercare, per un dato terreno, il contenuto d'acqua per il quale, ad una data energia di compattazione, corrisponde l'addensamento massimo. Quindi vengono realizzate sia delle prove di compattazione per individuare la curva di densità secca in funzione del contenuto d'acqua (Figura 1.25), sia delle prove di conducibilità idraulica su campioni di materiale compattato a contenuti d'acqua superiori all'optimum. Se si ottengono valori di conducibilità idraulica inferiori a quelli richiesti da normativa, il materiale potrà essere utilizzato nella costruzione della barriera di impermeabilizzazione. L'energia di compattazione utilizzata per le analisi di laboratorio deve simulare per quanto possibile quella prevista in sito. L'energia di compattazione Proctor modificata rappresenta un ragionevole limite superiore dello sforzo di compattazione applicabile in sito, mentre l'energia Proctor Standard rappresenta il valore medio di compattazione. Un'argilla che presenta un contenuto d'acqua uguale o leggermente superiore dell'optimum può essere compattata alla massima densità secca possibile e risulta caratterizzata dalla minima conducibilità idraulica. Se un'argilla presenta un contenuto d'acqua eccessivo, essa può perdere consistenza ed essere dotata di una resistenza al taglio molto bassa, che condiziona i materiali di diversa natura posti sulle pareti laterali di una discarica.

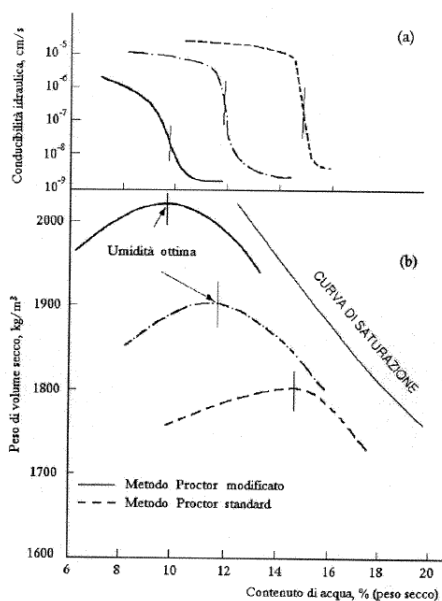


Figura 1.25 densità secca e conducibilità idraulica in funzione del contenuto d'acqua e dell'energia di compattazione (fonte: Sistemi barriera).

Ipotizzando di voler creare una barriera spessa 50 cm composta da 2 strati di materiale fine (30 cm+30 cm), si procede alla stesura del primo strato di 30 cm. Dopo il passaggio dei mezzi di compattazione, tale spessore si ridurrà a 25 cm. Si segue lo stesso procedimento per il secondo strato, fino ad ottenere una barriera finale di 50 cm (25 cm+25 cm). Ogni sottile strato deve necessariamente poggiare su una superficie piana regolare ("piano di posa"), per questo nel caso le ruote dei mezzi di compattazione lasciassero un'impronta importante, si procede con operazioni di spianamento/livellamento. Inoltre questo meccanismo di compattazione può portare a vie preferenziali di filtrazione nel caso di contatto incompleto degli strati. È necessario quindi procedere alla scarificazione e al controllo dell'umidità naturale superficiale di ciascun sottile strato. Qualora l'insolazione e l'alta temperatura ambientale creassero polvere sul piano di imposta o sulla superficie degli strati, e in taluni casi essiccassero e fratturassero il terreno con conseguente aumento della conducibilità idraulica complessiva anche di 2-3 ordini di grandezza, si dovrà necessariamente procedere all'umidificazione della superficie fino alla stesura dello strato successivo, oppure alla sigillatura con sigillanti bituminosi, o alla copertura con geomembrane. Il metodo della compattazione per strati sottili successivi consente di ottenere una distribuzione

omogenea sia dal punto di vista del contenuto d'acqua sia dell'energia di compattazione in tutto l'intero spessore della barriera impermeabile. In genere vengono condotte prove, dette “metodo della sabbia tarata” per analizzare l'effettivo grado di compattazione dell'intera barriera.

Le operazioni di compattazione normalmente vengono eseguite utilizzando un rullo statico con peso non inferiore alle 12 tonnellate e pressione di contatto al piede tra i 25 ed i 35 kg/cmq. I rulli compattatori operano in maniera sistematica, su strisce parallele più lunghe possibili, con una sovrapposizione non inferiore ai 20 cm. La loro velocità operativa non supera i 4 km/h. Qualora fossero presenti zolle di terra di grandi dimensioni, oltre al mezzo appena citato viene impiegato un rullo a piede di pecora, costituito da un pneumatico dotato di piedi di ferro, che compenetrando le zolle d'argilla esercita un'azione di punzonamento in grado di ridurre di dimensione gli aggregati ottenendo un terreno più possibile disgregato, incrementandone in questo modo anche l'impermeabilità.

Prima di compattare il terreno è buona norma condurre analisi sul contenuto d'acqua, precedendo all'aggiunta di acqua nebulizzata nel qual caso il contenuto d'umidità risultasse inferiore all'optimum. Il nebulizzatore consente di distribuire l'acqua in maniera omogenea su tutta la superficie, evitando la formazione di pozzanghere sulla superficie di stesa. Se al contrario il contenuto d'acqua risultasse maggiore dell'optimum, il terreno viene steso e atteso qualche giorno affinché si asciughi. Piccoli aggiustamenti del contenuto d'acqua possono essere apportati con una certa rapidità prima della compattazione, mentre grandi aggiustamenti (più del 3%) non possono essere implementati immediatamente prima di compattare, stante la limitata conducibilità idraulica del terreno, che deve avere il tempo di umidificare o essiccare uniformemente. In questo caso, è necessario bagnare o essiccare il terreno avendo cura di rimescolarlo durante la fase di bagnatura (o essiccazione) e di attendere il tempo necessario affinché raggiunga una sufficiente uniformità.

Non si potrà procedere alla compattazione se le analisi eseguite sui campioni prelevati in cantiere mostrano uno scarto superiore al 5% dall'umidità ottimale determinata in laboratorio con il metodo Proctor Standard. Il corretto numero di passate del rullo e dello spessore ottimale degli strati sarà determinato all'inizio dei

lavori di compattazione dopo aver eseguito un campo prova. Qualora le prove di densità in sito eseguite in tale momento provassero che la densità specificata non può essere raggiunta con le prescrizioni limite, il numero di passate richiesto potrà essere incrementato o lo spessore degli strati diminuito; in ogni caso il numero di passate non potrà mai essere superiore a 14.

La buona o cattiva esecuzione di uno strato di argilla compattata è indicata dal valore della porosità effettiva, che indica il rapporto tra il volume dei pori, attraverso i quali si sviluppa effettivamente il moto di filtrazione, ed il volume totale. La porosità effettiva di un'argilla compattata non può essere maggiore della sua porosità totale. La velocità di filtrazione v_s di un fluido attraverso un mezzo poroso, nella direzione del gradiente idraulico i , è inversamente proporzionale alla sua porosità effettiva n_e :

$$v_s = \frac{v}{n_e} = \frac{k \cdot i}{n_e}$$

dove con v è indicata la velocità media di filtrazione, calcolata con la legge di Darcy, e con k la conducibilità idraulica. Nel caso in cui vengano trascurati gli effetti della diffusione e dell'attenuazione chimica, il tempo di attraversamento t_a della barriera di argilla è pari al rapporto d/v_s (dove d è lo spessore dello strato della barriera) ed è proporzionale alla porosità effettiva. Alla luce di quanto detto è pertanto auspicabile che le procedure di compattazione dello strato di argilla portino ad ottenere una porosità effettiva quanto più prossima alla porosità totale; in tal caso infatti il tempo di attraversamento dello strato risulterebbe massimo.

1.4 Biodegradazione dei rifiuti solidi urbani

1.4.1 La caratterizzazione biochimica dei rifiuti

Il rifiuto è un mezzo poroso polifasico costituito da una fase solida, liquida e gassosa, in proporzioni variabili. La fase solida è a sua volta distinta in materia

inerte, materia deformabile e materia decomponibile. La fase liquida è composta dall'acqua di percolazione proveniente dalle precipitazioni e dai residui liquidi provenienti dalla decomposizione dei rifiuti organici. La fase gassosa è composta da aria e da gas essenzialmente organico o azotato, prodotto dalla decomposizione della sostanza organica. Il comportamento complessivo del rifiuto, in continua evoluzione nel tempo, dipende dal comportamento di ciascuna delle sue componenti, ma anche dalle loro interazioni.

Quando l'acqua di precipitazione si infiltra attraverso la fase solida dei rifiuti, essa si carica sia di sostanze chimiche a seguito degli scambi fisico-chimici che nascono tra queste due fasi, sia di residui di biodegradazione, trasformandosi in percolato. Durante la fase di degradazione biologica è possibile osservare una produzione continua di biogas costituito da CH_4 e CO_2 . La produzione di biogas è sempre attiva ed il metano viene collettato in continuo attraverso i pozzi di captazione.

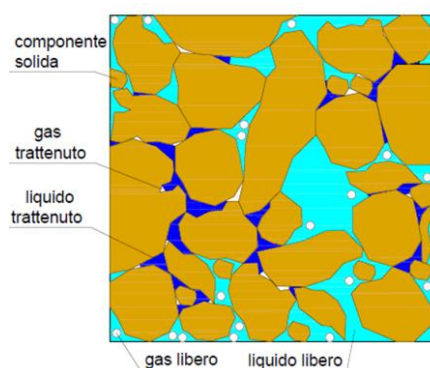


Figura 1.26 rappresentazione della struttura del rifiuto intesa come mezzo poroso (M. Conte).

1.4.1.1 I processi di biodegradazione

Tra la degradazione dei rifiuti e la temperatura c'è una relazione bifunzionale, ovvero la degradazione produce determinate temperature, ma la temperatura influenza essa stessa le specie di microrganismi che agiscono al processo di degradazione. In genere l'attività anaerobica si verifica in un ampio intervallo di temperatura (Figura 1.27): tra i -5° e i $+70^\circ\text{C}$. Esistono diverse specie di

microrganismi classificabili in base all'intervallo termico ottimale di crescita: psicrofili ($T < 20^{\circ}\text{C}$), mesofili ($20^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$) e termofili ($T > 45^{\circ}\text{C}$).

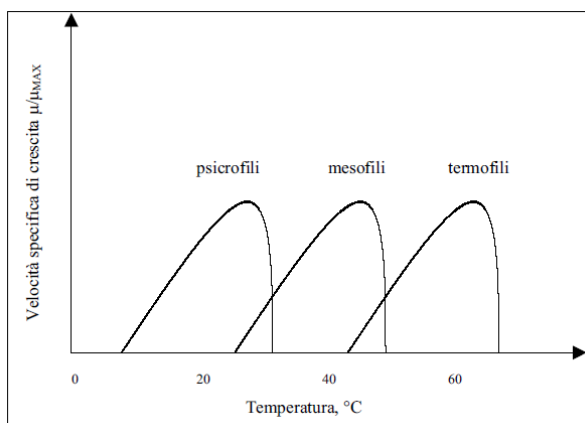


Figura 1.27 influenza della temperatura sulla cinetica biologica (Genon (1993)).

Secondo Rowe (1998) la temperatura dei rifiuti dipende dalla loro profondità, dal tasso di riempimento e dalle proprietà dei rifiuti stessi. Inoltre, imputa alla presenza di percolato, le alte temperature misurabili in discarica. Rees affronta un aspetto riguardante la produzione di gas. Secondo questo autore un'eccessiva infiltrazione d'acqua potrebbe inibire la metanogenesi e raffreddare la massa dei rifiuti, con la conseguente diminuzione di produzione di gas metano.

Le reazioni biologiche iniziano dapprima con la degradazione in condizioni aerobiche, durante la quale si sviluppa la consumazione dell'aria presente nei vuoti dei rifiuti. In compenso si ha la netta produzione di CO_2 . La durata di questa fase, fortemente esotermica (60°C - 70°C), può essere di qualche giorno fino a qualche settimana. Una volta consumato tutto l'ossigeno, avviene la biodegradazione anaerobica, che si divide in una prima fase non metanigena, seguita da una fase metanigena instabile, che può avere durata di qualche mese fino, in taluni casi, raggiungere gli 1-2 anni. La fase conclusiva di biodegradazione anaerobica è la così detta fase metanigena stabile con durata di 15-20 anni. L'ultima fase è detta aerobica finale.

1.4.2 I cedimenti dei rifiuti nelle discariche di RSU

Una discarica è un sistema progettato e costruito per contenere rifiuti così da minimizzare il rilascio di contaminanti nell'ambiente. L'efficacia di una discarica può essere espressa in forma generale in funzione di diversi fattori:

$$E_t = f[(D + P_m + C) + (Q) + (M_o + M_e) + (S_g + S_h) + (L_t)]$$

dove:

E_t è l'efficacia della discarica ad un particolare tempo dopo la costruzione;

D corrisponde alle dimensioni dei componenti della discarica;

P_m è la proprietà dei materiali in discarica;

C è l'arrangiamento (configurazione) dei componenti;

Q è la qualità di sicurezza pratica durante la costruzione;

M_o è il progetto e l'efficienza operativa del sistema di monitoraggio;

M_e è l'efficacia della manutenzione in base al tipo e alla frequenza delle attività di manutenzione stessa;

S_g indica le caratteristiche geotecniche e geologiche del sito;

S_h indica le caratteristiche idrologiche e climatiche del sito;

L_t sono i carichi variabili nel tempo e fenomeni che inducono stress dentro e/o tra i componenti della struttura.

E' fondamentale quindi che venga garantita nel tempo l'integrità delle strutture in essa presenti (sistema di drenaggio del percolato, sistema di captazione del biogas, sistemi barriera, capping). Mentre la stabilità del suolo su cui è posta la discarica è accuratamente studiabile facendo riferimento alle equazioni consolidate della geotecnica, la stabilità del corpo rifiuti è ancora oggetto di studio per le difficoltà presenti nella determinazione delle proprietà geotecniche dei rifiuti solidi urbani dovute alla loro eterogeneità, alle difficoltà nel reperire campioni rappresentativi, alla mancanza di procedure unificate di campionamento e alla variabilità delle proprietà nel tempo anche in funzione del sistema di abbancamento, dei pretrattamenti effettuati e della presenza dello strato di copertura giornaliero. La soluzione studiata attualmente in campo scientifico è la determinazione del

legame fra compressione secondaria e degradazione del rifiuto, come previsto dai modelli di calcolo dei cedimenti, in modo che la conoscenza a priori della prima possa portare ad una efficace determinazione della seconda. I cedimenti e le deformazioni che avvengono in una discarica, prodotti generalmente dalla compressibilità molto elevata, anche sotto carichi moderati, e da processi di degradazione, sono considerati l'aspetto strutturale più rilevante.

In particolare i rifiuti subiscono una riduzione del volume in seguito al processo di degradazione, che comporta la trasformazione da stato solido a stato liquido e gassoso dei materiali con conseguente instaurarsi di cedimenti anche di notevole entità. Il cedimento indotto dalla degradazione biologica della sostanza organica può continuare per molti anni, anche dopo la chiusura del sito provocando considerevoli rotture nella copertura finale, sebbene numerosi studi indichino un alto tasso di cedimento concentrato nel primo anno dal conferimento dei rifiuti in discarica. I cedimenti non sono distribuiti in maniera uniforme, ma differenziale, in quanto dipendono dalla caratteristica di deformabilità del corpo rifiuti, che a sua volta è relazionato a:

- la composizione iniziale del rifiuto;
- il contenuto di sostanza organica;
- l'età del rifiuto;
- la densità iniziale, la porosità e l'indice iniziale dei vuoti;
- le modalità di messa in opera dei rifiuti;
- la densità di compattazione;
- l'altezza finale del cumulo di rifiuti;
- la quantità di materiale utilizzato per la copertura giornaliera;
- la produzione di percolato, il suo livello sulla barriera impermeabile di fondo e la permeabilità idraulica nel cumulo di rifiuti;
- l'umidità ed il contenuto d'acqua;
- la velocità di degradazione della sostanza organica;
- la temperatura;
- la produzione di biogas.

Il rifiuto si deforma e cede a causa del proprio peso e per l'azione di sovraccarichi esterni, come:

- ulteriori strati di rifiuti;
- la copertura finale;
- eventuali costruzioni successive, durante la fase di riutilizzazione del sito.

Viste queste numerose variabili, la determinazione e il calcolo dei cedimenti rappresenta un processo di difficile attuazione. È comunque opportuno condurre una stima preliminare della deformabilità d'insieme in modo da dimensionare correttamente il sistema dei pozzi per la captazione del biogas. Nel caso contrario questi pozzi potrebbero essere sottoposti a delle anomale sollecitazioni o a sovraccarichi che possono compromettere facilmente la loro integrità e funzionalità. In riferimento alla Figura 1.28 a), un campione di rifiuti è composto idealmente da elementi inerti stabili, da elementi fortemente deformabili (carta, tessili, plastica lamellare) e da elementi degradabili (sostanza organica). Se soggetti a un sovraccarico Q , gli elementi inerti subiscono grandi spostamenti disponendosi secondo una struttura definitiva, senza però aver possibilità di entrare a contatto tra di loro in quanto impediti dagli altri elementi. Man mano che il campione è sottoposto a carico costante (creep) e la sostanza organica diminuisce di volume in seguito a degradazione biologica, la massa subisce una riorganizzazione della struttura interna (Figura 1.28 b)). Una volta terminata la degradazione degli elementi degradabili, i contatti tra gli elementi inerti possono essere ristabiliti (Figura 1.28 c)). In Tabella 1.6 sono riportati tutti i meccanismi di compressione del rifiuto e i fattori che influiscono sui cedimenti (Monassero et al., (1996)).

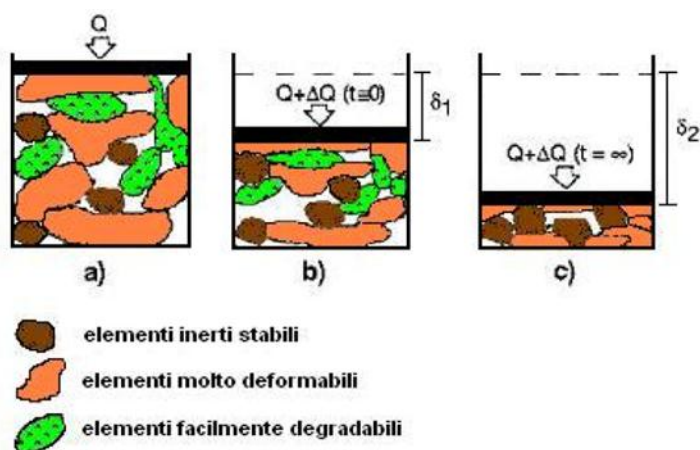


Figura 1.28 fasi di deformazione di un campione di rifiuti (adattata da Grisolia et al., 1995).

Meccanismi coinvolti nel cedimento	Fattori che controllano l'entità del cedimento
<ul style="list-style-type: none"> • Compressione fisica e <i>creep</i> (distorsione meccanica, piegamento, rottura e riorientamento delle particelle); • Cedimento prodotto dalla migrazione di piccole particelle nei vuoti presenti tra le particelle; • Collasso delle strutture e dei collegamenti tra le diverse componenti (cambiamenti chimico-fisici come corrosione e ossidazione); • Cedimenti prodotti dalla decomposizione (biodegradazione delle componenti organiche); • Cedimento sotto carico applicato dai rifiuti. 	<ul style="list-style-type: none"> • Composizione iniziale del rifiuto (forma delle particelle, proprietà materiali delle componenti, per es. metalli, carta); • Densità iniziale ed indice dei vuoti; • Spessore degli strati di rifiuto; • Tipo, spessore e numero degli strati di copertura intermedia; • Storia tensionale (trattamenti meccanici pre- e post-riempimento); • Livelli e fluttuazioni di percolato; • Fattori di controllo ambientale (contenuto d'umidità, temperatura, produzione di gas); • Grado di compressibilità.

Tabella 1.6 Meccanismi di compressione del rifiuto e fattori di influenza sui cedimenti (Monassero et al., 1996).

Prima del deposito nel sito		Inizio conteggio della durata di vita della discarica			Fine: 30 anni		Dopo 30 anni	
OPERATIONAL PERIOD		POST-OPERATIONAL PERIOD			AFTERCARE		CUSTODIAL CARE	
PREPARATION	WASTE DISPOSAL	SETTLEMENT	CAPPING	C L O S U R E	POST-CLOSURE	C O M P L E T I O N	SITE OF RECREATION	
Pretrattamento meccanico (selezione, triturazione, compattazione dei rifiuti); pretrattamento anaerobico; unificazione del rifiuto.	I rifiuti vengono conferiti in discarica e disposti, per strati, all'interno di un singolo settore di discarica. Gli strati di rifiuto sono sottoposti ad un sovraccarico crescente. Durante questa fase il rifiuto subisce una compressione immediata ed un cedimento primario.	Durante questa fase il rifiuto subisce un cedimento secondario costituito da una componente meccanica (dovuta al <i>creep</i>) e da una componente biologica (dovuta alla degradazione della sostanza organica).	Il cumulo di rifiuti viene confinato dalla barriera impermeabile costituita dalla copertura finale, che produce a sua volta un altro sovraccarico. Le funzioni alle quali devono attendere gli elementi costitutivi di una copertura sono molteplici: drenaggio degli effluenti gassosi, tenuta impermeabile, filtrazione, supporto della copertura vegetale, reintegro del paesaggio.		I cedimenti dovuti al <i>creep</i> e alla degradazione dei rifiuti continuano durante questo periodo. Al gestore incombe la responsabilità di assicurare il drenaggio ed il trattamento degli effluenti liquidi e gassosi e di vegliare sull'efficacia della copertura finale.		Quest'ultima fase corrisponde con la fine del periodo di sorveglianza dell'ultimo settore di discarica. A questo stadio, il rifiuto viene considerato come inerte ed i cedimenti sono supposti senza effetto sui progetti di riqualificazione del sito.	

Tabella 1.7 classificazione delle differenti fasi di vita di una discarica di RSU (IWWG, Conferenza di Toulouse, 2009).

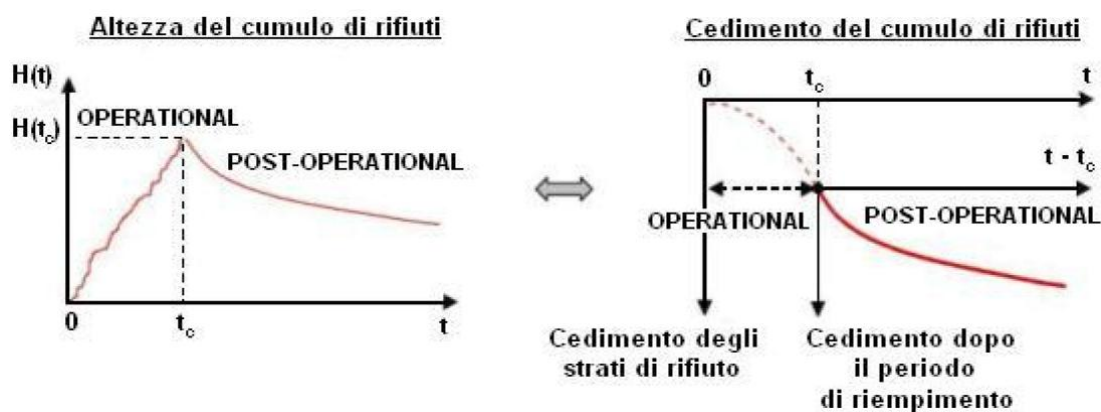


Figura 1.29 evoluzione dell'altezza del rifiuto e del cedimento di superficie nel corso delle fasi di riempimento (operational period) e di post-riempimento (post-operational period).

Alla conferenza di Toulouse tenutasi nel 2009, è stata redatta una classificazione delle differenti fasi di vita di una discarica che si sviluppano lungo un periodo di 100 anni (Tabella 1.7). La prima fase corrisponde al deposito dei rifiuti, mentre i cedimenti sono compresi totalmente nelle seconda e nella terza fase. In Figura 1.29 viene rappresentata l'altezza e il cedimento dei rifiuti in funzione del tempo. Nello specifico in letteratura i cedimenti vengono identificati come la sovrapposizione di tre componenti: istantanea, primaria e secondaria. Il cedimento

istantaneo ha inizio immediatamente dall'applicazione di un carico ed è indipendente dal tempo. Alcuni autori attribuiscono il fenomeno della compressione immediata agli effetti della non-saturazione del rifiuto: la presenza d'aria in qualche parte della struttura, ad esempio nei vuoti interparticellari, rende il rifiuto compressibile e perciò immediatamente deformabile (Watts e Charles (1999)). Come indicato anche in tabella, per ridurre la deformabilità iniziale della massa dei rifiuti, quest'ultimi possono subire dei pretrattamenti meccanici (separazione, triturazione e compattazione) prima del loro conferimento in discarica, oppure è possibile utilizzare compattatori di peso variabile in modo da ridurre lo spessore iniziale degli strati di rifiuto, o anche utilizzare una maggiore quantità di inerti stabili per aumentare la rigidità della massa o controllare i processi riguardanti la decomposizione della sostanza organica.

Il cedimento primario si verifica durante la fase di deposito dei diversi strati di rifiuti, che causano un importante sovraccarico. Il cedimento si presenta sotto forma di compressione ritardata, legata alla presenza di liquido e di gas all'interno dei rifiuti, che li rendono quindi ancora una volta comprimibili e deformabili.

$$\Delta h_p = h_{ist} \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'_v}{\sigma'_0} \quad (Sowers)$$

$$\Delta h_p = h_{ist} C'_c \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'_v}{\sigma'_0} \quad (Sowers)$$

dove Δh_p = cedimento primario (m); h_{ist} = altezza dello strato di rifiuti dopo la compressione istantanea (m); $\Delta \sigma'_v$ = incremento di sforzo effettivo verticale (kPa), agente al punto medio dello strato adiacente superiore; e_0 = indice dei vuoti iniziale (-); C_c = indice di compressione primaria (-); C'_c = coefficiente di compressione primaria (-); σ'_0 = sforzo effettivo iniziale (kPa).

Il cedimento secondario avviene sotto una tensione effettiva costante ed è associato al creep meccanico ed ai processi di degradazione biologica della sostanza organica. Durante questa fase si verifica la rottura e il riorientamento delle particelle di maggiori dimensioni e la migrazione graduale delle particelle fini, con conseguente riorganizzazione della struttura interna della massa dei rifiuti. Inoltre la materia solida organica si trasforma in biogas e percolato.

$$\Delta h_s = h_p \frac{C_\alpha}{1 + e_p} \log \frac{t}{t_p} \quad (\text{Sowers})$$

$$\Delta h_s = h_p C_{\alpha\epsilon} \log \frac{t}{t_p} \quad (\text{Sowers})$$

dove Δh_s =cedimento secondario (m); h_p =altezza dello strato di rifiuti dopo la compressione primaria (m); C_α =indice di compressione secondaria (-); $C_{\alpha\epsilon}$ =coefficiente di compressione secondaria (-); e_p =indice dei vuoti dopo la compressione primaria (-); t_p =tempo corrispondente alla fine della compressione primaria (giorni).

Parametro	Valore tipico	Commenti
C_c	$0,15 e_0 - 0,55 e_0$	rifiuto a debole – forte contenuto organico
C'_c	$0,163 - 0,205$	valori tipici di C'_c , in particolare:
	0,106	per $t < 2 \times 10^2$ (secondo Hettiarachchi, 2005)
	0,184	per $2 \times 10^2 < t < 2 \times 10^3$ (secondo Hettiarachchi, 2005)
	0,174	per $2 \times 10^3 < t < 2 \times 10^4$ (secondo Hettiarachchi, 2005)
	0,163	per $t > 2 \times 10^4$ (secondo Hettiarachchi, 2005)
e_0	2 – 15	rifiuto ben compattato – rifiuto poco compattato
θ_w	15 – 40%	valori tipici del contenuto d'acqua volumetrico
γ	6 – 12 kN/m ³	valori tipici del peso di volume del rifiuto
C_α	$0,03 e_p - 0,09 e_p$	condizioni non favorevoli – favorevoli alla degradazione
$C_{\alpha\epsilon}$	$0,015 - 0,350$	valori tipici del coefficiente di $C_{\alpha\epsilon}$, in particolare:
	0,035	per $t_p = 1 - 25$ giorni (secondo El-Fadel et al., 1999a)

Tabella 1.8 valori tipo dei parametri del modello di Sowers (1973).

Il cedimento secondario può avere durata molto lunga in quanto dipende dall'arco temporale in cui si verifica la completa degradazione biologica (Ivanova et al., 2008). Secondo Grisolia et al. (1995) il cedimento secondario può essere ulteriormente suddiviso in tre sotto-cedimenti (Figura 1.30): cedimento secondario intermedio prodotto dalle interazioni meccaniche, dovute ad un ritardo della compressione del rifiuto e a deformazioni lente e, in minima parte, dall'inizio della degradazione organica; cedimento secondario a lungo termine: in cui le velocità di cedimento sono molto elevate, probabilmente dovute agli effetti aggiuntivi della degradazione della frazione maggiormente biodegradabile del rifiuto; cedimento secondario residuo instaurato dal riorientamento meccanico ritardato e alla degradazione ritardata delle componenti organiche.

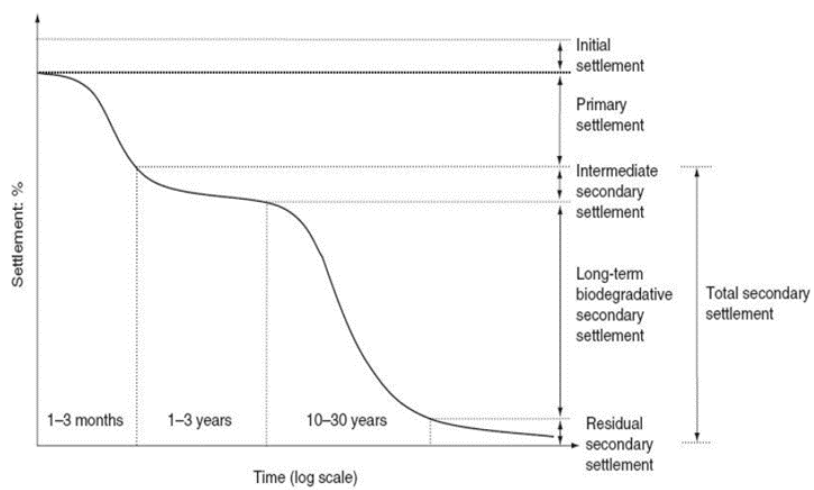


Figura 1.30 grafico di rappresentazione dei cedimenti del rifiuto nel tempo (Grisolia et al., 1995).

2 Variazione delle caratteristiche di un materiale coesivo a causa delle sollecitazioni termiche

Molti studi dimostrano che lo strato impermeabile del pacchetto di copertura superficiale delle discariche risente di variazioni termiche legate sia alle alte temperature prodotte dalla biodegradazione dei rifiuti, sia alle fluttuazioni termiche dell'aria, che possono creare condizioni di congelamento, scongelamento e essiccazione (Campanella e Mitchell(1968)), Daniel(1987), Othman (1994), Hanson e Yesiller (2010)).

In questo capitolo vengono affrontati i fenomeni del congelamento/scongelamento dei materiali coesivi e della loro essiccazione. Gli effetti generati dalle variazioni termiche interessano in modo particolare i sedimenti di tipo coesivo, in quanto fortemente influenzati dalla presenza dell'acqua all'interno della loro struttura. In seguito al fenomeno del congelamento e dell'evaporazione, il terreno va incontro a disidratazione e alla formazione di crack, che causano l'aumento della conducibilità termica dello strato in materiale fine e la perdita di resistenza. In seguito verrà creato un modello agli elementi finiti mediante il software Feflow, grazie al qual sarà possibile identificare l'effettiva distribuzione delle temperature all'interno della copertura provvisoria sottoposta a diverse sollecitazioni termiche.

2.1 Effetto del congelamento su uno strato di materiale coesivo

2.1.1 La nucleazione delle lenti di ghiaccio

Quando il terreno scende al di sotto del punto di congelamento del fluido, si instaura il processo di nucleazione di piccole lenti di ghiaccio all'interno dei pori di maggiori dimensioni. Tali nuclei ghiacciati si accrescono man mano richiamando le molecole d'acqua limitrofe, strappandole dai legami elettrici con le quali formavano i gusci più esterni del doppio strato elettrico attorno alle particelle di terreno (acqua adsorbita), trasformandole in acqua interstiziale che va ad aumentare l'apporto idrico di ogni lente di ghiaccio in via di crescita.

Questo comporta la formazione di aggregati di grandi dimensioni di particelle disidratate. Inoltre il ghiaccio, avendo volume maggiore dell'acqua, causa lo spostamento delle particelle solide di terreno allargando sempre di più i macropori nei quali avviene la nucleazione.

2.1.2 Il congelamento dei terreni

Un terreno, soggetto a influssi termici stagionali, risente di numerosi cambiamenti delle sue proprietà ingegneristiche. Il passaggio dallo stato liquido allo stato solido dell'acqua libera genera, infatti, una significativa modificazione irreversibile della struttura del terreno, comportando un'alterazione delle proprietà meccaniche, termiche e idrauliche del sedimento stesso. Il fenomeno del congelamento genera un cambiamento irreversibile della struttura del suolo, causando in genere un effetto di rigonfiamento, essendo il volume del ghiaccio pari a circa il 9% maggiore del volume dell'acqua allo stato liquido (Figura 2.1).

Allo stato congelato, però, il suolo risulta più resistente e quasi impermeabile. Per questo, il congelamento è spesso usato per stabilizzare temporaneamente i suoli durante la costruzione di fondazioni, tunnel, muri di contenimento, etc.

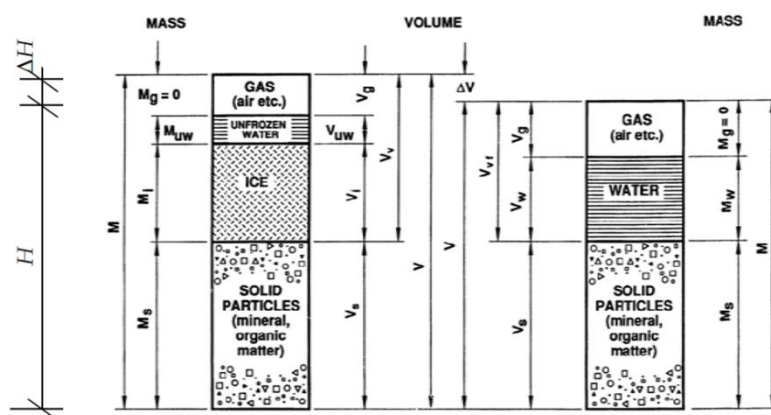


Figura 2.1 rapporti di massa (M) e volume (V) nei terreni congelati (a sinistra) e non congelati (destra) (Johansson T. (2009)).

Nel caso di processi di congelamento naturali, dovuti all'abbassamento della temperatura dell'aria, il fronte di congelamento (inteso come l'isoterma corrispondente alla temperatura di congelamento di un fluido contenuto in un mezzo poroso) penetra all'interno del terreno man mano che la temperatura diminuisce, parallelamente al piano campagna (Figura 2.2). L'acqua libera inizia così a congelare, formando lenti di ghiaccio disposte parallelamente al p. c. e perpendicolari alla direzione di avanzamento del fronte di congelamento. Man mano che il fronte di congelamento penetra nel terreno, attua una sorta di richiamo delle particelle d'acqua sottostanti presenti nei depositi, che andranno ad accrescere le lenti di ghiaccio in via di nucleazione.

Un processo di congelamento lento consente alle molecole d'acqua una maggiore disponibilità di tempo per la migrazione, verso le zone di formazione di lenti di ghiaccio, che si accrescono grazie al maggiore apporto idrico. Le dimensioni massime che un nucleo di ghiaccio può assumere dipendono anche dalle dimensioni del poro entro il quale esso si forma: nei pori di maggiori dimensioni si formano lenti più grandi. La combinazione di questi fenomeni si riflette nella formazione di lenti di maggiori dimensioni in prossimità della superficie, e via via più piccole e distanziate man mano che aumenta la profondità del deposito (Konrad e

Morgenstern (1980)). L'aspetto "a bande congelate" di un terreno sottoposto al fenomeno del congelamento, e la formazione di lenti via via più piccole man mano che si avanza in profondità, è dovuto alla graduale diminuzione del contenuto d'acqua del terreno a causa del richiamo delle molecole d'acqua verso il fronte di congelamento che avanza in profondità.

Il fenomeno della formazione delle lenti di ghiaccio è più evidente nei primi centimetri di un terreno, sui quali non grava nessun tipo di carico, che altrimenti causerebbe una pressione non favorevole alla nucleazione dei cristalli di ghiaccio.

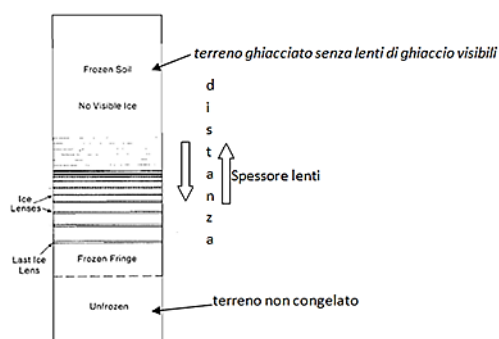


Figura 2.2 schema della formazione ritmata delle lenti di ghiaccio (Konrad & Morgenstern (1980), modificato).

Nel momento in cui la temperatura aumenta superando il punto di scongelamento, il ghiaccio si scioglie liberando una modesta quantità di molecole d'acqua. Quest'ultime, non riuscendo più a ristabilire i legami elettrici precedenti, in genere vengono drenate a causa del carico verticale applicato. Il terreno subirà così una fase di consolidamento (cedimento irreversibile) dovuta alla perdita d'acqua unita e all'inevitabile riorganizzazione della struttura dello scheletro solido (Chamberlain and Gow, 1979). Nel caso studio, lo strato impermeabile non risente di grandi carichi verticali, in particolare nei primi centimetri superficiali, dove il carico è considerato nullo. Quindi l'acqua libera fuoriesce dallo strato per evaporazione.

Durante la nucleazione delle lenti e durante la successiva fase di scongelamento, il ghiaccio applica una sorta di pressione verso le pareti dei pori,

causando la formazione di crack disposti verticalmente, che comportano l'aumento della permeabilità verticale dello strato.

2.1.3 I cicli di gelo-disgelo

I terreni sottoposti a variazioni termiche cicliche fluttuanti tra temperature sopra e sotto il punto di congelamento, si dicono sottoposti a cicli di gelo-disgelo. La successione di questi fenomeni termici causa, come detto precedentemente, una riorganizzazione della struttura delle particelle, la variazione del grado di consolidazione del terreno e l'aumento della conducibilità idraulica.

Il maggiore tasso di consolidazione si riscontra nel primo ciclo di gelo/disgelo, diminuendo sempre più man mano che proseguono i cicli termici. Dopo una sequenza di sette-dieci cicli, il sedimento raggiunge una sorta di equilibrio stabile, che impedisce al materiale di modificarsi ulteriormente anche se sottoposto a successivi influssi termici (Konrad, 1989).

La sensibilità di un terreno alle variazioni termiche dipende da:

-la granulometria: un terreno ricco di argille attive è caratterizzato da forti legami elettrici tra le particelle solide e le molecole d'acqua. Risulta quindi particolarmente sensibile alle variazioni termiche. I nuclei di ghiaccio, non riuscendo ad attrarre facilmente le molecole (fenomeno della suzione), avranno difficoltà ad accrescersi. Il processo di congelamento e successiva consolidazione risulta più lento.

-la permeabilità: in un terreno con un basso coefficiente di permeabilità, il richiamo delle molecole d'acqua per la nucleazione delle lenti di ghiaccio risulterà difficoltoso.

-il contenuto d'acqua iniziale: maggiore è la disponibilità di acqua libera interstiziale, maggiori saranno le dimensioni delle lenti di ghiaccio. Inoltre la consolidazione subita dal terreno in seguito ai fenomeni di gelo/disgelo risulterà maggiore in corrispondenza dei primi cicli, essendo presente una maggiore quantità d'acqua disponibile durante tali cicli rispetto ai successivi;

-la presenza di sali nel fluido: la presenza di sali nel fluido interstiziale aumenta la forza di legame elettrico che contrasta il congelamento (Dalla Santa et al. (2016)).

Sterpi (2015) ha condotto degli studi per valutare l'influenza dei cicli di gelo-disgelo su terreni limo argillosi utilizzati in discariche per RSU (come il caso studio), in dipendenza al diverso grado di compattazione dei terreni, essendo quest'ultimo un parametro molto importante da cui dipendono le caratteristiche idrauliche a lungo termine delle barriere impermeabili. I campioni di materiali maggiormente compattati, rivelano una minore conducibilità idraulica iniziale in condizioni indisturbate (0 cicli termici). Man mano che aumenta il numero dei cicli di gelo-disgelo, indipendentemente dal grado di compattazione, tutti i campioni subiscono un aumento della conducibilità idraulica, a causa del crescente sviluppo di fessure. I campioni maggiormente compattati hanno, però, un maggiore aumento di variazione della permeabilità in percentuale. Nei suoi esperimenti Sterpi (2015) indica che la permeabilità misurata nei campioni più compattati dopo 4 cicli aumenta di 18 volte il valore iniziale di permeabilità, mentre i campioni meno compattati solo di 5 volte la permeabilità iniziale. Secondo Sterpi (2015), quindi, i terreni più compattati sono più sensibili alle influenze termiche rispetto ai terreni meno compattati. Nonostante ciò Sterpi consiglia comunque di utilizzare, nelle barriere di copertura, materiali più compattati, in quanto dopo 4 cicli di gelo-disgelo la loro permeabilità finale è minore degli altri meno compattati.

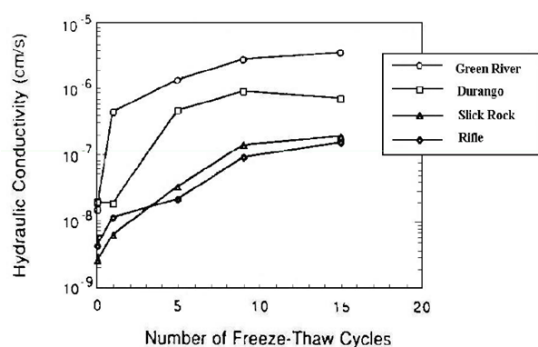


Figura 2.3 aumento della conducibilità idraulica con i cicli di gelo/disgelo (Kim e Daniel (1992)).

Da letteratura è noto che bastano pochi cicli ripetuti di gelo/disgelo per produrre un considerevole aumento della conducibilità idraulica di un'argilla

compattata (Kim e Daniel (1992), e che inoltre i primi cicli hanno un'influenza maggiore sulla permeabilità rispetto ai successivi cicli (Figura 2.3).

Se un campione di materiale è soggetto ad un carico verticale, l'effetto di aumento della sua permeabilità ne risulta compromesso. Il carico litostatico, infatti, riduce il potere di suzione di un campione di terreno posto ad una certa profondità, inibendo la formazione delle lenti di ghiaccio.

Nel momento in cui il terreno va incontro a scongelamento, il carico litostatico comprime maggiormente i crack, limitando la conducibilità idraulica del terreno e riducendo la possibilità delle molecole d'acqua di migrare durante la successiva fase di congelamento. Nel caso studio dello strato superiore di una discarica però, i pochi centimetri di terreno di copertura che vanno incontro a cicli di gelo/disgelo non sono soggetti a nessun tipo di carico verticale, di conseguenza il potere impermeabilizzante di tali materiali ne sarà sicuramente compromesso.

Mediante una tecnica di trattamento delle immagini digitali è possibile analizzare la comparsa e lo sviluppo delle fessure che si formano sulla superficie di uno strato a seguito dei cicli di gelo-disgelo. In Figura 2.4 si osservano le foto digitali scattate durante un esperimento condotto da Lu et al., (2016) nel quale un provino di terreno argilloso spesso 10 mm è stato soggetto a cicli di congelamento e scongelamento (-20°C per 12 h; 25°C per 12 h).

Le crepe si sono sviluppate grosso modo in tre fasi durante le prove di gelo-disgelo:

- prima fase di formazione delle prime fessure: durante i primi sei cicli di gelo-disgelo, l'acqua all'interno del campione migra dalle zone scongelate verso la superficie del campione più fredda. Sulla superficie del campione si osservano leggere irregolarità dall'aspetto filamentoso, non delle vere e proprie fratture;
- seconda fase di propagazione delle crepe: i crack formati nella precedente fase si allargano e si accrescono diventando più visibili. Questa fase si estende fino al diciassettesimo ciclo;
- terza fase di stabilità: in questa fase (dal ciclo 21 al ciclo 25) si osserva un quadro fessurativo relativamente stabile, senza modifiche evidenti nel numero e nella larghezza dei crack.

Globalmente si osserva dapprima un andamento lineare delle fessure, per poi diventare poligonale fino a quasi esagonale.

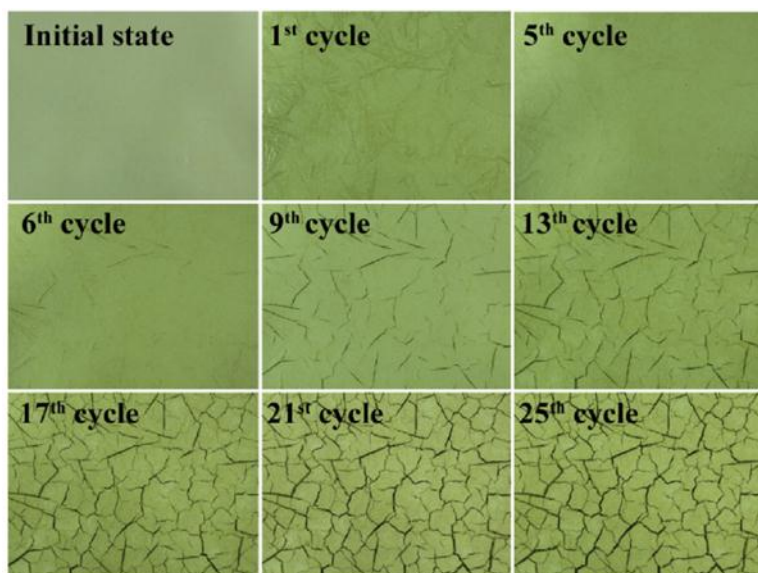


Figura 2.4 fotografie digitali della superficie di un terreno argilloso durante i cicli di gelo-disgelo (Lu et al. (2016))

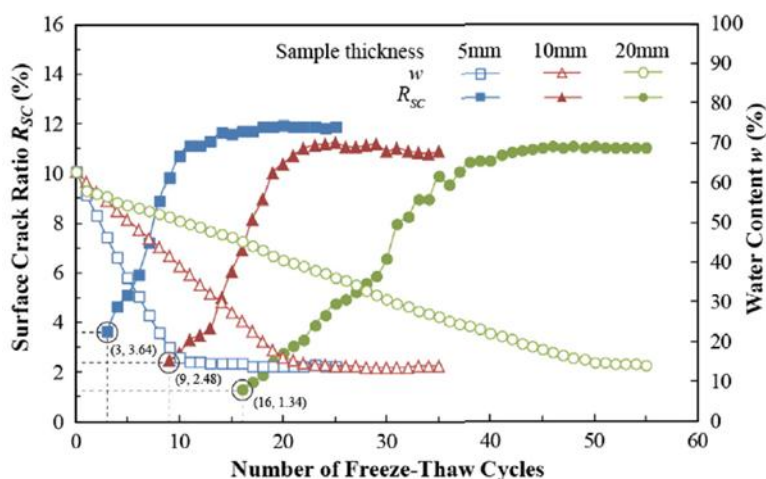


Figura 2.5 variazione della rapporto di superficie fessurata (altrimenti detto “fattore di intensità di fratturazione” CIF) e del contenuto d’acqua, in funzione del numero di cicli di gelo-disgelo (Lu et al. (2016)).

In Figura 2.5 il grafico testimonia la diminuzione del contenuto d’acqua in funzione all’aumento del numero dei cicli dei gelo-disgelo, più repentina per i campioni meno spessi. Dal grafico si deduce inoltre che in campioni sottili bastano pochi cicli

di gelo-disgelo per ottenere il valore di massima intensità di fratturazione superficiale.

2.2 Effetto dell'essiccazione su uno strato di materiale coesivo

2.2.1 Essiccazione

L'essiccazione è un problema molto studiato in campo ingegneristico perché legato al suo impatto su molte strutture in terra come substrati (Philip et al. (2002)), fondazioni (Silvestri et al. (1992)) e terrapieni (Smethurst et al. (2006)).

I terreni coesivi, come quelli utilizzati nello strato impermeabile, presentano la particolarità di modificare la propria consistenza in funzione della percentuale d'acqua che contengono: fragili e duri quando secchi; plastici e malleabili in presenza di umidità. In genere i terreni argillosi possono rigonfiare all'aumentare dell'apporto idrico, o al contrario contrarsi e compattarsi nel caso di disseccamento. Queste variazioni di volume (sia verticali che orizzontali) legate alla variazione del contenuto d'acqua del suolo in seguito al fenomeno dell'essiccazione, dipendono principalmente dal clima, ovvero dalle fluttuazioni stagionali delle precipitazioni e dell'evaporazione, dalla presenza di fonti calde che generano la migrazione dell'acqua in allontanamento, dal fabbisogno d'acqua della vegetazione presente, dal potenziale di infiltrazione del suolo.

L'alternanza di periodi piovosi e di periodi siccitosi, comporta la sequenziale chiusura e apertura di fessure, con un progressivo peggioramento del quadro fessurativo man mano che i cicli di bagnatura-essiccazione proseguono. Inoltre, in diversi casi si è constatato che all'essiccamento del terreno contribuiscono sensibilmente gli apparati radicali delle piante: un albero ad alto fusto assorbe acqua

fino ad una distanza equivalente alla sua altezza e fino ad una profondità di 4-5 metri dal piano campagna.

Lo studio dello sviluppo di fessurazioni da ritiro, a seguito delle intense temperature atmosferiche e della presenza di elevate temperature provenienti dalla massa dei rifiuti, riveste particolare importanza nel campo delle discariche. Nel caso studio di una discarica per rifiuti solidi urbani, infatti, la presenza di una fonte calda (rifiuti) sottostante lo strato di copertura superficiale, causa un aumento di pressione all'interno dei vuoti nei quali è contenuta acqua e/o aria. L'alta temperatura aumenta l'eccitazione delle particelle di gas, e la dilatazione dell'acqua. Questo aumento di volume causa una pressione verso le particelle di materiale fine, con la conseguente formazione di crack verticali, che fungono da vie preferenziali per il flusso dell'acqua in allontanamento dalla fonte calda, verso le zone più fredde poste in superficie, dove avviene la perdita d'acqua tramite evaporazione.

La crescita di fessure comporta l'inevitabile diminuzione del potere impermeabilizzante dello strato in materiale coesivo della copertura superficiale, con conseguente aumento della produzione di percolato (Kodikara et al. (2000)).

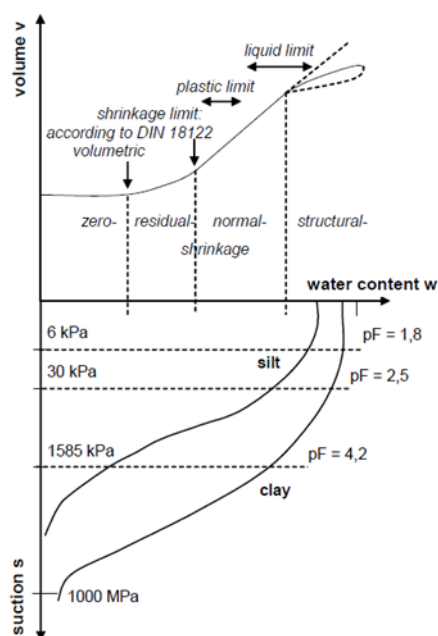


Figura 2.6 rapporto tra umidità-volume-suzione di un terreno coesivo (Witt K. J., Zeh R. M, 2005).

La condizione di essiccazione è direttamente correlata all'umidità contenuta nel suolo, alla suzione e alle temperature che si sviluppano all'interno del pacchetto

di copertura. La fessurazione per essiccazione comporta ovviamente la diminuzione del contenuto d'acqua, la contrazione volumetrica del suolo e la riduzione dell'indice dei vuoti (Figura 2.6).

L'entità della deformazione volumetrica dipende dalla struttura e dalla resistenza del terreno. Nel caso di un pacchetto di copertura completo di una discarica, la presenza di vegetazione nello strato di terreno superficiale opera, tramite le radici, una sorta di richiamo dell'acqua contenuta negli strati sottostanti (suzione), causando la parziale o totale disidratazione dello strato di argilla impermeabile.

Prendendo come esempio lo studio condotto da Miller et al. (1998), vengono rappresentate, mediante un grafico suzione-tempo (Figura 2.7), le varie fasi a cui è soggetto un campione di argilla limosa compattata come quella che può essere in genere utilizzata nello strato di copertura delle discariche. Il primo tratto AB indica il momento della completa compattazione di un terreno in condizioni completamente asciutte (definito come l'inizio della suzione dell'acqua interstiziale); il tratto BC (periodo secco-umido) indica il periodo tra lo stato completamente asciutto del terreno e la fase di infiltrazione dell'acqua in seguito ad una precipitazione piovosa (durante gli esperimenti condotti da Miller et al. il provino in questa fase è stato coperto in modo da evitare l'evaporazione dell'acqua presente); nell'ultimo periodo CD, detto "umido-secco", l'acqua è libera di fuoriuscire (negli esperimenti di Miller et al. il coperchio è stato rimosso) e termina con la completa seccatura del materiale. Come si osserva in figura, il potenziale idrico diminuisce durante la fase di compattazione secca (tratto AB) da -22.1 bar a -58.3 bar. Durante il periodo secco-umido (tratto BC) il potenziale idrico aumenta da -58.3 bar a -6.0 bar. Infine, durante il periodo umido-secco (tratto CD) il potenziale idrico diminuisce fino a -60.7 bar, che corrisponde alla condizione più secca dall'inizio dell'esperimento.

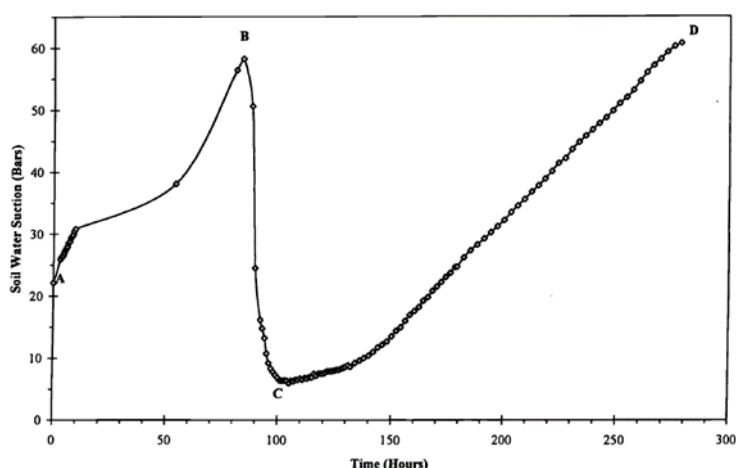


Figura 2.7 grafico suzione-tempo di uno strato di terreno coesivo. Tratto AB: compattazione in condizioni asciutte; tratto BC: periodo secco-umido; tratto CD: periodo umido-secco (Miller et al. (1998)).

2.2.1.1 Fessure da ritiro

La geometria delle fratture, così come la loro larghezza, profondità e superficie areale, sono parametri importanti perché influenzano le caratteristiche meccaniche e idrauliche del suolo. Secondo Morris et al. (1992) le fessure di più grandi dimensioni (macrocracks) sono prodotte dalla graduale crescita delle micro-fessure. Studi hanno dimostrato che, data una fessura di una certa lunghezza, questa si forma più velocemente in terreni a grana fine rispetto a terreni a grana grossolana, in quanto i primi sono caratterizzati da vuoti intergranulari di più piccole dimensioni e di conseguenza sono in grado di intrappolare un volume d'aria più grande per unità di superficie. Morris et al. (1992) affermarono inoltre che la propagazione delle fratture è favorita in superficie, dove il carico è pari a zero e la suzione è massima.

Grazie ad una prima analisi ad occhio nudo e in seguito mediante l'utilizzo di una tecnica di trattamento d'immagine digitale, è possibile determinare il fattore di intensità di fratturazione (CIF, Crack Intensity Factor) che definisce l'estensione della fratturazione superficiale. Esso è inteso come il rapporto tra l'area di superficie fessurata (A_c), e l'area di superficie totale dello strato (A_t). La variazione

del parametro CIF dipende dalla durata del periodo di essiccazione e dal fenomeno della suzione. L'inizio della comparsa delle prime fratture corrisponde al primo periodo (periodo di compattazione dell'argilla, tratto AB della curva a Figura 2.7) (Figura 2.8). Esse sono caratterizzate da un aspetto lineare. Durante il periodo secco-umido (tratto BC della curva), nel quale viene simulata una precipitazione sul terreno, le precedenti fessure formatesi durante il periodo precedente, scompaiono per l'espansione e il rigonfiamento del suolo. Si formano fratture molto estese nel periodo umido-secco (tratto CD della curva), alcune localizzate nella stessa posizione di quelle comparse del primo periodo (Figura 2.8). Le fratture del periodo umido-secco hanno larghezza maggiore rispetto alle fratture comparse nel primo periodo. Durante il periodo umido-secco le fratture hanno forme poligonali. Quando si forma una nuova fessura in prossimità di una fessura preesistente, la nuova crepa è attratta dalla vecchia crepa, fino alla loro congiunzione formando un angolo prossimo ai 90° .

Se si moltiplica il numero dei cicli di bagnatura e di seccatura di un campione di materiale, si osserva l'aumento del parametro CIF e delle dimensioni della fessure. Nel caso l'intensità della pioggia, simulata nei cicli di bagnatura successivi, aumentasse lievemente, si verificherebbe la chiusura delle fessure prossime alla superficie, mentre un elevato aumento di intensità di pioggia porterebbe all'allargamento delle fessure a causa dell'azione erosiva dell'acqua all'interno di esse.

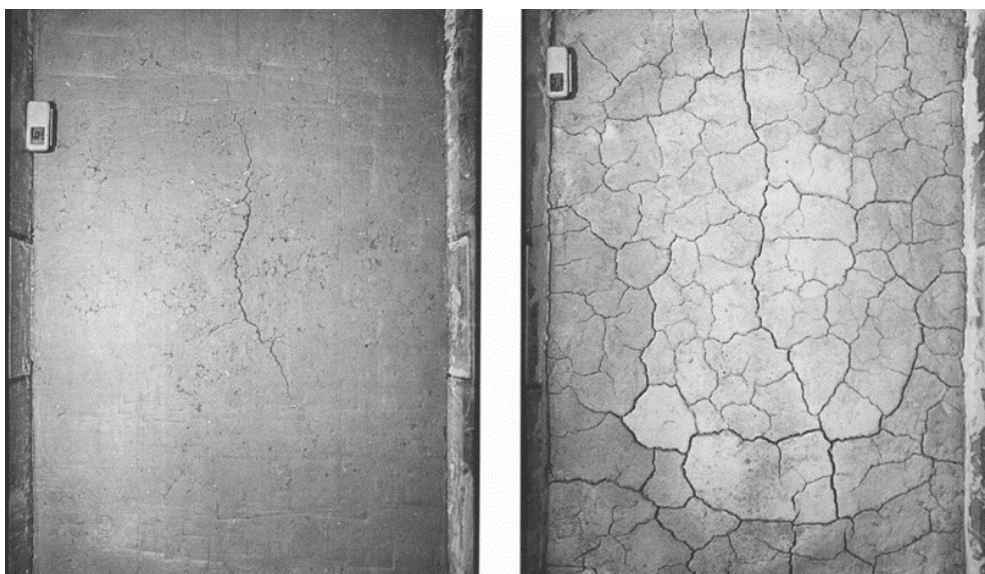


Figura 2.8 fotografie delle fessure formatesi durante la fase di essiccazione durante l'esperimento condotto da Miller et al.. A sinistra la fessurazione lineare formata durante il primo periodo (periodo di compattazione in condizioni secche); a destra la fessurazione poligonale durante il periodo umido-secco (Miller et al. (1995)).

Un aspetto su cui porre l'attenzione è la dipendenza del parametro CIF dallo spessore dello strato in cui avviene il processo di fessurazione. Questa dipendenza è testimoniata dagli studi condotti da Priyankara et al. (2006) un materiale prelevato da una discarica per RSU localizzata in Sri Lanka (proprietà del materiale testato in Tabella 2.1). Il materiale è stato miscelato con acqua in modo tale che il contenuto d'acqua iniziale risultasse maggiore del limite liquido del suolo. In seguito è stato collocato manualmente, mediante una spatola, su delle piastre circolari di essiccazione in diversi spessori (5mm, 10 mm, 20 mm, 50 mm). Le piastre, opportunamente scanalate, in modo da evitare lo scorrimento del terreno sulla superficie di contatto, sono state riposte in una camera asciutta. I campioni sono stati pesati a determinati intervalli di tempo e fotografati, mediante una fotocamera digitale apposita, la loro superficie a determinati intervalli temporali, in modo da visualizzare le varie fasi di formazione delle fessure (forma, temperatura, intervallo di tempo in cui iniziano a visualizzarsi le prime fratture).

Come si osserva in Figura 2.9, tutti i campioni di materiale hanno un simile contenuto d'acqua iniziale. Indipendentemente dallo spessore dei campioni, man mano che il tempo di essiccazione avanza, i campioni registrano la diminuzione

dell'umidità interna. I campioni più sottili mostrano una riduzione maggiore di umidità rispetto ai campioni più spessi, raggiungendo una percentuale circa costante da una certa ora in poi. Questo è dovuto alla maggiore velocità di evaporazione dell'acqua in campioni di spessore minore. Le molecole d'acqua poste a 5 mm dalla superficie sono infatti maggiormente attratte in superficie rispetto a molecole d'acqua poste a una profondità di 50 mm. Con "AEV" si identifica l'Air Entry Value, che corrisponde al momento in cui l'aria inizia a penetrare nei pori del terreno a causa dell'aumento della suzione (identificato come la transizione dallo stato saturo allo stato insaturo). L'AEV viene raggiunto da tutti i campioni in corrispondenza di un contenuto di umidità pari al 9%. Il campione più sottile (5 mm) ovviamente raggiunge per primo il punto corrispondente all'AEV.

Property	Value
Liquid Limit (LL)	35 %
Plastic Limit (PL)	20 %
Plasticity Index (PI)	15 %
Linear Shrinkage (LS)	3.9 %
Soil classification according to Unified Soil Classification System (USCS)	SC
Sand Content	58 %
Silt Content	14 %
Clay content	28 %
Maximum Dry Unit Weight	17.5 kN/m ³
Optimum Moisture Content	15.5 %
Specific Gravity	2.56

Tabella 2.1 proprietà del materiale utilizzato in una discarica per RSU in Sri Lanka (Priyankara et al. (2006)).

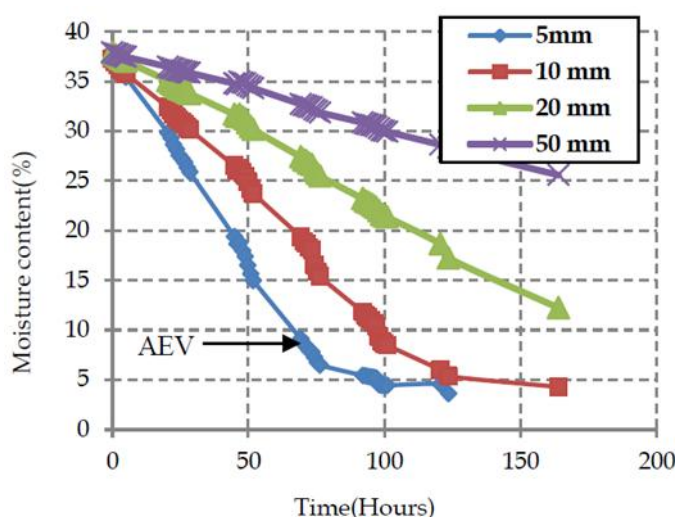


Figura 2.9 variazione del contenuto di umidità in funzione del tempo (con colori diversi vengono rappresentati i campioni di diverso spessore) (Priyankara et al. (2006)).

Come si nota in Figura 2.10 il parametro CIF aumenta maggiormente nei campioni più sottili, mentre nei campioni spessi 20 mm e 50 mm non si sono sviluppate fessure da ritiro nelle 100 ore in cui i campioni sono stati testati. Si può quindi concludere che lo sviluppo delle fessure da ritiro è dipendente dallo spessore del campione.

In Figura 2.11 si osserva che man mano che diminuisce il contenuto di umidità, il parametro CIF aumenta (per i campioni spessi 5 mm e 10 mm l'andamento è circa coincidente). Questo implica che, anche se i campioni più sottili (5 mm) hanno un tasso di essiccazione più elevato rispetto ai campioni spessi 10 mm, l'area fessurata è direttamente proporzionale al contenuto di umidità del suolo. Quindi si può affermare che, indipendentemente dallo spessore dello strato di argilla compattata, si formeranno comunque fessure da ritiro, con l'unica differenza che esse si formeranno in tempi diversi in dipendenza dello spessore (maggiore tempo per i provini spessi 20 mm).

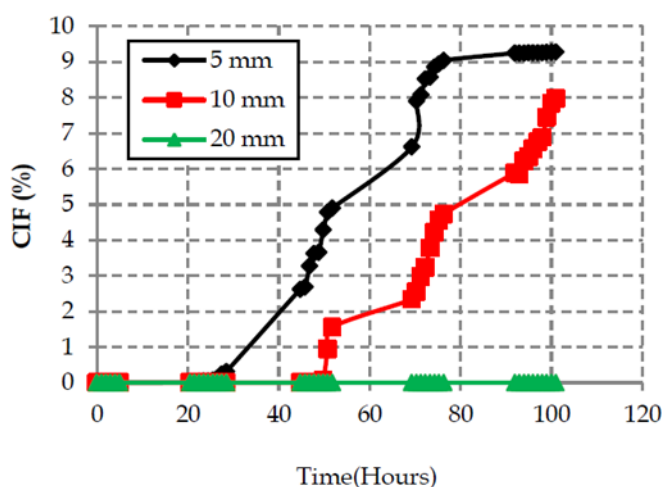


Figura 2.10 variazione del CIF con il tempo (Priyankara et al. (2006)).

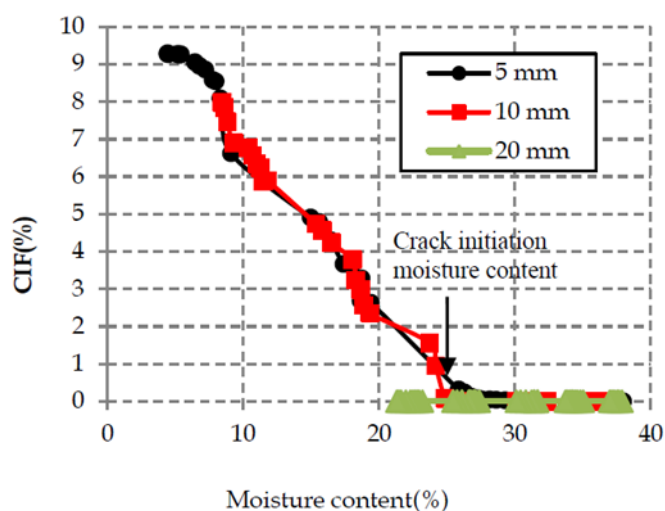


Figura 2.11 variazione di CIF con il contenuto d'umidità (Priyankara et al. (2006)).

Priyankara et al. fecero un altro studio molto interessante, nel quale analizzarono il comportamento al ritiro di un materiale argilloso miscelato con diverse percentuali di bentonite, materiale spesso utilizzato in strati d'argilla compattata perché ne migliora le caratteristiche idrauliche, rendendoli più impermeabili. Queste analisi sono condotte sui campioni più sottili, essendo i primi a fessurarsi. Come si osserva in Figura 2.12, il parametro CIF è maggiore nel caso di suolo + bentonite, rispetto al suolo tal quale. La bentonite è costituita principalmente da minerali di montmorillonite, attorno ai quali sono presenti doppi strati diffusi molto spessi, che creano forze repulsive lungo i lati delle particelle di argilla, non consentendo loro di avvicinarsi le une alle altre. Il risultato di questo, è l'apertura di fessure. L'effetto di ritiro in presenza di bentonite è illustrato in Figura 2.13: le fotografie testimoniano che maggiore è il contenuto di bentonite in un campione di terreno, maggiore è il numero di crack formatesi.

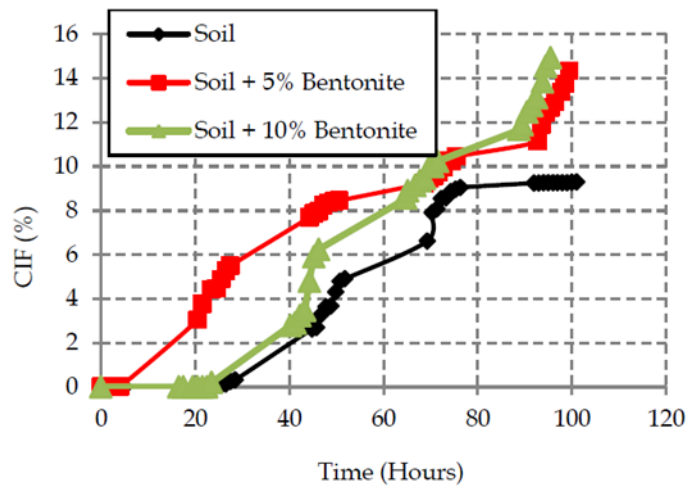


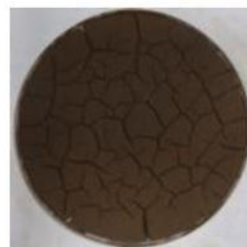
Figura 2.12 variazione del parametro CIF con il tempo per i campioni spessi 5 mm (Priyankara et al. (2006)).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.13 a) provino di terreno spesso 5 mm; b) provino di terreno con l'aggiunta del 5% di bentonite; c) provino di terreno con l'aggiunta del 5% di bentonite (Priyankara et al. (2006)).

2.3 Conclusioni

In genere i terreni coesivi vengono utilizzati nei sistemi di copertura delle discariche per le loro caratteristiche di plasticità e impermeabilità. A lungo termine, però, questi materiali possono risentire di cambiamenti delle loro proprietà se soggetti a sollecitazioni termiche. Riassumendo, quindi:

- lo strato soggetto a sollecitazioni termiche subisce la diminuzione del suo contenuto d'acqua sia per l'allontanamento dell'acqua dalla fonte calda sottostante la copertura, sia per l'evaporazione dell'acqua stessa una volta raggiunta la superficie;
- i terreni diventano meno plastici in seguito alla perdita del contenuto d'acqua;
- cicli di gelo-disgelo hanno effetti irreversibili sull'indice dei vuoti, causando la loro diminuzione, e sul grado di saturazione dei terreni;
- il passaggio di fase dallo stato liquido allo stato solido dell'acqua, a seguito del fenomeno di congelamento, causa il suo aumento di volume;
- a seguito di fenomeni di congelamento e scongelamento si ha una riorganizzazione interna della tessitura;
- si verifica la formazione di aggregati di maggiori dimensioni formati da particelle disidratate in seguito al fenomeno della suzione delle molecole d'acqua da parte dei nuclei di ghiaccio;
- si producono micro-fessure che fungono da dreni verticali per la migrazione delle molecole d'acqua verso le lenti di ghiaccio in accrescimento;
- il processo di congelamento induce la formazione sia di fratture orizzontali in seguito alla crescita di lenti di ghiaccio parallele alla superficie del terreno, sia di fessure verticali di essiccazione, dovute alla migrazione delle molecole d'acqua dalle zone non congelate sottostanti verso il fronte di congelamento sovrastante (isoterma a temperatura di congelamento);
- aumenta l'interconnessione tra i macropori;
- terreni con un elevato grado di saturazione iniziale avranno un incremento di volume maggiore in seguito alla formazione del ghiaccio, rispetto a terreni con minore grado di saturazione;
- i fenomeni di congelamento e essiccazione causano la formazione di fessure che comportano l'incremento della permeabilità dello strato, che può essere valutata mediante prove di laboratorio riproducendo le condizioni reali presenti nel caso reale di uno strato di materiale fine soggetto agli influssi termici, tenendo conto anche dell'influenza dei geotessili.

- la permeabilità verticale di un terreno coesivo soggetto alle sollecitazioni termiche può aumentare anche di due ordini di grandezza;
- la conducibilità idraulica di un terreno fine aumenta maggiormente in corrispondenza dei primi cicli di gelo/disgelo, cessando in genere già dal terzo ciclo;
- analisi mediante fotografie digitali consentono la determinazione del fattore di intensità di fratturazione (CIF, Crack Intensity Factor) che definisce l'estensione della fratturazione superficiale. Campioni più sottili impiegano meno tempo rispetto ai campioni più spessi a fratturarsi.

Per tutta questa serie di osservazioni è necessario prestare molta attenzione al comportamento a lungo termine dello strato impermeabile, considerandolo meno performante dopo aver subito le sollecitazioni termiche.

3 Caratterizzazione dei materiali utilizzati nella discarica studio

In questo capitolo viene trattata la classificazione dei due materiali provenienti dalla discarica studio di Torretta di Legnago, relativi allo strato impermeabile e allo strato di drenaggio del biogas. Sui due tipi di materiale sono state condotte misure di conducibilità termica in diverse condizioni di temperatura, anche sotto al punto di congelamento del sedimento. I dati ottenuti costituiranno un dato di input per lo sviluppo del modello agli elementi finiti creato con il software Feflow, che permetterà di conoscere a che temperatura è soggetto lo strato impermeabile.

3.1 La conducibilità termica

3.1.1 Metodi di trasmissione di calore nei terreni

Il terreno può essere considerato come un mezzo poroso multifase (solido, liquido e gas), nel quale la trasmissione di calore può avvenire per conduzione o per convezione. Generalmente la trasmissione del calore avviene principalmente per conduzione. Il fenomeno della trasmissione di calore tramite conduzione avviene all'interno di un corpo o tra corpi diversi in contatto tra di loro, senza movimento macroscopico di materia. Lo scambio termico è legato all'energia cinetica delle molecole, che viene trasmessa dalla zona più calda alla zona più fredda, o dal corpo più caldo al corpo più freddo, mediante il loro fenomeno di rotazione e vibrazione. Essendo il terreno inteso come mezzo poroso multifase (Figura 3.1), la trasmissione di calore può avvenire tra solido-solido, solido-liquido, liquido-liquido. Il primo

metodo di scambio di calore, ovvero solido-solido, si verifica quando le particelle di terreno sono a diretto contatto le une con le altre. Quando il flusso di calore tra due particelle solide attraversa una parte di liquido interstiziale, si rientra nel secondo caso (solido-liquido). Se lo scambio di calore avviene tra due fluidi all'interno di pori di grandi dimensioni, si rientra invece nel metodo di trasmissione di calore liquido-liquido.

Al contrario, si parla di convezione solo nel caso in cui effettivamente si possa verificare lo spostamento delle molecole di fluido da zone a alta temperatura verso zone a bassa temperatura (in rocce fratturate o acquiferi ad alta permeabilità). In questo caso acquisisce notevole importanza la porosità del materiale, intesa come il rapporto tra il volume dei vuoti sul volume totale, ma anche il grado di connessione tra i pori, ovvero la cosiddetta porosità effettiva.

Esiste un terzo metodo di trasmissione di calore, ovvero per irraggiamento, ma nel caso dei sedimenti può essere considerato trascurabile.

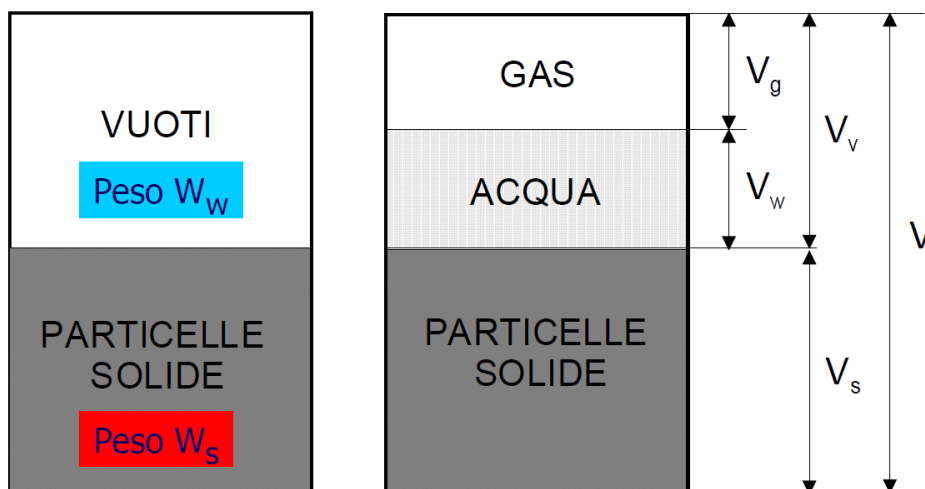


Figura 3.1 terreno inteso come mezzo poroso multifase (particelle solide + vuoti riempiti da gas o acqua).

3.1.2 La conducibilità termica dei sedimenti

La conducibilità termica rappresenta la capacità di un qualsiasi materiale di trasmettere calore per conduzione ed è intesa come il rapporto tra il flusso di calore e il gradiente di temperatura. Il trasferimento di calore in un sedimento avviene tramite le superfici di interfaccia delle particelle che lo compongono.

elemento	conducibilità termica (W/mK)
illite	1.8
clorite	5.1
caolinite	2.8
mica	2.3
smectite	1.8
quarzo	7.8
dolomite	5.1

Tabella 3.1 conducibilità termica (W/mK) di alcuni elementi comuni a temperatura ambiente 20°C (Horai (1971)).

Vi sono numerosi fattori che influenzano la capacità di scambio termico:

-composizione mineralogica: un sedimento è composto da minerali in varie percentuali, ognuno dei quali caratterizzato da una specifica conducibilità termica dipendente dalla temperatura. Un metodo speditivo per la determinazione della conducibilità termica totale è attuare la media pesata dei valori di conducibilità tipici dei minerali costituenti il sedimento (Tabella 3.1);

-granulometria: a parità di volume, un terreno fine, rispetto a un terreno a grana grossa, è costituito da tante piccole particelle distinte. Dato che il trasferimento di calore per conduzione è favorito dalla continuità del mezzo, si deduce che sedimenti sabbiosi siano dotati di maggiore conducibilità termica, rispetto a terreni fini;

-porosità del materiale/densità: come già detto, il trasferimento del calore per conduzione avviene tramite il contatto tra i granuli. Di conseguenza minore è la porosità e maggiore è la densità del materiale, maggiore sarà la sua conducibilità termica. Ad esempio terreni fini compattati e addensati godono di maggiore conducibilità termica;

-saturazione/contenuto d'acqua: l'acqua ha un valore di conducibilità termica maggiore rispetto all'aria. Quindi un mezzo poroso saturo d'acqua ha una maggiore capacità di condurre il calore rispetto a mezzi porosi parzialmente saturi. Si deduce che al crescere del contenuto d'acqua e del grado di saturazione, aumenta la conducibilità termica del terreno.

L'incremento del contenuto d'acqua ha però un effetto diverso a seconda del tipo di terreno. Ad esempio una stessa quantità d'acqua aggiunta ad un terreno argilloso e ad uno sabbioso, causa un incremento della conducibilità termica maggiore in quest'ultimo. Questo è dovuto al rapido riempimento da parte dell'acqua dei vuoti dei terreni costituiti da particelle più grossolane, dando continuità al mezzo. Al contrario la crescita della conducibilità termica con il contenuto d'acqua nei terreni argillosi è molto più contenuta in quanto le molecole d'acqua vanno inizialmente a soddisfare le richieste elettriche superficiali delle singole particelle argillose. Ciò significa che le molecole d'acqua si polarizzano e vengono attratte verso la superficie delle particelle cariche negativamente, le quali hanno una forza di legame crescente con la vicinanza. Le molecole d'acqua si dispongono così attorno alle particelle d'argilla formando delle specie di gusci concentrici, chiamati doppio strato elettrico. Una volta aggiunta una quantità d'acqua limite, l'ulteriore incremento va a riempire i vuoti intergranulari, creano una continuità del mezzo e aumentando la conducibilità termica totale del mezzo poroso.

-permeabilità: pori di grandi dimensioni e interconnessi tra loro consentono al terreno di essere dotato non solo di elevata permeabilità ma anche di maggiore conducibilità termica, due fattori direttamente proporzionali;

-area specifica: un altro fattore che limita la trasmissione di calore di un sedimento fine rispetto ad un sedimento sabbioso, è la presenza del doppio strato elettrico formato da molecole d'acqua attorno alle particelle solide argillose. Questi film liquidi, seppur molto sottili, fungono da barriera al flusso di calore, limitandone il trasferimento. Quindi la conducibilità termica di una sabbia è sempre maggiore rispetto alla conducibilità termica di un'argilla. Però, come si osserva in Tabella 3.1, la smectite e l'illite, nonostante la prima sia dotata di altissima superficie specifica interna e la seconda, al contrario, abbia una superficie specifica interna

molto bassa, sono caratterizzate dallo stesso valore di conducibilità termica. In questo caso, quindi, la superficie specifica interna non riveste un ruolo così influente sul valore di conducibilità termica;

-tessitura: il flusso di calore può svilupparsi perpendicolarmente o parallelamente alla struttura del materiale. L'anisotropia dei terreni fini è legata alla fase di deposizione, durante la quale il piano di deposizione consente alle particelle di disporsi con una direzione ben precisa. L'anisotropia dei terreni di tipo sabbioso è invece meno marcata, in quanto le particelle si dispongono in maniera più disordinata;

-temperatura: questo parametro è molto influente sulle misure di conducibilità termica, per questo è trattato in dettaglio al sottoparagrafo seguente.

Concludendo si può dire, quindi, che la conducibilità termica dei materiali coesivi è in genere inferiore rispetto a quella di un materiale più sabbioso, sebbene in entrambi i casi essa dipenda dalle caratteristiche di ciascun sedimento. La composizione mineralogica è l'elemento predominante nella definizione delle proprietà termiche dei sedimenti sabbiosi e sciolti. Al contrario, nei sedimenti argillosi, oltre alla tipologia di minerali presenti che hanno conducibilità contenuta rispetto ai minerali contenuti nelle sabbie (nelle quali è abbondante il quarzo dotato di conducibilità termica pari a 7.8 W/mK), sono predominanti quei fattori che influenzano le forze di attrazione delle particelle sui fluidi interstiziali: porosità, densità e contenuto d'acqua.

3.1.2.1 Variazione della conducibilità termica dei sedimenti al variare della temperatura

a) A temperature superiori allo zero

Quando in un sedimento coesivo secco viene aggiunta una piccola quantità d'acqua, le molecole si polarizzano e si posizionano attorno alle particelle solide perché attratte dalle cariche elettriche superficiali (Horiguchi (1979)). In questa condizione, l'incremento della conducibilità termica in funzione del contenuto

idrico è lento. Questo lento aumento del λ termico si registra fino a quando le particelle solide non sono completamente ricoperte da un film d'acqua ($W < 12\%$ nel caso del materiale testato da Nicolaev et al. (2013)).

Man mano che viene aggiunta acqua ($W > 12\%$), questa va a riempire gli spazi intergranulari del terreno offrendo una maggiore continuità al mezzo poroso. In tale condizione si verifica un rapido incremento della conducibilità termica complessiva (Fricke et al. (1997)). Questo rapido incremento della conducibilità termica dipende dalla temperatura: a temperature maggiori di 62°C (secondo uno studio condotto da Nicolaev et al. (2013)) il tasso di incremento è maggiore. Questo è dovuto al cambiamento di fase, a temperature maggiori di 50°C , di parte delle molecole acqua contenute nei terreni: il vapore consente la trasmissione di calore anche per convezione. In condizioni prossime alla saturazione, però, il riempimento dei pori da parte delle molecole d'acqua impedisce al vapore di trasferire calore attraverso i moti convettivi, cessando il fenomeno della convezione. Ne consegue che ad alte temperature e in condizioni di saturazione, si riscontra la diminuzione della conducibilità termica totale.

Dalle curve riportate in Figura 3.2, si osserva che l'aumento della conducibilità termica per ulteriori incrementi di contenuto d'acqua segue un trend circa lineare per i sedimenti a temperature fino ai 50°C . Per sedimenti a temperature maggiori di 50°C , si osserva un valore di contenuto d'acqua limite corrispondente al 30% nei materiali testati da Nicolaev et al. (2013), oltre il quale la conducibilità termica decresce. Per sedimenti ad elevate temperature, infatti, l'apporto di trasmissione di calore per convezione grazie alla migrazione del vapore, è rilevante: l'aumento, oltre questo limite di contenuto d'acqua, comporta il riempimento dei pori da parte delle molecole d'acqua, non consentendo la trasmissione di calore attraverso moti convettivi di vapore.

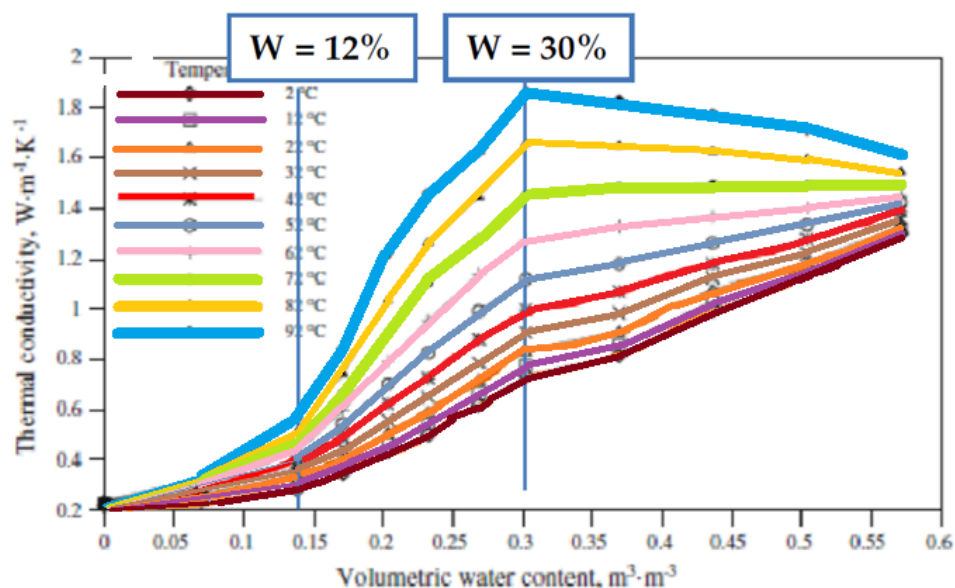


Figura 3.2 Variazione della conducibilità termica di un'argilla organica sabbiosa al variare del contenuto d'acqua e della temperatura (da Nicolaev et al. (2013)).

b) In condizioni di congelamento

In condizioni di totale o parziale congelamento, la conducibilità termica dei sedimenti fini e dei sedimenti sabbiosi varia in funzione del tipo di terreno, della composizione mineralogica e delle condizioni di saturazione. Inoltre la porosità iniziale è un parametro molto importante, perché, oltre ad influenzare direttamente la conducibilità termica, da essa dipende la facilità o meno delle molecole d'acqua di migrare verso le lenti di ghiaccio in via di formazione.

Il processo di congelamento genera, in un sedimento, l'aumento della sua densità e la diminuzione della porosità.

Un sedimento ghiacciato presenterà quindi un valore di conducibilità termica maggiore rispetto ad un sedimento non ghiacciato, per i seguenti fattori:

- la presenza di ghiaccio nei pori del terreno conferisce continuità al mezzo (maggiore quantità di materiale per unità di volume);
- il ghiaccio, avendo un λ termico maggiore rispetto all'aria e all'acqua, conferirà al terreno ghiacciato una conducibilità termica totale maggiore;
- la presenza del ghiaccio consente il miglior trasferimento di calore nelle zone di contatto tra i grani di materiale (Esch (2004)).

Ci si attende quindi che le prove sperimentali di misura della conducibilità termica condotte in laboratorio, testimonieranno questo aspetto.

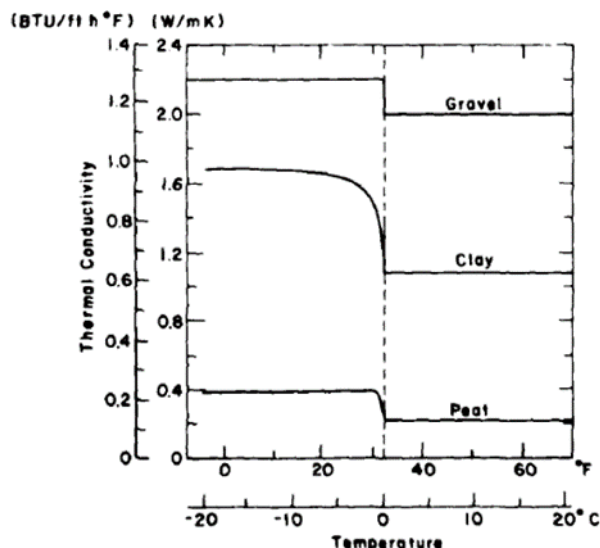


Figura 3.3 variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura (Farouki, 1981).

3.1.3 La conducibilità termica dell'acqua

Per quanto riguarda l'acqua, il range di variazione della conducibilità termica risulta molto ampio (Tabella 3.2) ed inoltre caratterizzato da importanti discontinuità legate ai cambiamenti di fase, che causano una riorganizzazione del reticolo cristallino. La dipendenza della conducibilità termica dell'acqua, allo stato liquido, dalla temperatura, è espressa dall'Equazione 1 (Abuel-Naga, Bergado e Bouazza, 2008), nella quale il parametro T_c rappresenta la temperatura espressa in °C.

Equazione 1

$$\lambda = 0.569 + (1.884 \cdot 10^{-3}) \cdot T_c - (0.0072 \cdot 10^{-8}) \cdot T_c^2$$

In corrispondenza del passaggio di stato liquido-vapore, la conducibilità termica diminuisce di un ordine di grandezza, per poi aumentare nuovamente in funzione della temperatura. Al contrario al passaggio liquido-solido si verifica un improvviso aumento della conducibilità termica, mostrando un valore di 2 W/mK alla fine del passaggio di stato. Man mano che la temperatura diminuisce, la conducibilità

termica del ghiaccio aumenta (a -100°C la conducibilità termica del ghiaccio è pari a 3.5 W/mK).

elemento	conducibilità termica (W/mK)
acqua ($T=10^{\circ}\text{C}$)	0.59
acqua ($T=20^{\circ}\text{C}$)	0.61
acqua ($T=30^{\circ}\text{C}$)	0.62
acqua ($T=40^{\circ}\text{C}$)	0.64
acqua ($T=50^{\circ}\text{C}$)	0.66
ghiaccio (-10°C)	2.32

Tabella 3.2 conducibilità termica (W/mK) dell'acqua allo stato liquido e alla stato solido, in funzione alle diverse temperature.

3.2 Lo strato impermeabile

3.2.1 Classificazione del materiale utilizzato

Gli addetti della società Le.Se. S.p.A. che gestisce la discarica di Torretta hanno messo a disposizione il materiale impiegato nello strato impermeabile del sistema di copertura. Il materiale in oggetto è stato classificato mediante numerose prove condotte presso il Laboratorio di Ingegneria Geotecnica, Dipartimento di Ing. Civile, Edile e Ambientale, di seguito elencate:

- Analisi granulometrica (ASTM D422-63);
- Misura del peso specifico dei grani (ASTM D854-92);
- Determinazione dei limiti di Atterberg (ASTM D4318-95);
- Misura del contenuto di sostanza organica (ASTM D2974-87);
- Diffrazione ai raggi X.



Figura 3.4 materiale dello strato impermeabile proveniente dalla discarica di Torretta di Legnago.

1) Aerometria/granulometria

Il materiale in oggetto è composto sia da particelle fini (diametro particelle <0.06 mm) classificabili mediante sedimentazione, sia da una minima percentuale di particelle dal diametro $d \geq 0.06$ mm classificabile tramite setacciatura.

Seguendo la procedura di laboratorio standard, sono state ricavate le seguenti percentuali di trattenuto e passante ai vari vagli ASTM (Tabella 3.3).

La percentuale del passante (P_i) al vaglio n.200 ASTM è pari a:

$$P_i = \frac{P_{tot} - (P_{trattenuto1} + P_{trattenuto2} + \dots + P_{trattenuto\ i-esimo})}{P_{tot}} \cdot 100 [\%] = 98.5\%$$



Figura 3.5 a sinistra: materiale durante la fase di frantumazione in mortaio per l'analisi granulometrica; a destra: risultato della frantumazione.



Figura 3.6 colonna di setacci.

		Peso lordo	g.	205.5
		Peso tara	g.	84.3
		Peso netto	g.	121.2
Vaglio	D Vaglio	Peso netto (g)	% Trattenuto	% Passante
			0.00	100.00
4"	101.6		0.00	100.00
3"	76.2		0.00	100.00
2"	50.8		0.00	100.00
1" 1/2	38.1		0.00	100.00
1"	25.40		0.00	100.00
3/4"	19.05		0.00	100.00
1/2"	12.70		0.00	100.00
3/8"	9.52		0.00	100.00
4	4.76		0.00	100.00
10	2.00		0.00	100.00
20	0.84		0.00	100.00
40	0.42		0.00	100.00
60	0.25		0.00	100.00
80	0.18	0.4	0.33	99.67
140	0.11	0.5	0.41	99.26
200	0.07	0.9	0.74	98.51

Tabella 3.3 percentuali di trattenuto e passante ai vari vagli ASTM.

La prova dell'aerometria consente di trovare, tramite la formula di Stokes, il diametro del singolo granulo di materiale, che viene approssimato al diametro di una sfera avente peso specifico noto, della quale sia nota la velocità di caduta V (in cm/sec), all'interno di un liquido di peso specifico e viscosità conosciuti.

Le particelle in sospensione sedimentano con una certa velocità, data dalla seguente formula:

$$v = Bd^2 \quad (\text{Stokes})$$

dove v è appunto la velocità; B è il coefficiente che dipende dalla viscosità del fluido e dal peso specifico del granello di terreno; d è il diametro delle particelle. All'istante di tempo $t > 0$ le particelle di diverso diametro si troveranno a diverse altezze in dipendenza della loro velocità di sedimentazione (si deduce che se $d_1 > d_2 > d_3$ allora $v_1 > v_2 > v_3$).

Una volta seguita la procedura standard di preparazione di una soluzione omogenea, viene inserito a determinati intervalli di tempo un densimetro graduato che consente la lettura della densità del liquido ad una certa temperatura.

Grazie al densimetro è possibile fare una lettura ($R_{lettura}$) che consiste nel rapporto tra la densità del fluido e la densità dell'acqua a 20°C:

$$R_{lettura} = \frac{\rho}{\rho_{w(20^\circ C)}}$$

Il valore di $R_{lettura}$ dev'essere opportunamente modificato mediante determinati coefficienti correttivi:

$$R_{corretta} = R_{lettura} + Cm \pm z_t - X$$

dove grazie all'inserimento di Cm si tiene conto degli effetti del menisco sulla lettura; z_t consente di correggere il valore di R se la lettura di $R_{lettura}$ viene fatta a una temperatura diversa dai 20°C; mediante il coefficiente X si tiene conto del fluidificante inserito per prevenire la formazione di flocculi dovuti agli addensamenti di particelle caricate elettrostaticamente.

La percentuale in peso delle particelle rimaste in sospensione è pari a:

Equazione 2

$$P\% = 100 \left[\frac{G_s}{(G_s - G_{water})} \frac{V_{tot}}{P_{solid}} \right] (R_{corretta} - R_{water})$$

dove G_s è il peso specifico del granulo, G_{water} è il peso specifico del liquido senza impurità; V_{tot} è il volume totale contenuto nel cilindro; P_{solid} è il peso totale del solido; $R_{corretta}$ è la lettura del densimetro corretta; R_{water} è la lettura del densimetro in acqua.

Per ricavare il diametro D (mm) delle particelle si utilizza la seguente equazione:

$$d = K \sqrt{\frac{H}{t}}$$

dove K è una costante; H è l'affondamento del baricentro del densimetro (fornito dalla tabella del costruttore del densimetro); t è l'intervallo di tempo fra le misure di affondamento del baricentro del densimetro.

La velocità di affondamento del baricentro del densimetro è pari a $v = \frac{H}{t}$.

Data	T (°C)	ora t	intervalli di tempo dt	R
22/02/2016		10:00	10"	25
22/02/2016		10:00:20	20"	24.5
22/02/2016		10:00:00	30"	24
22/02/2016		10:01	1'	23.5
22/02/2016	21°	10:02	2'	23
22/02/2016		10:04	4'	22.5
22/02/2016		10:08	8'	21
22/02/2016		10:15	15'	20
22/02/2016		10:30	30'	18
22/02/2016		11:00	1h	15.5
22/02/2016		12:00	2h	12.5
22/02/2016		14:00	4h	10.5
22/02/2016		18:00	8h	8
23/02/2016	20.05°	10:00	24h	5.5
24/02/2016		10:00	48h	4.5
25/02/2016		10:00	72h	3.5
26/02/2016		10:00	96h	2.5

Tabella 3.4 misure di R mediante densimetro condotte in laboratorio.

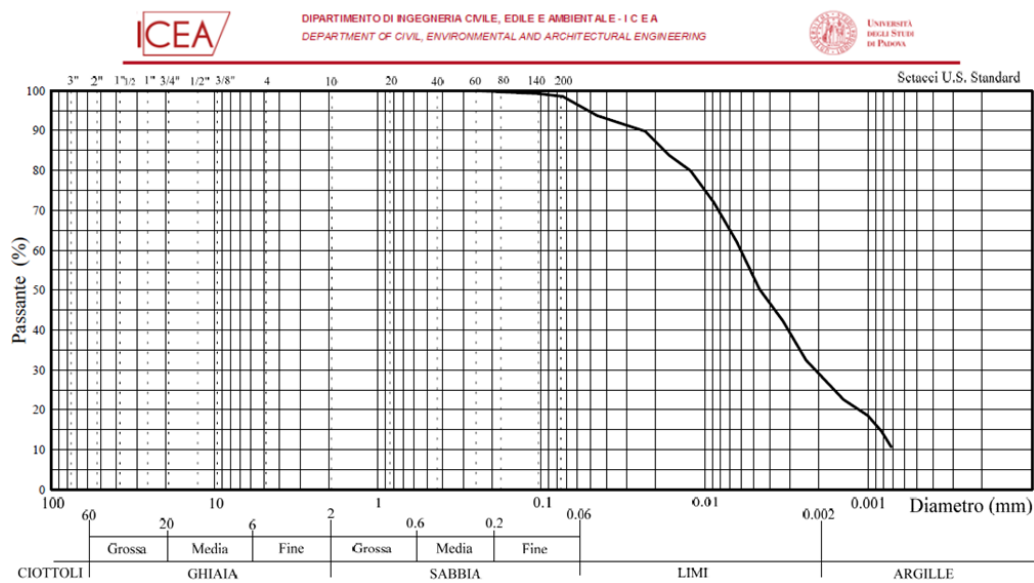


Figura 3.7 curva granulometrica del materiale: limo con argilla.

Basandosi sulle diverse percentuali delle classi granulometriche presenti nel terreno in oggetto, è stato possibile classificarlo come limo con argilla con coefficiente di uniformità di 8.6. Il terreno è mediamente attivo avendo un indice di attività pari a 1.18 ($I_a = \frac{I_p}{\% \text{ in peso di argilla al passante n.200 ASTM}}$).

2) Peso specifico dei grani

È stata seguita la procedura standardizzata per ricavare il valore di G_s (peso specifico dei granuli $G_s = \frac{P_{solido}}{V_{solido}} [\frac{g}{cm^3}]$) dell'Equazione 2.



Figura 3.8 a sinistra: picnometri riempiti con materiale e acqua deionizzata; due immagini centrali: essiccatore collegato alla pompa da vuoto e i due picnometri inseriti nell'essiccatore; a destra: picnometri durante la fase di sedimentazione del materiale in acqua deionizzata.

Alla fine della prova si è ottenuto un valore di peso specifico pari a 2.661 g/cm³ (ottenuto dalla media dei pesi specifici dei due picnometri) (Tabella 3.5).

numero tara		1	12
peso secco lordo	g	67.209	68.249
peso tara	g	42.559	43.758
peso secco netto (Ps)	g	24.650	24.491
peso picnometro + acqua (Pa)	g	149.948 (T=23.5°C)	153.384 (T=23.5°C)
peso Ps + Pa	g	174.598	177.875
peso picnometro + acqua + campione (Pt)	g	165.325 (T=23.5°C)	168.682 (T=23.5°C)
peso Ps + Pa - Pt	g	9.273	9.193
peso specifico $G_s = Ps/(Ps+Pa-Pt)$	g/cm ³	2.658	2.664
peso specifico $G_s = Ps/(Ps+Pa-Pt)$	2.661 g/cm ³		

Tabella 3.5 dati ottenuti in laboratorio durante la prova di determinazione del peso specifico dei granuli.

3) Composizione mineralogica

Per avere una caratterizzazione completa del materiale esso è stato sottoposto ad analisi diffrattometrica ai raggi X e validata tramite confronto con i risultati dell'analisi chimica a fluorescenza. Il materiale ha un contenuto di fillosilicati pari al 69%, quarzo al 18%, feldspati al 7% così come la dolomite, tracce di anfiboli. I fillosilicati presenti sono, dal più abbondante: illite e/o mica, vermiculite, clorite, serpentino, caolinite e in minima quantità una mica di Na o di Ca.

4) Limiti di Atterberg

I limiti di Atterberg indicano il valore limite del contenuto d'acqua per il quale si registra una transizione dello stato fisico del terreno. Per la determinazione del limite di liquidità w_L e del limite di plasticità w_P , sono state seguite le procedure di laboratorio standard. Per il contenuto in acqua riportato in Tabella 3.6 è stata utilizzata la correzione in base al numero di colpi $W * (\frac{\text{numero di colpi}}{25})^{0.121}$. A fine prova si è ottenuto un limite di liquidità pari al 64%.



Figura 3.9 a sinistra: miscelazione del materiale con acqua deionizzata; in centro: stesura del materiale nel cucchiaio di Casagrande; a destra: creazione del solco.

LIMITE DI LIQUIDITA' = 64%				
numero tara			124.000	136.000
peso umido lordo	gr.		26.705	25.570
peso secco lordo	gr.		21.585	21.000
peso tara	gr.		14.016	14.016
peso secco netto	gr.		7.569	6.984
peso dell'acqua	gr.		5.120	4.570
contenuto in acqua	%		64	64
numero di colpi			15	20

Tabella 3.6 dati relativi alla prova per determinare il limite di liquidità.

Per la determinazione del limite di plasticità è stata anche in questo caso seguita la procedura standard di creazione di bastoncini dello spessore di 3.2 mm su un piano liscio fino al momento della loro fessurazione. Alla fine è stato ottenuto un valore di indice di plasticità pari al 32%.

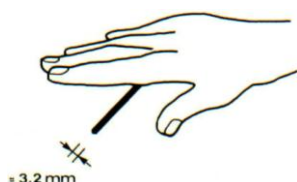


Figura 3.10 creazione dei bastoncini di spessore 3.2 mm per la prova di determinazione del limite di plasticità.



Figura 3.11 campioni di materiale per la determinazione del limite di liquidità e del limite di plasticità.

LIMITE DI PLASTICITA'=32%						
numero tara		149	144	143	145	139
peso umido lordo	gr.	15.761	16.396	15.563	15.851	15.514
peso secco lordo	gr.	15.354	15.790	15.153	15.395	15.148
peso tara	gr.	14.004	13.892	13.877	14.003	14.006
peso secco netto	gr.	1.350	1.898	1.276	1.392	1.142
peso dell'acqua	gr.	0.407	0.606	0.410	0.456	0.366
contenuto in acqua	%	30	32	32	33	32

Tabella 3.7 dati relativi alla prova per la determinazione del limite di plasticità.

Limite di Liquidità W_L =%	64
Limite di Plasticità W_P =%	32
Indice di Plasticità IP	32

Tabella 3.8 risultati delle prove di determinazione del limite liquido, limite plastico e indice plastico.

Una volta ottenuti i valori del limite di liquidità e del limite di plasticità, è stato possibile determinare l'indice di plasticità I_p , che indica l'ampiezza dell'intervallo plastico di un terreno. L'indice di plasticità cresce linearmente in funzione della percentuale di argilla presente nel materiale.

Il valore di I_p ottenuto con Equazione 3 è pari a 32, quindi il terreno viene definito “plastico”.

Equazione 3

$$I_p = w_L - w_P$$

IP	Terreno
0 – 5	Non plastico
5 – 15	Poco Plastico
15 - 40	Plastico
> 40	Molto Plastico

Tabella 3.9 grado di plasticità di un terreno in funzione del valore dell'indice di plasticità.

Il materiale rientra nel campo dei terreni a grana fine limosi ad alta plasticità (Figura 3.12). In Figura 3.13 è rappresentato il campo nel quale ricadono i campioni prelevati nella discarica studio (fonte: Geotechna srl).

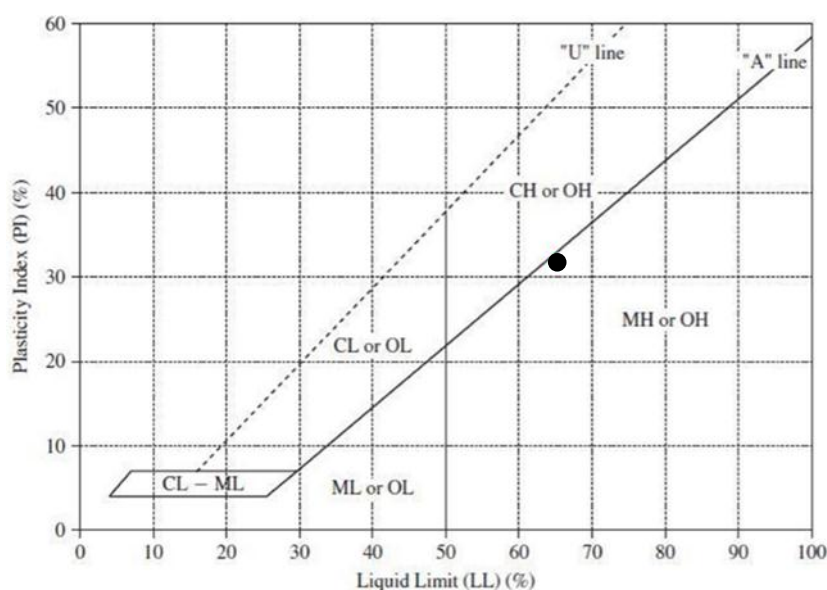


Figura 3.12 Carta di plasticità di Casagrande. Il punto rappresenta il materiale investigato.

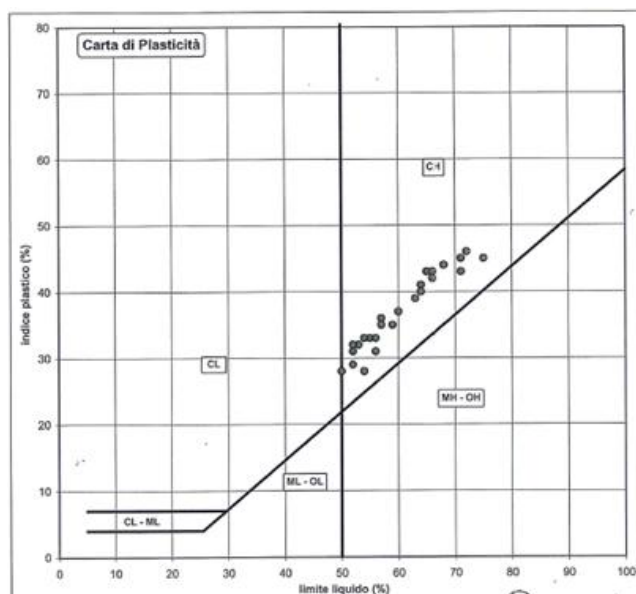


Figura 3.13 Carta di plasticità di Casagrande riassuntiva rappresentante i campioni prelevati in discarica.

5) Contenuto di sostanza organica

Oltre a questi dati si è voluto determinare anche il contenuto di sostanza organica (Oc) presente nel materiale. Il contenuto di materiale organico Oc espresso in percentuale è stato ottenuto con la seguente equazione:

$$Oc (\%) = \frac{\text{peso secco netto } (105^{\circ}C) - \text{peso secco netto } (440^{\circ}C)}{\text{peso secco netto } (105^{\circ}C)} \cdot 100$$

Alla fine si è ottenuto un contenuto di sostanza organica pari al 3%.

	u.d.m.	
numero di tara		3
peso tara	g	38.486
peso umido lordo	g	71.028
T di essicazione	°C	105
peso secco lordo	g	63.046
peso acqua	g	7.982
peso secco netto	g	24.578
contenuto d'acqua	%	32
T di essicazione	°C	440
peso secco lordo dopo 33 h	g	62.279
peso secco netto dopo 33h	g	23.811
percentuale ceneri Ac	97%	
percentuale organica Oc	3%	
	u.d.m.	
numero di tara		11
peso tara	g	38.726
peso umido lordo	g	74.686
T di essicazione	°C	105
peso secco lordo	g	65.559
peso acqua	g	9.127
peso secco netto	g	26.833
contenuto d'acqua	%	34
T di essicazione	°C	440
peso secco lordo dopo 33 h	g	64.624
peso secco netto dopo 33h	g	25.898
percentuale ceneri Ac	97%	
percentuale organica Oc	3%	

Tabella 3.10 Dati ottenuti in laboratorio durante le due prove di determinazione del contenuto di materiale organico.

3.2.2 Metodologie di analisi termica

Il materiale costituente la barriera impermeabile e gentilmente fornitoci dalla società Le.Se è stato caratterizzato anche dal punto di vista termico, mediante l'utilizzo dello strumento ISOMET 2114 (Figura 3.14). Tale strumento consente di misurare la conducibilità termica del materiale, e fornisce una stima indiretta della diffusività termica (k) e della capacità termica (cp). Per conducibilità termica (W/mK , nel Sistema Internazionale) si intende l'attitudine di un materiale a trasmettere calore per conduzione, calcolata come il rapporto tra il flusso di calore in direzione normale a una superficie di area unitaria, sul gradiente di temperatura che genera il passaggio. La diffusività termica (m^2/s) è una proprietà specifica di ciascun materiale ed indica la propagazione di un campo termico in condizioni non stazionarie. È definita come il rapporto tra la conducibilità termica e il prodotto tra la densità e il calore specifico del corpo oggetto di studio. La capacità termica è invece il rapporto fra il calore scambiato dal corpo con l'ambiente e la variazione di temperatura che ne consegue.

L'ISOMET è uno strumento portatile (CEI EN 61010), dotato di due tipi di sonda: sonda ad ago, consigliata nel caso di materiali sciolti; sonda circolare piana, adatta a misurazioni su rocce consolidate. I dati di calibrazione nella memoria interna garantiscono l'intercambiabilità delle sonde senza compromettere la precisione della misura. Lo strumento si basa su un metodo di misurazione dinamico (unsteady-state) che consiste nella misurazione della conducibilità termica in situazione transitoria, riducendo di molto i tempi di acquisizione del dato rispetto ai metodi statici. Vengono infatti trasmessi impulsi intermittenti di calore al campione e in seguito monitorato dalla sonda il flusso di calore che tende a riequilibrare lo stato termico del materiale. Gli impulsi termici sono prodotti dal riscaldamento elettrico di un resistore inserito nella sonda. Quest'ultima dev'essere in perfetto contatto con il materiale testato. L'accuratezza della misura dello strumento si attesta attorno al 5% (Tabella 3.11). Informazioni tecniche in allegato (Tabella 6.1).



Figura 3.14 ISOMET 2114, dotato di sonda circolare piana e sonda ad ago.

Measurement	Measurement range	Accuracy
Thermal conductivity	0.015–0.7 W/mK	5 % of reading + 0.001 W/mK
	0.7–6.0 W/mK	10 % of reading
Volumetric heat capacity	4.0×10^4 – 4.0×10^6 J/m ³ K	15 % of reading + 1.103 J/m ³ K
Temperature	–20–+70°C	1 °C

Tabella 3.11 precisione delle misure, ISOMET 2114.

3.2.3 Analisi di laboratorio

Il materiale è stato rimaneggiato con acqua deionizzata mediante l'aiuto di due spatole (stato slurry) con la finalità di ottenerne una miscela omogenea dal comportamento plastico. In seguito sono stati riempiti due becher (barattolo A e barattolo B) e opportunamente sigillati con pellicola alimentare, per evitare che durante le fasi di misura a diverse temperature vi fossero perdite d'acqua (Figura 3.15). I due campioni analizzati hanno un indice dei vuoti di 1.52 (barattolo A) e 1.53 (barattolo B). Inizialmente le misure di conducibilità termica mediante sonda ad ago sono state condotte su entrambi i campioni a temperatura ambiente (21°C) (Figura 3.16). In seguito i due barattoli sono stati riposti in forno termostato regolabile a diverse temperature. Prima di procedere all'inserimento della sonda per

le misure di conducibilità termica, ogni campione è stato tenuto in forno per almeno 24 ore ad ogni step di temperatura imposta, in modo tale che avesse temperatura omogenea in tutta la sua massa. I due campioni sono stati soggetti anche a congelamento, mediante il loro inserimento in congelatore. In questo caso le misure di conducibilità termica sono state condotte mediante l'uso della sonda circolare piana (Figura 3.18).

Per ogni campione, ad ogni step di temperatura, sono state condotte un minimo di due misurazioni (ad ogni avvio di misurazione lo strumento dà in uscita due valori di conducibilità). Inoltre i campioni sono stati soggetti a più cicli termici (in Tabella 3.12 la sequenza delle temperature imposte):

- primo ciclo unfrozen: 21°, 2°C;
- primo ciclo congelato: -17°C;
- secondo ciclo: 40°, 20°, 2°C;
- secondo ciclo congelato: -17°C;
- terzo ciclo: 40°, 20°, 50°, 30°, 10°;
- terzo ciclo congelato: -15°C.

In allegato sono riportati tutti i valori misurati dallo strumento ISOMET 2114 relativi al barattolo A e al barattolo B (Tabella 6.2 e Tabella 6.3).



Figura 3.15 a sinistra: i due campioni di materiale (barattolo A e barattolo B); a destra: forno termostato.

21			primo ciclo unfrozen
2			primo ciclo congelato
-17			secondo ciclo
40			secondo ciclo congelato
20			terzo ciclo
2			terzo ciclo congelato
-17			
40			
20			
50			
30			
10			
-15			

Tabella 3.12 cicli termici a cui sono stati soggetti i due campioni (nella colonna di sinistra sono riportate le temperature °C imposte ai due campioni durante i vari cicli).

Sono state riscontrate alcune difficoltà nelle misurazioni a temperature sotto lo zero. Quando il campione ghiaccia, infatti, si formano numerose striature che conferiscono alla superficie di misura un aspetto corrugato e non liscio (Figura 3.17). Per il funzionamento corretto della sonda circolare piana è richiesto invece un contatto quanto più possibile continuo con il campione di materiale. I primi tentativi di misura sono risultati vani, per questo si è cercato di rendere la superficie dei due barattoli più liscia possibile prima di procedere con le successive misurazioni di conducibilità termica.



Figura 3.16 a sinistra: fase di misura della conducibilità termica mediante sonda ad ago a temperatura ambiente di 21°C; a destra: fase di misura della conducibilità termica mediante sonda ad ago a temperatura controllata nel forno termostato.



Figura 3.17 campioni ghiacciati. Si osserva la superficie non uniformemente liscia per la presenza di filamenti di ghiaccio, che impediscono il perfetto contatto materiale-sonda circolare piana.



Figura 3.18 fase di misura della conducibilità termica all'interno del congelatore. Non è rappresentato il peso generalmente posto sopra alla sonda piana circolare per meglio visualizzare quest'ultima.

3.2.4 Risultati ottenuti

I valori di conducibilità termica misurati dalle due sonde (Tabella 6.2 e Tabella 6.3) sono mostrati nei grafici seguenti, nei quali la conducibilità termica è rappresentata in funzione della temperatura. Nei grafici si rappresentano con colori diversi i vari cicli termici a cui sono state effettuate le misure. Dai diversi valori misurati ad ogni step di temperatura, è stata ricavata e rappresentata la mediana.

T	max	min	mediana	media	deviazione standard
21	0.94	0.91	0.92	0.93	0.01
2	0.85	0.83	0.83	0.83	0.01
-17	1.66	1.00	1.31	1.32	0.32
40	0.99	0.89	0.94	0.94	0.04
20	0.94	0.87	0.90	0.90	0.04
2	0.95	0.85	0.89	0.89	0.05
-17	2.03	1.71	1.80	1.84	0.15
40	1.11	0.97	1.04	1.04	0.06
20	1.00	0.89	0.96	0.95	0.05
50	1.21	0.98	1.05	1.06	0.08
30	1.03	0.92	0.98	0.98	0.05
10	1.03	0.91	0.96	0.97	0.05
-15	2.20	1.86	2.04	2.04	0.15

Tabella 3.13 valore massimo, valore minimo, mediana, media e deviazione standard ricavati dai valori di conducibilità termica misurati alle diverse temperature (barattolo A).

T	max	min	mediana	media	deviazione standard
21	0.90	0.86	0.88	0.88	0.02
2	0.84	0.82	0.83	0.83	0.01
-17	1.85	1.54	1.73	1.69	0.12
40	1.05	0.93	0.97	0.98	0.05
20	0.98	0.87	0.91	0.92	0.05
2	0.96	0.85	0.88	0.89	0.05
-17	2.27	1.69	1.92	1.94	0.24
40	1.02	0.94	0.98	0.98	0.04
20	1.00	0.90	0.94	0.94	0.05
50	1.00	0.91	0.95	0.96	0.04
30	0.98	0.90	0.94	0.94	0.04
10	1.00	0.89	0.93	0.94	0.05
-15	1.86	1.60	1.71	1.73	0.11

Tabella 3.14 valore massimo, valore minimo, mediana, media e deviazione standard ricavati dai valori di conducibilità termica misurati alle diverse temperature (barattolo B).

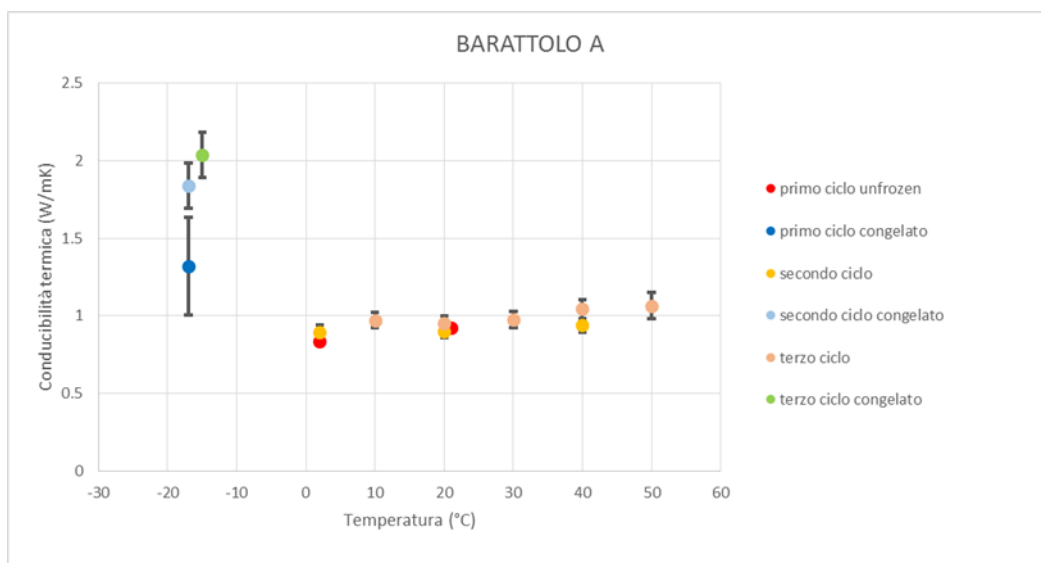


Figura 3.19 variabilità della conducibilità termica in funzione della temperatura alla quale è stata condotta la misura. Le barre di errore evidenziano la maggiore instabilità della misura nelle condizioni di sedimento congelato (barattolo A).

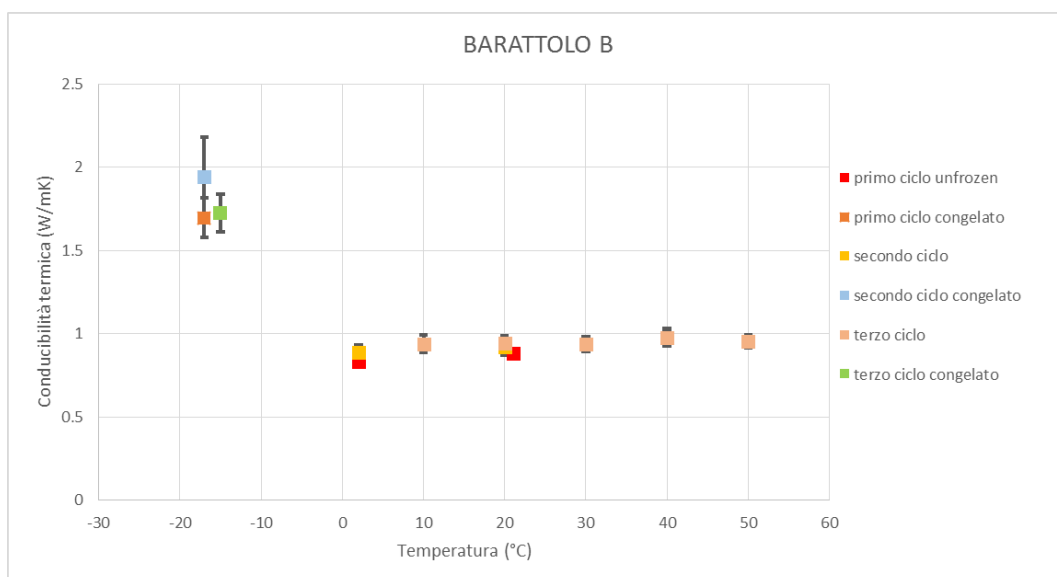


Figura 3.20 variabilità della conducibilità termica in funzione della temperatura alla quale è stata condotta la misura. Le barre di errore evidenziano la maggiore instabilità della misura nelle condizioni di sedimento congelato (barattolo B).

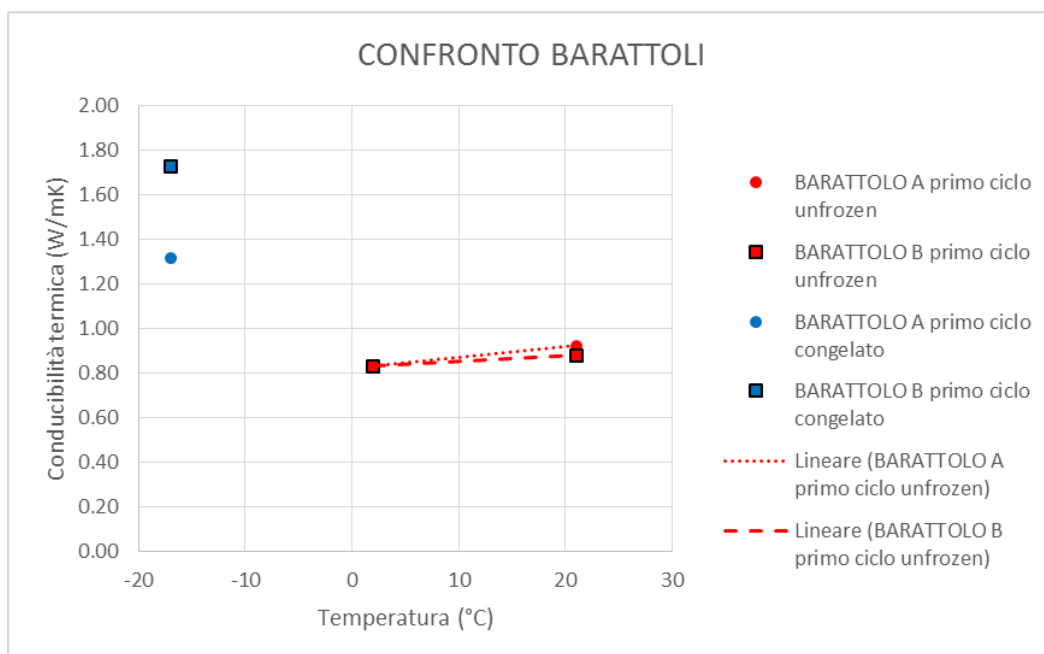


Figura 3.21 confronto tra i valori di conducibilità termica misurata dei due barattoli (primo ciclo unfrozen; primo ciclo congelato).

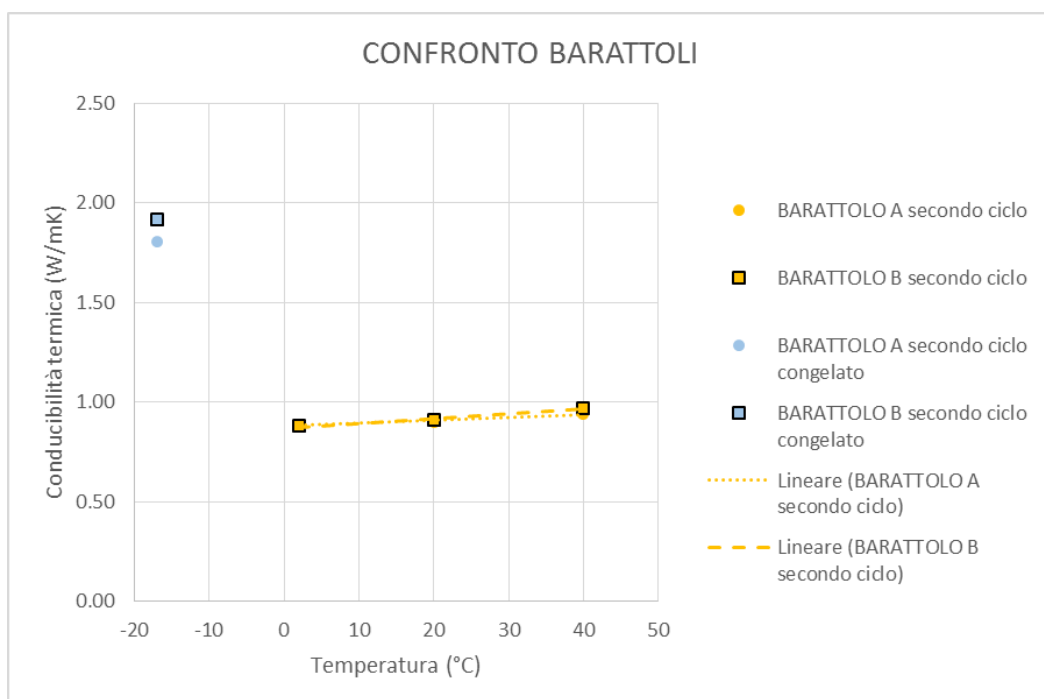


Figura 3.22 confronto tra i valori di conducibilità termica misurata dei due barattoli (secondo ciclo; secondo ciclo congelato).

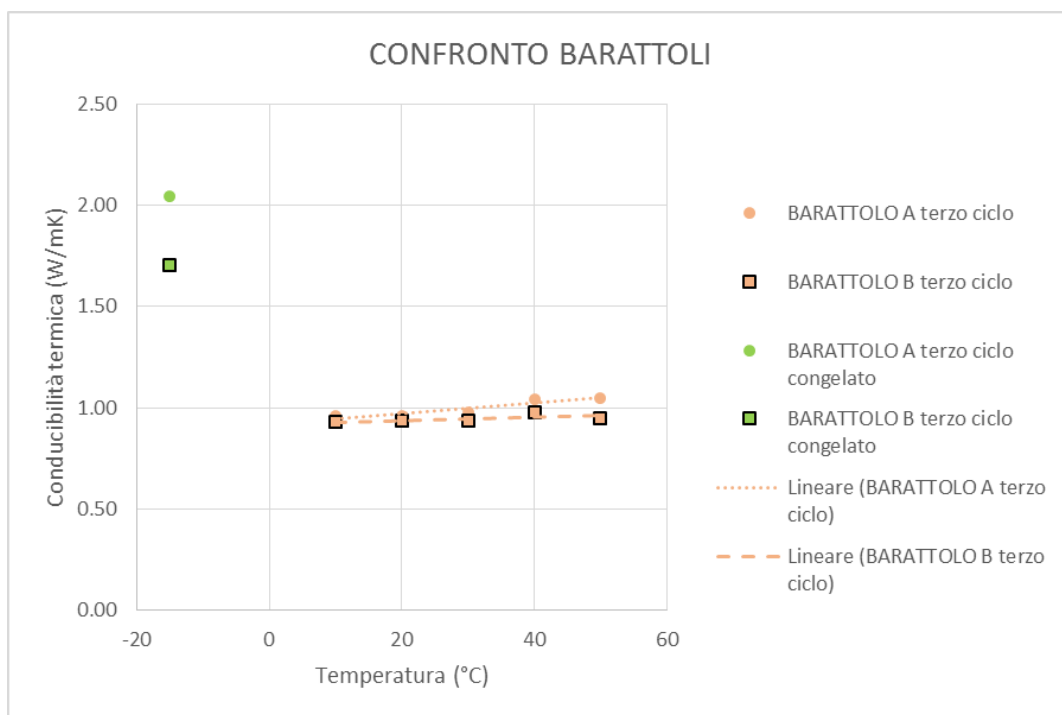


Figura 3.23 confronto conducibilità termica dei due barattoli (terzo ciclo; terzo ciclo congelato).

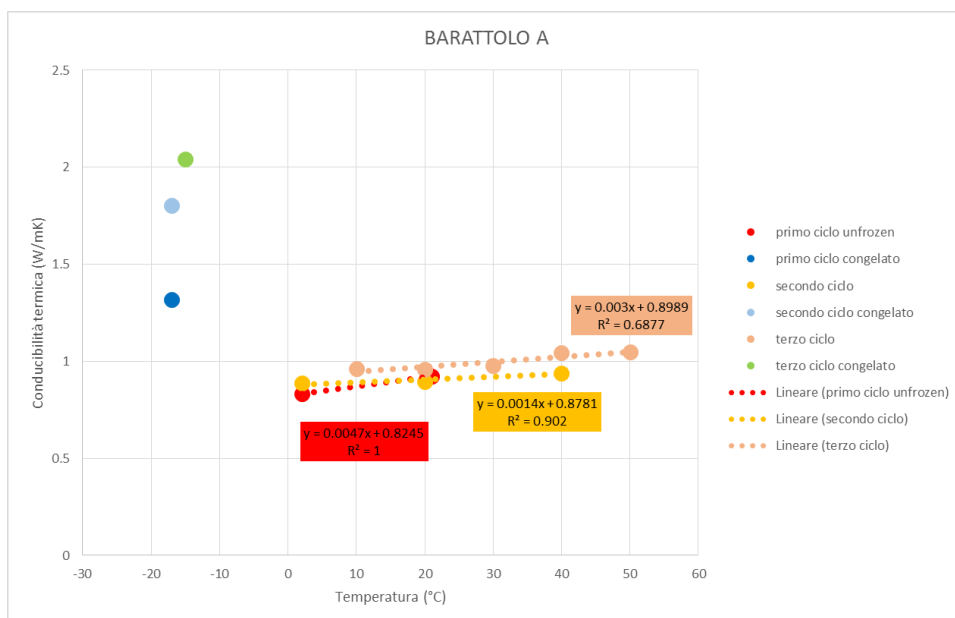


Figura 3.24 conducibilità termica misurata (barattolo A).

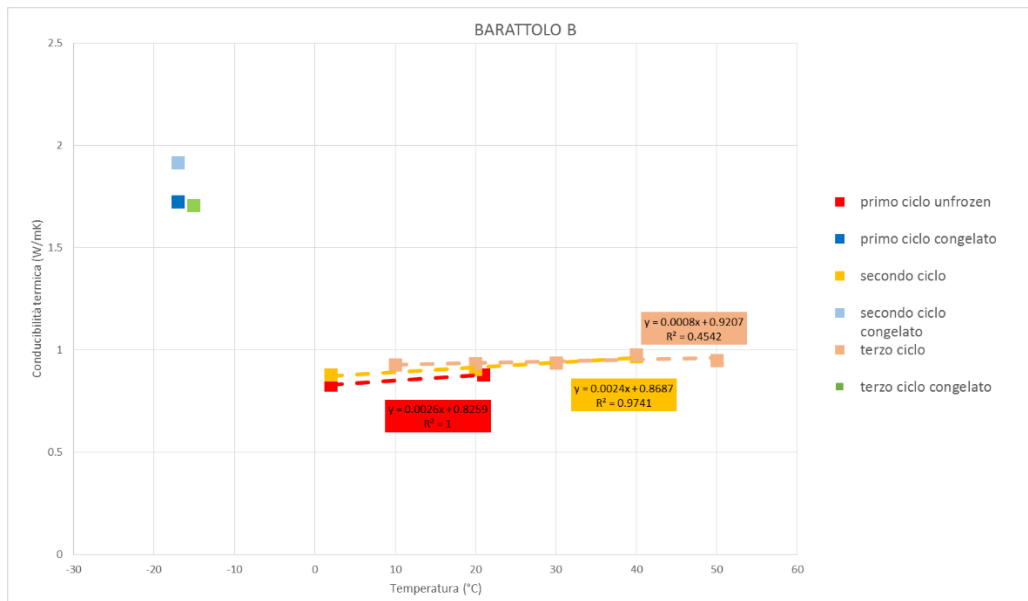


Figura 3.25 conducibilità termica misurata (barattolo B).

3.2.5 Discussione

Osservando i grafici si può affermare che:

- per $T > 0^\circ\text{C}$ si osserva che al crescere della temperatura si verifica un lieve aumento della conducibilità termica. L'andamento della conducibilità termica è espresso dalle seguenti equazioni:
 - primo ciclo unfrozen – barattolo A $\lambda = 0.0047T + 0.824$
 - secondo ciclo – barattolo A $\lambda = 0.0014T + 0.8781$
 - terzo ciclo – barattolo A $\lambda = 0.0030T + 0.8989$
 - primo ciclo unfrozen – barattolo B $\lambda = 0.0026T + 0.8259$
 - secondo ciclo – barattolo B $\lambda = 0.0024T + 0.8687$
 - terzo ciclo – barattolo B $\lambda = 0.0008T + 0.9207$
- A temperature inferiori alla temperatura critica di congelamento, il materiale mostra una conducibilità termica ben maggiore rispetto ai valori di conducibilità termica misurati a temperature positive. Questo “salto” è dovuto al cambiamento di fase del fluido interstiziale da liquido a solido, del quale però non si conosce l'affettiva temperatura alla quale ciò avviene. Inoltre la conducibilità termica del ghiaccio continua a crescere al

decrescere della temperatura (sottoparagrafo 3.1.3). Il sedimento ghiacciato presenta valori di conducibilità termica maggiori rispetto al sedimento non ghiacciato, in quanto il ghiaccio nei pori del terreno conferisce continuità al mezzo, aspetto che favorisce la trasmissione di calore. Inoltre il ghiaccio, avendo un λ termico maggiore rispetto all'aria e all'acqua, conferisce al terreno ghiacciato una conducibilità termica totale maggiore.

- 3- Le barre di errore rappresentate in Figura 3.19 e Figura 3.20 indicano una maggiore variabilità dei dati sperimentali misurati a $T < 0^\circ\text{C}$ rispetto ai valori di λ a $T > 0^\circ\text{C}$. Questo è dovuto alla difficoltà di compiere le misurazioni tramite sonda circolare piana sulla superficie ghiacciata del materiale, che presenta numerose striature che non consentono il perfetto contatto sonda-campione.
- 4- Come si osserva nei grafici di confronto (Figura 3.21, Figura 3.22, Figura 3.23), la conducibilità termica misurata nei due barattoli a temperature positive segue andamenti simili. Al contrario i valori misurati a temperature negative appaiono diversi. Ciò potrebbe essere legato alla precisione dello strumento ($\pm 5\%$) e alla sua difficoltà di condurre misure in condizioni di materiale ghiacciato.
- 5- Nel corso delle misure condotte, si è voluto ricercare una sorta di isteresi nel comportamento del materiale in seguito ad una sollecitazione termica di congelamento e scongelamento ripetuta. In questo caso il materiale è stato sottoposto a tre cicli termici, sia in condizioni di non congelamento che di congelamento.

Come si osserva in Figura 3.24 e in Figura 3.25, il materiale presenta effettivamente una sorta di isteresi, in quanto “memorizza” ciò che accade nel ciclo precedente. Come si osserva dalle equazioni delle rette di Figura 3.24 e Figura 3.25, mano a mano che aumenta il numero dei cicli, l'intercetta aumenta, anche se leggermente, a testimonianza dell'aumento della conducibilità termica con il susseguirsi dei cicli termici. Questo potrebbe trovare spiegazione dal fatto che man mano che si susseguono i cicli di gelo-

disgelo, il materiale subisce una sorta di consolidamento/addensamento con conseguente aumento della conducibilità termica (sottoparagrafo 3.1.2).

3.3 Lo strato drenante

3.3.1 Caratterizzazione del materiale

Gli addetti della società Le.Se. S.p.A. hanno messo a disposizione il materiale impiegato nello strato di drenaggio del biogas. I clasti, di natura fluvio-glaciale, hanno probabile provenienza dal bacino dell'Adige. Sono caratterizzati da forma e dimensioni variabili da spigolosi a arrotondati. Si tratta di conglomerati polimerici con prevalenza di clasti carbonatici e frazioni di litologie metamorfiche e intrusive.



Figura 3.26 materiale ghiaioso proveniente dalla discarica di Torretta di Legnago (VR). Una parte di materiale è stato lavato dalla parte fine e sabbiosa per meglio apprezzarne la litologia (foto a destra).

Il materiale è stato sottoposto a analisi granulometrica mediante setacciatura (ASTM D422-63), durante la quale i materiali sono stati inseriti nella colonna dei setacci a maglia quadrata decrescente verso il basso e opportunamente vibrata.

Basandosi sulle diverse percentuali delle classi granulometriche presenti nel terreno in oggetto, è stato possibile classificarlo come ghiaia medio-grossa. Visto l'andamento della curva granulometrica a Figura 3.28, il terreno in oggetto è molto omogeneo.



Figura 3.27 rappresentazione del trattenuto ad un vaglio ASTM.

		Peso lordo	g.	6918.1
		Peso tara	g.	252
		Peso netto	g.	6666.1
Vaglio n.	D Vaglio	Peso netto (g)	% Trattenuto	% Passante
			0.00	100.00
4"	101.6		0.00	100.00
3"	76.2		0.00	100.00
2"	50.8		0.00	100.00
1" 1/2	38.1		0.00	100.00
1"	25.4	309.6	4.64	95.36
3/4"	19.1	3189.7	47.85	47.51
1/2"	12.7	2985.4	44.78	2.72
3/8"	9.52	55.6	0.83	1.89
4	4.76	25.4	0.38	1.51
10	2	1.7	0.03	1.48
20	0.84	3.2	0.05	1.43
40	0.42	4.3	0.06	1.37
60	0.25	4.6	0.07	1.30
80	0.177	5	0.08	1.22
140	0.105	9.2	0.14	1.09
200	0.074	5.6	0.08	1.00

Tabella 3.15 percentuali di trattenuto e passante ai vari vagli ASTM.

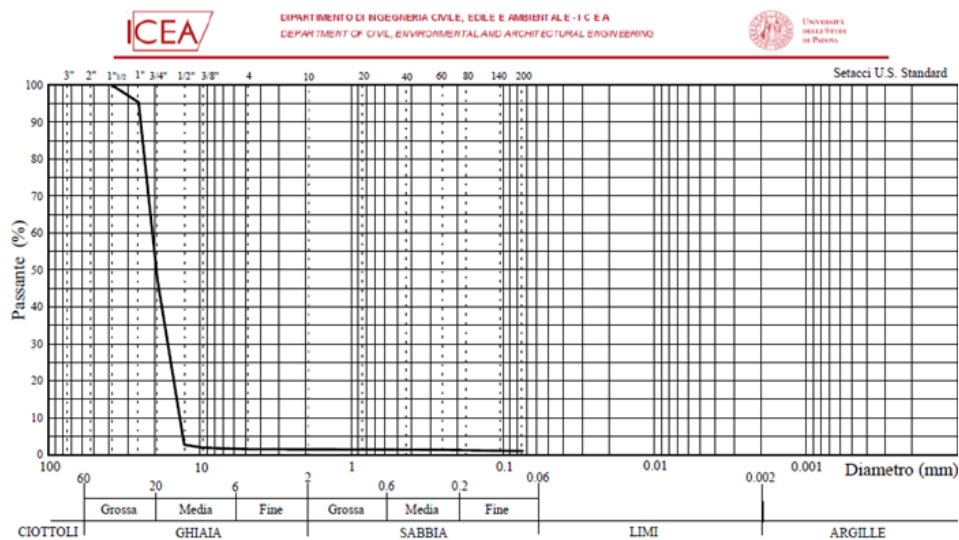


Figura 3.28 curva granulometrica del materiale ghiaioso a grana grossa poco gradata.

3.3.2 Metodologie di analisi termica

Vista la necessità delle due sonde dello strumento ISOMET 2114 di avere completo contatto con il materiale per poterne misurare la relativa conducibilità termica, non era possibile effettuare le misure su ghiaia con il medesimo strumento. Le analisi sul materiale utilizzato nello strato drenante sono state quindi condotte presso il laboratorio IUAV con sede a Mestre (Università di Venezia) mediante un particolare strumento a piastra calda con anello di guardia, che permette di misurare la conducibilità termica di campioni di grandi dimensioni, essendo così adatto anche per un materiale eterogeneo e a grana grossa come quello da analizzare. Lo strumento viene normalmente utilizzato per la determinazione delle caratteristiche termiche dei materiali per l'edilizia in accordo con le norme ISO 8302, UNI EN 12667 e UNI EN 12664. Lo strumento è così composto: elemento riscaldante posto in posizione centrale, due elementi raffreddanti esterni e due campioni di prova compresi tra l'elemento riscaldante e quelli raffreddanti (Figura 3.29).

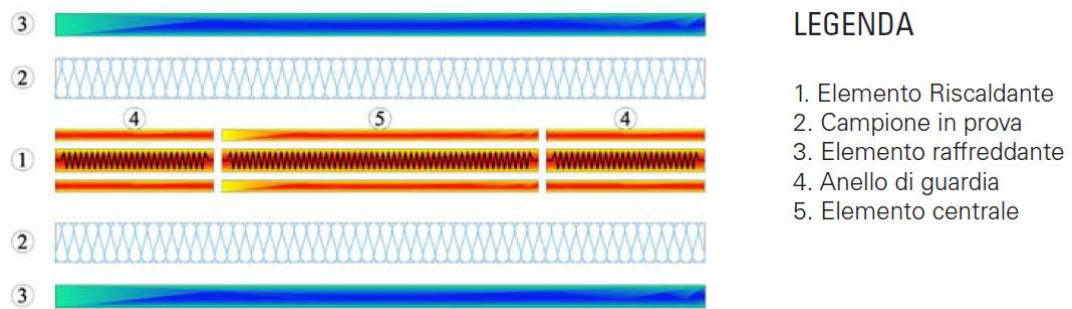


Figura 3.29 componenti dello strumento.

È possibile apportare delle modifiche a questo strumento (rappresentazione schematica in Figura 3.30) mediante l'utilizzo di un solo provino compreso tra un elemento riscaldante (piastra calda) e un elemento raffreddante (piastra fredda). Questo metodo permette di conoscere facilmente le proprietà di trasmissione termica del provino una volta raggiunta la condizione steady-state.

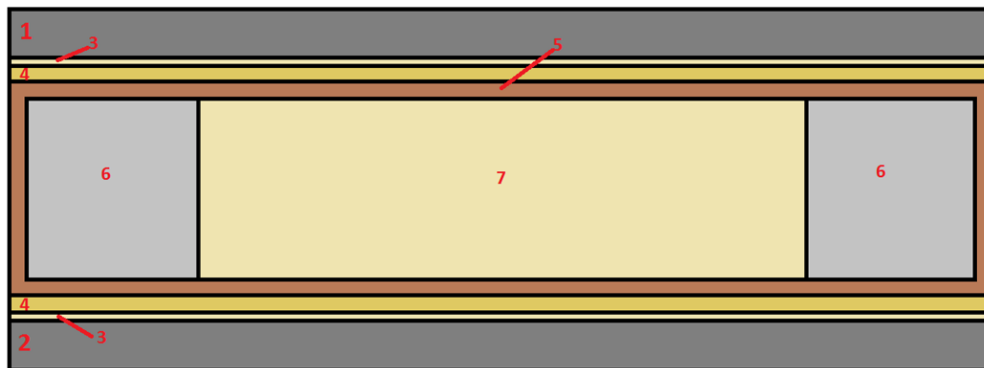


Figura 3.30 schema semplificato dello strumento a doppia piastra (1-piastra fredda; 2-piastra calda; 3-foglio di gomma naturale; 4-termocoppie; 5-box di multistrato in legno pressato; 6-area di guardia; 7-area di misurazione).

L'elemento riscaldante è costituito da un elemento centrale di misura e da un anello di guardia mantenuto alla stessa temperatura dell'elemento centrale tramite un sistema di monitoraggio costituito da n termocoppie in serie (termopila), in maniera da generare un flusso termico monodimensionale attraverso il campione di prova. La termopila evita quindi dispersioni di calore che potrebbero influenzare l'intera prova. La termopila possiede ai suoi capi una differenza di potenziale n volte superiore rispetto ad una singola termocoppia ed in questo modo la sua sensibilità

è di molto maggiore. La temperatura rilevata dalla termopila è però in realtà una temperatura media, in quanto alle giunzioni di misura è associata un'ampia area.

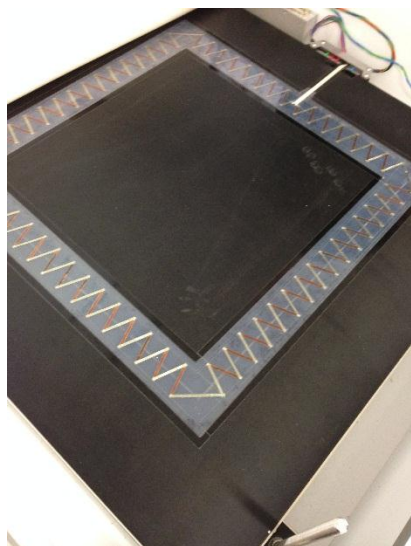


Figura 3.31 piastra calda con perimetro di termocoppie in serie per il controllo della temperatura interna (area di misurazione) e esterna (area di guardia).

Le due piastre parallele a temperature costanti nel tempo e differenti tra loro, devono necessariamente aderire completamente con il lato superiore e inferiore del provino, posizionato tra di esse. Per effettuare le misure sul materiale ghiaioso, è stato realizzato un apposito contenitore in multistrato di dimensioni 80x80 cm e 10.4 cm di spessore, all'interno del quale viene disposto il materiale oggetto di studio. Esso è suddiviso in “area di misurazione” di 50x50 cm e 8 cm di spessore (Figura 3.30, (7) e Figura 3.33), nella quale è inserito il materiale inerte, e “area di guardia” il perimetro circostante in EPS grafitato (Figura 3.30, (6)). La grafite utilizzata nella fabbricazione dell'EPS grafitato, oltre a renderlo di color nero, permette al sistema un migliore isolamento termico avendo la grafite stessa una conducibilità termica minore rispetto al materiale ghiaioso. In genere il sistema può essere costituito da un solo trasduttore di flusso (Figura 3.35) oppure possono essere presenti due trasduttori di flusso collegati ad entrambe le piastre (Figura 3.36). Nel caso in cui non vi sia un trasduttore di flusso a contatto con una delle due piastre, quest'ultima è costituita da materiale ad alta conduttività (piastra isoterma). Sono

ammesse deviazioni dalle condizioni isoterme sulla superficie della piastra non maggiori di ± 0.3 K.

Lo strumento in dotazione al laboratorio IUAV rientra nella seconda configurazione, nella quale due set di termocoppie vengono disposte a contatto con la superficie inferiore e superiore del provino (Figura 3.30 (4) e Figura 3.32). Tra le due piastre e i set di termocoppie sono inseriti due fogli in gomma naturale (Figura 3.30 (3)), che consentono una distribuzione omogenea della temperatura su entrambe le superfici del provino. Le termocoppie utilizzate sono di tipo T, composte cioè da una coppia di conduttori elettrici di diverso materiale, rame Cu (+) e costantana Cu-Ni (-), uniti tra loro in un punto.

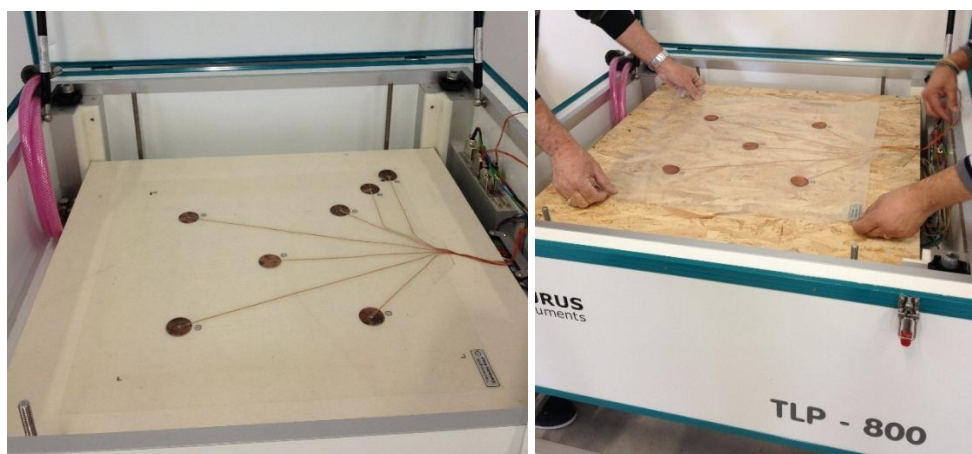


Figura 3.32 set di termocoppie disposte alla base (immagine a sinistra) e al tetto del provino (immagine a destra).

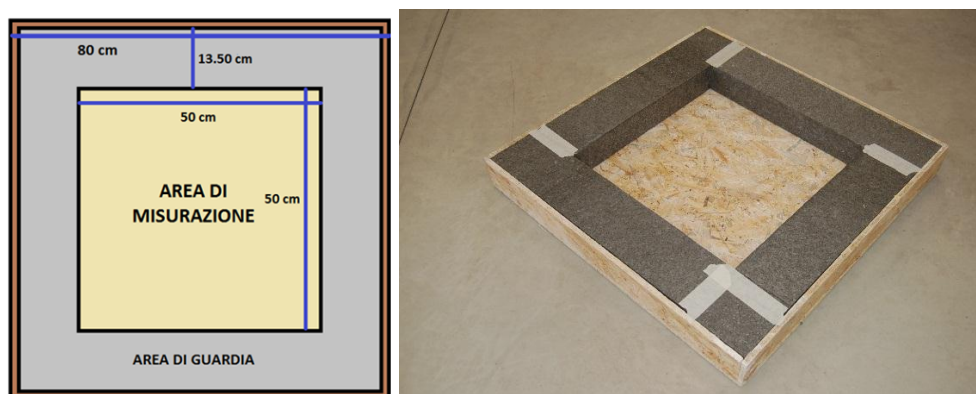


Figura 3.33 a sinistra: schema semplificato dell'area di misurazione e dell'area di guardia (vista in pianta); a destra: foto dell'area di misurazione e dell'area, o anello, di guardia.

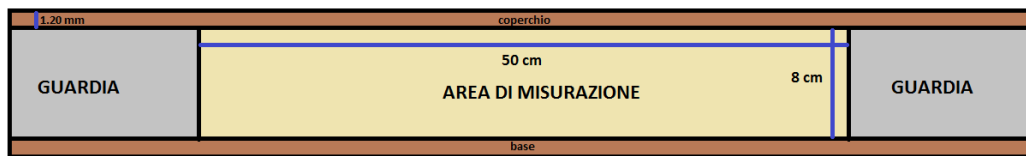


Figura 3.34 schema semplificato dell'area di misurazione e dell'area di guardia (vista in sezione).

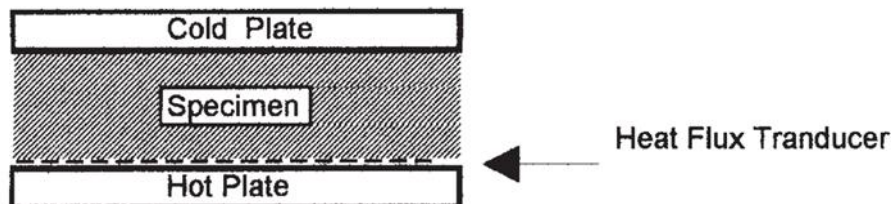


Figura 3.35 apparato con un trasduttore di flusso di calore e un provino.

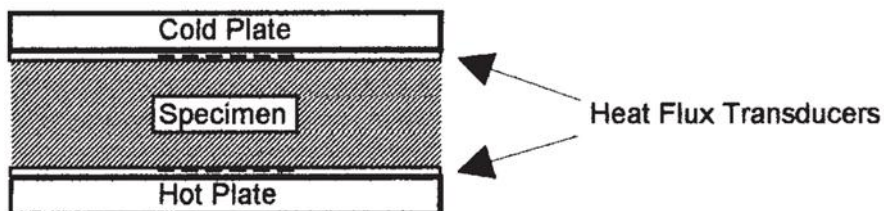


Figura 3.36 apparato con due trasduttori di flusso di calore e un provino.

Il sistema provino-piastre è contenuto in un box di dimensioni appena più grandi, in modo da evitare sia perdite di calore ai bordi del sistema, sia formazione di condensa sulla piastra fredda nel caso in cui la temperatura media del provino sia inferiore rispetto alla temperatura ambiente circostante (Figura 3.37).



Figura 3.37 box di contenimento del sistema provino-piastre. A lato è riposto un refrigeratore, che raffredda l'acqua immessa nella piastra superiore, detta appunto piastra fredda.

A inizio prova vengono impostanti, secondo il tipo di materiale in esame, i seguenti dati di input:

- ΔT ;
- step di temperatura media del campione;
- un valore di λ termico attendibile a fine prova
- intervallo di acquisizione
- differenza minima attendibile tra due registrazioni successive (per due volte)

Normalmente nel caso di campioni per i quali ci si aspetta una resistenza termica abbastanza elevata, si consiglia di utilizzare un ΔT basso (Practice C 1058: “Selezione della temperatura delle piastre”). Il sistema impostato allo IUAV registra i valori di conducibilità termica a intervalli di acquisizione pari a circa 30 minuti. Questi intervalli temporali dipendono ovviamente dalle caratteristiche del provino che influiscono sulla sua capacità di raggiungimento della stabilità termica. Per esempio nel caso di campioni ad alta densità ($\rho > 40 \text{ kg/m}^3$) o per materiali a bassa conduttanza ($C < 0.05 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$) il tempo tra le letture può aumentare di oltre 30 minuti. Per ogni step di temperatura, l’acquisizione si interrompe ogni qualvolta tra due valori di conducibilità termica successivi si ha una differenza minima corrispondente a quella imposta a inizio prova (per le prove condotte nel laboratorio IUAV si è imposta una differenza minima pari allo 0.6%). La condizione di equilibrio termico è raggiunta quando il valore di differenza minima imposto a inizio prova è presente tra due coppie successive di valori di conducibilità termica, ecco il perché della dicitura “per due volte”. Una volta raggiunta questa condizione ad ogni step di temperatura imposto, viene riportato in una tabella il valore finale di conducibilità termica raggiunto in condizioni steady-state, correlato al fem di output del trasduttore di flusso di calore, alle temperature raggiunte dalla piastra calda e dalla piastra fredda, alla temperatura media del campione e alla variazione di temperatura nel campione.

La conduttanza termica $C \text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$ di un campione è calcolabile come:

$$C = S \cdot E / \Delta T$$

dove S è il fattore di calibrazione del trasduttore di flusso di calore ((W/m²)/V); E è il trasduttore di flusso di calore in output (V); ΔT è la differenza di temperatura attraverso il campione (°C).

La conducibilità termica λ (W/(m·K)) è ricavabile da:

$$\lambda = S \cdot E \cdot \left(\frac{L}{\Delta T}\right)$$

dove L è la distanza tra la piastra calda e la piastra fredda (m).

La conducibilità termica è esprimibile anche mediante la seguente relazione:

Equazione 4

$$\lambda = \frac{P \cdot s}{A(T_w - T_c)}$$

dove P è la potenza elettrica dissipata dall'elemento centrale (W); A è l'area dell'elemento centrale (m²); s è lo spessore del campione in prova (m) e (T_w - T_c) è la differenza di temperatura (°C) tra la superficie calda e la superficie fredda del campione di prova.

Lo strumento misura la resistenza al passaggio di calore, nel caso specifico, risultato della somma tra quella della massa di materiale testato e quella dei due pannelli in legno pressato tra i quali esso è contenuto. Applicando quindi la seguente formula (Equazione 5) è possibile ricavare la conducibilità termica relativa al solo inerte ghiaioso:

$$R_{tot} = R_{pannello} + R_{inerte} + R_{pannello}$$

Equazione 5

$$\frac{s_{tot}}{\lambda_{tot}} = \frac{s_{pannello}}{\lambda_{pannello}} + \frac{s_{inerte}}{\lambda_{inerte}} + \frac{s_{pannello}}{\lambda_{pannello}}$$

dove R_{tot} è il contributo della resistenza dei due pannelli e della resistenza del materiale inerte; s_{tot} è lo spessore totale del provino (pari a 104 mm) e λ_{pannello} corrisponde alla conducibilità termica del legno pressato.

Le prove sono state condotte sia in condizioni dry (campione secco), sia in condizioni wet (campione saturo d'acqua). Dall'Equazione 5 si ricava il valore dell'incognita λ_{inerte}:

$$\lambda_{inerte} = \frac{S_{inerte} \cdot \lambda_{pannello} \cdot \lambda_{tot}}{S_{tot} \cdot \lambda_{pannello} - 2S_{pannello} \cdot \lambda_{tot}}$$

3.3.3 Analisi di laboratorio

3.3.3.1 Prova 1 (solo ghiaia – condizioni dry)

Il materiale, classificato nel sottoparagrafo 3.3.1, è stato posto in forno a 105°C per almeno 24 ore. Una volta estratto dal forno è stato inserito nell'area di misurazione del box in multistrato opportunamente rivestito mediante nylon con lo scopo di impermeabilizzare l'area in vista della realizzazione della prova successiva in condizioni di completa saturazione. Per riprodurre più possibile fedelmente la compattazione creata dai rulli compattatori operanti in discarica, il box è stato opportunamente vibrato e il materiale è stato via via pressato manualmente per renderlo più compatto possibile, evitando la presenza di vuoti troppo ampi (Figura 3.38). La compattazione può infatti sostanzialmente influenzare la conducibilità termica dei suoli.



Figura 3.38 fase di compattazione manuale del materiale ghiaioso.



Figura 3.39 materiale inserito nell'area di misurazione (a destra: dettaglio del materiale ghiaioso).

Una volta eseguite queste operazioni, il box è stato chiuso con il coperchio anch'esso in legno pressato ed opportunamente fissato tramite viti di metallo e calato nello strumento TLP-800 (Figura 3.40).



Figura 3.40 fase di inserimento del box di legno pressato.

Prima dell'avvio della prova sono stati impostati i seguenti dati di input:

- $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$
- Step di temperatura media del campione = -5°C ; 0°C ; 10°C ; 20°C ; 30°C
- $\text{Lambda dry} = 0.8 \text{ W/mK}$
- intervallo di acquisizione: 30 minuti
- differenza minima attendibile tra due registrazioni successive (per due volte): 0.6 %

A fine prova si sono ottenuti i seguenti parametri:

Heating power (W)	T cold sample surface (°C)	T warm sample surface (°C)	Sample mean T (°C)	Temperature difference on sample (K)	Lambda (W/mK)
4.9	-9	1.7	-3.6	10.7	0.1903
5.23	-4.3	6.4	1.1	10.7	0.2037
5.3	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2064
5.52	15.4	26	20.7	10.7	0.2153
5.68	25.3	35.9	30.6	10.7	0.2217

Tabella 3.16 valori ottenuti a fine 1° prova in condizioni dry.

Applicando l'equazione seguente (Equazione 6) sono facilmente verificabili i valori di conducibilità termica ottenuti a fine prova.

Equazione 6

$$\lambda = \frac{P \cdot s}{A(T_w - T_c)}$$

$$\lambda_{dry}(T = -3.6^\circ\text{C}) = \frac{4.9 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (1.7^\circ\text{C} - (-9.0^\circ\text{C}))} = 0.1903 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 1.1^\circ\text{C}) = \frac{5.23 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (6.4^\circ\text{C} - (-4.3^\circ\text{C}))} = 0.2037 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 10.8^\circ\text{C}) = \frac{5.30 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (16.1^\circ\text{C} - 5.5^\circ\text{C})} = 0.2064 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 20.7^\circ\text{C}) = \frac{5.52 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (26.0^\circ\text{C} - 15.4^\circ\text{C})} = 0.2153 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 30.6^\circ\text{C}) = \frac{5.68 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (35.9^\circ\text{C} - 25.3^\circ\text{C})} = 0.2217 \text{ W/mK}$$

Come si osserva in Tabella 3.17, i valori di temperatura media raggiunta (T_m) non corrispondono esattamente a quelli imposti a inizio prova (-5°C; 0°C; 10°C; 20°C; 30°C), ma dipendono dalla condizione di minima differenza tra i valori di lambda termico imposta a inizio prova (0.6%) (tutti i dati misurati durante la prova in Tabella 6.5).

In Tabella 3.17 sono riportati i valori di conducibilità termica (W/mK) e di resistenza termica (m²K/W) ottenuti con la seguente formula:

Equazione 7

$$R \left(\frac{m^2 K}{W} \right) = \frac{s (m)}{\lambda \left(\frac{W}{m K} \right)}$$

nella quale s è lo spessore del campione (m), in questo caso pari a 104 mm.

Solo Ghiaia (1° prova)		
pacchetto intero		104 mm
Tm	lambda	resistenza
-3.6	0.1903	0.5465
1.1	0.2037	0.5106
10.8	0.2064	0.5039
20.7	0.2153	0.4830
30.6	0.2217	0.4691

Tabella 3.17 dati del pacchetto completo ottenuti a fine della prima prova in condizioni dry nella quale l'area di misurazione è stata riempita solo con ghiaia (Tm: °C; lambda: W/mK; resistenza; m²K/W).

I dati ottenuti consentono di rappresentare la resistenza termica in funzione della temperatura media del campione ai diversi step di misura. È stata fatta un'interpolazione lineare tra i valori di resistenza termica ottenuti a temperature positive. Alla retta di interpolazione lineare di equazione $y = -0.0015x + 0.515$ non appartiene il punto rappresentante la resistenza termica ai -3.6°C, in quanto da bibliografia è noto che a temperature negative (di qualche grado inferiori allo zero) avviene il passaggio di stato dell'acqua interstiziale da liquido a solido (formazione di ghiaccio). Però, come accennato a inizio di questo sottoparagrafo, il materiale testato non contiene acqua essendo stato riposto in forno termostato per almeno 24 ore. Il campione di materiale, nonostante questo, durante la sua preparazione ha visto comunque un'esposizione all'aria per qualche tempo, arricchendosi probabilmente di umidità. La percentuale di particelle d'acqua si presuppone essere però infinitesima, quindi non influente sulla conducibilità e resistività termica del campione. Resta quindi in sospeso il perché quel punto rappresentante la resistenza termica a -3.5°C risulti così discordante dalla retta di interpolazione lineare.

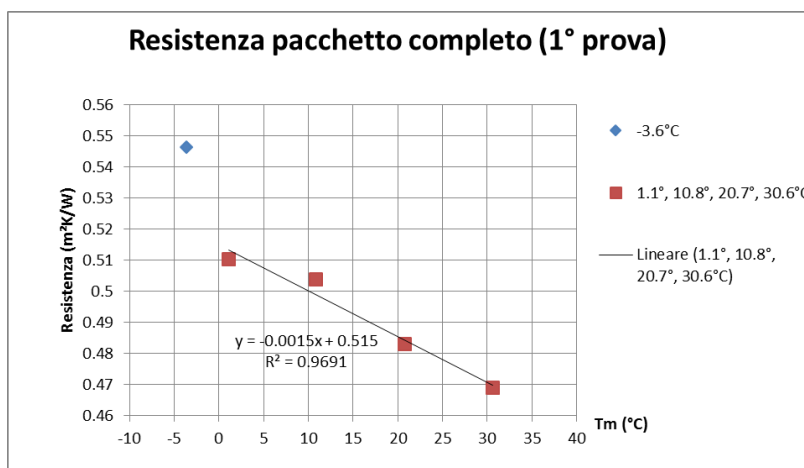


Figura 3.41 resistenza termica in funzione della temperatura media nel caso del pacchetto completo (1° prova).

Per ottenere i valori di conducibilità termica relativi al solo materiale inerte ghiaioso è necessario considerare anche il contributo dato dai due pannelli di legno pressato tra i quali è contenuto il materiale. Mediante lo strumento a piastra calda si è quindi misurato il valore di conducibilità termica di un pannello, per poi ricavarne la resistenza (Tabella 3.18).

Pannello in canapa 12 mm

Tm	lambda	resistenza
12.7	0.09698	0.12374
22.5	0.09903	0.12118
32.4	0.1011	0.11869

Tabella 3.18 valori ottenuti nella prova condotta su pannello di legno pressato in condizioni dry mediante strumento a piastra calda (Tm: °C; lambda: W/mK; resistenza; m²K/W). I dati hanno un errore di +/- 0.001.

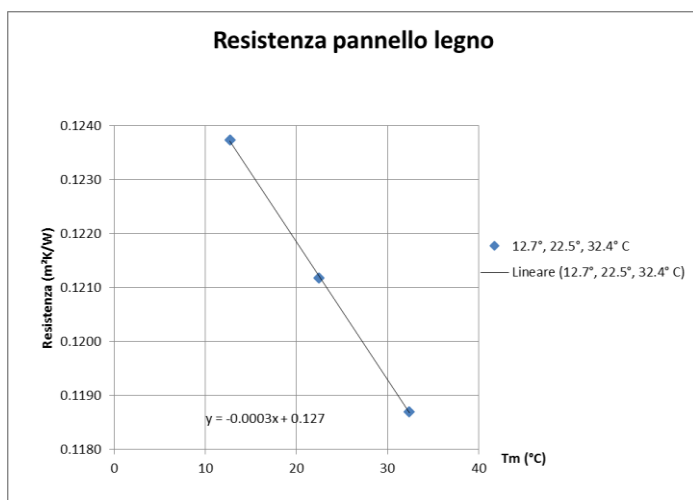


Figura 3.42 resistenza termica in funzione della temperatura media nel caso del pannello di legno pressato.

È ora possibile ricavare i valori di resistenza totale del campione e del pannello alle esatte temperature di -3.6°, 0°, 10°, 20°, 30°C dalle rette interpolatrici trovate in precedenza (come temperatura inferiore viene considerata -3.6°C in quanto la macchina non è mai riuscita a raggiungere i -5°C durante la prova).

La resistenza della ghiaia è stata in seguito ottenuta sottraendo alla resistenza totale quella dei due pannelli (Tabella 3.19). I valori di lambda sono ricavati da:

Equazione 8

$$\lambda_{ghiaia} \left(\frac{W}{mK} \right) = \frac{s_{ghiaia} (m)}{R_{ghiaia} \left(\frac{m^2 K}{W} \right)}$$

lambda GHIAIA 80 mm				
Tm	Rtot	Rpannello	Rghiaia	λ_{ghiaia}
-3.6	0.5465	0.1285	0.2895	0.2763
0	0.5150	0.1270	0.2610	0.3065
10	0.5000	0.1240	0.2520	0.3175
20	0.4850	0.1210	0.2430	0.3292
30	0.4700	0.1180	0.2340	0.3419

Resistenza della ghiaia ricavata dalla differenza di
Rtotale-Rpannello

Tabella 3.19 lambda del materiale ghiaioso (Tm: °C; lambda: W/mK; resistenza; m²K/W).

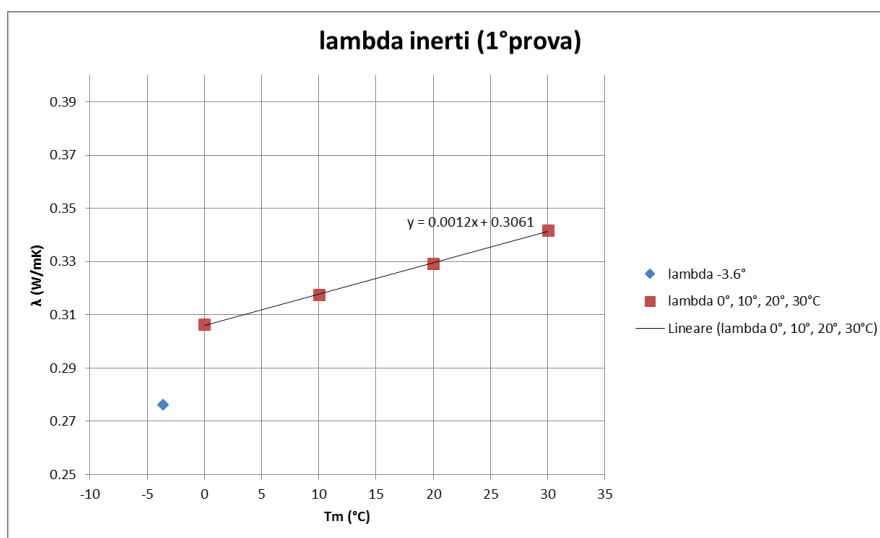


Figura 3.43 λ del materiale ghiaioso in funzione della temperatura media (1° prova: solo ghiaia).

I valori di conducibilità termica ottenuti a $T > 0^\circ\text{C}$ risultano troppo bassi (circa 0.32 W/mK) rispetto al valore che si attendeva a inizio prova (0.45-0.7 da bibliografia). Questo è dovuto probabilmente al fatto che in un mezzo poroso in condizioni insature vi siano forti componenti convettivi, che alterano il flusso di calore dalla superficie calda alla superficie fredda, determinando un'alternazione nel finale risultato di conducibilità termica del provino analizzato. L'aria è di fatto un cattivo conduttore, riducendo l'efficacia termica delle altre fasi di cui è costituito un suolo.

3.3.3.2 Prova 2 (ghiaia e sabbia – condizioni dry)

Per migliorare i valori di conducibilità termica ottenuti nella precedente prova, si è deciso di ripetere la misura migliorando il contatto tra il campione e le due superfici superiore e inferiore del box di contenimento, disponendo rispettivamente un centimetro di sabbia fine di risulta alla base e al tetto del materiale ghiaioso. In questo modo si sono eliminati, per quanto possibile, gli eventuali vuoti presenti al contatto tra il materiale e le due superfici. Inoltre il materiale ghiaioso è stato miscelato omogeneamente con sabbia media di risulta diminuendo la porosità del campione utilizzato nella prima prova. In Tabella 3.20 e in Figura 3.44 vi sono i dati e i risultati relativi alla classificazione granulometrica del nuovo materiale,

mentre le immagini sottostanti rappresentano in sequenza le varie fasi di preparazione del provino per la seconda prova in condizioni dry.

		Peso lordo	g.	49.43
		Peso tara	g.	7.196
		Peso netto	g.	42.234
Vaglio	D Vaglio	Peso netto (g)	% Trattenuto	% Passante
4"	101.6		0.00	100.00
3"	76.2		0.00	100.00
2"	50.8		0.00	100.00
1" 1/2	38.1		0.00	100.00
1"	25.40	0.378	0.90	99.10
3/4"	19.05	7.28	17.24	81.87
1/2"	12.70	10.39	24.60	57.27
3/8"	9.51	1.314	3.11	54.16
4,760 mm	4.76	1.46	3.46	50.70
2 mm	2.00	1.942	4.60	46.10
0,420 mm	0.42	8.81	20.86	25.24
0,250 mm	0.25	5.63	13.33	11.91
0 mm	0.00	5.03	11.91	0.00

Tabella 3.20 percentuali di trattenuto e passante ai vari vagli.

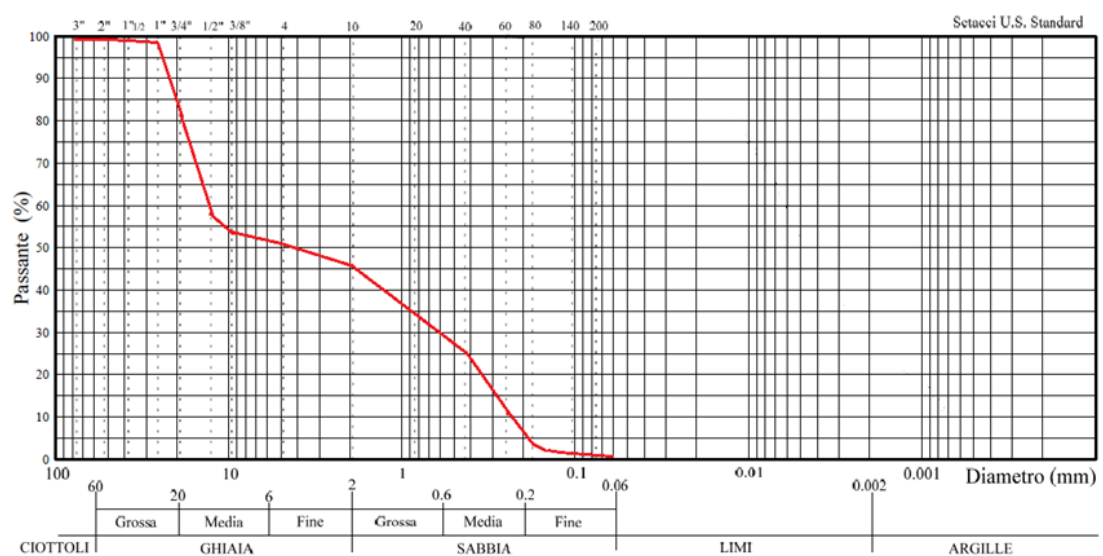


Figura 3.44 curva granulometrica della terreno ghiaioso con sabbia ben gradato.



Figura 3.45 a sinistra: letto di sabbia fine di risulta (1 cm); in centro: disposizione del materiale ghiaioso all'interno dell'area di misura; a destra: tetto di sabbia fine di risulta (1 cm).



Figura 3.46 a sinistra: inserimento del box sopra la piastra calda; in centro: chiusura del box con pannello di legno pressato; a destra: posizionamento della piastra fredda sopra al box.

Come nella prova precedente, i dati di input sono:

- $\Delta T = 10^\circ\text{C}$
- Step di temperatura media del campione = -5°C ; 0°C ; 10°C ; 20°C ; 30°C
- $\text{Lambda dry} = 0.8 \text{ W/mK}$
- intervallo di acquisizione: 30 minuti
- differenza minima attendibile tra due registrazioni successive (per due volte): 0.6 %

A fine prova si sono ottenuti i seguenti parametri:

Heating power (W)	T cold sample surface ($^\circ\text{C}$)	T warm sample surface ($^\circ\text{C}$)	Sample mean T ($^\circ\text{C}$)	Temperature difference on sample (K)	Lambda (W/mK)
5.83	-8.8	1.8	-3.5	10.6	0.2279
6.26	-4.1	6.5	1.2	10.6	0.2451
6.30	5.6	16.2	10.9	10.6	0.2466
6.40	15.4	26.1	20.7	10.6	0.2508
6.60	25.4	36.0	30.7	10.6	0.2589

Tabella 3.21 valori ottenuti a fine 2° prova (ghiaia + sabbia) in condizioni dry. I dati hanno un errore di ± 0.005 .

Applicando l'equazione (Equazione 6) sono facilmente verificabili i valori di conducibilità termica ottenuti a fine prova (tutti i dati misurati durante la prova in Tabella 6.5).

$$\lambda = \frac{P \cdot s}{A(T_w - T_c)}$$

$$\lambda_{dry}(T = -3.5^\circ C) = \frac{5.83 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (1.8^\circ C - (-8.8^\circ C))} = 0.2279 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 1.2^\circ C) = \frac{6.26 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (6.5^\circ C - (-4.1^\circ C))} = 0.2451 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 10.9^\circ C) = \frac{6.30 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (16.2^\circ C - 5.6^\circ C)} = 0.2466 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 20.7^\circ C) = \frac{6.40 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (26.1^\circ C - 15.4^\circ C)} = 0.2508 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 30.7^\circ C) = \frac{6.60 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (36.0^\circ C - 25.4^\circ C)} = 0.2589 \text{ W/mK}$$

Oltre a tali valori, nella Tabella 3.22 sono riportati i valori di resistenza termica ($\text{m}^2\text{K/W}$) ottenuti applicando l'Equazione 7.

Ghiaia + sabbia asciutta (2° prova)			
pacchetto intero		ghiaia con sabbia asciutta	104 mm
Tm	lambda	resistenza	
-3.5	0.2279	0.4563	
1.2	0.2451	0.4243	
10.9	0.2466	0.4217	
20.7	0.2508	0.4147	
30.7	0.2589	0.4017	

Tabella 3.22 dati del pacchetto completo ottenuti a fine della seconda prova in condizioni dry (T_m : $^\circ\text{C}$; λ : W/mK ; resistenza; $\text{m}^2\text{K/W}$).

Come nella prova 1, i dati ottenuti nella seconda prova sono stati rappresentati in un grafico resistenza termica-temperatura media. Anche in questo caso tra i dati di resistività termica relativi alle temperature positive (1.2° , 10.9° , 20.7° , 30.7°C) è stata condotta un'interpolazione lineare, escludendo il valore a -3.5°C .

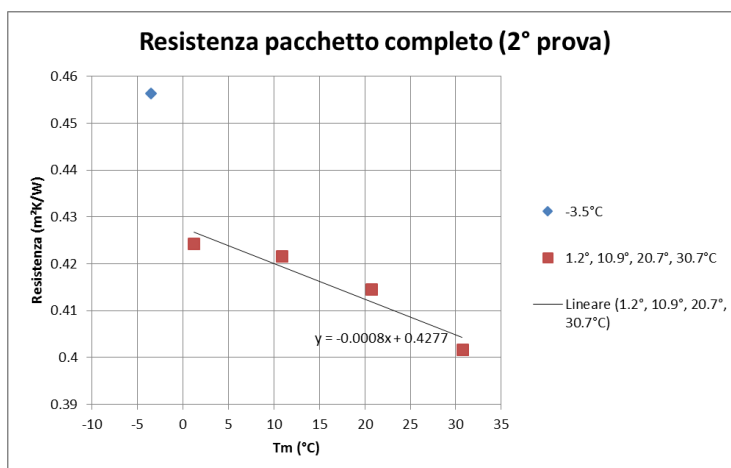


Figura 3.47 resistenza termica in funzione della temperatura media nel caso del pacchetto completo (2° prova).

Per ottenere i valori di conducibilità termica relativi al solo materiale inerte ghiaioso è necessario considerare anche il contributo dato dai due pannelli di legno pressato tra i quali è contenuto il materiale. Mediante lo strumento a piastra calda si è quindi misurato il valore di conducibilità termica di un pannello, per poi ricavarne la resistenza (Tabella 3.18 e Figura 3.42).

In seguito sono stati ricavati i valori di resistenza termica del campione e del pannello alle esatte temperature di -3.5°, 0°, 10°, 20°, 30°C dalle rette interpolatrici trovate in precedenza (come temperatura inferiore viene considerata -3.5°C in quanto la macchina non è mai riuscita a raggiungere i -5°C durante la prova). La resistenza della ghiaia è stata in seguito ottenuta sottraendo alla resistenza totale del campione quella dei due pannelli (Tabella 3.23). I valori di lambda sono ricavati dall'Equazione 8.

lambda GHIAIA 80 mm				
Tm	Rtot	Rpannello	Rghiaia	λ ghiaia
-3.5	0.4563	0.1281	0.2002	0.3996
0	0.4277	0.1270	0.1737	0.4606
10.0	0.4197	0.1240	0.1717	0.4659
20.0	0.4117	0.1210	0.1697	0.4714
30.0	0.4037	0.1180	0.1677	0.4770
Resistenza della ghiaia ricavata dalla differenza di Rtotale-Rpannello				

Tabella 3.23 lambda del materiale (Tm: °C; lambda: W/mK; resistenza; m²K/W).

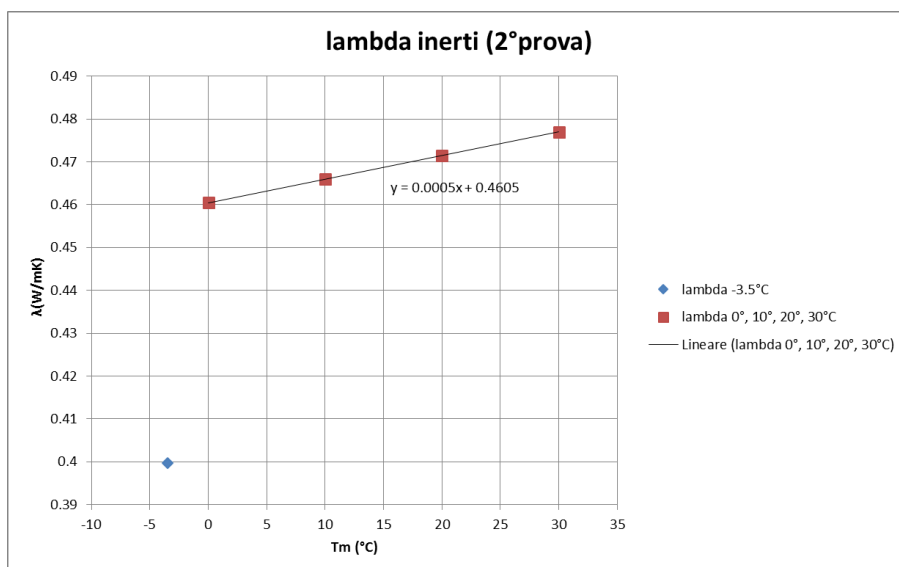


Figura 3.48 λ del materiale ghiaioso in funzione della temperatura media (2° prova: ghiaia più sabbia).

3.3.3.3 Prova 3 (ghiaia e sabbia – condizioni wet)

Nella terza e ultima prova è stata simulata la condizione di saturazione, inserendo nel materiale acqua tramite un imbuto. In condizioni di completa saturazione l'acqua acquista un ruolo di fondamentale importanza, costituendo un ponte tra le varie particelle solide, migliorandone la trasmissività termica. L'acqua, dotata di capacità termica molto alta, influenza le proprietà termiche e il potenziale accumulo di calore. Per questo motivo ci si attende a fine prova valori di conducibilità termica maggiori rispetto alla prova in condizioni anidre.

Si è quindi provveduto all'inserimento di 4.4 litri d'acqua (0.044 m^3) attraverso un imbuto fino a completa saturazione (Figura 3.49). In seguito il materiale è stato ricoperto con della pellicola trasparente per evitare perdite di quantità d'acqua del campione durante la prova.



Figura 3.49 a sinistra: iniziale fase di inserimento dell'acqua; in centro: inserimento dell'acqua in più punti; a destra: pellicola trasparente a copertura del campione di terreno.

Come nella prova precedente, i dati di input sono:

- $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$
- Step di temperatura media del campione = -3°C ; -2°C ; 0°C ; 10°C ; 20°C ; 30°C
- $\text{Lambda dry} = 0.8 \text{ W/mK}$
- intervallo di acquisizione: 30 minuti
- differenza minima attendibile tra due registrazioni successive (per due volte): 0.6 %

A fine prova si sono ottenuti i seguenti parametri:

Heating power (W)	T cold sample surface ($^{\circ}\text{C}$)	T warm sample surface ($^{\circ}\text{C}$)	Sample mean T ($^{\circ}\text{C}$)	Temperature difference on sample (K)	Lambda (W/mK)
3.70	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1459
5.73	-6.4	3.9	-1.2	10.3	0.2312
6.75	-5.6	4.6	-0.5	10.2	0.2753
8.19	-4.8	5.2	0.2	10.0	0.3396
8.16	1.0	11.1	6.0	10.0	0.3383
8.57	3.9	13.9	8.9	10.0	0.3569
8.55	5.8	15.8	10.8	10.0	0.3560
8.91	25.6	35.5	30.6	10.0	0.3725

Tabella 3.24 valori ottenuti a fine 3^o prova (ghiaia + sabbia) in condizioni wet. I dati relativi a temperature negative hanno un errore di ± 0.019 .

Applicando l'equazione (Equazione 6) sono facilmente verificabili i valori di conducibilità termica ottenuti a fine prova (tutti i dati misurati durante la prova da Tabella 6.6 a Tabella 6.9).

$$\lambda = \frac{P \cdot s}{A(T_w - T_c)}$$

$$\lambda_{dry}(T = -2.7^\circ C) = \frac{3.70 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (2.6^\circ C - (-7.9^\circ C))} = 0.1459 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 1.2^\circ C) = \frac{5.73 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (3.9^\circ C - (-6.4^\circ C))} = 0.2312 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 10.9^\circ C) = \frac{6.75 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (4.6^\circ C - (-5.6^\circ C))} = 0.2753 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 20.7^\circ C) = \frac{8.19 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (5.2^\circ C - (-4.8^\circ C))} = 0.3396 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 30.7^\circ C) = \frac{8.16 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (11.1^\circ C - 1.0^\circ C)} = 0.3383 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 10.9^\circ C) = \frac{8.57 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (13.9^\circ C - 3.9^\circ C)} = 0.3569 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 10.9^\circ C) = \frac{8.55 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (15.8^\circ C - 5.8^\circ C)} = 0.3560 \text{ W/mK}$$

$$\lambda_{dry}(T = 10.9^\circ C) = \frac{8.91 \text{ W} \cdot 0.104 \text{ m}}{0.25 \text{ m}^2 \cdot (35.5^\circ C - 25.6^\circ C)} = 0.3725 \text{ W/mK}$$

Oltre a tali valori, nella Tabella 3.25 sono riportati i valori di resistenza termica ($\text{m}^2\text{K/W}$) ottenuti applicando l'Equazione 7.

Ghiaia + sabbia bagnata (3° prova)

pacchetto intero ghiaia con sabbia asciutta 104 mm

Tm	lambda	resistenza
-2.7	0.1459	0.7128
-1.2	0.2312	0.4498
-0.5	0.2753	0.3778
0.2	0.3396	0.3062
6	0.3383	0.3074
10.8	0.3569	0.2914
20.7	0.3560	0.2921
30.6	0.3725	0.2792

Tabella 3.25 dati del pacchetto completo ottenuti a fine della terza prova in condizioni wet (Tm: °C; lambda: W/mK; resistenza; m²K/W).

Come nelle prove precedenti, i dati ottenuti nella prova 3 sono stati rappresentati in un grafico resistenza termica-temperatura media. Anche in questo caso tra i dati di resistività termica relativi alle temperature positive (0.2°, 6°, 10.8°, 20.7°, 30.6°C) è stata condotta un'interpolazione lineare, escludendo i valori a -2.7°C, -1.2°C, -0.5°C.

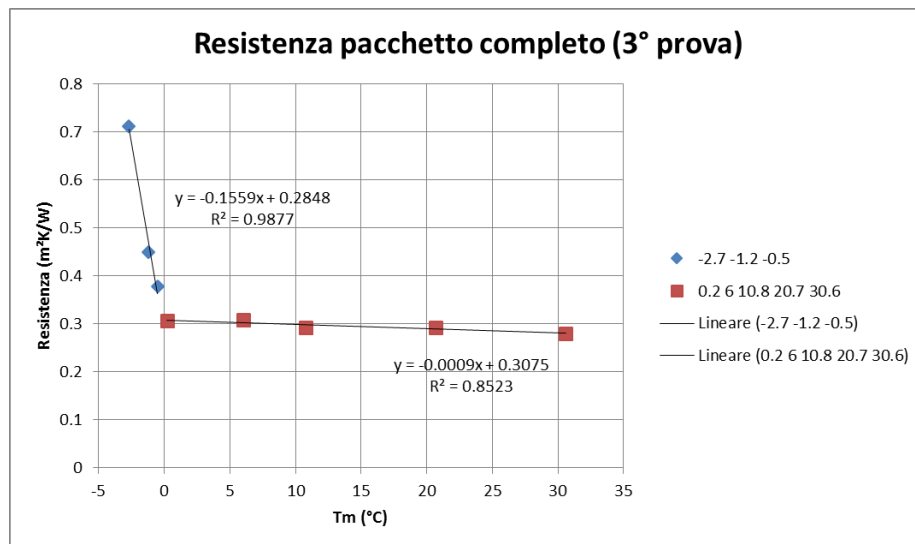


Figura 3.50 resistenza termica in funzione della temperatura media nel caso del pacchetto completo (3° prova).

Per ottenere i valori di conducibilità termica relativi al solo materiale inerte ghiaioso è necessario considerare anche il contributo dato dai due pannelli di legno pressato tra i quali è contenuto il materiale. Mediante lo strumento a piastra calda si è quindi

misurato il valore di conducibilità termica di un pannello, per poi ricavarne la resistenza (Tabella 3.18 e Figura 3.42).

In seguito sono stati ricavati i valori di resistenza termica del campione e del pannello alle esatte temperature di -2.7°, -2°, 0°, 10°, 20°, 30°C dalle rette interpolatrici trovate in precedenza (come temperatura inferiore viene considerata -2.7°C in quanto la macchina non è mai riuscita a raggiungere i -3°C durante la prova). La resistenza della ghiaia è stata in seguito ottenuta sottraendo alla resistenza totale del campione quella dei due pannelli (Tabella 3.26). I valori di lambda sono ricavati dall'Equazione 8.

lambda GHIAIA 80 mm				
Tm	Rtot	Rpannello	Rghiaia	λ ghiaia
-2.7	0.712817	0.1278	0.4572	0.1750
-2	0.5966	0.1276	0.3414	0.2343
0	0.3075	0.1270	0.0535	1.4953
10.0	0.2985	0.1240	0.0505	1.5842
20.0	0.2895	0.1210	0.0475	1.6842
30.0	0.2805	0.1180	0.0445	1.7978

Resistenza della ghiaia ricavata dalla differenza di Rtotale-Rpannello

Tabella 3.26 lambda del materiale ghiaioso in condizioni sature (Tm: °C; lambda: W/mK; resistenza; m²K/W).

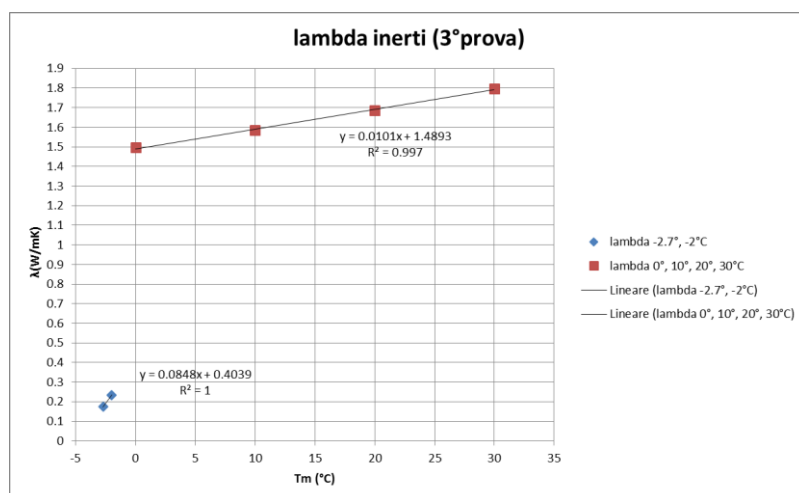


Figura 3.51 λ del materiale ghiaioso in funzione della temperatura media (3° prova: ghiaia più sabbia in condizioni wet).

3.3.4 Discussione

Osservando i grafici si può dire che:

- 1- i risultati ottenuti con la prima prova, che si ricordi essere condotta su un campione di sola ghiaia in condizioni anidre, non sono accettabili in quanto i valori di conducibilità termica (W/mK) risultano troppo bassi rispetto a quelli che ci si attendeva a inizio prova. Ciò potrebbe essere dovuto a moti convettivi che si sviluppano nei vuoti del provino.
- 2- I risultati della seconda prova, nella quale il materiale è stato opportunamente miscelato con sabbia media e posizionato tra due sottili letti di sabbia fine, possono essere assunti come corretti: 0.47 W/mK a $T > 0^{\circ}\text{C}$.
- 3- Nella seconda prova c'è un lieve discostamento del valore di conducibilità termica misurato a -3.5°C (0.3996 W/mK) rispetto al trend di valori misurati a temperature $> 0^{\circ}\text{C}$ (variazione tra 0.3996 W/mK e 0.4606 W/mK non significativa (15% circa)). L'acqua libera, di cui il materiale può essersi arricchito durante l'esposizione all'aria nelle fasi di preparazione del provino, è in quantità talmente minima da non poter influenzare le capacità termica del campione stesso.
- 4- Questo discostamento dei valori di conducibilità termica misurati a $T < 0^{\circ}\text{C}$ rispetto al trend delle misure a $T > 0^{\circ}\text{C}$ si riscontra anche nella terza prova in condizioni di saturazione. L'acqua presente, una volta ghiacciata, dovrebbe aumentare la conducibilità termica del campione (conducibilità termica dell'acqua a 20°C pari a 0.6 W/mK; conducibilità termica del ghiaccio pari a 2.22 W/mK a 0°C). Al contrario i dati sperimentali ottenuti rivelano addirittura valori di λ a temperature di congelamento (0.1750 W/mK a -2.7°C e 0.2343 W/mK a -2°C) di molto minori rispetto a quelli misurati in condizioni di non congelamento. Questo potrebbe essere dovuto ad una situazione di non completo congelamento del campione, soprattutto nella porzione limitrofa alla piastra calda, dove l'instaurarsi di moti convettivi legati alla presenza dell'acqua in fase ancora liquida, influenzerebbero la

misura del λ termico a temperature sotto zero diminuendone di molto il valore, rispetto ad una situazione ottimale che si avrebbe se il campione fosse completamente ghiacciato.

- 5- Concludendo, i valori di λ misurati a temperature di congelamento in condizioni anidre non in linea con il trend delle altre misure (prova 2), o addirittura minori nel caso wet (prova 3), non sono attendibili e potrebbero dipendere da una modalità operativa innovativa che va ancora ottimizzata, essendo la prima volta che si conducono misure di conducibilità termica su materiali inerti mediante lo strumento a piastra calda e anello di guardia. L'innovatività di questo processo di indagine serve quindi per comprendere quali siano i reali limiti strumentali.

3.4 I materiali sintetici

3.4.1 Conducibilità termica dei geosintetici

Secondo gli autori Abuel-Naga e Bouazza (2013) le prestazioni termomeccaniche a lungo termine dei materiali geosintetici impiegati nella barriera di copertura delle discariche risentono del gradiente termico e in particolare delle elevate temperature generate dalla decomposizione biologica dei rifiuti solidi urbani (attorno ai 60°C secondo Yesiller et al. (2005) e Rowe (2005); fino a raggiungere gli oltre 70°C alla base delle discariche nel caso vi fosse la presenza di una grande quantità di percolato secondo Yoshida et al. (1996). Winterkorn e Eyring (1946) e Jakob (1949) hanno dichiarato che vi sono tre meccanismi di flusso di calore attraverso qualsiasi materiale:

-conduzione: la trasmissione di calore avviene dalle zone a temperatura maggiore verso quelle a temperatura minore grazie all'oscillazione delle molecole di materiale (più la temperatura è elevata, maggiore è l'oscillazione);

-convezione: il corpo a più alta temperatura cede calore al corpo a più bassa temperatura;

-radiazione: lo scambio di calore avviene mediante onde che attraversano lo spazio compreso tra un corpo e un altro.

La conducibilità termica dei geomateriali è un parametro molto importante e può essere stimato mediante due metodi: metodo steady state (stato stazionario) e metodo transient state (stato transitorio). Nel metodo steady state un campione viene sottoposto a un gradiente termico fisso. La conducibilità termica viene poi misurata quando il flusso di calore attraverso un campione di geomateriale raggiunge un valore costante e non cambia nel tempo. Per questo metodo si utilizza l'equazione di Fourier che consente di determinare la conducibilità termica, noti il flusso di calore e il gradiente termico.

$$Q = -\lambda \nabla T$$

$$\nabla T = \frac{\Delta T}{L}$$

dove λ (W/mK) è la conducibilità termica; Q (W/m²) è il flusso di calore; ∇T (K/m) è il gradiente di temperatura; ΔT (°C) è la differenza di temperatura e L (m) è lo spessore. Per ottenere il valore della conducibilità termica è necessario, quindi, possedere la misura del flusso di calore e della differenza di temperatura.

Al contrario il metodo transient state determina la conducibilità termica mentre la temperatura del campione di geomateriale cambia in seguito a riscaldamento o raffreddamento.

Da letteratura si apprende di studi condotti su geotessuti (in Figura 3.52 indicati con la sigla GT1, GT2 e GT3) mediante metodo steady state, che mettono in luce una relazione tra la conducibilità termica degli stessi materiali e il loro contenuto d'acqua gravimetrica (Singh, Bouazza (2013)). Il valore della conducibilità termica, infatti, aumenta man mano che aumentano i giorni di immersione in acqua dei geotessili e quindi del loro contenuto d'acqua. La conducibilità termica dei geotessili varia da 0.07 a 0.83 W/mK a seconda del tempo di immersione in acqua. L'aumento del valore del parametro termico è dovuto alla più alta conducibilità

termica dell'acqua ($\lambda=0.6$ W/mK) rispetto a quella dell'aria ($\lambda=0.02$ W/mK). Di conseguenza se nei pori ricchi d'aria di un qualsiasi materiale entra dell'acqua, la sua conducibilità termica inevitabilmente aumenta.

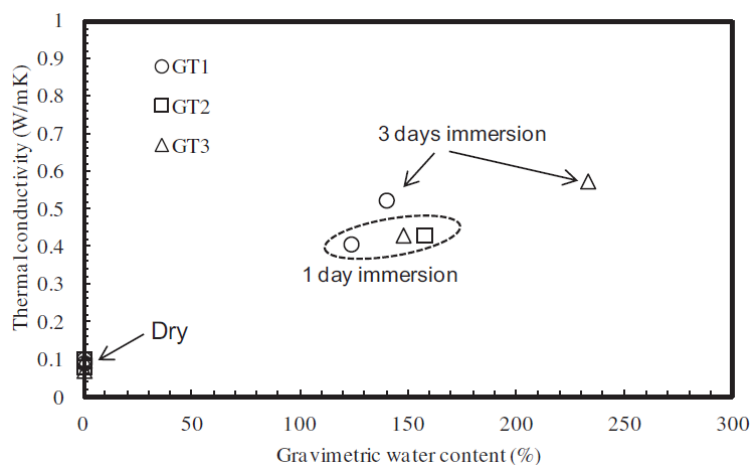


Figura 3.52 variazioni della conducibilità termica dei geotessili in funzione del contenuto d'acqua (Singh, Bouazza (2013)).

3.4.2 Materiali analizzati

Partendo da queste basi bibliografiche, si è passati alla misurazione del λ termico dei geotessili utilizzati nella discarica di Torretta, che si distinguono in: geotessili nontessuti in polipropilene ad alta tenacità (in blu in Figura 1.16) e geotessili tessuti in polipropilene (in rosso in Figura 1.16). I primi ricoprono principalmente la funzione di rinforzo, mentre i secondi sono particolarmente adatti al drenaggio, filtrazione, protezione e separazione. I geotessili nontessuti, come quello in figura, sono composti da fibre sintetiche in polipropilene (Figura 3.53) disposte casualmente e coesionate con metodi meccanici (agugliati).



Figura 3.53: a sinistra: geotessile nontessuto agugliato in polipropilene ad alta tenacità, colore bianco; a destra: geotessile nontessuto agugliato visto al microscopio (AssINGeo).

SCHEDA TECNICA STANDARD: Rev 20090401

DESCRIZIONE: Geotessile nontessuto (GTX-N) agugliato

COMPOSIZIONE: Polipropilene alta tenacità, bianco

CARATTERISTICHE FISICHE		VALORE	NORMA
Massa areica	g/mq	300	EN ISO 9864
Spessore a 2 kPa	mm	2,7	EN ISO 9863
CARATTERISTICHE MECCANICHE			
Resistenza a trazione longitudinale MD	kN/m	22,0	EN ISO 10319
Resistenza a trazione trasversale CMD	kN/m	22,0	EN ISO 10319
Allungamento a carico max longitudinale MD	%	75	EN ISO 10319
Allungamento a carico max trasversale CMD	%	95	EN ISO 10319
Resistenza al punzonamento statico CBR	kN	3,6	EN ISO 12236
Perforazione al cone drop	mm	10	EN ISO 13433
Resistenza al punzone piramidale elettrico	N	140	EN 14574
CARATTERISTICHE IDRAULICHE			
Apertura caratteristica O_{90}	µm	< 100	EN ISO 12956
Permeabilità normale al piano $V_{1,50}$	mm/s	55	EN ISO 11058

DURABILITA'

Conservare il prodotto nella confezione fino al momento dell'applicazione.

Da ricoprire entro 2 settimane dalla installazione (EN 12224).

Previsione di durabilità minima in terreni con $4 < \text{pH} < 9$ e $T < 25^\circ$ non inferiore a 25 anni (EN ISO 13438).

Tabella 3.27: scheda tecnica del geotessile nontessuto in polipropilene.



Figura 3.54 geotessile tessuto a trama e ordito in polipropilene, colore nero (a destra, dettaglio della trama).

Descrizione:	geotessile tessuto a "trama e ordito" in polipropilene nero - stabilizzato UV
Peso (EN 9864):	310 g/m ²
Resistenza a trazione: (EN ISO 10319)	
- longitudinale:	65 kN/m
- trasversale:	65 kN/m
Allungamento a rottura: (EN ISO 10319)	
- longitudinale:	15 %
- trasversale:	11 %
CBR Resistenza al punzonamento: (EN ISO 12236)	8,0 kN
Resistenza al punzonamento dinamico: (EN ISO 13433)	10 mm
Porometria O90 (EN ISO 12956):	225 micron
Permeabilità (EN ISO 11058):	15 l/m ² .s
Altezza rotoli:	5,20 m
Lunghezza rotoli:	100 m

Tabella 3.28 scheda tecnica del geotessile tessuto in polipropilene.

3.4.3 Metodologie di analisi termica e misure eseguite

Per riprodurre la situazione reale in cui si trovano i geotessili in discarica ed ottenere inoltre una migliore aderenza tra la sonda piana e i geotessili, quest'ultimi sono stati immersi in acqua per un tempo indicativo di almeno 4-5 ore. In seguito sono stati posti tra la sonda circolare piana dello strumento ISOMET 2114 e un peso, con lo scopo di ottenere un perfetto contatto tra i due oggetti (Figura 3.55-Figura 3.56).

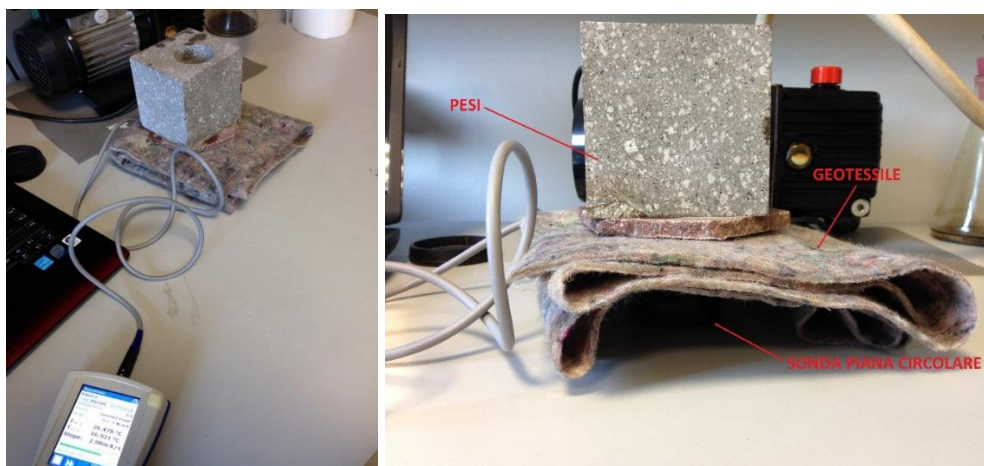


Figura 3.55 misurazione della conducibilità termica del geotessile nontessuto.

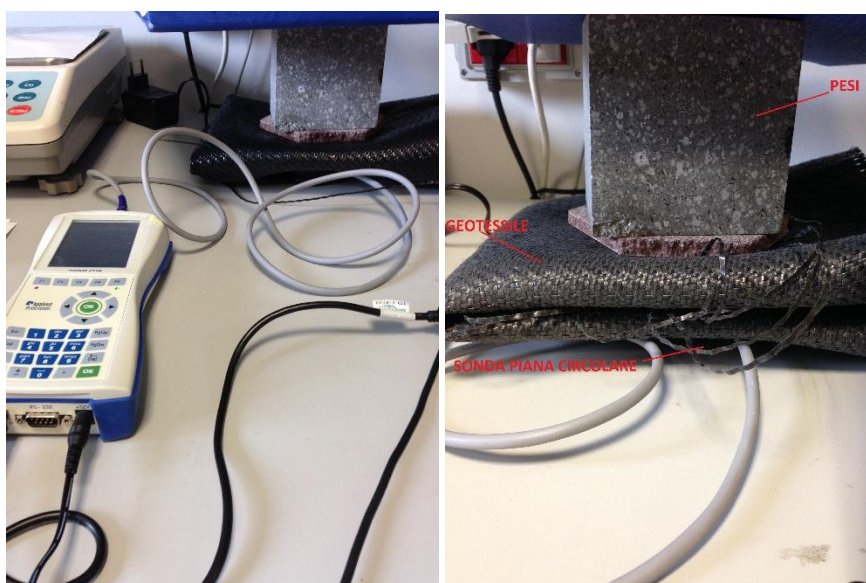


Figura 3.56 misurazione della conducibilità termica del geotessile tessuto.

Per ridurre l'errore di valutazione di misura, per ogni geotessile sono state condotte due misurazioni a temperatura ambiente, ottenendo così due coppie di valori di conducibilità termica (W/mK) per ogni geotessuto (Tabella 3.29).

materiale	lamdba (W/mK)
geotessile nontessuto	0.4542
geotessile nontessuto	0.4573
geotessile nontessuto	0.4346
geotessile nontessuto	0.4385
geotessile tessuto	0.1659
geotessile tessuto	0.1631
geotessile tessuto	0.1681
geotessile tessuto	0.1687

Tabella 3.29 valori di conducibilità termica (W/mK) misurati con lo strumento ISOMET 2114.

3.4.4 Discussione

La conducibilità termica del geotessile nontessuto pari a 0.45 W/mK e quella del geotessile tessuto pari a 0.17 W/mK sono da ritenersi accettabili in quanto rientranti nell'intervallo indicato in letteratura (Sottoparagrafo 3.4.1). Rispetto a quell'intervallo, il valore di conducibilità termica del geotessile tessuto è prossimo al limite inferiore. Ciò è dovuto al limitato tempo di immersione e all'altissima idrofobicità del materiale.

4 Analisi numeriche dei processi di trasporto termico nella copertura

Nel capitolo 4 verrà trattato ampiamente l'argomento delle sollecitazioni termiche a cui è soggetta la copertura temporanea di una discarica per RSU. I principali fattori di influenza del regime termico di una discarica sono la tipologia, l'età e la profondità dei rifiuti, il tasso di umidità interno e le variazioni termiche dell'aria atmosferica. La temperatura è infatti un fattore di primaria importanza in una discarica, in quanto da essa dipendono le proprietà fisiche, chimiche, biologiche e meccaniche sia dei rifiuti che dei materiali impiegati nello strato di copertura e di fondo. Hartz et al. (1982), Edil et al. (1990) e Fassett (1994) relazionarono il comportamento dei rifiuti alla temperatura, imputandola come principale fattore di influenza per la loro degradazione e decomposizione. Alcuni studi si concentrarono sul riscaldamento (Campanella e Mitchell (1968)), mentre altri analizzarono la struttura dell'argilla sottoposta a cicli di gelo-disgelo, che causano la formazione in uno strato di argilla di numerosi crack e fessure con conseguente aumento della conducibilità idraulica (Daniel (1987) e Othman (1994)). Oltre ai materiali naturali, anche i geosintetici utilizzati al top e al bottom di una discarica risentono delle variazioni di temperatura, come testimoniato da Rigo e Cazzuffi (1991). Secondo i due studiosi, le alte temperature aumentano la degradazione e l'invecchiamento dei geotessuti, mentre le basse temperature portano alla diminuzione della flessibilità di codesti materiali sintetici.

Dal momento, quindi, che la copertura di una discarica per rifiuti solidi urbani, come il presente caso studio, risente delle variazioni termiche dell'aria e del calore endogeno prodotto dai rifiuti, si è deciso di fare un modello agli elementi finiti mediante il codice di calcolo Feflow, per valutare l'andamento dell'onda termica all'interno della barriera impermeabile di copertura.

4.1 Andamento della temperatura nel corpo rifiuti di una discarica

Nell'immagine sottostante si osserva che in una discarica le temperature si spingono a valori superiori rispetto al caso di un terreno qualsiasi non soggetto alle alte temperature generate dai rifiuti. Uno dei più significativi studi sulla distribuzione e monitoraggio della temperatura a lungo termine nel sistema discarica è quello presentato da Hanson e Yesiller (2003).

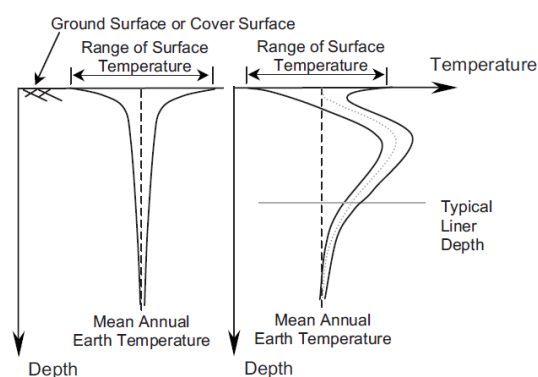


Figura 4.1 andamento della temperatura per un suolo (a sinistra) e per una discarica (a destra) (Hanson e Yesiller (2010)).

Il sito di indagine degli studi di Hanson e Yesiller è collocato in una zona con clima continentale umido (temperature medie tra i 15.1°C e i 5.5°C) nel Michigan (USA). La temperatura minima, pari a -3.3°C, viene raggiunta tra i mesi di dicembre e di gennaio, mentre la temperatura massima corrispondente a 23.5°C si verifica nel periodo compreso tra luglio-agosto. La discarica del Michigan è una discarica per rifiuti solidi urbani, come la discarica sito studio di Torretta di Legnago, attiva dal 1983. La discarica è divisa in undici lotti (A-K), qui indicati con il termine “celle”. Hanson e Yesiller disposero 17 array orizzontali e verticali sia all'interno del corpo rifiuti che nelle barriere di superficie e di fondo. Le serie di sensori erano dotati di ben 200 sensori di misura, costituiti da termocoppie di tipo K composte da leghe di nichel (Ni-Cr / Ni-Mn-Al) resistenti agli ambienti chimicamente aggressivi, poste dentro un condotto in PVC flessibile di cloruro di polivinile. Come è possibile

osservare nella figura sottostante, gli array erano disposti al di sotto della barriera di fondo (Type 1), all'interno della barriera di fondo nello strato di sabbia (Type 2), all'interno dei vecchi (Type 3) e nuovi (Type 4) rifiuti, all'interno del sistema di copertura temporaneo (Type 5) e finale (Type 6), e per finire in posizione esterna rispetto al corpo della discarica (Type 7).

La cella A è stata costruita nel 1994 e riempita con i rifiuti dal 1994 al 1996. L'array di sensori (Type 6) è stato installato nel 2002. La cella B è stata costruita nel 1994 e i rifiuti sono stati scaricati dal 1994 al 1999. I due array di sensori (Type 4) sono stati installati nel 1999 e nel 2001. Nella cella D, costruita nel 2001, i rifiuti risalgono al 2002. I sensori (Type 1 e 2) sono stati disposti nell'anno 2001, mentre l'array Type 3 è stato installato nel 2003. La cella I risale al 1999, riempita con rifiuti dal 2000 al 2002. L'array di sensori Type 2 è stato installato nel 1999, mentre il Type 3 nell'anno 2000. La cella J è stata realizzata nel 1998 e riempita con i rifiuti dal 1999 al 2001. L'array Type 2 risale al 1999, così come il Type 7. L'array Type 5 è stato installato nel 2001, il Type 4 e 6 nell'anno 2002. La cella L è stata riempita con i rifiuti dal 1984 al 1987 e dal 1993 al 1994. L'array di sensori Type 4 è stato installato nel 1999. I dati di temperatura venivano acquisiti in continuo e registrati dal monitoring box (Figura 4.2). Inoltre veniva registrata in continuo anche la temperatura dell'aria.

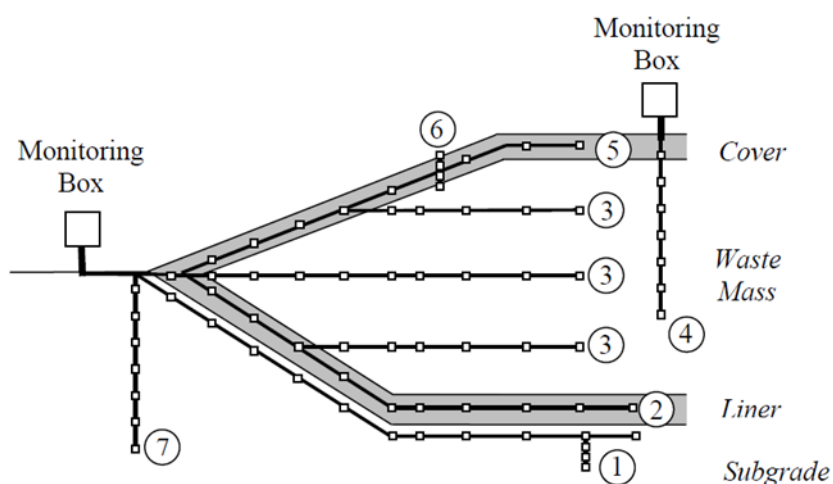


Figura 4.2: schema semplificato della collocazione degli array nel corpo della discarica del Michigan (Yesiller & Hanson (2003)).

Le serie di sensori disposte all'interno della massa dei rifiuti (Type 3, Type 4) e quelle situate nello strato di copertura (Type 5) hanno permesso di analizzare più nel dettaglio l'andamento delle temperature rapportandole alle temperature dell'aria. Con riferimento alla Tabella 4.1 e alla Figura 4.3, una serie orizzontale di sensori è disposta all'interno della massa dei rifiuti. Osservando i valori in Figura 4.3, si osserva che le temperature prossime al bordo della cella hanno un andamento molto simile a quello stagionale dell'aria, mentre man mano che si avanza verso l'interno della massa dei rifiuti e quindi aumenta lo spessore dei rifiuti sovrastanti i sensori, le temperature diventano più elevate raggiungendo anche i 40°C.

Installation	Type	Date of Installation	Temperature Sensors	Length of Array (m)	Comments
Cell J Liner	2	3/6/1999	10	183	New cell
Cell B Waste 1	4	8/7/1999	17	17	Old waste
Cell J Clay North	7	8/23/1999	4	5	Subgrade
Cell J Clay South	7	8/23/1999	12	12	Subgrade
Cell L Waste	4	8/23/1999	11	20	Old waste
Cell J/L Interface	2	9/30/1999	9	166	New waste
Cell I Liner	2	11/5/1999	21	169	New cell
Cell I Waste Mass	3	3/25/2000	9	163	New waste
Cell B Waste 2	4	1/16/2001	12	28	Old waste
Cell J Midheight	5	5/23/2001	8	213	Interim cover
Cell D Below Liner	1	9/8/2001	12	186	New cell
Cell D Liner	2	12/18/2001	8	186	New cell
Cell J Waste 1	4	5/29/2002	10	27	New Waste
Cell J Waste 2	4	5/30/2002	13	28	New Waste
Cell J Cover Profile	6	12/16/2002	12	11	Final cover
Cell A Cover Profile	6	12/16/2002	14	13	Final cover
Cell D Low Waste	3	3/29/2003	9	185	New Waste

Tabella 4.1 dettagli degli array appartenenti alle sei celle A, B, D, I, J e L. In arancio evidenziate le caratteristiche dell'array Type 3, cella I (Yesiller & Hanson (2003)).

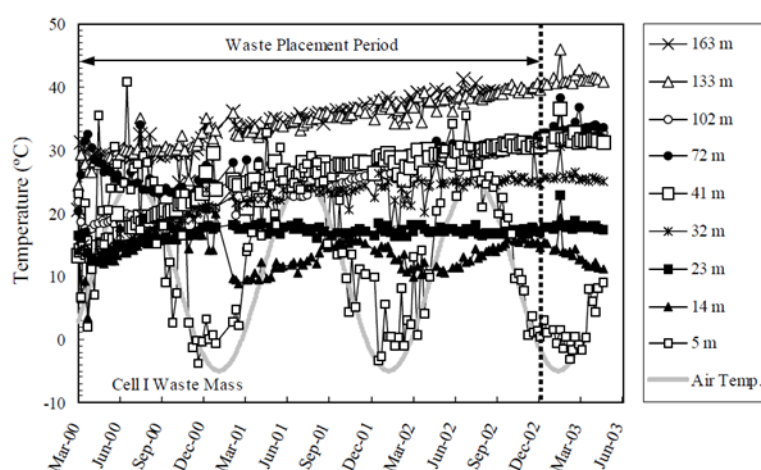


Figura 4.3 temperatura della massa di rifiuti (cella I). Sulla destra sono indicate le lunghezze dell'array orizzontale (Yesiller & Hanson (2003)).

Nelle celle B, I e J (Tabella 4.2) sono state disposte le serie di tipo verticale, allo scopo di conoscere l'andamento della temperatura in funzione della profondità all'interno del corpo rifiuti. Come è facilmente deducibile, i rifiuti posti in prossimità della superficie risentono molto della variazioni stagionali dell'aria rispetto agli strati più profondi, caratterizzati da una temperatura pressoché costante ed elevata fino a raggiungere quasi i 70°C. L'insieme delle serie verticali e quelle orizzontali permette la determinazione dei gradienti termici i , intesi come il rapporto tra la differenza di temperatura tra due sensori all'interno della stessa serie e la distanza tra i sensori stessi, usando misure di temperatura di un unico evento di monitoraggio.

In dettaglio, le temperature dei rifiuti conferiti nella discarica 9 anni prima rispetto all'inizio delle misurazioni (marzo 2000), variano dai 35° ai 50°C (cella L, Figura 4.4), con un gradiente termico medio tra i 3 e i 20 m pari a 1.5°C/m. Dal confronto dei valori di temperatura riportati in Figura 4.5 (cella B) e in Figura 4.6 (cella J) si può affermare che rifiuti conferiti in sito 2-3 anni prima rispetto all'inizio delle misure, hanno temperature più elevate rispetto ai rifiuti conferiti 6-7 anni prima dell'inizio delle misurazioni. I primi hanno temperature che variano dai 33° ai 60°C con un gradiente termico medio pari a 0.4°C/m tra i 12 e i 28 m di profondità, mentre i secondi hanno temperature comprese tra i 35° e i 56°C, con un gradiente termico medio tra gli 8 e i 17 m di profondità corrispondente a 2.9°C/m. Il gradiente termico medio più alto corrisponde alla cella B, nella quale sono presenti i rifiuti di età media (6-7 anni) rispetto ai rifiuti presenti nelle altre due celle, a testimonianza di un'attività biologica nei rifiuti significativa.

Installation	Type	Date of Installation	Temperature Sensors	Length of Array (m)	Comments
Cell J Liner	2	3/6/1999	10	183	New cell
Cell B Waste 1	4	8/7/1999	17	17	Old waste
Cell J Clay North	7	8/23/1999	4	5	Subgrade
Cell J Clay South	7	8/23/1999	12	12	Subgrade
Cell L Waste	4	8/23/1999	11	20	Old waste
Cell J/L Interface	2	9/30/1999	9	166	New waste
Cell I Liner	2	11/5/1999	21	169	New cell
Cell I Waste Mass	3	3/25/2000	9	163	New waste
Cell B Waste 2	4	1/16/2001	12	28	Old waste
Cell J Midheight	5	5/23/2001	8	213	Interim cover
Cell D Below Liner	1	9/8/2001	12	186	New cell
Cell D Liner	2	12/18/2001	8	186	New cell
Cell J Waste 1	4	5/29/2002	10	27	New Waste
Cell J Waste 2	4	5/30/2002	13	28	New Waste
Cell J Cover Profile	6	12/16/2002	12	11	Final cover
Cell A Cover Profile	6	12/16/2002	14	13	Final cover
Cell D Low Waste	3	3/29/2003	9	185	New Waste

Tabella 4.2 dettagli degli array appartenenti alle sei celle A, B, D, I, J e L. In blu evidenziate le caratteristiche degli array Type 4, celle B e L (rifiuti vecchi) e cella J (rifiuti nuovi) (Yesiller & Hanson (2003)).

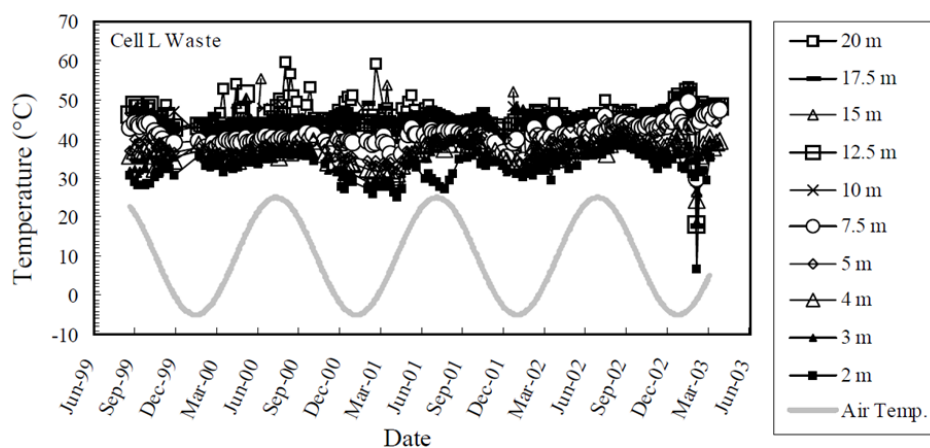


Figura 4.4 variazione delle temperature dei rifiuti con la profondità indicata nella colonna di destra (array Type 4, cella L, rifiuti vecchi 9 anni) (Yesiller & Hanson (2003)).

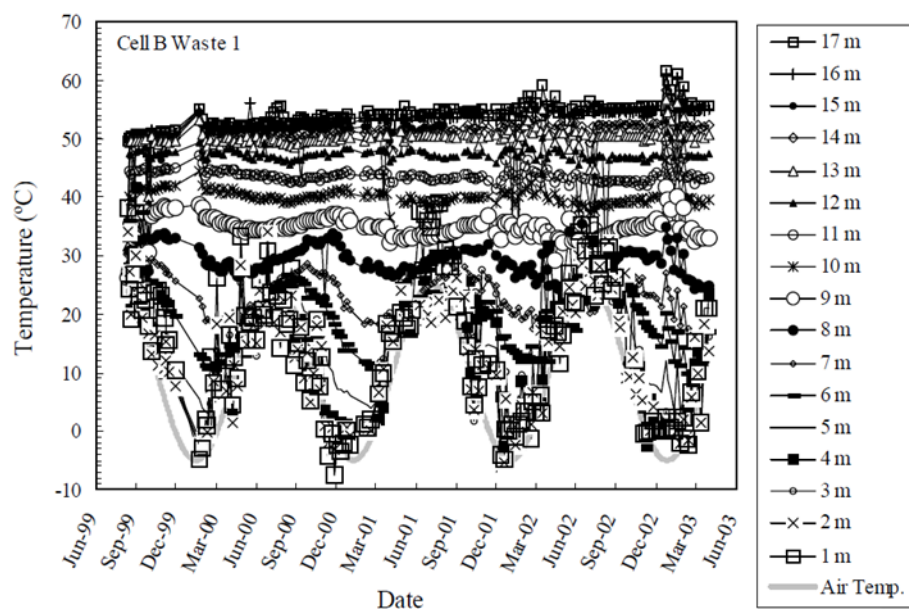


Figura 4.5 variazione delle temperature dei rifiuti con la profondità (array Type 4, cella B, rifiuti vecchi di 6-7 anni). Sulla destra sono indicate le varie profondità raggiunte dalla serie di sensori (Yesiller & Hanson (2003)).

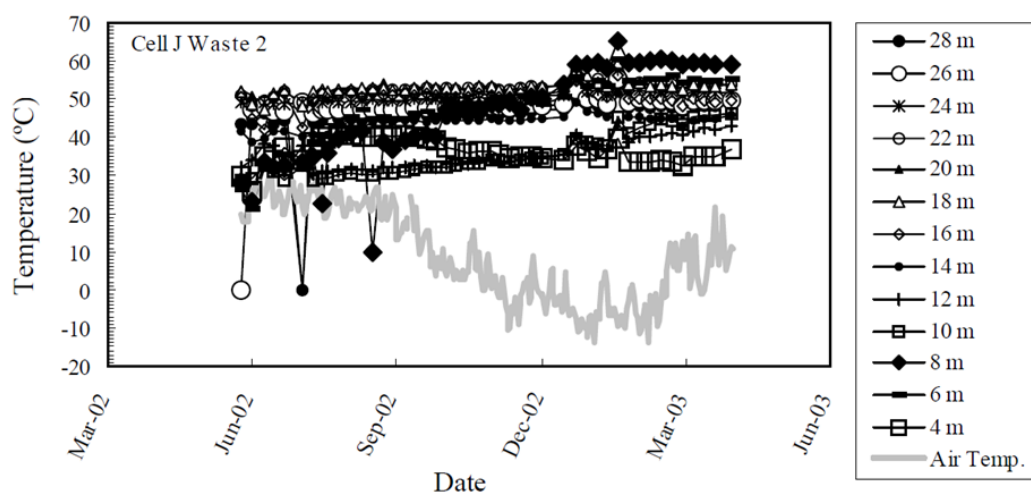


Figura 4.6 variazione delle temperature dei rifiuti con la profondità (array Type 4, cella J, rifiuti nuovi di 2-3 anni). Sulla destra sono indicate le varie profondità raggiunte dalla serie di sensori (Yesiller & Hanson (2003)).

Hanson e Yesiller (2010) rappresentarono, mediante un pattern di colori a scala di grigi (dal più chiaro per $T < 10^{\circ}\text{C}$; al più scuro per $T > 55^{\circ}\text{C}$), le zone a diversa temperatura del corpo rifiuti della discarica per RSU del Michigan. Le immagini rappresentano le temperature di diversi anni (dal 2004 al 2007), proprio per

evidenziare le escursioni termiche avvenute nel tempo, in funzione all'età dei rifiuti. Nelle immagini della distribuzione della temperatura si osserva una grande variazione delle temperature con il passare degli anni, in particolare nella zona centrale della discarica (Figura 4.7). Questo elevato trend è legato ad effetti combinati tra condizioni climatiche e operative tra cui elevate precipitazioni/condizioni di umidità e alta densità dei rifiuti.

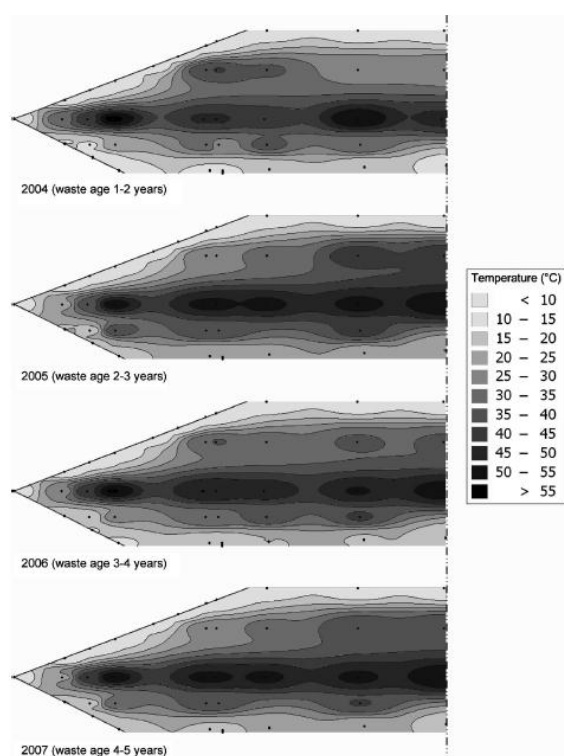


Figura 4.7 mappe rappresentanti le diverse zone di temperatura media dall'anno 2004 all'anno 2007 presenti nella massa rifiuti della discarica del Michigan. Le misure sono state effettuate mediante sensori di misura posizionati in una singola cella (Hanson & Yesiller (2010)).

Lo studio condotto da Hanson e Yesiller (2010) è molto utile per conoscere le temperature effettivamente presenti nella massa di rifiuti di una discarica per RSU come quella di Torretta di Legnago. I valori della temperatura dei rifiuti dipendono dall'anno del loro conferimento in discarica (rifiuti più recenti hanno temperature più elevate rispetto a rifiuti conferiti in discarica molti anni prima rispetto alle misurazioni). Inoltre i rifiuti posti in prossimità della superficie risentono molto della variazioni stagionali dell'aria rispetto ai rifiuti depositati negli strati più

profondi, caratterizzati da una temperatura pressoché costante ed elevata fino a raggiungere quasi i 70°C. Notevole importanza rivestono le temperature raggiunte dai rifiuti nei primi 1-2 anni dopo il loro ricoprimento mediante la copertura provvisoria. Nelle simulazioni che verranno condotte tramite il codice di calcolo Feflow, infatti, verrà valutata la distribuzione della temperatura all'interno della copertura provvisoria soggetta alle fluttuazioni della temperatura dell'aria e del calore endogeno prodotto dalla biodegradazione dei rifiuti conferiti in discarica appena prima della sua creazione. Facendo riferimento alla Figura 4.7 si è quindi deciso di imporre ai rifiuti una temperatura di 30°C e una temperatura di 70°C (temperatura considerata come il caso estremo limite, raggiunta dal corpo rifiuti durante la fase di degradazione aerobica).

4.2 Influenza della temperatura dell'aria

Il copertura provvisoria risente, oltre che del calore endogeno generato dal corpo rifiuti, anche delle escursioni termiche dell'aria (variazioni di temperatura stagionali e giornaliere). Come detto al Capitolo 2, condizioni di congelamento e essiccazione possono produrre radicali modifiche nelle caratteristiche di taluni terreni. Sono stati raccolti i dati di temperatura media, massima e minima giornaliera dall'anno 2006 all'anno 2015 misurati dalle stazioni meteo di Vangadizza (VR), Castelnovo Bariano (VR) e Torretta (VR). Dopo una prima analisi e valutando la maggiore disponibilità di dati relativi alla stazione Arpav di Castelnovo Bariano, si sono realizzati i seguenti grafici nei quali sono riportate le temperature medie (Figura 4.8), le medie delle temperature minime (Figura 4.9) e le medie delle temperature massime (Figura 4.10) annuali.

MEDIA	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gennaio	1.32	5.21	4.74	1.91	1.75	2.52	1.20	3.14	6.04	3.78
febbraio	3.68	6.33	4.93	4.87	4.66	4.48	0.91	3.34	7.85	5.48
marzo	7.50	9.55	8.60	8.82	8.11	9.23	11.71	7.43	10.87	9.43
aprile	13.96	15.72	12.43	13.96	13.56	15.91	12.95	13.46	14.96	13.25
maggio	18.20	19.27	18.08	19.95	17.41	20.08	18.02	16.33	17.81	18.85
giugno	21.95	22.44	21.79	22.12	21.95	21.75	23.59	21.98	22.57	23.10
luglio	25.40	25.16	24.09	24.33	25.75	23.26	25.77	25.51	22.25	27.27
agosto	20.88	23.07	24.36	25.77	23.32	25.62	26.58	24.16	21.86	24.61
settembre	20.11	18.59	18.38	20.53	18.56	22.34	19.65	20.02	19.34	19.54
ottobre	15.12	13.74	15.35	14.01	12.57	13.27	14.61	15.00	16.25	16.25
novembre	8.31	7.01	8.47	9.73	9.44	7.15	9.77	9.55	11.53	11.53
dicembre	3.29	2.77	4.17	2.72	1.51	3.77	1.59	3.74	6.17	6.17

Tabella 4.3 temperature medie mensili dal 2006 al 2015 (fonte: Arpav).

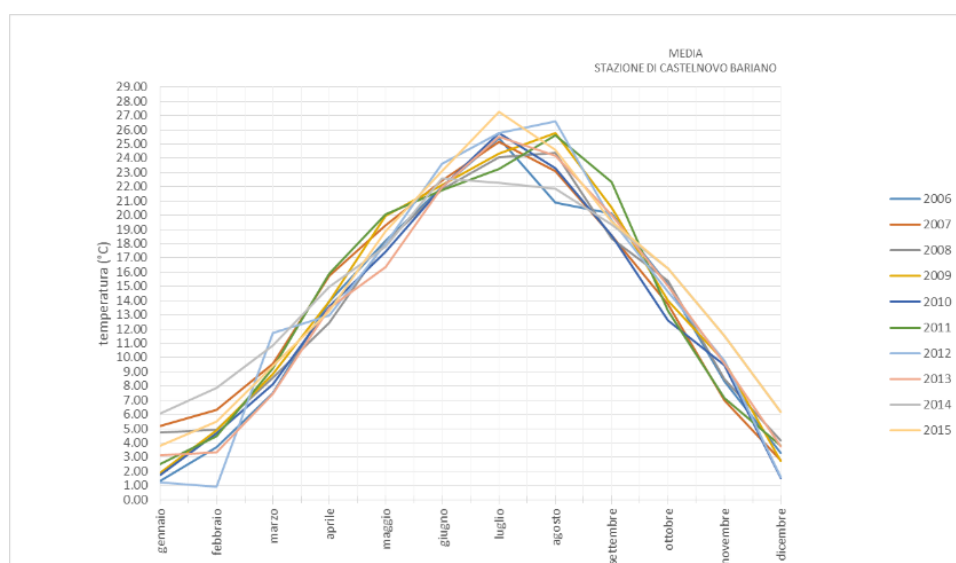


Figura 4.8 grafico temperatura-tempo: temperature medie mensili dal 2006 al 2015.

MIN	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gennaio	-1.43	2.74	2.29	-0.29	-0.25	0.40	-2.39	0.94	3.69	0.08
febbraio	0.11	2.32	0.49	0.45	1.33	0.60	-3.51	0.17	4.37	1.80
marzo	2.89	4.23	3.38	3.25	3.56	4.59	4.40	3.99	5.93	4.28
aprile	8.45	8.74	7.21	9.46	7.88	9.27	8.48	8.72	9.62	6.81
maggio	12.21	12.74	12.43	13.62	12.44	12.55	12.21	11.51	12.13	13.65
giugno	14.81	16.06	16.14	15.03	16.23	15.96	16.59	15.71	15.85	16.13
luglio	17.75	16.78	16.52	17.67	19.19	16.32	18.05	18.71	16.79	20.35
agosto	14.78	16.59	17.35	18.95	17.51	18.15	18.40	18.01	15.97	18.51
settembre	14.03	12.58	13.18	15.28	13.39	16.76	14.91	14.51	13.95	14.41
ottobre	10.53	9.13	10.54	9.35	8.49	7.98	10.77	12.33	12.23	12.23
novembre	4.24	2.95	5.82	7.18	7.14	4.55	6.88	6.66	8.87	8.87
dicembre	0.20	0.01	1.90	-0.15	-0.88	0.77	-0.85	0.68	4.42	4.42

Tabella 4.4 medie delle temperature minime mensili dal 2006 al 2015 (fonte: Arpav).

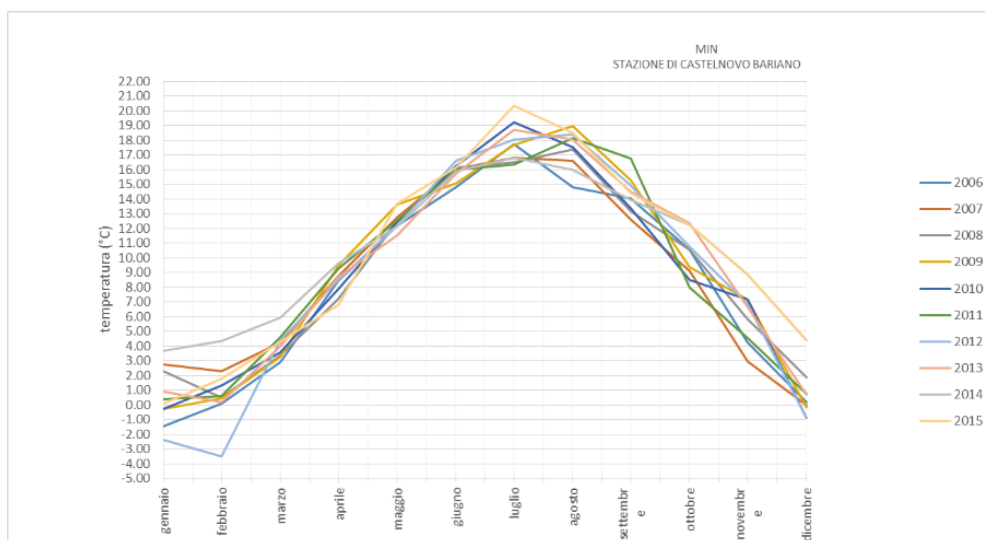


Figura 4.9 grafico temperatura-tempo: temperature medie minime mensili dal 2006 al 2015.

MAX	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
gennaio	4.60	8.10	7.46	4.49	3.98	4.98	6.11	5.70	8.40	8.44
febbraio	8.55	10.84	10.36	10.24	8.53	9.78	5.68	7.49	11.32	9.76
marzo	12.59	15.13	14.14	14.59	13.07	14.14	19.51	11.27	16.52	15.02
aprile	19.57	22.65	17.82	19.19	19.38	22.72	17.85	18.29	20.51	19.90
maggio	24.10	25.95	23.59	26.37	22.57	26.93	24.15	21.46	23.83	24.52
giugno	28.66	29.14	28.28	29.04	27.74	27.78	30.26	28.42	29.06	30.02
luglio	32.65	33.01	31.82	30.94	32.09	29.95	33.41	31.98	28.18	33.97
agosto	27.60	29.81	31.92	32.83	29.55	33.21	34.62	30.74	28.23	31.40
settembre	27.10	25.27	24.58	26.57	24.42	29.09	25.30	25.90	25.76	25.48
ottobre	20.75	19.09	21.11	19.32	17.44	19.35	19.20	18.41	21.62	21.62
novembre	12.53	11.83	11.84	12.12	11.95	10.55	13.22	12.99	14.63	14.63
dicembre	7.51	6.44	6.78	5.75	4.14	7.61	4.44	7.62	8.31	8.31

Tabella 4.5 medie delle temperature massime mensili dal 2006 al 2015 (fonte: Arpav).

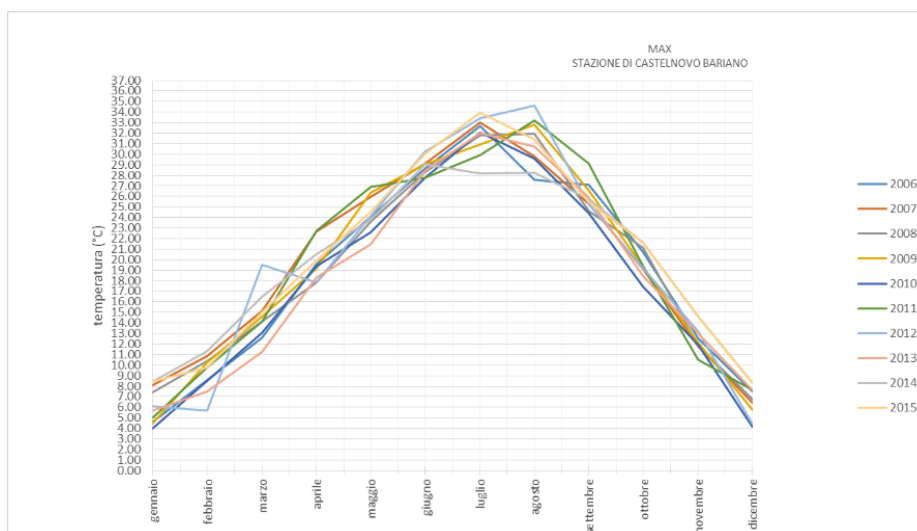


Figura 4.10 grafico temperatura-tempo: temperature medie massime mensili dal 2006 al 2015.

Si è quindi deciso di ricercare tra i dati disponibili, il mese più freddo e il mese più caldo, e studiare con il modello FEM appositamente realizzato, l'evoluzione dell'onda termica all'interno dello strato di copertura.

Il mese più freddo corrisponde a febbraio 2012: temperatura media minima di -3.51°C , mentre il mese più caldo è agosto 2012, con temperatura media massima pari a 34.62°C (Figura 4.11). In allegato (Tabella 6.10 e Tabella 6.11) sono riportate le temperature orarie del mese di febbraio e del mese di agosto 2012 (rappresentazione dell'andamento sinusoidale delle temperature orarie in Figura 4.12 e Figura 4.13).

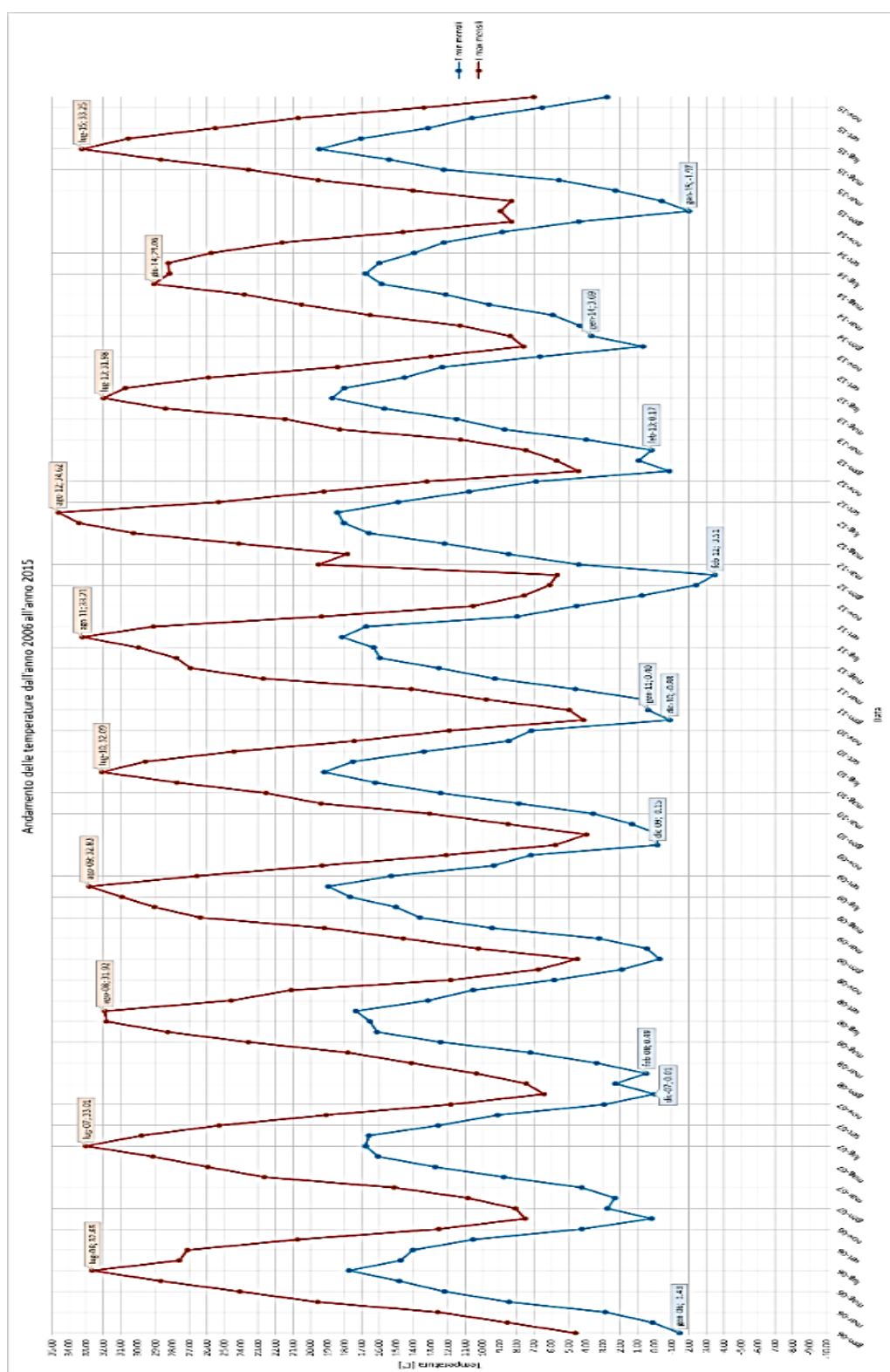


Figura 4.11 andamento delle temperature medie massime (curva rossa) e minime (curva azzurra) dall'anno 2006 all'anno 2015 (dati stazione Arpav, Castelnovo Bariano).

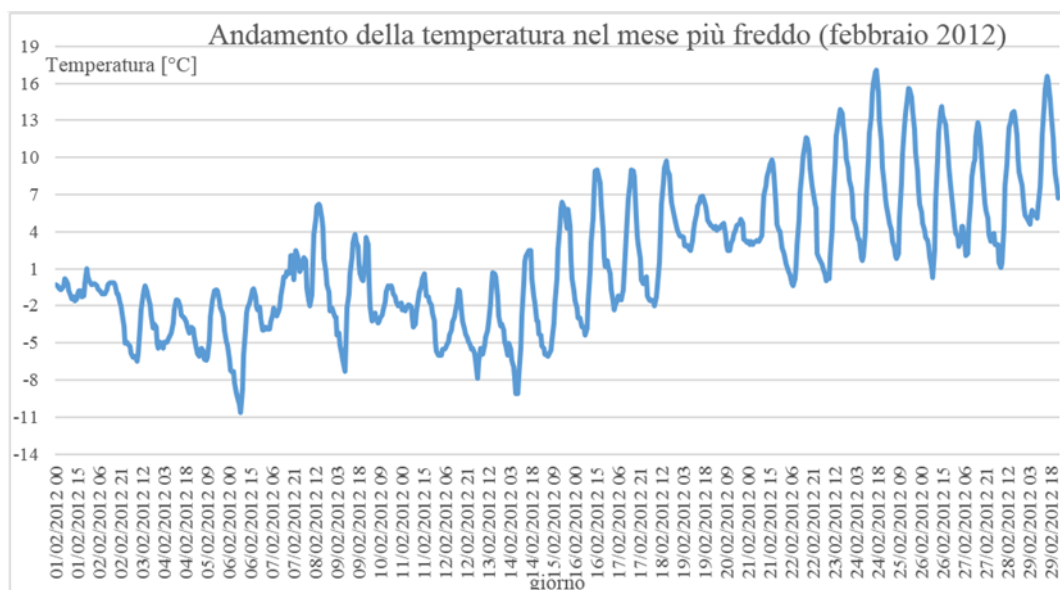


Figura 4.12 grafico temperatura-giorno: andamento delle temperature orarie nel mese di febbraio 2012 (stazione di Castelnovo Bariano, dati Arpav).

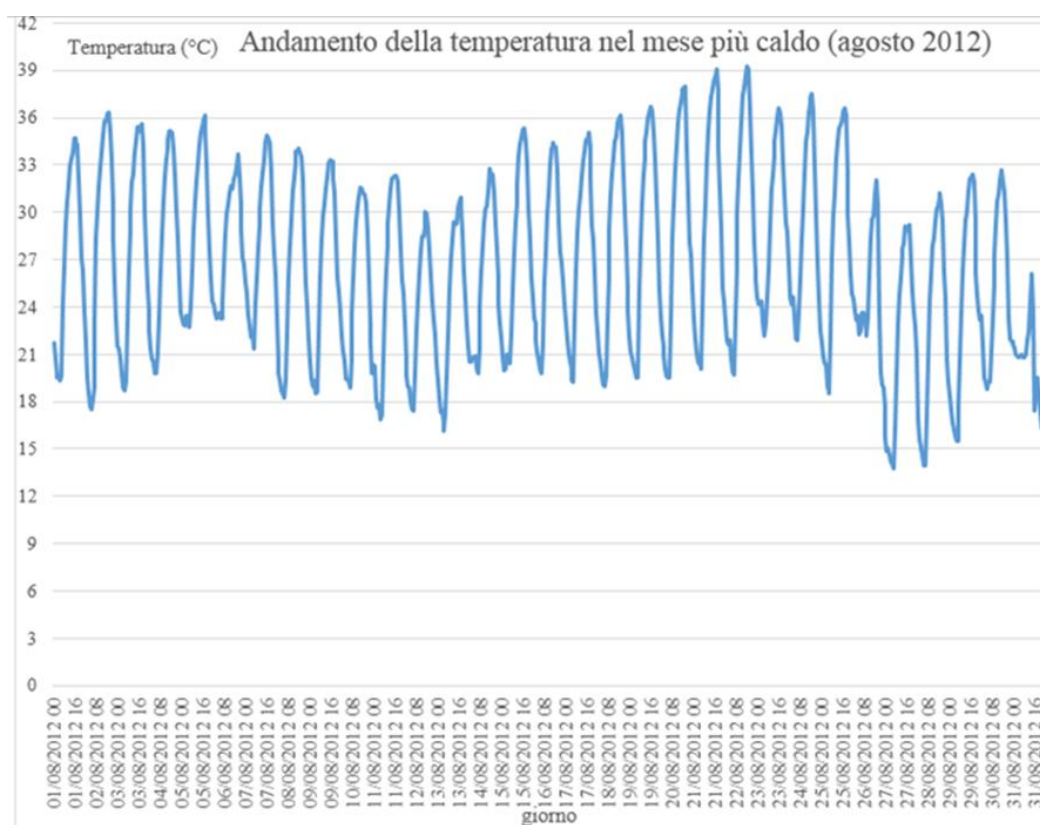


Figura 4.13 grafico temperatura-giorno: andamento delle temperature orarie nel mese di agosto 2012 (stazione di Castelnovo Bariano, dati Arpav).

4.3 Andamento della temperatura nella copertura

Hanson e Yesiller (2003) hanno misurato anche l'andamento dell'onda termica all'interno del pacchetto di copertura superficiale.

Nelle celle A e J sono stati installati due serie di sensori verticali (Type 6) nel sistema di copertura superficiale, formata, dall'alto verso il basso, da terreno di copertura, strato di terreno di protezione, georete e geomembrana in HDPE spessa 1.5 mm, strato di argilla compattata CL e uno strato di terreno di fondazione immediatamente sopra ai rifiuti come rappresentato schematicamente nella Figura 4.14. Lo spazio attorno al posizionamento delle serie è stato riempito con polvere di bentonite per evitare fenomeni di convezione e per ripristinare l'integrità del sistema di copertura.

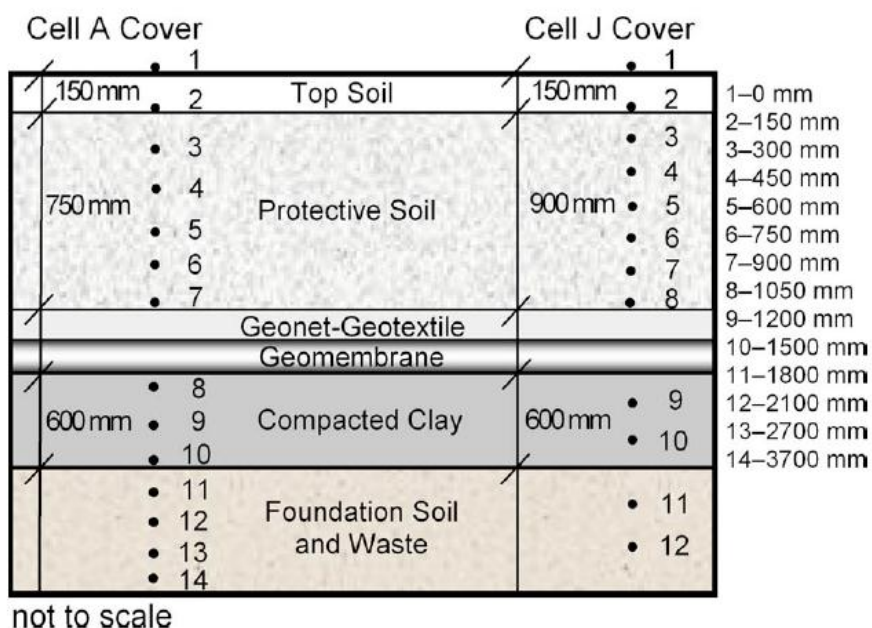


Figura 4.14 profilo dello strato di copertura della discarica nel Michigan, nel quale sono stati collocati due array verticali Type 6 (Yesiller & Hanson (2008)).

I profili di temperatura registrata nella copertura relativa ai cinque mesi invernali, da dicembre 2002 a maggio 2003, sono rappresentati nelle due immagini seguenti (Figura 4.15), nelle quali si osservano temperature più basse in superficie (0 mm), mentre, man mano che aumenta la profondità rispetto al piano campagna, le temperature aumentano fino ad attestarsi attorno ai 15°C con picchi fino ai 20°C in taluni casi. Le differenze di temperatura tra la superficie del terreno e le porzioni più profonde della copertura diminuiscono con l'arrivo della stagione calda. Complessivamente in Figura 4.16 viene rappresentato l'andamento annuale della temperatura acquisita dal luglio 2003 al luglio 2006 (cella A). Anche in questo caso i valori acquisiti in prossimità della superficie risultano inferiori rispetto a quelli in profondità, che risentono quindi dell'influenza delle calde temperature provenienti dalla biodegradazione dei rifiuti sottostanti. Questa influenza è testimoniata anche dalle maggiori temperature presenti nello strato di copertura rispetto alle temperature acquisite da un array di controllo (control array) posto nel terreno esternamente rispetto all'area di discarica (Figura 4.17). Concludendo si osserva che le temperature prossime alla superficie variano stagionalmente in relazione alla temperatura dell'aria mentre in profondità mostrano uno sfasamento e un'attenuazione dell'onda termica.

Installation	Type	Date of Installation	Temperature Sensors	Length of Array (m)	Comments
Cell J Liner	2	3/6/1999	10	183	New cell
Cell B Waste 1	4	8/7/1999	17	17	Old waste
Cell J Clay North	7	8/23/1999	4	5	Subgrade
Cell J Clay South	7	8/23/1999	12	12	Subgrade
Cell L Waste	4	8/23/1999	11	20	Old waste
Cell J/L Interface	2	9/30/1999	9	166	New waste
Cell I Liner	2	11/5/1999	21	169	New cell
Cell I Waste Mass	3	3/25/2000	9	163	New waste
Cell B Waste 2	4	1/16/2001	12	28	Old waste
Cell J Midheight	5	5/23/2001	8	213	Interim cover
Cell D Below Liner	1	9/8/2001	12	186	New cell
Cell D Liner	2	12/18/2001	8	186	New cell
Cell J Waste 1	4	5/29/2002	10	27	New Waste
Cell J Waste 2	4	5/30/2002	13	28	New Waste
Cell J Cover Profile	6	12/16/2002	12	11	Final cover
Cell A Cover Profile	6	12/16/2002	14	13	Final cover
Cell D Low Waste	3	3/29/2003	9	185	New Waste

Tabella 4.6 dettagli degli array appartenenti alle sei celle A, B, D, I, J e L. In verde evidenziate le caratteristiche degli array Type 6, celle A e J (Yesiller & Hanson (2003)).

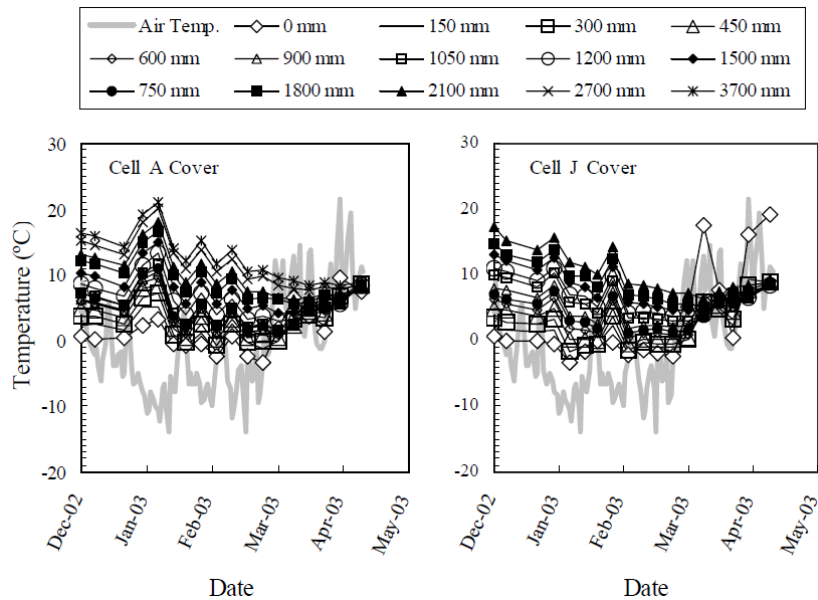


Figura 4.15 profili verticali delle temperature nei sistemi di copertura superficiale nella celle A e J. In alto sono indicate le varie profondità raggiunte dalla serie di sensori (Yesiller & Hanson (2003)).

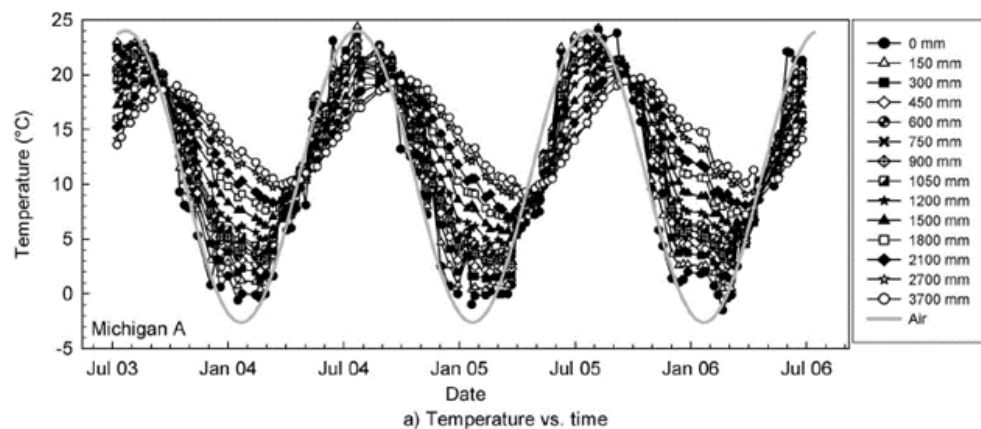


Figura 4.16 andamento della temperatura da luglio 2003 a luglio 2006, array verticale Type 6 cella A. Sulla destra sono indicate le varie profondità raggiunte dalla serie di sensori (Yesiller & Hanson (2008)).

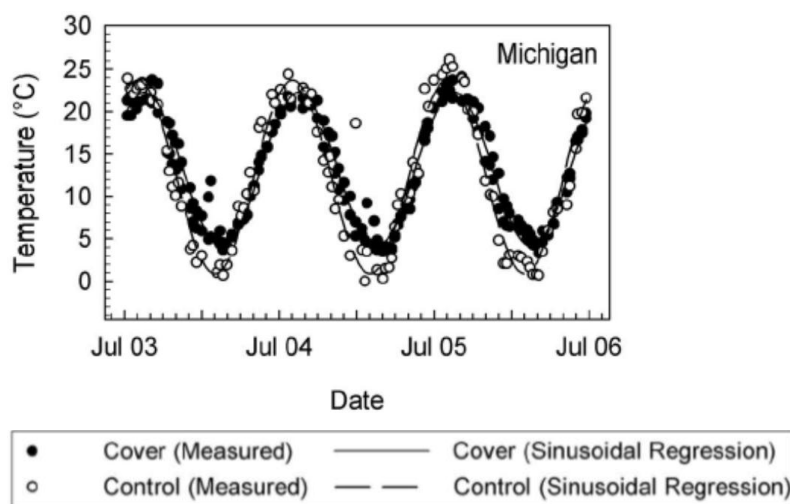


Figura 4.17 confronto tra le temperature acquisite dall'array verticale inserito nello strato di copertura e le temperature acquisite da un array verticale posto esternamente alla discarica (control array) (Yesiller & Hanson (2008)).

Oltre agli array verticali, nello strato di copertura sono stati installati anche una serie di array orizzontali (Type 5). I gradienti di temperatura fluttuano stagionalmente tra valori positivi (flusso di calore verso il basso) e valori negativi (flusso di calore verso l'alto). Il gradiente termico medio globale i_g , inteso come la pendenza della temperatura media in rapporto con la profondità, è pari a $-2^\circ\text{C}/\text{m}$, cioè la temperatura media aumenta con la profondità di $2^\circ\text{C}/\text{m}$, a causa della presenza dei rifiuti sottostanti a temperature più elevate, rispetto a quelle dell'aria, dovute ai processi di degradazione. I gradienti orizzontali sono inferiori a $1^\circ\text{C}/\text{m}$. Il range di variazione dei gradienti orizzontali è maggiore nei pressi della superficie, mentre si fa via via più limitato man mano che si scende in profondità (Figura 4.18).

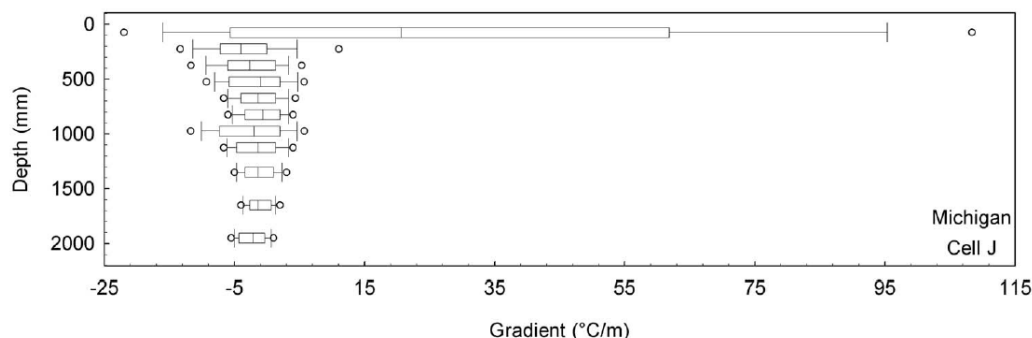


Figura 4.18 esempio di variazione dei gradienti con la profondità (Cell J, Michigan) (Yesiller & Hanson (2008)).

4.4 Simulazione numerica dell'onda termica

Come enunciato nei capitoli precedenti, prima di completare l'intero pacchetto di copertura superficiale della discarica, che necessita di un determinato grado di inclinazione per favorire il deflusso delle acque meteoriche, viene creata la cosiddetta copertura provvisoria. Questo modo di procedere viene utilizzato per minimizzare la necessità di intervento di riprofilamento della copertura in conseguenza ai localizzati cedimenti differenziali che possono verificarsi localmente a causa delle distribuzioni disomogenee della degradazione dei rifiuti e conseguente variazione del volume occupato.

Ci si chiede, quindi, cosa possa accadere allo strato impermeabile durante il periodo di esposizione all'aria (che si ricordi essere di almeno un anno). Altro quesito è il rispetto o meno della funzione di barriera impermeabile (da Decreto Legislativo: conducibilità idraulica pari a $k \leq 10^{-8}$ m/s) dopo un periodo di esposizione agli input termici.

Il primo passo per analizzare il comportamento e le variazioni delle proprietà dello strato impermeabile sollecitato sia dal calore endogeno generato dal corpo rifiuti, che dalle escursioni termiche dell'aria, è la stima della distribuzione delle temperature all'interno della barriera di copertura di una discarica ed in particolare all'interno dello strato impermeabile. Per questo è stato sviluppato un modello bidimensionale agli elementi finiti utilizzando il software di modellistica idrogeologica Feflow (Finite Element Flow).

4.4.1 Il codice di calcolo utilizzato

Quando viene richiesto di rappresentare il flusso dell'acqua in un corpo e si conoscono tutti i parametri del sistema, è possibile applicare le equazioni analitiche per descrivere i processi fisici che si verificano. Quando si ha un sistema complesso si ricorre ad un modello numerico capace di risolvere le equazioni matematiche per ottenere soluzioni in ogni punto del dominio di calcolo.

Per simulare l'andamento dell'onda termica all'interno della copertura provvisoria di una discarica è stato quindi necessario utilizzare un modello agli elementi finiti creato tramite il software Feflow 7.0 (Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media), sviluppato dalla DHI-WASY di Berlino. Feflow è nato alla fine degli anni Settanta soprattutto come software per la modellazione delle acque sotterranee. In seguito si è evoluto trovando applicazione in diversi campi, come il controllo dei siti inquinati, nelle industrie minerarie e nell'ambito geotermico (nella gestione dell'energia geotermica il software Feflow ha però delle limitazioni legate al fatto che non riesce a gestire un sistema a più fasi, nel quale cioè siano presenti contemporaneamente sia fase liquida che fase gassosa). Con un modello agli elementi finiti è possibile la realizzazione di una griglia di calcolo in continuo formata da elementi triangolari (o quadrangolari), che consente la descrizione di geometrie complesse. Con Feflow è possibile costruire delle mesh estremamente flessibili sia in 2D che in 3D con condizioni al contorno variabili nel tempo. All'aumentare del numero di nodi che costituiscono la maglia di calcolo, aumenta l'accuratezza della soluzione trovata, ma aumentano anche i tempi necessari per arrivare a soluzione.

Il codice di calcolo Feflow risolve in modo accoppiato problemi di trasporto di massa e di calore in un mezzo poroso. Se le condizioni variano nel tempo si parla di regime transitorio o transient, se invece sono costanti, si parla di regime permanente o steady-state.

4.4.1.1 Costruzione della mesh

La stesura di un modello 2D prevede innanzitutto la creazione di una supermesh (dominio di calcolo), formata in questo caso solo da elementi areali rappresentanti gli strati della copertura provvisoria. In seguito è stata creata una finite element mesh, che consiste in una rete, o maglia di calcolo, composta da un certo numero di elementi dalla geometria triangolare o quadrangolare. Ogni elemento finito sarà formato da un numero di nodi che dipenderà dalla sua geometria, per ognuno dei

quali Feflow calcolerà l'equazione di flusso. La generazione della mesh è un processo trial-and-error, che si basa cioè su una serie di tentativi ed errori. La scelta di una buona mesh consentirà di risparmiare tempo nelle fasi successive del processo di modellazione a causa del ridotto rischio di instabilità. Si è scelto di creare una mesh a elementi triangolari.

Sono stati eseguiti vari tentativi per la costruzione della supermesh variando il numero di poligoni componenti lo strato di ciascun materiale, altre aventi giacitura inclinata, altri sia piana che inclinata (da Figura 6.3 a Figura 6.6). Le mesh create inizialmente nei vari tentativi erano composte da un alto numero di elementi triangolari che richiedeva tempi di calcolo molto elevati. Inoltre la suddivisione di ogni strato in cinque/tre poligoni, facilita le operazioni di calcolo compiute dal software.

La configurazione finale adottata è costituita da una supermesh di lunghezza pari a 10000 mm e composta dal basso verso l'alto, da (Figura 4.19):

- tout-venant formato da 5 poligoni di spessore totale di circa 200 mm;
- geotessile tessuto formato da 3 poligoni spesso circa 6 mm;
- strato di drenaggio del biogas formato da 5 poligoni di spessore totale di circa 500 mm;
- geotessile nontessuto formato da 3 poligoni spesso circa 6 mm;
- strato impermeabile formato da 5 poligoni di spessore totale di circa 500 mm.

Si è ottenuta una griglia di calcolo composta da 429703 elementi e 216026 nodi, di cui in Figura 4.22 si è rappresentato un dettaglio. Il modello utilizzato è una proiezione verticale planare.

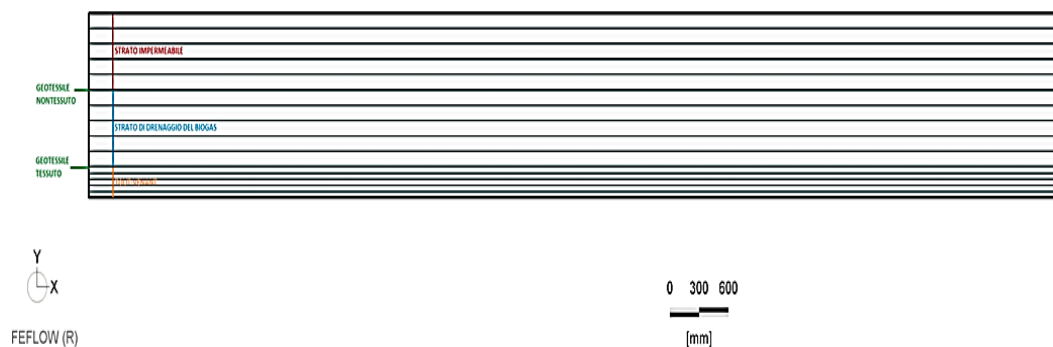


Figura 4.19 supermesh scelta.



Figura 4.20 particolare della supermesh scelta.



Figura 4.21 particolare dello spessore dei due geotessili, composti da tre poligoni.

Triangle	
Property	Value
Quality Mesh	<input checked="" type="checkbox"/> True
Minimum Angle	30.00
Forces Delaunay	<input checked="" type="checkbox"/> True
Fill Holes	<input checked="" type="checkbox"/> True
Delaunay Algorithms	Divide-and-conquer
Quiet Mode	<input checked="" type="checkbox"/> True
Steiner Points Insert...	Allow at all borders
Mesh Anisotropy	1.00
Refine Polygons	<input checked="" type="checkbox"/> True
Edge Refine Mode	ALL
Polygon Gradation	5
Polygon Target Size	0.02
Refine Lines	<input type="checkbox"/> False
Line Gradation	2
Line Target Size	0.20
Refine Points	<input type="checkbox"/> False
Point Gradation	2
Point Target Size	0.20
From Supermesh Elements	
Property	Value
Element name	Supermesh
Proposed elements	200000
Meshing density	1.00

Tabella 4.7 pannello di controllo per la creazione della mesh.

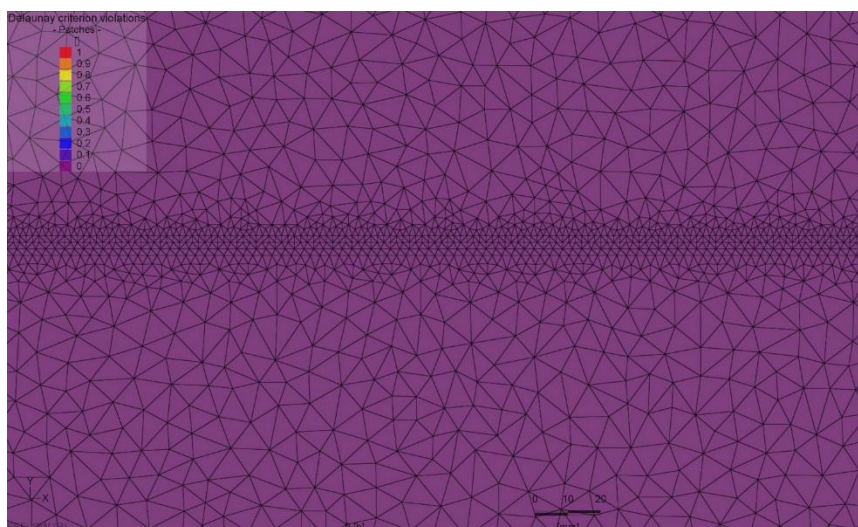


Figura 4.22 dettaglio della mesh di calcolo creata.

Sono stati ubicati all'interno dello strato impermeabile e dello strato di drenaggio del biogas dei punti di controllo (Observation Points) che consentono di “misurare” il carico idraulico e la temperatura di un certa area durante la simulazione (Figura 4.23, Figura 4.24, Tabella 4.8, Tabella 4.9).

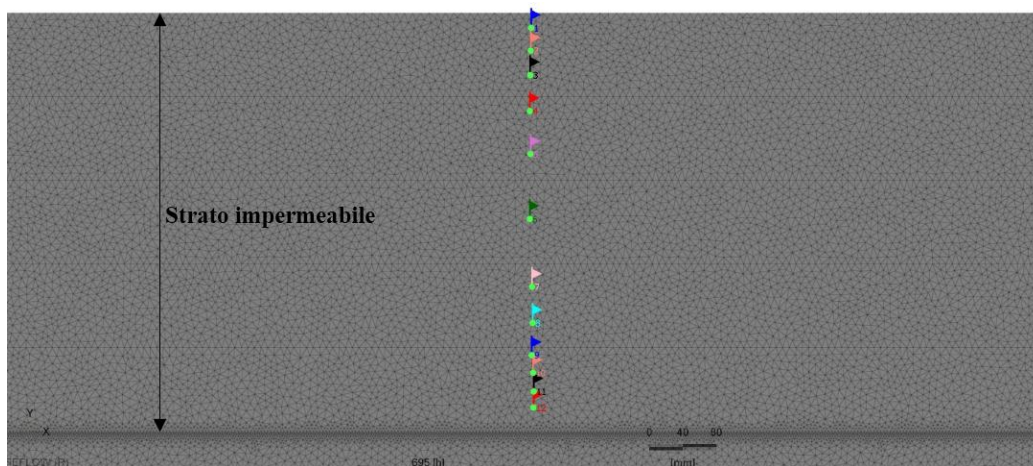


Figura 4.23 Observation Points nello strato impermeabile (dall'alto verso il basso: dall'1 al 12).

observation points - argilla	profondità dal tetto della discarica (mm)
1	18.0
2	46.0
3	74.0
4	117.6
5	171.6
6	246.3
7	327.3
8	370.3
9	409.0
10	432.3
11	448.4
12	473.8

Tabella 4.8 profondità (mm) dei punti di osservazione ubicati nello strato impermeabile.

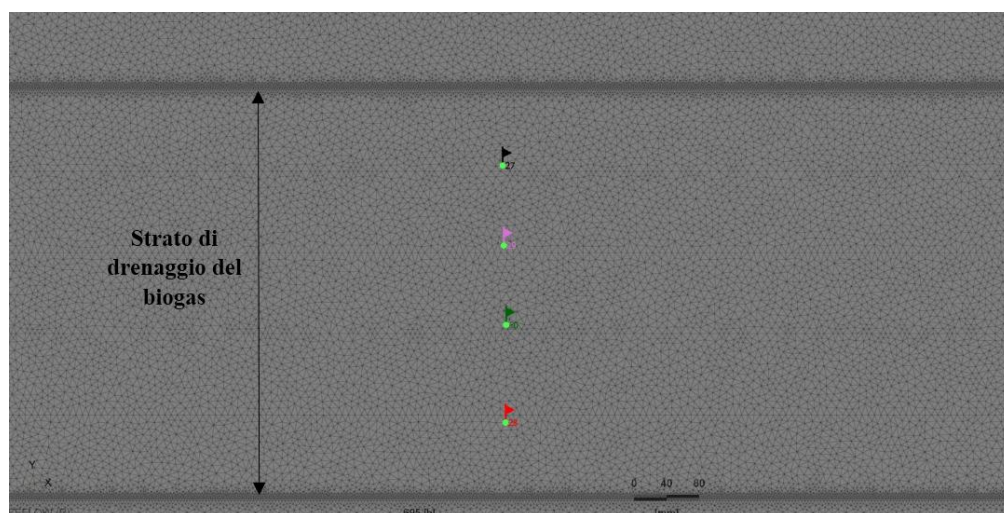


Figura 4.24 Observation Points nello strato di drenaggio del biogas.

observation point - ghiaia	profondità dal tetto della discarica (mm)
27	599.0
29	697.4
30	796.0
28	915.6

Tabella 4.9 profondità (mm) dei punti di osservazione ubicati nello strato di drenaggio del biogas.

4.4.1.2 Le condizioni iniziali

Si è scelto di condurre quattro simulazioni, nelle quali cambiano la temperatura imposta alla base della copertura provvisoria (temperatura dei rifiuti prodotta dalla loro biodegradazione) e la temperatura imposta in superficie (temperatura media dell'aria) (Tabella 4.10).

Nella prima e nella seconda simulazione è stata fissata una temperatura dell'aria pari a 1.2°C (temperatura media relativa al mese invernale di gennaio 2012, stazione di Castelnovo Bariano, dato Arpav). Nella terza e nella quarta simulazione è stata fissata una temperatura dell'aria pari a 25.77°C (temperatura media relativa al mese estivo di luglio 2012, stazione di Castelnovo Bariano, dato Arpav). Nella prima e nella terza simulazione è stata imposta una temperatura ai rifiuti di 30°C, mentre nelle altre due simulazioni si è deciso di imporre una temperatura massima estrema di 70°C. Nelle simulazioni condotte viene considerato il mezzo completamente saturo.

SIMULAZIONE 1	Temperature (°C)
aria (BC)	1.2°C
rifiuti (BC)	30°C
T media del sistema	15.6°C
SIMULAZIONE 2	Temperature (°C)
aria (BC)	1.2°C
rifiuti (BC)	70°C
T media del sistema	35.6°C
SIMULAZIONE 3	Temperature (°C)
aria (BC)	25.77°C
rifiuti (BC)	30°C
T media del sistema	27.9°C
SIMULAZIONE 4	Temperature (°C)
aria (BC)	25.77°C
rifiuti (BC)	70°C
T media del sistema	47.9°C

Tabella 4.10 condizioni iniziali di temperatura imposte alla copertura provvisoria.

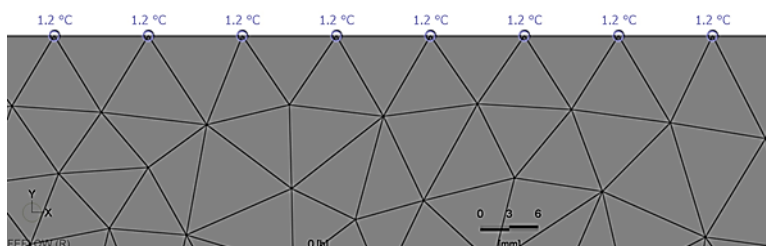


Figura 4.25 Temperature Boundary Conditions (BC) dell'aria pari a 1.2 °C (temperatura media del mese di febbraio 2012, dato Arpav). Le immagini rappresentano una piccola sezione del bordo superiore del modello.

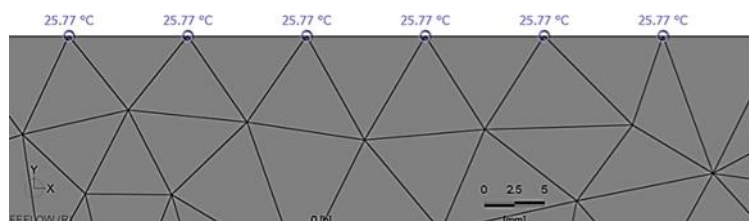


Figura 4.26 Temperature Boundary Conditions (BC) dell'aria pari a 25.77 °C (temperatura media del mese di luglio 2012, dato Arpav). Le immagini rappresentano una piccola sezione del bordo superiore del modello.

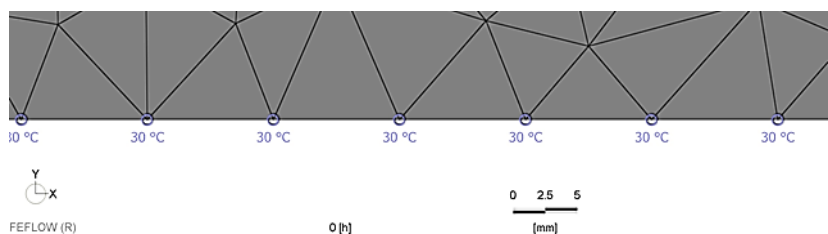


Figura 4.27 Temperature Boundary Conditions (BC) dei rifiuti pari a 30 °C. Le immagini rappresentano una piccola sezione del bordo inferiore del modello.

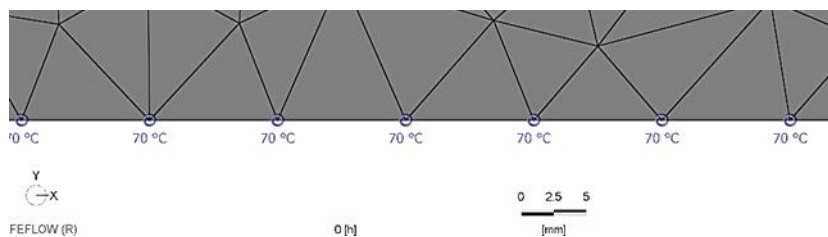


Figura 4.28 Temperature Boundary Conditions (BC) dei rifiuti pari a 70 °C. Le immagini rappresentano una piccola sezione del bordo inferiore del modello.

In tutte le quattro simulazioni è stato applicato un carico idraulico (mm) (Hydraulic-head BC) pari a 46000 mm nel bordo est e 45700 mm nel bordo ovest (in questo

modo viene considerato un gradiente pari a circa il 3%). Nonostante la supermesh abbia configurazione orizzontale, applicando un potenziale imposto con un gradiente del 3% viene simulato un flusso da destra verso sinistra.

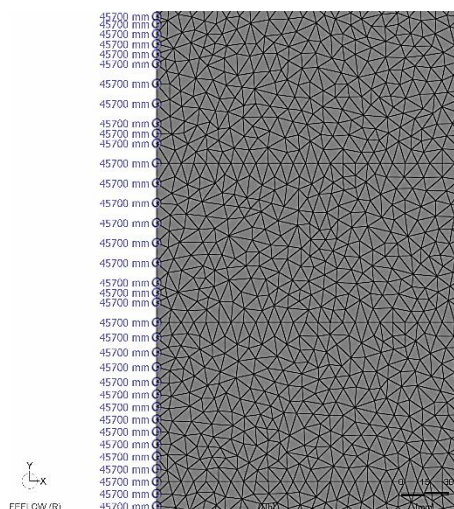


Figura 4.29 particolare del bordo ovest nel quale è applicato un Hydraulic Head Boundary Conditions (BC) pari a 45700 mm.

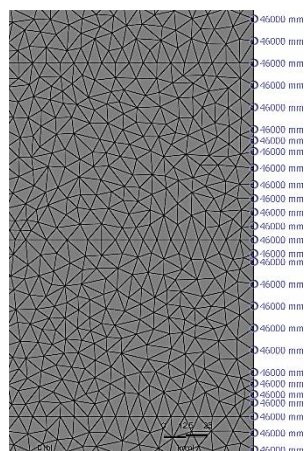


Figura 4.30 particolare del bordo est nel quale è applicato un Hydraulic Head Boundary Conditions (BC) pari a 46000 mm.

In ogni nodo della maglia di calcolo sono state fissate le temperature medie tra la temperatura dell'aria e quella dei rifiuti. Lo stesso vale per il carico idraulico, corrispondente alla media tra i due carichi idraulici fissati al bordo est e al bordo ovest.

4.4.1.3 Assegnazione dei valori dei parametri ai materiali della copertura

Dopo aver creato la griglia di calcolo e aver fissato le condizioni iniziali, è necessario indicare i valori dei parametri dei materiali degli strati (Tabella 4.11).

Per determinare i valori di alcuni parametri è stata necessaria una ricerca bibliografica o di normativa (conducibilità idraulica, porosità, conducibilità termica della fase fluida), altri sono stati ricavati dai valori di conducibilità termica misurati in laboratorio (conducibilità termica del materiale fine e del materiale ghiaioso e capacità termica volumetrica del materiale fine), per tutti gli altri parametri è stato utilizzato il valore di default proposto da Feflow (Tabella 4.12, Tabella 4.13, Tabella 4.14 e Tabella 4.15). Essendo i due geotessili (di spessore 6 mm ciascuno) poco influenti sulla distribuzione della temperatura all'interno della copertura provvisoria, a questi strati sono stati attribuiti dei valori dei parametri adeguati a favorire la convergenza della soluzione.

MATERIAL PROPERTIES

→ FLUID FLOW:

- Conductivity [m/s]
- Anisotropy of conductivity []
- Anisotropy angle [DEG]
- Source/sink [1/s]
- Expansion coefficient [$10^{-4}/K$]
- Specific storage (compressibility) [1/m]
- In-transfer rate fluid [1/s]
- Out-transfer rate fluid [1/s]

→ HEAT TRANSPORT:

- Porosity []
- Source/sink – fluid [W/m^3]
- Source/sink – solid [W/m^3]
- Volumetric heat capacity of fluid [$MJ/m^3/K$]
- Volumetric heat capacity of solid [$MJ/m^3/K$]
- Thermal conductivity of fluid [$J/m/s/K$]
- Thermal conductivity of fluid [$J/m/s/K$]
- Longitudinal dispersivity [mm]
- Transverse dispersivity [mm]
- In-transfer rate (heat) [$J/m^2/s/K$]
- Out-transfer rate (heat) [$J/m^2/s/K$]

Tabella 4.11 parametri di input con relative unità di misura del modello agli elementi finiti.

MATERIAL PROPERTIES	u.d.m.	STRATO IMPERMEABILE	GEOTESSILE NONTESSTUTO	STRATO DI DRENAGGIO DEL BIOGAS	GEOTESSILE TESSUTO	TOUT-VENANT
HYDRAULIC CONDUCTIVITY	m/s	1·10 ⁻⁸	2.5·10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁴	2.5·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁴
ANISOTROPY OF CONDUCTIVITY		1	1	1	1	1
ANISOTROPY ANGLE	DEG	0	0	0	0	0
SOURCE/SINK (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
EXPANSION COEFFICIENT	10 ⁻⁴ /K	0	0	0	0	0
SPECIFIC STORAGE (COMPRESSIBILITY)	1/m	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
IN-TRANSFER RATE (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
OUT-TRANSFER RATE (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
POROSITY		0.35	0.3	0.25	0.3	0.32
SOURCE/SINK (HEAT) - FLUID	W/m ²	0	0	0	0	0
SOURCE/SINK (HEAT) - SOLID	W/m ²	0	0	0	0	0
VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF FLUID PHASE	MJ/m ³ /K	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF SOLID PHASE	MJ/m ³ /K	0.86	2.52	2.52	2.52	2.52
THERMAL CONDUCTIVITY OF FLUID PHASE	J/m/s/K	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
THERMAL CONDUCTIVITY OF SOLID PHASE	J/m/s/K	1.09	1	1.99	1	1
LONGITUDINAL DISPERSIVITY	mm	5000	5000	5000	5000	5000
TRANSVERSE DISPERSIVITY	mm	500	500	500	500	500
IN-TRANSFER RATE (HEAT)	J/m ² /s/K	0	0	0	0	0
OUT-TRANSFER RATE (HEAT)	J/m ² /s/K	0	0	0	0	0

Tabella 4.12 parametri di caratterizzazione dei materiali degli strati (Simulazione 1).

MATERIAL PROPERTIES	u.d.m.	STRATO IMPERMEABILE	GEOTESSILE NONTESUTO	STRATO DI DRENAGGIO DEL BIOGAS	GEOTESSILE TESSUTO	TOUT-VENANT
HYDRAULIC CONDUCTIVITY	m/s	1-10 ⁻⁸	2.5-10 ⁻⁶	5-10 ⁻⁴	2.5-10 ⁻⁴	1-10 ⁻⁴
ANISOTROPY OF CONDUCTIVITY		1	1	1	1	1
ANISOTROPY ANGLE	DEG	0	0	0	0	0
SOURCE/SINK (FLUID)	1/S	0	0	0	0	0
EXPANSION COEFFICIENT	10 ⁻⁴ /K	0	0	0	0	0
SPECIFIC STORAGE (COMPRESSIBILITY)	1/m	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
IN-TRANSFER RATE (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
OUT-TRANSFER RATE (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
POROSITY		0.35	0.3	0.25	0.3	0.32
SOURCE/SINK (HEAT) - FLUID	W/m^2	0	0	0	0	0
SOURCE/SINK (HEAT) - SOLID	W/m^3	0	0	0	0	0
VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF FLUID PHASE	MJ/m^3/K	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF SOLID PHASE	MJ/m^3/K	0.95	2.52	2.52	2.52	2.52
THERMAL CONDUCTIVITY OF FLUID PHASE	J/m/s/K	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
THERMAL CONDUCTIVITY OF SOLID PHASE	J/m/s/K	1.17	1	2.25	1	1
LONGITUDINAL DISPERSIVITY	mm	5000	5000	5000	5000	5000
TRANSVERSE DISPERSIVITY	mm	500	500	500	500	500
IN-TRANSFER RATE (HEAT)	J/m^2/s/K	0	0	0	0	0
OUT-TRANSFER RATE (HEAT)	J/m^2/s/K	0	0	0	0	0

Tabella 4.13 parametri di caratterizzazione dei materiali degli strati (Simulazione 2).

MATERIAL PROPERTIES	u.d.m.	STRATO IMPERMEABILE	GEOTESSILE NONTCESSUTO	STRATO DI DRENAGGIO DEL BIOGAS	GEOTESSILE TESSUTO	TOUT-VENANT
HYDRAULIC CONDUCTIVITY	m/s	1·10 ⁻⁸	2.5·10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁴	2.5·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁴
ANISOTROPY OF CONDUCTIVITY		1	1	1	1	1
ANISOTROPY ANGLE	DEG	0	0	0	0	0
SOURCE/SINK (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
EXPANSION COEFFICIENT	10 ⁻⁴ /K	0	0	0	0	0
SPECIFIC STORAGE (COMPRESSIBILITY)	1/m	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
IN-TRANSFER RATE (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
OUT-TRANSFER RATE (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
POROSITY		0.35	0.3	0.25	0.3	0.32
SOURCE/SINK (HEAT) - FLUID	W/m ²	0	0	0	0	0
SOURCE/SINK (HEAT) - SOLID	W/m ³	0	0	0	0	0
VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF FLUID PHASE	W/m ³ /K	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF SOLID PHASE	MJ/m ³ /K	0.91	2.52	2.52	2.52	2.52
THERMAL CONDUCTIVITY OF FLUID PHASE	J/m/s/K	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
THERMAL CONDUCTIVITY OF SOLID PHASE	J/m/s/K	1.14	1	2.15	1	1
LONGITUDINAL DISPERSIVITY	mm	5000	5000	5000	5000	5000
TRANSVERSE DISPERSIVITY	mm	500	500	500	500	500
IN-TRANSFER RATE (HEAT)	J/m ² /s/K	0	0	0	0	0
OUT-TRANSFER RATE (HEAT)	J/m ² /s/K	0	0	0	0	0

Tabella 4.14 parametri di caratterizzazione dei materiali degli strati (Simulazione 3).

MATERIAL PROPERTIES	u.d.m.	STRATO IMPERMEABILE	GEOTESSILE NONTESSUTO	STRATO DI DRENAGGIO DEL BIOGAS	GEOTESSILE TESSUTO	TOUT-VENANT
HYDRAULIC CONDUCTIVITY	m/s	1·10 ⁻⁸	2.5·10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁴	2.5·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁴
ANISOTROPY OF CONDUCTIVITY		1	1	1	1	1
ANISOTROPY ANGLE	DEG	0	0	0	0	0
SOURCE/SINK (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
EXPANSION COEFFICIENT	10 ⁻⁴ /K	0	0	0	0	0
SPECIFIC STORAGE (COMPRESSIBILITY)	1/m	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
IN-TRANSFER RATE (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
OUT-TRANSFER RATE (FLUID)	1/s	0	0	0	0	0
POROSITY		0.35	0.3	0.25	0.3	0.32
SOURCE/SINK (HEAT) - FLUID	W/m²	0	0	0	0	0
SOURCE/SINK (HEAT) - SOLID	W/m³	0	0	0	0	0
VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF FLUID PHASE	MJ/m³/K	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF SOLID PHASE	MJ/m³/K	1.00	2.52	2.52	2.52	2.52
THERMAL CONDUCTIVITY OF FLUID PHASE	J/m/s/K	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
THERMAL CONDUCTIVITY OF SOLID PHASE	J/m/s/K	1.22	1	2.41	1	1
LONGITUDINAL DISPERSIVITY	mm	5000	5000	5000	5000	5000
TRANSVERSE DISPERSIVITY	mm	500	500	500	500	500
IN-TRANSFER RATE (HEAT)	J/m²/s/K	0	0	0	0	0
OUT-TRANSFER RATE (HEAT)	J/m²/s/K	0	0	0	0	0

Tabella 4.15 parametri di caratterizzazione dei materiali degli strati (Simulazione 4).

Come si osserva nelle quattro tabelle, gli unici parametri che si differenziano sono la conducibilità termica del materiale fine e del materiale a granulometria grossolana, e la capacità termica volumetrica del materiale fine. Questi due

parametri, essendo dipendenti della temperatura, sono stati ricavati in funzione della temperatura media presente in ognuna delle quattro simulazioni. Tali parametri (λ_{solid} e c_{solid}) sono stati ottenuti dai valori misurati tramite lo strumento ISOMET 2114 e lo strumento a piastra calda e anello di guardia.

I valori misurati dai due strumenti, di cui si è ampiamente discusso nei paragrafi precedenti (3.2.3 e 3.3.3) corrispondono alla conducibilità termica del materiale unito al contributo della conducibilità termica dell'acqua presente nella porosità del campione (λ_{bulk}), mentre Feflow richiede l'inserimento del valore di λ_{solid} relativo alla sola fase solida, ottenibile dalla seguente equazione:

Equazione 9

$$\lambda_{bulk} = \lambda_{solid} \cdot (1 - n) + (\lambda_{fluid} \cdot n)$$

Da cui si ricava:

Equazione 10

$$\lambda_{solid} = \frac{\lambda_{bulk} - (\lambda_{fluid} \cdot n)}{(1 - n)}$$

dove λ_{bulk} è la conducibilità termica misurata dallo strumento (W/mK), λ_{fluid} è la conducibilità termica dell'acqua (W/mK) e n la porosità del campione.

I valori di λ_{fluid} riportati in Tabella 4.16 sono stati ricavati dall'Equazione 1.

T (°C)	lambda (W/mK)
0	0.57
10	0.59
20	0.61
30	0.62
40	0.64
50	0.66
60	0.68
70	0.70
80	0.71
90	0.73
100	0.75
110	0.77
120	0.78

Tabella 4.16 conducibilità termica dell'acqua (W/mK).

▪ Conducibilità termica del materiale coesivo

Si è deciso di prendere come riferimento i valori di conducibilità termica ($\lambda_{bulk\ misurata}$) del materiale contenuto nel barattolo A misurati a 2°, 10°, 20°, 21°, 30°, 40°, 50°C, tra i quali è stata fatta un interpolazione lineare (Figura 4.31) ricavando l'equazione della retta: $\lambda_{bulk\ misurata} = 0.0034 \cdot T + 0.8629$. Da codesta equazione sono stati ricavati i valori effettivi di λ_{bulk} a 10°, 20°, 30°, 40°, 50°C (Tabella 4.18).

T (°C)	lambda bulk misurato (W/mK)
21	0.92
2	0.83
40	0.94
20	0.90
2	0.89
40	1.04
20	0.91
50	1.05
30	0.98
10	0.96

Tabella 4.17 conducibilità termica del materiale contenuto nel barattolo A misurata con lo strumento ISOMET 2114 durante i primi tre cicli non congelati.

T (°C)	lambda bulk (W/mK)
10	0.90
20	0.93
30	0.96
40	1.00
50	1.03

Tabella 4.18 λ_{bulk} del materiale ricavati dall'equazione $\lambda_{bulk\ misurata} = 0.0034 \cdot T + 0.8629$.

Applicando l'Equazione 10 sono stati ricavati i valori di λ_{solid} riportati in Tabella 4.20, utilizzando un valore di porosità pari a 0.35 ricavato da letteratura e i valori di λ_{fluid} riportati in Tabella 4.19 ottenuti dall'Equazione 1. In seguito dai valori di conducibilità termica propria del solido è stata ricavata l'equazione $\lambda_{solid} = 0.0041 \cdot T + 1.023$ (retta grigia in Figura 4.31).

T (°C)	lambda fluid /W/mK)
10	0.59
20	0.61
30	0.62
40	0.64
50	0.66

Tabella 4.19 conducibilità termica dell'acqua ricavata dall'Equazione 1.

T (°C)	lambda solid (W/mK)
10	1.07
20	1.10
30	1.14
40	1.19
50	1.23

Tabella 4.20 λ_{solid} del materiale ricavati dall'Equazione 10.

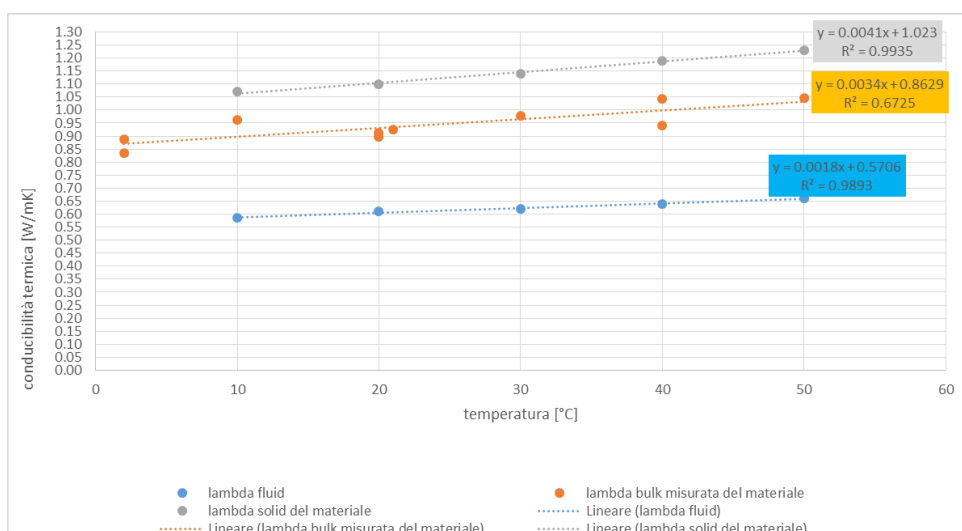


Figura 4.31 grafico rappresentante i valori di λ_{fluid} (azzurro) ricavati dall'Equazione 1; λ_{bulk} (arancio) misurati dallo strumento; λ_{solid} (grigio) ricavati dalle due rette di interpolazione lineare.

Dal momento che Feflow, senza un apposito plug-in (IFM Plug-in HeatConductivity), non consente di applicare al sistema un valore di conducibilità termica dipendente dalla variazione di temperatura, si è deciso di utilizzare l'equazione $\lambda_{solid} = 0.0041 \cdot T + 1.023$ per ricavare la conducibilità termica in funzione della temperatura media del sistema presente in ciascuna simulazione:

Simulazione 1

$$\lambda_{solid \text{ a } 15.6^{\circ}C} = 0.0041 \cdot (15.6^{\circ}C) + 1.023 = 1.09 \text{ W/mK}$$

Simulazione 2

$$\lambda_{solid \text{ a } 35.6^{\circ}C} = 0.0041 \cdot (35.6^{\circ}C) + 1.023 = 1.17 \text{ W/mK}$$

Simulazione 3

$$\lambda_{solid \text{ a } 27.9^{\circ}C} = 0.0041 \cdot (27.9^{\circ}C) + 1.023 = 1.14 \text{ W/mK}$$

Simulazione 4

$$\lambda_{solid \text{ a } 47.9^{\circ}C} = 0.0041 \cdot (47.9^{\circ}C) + 1.023 = 1.22 \text{ W/mK}$$

simulazione	T media (°C)	λ solid (W/mK)
1	15.6	1.09
2	35.6	1.17
3	27.9	1.14
4	47.9	1.22

Tabella 4.21 valori di λ_{solid} del materiale fine in funzione della temperatura media.

- Capacità termica volumetrica della fase solida del materiale coesivo

T (°C)	capacità termica volumetrica misurata (MJ/m ³ /K)
21	2.03
2	1.97
40	2.07
20	2.07
2	2.01
40	2.14
20	2.05
50	2.13
30	2.05
10	1.99

Tabella 4.22 conducibilità termica volumetrica del materiale contenuto nel barattolo A misurata con lo strumento ISOMET 2114 durante i primi tre cicli non congelati.

Lo stesso procedimento è stato attuato per ricavare la conducibilità termica volumetrica del materiale fine (MJ/m³/K). Nelle prove di laboratorio, già

ampiamente presentate nel sottoparagrafo 3.2.3 e delle quali sono riportati i valori in allegato in Tabella 6.2 e in Tabella 6.3, lo strumento ISOMET 2114 consentiva la misurazione anche della capacità termica volumetrica dei due campioni (in Tabella 4.22 vengono presentati i valori di conducibilità termica c_{bulk} relativi al barattolo A). Mediante un'interpolazione lineare è stata ricavata l'equazione della retta dalla quale si sono calcolati i valori di c_{solid} e in seguito i valori corrispondenti alle temperature di 15.6°, 35.6°, 27.9° e 47.9°C (temperature medie presenti nelle quattro simulazioni):

simulazione	T media (°C)	capacità termica vol. solid (MJ/m ³ /K)
1	15.6	0.86
2	35.6	0.95
3	27.9	0.91
4	47.9	1.00

Tabella 4.23 capacità termica volumetrica (c_{solid}) del materiale fine in funzione della temperatura media.

- Conducibilità termica del materiale inerte

Dai valori di conducibilità termica misurati nella terza prova in condizioni sature dallo strumento a piastra calda e anello di guardia ($\lambda_{bulk\ misurato}$, Tabella 4.24) si è ricavata la retta di interpolazione $\lambda_{bulk\ misurata} = 0.0101 \cdot T + 1.4893$ (Figura 4.32). In seguito sono stati ricavati i valori effettivi di λ_{bulk} a 10°, 20°, 30°C (Tabella 4.25).

T (°C)	lambda bulk misurato (W/mK)
0	1.50
10.0	1.58
20.0	1.68
30.0	1.80

Tabella 4.24 conducibilità termica del materiale inerte ghiaioso misurata dallo strumento a piastra calda e anello di guardia durante la terza prova in condizioni sature.

T (°C)	lambda bulk (W/mK)
10	1.59
20	1.69
30	1.79

Tabella 4.25 λ_{bulk} del materiale ricavati dall'equazione $\lambda_{bulk\ misurata} = 0.0101 \cdot T + 1.4893$.

Applicando l'Equazione 10 sono stati ottenuti i valori di λ_{solid} riportati in Tabella 4.27, utilizzando un valore di porosità pari a 0.25 ricavato da letteratura, e i valori di λ_{fluid} riportati in Tabella 4.26 ottenuti dall'Equazione 1. In seguito dai valori di conducibilità termica propria del solido è stata ricavata l'equazione $\lambda_{solid} = 0.013 \cdot T + 1.79$ (retta verde in Figura 4.32).

T (°C)	lambda fluid (W/mK)
10	0.59
20	0.61
30	0.62
40	0.64
50	0.66

Tabella 4.26 conducibilità termica dell'acqua ricavata dall'Equazione 1.

T (°C)	lambda solid (W/mK)
10	1.92
20	2.05
30	2.18

Tabella 4.27 λ_{solid} del materiale ricavati dall'Equazione 10.

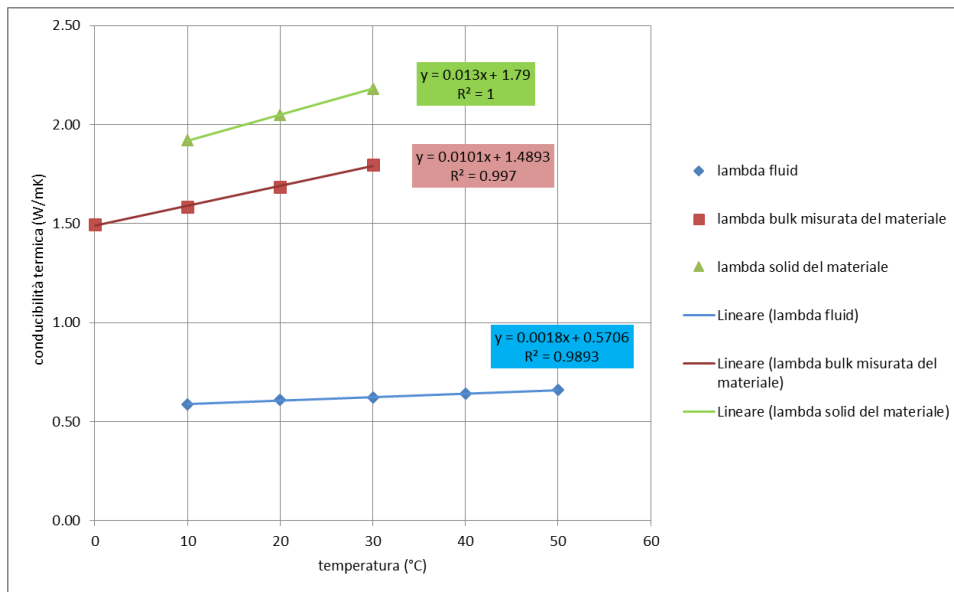


Figura 4.32 grafico rappresentante i valori di λ_{fluid} (azzurro) ricavati dall'Equazione 1; λ_{bulk} (arancio) misurati dallo strumento; λ_{solid} (grigio) ricavati dalle due rette di interpolazione lineare tra i valori di λ_{fluid} e λ_{bulk} .

Dal momento che Feflow, senza un apposito plug-in (IFM Plug-in HeatConductivity), non consente di applicare al sistema un valore di conducibilità termica dipendente dalla variazione di temperatura, si è deciso di utilizzare l'equazione $\lambda_{solid} = 0.013 \cdot T + 1.79$ per ricavare la conducibilità termica in funzione della temperatura media del sistema presente in ciascuna simulazione:

Simulazione 1

$$\lambda_{solid} \text{ a } 15.6^{\circ}\text{C} = 0.013 \cdot (15.6^{\circ}\text{C}) + 1.79 = 1.99 \text{ W/mK}$$

Simulazione 2

$$\lambda_{solid} \text{ a } 35.6^{\circ}\text{C} = 0.013 \cdot (35.6^{\circ}\text{C}) + 1.79 = 2.25 \text{ W/mK}$$

Simulazione 3

$$\lambda_{solid} \text{ a } 27.9^{\circ}\text{C} = 0.013 \cdot (27.9^{\circ}\text{C}) + 1.79 = 2.15 \text{ W/mK}$$

Simulazione 4

$$\lambda_{solid} \text{ a } 47.9^{\circ}\text{C} = 0.013 \cdot (47.9^{\circ}\text{C}) + 1.79 = 2.41 \text{ W/mK}$$

simulazione	T media (°C)	λ solid (W/mK)
1	15.6	1.99
2	35.6	2.25
3	27.9	2.15
4	47.9	2.41

Tabella 4.28 valori di λ_{solid} del materiale a granulometria grossolana in funzione della temperatura media.

- Conducibilità termica dei geotessili

Prima di poter applicare l'Equazione 10 è necessario ricavare la porosità dei due geotessili. Questo valore però non è mai presente nelle schede tecniche dei geotessuti, in quanto è un parametro non obbligatorio ai fini della marcatura CE, e per questo non viene mai misurata dalle ditte fabbricatrici. In ogni caso, la porosità n è un dato facilmente ricavabile applicando le seguenti relazioni:

$$n = \frac{V_v}{V_{tot}}$$

dove V_v corrisponde al volume dei vuoti e V_{tot} al volume totale. È possibile esprimere il valore di porosità anche come:

$$n = 1 - \frac{V_s}{V_{tot}}$$

dove V_s corrisponde al volume del materiale solido. Ne consegue che:

$$n = 1 - \frac{\rho_s V_s}{\rho_s V_{tot}}$$

dove ρ_s rappresenta la massa specifica del materiale solido.

Considerando l'unità di area di superficie, la porosità corrisponde a:

Equazione 11

$$n = 1 - \frac{\mu}{\rho_s T_g}$$

nella quale μ è la massa per unità di area di superficie (massa areica), ρ_s è la massa specifica del materiale di cui sono costituite le fibre del geotessile (nel caso in esame

in polipropilene), T_g è lo spessore del geotessile. Applicando quindi l'Equazione 11 si ottiene un valore di porosità pari a:

$$n = 1 - \frac{0.031 \frac{g}{cm^2}}{0.9 \frac{g}{cm^3} \cdot 0.27 cm} = 0,87 \text{ (87\%)} \text{ per il geotessile tessuto;}$$

$$n = 1 - \frac{0.03 \frac{g}{cm^2}}{0.9 \frac{g}{cm^3} \cdot 0.27 cm} = 0,88 \text{ (88\%)} \text{ per il geotessile nontessuto.}$$

Avendo ottenuto un valore di porosità così alto, applicando l'Equazione 10 si ricava un valore di conducibilità termica negativo e per questo non accettabile. Di conseguenza si è deciso inizialmente di applicare il valore di conducibilità termica propria del polipropilene, materiale di cui sono costituite le fibre dei due geotessili, pari a 0.21 W/mK. I primi tentativi di simulazione hanno però mostrato dei problemi di convergenza dovuti alla forte eterogeneità tra i valori di conducibilità termica imposti ai vari strati. Avendo i geotessuti uno spessore pari a 6 mm cadauno, il loro contributo al sistema può essere considerato irrisorio e per questo si è deciso di imporre un valore di conducibilità termica ai geotessuti che più approssimasse i valori di conducibilità termica degli altri strati. Scegliendo infatti un valore pari a 1 W/mK si è minimizzata la differenza tra tali valori. La stessa considerazione è stata fatta per la scelta sia del valore di capacità termica volumetrica (2.52 MJ/m³/K), sia del carico idraulico ($2.5 \cdot 10^{-6}$ m/s per il geotessile nontessuto e $2.5 \cdot 10^{-4}$ m/s per il geotessile tessuto), sia per la porosità (0.3), in modo da ridurre al minimo la differenza tra tali dati e i corrispettivi valori degli altri strati limitrofi ai geotessili.

4.4.1.4 Simulazioni in condizioni Steady-State

Le condizioni iniziali di temperatura sono note solo alla base (temperatura dei rifiuti originata dalla loro biodegradazione) e in superficie (temperatura dell'aria). Per distribuire le condizioni iniziali a tutti i nodi della mesh, sono state svolte le quattro simulazioni in condizioni steady-state.

Nelle quattro simulazioni si ottiene una distribuzione del carico idraulico come quello rappresentato in Figura 4.33 al tempo $t=0$ h e come quello di Figura 4.34 al tempo $t=420$ h.

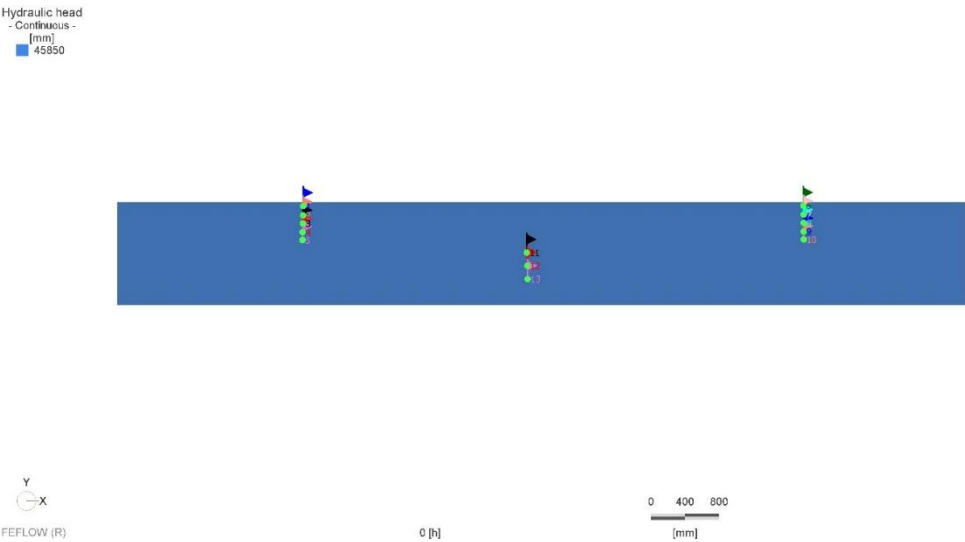


Figura 4.33 carico idraulico nel pacchetto di copertura provvisoria al tempo $t=0$ ore.

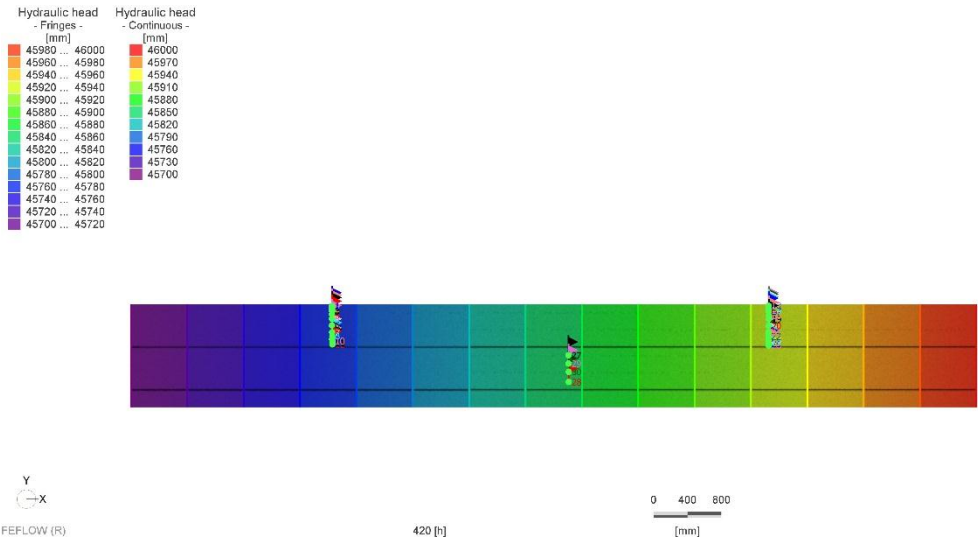


Figura 4.34 trend della carico idraulico nel pacchetto di copertura provvisoria al tempo $t=420$ ore.

Simulazione 1

Temperature
- Continuous -
[°C]
■ 15.6

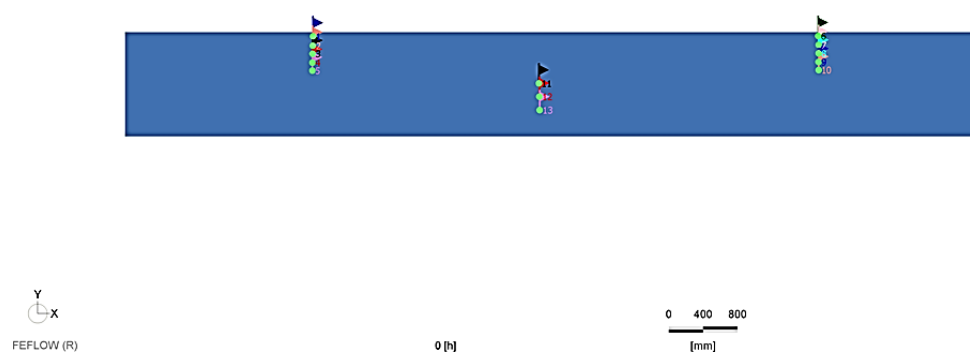


Figura 4.35 valori di temperatura nel pacchetto di copertura provvisoria al tempo $t=0$ (simulazione 1).

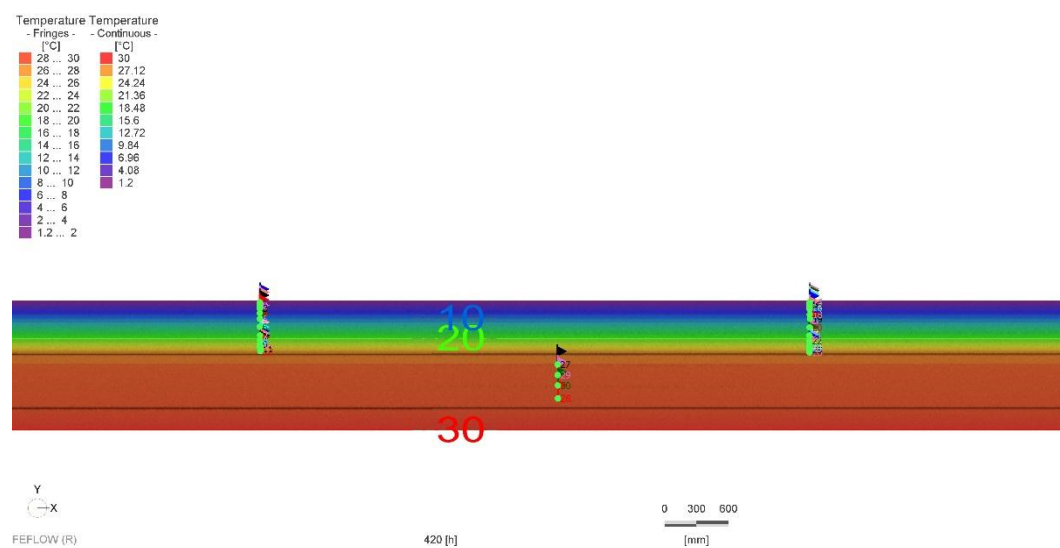


Figura 4.36 trend della temperatura nel pacchetto di copertura provvisoria al tempo $t=420$ ore (simulazione 1).

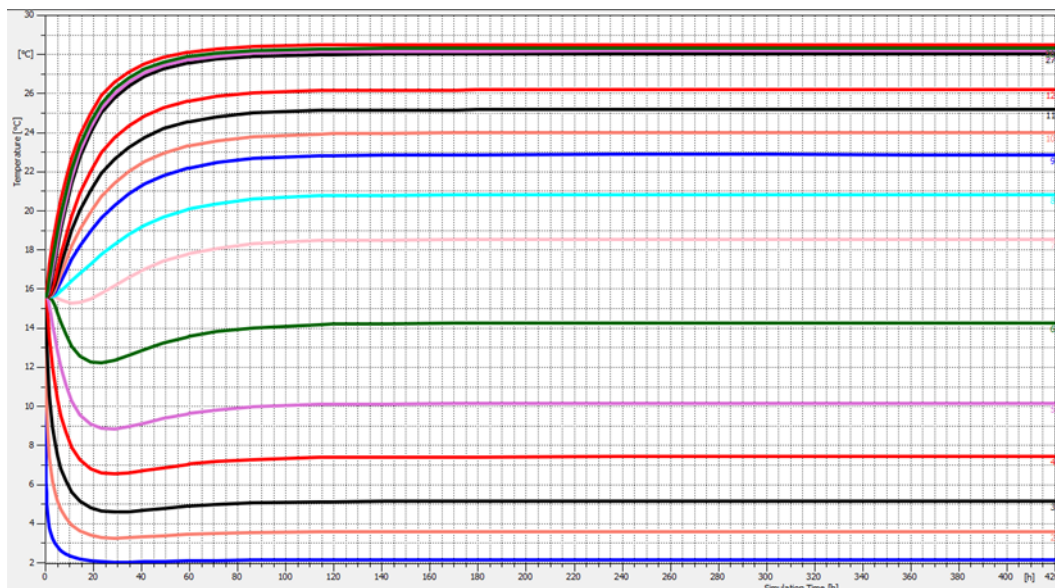


Figura 4.37 grafico temperatura-tempo (simulazione 1).

Al tempo $t=0$ la temperatura del sistema corrisponde a quella imposta di 15.6°C (Figura 4.35). Come si osserva nel grafico riportato in Figura 4.37 la temperatura raggiunge una condizione di stabilità attorno alle 120 ore.

Simulazione 2

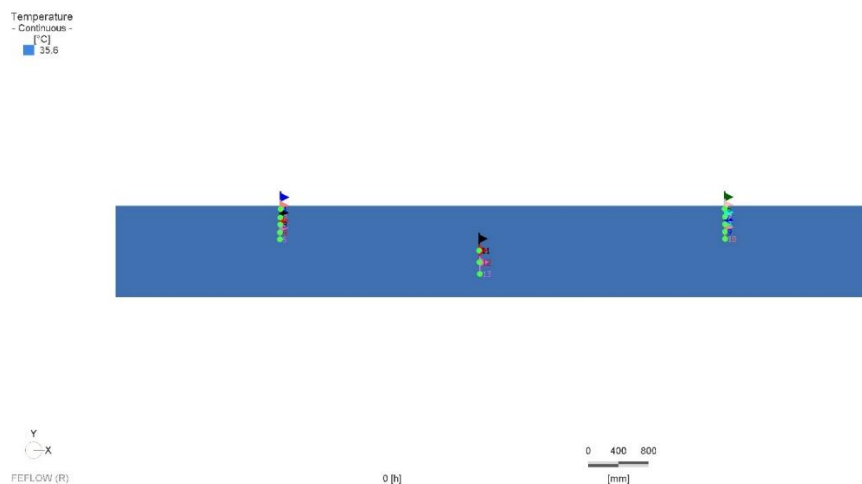


Figura 4.38 valori di temperatura nel pacchetto di copertura provvisoria al tempo $t=0$ (simulazione 2).

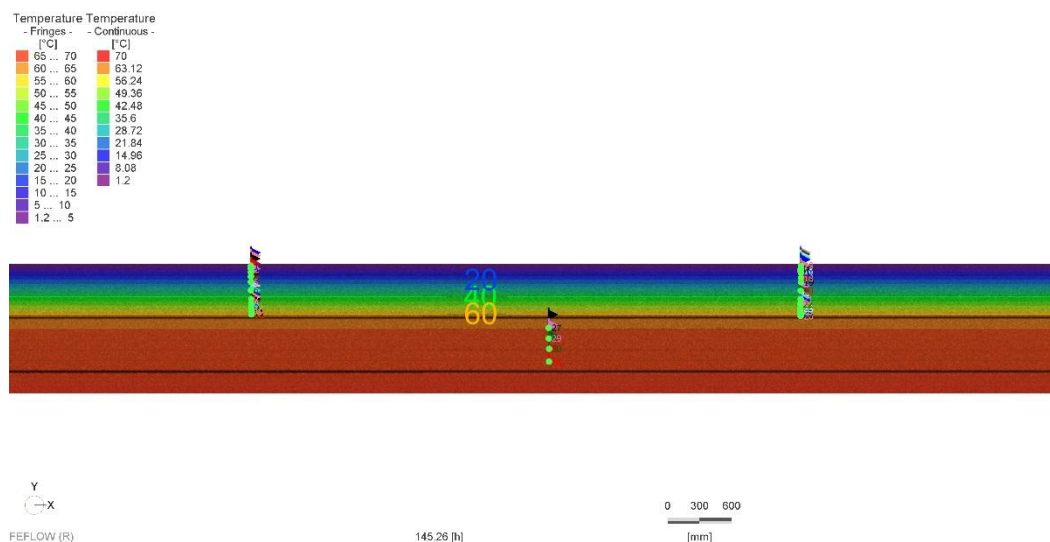


Figura 4.39 trend della temperatura nel pacchetto di copertura provvisoria al tempo $t=145$ ore (simulazione 2).

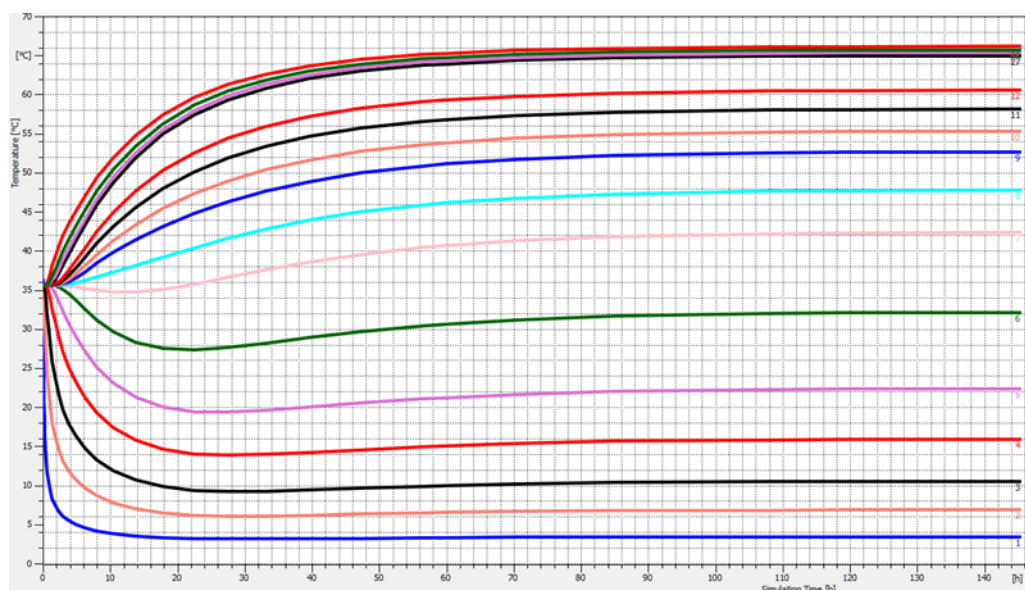


Figura 4.40 grafico temperatura-tempo (simulazione 2).

Al tempo $t=0$ la temperatura del sistema corrisponde a quella imposta di 35.6°C (Figura 4.38). Anche in questo caso la temperatura raggiunge una condizione di stabilità attorno alle 120 ore (grafico in Figura 4.40).

Simulazione 3

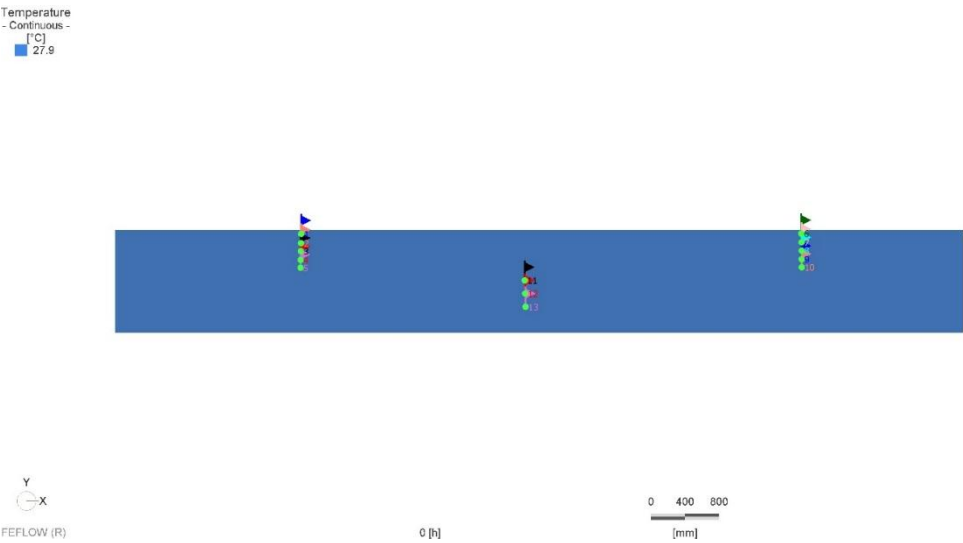


Figura 4.41 valori di temperatura nel pacchetto di copertura provvisoria al tempo $t=0$ (simulazione 3).

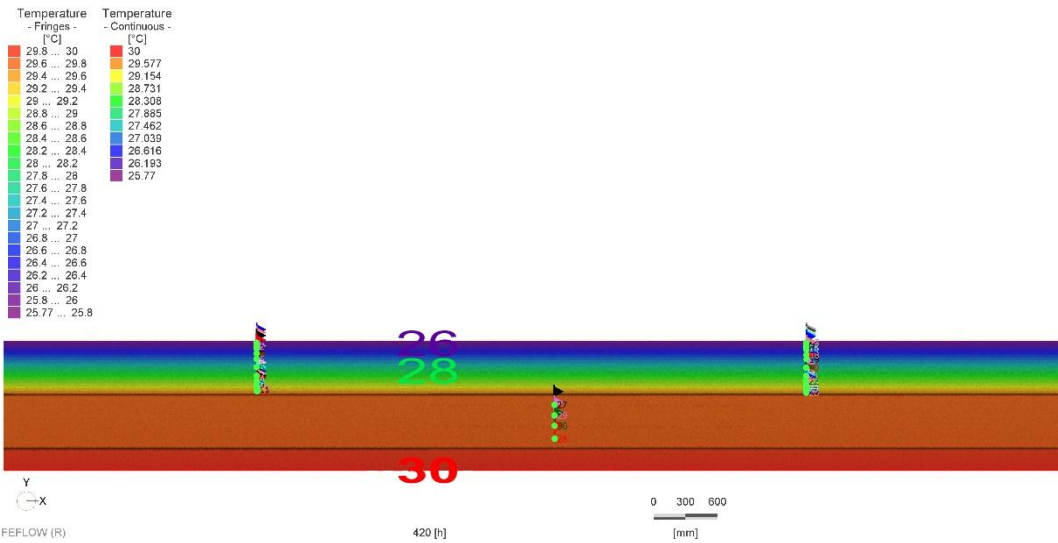


Figura 4.42 trend della temperatura nel pacchetto di copertura provvisoria al tempo $t=420$ ore (simulazione 3).

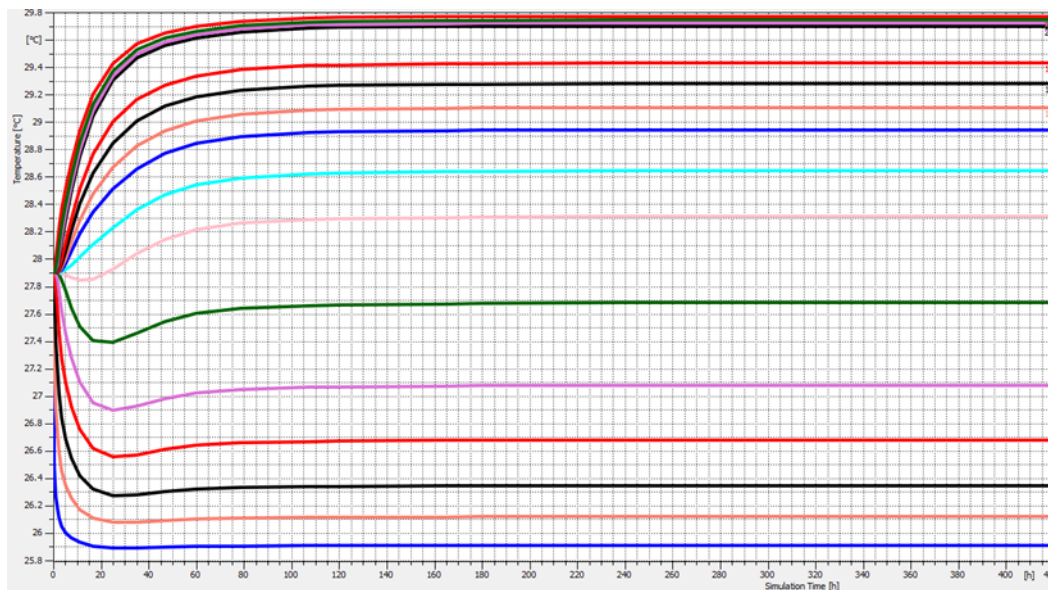


Figura 4.43 grafico temperatura-tempo (simulazione 3).

Al tempo $t=0$ la temperatura del sistema corrisponde a quella imposta di 27.9°C (Figura 4.41). In questo caso la temperatura raggiunge una condizione di stabilità attorno alle 180 ore (grafico in Figura 4.43).

Simulazione 4

Temperature
- Continuous -
[°C]
■ 47.9

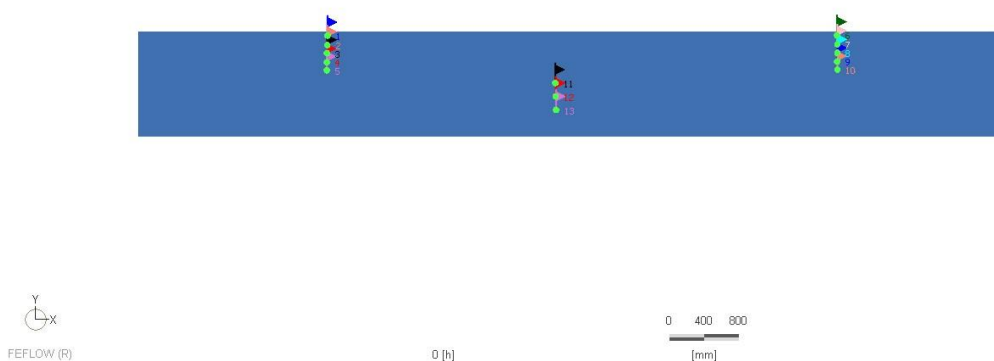


Figura 4.44 valori di temperatura nel pacchetto di copertura provvisoria al tempo $t=0$ (simulazione 4).

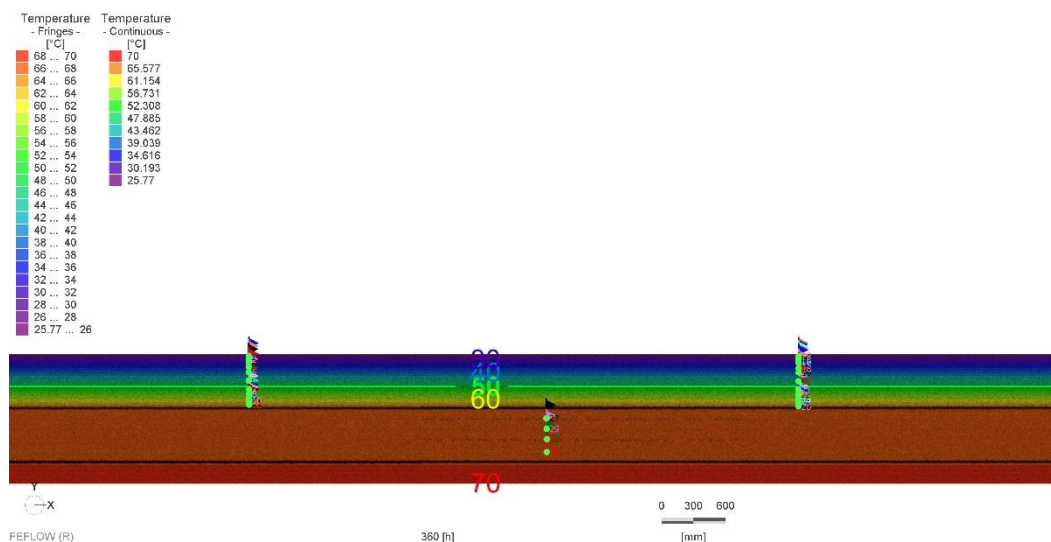


Figura 4.45 trend della temperatura nel pacchetto di copertura provvisoria al tempo $t=360$ ore (simulazione 4).

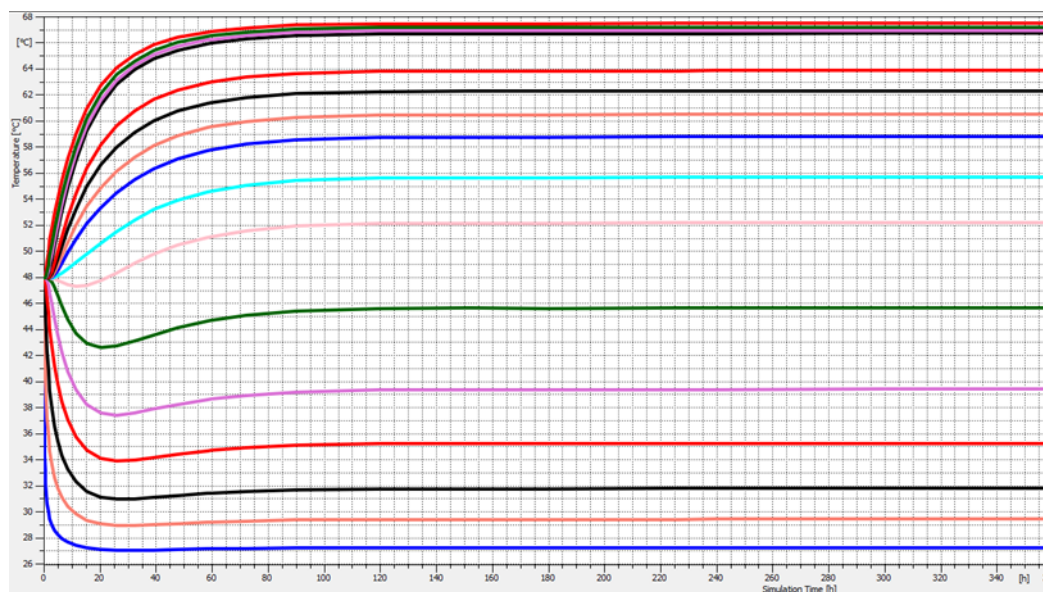


Figura 4.46 grafico temperatura-tempo (simulazione 4).

Al tempo $t=0$ la temperatura del sistema corrisponde a quella imposta di 47.9°C (Figura 4.31). La temperatura raggiunge una condizione di stabilità attorno alle 120 ore (grafico in Figura 4.46).

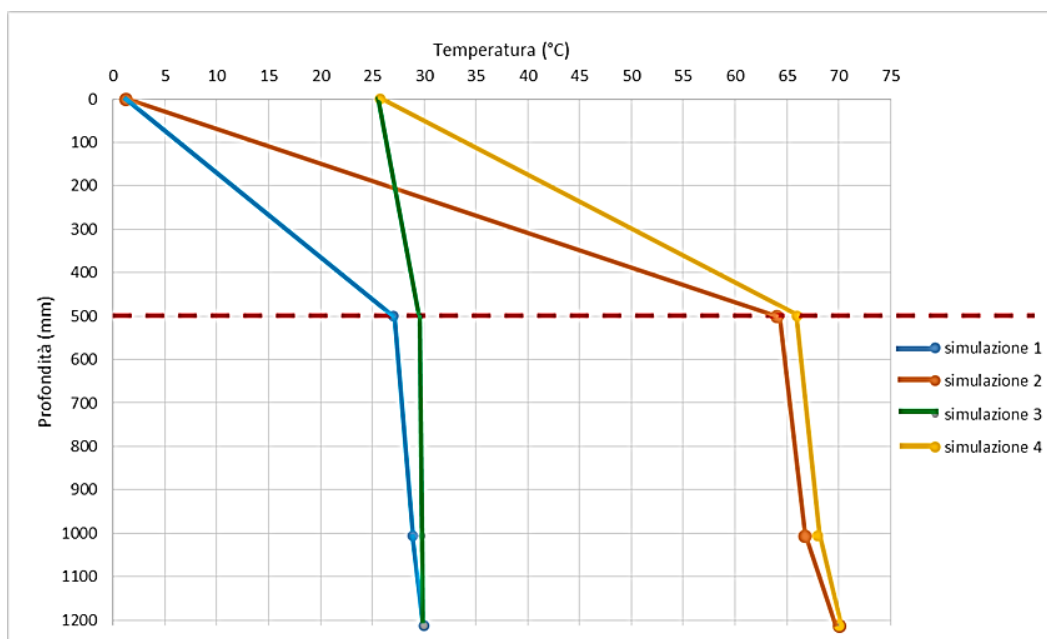


Figura 4.47 grafico profondità-temperatura: andamento lineare della temperatura in funzione della profondità. Con la freccia rossa è indicato lo spessore dello strato impermeabile.

Nel grafico profondità-temperatura di Figura 4.47 è raffigurato il gradiente di temperatura che si sviluppa nella copertura provvisoria durante le quattro simulazioni. Lo spessore dello strato impermeabile è rappresentato dalla linea tratteggiata rossa posta a 500 mm di profondità. Il gradiente termico presente nello strato impermeabile è maggiore rispetto al gradiente termico dei sottostanti strati di materiale inerte.

4.4.1.5 Attribuzione dei nuovi parametri termici in dipendenza dalla temperatura

Le simulazioni condotte in condizioni steady-state permettono di determinare la distribuzione delle temperature all'interno dello strato impermeabile e nei sottostanti strati, in funzione delle quali è necessario ricavare i nuovi valori di λ_{solid} e c_{solid} (Tabella 4.29, Tabella 4.30 e Tabella 4.31).

simulazione	T media strato impermeabile (°C)	λ solid (W/mK)
1	14.1	1.08
2	32.6	1.16
3	27.7	1.14
4	45.9	1.21

Tabella 4.29 valori di λ_{solid} del materiale a granulometria fine in funzione della temperatura media ottenuta con la simulazione in condizioni steady-state.

simulazione	T media strato impermeabile (°C)	capacità termica vol. solid (MJ/m ³ /K)
1	14.1	0.85
2	32.6	0.94
3	27.7	0.91
4	45.9	1.00

Tabella 4.30 capacità termica volumetrica (c_{solid}) del materiale fine in funzione della temperatura media ottenuta con la simulazione in condizioni steady-state.

simulazione	T media strato drenaggio (°C)	λ solid (W/mK)
1	28	2.15
2	65.4	2.64
3	29.7	2.18
4	67	2.66

Tabella 4.31 valori di λ_{solid} del materiale a granulometria grossolana in funzione della temperatura media ottenuta con la simulazione in condizioni steady-state.

4.4.1.6 Condizioni al contorno

Durante la simulazione 1 e 2 la copertura provvisoria risente delle fluttuazioni delle temperature orarie del mese più freddo (febbraio 2012, dati Arpav stazione di Castelnovo Bariano, VR), mentre nella simulazione 3 e nella simulazione 4 il pacchetto di copertura risente delle temperature relative al mese più caldo (agosto 2012, dati Arpav stazione di Castelnovo Bariano, VR). Le temperature vengono imposte al bordo superiore del pacchetto, inteso come l'aria, con passo di quattro

ore, per un totale di 695 ore (175 step) nelle prime due simulazioni e 742 ore (185 step) nelle ultime due simulazioni.

4.4.1.7 Risultati ottenuti

Una volta fissate le condizioni al contorno e le condizioni iniziali e assegnati i vari parametri agli strati, sono state eseguite le quattro simulazioni di cui si riportano i risultati nelle immagini seguenti. Nello specifico vengono rappresentate:

- la configurazione al tempo $t=4$ ore (primo step);
- la configurazione in corrispondenza della temperatura oraria più bassa, vale a dire -10.6°C (step 128) per le prime due simulazioni e la configurazione in corrispondenza della temperatura oraria più alta ovvero 39.2°C (step 520) per le ultime due simulazioni, in modo da osservare a che profondità si spinge l'isoterma minima e l'isoterma massima;
- la configurazione all'ultimo step di temperatura, ossia dopo 695 ore (step 175) per le prime due simulazioni e dopo 742 ore (step 185) per le ultime due simulazioni.

Simulazione 1

Si ricorda che è stata imposta una temperatura al bordo superiore (aria) pari a 1.2°C (media mensile del mese di gennaio 2012) e temperatura al bordo inferiore (rifiuti) pari a 30°C . Lo strato risente delle temperature orarie del mese di febbraio 2012 (Tabella 6.10 e Figura 4.12).

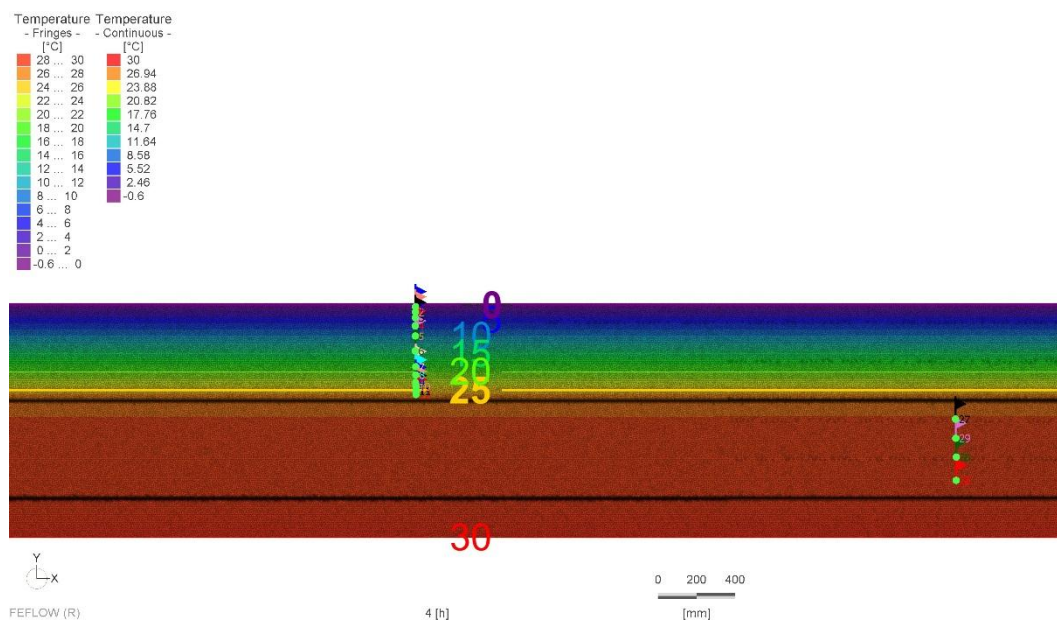


Figura 4.48 Simulazione 1 a $t=4$ ore.

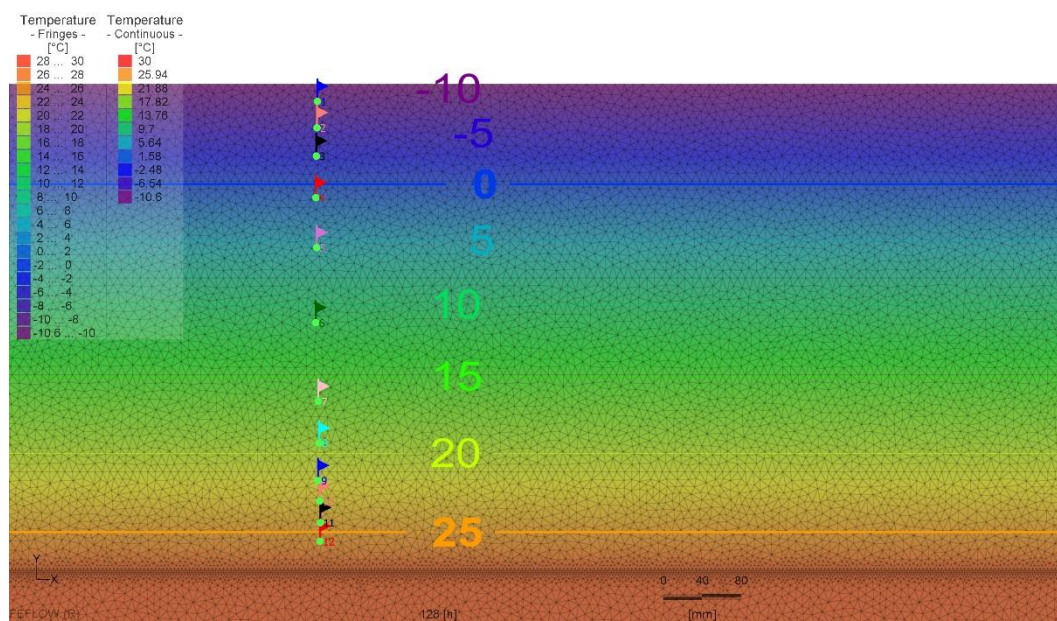


Figura 4.49 Simulazione 1 a $t=128$ ore (in cui si ha la temperatura minima dell'aria pari a -10.6°C).

Simulazione 2

Si ricorda che è stata imposta una temperatura al bordo superiore (aria) pari a 1.2°C (media mensile del mese di gennaio 2012) e temperatura al bordo inferiore (rifiuti) pari a 70°C (caso estremo limite). Lo strato risente delle temperature orarie del mese di febbraio 2012 (Tabella 6.10 e Figura 4.12).

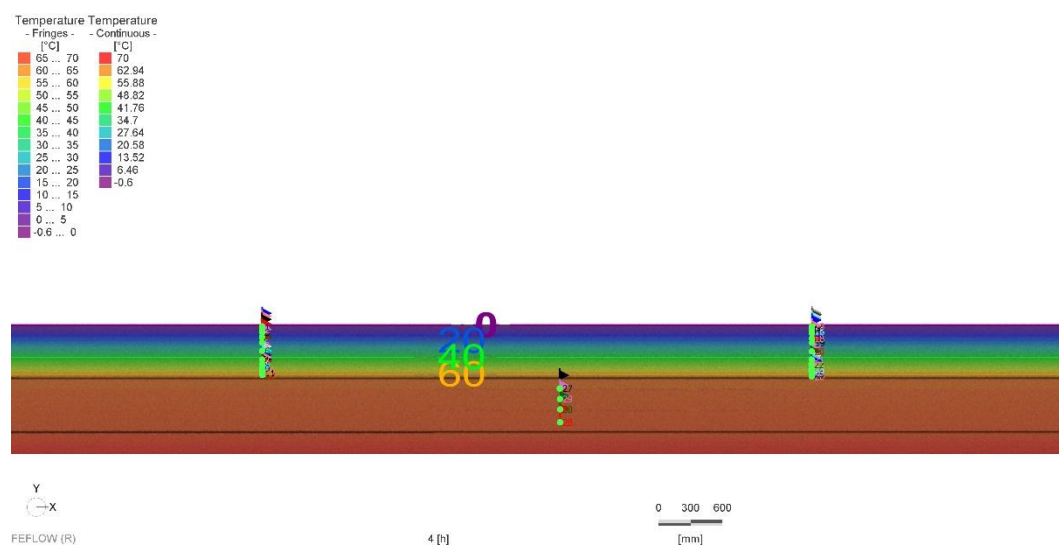


Figura 4.52 Simulazione 2 a $t=4$ ore.

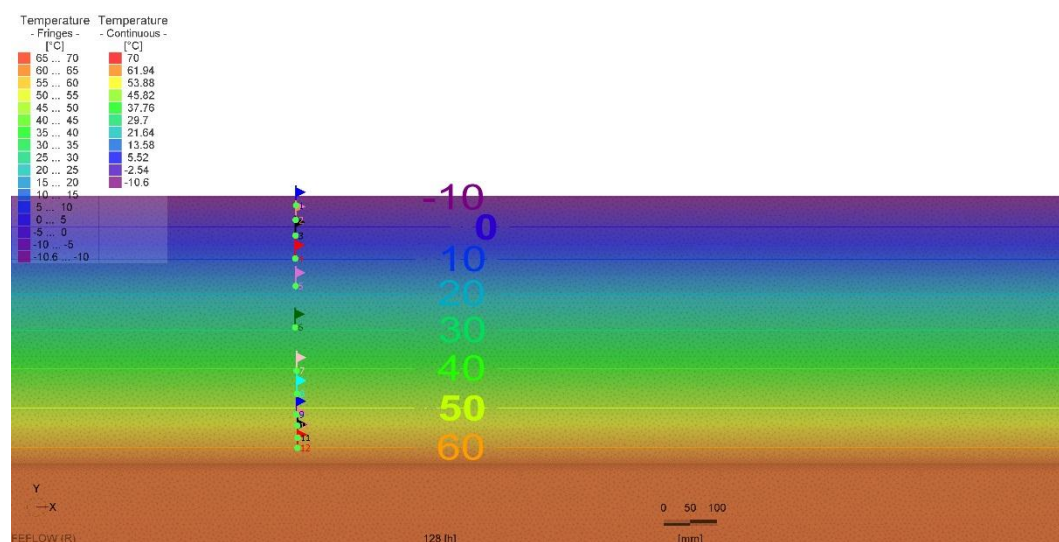


Figura 4.53 Simulazione 2 a $t=128$ ore (in cui si ha la temperatura minima dell'aria pari a -10.6°C).

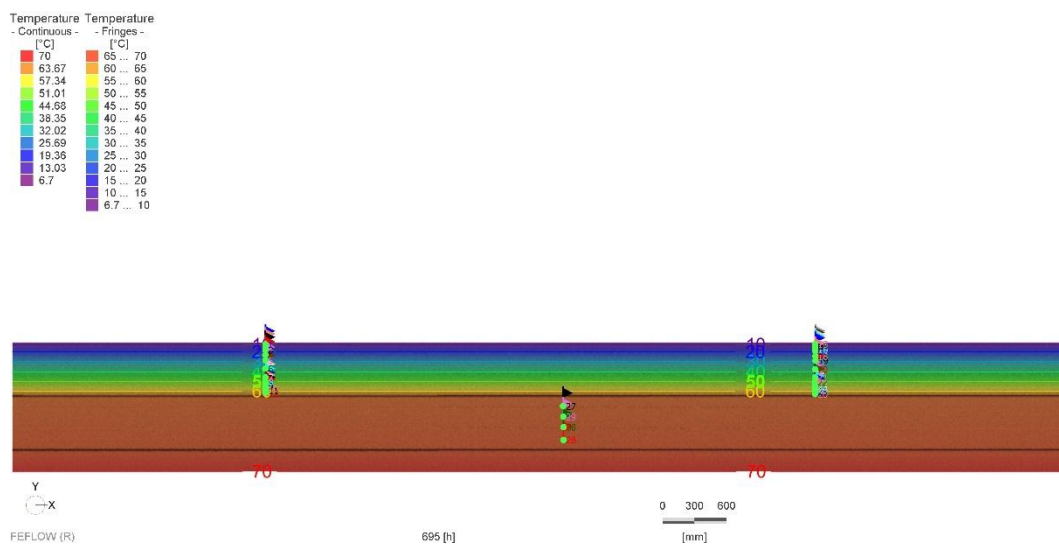


Figura 4.54 Simulazione 2 a $t=695$ ore.

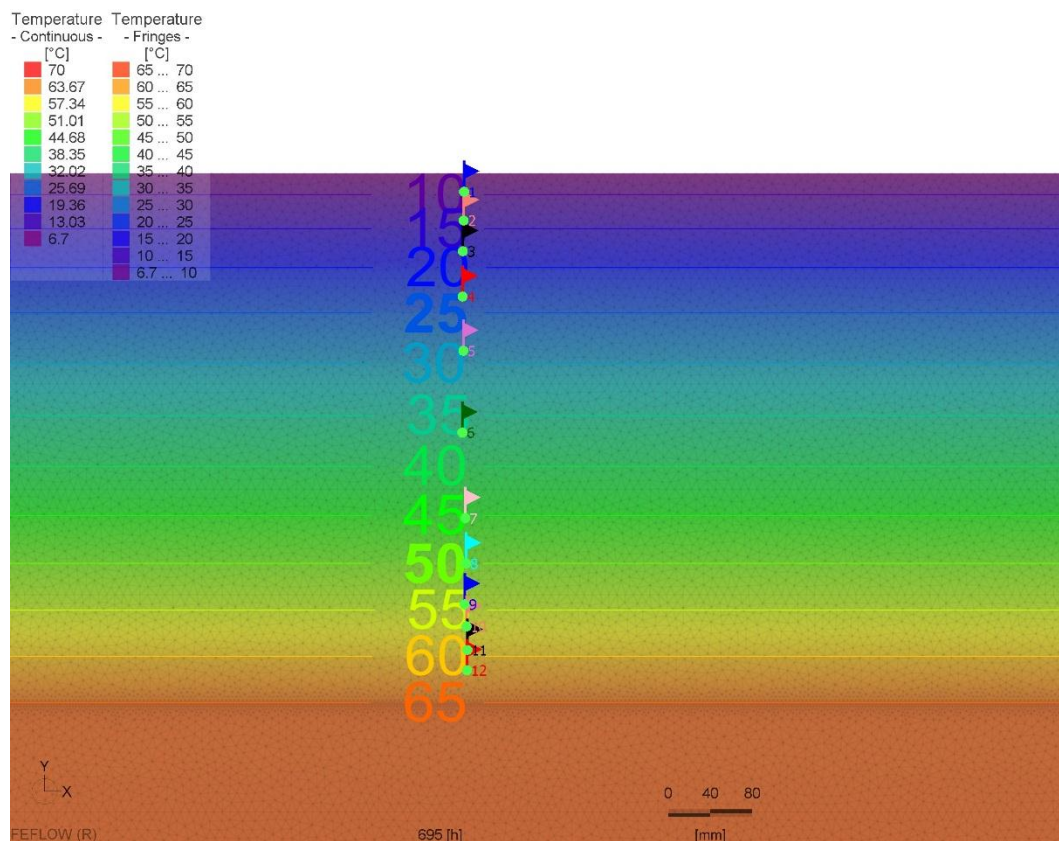


Figura 4.55 dettaglio dello strato impermeabile a $t=695$ ore.

Simulazione 3

In questa simulazione è stata imposta una temperatura al bordo superiore (aria) pari a 25.77°C (media mensile del mese di luglio 2012) e temperatura al bordo inferiore (rifiuti) pari a 30°C. Lo strato risente delle temperature orarie del mese di agosto 2012 (Tabella 6.11 e Figura 4.13).

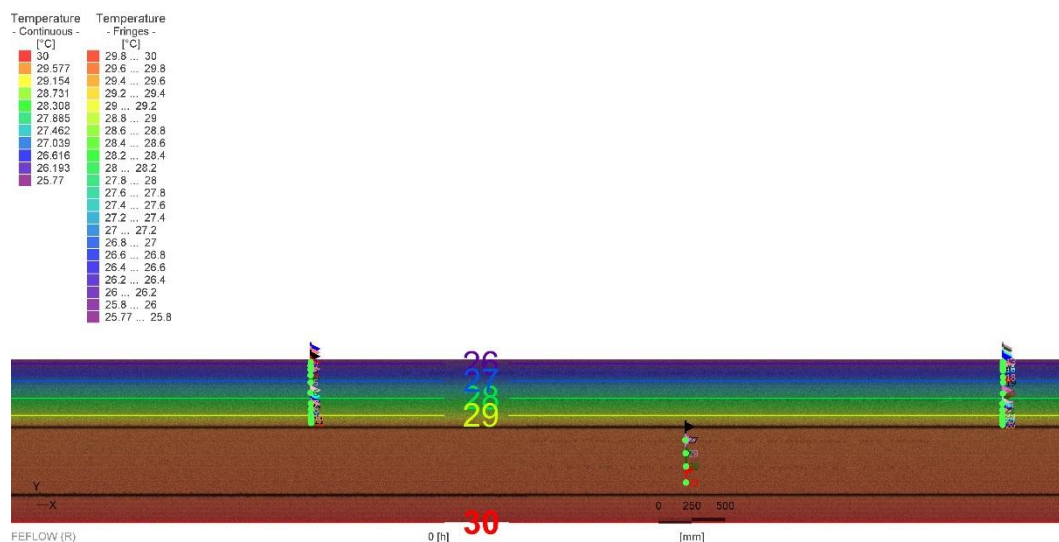


Figura 4.56 Simulazione 3 a $t=4$ ore.

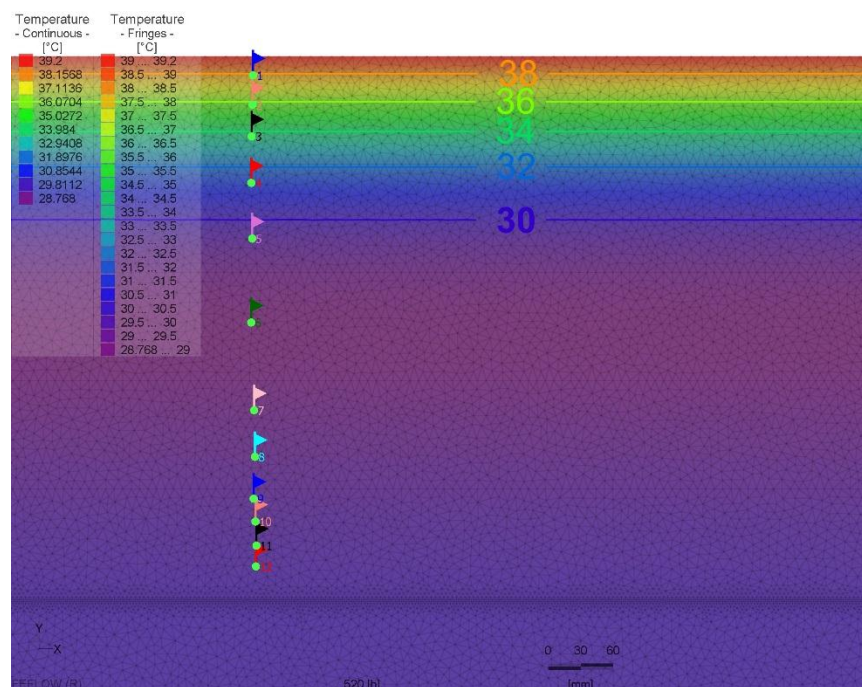


Figura 4.57 Simulazione 3 a $t= 520$ ore (in cui si ha la temperatura massima dell'aria pari a 39.2°C).

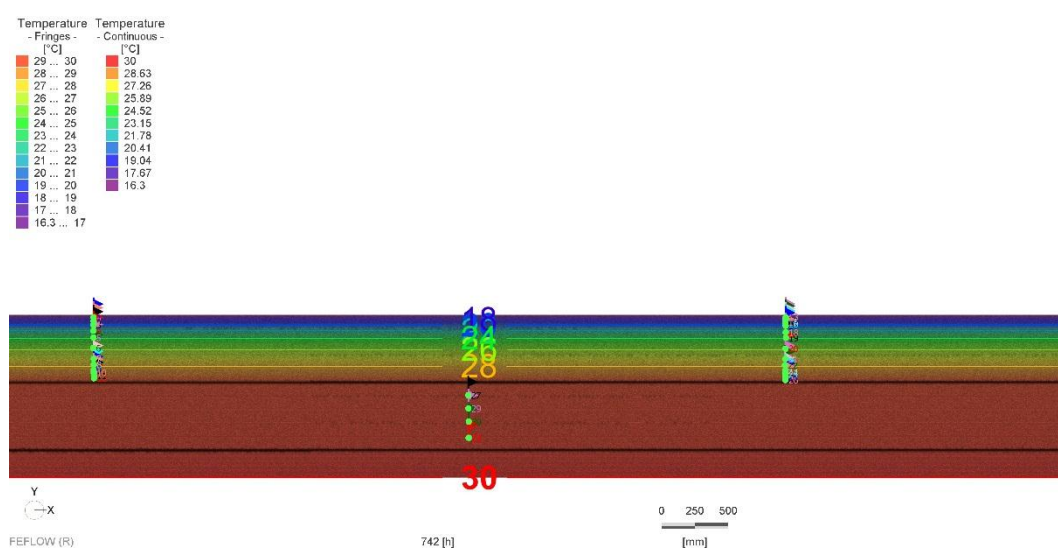


Figura 4.58 Simulazione 3 a $t=742$ ore.

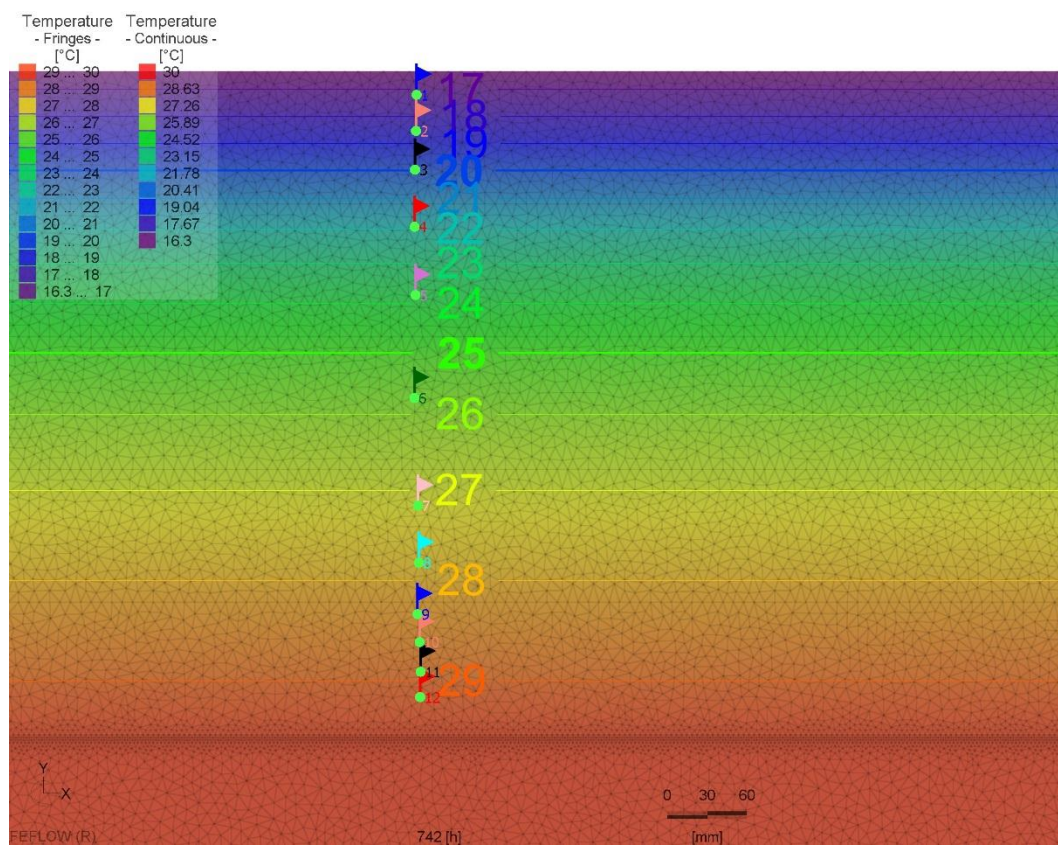


Figura 4.59 dettaglio dello strato impermeabile a $t=742$ ore.

Simulazione 4

In questa simulazione era stata imposta una temperatura al bordo superiore (aria) pari a 25.77°C (media mensile del mese di luglio 2012) e una temperatura al bordo inferiore (rifiuti) pari a 70°C (caso estremo limite). Lo strato risente delle temperature orarie del mese di agosto 2012 (Tabella 6.11 e Figura 4.13).

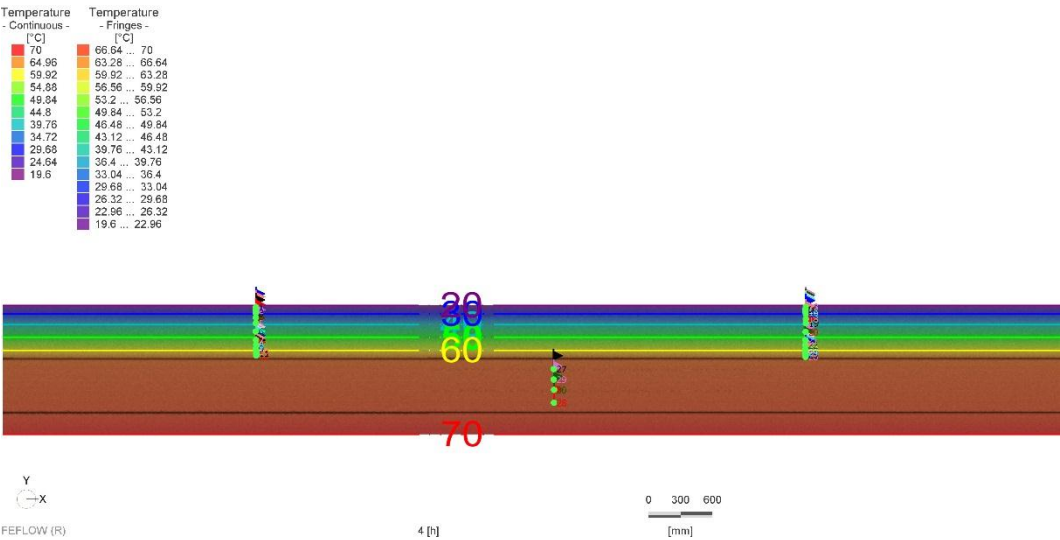


Figura 4.60 Simulazione 4 a t=4 ore.

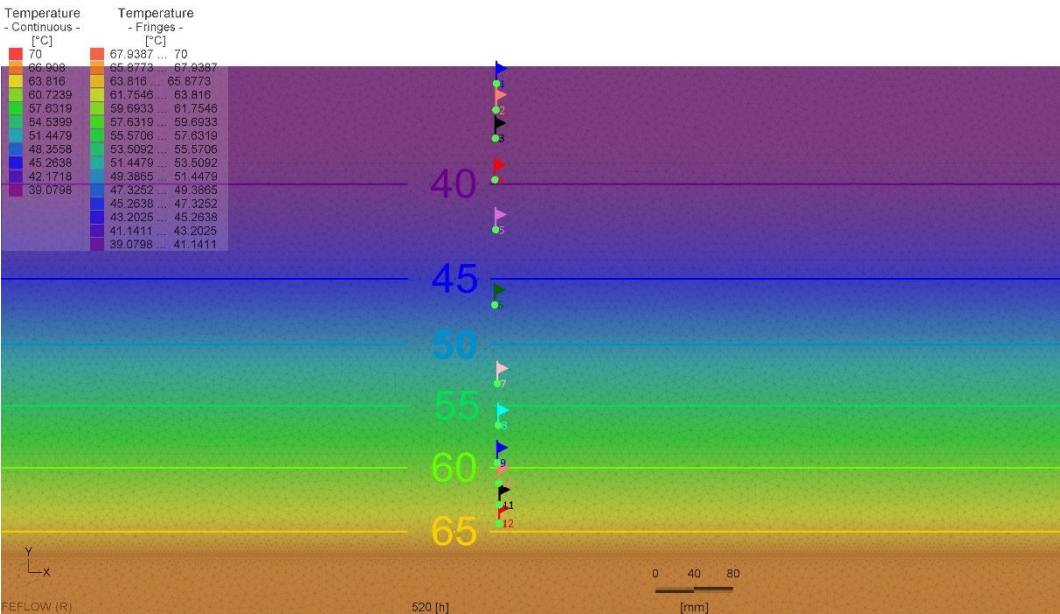


Figura 4.61 Simulazione 4 a t=520 ore.

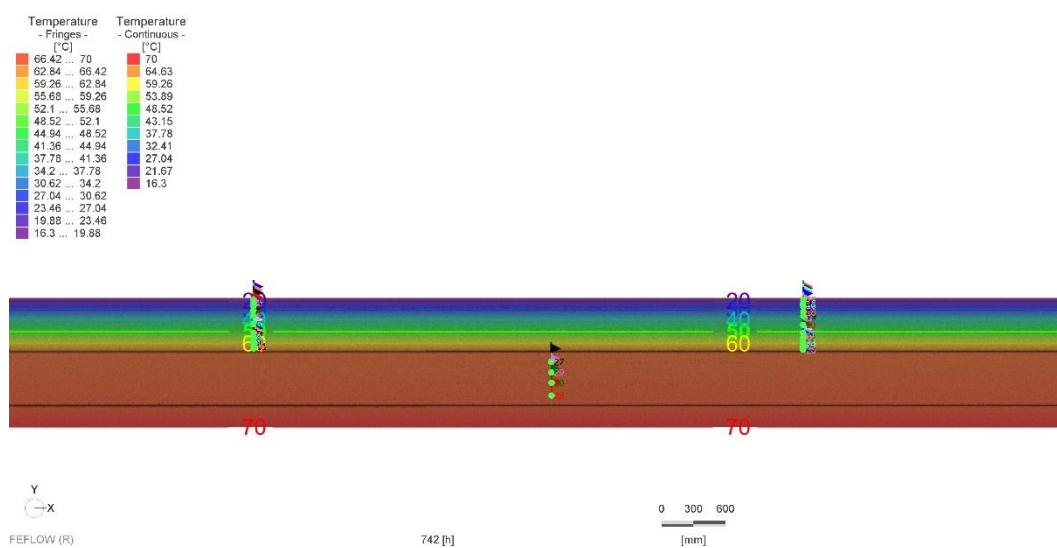


Figura 4.62 Simulazione 4 a $t=742$ ore

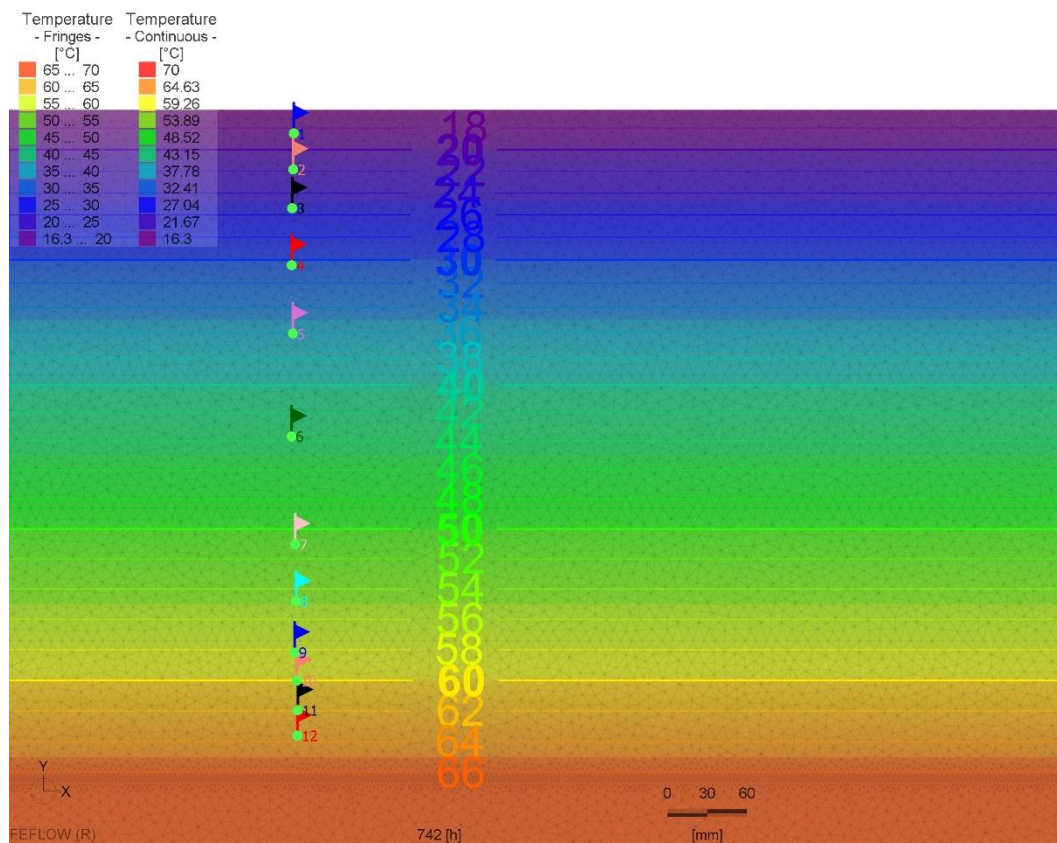


Figura 4.63 dettaglio dello strato impermeabile a $t=742$ ore.

4.4.1.8 Discussione sulle simulazioni eseguite

Dalle prime simulazioni condotte in condizioni steady-state e dalle successive nelle quali è stata imposta una condizione al contorno di fluttuazione oraria della temperatura dell'aria, si è potuto ricavare l'andamento del gradiente termico della copertura provvisoria sottoposta ai diversi input termici imposti al bordo superiore (aria) e al bordo inferiore (rifiuti) (da Figura 4.64 a Figura 4.67). Nei grafici profondità-temperatura è rappresentata la profondità del letto dello strato impermeabile mediante una linea tratteggiata di colore rosso posta a 500 mm.

Nei grafici relativi alle simulazioni 1 e 2 (Figura 4.64, Figura 4.65), sono rappresentati i diversi istanti in cui la temperatura dell'aria è pari a: -0.6°C al tempo $t=4$ ore (ovvero dopo 4 ore dall'inizio della simulazione) (curva arancione); -10.6°C (che corrisponde all'istante in cui è presente il picco di temperatura minima nel mese di febbraio 2012) al tempo $t=128$ ore (curva grigia); 6.7°C al tempo finale di $t=695$ ore (curva azzurra). Nei grafici relativi alle simulazioni 3 e 4 (Figura 4.66, Figura 4.67), sono rappresentati gli istanti in cui la temperatura dell'aria è pari a: 19.6°C al tempo $t=4$ ore (ovvero dopo 4 ore dall'inizio della simulazione) (curva arancione); 39.2°C al tempo $t=520$ ore (che corrisponde all'istante di massima temperatura dell'aria nel mese di agosto 2012) (curva grigia); 16.3°C al tempo finale di $t=742$ ore (curva azzurra).

Osservando l'andamento delle curve del gradiente si può affermare che, nel caso una temperatura venga mantenuta per molto tempo, la distribuzione è omogenea, se invece la temperatura è un valore di picco (39.2°C) il gradiente ha uno sviluppo molto più ripido (curva grigia di Figura 4.66 e Figura 4.67). Inoltre il gradiente di temperatura all'istante $t=520$ h della simulazione 3 è negativo fino alla profondità di 17 cm.

Nei grafici profondità-temperatura si osserva inoltre un gradiente termico nello strato impermeabile elevato rispetto al gradiente termico presente nei sottostanti strati di materiali inerti. Il basso gradiente termico degli strati sottostanti la barriera impermeabile è determinato dalla prevalente convezione rispetto alla conduzione,

testimoniata dalla presenza di moti convettivi che consentono una sorta di omogeneizzazione della temperatura in quelle aree dove tali moti di fluido si sviluppano. Grazie all'alta conducibilità termica equivalente degli strati a granulometria grossolana, la sollecitazione termica dei rifiuti ha influenza diretta sulla base dello strato impermeabile.

Il numero di Péclet (Figura 4.68) indica il contributo di ciascun elemento triangolare della maglia di calcolo al trasporto diffusivo rispetto a quello advettivo (quando il numero di Péclet è maggiore di 1, significa che vi è la prevalenza del fenomeno di conduzione rispetto al fenomeno della convezione). In Figura 4.68 si osserva infatti che il numero di Péclet è maggiore di 1 in corrispondenza dello strato impermeabile.

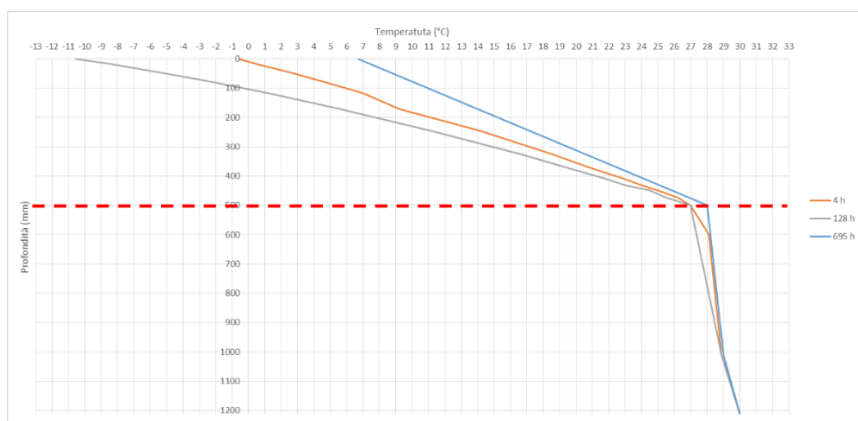


Figura 4.64 grafico profondità-tempo della Simulazione 1 (a $t=4$ ore: $T_{\text{aria}} = -0.6^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{rifiuti}} = 30^{\circ}\text{C}$; a $t=128$ ore: $T_{\text{aria}} = -10.6^{\circ}\text{C}$ (la più bassa temperatura del mese di febbraio 2012) e $T_{\text{rifiuti}} = 30^{\circ}\text{C}$; a $t=695$ ore: $T_{\text{aria}} = 6.7^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{rifiuti}} = 30^{\circ}\text{C}$).

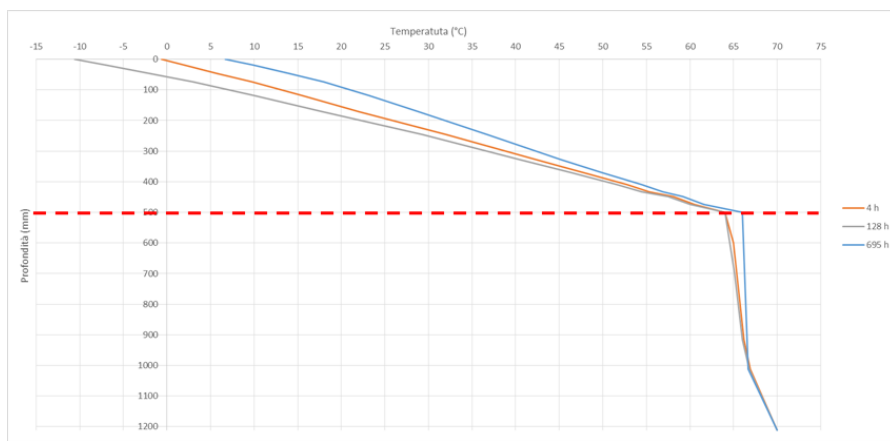


Figura 4.65 grafico profondità-tempo della Simulazione 2 (a $t=4$ ore: $T_{\text{aria}} = -0.6^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{rifiuti}} = 70^{\circ}\text{C}$; a $t=128$ ore: $T_{\text{aria}} = -10.6^{\circ}\text{C}$ (la più bassa temperatura del mese di febbraio 2012) e $T_{\text{rifiuti}} = 70^{\circ}\text{C}$; a $t=695$ ore: $T_{\text{aria}} = 6.7^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{rifiuti}} = 70^{\circ}\text{C}$).

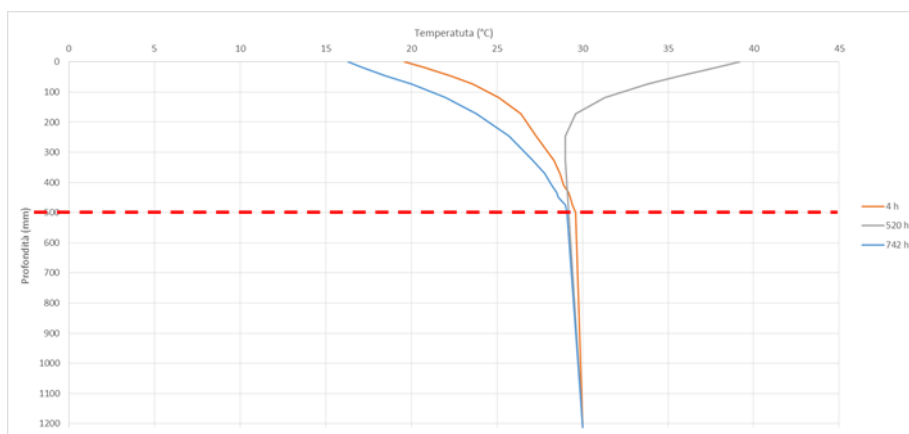


Figura 4.66 grafico profondità-tempo della Simulazione 3 (a $t=4$ ore: $T_{\text{aria}}=19.6^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{rifiuti}}=30^{\circ}\text{C}$; a $t=520$ ore: $T_{\text{aria}}=39.2^{\circ}\text{C}$ (la più alta temperatura del mese di agosto 2012) e $T_{\text{rifiuti}}=30^{\circ}\text{C}$; a $t=742$ ore: $T_{\text{aria}}=16.3^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{rifiuti}}=30^{\circ}\text{C}$).

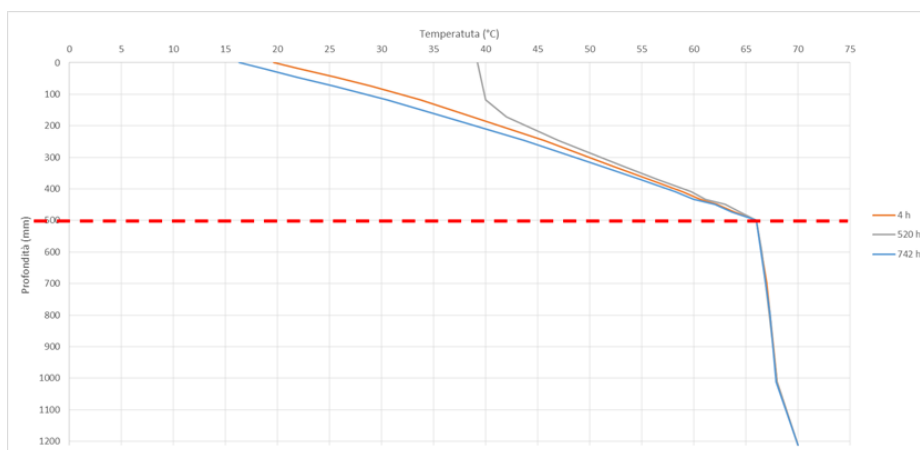


Figura 4.67 grafico profondità-tempo della Simulazione 4 (a $t=4$ ore: $T_{\text{aria}}=19.6^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{rifiuti}}=70^{\circ}\text{C}$; a $t=520$ ore: $T_{\text{aria}}=39.2^{\circ}\text{C}$ (la più alta temperatura del mese di agosto 2012) e $T_{\text{rifiuti}}=70^{\circ}\text{C}$; a $t=742$ ore: $T_{\text{aria}}=16.3^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{rifiuti}}=70^{\circ}\text{C}$).

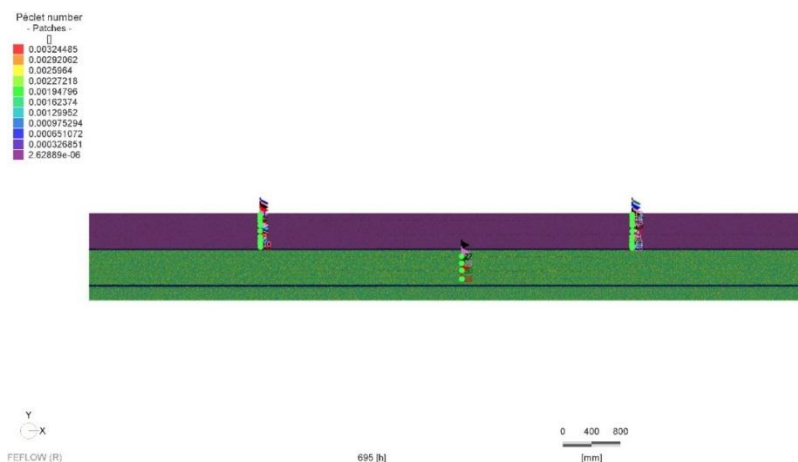


Figura 4.68 numero di Pécel (Simulazione 1).

Dal confronto tra i grafici temperatura-tempo riportati di seguito (Figura 4.70, Figura 4.71, Figura 4.73, Figura 4.74), e i grafici temperatura-tempo relativi al mese di febbraio 2012 (Figura 4.69) e al mese di agosto 2012 (Figura 4.72), si osserva che le temperature presenti negli strati più superficiali risentono maggiormente delle variazioni stagionali dell'aria rispetto alle temperature degli strati più profondi, così come rappresentato anche negli studi condotti da Hanson e Yesiller (2003).

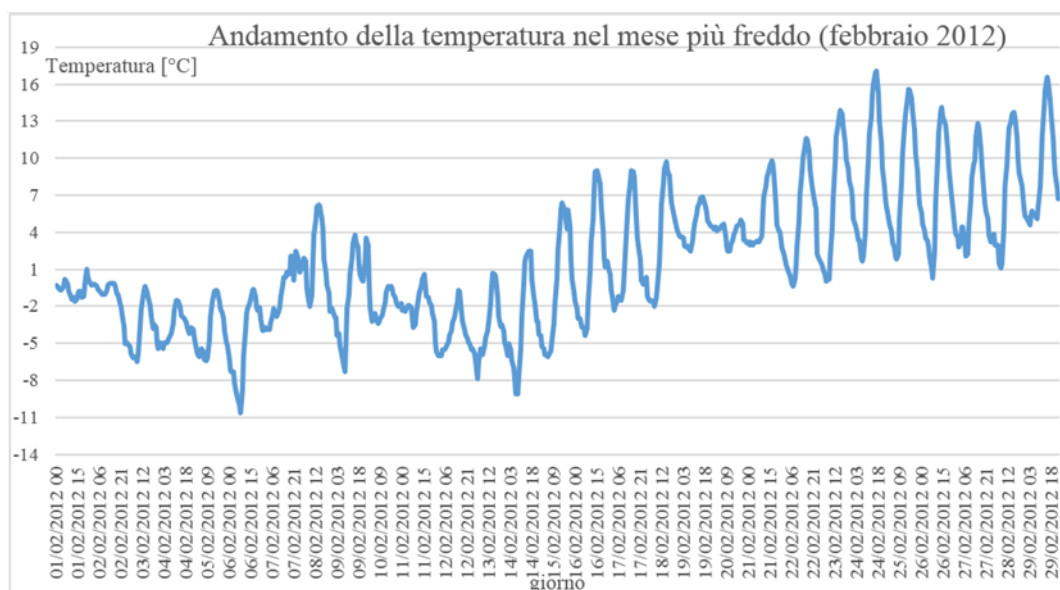


Figura 4.69 grafico temperatura-giorno: andamento delle temperature orarie nel mese di febbraio 2012 (stazione di Castelnovo Bariano, dati Arpav).

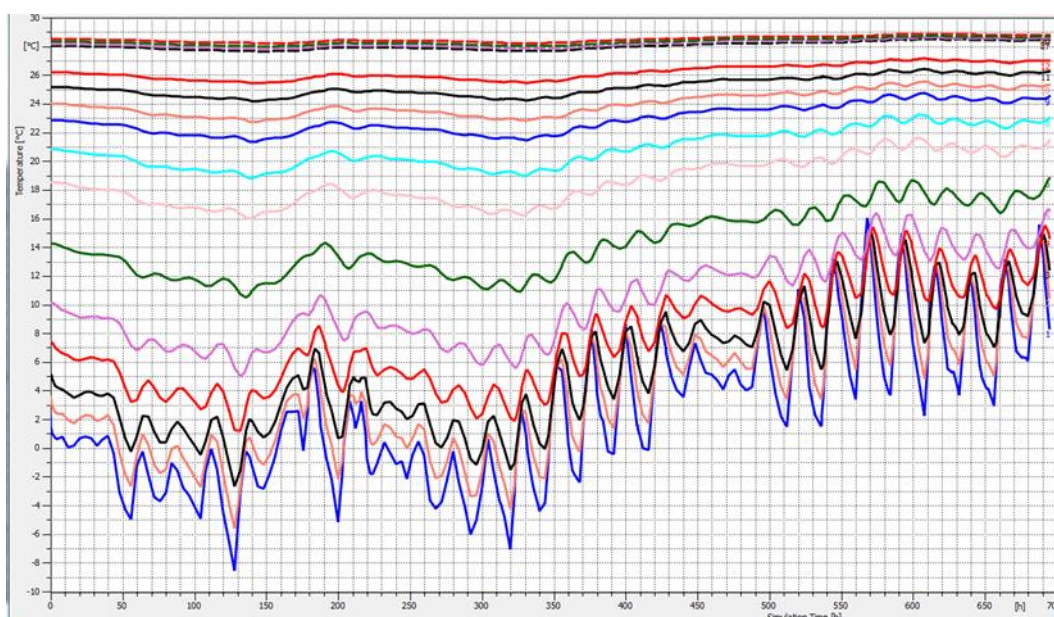


Figura 4.70 grafico temperatura-tempo relativo alla simulazione 1. Le curve continue si riferiscono agli Observation Points presenti nello strato impermeabile (dall'1 al 12); le curve tratteggiate si riferiscono agli Observation Points dello strato di drenaggio del biogas (dal 27 al 30).

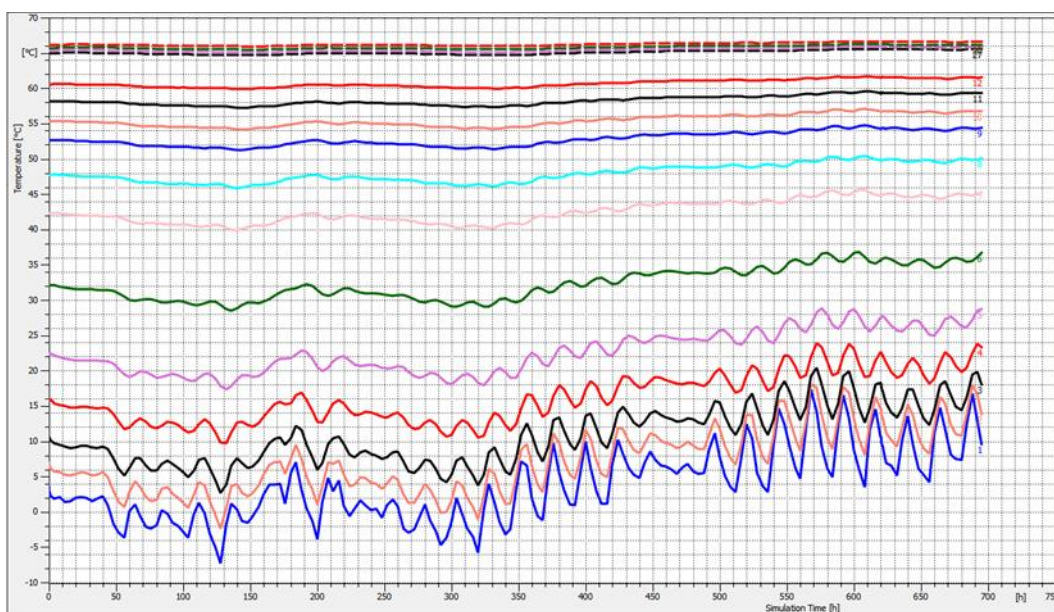


Figura 4.71 grafico temperatura-tempo relativo alla simulazione 2. Le curve continue si riferiscono agli Observation Points presenti nello strato impermeabile (dall'1 al 12); le curve tratteggiate si riferiscono agli Observation Points dello strato di drenaggio del biogas (dal 27 al 30).

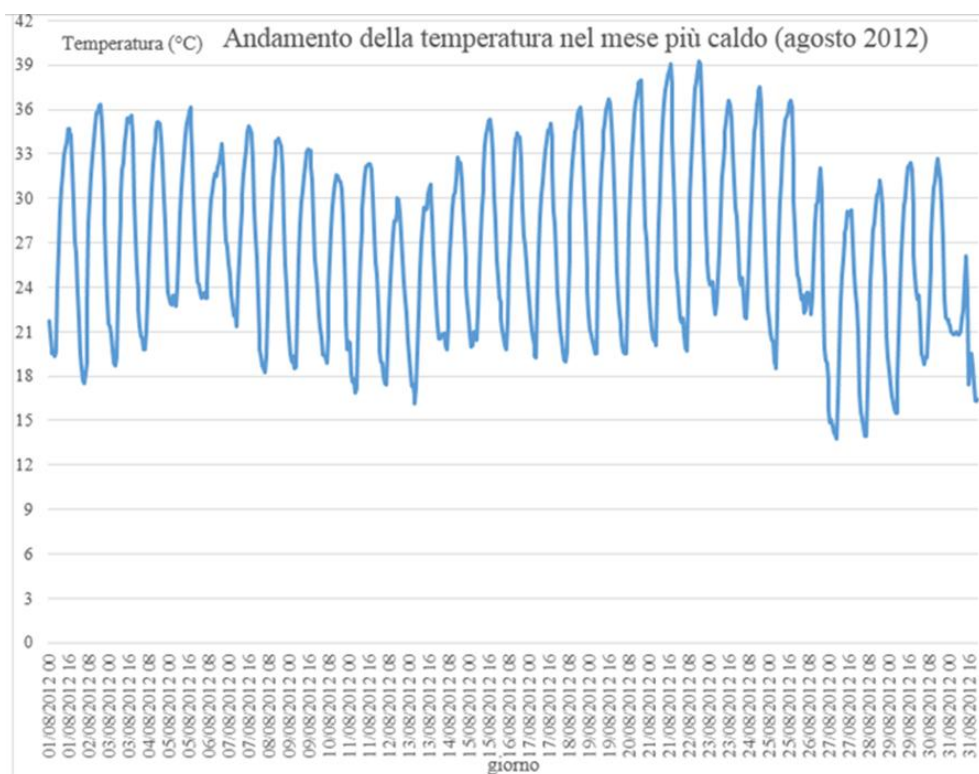


Figura 4.72 grafico temperatura-giorno: andamento delle temperature orarie nel mese di agosto 2012 (stazione di Castelnovo Bariano, dati Arpav).

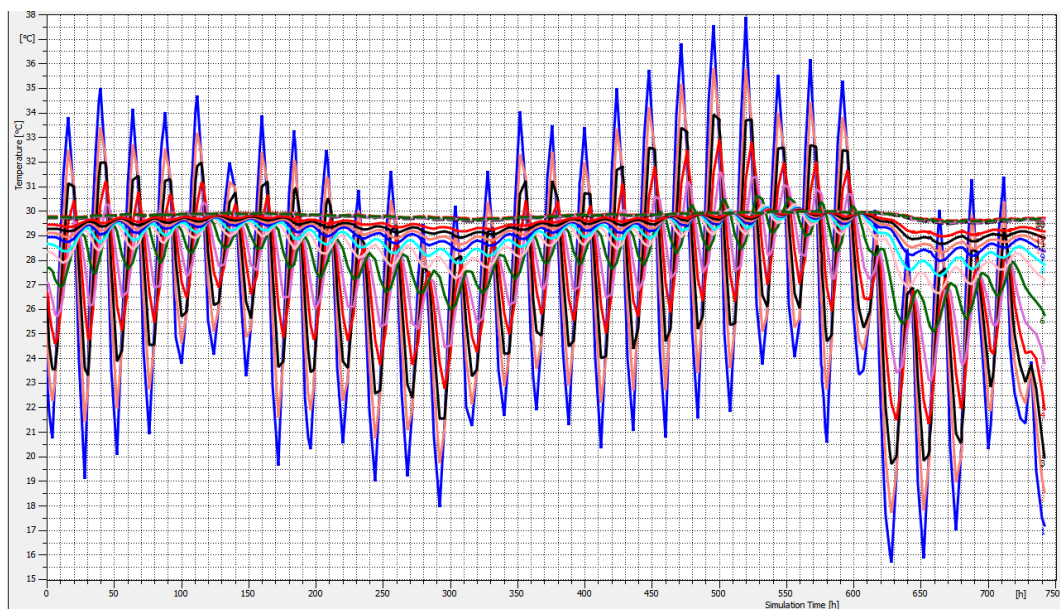


Figura 4.73 grafico temperatura-tempo relativo alla simulazione 3. Le curve continue si riferiscono agli Observation Points presenti nello strato impermeabile (dall'1 al 12); le curve tratteggiate si riferiscono agli Observation Points dello strato di drenaggio del biogas (dal 27 al 30).

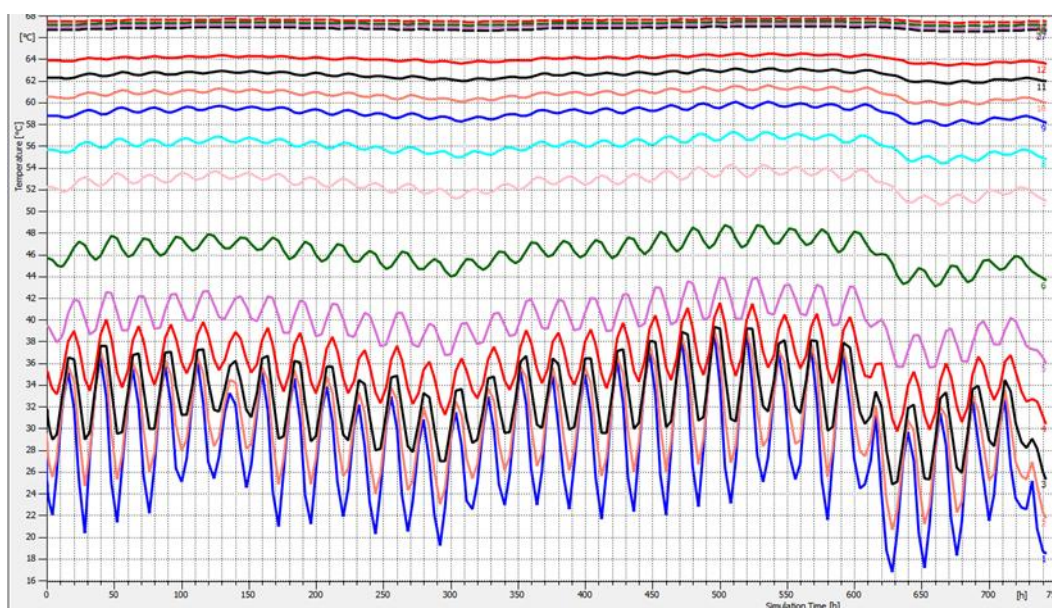


Figura 4.74 grafico temperatura-tempo relativo alla simulazione 4. Le curve continue si riferiscono agli Observation Points presenti nello strato impermeabile (dall'1 al 12); le curve tratteggiate si riferiscono agli Observation Points dello strato di drenaggio del biogas (dal 27 al 30).

Le simulazioni sono state condotte soprattutto per verificare la presenza o meno di condizioni di congelamento e/o essiccazione all'interno dello strato impermeabile, che potrebbero, come si è ampiamente discusso nel Capitolo 2, causare la formazione di fessure nel terreno, con conseguente aumento della conducibilità termica dello strato di materiale fine. Il punto di congelamento dell'acqua libera corrisponde a 0°C , mentre per un fluido interstiziale contenuto all'interno dei pori di un sedimento si attesta attorno ad un valore di temperatura minore, variabile in funzione, ad esempio, della granulometria del terreno, della mineralogia e del contenuto d'acqua. Vengono qui considerati i -2°C come una temperatura di congelamento indicativa. In Figura 4.75 e in Figura 4.76 sono evidenziate le n-volte in cui le temperature, in corrispondenza degli Observation Points posti in prossimità della superficie, raggiungono i valori $\leq -2^{\circ}\text{C}$.

Grazie ai dati orari del mese di febbraio 2012, è possibile confrontare l'arco temporale (espresso in ore) nel quale la temperatura atmosferica si attesta a temperature $\leq -2^{\circ}\text{C}$, con quello relativo alle temperature presenti in corrispondenza degli Observation Points n.1 (profondo 1.8 cm rispetto alla superficie), n.2 (profondo 4.6 cm) e n.3 (profondo 7.6 cm) (Tabella 4.32, Tabella 4.33, Tabella

4.34). Considerando la profondità di ubicazione degli Observation Points, si può affermare che durante la Simulazione 1, i primi 18 mm di terreno vanno incontro a congelamento una decina di volte. Il fenomeno del congelamento si può verificare fino alla profondità di 46 mm dalla superficie, per un numero di volte minore rispetto al precedente. In corrispondenza di una temperatura dell'aria pari a -10.6°C , l'isoterma -2°C raggiunge anche i 7.4 cm di profondità. In quest'ultimo caso, probabilmente, non si verifica la nucleazione di lenti di ghiaccio dato il limitato intervallo di tempo in cui si attestano temperature inferiori ai -2°C (solo per 3 ore). Durante la Simulazione 2, nonostante una temperatura imposta sottostante pari a 70°C , riescono a congelare solamente i primi 18 mm.

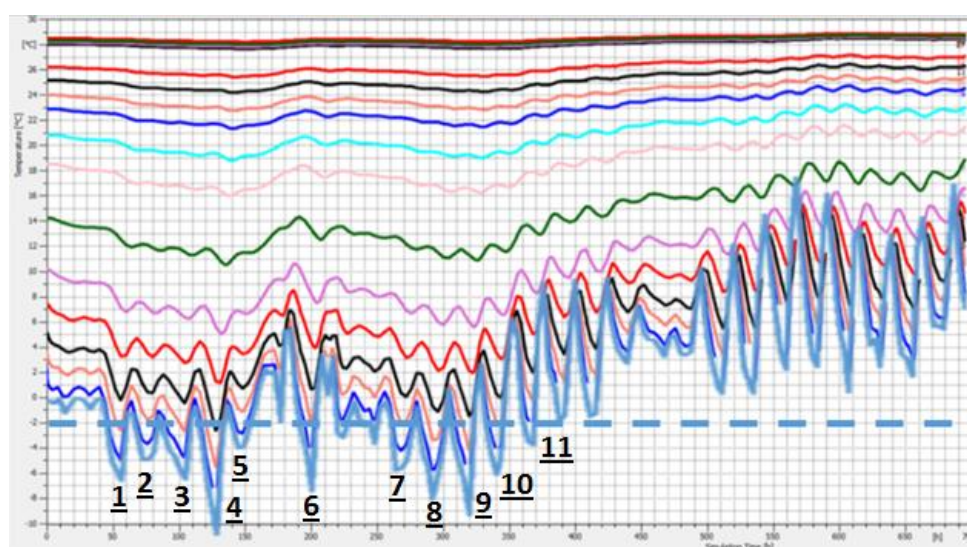


Figura 4.75 grafico temperatura-tempo: i numeri rappresentano le n -volte in cui sono presenti temperature inferiori ai -2°C in corrispondenza degli Observation Points n.1 (profondo 1.8 cm, n.2 (profondo 4.6 cm) e n.3 (profondo 7.4 cm) (Simulazione 1). La curva azzurra rappresenta l'andamento della temperatura dell'aria nel mese di febbraio 2012.

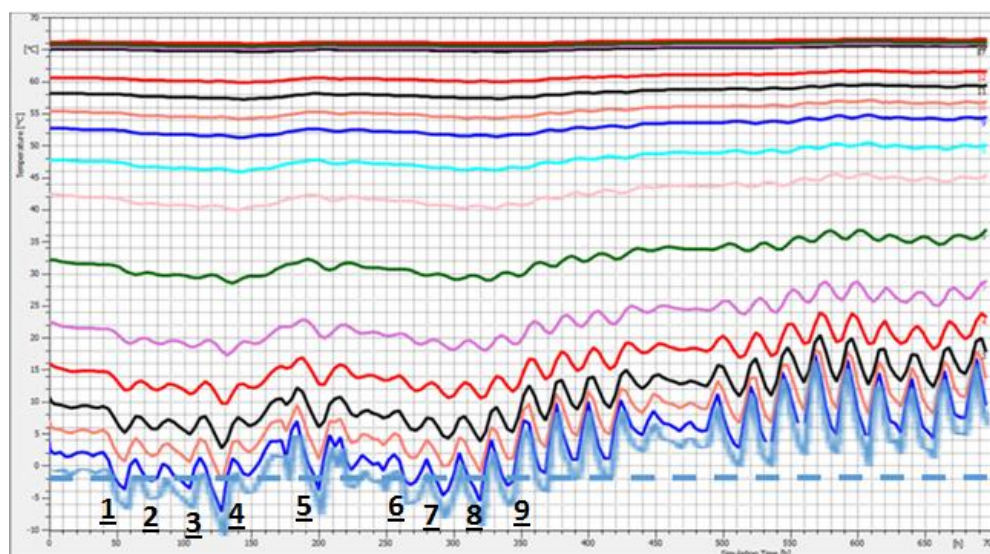


Figura 4.76 grafico temperatura-tempo: i numeri rappresentano le n-volte in cui sono presenti temperature inferiori ai -2°C in corrispondenza degli Observation Points n.1 (profondo 1.8 cm) (Simulazione 2). La curva azzurra rappresenta l'andamento della temperatura dell'aria nel mese di febbraio 2012.

numero	data e ora inizio	data e ora fine	tempo in cui $T_{\text{aria}} \leq -2^{\circ}\text{C}$ (durata espressa in ore)
1	02/02/2012 21	03/02/2012 11	14 ore
2	03/02/2012 18	04/02/2012 10	16 ore
3	04/02/2012 15	05/02/2012 11	20 ore
4	05/02/2012 18	06/02/2012 13	19 ore
5	06/02/2012 19	07/02/2012 11	16 ore
6	08/02/2012 22	09/02/2012 10	12 ore
7	11/02/2012 21	12/02/2012 13	16 ore
8	12/02/2012 17	13/02/2012 12	19 ore
9	13/02/2012 19	14/02/2012 11	16 ore
10	14/02/2012 21	15/02/2012 09	12 ore
11	16/02/2012 01	16/02/2012 08	7 ore

Tabella 4.32 tempo nel quale l'aria si trova a temperature $\leq -2^{\circ}\text{C}$ (durata espressa in ore).

numero	tempo in cui $T_{\text{aria}} \leq -2^{\circ}\text{C}$ (durata espressa in ore)	tempo in cui $T_{\text{ob.point1}} \leq -2^{\circ}\text{C}$ (durata espressa in ore)	tempo in cui $T_{\text{ob.point2}} \leq -2^{\circ}\text{C}$ (durata espressa in ore)	tempo in cui $T_{\text{ob.point3}} \leq -2^{\circ}\text{C}$ (durata espressa in ore)
1	14 ore	13 ore	7 ore	
2	16 ore	13 ore		
3	20 ore	16 ore	4 ore	
4	19 ore	18 ore	12 ore	3 ore
5	16 ore	9 ore		
6	12 ore	8 ore	1 ora	
7	16 ore	15 ore		
8	19 ore	17 ore	10 ore	
9	16 ore	14 ore	9 ore	
10	12 ore	9 ore		
11	7 ore	4 ore		

Tabella 4.33 tempo nel quale il terreno manifesta temperature $\leq -2^{\circ}\text{C}$ in corrispondenza degli Observation Points n.1 (profondo 1.8 cm), n.2 (profondo 4.6 cm) e n.3 (profondo 7.4 cm) (durata espressa in ore) (Simulazione 1). Le caselle vuote indicano la non presenza di temperature $\leq -2^{\circ}\text{C}$.

numero	tempo in cui $T_{aria} \leq -2^{\circ}\text{C}$ (durata espressa in ore)	tempo in cui $T_{ob.point1} \leq -2^{\circ}\text{C}$ (durata espressa in ore)
1	14 ore	10 ore
2	16 ore	10 ore
3	20 ore	9 ore
4	19 ore	13 ore
5	12 ore	5 ore
6	16 ore	14 ore
7	19 ore	16 ore
8	16 ore	11 ore
9	12 ore	7 ore

Tabella 4.34 tempo nel quale il terreno in corrispondenza degli Observation Points n.1 (profondo 1.8 cm), n.2 (profondo 4.6 cm) e n.3 (profondo 7.4 cm), si trova a temperature $\leq -2^{\circ}\text{C}$ (durata espressa in ore) (Simulazione 2).

Concludendo si può affermare che durante il mese invernale, lo strato impermeabile risente di una temperatura alla base pari a 28°C se i rifiuti sono a 30°C , e di 65°C se i rifiuti si trovano a 70°C . Nel mese estivo, invece, lo strato impermeabile risente di 29°C se i rifiuti sono a 30°C e di 66°C se la massa dei rifiuti è a 70°C . Quindi, indipendentemente dalla temperatura media stagionale dell'aria, se i rifiuti sono a 30°C , lo strato impermeabile risente di circa 28°C , mentre se la massa in fase di biodegradazione è a 70°C , lo strato impermeabile risente di una temperatura dal basso di circa 65°C .

Dal momento che, come si era detto nel capitolo 2, la fonte calda sottostante lo strato causa la migrazione dell'acqua verso le zone più fredde in superficie, nello strato si verifica quindi il graduale impoverimento del suo contenuto d'acqua. Inoltre, risentendo di essiccazione nei mesi estivi, e del fenomeno del congelamento nei mesi invernali, nello strato si formano fessure verticali, che causano l'incremento della conducibilità idraulica dello strato in materiale fine e la sua diminuzione del potere impermeabilizzante.

Vista l'influenza della temperatura sui materiali coesivi, una prospettiva futura potrebbe essere lo studio della permeabilità dei materiali coesivi, riproducendo le condizioni reali in cui il terreno si ghiaccia o si essicca in sito e applicando le temperature risultate dalle simulazioni condotte tramite Feflow. Dal momento che, secondo il Decreto Legislativo 36/2003, lo strato impermeabile di una barriera di copertura di una discarica deve rispettare la conducibilità idraulica massima di $k \leq 10^{-8} \text{ m/s}$, uno studio sperimentale potrebbe essere condotto nella finalità di

determinare la variazione della permeabilità di tale strato una volta soggetto a variazioni termiche di congelamento e di essiccazione.

5 Conclusioni

Considerando il contesto di conoscenze attualmente disponibili nell'ambito delle modalità di realizzazione dei sistemi di copertura di zone di conferimento di rifiuti solidi urbani, e la evidente mancanza di studi scientifici sugli effetti meccanici indotti dalle sollecitazioni termiche, endogene ed atmosferiche, a cui sono sottoposti i materiali utilizzati nelle coperture, lo studio in oggetto rappresenta un primo passo per la caratterizzazione termofisica dei materiali impiegati a scopo di impermeabilizzazione e la verifica dei processi di trasporto termico che avvengono al loro interno.

Risulta quindi importante proseguire la ricerca con la valutazione quantitativa delle proprietà idrauliche dei depositi argillosi di copertura, al fine di poter disporre di indicazioni utili all'adeguamento normativo in materia di realizzazione di discariche ed all'adozione di una linea guida delle buone pratiche.

Uno degli aspetti innovativi dello studio qui presentato è costituito dall'applicazione di una nuova tecnologia per la misura della conducibilità termica dei materiali sciolti a granulometria grossolana, per i quali non è possibile l'utilizzo dei metodi tradizionali di misura tramite sonde ad ago o sonde piane di ridotta superficie di contatto. Lo strumento impiegato a tale scopo, in genere utilizzato per la caratterizzazione della conducibilità e trasmittanza termica dei materiali edilizi quali vetrate, è stato adattato allo scopo per consentire la caratterizzazione termica dei materiali ghiaiosi. Per un range di temperature superiori allo zero, i risultati ottenuti sembrano incoraggianti e coerenti con i dati di letteratura. Al contrario, i risultati ottenuti in condizioni termiche di congelamento al momento risultano di difficile interpretazione e richiedono ulteriori approfondimenti di tipo metodologico.

Un importante risultato sempre di novità nel panorama di letteratura specifica, è stato ottenuto dall'implementazione di un'articolata serie di analisi numeriche

effettuate, in cui sono state imposte le condizioni di stress termico correlato alla produzione interna di calore bio-chimico e all'andamento delle temperature di superficie nelle condizioni più estreme nelle stagioni estiva ed invernale.

Dai risultati ottenuti si può desumere che possano avvenire nei materiali argillosi dei fenomeni di disidratazione con conseguente aumento delle condizioni di permeabilità e quindi possibilità di filtrazione di acque meteoriche. Tale rischio potrebbe a sua volta incrementare la produzione di percolato oltre i limiti di capacità di gestione e smaltimento, creando elevati pericoli di carattere ambientale.

Lo studio condotto è utile, inoltre, per la valutazione della sensibilità dei materiali impiegati nelle discariche per RSU, alle sollecitazioni termiche, aspetto che attualmente, in campo scientifico e tecnico è stato spesso trascurato o scarsamente considerato. Un'esposizione prolungata del livello impermeabile della copertura temporanea, può, infatti, contribuire ad accentuare gli aspetti di alterazione delle proprietà idrauliche iniziali. Si auspica, quindi, che nelle azioni future di adeguamento normativo si tenga in adeguata considerazione sia i possibili effetti connessi alle sollecitazioni termiche di natura endogena al sistema discarica, sia delle evoluzioni delle proprietà geotecniche che possono avvenire nei periodi di esposizione che talvolta persistono anche per oltre un anno.

I possibili sviluppi di completamente dello studio qui condotto potrebbero vertere sull'analisi delle proprietà idrauliche della copertura argillosa provvisoria nelle condizioni indisturbate ed a seguito delle sollecitazioni termiche, valutando in particolare le variazioni di permeabilità idraulica in laboratorio ed in sito. Tali indagini consentiranno di tarare e validare i modelli numerici di trasporto termico, potendo alla fine disporre di uno strumento previsionale dedicato alla valutazione delle migliori pratiche di realizzazione e mantenimento della copertura di discariche del tipo considerato.

6 Allegati

Measured Quantities				
λ - Thermal conductivity	(W / m K)	c_p - Volume heat capacity	(J / m ³ K)	
a - Thermal diffusivity	(m ² / s)	T - Temperature	(°C)	
Measurement Ranges		Thermal Conductivity	Volume Heat Capacity	Temperature
Needle Probe IPN 1100	/0.015-0.05	0.015 .. 0.05 W/mK	4.0.10 ⁴ .. 1.5.10 ⁶ J/m ³ K	-20 .. +70 °C
	/0.035-0.2	0.035 .. 0.20 W/mK	4.0.10 ⁴ .. 1.5.10 ⁶ J/m ³ K	
	/0.20-1.0	0.20 .. 1.0 W/mK	1.5.10 ⁶ .. 3.0.10 ⁶ J/m ³ K	
	/1.0-2.0	1.0 .. 2.0 W/mK	1.5.10 ⁶ .. 3.0.10 ⁶ J/m ³ K	
Surface Probe IPS 1100	/0.04-0.3	0.04 .. 0.3 W/mK	4.0.10 ⁴ .. 1.5.10 ⁶ J/m ³ K	-15 .. +50 °C
	/0.3-2.0	0.30 .. 2.0 W/mK	1.5.10 ⁶ .. 3.0.10 ⁶ J/m ³ K	
	/2.0-6.0	2.0 .. 6.0 W/mK	1.5.10 ⁶ .. 3.0.10 ⁶ J/m ³ K	
Measurement Accuracy		Measurement Range	Accuracy	
Thermal Conductivity		0.015 .. 0.70 W/m K	5 % of reading + 0.001 W/m K	
		0.70 .. 6.0 W/m K	10 % of reading	
Volume Heat Capacity		4.0.10 ⁴ .. 3.0.10 ⁶ J/m ³ K	15 % of reading+1.10 ³ J/m ³ K	
Temperature		-20 .. +70 °C	1°C	
Measurement Accuracy		Measurement Range	Accuracy	
Thermal Conductivity		0.015 .. 0.70 W/m K	5 % of reading + 0.001 W/m K	
		0.70 .. 6.0 W/m K	10 % of reading	
Volume Heat Capacity		4.0.10 ⁴ .. 3.0.10 ⁶ J/m ³ K	15 % of reading+1.10 ³ J/m ³ K	
Temperature		-20 .. +70 °C	1°C	
Measurement Reproducibility				
Thermal Conductivity		3 % of reading + 0.001 W/m K		
Volume Heat Capacity		3 % of reading + 1.10 ³ J/m ³ K		
General Parameters				
Communication Interfaces		USB		
Display		3.5" / 320 x 240 pixels / 256 colors		
Internal Memory for Data		min. 2 GB (>1000 results)		
Operation Temperature		0 .. +40 °C		
Storage Temperature		-25 .. +60 °C		
Power Consumption		approx. 1.5 W		
Power Supply		from internal rechargeable accumulators (4xNiMH, AA size) from Power Adapter (100 - 240 V _{AC} / 12 V _{DC})		
Degree of Protection		IP-42 (measuring device) IP-67 (transport case)		
Dimensions (L x W x H)		210 x 105 x 40 mm (measuring device) 406 x 330 x 174 mm (transport case)		
Weight (approx.)		0.5 kg (measuring device) 5 kg (standard setup with one needle and one surface probe in transport case)		

Tabella 6.1 informazioni tecniche relative allo strumento ISOMET 2114.

Material	Label2	Label3	Lower limit-Measurement range	Higher limit-Measurement range	Lambda (W/mK)	Volume heat capacity (MJ/m ³ K)	Thermal diffusivity (1E-6 m ² /s)	Mean temperature T (°K)	Delta T-Temperature rise	Calibration constant-k	Calibration constant-q
barattolo A 1	wf	T-2.1	1	1	2	0.9200	2.0369	0.4517	17.7255	9.7701	1
barattolo A 1	wf	T-2.1	1	1	2	0.9441	2.0377	0.4633	18.1879	10.0664	1
barattolo A 2	wf	T-2.1	0.2	0.2	1	0.9274	2.0111	0.4611	19.0132	9.9380	1
barattolo A 2	wf	T-2.1	0.2	0.2	1	0.9105	2.0135	0.4522	19.4372	9.8687	1
barattolo A 1	wf	T-2	0.2	0.2	1	0.8260	1.9562	0.4222	7.1259	9.8189	1
barattolo A 1	wf	T-2	0.2	0.2	1	0.8461	1.9733	0.4288	7.4245	10.0943	1
barattolo A 2	wf	T-2	0.2	0.2	1	0.8323	1.9841	0.4195	7.4893	10.0006	1
barattolo A 2	wf	T-2	0.2	0.2	1	0.8355	1.9618	0.4259	7.5213	9.9725	1
barattolo A 5	wf	T-17	0.3	0.3	2	1.6571	1.3421	1.2347	-0.1892	9.5501	1
barattolo A 5	wf	T-17	0.3	0.3	2	1.5132	1.3406	1.1287	-0.9420	10.1588	1
barattolo A 7	wf	T-17	0.3	0.3	2	0.9955	1.3094	0.7602	-3.5715	9.2168	1
barattolo A 7	wf	T-17	0.3	0.3	2	1.1164	1.3072	0.8540	-3.8667	9.9894	1

Material	Label2	Label3	Lower limit-Measurement range	Higher limit-Measurement range	Lambda [W/mK]	Volume heat capacity [MJ/m3K]	Thermal diffusivity [E6 m2/s]	Mean temperature T [Ktr]	Delta T-Temperature rise	Calibration constant-k	Calibration constant-q
barattolo A1	wl	T +40	0.2		1	0.9925	2.0630	0.4811	43.1952	9.6258	1
barattolo A1	wl	T +40	0.2		1	0.9102	2.0874	0.4360	43.1439	10.1043	1
barattolo A2	wl	T +40	0.2		1	0.9689	2.1420	0.4523	43.0841	9.6743	1
barattolo A2	wl	T +40	0.2		1	0.8885	2.0555	0.4322	43.0808	10.0866	1
barattolo A3	wl	T +40	1		2	0.9756	2.0640	0.4727	43.1688	9.5206	1
barattolo A3	wl	T +40	1		2	0.9027	2.0734	0.4354	43.3071	10.1928	1
barattolo A1	wl	T +20	0.2		1 nan		2.0900 nan		25.1598	9.2627	1
barattolo A1	wl	T +20	0.2		1	0.8560	2.0815	0.4112	25.2597	10.4447	1
barattolo A2	wl	T +20	0.2		1	0.9261	2.0800	0.4452	24.9502	9.5594	1
barattolo A2	wl	T +20	0.2		1	0.8662	2.0372	0.4252	25.1303	10.1943	1
barattolo A3	wl	T +20	0.2		1	0.9440	2.1146	0.4464	25.0838	9.5854	1
barattolo A3	wl	T +20	0.2		1	0.8661	2.0767	0.4170	25.2633	10.2855	1
barattolo A1	wl	T +2	0.2		1	0.9053	2.0534	0.4409	74.388	9.7434	1
barattolo A1	wl	T +2	0.2		1	0.8477	2.0085	0.4221	7.5443	10.0709	1
barattolo A2	wl	T +2	0.2		1	0.9517	1.9982	0.4763	7.9078	9.6877	1
barattolo A2	wl	T +2	0.2		1	0.8673	2.0103	0.4314	7.8928	10.1188	1

Material	Label2	Label3	Lower limit-Measurement range	Higher limit-Measurement range	Lambda [W/mK]	Volume heat capacity [MJ/m ³ K]	Thermal diffusivity [E-6 m ² /s]	Mean temperature T [K]	Delta T-Temperature rise	Calibration constant-k	Calibration constant-q
barattolo A 1	wl	T-17	2		6	1.787	1.8614	0.9341	-9.9679	8.5123	1
barattolo A 1	wl	T-17	2		6	1.7125	1.8573	0.9220	-9.2916	10.0535	1
barattolo A 2	wl	T-17	0.3		2	2.0338	1.8836	1.0798	-9.4764	9.5915	1
barattolo A 2	wl	T-17	0.3		2	1.8679	1.8468	1.0114	-9.5023	10.2163	1
barattolo A 1	wl	T+40	0.2		1	1.1123	2.1405	0.5197	42.7940	9.4984	1
barattolo A 1	wl	T+40	0.2		1	1.0262	2.1512	0.4771	42.8559	10.2588	1
barattolo A 2	wl	T+40	1		2	1.1109	2.1191	0.5242	42.5408	9.5130	1
barattolo A 2	wl	T+40	1		2	0.9791	2.1186	0.4621	42.6713	10.3020	1
barattolo A 3	wl	T+40	1		2	1.0626	2.2009	0.4828	42.6712	9.6982	1
barattolo A 3	wl	T+40	1		2	0.9748	2.1457	0.4543	42.6982	10.1751	1
barattolo A 1	wl	T+20	0.2		1	0.9360	2.0449	0.4577	24.8161	9.6310	1
barattolo A 2	wl	T+20	0.2		1	0.9821	2.0580	0.4772	25.0734	9.7214	1
barattolo A 2	wl	T+20	0.2		1	0.8881	2.0712	0.4288	25.0377	10.1340	1
barattolo A 3	wl	T+20	0.2		1	0.9972	2.0837	0.4786	25.1648	9.7059	1

Material	Label2	Label3	Lower limit-Measurement range	Higher limit-Measurement range	Lambda (W/mK)	Volume heat capacity (MJ/m3K)	Thermal diffusivity (E-6 m2/s)	Mean temperature T (Ktr)	Delta T-Temperature rise	Calibration constant-k	Calibration constant-q	
barattolo A1	wl	T +50	1	1	2	1.2136	2.1250	0.5711	51.3919	9.4716	1	0
barattolo A1	wl	T +50	1	1	2	1.0264	2.1227	0.4835	51.3029	10.2052	1	0
barattolo A2	wl	T +50	1	1	2	1.1031	2.1211	0.5200	51.0554	9.5922	1	0
barattolo A2	wl	T +50	1	1	2	0.9981	2.1517	0.4639	51.1156	10.2280	1	0
barattolo A3	wl	T +50	1	1	2	1.0666	2.1256	0.5018	51.2025	9.6429	1	0
barattolo A3	wl	T +50	1	1	2	0.9807	2.1436	0.4575	51.2958	10.1358	1	0
barattolo A1	wl	T +30	0.2	0.2	1	1.0210	2.0378	0.5010	34.4665	9.5565	1	0
barattolo A1	wl	T +30	0.2	0.2	1	0.9193	2.0409	0.4504	34.5444	10.2213	1	0
barattolo A2	wl	T +30	1	1	2	1.0209	2.0629	0.4949	34.5004	9.6270	1	0
barattolo A2	wl	T +30	1	1	2	0.9324	2.0611	0.4524	34.5577	10.1887	1	0
barattolo A3	wl	T +30	1	1	2	1.0350	2.0552	0.5036	34.5416	9.5365	1	0
barattolo A3	wl	T +30	1	1	2	0.9374	2.0405	0.4594	34.6360	10.1904	1	0

Material	Label2	Label3	Lower limit-Measurement range	Higher limit-Measurement range	Lambda (W/mK)	Volume heat capacity (MJ/m3K)	Thermal diffusivity (1E-6 m2/s)	Mean temperature T (litr)	Delta T-Temperature rise	Calibration constant-k	Calibration constant-q	
barattolo A1	wl	T+10	0.2	0.2	1	0.9867	1.9911	0.4956	15.2867	9.6149	1	0
barattolo A1	wl	T+10	0.2	0.2	1	0.9149	1.9806	0.4619	15.4686	10.1679	1	0
barattolo A2	wl	T+10	0.2	0.2	1	1.0261	1.9901	0.5156	15.6308	9.6189	1	0
barattolo A2	wl	T+10	0.2	0.2	1	0.9386	1.9984	0.4697	15.7090	10.2176	1	0
barattolo A3	wl	T+10	0.2	0.2	1	1.0297	1.9961	0.5159	15.6595	9.5811	1	0
barattolo A3	wl	T+10	0.2	0.2	1	0.9299	1.9821	0.4691	15.7364	10.1982	1	0
barattolo A2	wl	T-15	0.3	0.3	2	2.2038	1.6012	1.3764	-1.4745	9.6879	1	0
barattolo A2	wl	T-15	0.3	0.3	2	1.9936	1.5973	1.2481	-2.0427	10.2547	1	0
barattolo A3	wl	T-15	0.3	0.3	2	2.0934	1.5039	1.3920	-3.5857	9.2144	1	0
barattolo A3	wl	T-15	0.3	0.3	2	1.8569	1.5051	1.2337	-3.8694	10.1418	1	0

Material	Label2	Label3	Lower limit-Measurement range	Higher limit-Measurement range	Lambda (W/mK)	Volume heat capacity (MJ/m ³ K)	Thermal diffusivity (1E-6 m ² /s)	Mean temperature T (hr)	Delta T-Temperature rise	Calibration constant-k	Calibration constant-q
barattolo B 1	w/	T2.1	0.2		1	0.9025	2.0269	0.4452	20.0489	9.8302	1
barattolo B 1	w/	T2.1	0.2		1	0.8903	2.0237	0.4399	20.5263	9.9468	1
barattolo B 2	w/	T2.1	0.2		1	0.8958	2.0333	0.4406	21.6705	9.8168	1
barattolo B 2	w/	T2.1	0.2		1	0.8692	2.0217	0.4299	22.0934	9.9535	1
barattolo B 3	w/	T2.1	0.2		1	0.8635	2.0455	0.4222	22.5171	9.9318	1
barattolo B 3	w/	T2.1	0.2		1	0.8647	2.0234	0.4274	22.7898	9.8681	1
barattolo B 1	w/	T2	0.2		1	0.8391	2.0023	0.4191	7.3182	9.9280	1
barattolo B 1	w/	T2	0.2		1	0.8309	1.9871	0.4181	7.5232	9.9838	1
barattolo B 2	w/	T2	0.2		1	0.8214	2.0008	0.4105	7.6395	9.8916	1
barattolo B 2	w/	T2	0.2		1	0.8313	2.0005	0.4155	7.7190	10.0125	1
barattolo B 3	w/	T2	0.2		1	0.8319	1.9982	0.4163	7.5941	9.8807	1
barattolo B 3	w/	T2	0.2		1	0.8279	1.9906	0.4159	7.6286	10.0042	1
barattolo B 5	w/	T-17	0.3		2	1.7573	1.3907	1.2636	-5.3605	9.6284	1
barattolo B 5	w/	T-17	0.3		2	1.5401	1.3888	1.1090	-5.6273	10.2661	1
barattolo B 6	w/	T-17	0.3		2	1.8509	1.3861	1.3354	-7.7942	9.6587	1
barattolo B 6	w/	T-17	0.3		2	1.6975	1.3866	1.2242	-8.3109	10.0979	1
barattolo B 7	w/	T-17	0.3		2	1.7533	1.3939	1.2579	-9.3757	9.5841	1
barattolo B 7	w/	T-17	0.3		2	1.5702	1.3917	1.1283	-9.6022	10.2102	1

Material	Label2	Label3	Lower limit-Measurement range	Higher limit-Measurement range	Lambda (W/mK)	Volume heat capacity (J/(m ³ K))	Thermal diffusivity (1E-6 m ² /s)	Mean temperature T (hr)	Delta T Temperature rise	Calibration constant-k	Calibration constant-q
barattolo B1	wf	T +40	0.2	1	0.9951	2.0838	0.4775	42.9968	9.5853	1	0
barattolo B1	wf	T +40	0.2	1	0.9291	2.0921	0.4441	43.1737	10.1305	1	0
barattolo B2	wf	T +40	0.2	1	1.0450	2.0936	0.4991	43.3407	9.7060	1	0
barattolo B2	wf	T +40	0.2	1	0.9349	2.0956	0.4461	43.3302	10.1855	1	0
barattolo B3	wf	T +40	1	2	1.0291	2.1553	0.4775	43.4108	9.6918	1	0
barattolo B3	wf	T +40	1	2	0.9391	2.0782	0.4519	43.4114	10.0604	1	0
barattolo B1	wf	T +20	0.2	1	0.9285	2.0664	0.4493	24.8744	9.5638	1	0
barattolo B1	wf	T +20	0.2	1	0.8724	2.0495	0.4257	25.0861	10.2842	1	0
barattolo B2	wf	T +20	0.2	1	0.9660	2.0504	0.4711	25.1826	9.6495	1	0
barattolo B2	wf	T +20	0.2	1	0.8812	2.1140	0.4168	25.2221	10.2309	1	0
barattolo B3	wf	T +20	0.2	1	0.9825	2.0750	0.4735	25.3475	9.7757	1	0
barattolo B3	wf	T +20	0.2	1	0.8865	2.0473	0.4330	25.2569	10.1353	1	0
barattolo B1	wf	T +2	0.2	1	0.9017	2.0023	0.4503	7.6826	9.7550	1	0
barattolo B1	wf	T +2	0.2	1	0.8490	1.9825	0.4283	7.7435	10.0876	1	0
barattolo B2	wf	T +2	0.2	1	0.9223	2.0511	0.4497	8.0003	9.7760	1	0
barattolo B2	wf	T +2	0.2	1	0.8464	2.0256	0.4179	7.9992	10.1749	1	0
barattolo B3	wf	T +2	0.2	1	0.9566	2.0160	0.4745	8.0422	9.6231	1	0
barattolo B3	wf	T +2	0.2	1	0.8542	1.9941	0.4283	8.0975	10.3142	1	0

Material	Label2	Label3	Lower limit-Measurement range	Higher limit-Measurement range	Lambda (W/mK)	Volume heat capacity (J/(m ³ K))	Thermal diffusivity (E-6 m ² /s)	Mean temperature T (hr)	Delta T Temperature rise	Calibration constant-k	Calibration constant-q
barattolo B 1	wl	T -17	0.3		2	2.0571	1.7802	1.1555	-2.3150	8.4928	1
barattolo B 1	wl	T -17	0.3		2	2.2706	1.7578	1.2917	-2.3126	10.0726	1
barattolo B 2	wl	T -17	2		6	1.7745	1.7649	1.0055	-4.6574	9.3385	1
barattolo B 2	wl	T -17	2		6	1.7387	1.7621	0.9868	-4.8449	10.0772	1
barattolo B 3	wl	T -17	0.3		2	2.2132	1.7499	1.2648	-6.0568	9.7392	1
barattolo B 3	wl	T -17	0.3		2	2.0672	1.7465	1.1836	-6.6534	10.1841	1
barattolo B 4	wl	T -17	2		6	1.7233	1.7422	0.9891	-8.0465	9.1455	1
barattolo B 4	wl	T -17	2		6	1.6920	1.7509	0.9664	-7.8648	10.0629	1
barattolo B 1	wl	T +40	1		2	1.0037	2.1322	0.4707	42.8947	9.5083	1
barattolo B 1	wl	T +40	1		2	0.9975	2.1054	0.4453	43.0965	10.1435	1
barattolo B 2	wl	T +40	0.2		1	1.0155	2.1141	0.4804	43.2538	9.6599	1
barattolo B 3	wl	T +40	0.2		1	0.9509	2.0286	0.4688	43.4917	9.7169	1

Material	Label2	Label3	Lower limit-Measurement range	Higher limit-Measurement range	Lambda (W/mK)	Volume heat capacity (MJ/m3K)	Thermal diffusivity (E-6 m2/s)	Mean temperature T (°C)	Delta T-Temperature rise	Calibration constant-k	Calibration constant-q	
baratto0B1	wl	T+20	0.2	0.2	1	0.9623	1.9465	0.4944	24.9000	9.7388	1	0
baratto0B1	wl	T+20	0.2	0.2	1	0.9012	1.9179	0.4699	24.9472	10.1030	1	0
baratto0B2	wl	T+20	0.2	0.2	1	0.9881	1.9432	0.5085	25.1639	9.7672	1	0
baratto0B2	wl	T+20	0.2	0.2	1	0.9078	1.9095	0.4754	25.1027	10.1139	1	0
baratto0B3	wl	T+20	0.2	0.2	1	1.0013	1.9220	0.5210	25.1935	9.6349	1	0
baratto0B3	wl	T+20	0.2	0.2	1	0.9019	1.9117	0.4718	25.2469	10.2271	1	0
baratto0B1	wl	T+50	1	1	2	1.0026	2.1251	0.4718	52.6127	9.4874	1	0
baratto0B1	wl	T+50	1	1	2	0.9283	2.1002	0.4420	52.8372	10.1819	1	0
baratto0B2	wl	T+50	1	1	2	0.9970	2.1100	0.4725	52.8612	9.4943	1	0
baratto0B2	wl	T+50	1	1	2	0.9250	2.1006	0.4403	53.0649	10.2077	1	0
baratto0B3	wl	T+50	0.2	0.2	1	0.9685	2.0868	0.4641	53.1488	9.6779	1	0
baratto0B3	wl	T+50	0.2	0.2	1	0.9090	2.0992	0.4330	53.2961	10.3052	1	0

Material	Label	Label3	Lower limit-Measurement range	Higher limit-Measurement range	Lambda [W/mK]	Volume heat capacity [MJ/m ³ K]	Thermal diffusivity [1E-6 m ² /s]	Mean temperature T [K]	Delta T-Temperature rise	Calibration constant-k	Calibration constant-q
barattolo B 1	wl	T +30	0.2		1	0.9736	2.0576	0.4732	34.4235	9.6314	1
barattolo B 1	wl	T +30	0.2		1	0.8958	2.0339	0.4404	34.5365	10.1709	1
barattolo B 2	wl	T +30	0.2		1	0.9728	2.0900	0.4655	34.5793	9.6457	1
barattolo B 2	wl	T +30	0.2		1	0.9019	2.0543	0.4390	34.6358	10.1259	1
barattolo B 3	wl	T +30	0.2		1	0.9805	2.0518	0.4779	34.6046	9.5753	1
barattolo B 3	wl	T +30	0.2		1	0.8975	2.0425	0.4394	34.7740	10.2560	1
barattolo B 1	wl	T +10	0.2		1	0.9576	1.9886	0.4816	15.2956	9.5772	1
barattolo B 1	wl	T +10	0.2		1	0.8921	1.9943	0.4473	15.4572	10.1939	1
barattolo B 2	wl	T +10	0.2		1	0.9990	1.9827	0.5039	15.5799	9.6646	1
barattolo B 2	wl	T +10	0.2		1	0.8928	1.9590	0.4557	15.6282	10.2270	1
barattolo B 3	wl	T +10	0.2		1	1.0019	1.9715	0.5082	15.6537	9.6463	1
barattolo B 3	wl	T +10	0.2		1	0.8993	1.9622	0.4583	15.6934	10.2222	1
barattolo B 1	wl	T -15	0.3		2	1.6201	1.4710	1.1013	-6.5777	9.6203	1
barattolo B 1	wl	T -15	0.3		2	1.6020	1.4699	1.0899	-6.7462	10.0777	1
barattolo B 2	wl	T -15	0.3		2	1.8493	1.4790	1.2503	-6.7213	9.5321	1
barattolo B 2	wl	T -15	0.3		2	1.7015	1.4733	1.1549	-6.7585	10.2535	1
barattolo B 3	wl	T -15	0.3		2	1.8642	1.4795	1.2600	-6.9800	9.5579	1
barattolo B 4	wl	T -15	0.3		2	1.7133	1.4743	1.1621	-7.0314	10.2614	1

	primo ciclo unfrozen
	primo ciclo congelato
	secondo ciclo
	secondo ciclo congelato
	terzo ciclo
	terzo ciclo congelato

Tabella 6.3 valori relativi alle misurazioni di conducibilità termica condotte sul barattolo B tramite lo strumento ISOMET 2114.

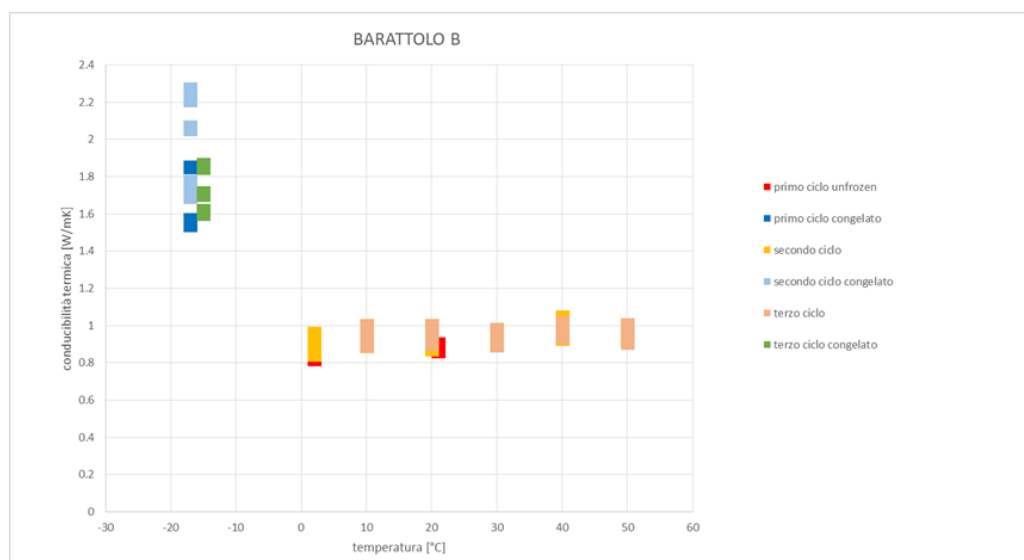


Figura 6.2 grafico conducibilità termica-temperatura. Rappresentazione di tutti i valori misurati con lo strumento ISOMET 2114 sul barattolo B ai vari step di temperatura.

Sample	ghiaia-legno						
Material	ghiaia-legno						
Dimension/ weight sample	Dimension/ weight sample (800 x 800 x50) mm						
Height	104 mm						
Start	29.03.2016 / 14:33						
End	02.04.2016 / 05:01						

Time	Heating power	T cold sample surface (°C)	T warm sample surface (°C)	Sample mean T (°C)	Temperature difference on sample (K)	Lambda (W/mK)	Instability
15:03:34	0	-8.1	11.2	1.5	19.3	0	100
15:33:29	0	-8.1	10.4	1.2	18.4	0	49.42
16:03:25	0	-8.1	9.6	0.7	17.7	0	22.75
16:33:20	0	-8.2	8.8	0.3	17	0	28.6
17:03:16	0	-8.2	8.1	-0.1	16.4	0	14.68
17:33:11	0	-8.3	7.4	-0.4	15.7	0	29.5
18:03:07	0	-8.4	6.8	-0.8	15.1	0	21.05
18:33:02	0	-8.4	6.1	-1.1	14.5	0	27.27
19:02:58	0	-8.4	5.5	-1.5	14	0	30.4
19:32:53	0	-8.5	5	-1.8	13.4	0	1.5
20:02:49	0	-8.5	4.4	-2.1	12.9	0	53.43
20:32:45	0	-8.6	3.9	-2.3	12.4	0	50.8
21:02:40	0	-8.6	3.3	-2.6	12	0	12.67
21:32:35	0	-8.7	2.9	-2.9	11.5	0	38.16
22:02:31	0.12	-8.7	2.4	-3.1	11.1	0.0046	100
22:32:26	1.63	-8.7	2.2	-3.3	10.9	0.0624	92.66
23:02:22	2.32	-8.8	2.1	-3.3	10.8	0.089	29.89
23:32:18	2.72	-8.8	2	-3.4	10.8	0.1047	15.02
00:02:13	2.84	-8.8	2	-3.4	10.8	0.1094	4.28
00:32:09	3.12	-8.8	2	-3.4	10.8	0.1201	8.98
01:02:04	3.41	-8.9	1.9	-3.5	10.8	0.1314	8.56
01:32:00	3.62	-8.9	1.9	-3.5	10.8	0.1396	5.89
02:01:55	3.79	-8.9	1.9	-3.5	10.8	0.1467	4.81
02:31:51	3.95	-8.9	1.9	-3.5	10.8	0.1529	4.06
03:01:46	4.07	-8.9	1.8	-3.5	10.7	0.1574	2.89

03:31:42	4.16	-8.9	1.8	-3.5	10.7	0.1612	2.37
04:01:41	4.32	-8.9	1.8	-3.6	10.7	0.1674	3.7
04:31:41	4.4	-8.9	1.8	-3.6	10.7	0.1707	1.9
05:01:41	4.45	-8.9	1.8	-3.6	10.7	0.1727	1.17
05:31:41	4.5	-8.9	1.8	-3.6	10.7	0.1745	1
06:01:40	4.61	-9	1.8	-3.6	10.7	0.179	2.53
06:31:41	4.65	-9	1.8	-3.6	10.7	0.1808	0.98
07:01:41	4.7	-9	1.8	-3.6	10.7	0.1826	0.98
07:31:41	4.77	-9	1.8	-3.6	10.7	0.1854	1.54
08:01:41	4.74	-9	1.7	-3.6	10.7	0.1842	0.67
08:31:41	4.81	-9	1.8	-3.6	10.7	0.1869	1.44
09:01:41	4.84	-9	1.7	-3.6	10.7	0.1879	0.57
09:31:41	4.85	-9	1.7	-3.6	10.7	0.1885	0.3
10:01:40	4.88	-9	1.7	-3.6	10.7	0.1897	0.63
10:31:41	4.9	-9	1.7	-3.6	10.7	0.1906	0.48
11:01:41	4.9	-9	1.7	-3.6	10.7	0.1903	0.16
11:31:41	21.07	-6.1	3.7	-1.2	9.8	0.9144	100
12:01:41	10.99	-4.8	5.5	0.4	10.4	0.4409	100
12:31:41	9.73	-4.7	5.7	0.5	10.4	0.3878	13.7
13:01:41	9.08	-4.6	5.8	0.6	10.5	0.3609	7.46
13:31:40	8.53	-4.6	5.9	0.7	10.5	0.3381	6.72
14:01:41	8.11	-4.5	6	0.7	10.5	0.3205	5.5
14:31:41	7.71	-4.5	6	0.8	10.5	0.3044	5.31
15:01:41	7.35	-4.5	6.1	0.8	10.6	0.2892	5.23
15:31:41	7.08	-4.4	6.1	0.9	10.6	0.2785	3.85
16:01:40	6.81	-4.4	6.2	0.9	10.6	0.2674	4.15
16:31:41	6.6	-4.4	6.2	0.9	10.6	0.259	3.26
17:01:41	6.41	-4.4	6.2	0.9	10.6	0.2512	3.08
17:31:41	6.22	-4.4	6.3	1	10.6	0.2433	3.24

18:01:41	6.09	-4.3	6.3	1	10.6	0.2381	2.18
18:31:41	5.93	-4.3	6.3	1	10.6	0.232	2.64
19:01:41	5.83	-4.3	6.3	1	10.6	0.2279	1.82
19:31:40	5.75	-4.3	6.3	1	10.7	0.2245	1.51
20:01:41	5.66	-4.3	6.3	1	10.7	0.2208	1.67
20:31:41	5.58	-4.3	6.4	1	10.7	0.2178	1.39
21:01:41	5.51	-4.3	6.4	1	10.7	0.215	1.27
21:31:41	5.44	-4.3	6.4	1	10.7	0.2121	1.4
22:01:41	5.41	-4.3	6.4	1	10.7	0.211	0.52
22:31:41	5.37	-4.3	6.4	1	10.7	0.2092	0.86
23:01:40	5.33	-4.3	6.4	1.1	10.7	0.2077	0.68
23:31:41	5.31	-4.3	6.4	1	10.7	0.2068	0.48
00:01:41	5.25	-4.3	6.4	1.1	10.7	0.2045	1.09
00:31:41	5.25	-4.3	6.4	1.1	10.7	0.2047	0.06
01:01:41	5.23	-4.3	6.4	1.1	10.7	0.2037	0.48
01:31:41	38.35	1.2	10.1	5.7	8.8	1.9152	100
02:01:41	18.52	4.4	14.4	9.4	10	0.7735	100
02:31:40	15.25	4.6	14.7	9.6	10.1	0.6258	23.62
03:01:41	13.83	4.7	14.9	9.8	10.2	0.5632	11.11
03:31:41	12.66	4.8	15.1	10	10.3	0.5123	9.93
04:01:41	11.7	4.9	15.2	10.1	10.3	0.4714	8.68
04:31:41	10.86	5	15.4	10.2	10.4	0.4356	8.21
05:01:41	10.11	5	15.5	10.3	10.4	0.404	7.83
05:31:41	9.49	5.1	15.6	10.3	10.4	0.3781	6.85
06:01:40	8.91	5.2	15.6	10.4	10.5	0.3539	6.84
06:31:41	8.46	5.2	15.7	10.5	10.5	0.3352	5.59
07:01:41	8.05	5.2	15.8	10.5	10.5	0.3182	5.34
07:31:41	7.65	5.3	15.8	10.5	10.5	0.3019	5.39
08:01:41	7.36	5.3	15.9	10.6	10.6	0.2897	4.19

08:31:41	7.05	5.3	15.9	10.6	10.6	0.2771	4.57
09:01:41	6.86	5.3	15.9	10.6	10.6	0.2693	2.9
09:31:40	6.59	5.4	16	10.7	10.6	0.2586	4.14
10:01:41	6.46	5.4	16	10.7	10.6	0.2531	2.16
10:31:41	6.27	5.4	16	10.7	10.6	0.2457	3
11:01:41	6.13	5.4	16	10.7	10.6	0.24	2.39
11:31:41	6.03	5.4	16	10.7	10.6	0.2359	1.75
12:01:40	5.93	5.4	16.1	10.7	10.6	0.2316	1.83
12:31:41	5.82	5.4	16.1	10.7	10.6	0.2274	1.87
13:01:41	5.74	5.4	16.1	10.8	10.7	0.224	1.49
13:31:41	5.7	5.4	16.1	10.8	10.7	0.2225	0.7
14:01:40	5.6	5.4	16.1	10.8	10.7	0.2184	1.85
14:31:41	5.57	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2174	0.47
15:01:41	5.53	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2157	0.79
15:31:41	5.47	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2132	1.2
16:01:41	5.46	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2127	0.2
16:31:41	5.4	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2105	1.06
17:01:41	5.4	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2104	0.04
17:31:40	5.35	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2083	1
18:01:41	5.36	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2087	0.2
18:31:41	5.3	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2066	1.03
19:01:41	5.33	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2075	0.43
19:31:41	5.3	5.5	16.1	10.8	10.7	0.2064	0.52
20:01:41	40.06	11.2	19.8	15.5	8.6	2.0644	100
20:31:41	18.85	14.3	24.3	19.3	10	0.7886	100
21:01:40	15.6	14.5	24.6	19.5	10.1	0.6415	22.93
21:31:41	14.16	14.6	24.8	19.7	10.2	0.5779	11
22:01:41	12.98	14.7	25	19.8	10.3	0.5265	9.77
22:31:41	11.98	14.8	25.1	20	10.3	0.4834	8.93

23:01:41	11.09	14.9	25.2	20.1	10.4	0.4452	8.57
23:31:41	10.39	15	25.4	20.2	10.4	0.4157	7.1
00:01:41	9.68	15	25.4	20.2	10.4	0.3859	7.73
00:31:40	9.15	15.1	25.5	20.3	10.5	0.3638	6.08
01:01:41	8.64	15.1	25.6	20.3	10.5	0.3427	6.17
01:31:41	8.24	15.1	25.6	20.4	10.5	0.3261	5.09
02:01:41	7.87	15.2	25.7	20.4	10.5	0.3107	4.93
02:31:41	7.51	15.2	25.7	20.5	10.6	0.296	4.99
03:01:41	7.27	15.2	25.8	20.5	10.6	0.2862	3.42
03:31:41	7	15.2	25.8	20.5	10.6	0.2753	3.96
04:01:40	6.78	15.3	25.8	20.5	10.6	0.2662	3.42
04:31:41	6.62	15.3	25.9	20.6	10.6	0.2599	2.43
05:01:41	6.43	15.3	25.9	20.6	10.6	0.2522	3.06
05:31:41	6.3	15.3	25.9	20.6	10.6	0.2469	2.12
06:01:41	6.19	15.3	25.9	20.6	10.6	0.2424	1.85
06:31:41	6.09	15.3	25.9	20.6	10.6	0.2381	1.8
07:01:41	5.97	15.3	26	20.6	10.6	0.2334	2.02
07:31:40	5.91	15.3	26	20.7	10.6	0.231	1.07
08:01:41	5.85	15.3	26	20.7	10.6	0.2287	0.97
08:31:41	5.77	15.3	26	20.7	10.7	0.2254	1.48
09:01:40	5.7	15.3	26	20.7	10.7	0.2226	1.25
09:31:40	5.68	15.3	26	20.7	10.7	0.2219	0.34
10:01:41	5.63	15.3	26	20.7	10.7	0.2198	0.95
10:31:41	5.62	15.4	26	20.7	10.7	0.2191	0.29
11:01:41	5.58	15.4	26	20.7	10.7	0.2177	0.65
11:31:41	5.55	15.4	26	20.7	10.7	0.2166	0.55
12:01:41	5.52	15.4	26	20.7	10.7	0.2153	0.56
12:31:41	41.25	21.1	29.6	25.4	8.5	2.1609	100
13:01:40	19.53	24.2	34.1	29.2	9.9	0.8201	100

13:31:41	16.1	24.4	34.5	29.4	10.1	0.6636	23.58
14:01:41	14.55	24.5	34.7	29.6	10.2	0.5948	11.57
14:31:41	13.37	24.6	34.9	29.7	10.2	0.5431	9.53
15:01:41	12.32	24.7	35	29.8	10.3	0.4978	9.11
15:31:41	11.41	24.8	35.1	30	10.3	0.4589	8.47
16:01:41	10.64	24.9	35.2	30	10.4	0.4262	7.67
16:31:41	9.97	24.9	35.3	30.1	10.4	0.3979	7.12
17:01:41	9.4	25	35.4	30.2	10.5	0.374	6.39
17:31:41	8.88	25	35.5	30.3	10.5	0.3523	6.16
18:01:40	8.43	25.1	35.6	30.3	10.5	0.3338	5.55
18:31:41	8.05	25.1	35.6	30.4	10.5	0.3183	4.85
19:01:41	7.71	25.1	35.7	30.4	10.5	0.3043	4.62
19:31:41	7.45	25.1	35.7	30.4	10.6	0.2936	3.64
20:01:41	7.18	25.2	35.7	30.4	10.6	0.2825	3.94
20:31:41	6.97	25.2	35.8	30.5	10.6	0.2741	3.06
21:01:41	6.8	25.2	35.8	30.5	10.6	0.2668	2.72
21:31:40	6.62	25.2	35.8	30.5	10.6	0.2597	2.73
22:01:41	6.48	25.2	35.8	30.5	10.6	0.2542	2.19
22:31:41	6.36	25.2	35.8	30.5	10.6	0.2492	1.98
23:01:41	6.24	25.2	35.9	30.5	10.6	0.2443	2.02
23:31:41	6.14	25.2	35.9	30.6	10.6	0.2403	1.65
00:01:41	6.1	25.2	35.9	30.6	10.6	0.2385	0.79
00:31:41	5.98	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2337	2.06
01:01:40	5.95	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2327	0.42
01:31:41	5.89	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2303	1.05
02:01:41	5.84	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2283	0.87
02:31:41	5.82	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2273	0.41
03:01:41	5.75	25.3	35.9	30.6	10.7	0.2247	1.16
03:31:41	5.76	25.3	35.9	30.6	10.7	0.225	0.13

04:01:41	5.69	25.3	35.9	30.6	10.7	0.2221	1.31
04:31:40	5.69	25.3	35.9	30.6	10.7	0.2221	0.01
05:01:41	5.68	25.3	35.9	30.6	10.7	0.2217	0.15

Tabella 6.4 dati relativi alla 1° prova.

Sample	ghiaia- legno						
Material	ghiaia- legno						
Dimension/ weight sample	Dimension/ weight sample (800 x 800 x50) mm						
Height	104 mm						
Start	15.04.2016 / 13:29						
End	19.04.2016 / 00:59						
Time	Heating power (W)	T cold sample surface (°C)	T warm sample surface (°C)	Sample mean T (°C)	Temperature difference on sample (K)	Lambda (W/mK)	Instability
13:59:28	0	-6.8	16.6	4.9	23.4	0	100
14:29:28	0	-7	15.9	4.4	22.8	0	43.31
14:59:28	0	-7.1	15.1	4	22.2	0	47.43
15:29:28	0	-7.2	14.2	3.5	21.4	0	35.49
15:59:28	0	-7.4	13.3	3	20.6	0	62.66
16:29:28	0	-7.5	12.3	2.4	19.8	0	71.31
16:59:28	0	-7.6	11.4	1.9	19	0	87.03
17:29:28	0	-7.7	10.5	1.4	18.2	0	3.99
17:59:28	0	-7.8	9.7	0.9	17.4	0	8.18
18:29:28	0	-7.8	8.8	0.5	16.6	0	4.2
18:59:28	0	-7.9	8	0	15.9	0	38.84
19:29:28	0	-8	7.2	-0.4	15.2	0	50.33
19:59:28	0	-8.1	6.5	-0.8	14.6	0	24.52
20:29:28	0	-8.1	5.8	-1.2	13.9	0	3.94
20:59:28	0	-8.2	5.1	-1.5	13.3	0	4.54
21:29:28	0	-8.2	4.5	-1.9	12.7	0	0.93

21:59:28	0	-8.3	3.9	-2.2	12.2	0	30.69
22:29:28	0	-8.4	3.3	-2.5	11.7	0	29.91
22:59:28	0	-8.4	2.8	-2.8	11.2	0	9.37
23:29:28	1.39	-8.5	2.4	-3	10.9	0.0531	100
23:59:28	2.36	-8.5	2.3	-3.1	10.8	0.0906	41.36
00:29:28	2.95	-8.5	2.3	-3.1	10.8	0.1136	20.21
00:59:28	3.49	-8.6	2.2	-3.2	10.8	0.1346	15.63
01:29:28	3.71	-8.6	2.2	-3.2	10.8	0.1433	6.03
01:59:28	3.97	-8.6	2.1	-3.3	10.8	0.1536	6.7
02:29:28	4.22	-8.7	2.1	-3.3	10.7	0.1634	6
02:59:28	4.43	-8.7	2	-3.3	10.7	0.1717	4.88
03:29:28	4.64	-8.7	2	-3.3	10.7	0.1804	4.78
03:59:28	4.83	-8.7	2	-3.4	10.7	0.1876	3.84
04:29:28	4.94	-8.7	2	-3.4	10.7	0.1923	2.45
04:59:28	5.1	-8.7	1.9	-3.4	10.7	0.1984	3.08
05:29:28	5.21	-8.8	1.9	-3.4	10.7	0.2028	2.17
05:59:28	5.31	-8.8	1.9	-3.4	10.7	0.2067	1.91
06:29:28	5.39	-8.8	1.9	-3.4	10.7	0.2102	1.64
06:59:28	5.47	-8.8	1.9	-3.4	10.7	0.2131	1.39
07:29:28	5.55	-8.8	1.9	-3.5	10.7	0.2167	1.63
07:59:28	5.58	-8.8	1.9	-3.5	10.7	0.2179	0.56
08:29:28	5.65	-8.8	1.9	-3.5	10.7	0.2204	1.16
08:59:28	5.69	-8.8	1.9	-3.5	10.7	0.2222	0.81
09:29:28	5.73	-8.8	1.9	-3.5	10.7	0.2239	0.74
09:59:28	5.76	-8.8	1.8	-3.5	10.7	0.2248	0.4
10:29:28	5.8	-8.8	1.8	-3.5	10.6	0.2267	0.83
10:59:28	5.83	-8.8	1.8	-3.5	10.6	0.2278	0.5
11:29:28	5.83	-8.8	1.8	-3.5	10.6	0.2279	0.01
11:59:28	21.78	-6	3.8	-1.1	9.8	0.9488	100
12:29:28	11.99	-4.7	5.6	0.4	10.3	0.4835	96.22
12:59:28	10.87	-4.6	5.7	0.6	10.4	0.4359	10.93
13:29:28	10.22	-4.6	5.8	0.6	10.4	0.4087	6.65
13:59:28	9.68	-4.5	5.9	0.7	10.4	0.386	5.89
14:29:28	9.21	-4.4	6	0.8	10.5	0.366	5.45
14:59:28	8.78	-4.4	6.1	0.8	10.5	0.3484	5.08
15:29:28	8.45	-4.4	6.1	0.9	10.5	0.3347	4.07
15:59:28	8.13	-4.3	6.2	0.9	10.5	0.3215	4.11
16:29:28	7.85	-4.3	6.2	1	10.5	0.3097	3.8
16:59:28	7.64	-4.3	6.3	1	10.5	0.3013	2.81
17:29:28	7.48	-4.2	6.3	1	10.6	0.2947	2.24
17:59:28	7.26	-4.2	6.3	1.1	10.6	0.2858	3.12

18:29:28	7.09	-4.2	6.4	1.1	10.6	0.2789	2.49
18:59:28	7	-4.2	6.4	1.1	10.6	0.275	1.4
19:29:28	6.84	-4.2	6.4	1.1	10.6	0.2688	2.29
19:59:28	6.73	-4.2	6.4	1.1	10.6	0.2642	1.76
20:29:28	6.63	-4.2	6.4	1.1	10.6	0.26	1.62
20:59:28	6.6	-4.2	6.4	1.1	10.6	0.2588	0.45
21:29:28	6.46	-4.2	6.5	1.1	10.6	0.2532	2.21
21:59:28	6.42	-4.2	6.5	1.2	10.6	0.2516	0.64
22:29:28	6.39	-4.1	6.5	1.2	10.6	0.2504	0.47
22:59:28	6.35	-4.1	6.5	1.2	10.6	0.2488	0.67
23:29:28	6.28	-4.1	6.5	1.2	10.6	0.246	1.1
23:59:28	6.26	-4.1	6.5	1.2	10.6	0.2452	0.34
00:29:28	6.26	-4.1	6.5	1.2	10.6	0.2451	0.03
00:59:28	39.08	1.4	10.1	5.8	8.7	1.9748	100
01:29:28	19.45	4.3	14.3	9.3	9.9	0.8163	100
01:59:28	16.67	4.6	14.6	9.6	10.1	0.6892	18.44
02:29:28	15.22	4.7	14.8	9.8	10.1	0.6247	10.34
02:59:28	14.05	4.8	15	9.9	10.2	0.5728	9.05
03:29:28	13.02	4.9	15.2	10.1	10.3	0.528	8.5
03:59:28	12.12	5	15.3	10.2	10.3	0.4892	7.92
04:29:28	11.32	5.1	15.4	10.3	10.3	0.4553	7.46
04:59:28	10.67	5.2	15.5	10.4	10.4	0.4273	6.54
05:29:28	10.06	5.2	15.6	10.4	10.4	0.402	6.31
05:59:28	9.58	5.3	15.7	10.5	10.4	0.3816	5.33
06:29:28	9.1	5.3	15.8	10.5	10.5	0.3616	5.54
06:59:28	8.74	5.3	15.8	10.6	10.5	0.3466	4.3
07:29:28	8.37	5.4	15.9	10.6	10.5	0.3315	4.56
07:59:28	8.1	5.4	15.9	10.7	10.5	0.3201	3.57
08:29:28	7.85	5.4	16	10.7	10.5	0.31	3.27
08:59:28	7.64	5.4	16	10.7	10.5	0.3012	2.9
09:29:28	7.41	5.5	16	10.7	10.6	0.2921	3.13
09:59:28	7.27	5.5	16	10.8	10.6	0.286	2.12
10:29:28	7.13	5.5	16.1	10.8	10.6	0.2804	1.99
10:59:28	6.98	5.5	16.1	10.8	10.6	0.2742	2.29
11:29:28	6.88	5.5	16.1	10.8	10.6	0.2701	1.5
11:59:28	6.8	5.5	16.1	10.8	10.6	0.267	1.17
12:29:28	6.69	5.5	16.1	10.8	10.6	0.2627	1.61
12:59:28	6.63	5.5	16.1	10.8	10.6	0.2602	0.96
13:29:28	6.55	5.5	16.1	10.8	10.6	0.2571	1.23
13:59:28	6.52	5.6	16.2	10.9	10.6	0.2556	0.56
14:29:28	6.46	5.6	16.2	10.9	10.6	0.2533	0.94

14:59:28	6.41	5.6	16.2	10.9	10.6	0.2513	0.77
15:29:28	6.39	5.6	16.2	10.9	10.6	0.2504	0.36
15:59:28	6.34	5.6	16.2	10.9	10.6	0.2484	0.83
16:29:28	6.33	5.6	16.2	10.9	10.6	0.248	0.15
16:59:28	6.3	5.6	16.2	10.9	10.6	0.2466	0.56
17:29:28	40.74	11.4	19.9	15.6	8.5	2.1224	100
17:59:28	19.83	14.2	24.1	19.2	9.9	0.8341	100
18:29:28	17.05	14.4	24.5	19.5	10	0.7064	18.08
18:59:28	15.61	14.6	24.7	19.6	10.1	0.6418	10.07
19:29:28	14.36	14.7	24.9	19.8	10.2	0.5864	9.44
19:59:28	13.31	14.8	25.1	19.9	10.2	0.5409	8.41
20:29:28	12.37	14.9	25.2	20.1	10.3	0.5001	8.16
20:59:28	11.57	15	25.3	20.1	10.3	0.4659	7.35
21:29:28	10.89	15	25.4	20.2	10.4	0.4367	6.68
21:59:28	10.29	15.1	25.5	20.3	10.4	0.4116	6.1
22:29:28	9.74	15.1	25.6	20.4	10.4	0.3885	5.96
22:59:28	9.29	15.2	25.6	20.4	10.5	0.3695	5.13
23:29:28	8.91	15.2	25.7	20.5	10.5	0.3537	4.46
23:59:28	8.57	15.3	25.8	20.5	10.5	0.3397	4.13
00:29:28	8.26	15.3	25.8	20.5	10.5	0.327	3.88
00:59:28	7.98	15.3	25.8	20.6	10.5	0.3151	3.78
01:29:28	7.77	15.3	25.9	20.6	10.5	0.3067	2.75
01:59:28	7.58	15.3	25.9	20.6	10.6	0.2988	2.64
02:29:28	7.39	15.4	25.9	20.6	10.6	0.2911	2.66
02:59:28	7.26	15.4	25.9	20.7	10.6	0.2858	1.83
03:29:28	7.1	15.4	26	20.7	10.6	0.2794	2.3
03:59:28	7.03	15.4	26	20.7	10.6	0.2762	1.15
04:29:28	6.9	15.4	26	20.7	10.6	0.2713	1.82
04:59:28	6.81	15.4	26	20.7	10.6	0.2673	1.5
05:29:28	6.75	15.4	26	20.7	10.6	0.265	0.84
05:59:28	6.67	15.4	26	20.7	10.6	0.2618	1.25
06:29:28	6.64	15.4	26	20.7	10.6	0.2605	0.51
06:59:28	6.59	15.4	26	20.7	10.6	0.2583	0.83
07:29:28	6.52	15.4	26	20.7	10.6	0.2558	1
07:59:28	6.5	15.4	26	20.7	10.6	0.2549	0.32
08:29:28	6.46	15.4	26	20.7	10.6	0.2533	0.65
08:59:28	6.44	15.4	26.1	20.7	10.6	0.2522	0.43
09:29:28	6.4	15.4	26.1	20.7	10.6	0.2508	0.57
09:59:28	41.89	21.3	29.7	25.5	8.4	2.2272	100
10:29:28	20.45	24.1	34	29.1	9.9	0.8628	100
10:59:28	17.43	24.3	34.3	29.3	10	0.7236	19.23

11:29:28	15.92	24.4	34.5	29.5	10.1	0.6558	10.35
11:59:28	14.64	24.6	34.7	29.7	10.2	0.599	9.47
12:29:28	13.56	24.7	34.9	29.8	10.2	0.5516	8.61
12:59:28	12.63	24.8	35.1	29.9	10.3	0.5113	7.89
13:29:28	11.8	24.9	35.2	30	10.3	0.4757	7.48
13:59:28	11.09	24.9	35.3	30.1	10.4	0.4455	6.77
14:29:28	10.47	25	35.4	30.2	10.4	0.4189	6.34
14:59:28	9.95	25.1	35.5	30.3	10.4	0.3973	5.44
15:29:28	9.48	25.1	35.5	30.3	10.4	0.3775	5.25
15:59:28	9.08	25.1	35.6	30.4	10.5	0.3607	4.65
16:29:28	8.73	25.2	35.7	30.4	10.5	0.3461	4.23
16:59:28	8.42	25.2	35.7	30.4	10.5	0.3333	3.85
17:29:28	8.17	25.2	35.7	30.5	10.5	0.323	3.16
17:59:28	7.92	25.2	35.8	30.5	10.5	0.3127	3.31
18:29:28	7.74	25.3	35.8	30.5	10.5	0.3055	2.34
18:59:28	7.55	25.3	35.8	30.5	10.6	0.2976	2.66
19:29:28	7.4	25.3	35.8	30.6	10.6	0.2914	2.15
19:59:28	7.26	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2858	1.96
20:29:28	7.16	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2817	1.43
20:59:28	7.06	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2776	1.5
21:29:28	6.96	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2736	1.46
21:59:28	6.89	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2706	1.09
22:29:28	6.82	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2678	1.07
22:59:28	6.77	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2659	0.69
23:29:28	6.72	25.3	35.9	30.6	10.6	0.2636	0.87
23:59:28	6.66	25.4	36	30.7	10.6	0.2612	0.94
00:29:28	6.63	25.3	36	30.6	10.6	0.2603	0.34
00:59:28	6.6	25.4	36	30.7	10.6	0.2589	0.54

Tabella 6.5 dati relativi alla 2° prova.

<i>Sample</i>	<i>ghiaia- legno</i>						
<i>Material</i>	<i>ghiaia- legno</i>						
<i>Dimension/ weight sample</i>	<i>Dimension/ weight sample (800 x 800 x50) mm</i>						

<i>Height</i>	<i>104 mm</i>						
<i>Time</i>	<i>Heating power (W)</i>	<i>T cold sample surface (°C)</i>	<i>T warm sample surface (°C)</i>	<i>Sample mean T (°C)</i>	<i>Temperature difference on sample (K)</i>	<i>Lambda (W/mK)</i>	<i>Instability</i>
<i>14:31:31</i>	<i>0</i>	<i>-5.9</i>	<i>13.4</i>	<i>3.8</i>	<i>19.3</i>	<i>0</i>	<i>100</i>
<i>15:01:31</i>	<i>0</i>	<i>-6.3</i>	<i>12.9</i>	<i>3.3</i>	<i>19.2</i>	<i>0</i>	<i>31.87</i>
<i>15:31:31</i>	<i>0</i>	<i>-6.5</i>	<i>12.3</i>	<i>2.9</i>	<i>18.7</i>	<i>0</i>	<i>61.52</i>
<i>16:01:31</i>	<i>0</i>	<i>-6.6</i>	<i>11.5</i>	<i>2.4</i>	<i>18.1</i>	<i>0</i>	<i>7.64</i>
<i>16:31:31</i>	<i>0</i>	<i>-6.8</i>	<i>10.7</i>	<i>1.9</i>	<i>17.4</i>	<i>0</i>	<i>20.5</i>
<i>17:01:31</i>	<i>0</i>	<i>-6.9</i>	<i>9.8</i>	<i>1.5</i>	<i>16.7</i>	<i>0</i>	<i>17.59</i>
<i>17:31:31</i>	<i>0</i>	<i>-7</i>	<i>9</i>	<i>1</i>	<i>16</i>	<i>0</i>	<i>3.43</i>
<i>18:01:31</i>	<i>0</i>	<i>-7.1</i>	<i>8.2</i>	<i>0.5</i>	<i>15.3</i>	<i>0</i>	<i>0.52</i>
<i>18:31:31</i>	<i>0</i>	<i>-7.3</i>	<i>7.4</i>	<i>0.1</i>	<i>14.7</i>	<i>0</i>	<i>26.17</i>
<i>19:01:31</i>	<i>0</i>	<i>-7.4</i>	<i>6.7</i>	<i>-0.3</i>	<i>14.1</i>	<i>0</i>	<i>26.09</i>
<i>19:31:31</i>	<i>0</i>	<i>-7.5</i>	<i>6</i>	<i>-0.7</i>	<i>13.5</i>	<i>0</i>	<i>20.02</i>
<i>20:01:31</i>	<i>0</i>	<i>-7.5</i>	<i>5.3</i>	<i>-1.1</i>	<i>12.9</i>	<i>0</i>	<i>23.93</i>
<i>20:31:31</i>	<i>0</i>	<i>-7.6</i>	<i>4.7</i>	<i>-1.5</i>	<i>12.3</i>	<i>0</i>	<i>20.68</i>

<i>21:01:31</i>	<i>0</i>	<i>-7.7</i>	<i>4.1</i>	<i>-1.8</i>	<i>11.8</i>	<i>0</i>	<i>0.13</i>
<i>21:31:31</i>	<i>0</i>	<i>-7.8</i>	<i>3.5</i>	<i>-2.1</i>	<i>11.3</i>	<i>0</i>	<i>1.76</i>
<i>22:01:31</i>	<i>0.65</i>	<i>-7.9</i>	<i>3</i>	<i>-2.4</i>	<i>10.9</i>	<i>0.025</i>	<i>100</i>
<i>22:31:31</i>	<i>1.9</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.8</i>	<i>-2.6</i>	<i>10.7</i>	<i>0.0736</i>	<i>66.1</i>
<i>23:01:31</i>	<i>2.76</i>	<i>-8</i>	<i>2.7</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.6</i>	<i>0.1079</i>	<i>31.72</i>
<i>23:31:31</i>	<i>3.44</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.6</i>	<i>0.1357</i>	<i>20.52</i>
<i>00:01:31</i>	<i>3.49</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.6</i>	<i>0.1374</i>	<i>1.25</i>
<i>00:31:31</i>	<i>3.48</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.6</i>	<i>0.1373</i>	<i>0.1</i>
<i>01:01:31</i>	<i>3.56</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1406</i>	<i>2.34</i>
<i>01:31:31</i>	<i>3.57</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1407</i>	<i>0.12</i>
<i>02:01:31</i>	<i>3.61</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1424</i>	<i>1.15</i>
<i>02:31:31</i>	<i>3.62</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1428</i>	<i>0.32</i>
<i>03:01:31</i>	<i>3.62</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.6</i>	<i>10.5</i>	<i>0.143</i>	<i>0.09</i>
<i>03:31:31</i>	<i>3.63</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1434</i>	<i>0.32</i>
<i>04:01:31</i>	<i>3.65</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1441</i>	<i>0.44</i>
<i>04:31:31</i>	<i>3.65</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1439</i>	<i>0.08</i>
<i>05:01:31</i>	<i>3.66</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1446</i>	<i>0.43</i>
<i>05:31:31</i>	<i>3.67</i>	<i>-7.9</i>	<i>2.6</i>	<i>-2.7</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1447</i>	<i>0.12</i>

06:01:31	3.68	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1453	0.37
06:31:31	3.68	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1452	0.03
07:01:31	3.7	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.146	0.56
07:31:31	3.7	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1461	0.02
08:01:31	3.7	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1459	0.12
08:31:31	13.86	-5.8	3.6	-1.1	9.4	0.625	100
09:01:31	9.31	-4.9	5	0.1	9.9	0.3908	59.92

Tabella 6.6 dati relativi alle 3° prova.

Sample	ghiaia-legno						
Material	ghiaia-legno						
Dimension / weight sample	Dimension/ weight sample (800 x 800 x50) mm						
Height	104 mm						
Start	22.04.2016 / 13:21						
End	26.04.2016 / 17:50						
Time	Heating power (W)	T cold sample surface (°C)	T warm sample surface (°C)	Sample mean T (°C)	Temperature difference on sample (K)	Lambda (W/mK)	Instability
13:51:11	0	4.7	28.7	16.7	23.9	0	100
14:21:11	0	4.2	27.9	16.1	23.8	0	27.47
14:51:11	0	3.9	27	15.5	23.1	0	11.98
15:21:11	0	3.7	26	14.9	22.3	0	0.64
15:51:11	0	3.6	25	14.3	21.4	0	11.42

16:21:11	0	3.4	23.9	13.7	20.6	0	13.31
16:51:11	0	3.2	22.9	13.1	19.7	0	38.51
17:21:11	0	3.1	21.9	12.5	18.9	0	33.83
17:51:11	0	2.9	21	11.9	18.1	0	24.44
18:21:11	0	2.8	20.1	11.4	17.3	0	23.34
18:51:11	0	2.6	19.2	10.9	16.5	0	17
19:21:11	0	2.5	18.3	10.4	15.8	0	46.05
19:51:11	0	2.4	17.5	10	15.1	0	35.82
20:21:11	0	2.3	16.8	9.5	14.5	0	12.08
20:51:11	0	2.2	16	9.1	13.8	0	4.02
21:21:11	0	2.1	15.4	8.7	13.2	0	22.3
21:51:11	0	2	14.7	8.4	12.7	0	9.82
22:21:11	0	1.9	14	8	12.1	0	0.05
22:51:11	0	1.8	13.4	7.6	11.6	0	11.38
23:21:11	0.13	1.8	12.8	7.3	11.1	0.0048	100
23:51:11	1.59	1.7	12.5	7.1	10.8	0.0615	92.23
00:21:11	2.36	1.6	12.3	7	10.7	0.092	33.18
00:51:11	2.97	1.6	12.2	6.9	10.6	0.1162	20.85
01:21:11	3.49	1.5	12	6.8	10.6	0.1375	15.47
01:51:11	3.98	1.4	11.9	6.7	10.5	0.1576	12.78
02:21:11	4.4	1.4	11.9	6.6	10.5	0.1753	10.08
02:51:11	4.81	1.4	11.8	6.6	10.4	0.1921	8.74
03:21:11	5.15	1.3	11.7	6.5	10.4	0.2065	6.96
03:51:11	5.47	1.3	11.6	6.5	10.3	0.2203	6.25
04:21:11	5.74	1.3	11.6	6.4	10.3	0.2317	4.93
04:51:11	6.01	1.2	11.5	6.4	10.3	0.2434	4.82
05:21:11	6.23	1.2	11.5	6.3	10.2	0.2527	3.67
05:51:11	6.44	1.2	11.4	6.3	10.2	0.262	3.57
06:21:11	6.63	1.2	11.4	6.3	10.2	0.2703	3.05

06:51:11	6.79	1.2	11.3	6.2	10.2	0.2773	2.52
07:21:11	6.95	1.1	11.3	6.2	10.2	0.2844	2.52
07:51:11	7.08	1.1	11.3	6.2	10.2	0.2902	1.98
08:21:11	7.21	1.1	11.3	6.2	10.1	0.2958	1.92
08:51:11	7.32	1.1	11.2	6.2	10.1	0.3005	1.54
09:21:11	7.42	1.1	11.2	6.2	10.1	0.3049	1.47
09:51:11	7.52	1.1	11.2	6.1	10.1	0.3094	1.43
10:21:11	7.59	1.1	11.2	6.1	10.1	0.3124	0.98
10:51:11	7.66	1.1	11.2	6.1	10.1	0.3159	1.1
11:21:11	7.73	1.1	11.1	6.1	10.1	0.3189	0.94
11:51:11	7.79	1.1	11.1	6.1	10.1	0.3215	0.83
12:21:11	7.84	1.1	11.1	6.1	10.1	0.324	0.76
12:51:11	7.89	1.1	11.1	6.1	10.1	0.3259	0.59
13:21:11	7.92	1	11.1	6.1	10.1	0.3275	0.49
13:51:11	7.97	1	11.1	6.1	10.1	0.3296	0.62
14:21:11	8	1	11.1	6.1	10.1	0.331	0.43
14:51:11	8.04	1	11.1	6.1	10.1	0.3326	0.49
15:21:11	8.06	1	11.1	6.1	10	0.3339	0.39
15:51:11	8.09	1	11.1	6.1	10	0.3349	0.3
16:21:11	8.1	1	11.1	6	10	0.3357	0.24
16:51:11	8.15	1	11.1	6	10	0.3376	0.57
17:21:11	8.15	1	11.1	6	10	0.3376	0.01
17:51:11	8.16	1	11.1	6	10	0.3383	0.21
18:21:11	16.3	2.7	11.8	7.3	9.1	0.7507	100
18:51:11	12.73	3.5	13	8.2	9.5	0.5548	35.3
19:21:11	11.79	3.5	13.2	8.3	9.6	0.5086	9.09
19:51:11	11.43	3.6	13.3	8.4	9.7	0.491	3.58
20:21:11	11.12	3.6	13.3	8.5	9.7	0.476	3.16
20:51:11	10.87	3.6	13.4	8.5	9.7	0.4641	2.57

21:21:11	10.61	3.7	13.4	8.6	9.8	0.4517	2.73
21:51:11	10.37	3.7	13.5	8.6	9.8	0.4402	2.61
22:21:11	10.18	3.7	13.5	8.6	9.8	0.4313	2.07
22:51:11	9.98	3.7	13.6	8.7	9.8	0.4222	2.16
23:21:11	9.84	3.8	13.6	8.7	9.9	0.4152	1.67
23:51:11	9.68	3.8	13.6	8.7	9.9	0.408	1.78
00:21:11	9.55	3.8	13.7	8.7	9.9	0.402	1.48
00:51:11	9.43	3.8	13.7	8.7	9.9	0.3964	1.41
01:21:11	9.34	3.8	13.7	8.8	9.9	0.392	1.15
01:51:11	9.22	3.8	13.7	8.8	9.9	0.3867	1.36
02:21:11	9.14	3.8	13.8	8.8	9.9	0.3828	1.01
02:51:11	9.07	3.8	13.8	8.8	9.9	0.3797	0.82
03:21:11	8.98	3.8	13.8	8.8	9.9	0.3757	1.06
03:51:11	8.94	3.8	13.8	8.8	10	0.3735	0.6
04:21:11	8.88	3.9	13.8	8.8	10	0.371	0.66
04:51:11	8.82	3.9	13.8	8.8	10	0.3683	0.74
05:21:11	8.78	3.9	13.8	8.9	10	0.3662	0.56
05:51:11	8.73	3.9	13.8	8.9	10	0.364	0.62
06:21:11	8.7	3.9	13.9	8.9	10	0.3628	0.33
06:51:11	8.67	3.9	13.9	8.9	10	0.3614	0.38
07:21:11	8.64	3.9	13.9	8.9	10	0.3598	0.44
07:51:11	8.59	3.9	13.9	8.9	10	0.3579	0.54
08:21:11	8.58	3.9	13.9	8.9	10	0.3574	0.12
08:51:11	8.57	3.9	13.9	8.9	10	0.3569	0.14
09:21:11	14.01	5	14.4	9.7	9.4	0.6246	100
09:51:11	11.57	5.6	15.2	10.4	9.7	0.4977	25.49
10:21:11	10.91	5.6	15.3	10.5	9.7	0.466	6.81
10:51:11	10.64	5.6	15.4	10.5	9.8	0.4533	2.81
11:21:11	10.42	5.6	15.4	10.5	9.8	0.4428	2.36

11:51:11	10.23	5.7	15.5	10.6	9.8	0.4337	2.11
12:21:11	10.04	5.7	15.5	10.6	9.8	0.4246	2.13
12:51:11	9.88	5.7	15.5	10.6	9.9	0.417	1.82
13:21:11	9.72	5.7	15.6	10.6	9.9	0.4096	1.81
13:51:11	9.58	5.7	15.6	10.7	9.9	0.4033	1.56
14:21:11	9.47	5.7	15.6	10.7	9.9	0.3981	1.32
14:51:11	9.36	5.8	15.7	10.7	9.9	0.393	1.3
15:21:11	9.26	5.8	15.7	10.7	9.9	0.3885	1.15
15:51:11	9.17	5.8	15.7	10.7	9.9	0.3844	1.06
16:21:11	9.11	5.8	15.7	10.8	9.9	0.3814	0.78
16:51:11	9.03	5.8	15.7	10.8	9.9	0.3778	0.97
17:21:11	8.97	5.8	15.7	10.8	9.9	0.375	0.73
17:51:11	8.9	5.8	15.8	10.8	10	0.3719	0.82
18:21:11	8.85	5.8	15.8	10.8	10	0.3695	0.67
18:51:11	8.8	5.8	15.8	10.8	10	0.3674	0.56
19:21:11	8.77	5.8	15.8	10.8	10	0.3659	0.41
19:51:11	8.73	5.8	15.8	10.8	10	0.3641	0.5
20:21:11	8.69	5.8	15.8	10.8	10	0.3624	0.46
20:51:11	8.66	5.8	15.8	10.8	10	0.361	0.38
21:21:11	8.63	5.8	15.8	10.8	10	0.3595	0.42
21:51:11	8.62	5.8	15.8	10.8	10	0.359	0.15
22:21:11	8.58	5.8	15.8	10.8	10	0.3573	0.48
22:51:11	8.57	5.8	15.8	10.8	10	0.3568	0.14
23:21:11	8.55	5.8	15.8	10.8	10	0.3560	0.21
23:51:11	36.12	11.5	18.5	15	7	2.3616	100
00:21:11	24.26	14.2	22.6	18.4	8.3	1.2152	94.34
00:51:11	20.73	14.4	23.1	18.7	8.7	0.993	22.37
01:21:11	19.47	14.5	23.3	18.9	8.8	0.9187	8.09
01:51:11	18.37	14.6	23.6	19.1	8.9	0.8554	7.4

02:21:11	17.39	14.8	23.8	19.3	9	0.8001	6.91
02:51:11	16.52	14.9	24	19.4	9.1	0.7521	6.38
03:21:11	15.69	15	24.2	19.6	9.2	0.7079	6.24
03:51:11	14.95	15	24.3	19.7	9.3	0.6687	5.86
04:21:11	14.32	15.1	24.5	19.8	9.4	0.6357	5.19
04:51:11	13.73	15.2	24.6	19.9	9.4	0.6054	5.02
05:21:11	13.22	15.2	24.7	20	9.5	0.5797	4.42
05:51:11	12.73	15.3	24.8	20.1	9.5	0.5552	4.41
06:21:11	12.32	15.3	24.9	20.1	9.6	0.5346	3.87
06:51:11	11.95	15.4	25	20.2	9.6	0.5164	3.52
07:21:11	11.59	15.4	25.1	20.2	9.7	0.4989	3.5
07:51:11	11.29	15.4	25.1	20.3	9.7	0.4845	2.96
08:21:11	11.02	15.5	25.2	20.3	9.7	0.4714	2.78
08:51:11	10.77	15.5	25.2	20.4	9.8	0.4595	2.59
09:21:11	10.56	15.5	25.3	20.4	9.8	0.4491	2.31
09:51:11	10.35	15.5	25.3	20.4	9.8	0.4394	2.23
10:21:11	10.17	15.6	25.4	20.5	9.8	0.4308	1.99
10:51:11	10.01	15.6	25.4	20.5	9.8	0.4234	1.75
11:21:11	9.86	15.6	25.4	20.5	9.9	0.4166	1.63
11:51:11	9.72	15.6	25.5	20.5	9.9	0.41	1.61
12:21:11	9.6	15.6	25.5	20.5	9.9	0.4043	1.4
12:51:11	9.49	15.6	25.5	20.6	9.9	0.3993	1.25
13:21:11	9.4	15.6	25.5	20.6	9.9	0.3951	1.07
13:51:11	9.32	15.6	25.5	20.6	9.9	0.3913	0.96
14:21:11	9.24	15.6	25.6	20.6	9.9	0.3877	0.94
14:51:11	9.17	15.7	25.6	20.6	9.9	0.3845	0.83
15:21:11	9.12	15.7	25.6	20.6	9.9	0.382	0.66
15:51:11	9.04	15.7	25.6	20.6	9.9	0.3784	0.95
16:21:11	9	15.7	25.6	20.6	9.9	0.3765	0.52

16:51:11	8.96	15.7	25.6	20.7	9.9	0.3748	0.45
17:21:11	8.93	15.7	25.6	20.7	10	0.3731	0.47
17:51:11	8.89	15.7	25.6	20.7	10	0.3715	0.42
18:21:11	8.85	15.7	25.6	20.7	10	0.3695	0.53
18:51:11	8.83	15.7	25.7	20.7	10	0.3684	0.29
19:21:11	8.79	15.7	25.7	20.7	10	0.3668	0.45
19:51:11	8.77	15.7	25.7	20.7	10	0.3659	0.23
20:21:11	8.75	15.7	25.7	20.7	10	0.3649	0.28
20:51:11	36.99	21.4	28.3	24.8	6.9	2.4661	100
21:21:11	24.84	24.1	32.4	28.2	8.3	1.2539	96.68
21:51:11	21.2	24.2	32.9	28.6	8.6	1.0214	22.76
22:21:11	19.89	24.4	33.2	28.8	8.8	0.943	8.31
22:51:11	18.74	24.5	33.4	29	8.9	0.8764	7.61
23:21:11	17.71	24.6	33.6	29.1	9	0.818	7.13
23:51:11	16.79	24.8	33.9	29.3	9.1	0.767	6.65
00:21:11	15.97	24.9	34	29.4	9.2	0.7227	6.13
00:51:11	15.23	24.9	34.2	29.6	9.3	0.6834	5.75
01:21:11	14.57	25	34.3	29.7	9.3	0.6488	5.33
01:51:11	13.97	25.1	34.5	29.8	9.4	0.6178	5.02
02:21:11	13.43	25.1	34.6	29.9	9.5	0.5903	4.65
02:51:11	12.95	25.2	34.7	29.9	9.5	0.5661	4.29
03:21:11	12.53	25.2	34.8	30	9.6	0.545	3.88
03:51:11	12.14	25.3	34.9	30.1	9.6	0.5258	3.65
04:21:11	11.79	25.3	34.9	30.1	9.6	0.5087	3.36
04:51:11	11.48	25.3	35	30.2	9.7	0.4934	3.09
05:21:11	11.2	25.4	35.1	30.2	9.7	0.4801	2.78
05:51:11	10.96	25.4	35.1	30.3	9.7	0.4685	2.48
06:21:11	10.73	25.4	35.2	30.3	9.8	0.4576	2.37
06:51:11	10.51	25.4	35.2	30.3	9.8	0.4471	2.36

07:21:11	10.35	25.4	35.2	30.3	9.8	0.4394	1.74
07:51:11	10.18	25.5	35.3	30.4	9.8	0.4314	1.87
08:21:11	10.02	25.5	35.3	30.4	9.8	0.4241	1.72
08:51:11	9.9	25.5	35.3	30.4	9.8	0.4183	1.38
09:21:11	9.79	25.5	35.4	30.4	9.9	0.4131	1.25
09:51:11	9.67	25.5	35.4	30.4	9.9	0.4077	1.34
10:21:11	9.58	25.5	35.4	30.5	9.9	0.4033	1.07
10:51:11	9.49	25.5	35.4	30.5	9.9	0.3993	1.01
11:21:11	9.42	25.5	35.4	30.5	9.9	0.396	0.84
11:51:11	9.35	25.5	35.4	30.5	9.9	0.3928	0.81
12:21:11	9.29	25.5	35.5	30.5	9.9	0.3898	0.76
12:51:11	9.23	25.6	35.5	30.5	9.9	0.3872	0.67
13:21:11	9.18	25.6	35.5	30.5	9.9	0.3847	0.65
13:51:11	9.15	25.6	35.5	30.5	9.9	0.3832	0.4
14:20:37	9.11	25.6	35.5	30.5	9.9	0.3816	0.41
14:50:32	9.06	25.6	35.5	30.5	9.9	0.379	0.68
15:20:28	9.04	25.6	35.5	30.5	9.9	0.3782	0.23
15:50:23	9	25.6	35.5	30.6	9.9	0.3764	0.46
16:20:19	8.98	25.6	35.5	30.6	9.9	0.3756	0.23
16:50:14	8.95	25.6	35.5	30.6	10	0.3743	0.34
17:20:10	8.93	25.6	35.5	30.6	10	0.3735	0.24
17:50:05	8.91	25.6	35.5	30.6	10	0.3725	0.26

Tabella 6.7 dati relativi alla 3° prova.

Sample	ghiaia-legno					
Material	ghiaia-legno					
Dimension / weight sample	Dimension/ weight sample (800 x 800 x50) mm					
Height	104 mm					

<i>Start</i>	27.04.2016 / 14:01						
<i>Time</i>	<i>Heating power (W)</i>	<i>T cold sample surface (°C)</i>	<i>T warm sample surface (°C)</i>	<i>Sample mean T (°C)</i>	<i>Temperature difference on sample (K)</i>	<i>Lambda (W/mK)</i>	<i>Instability</i>
14:31:31	0	-5.9	13.4	3.8	19.3	0	100
15:01:31	0	-6.3	12.9	3.3	19.2	0	31.87
15:31:31	0	-6.5	12.3	2.9	18.7	0	61.52
16:01:31	0	-6.6	11.5	2.4	18.1	0	7.64
16:31:31	0	-6.8	10.7	1.9	17.4	0	20.5
17:01:31	0	-6.9	9.8	1.5	16.7	0	17.59
17:31:31	0	-7	9	1	16	0	3.43
18:01:31	0	-7.1	8.2	0.5	15.3	0	0.52
18:31:31	0	-7.3	7.4	0.1	14.7	0	26.17
19:01:31	0	-7.4	6.7	-0.3	14.1	0	26.09
19:31:31	0	-7.5	6	-0.7	13.5	0	20.02
20:01:31	0	-7.5	5.3	-1.1	12.9	0	23.93
20:31:31	0	-7.6	4.7	-1.5	12.3	0	20.68
21:01:31	0	-7.7	4.1	-1.8	11.8	0	0.13
21:31:31	0	-7.8	3.5	-2.1	11.3	0	1.76
22:01:31	0.65	-7.9	3	-2.4	10.9	0.025	100
22:31:31	1.9	-7.9	2.8	-2.6	10.7	0.0736	66.1
23:01:31	2.76	-8	2.7	-2.7	10.6	0.1079	31.72
23:31:31	3.44	-7.9	2.6	-2.7	10.6	0.1357	20.52
00:01:31	3.49	-7.9	2.6	-2.7	10.6	0.1374	1.25
00:31:31	3.48	-7.9	2.6	-2.7	10.6	0.1373	0.1
01:01:31	3.56	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1406	2.34
01:31:31	3.57	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1407	0.12

02:01:31	3.61	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1424	1.15
02:31:31	3.62	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1428	0.32
03:01:31	3.62	-7.9	2.6	-2.6	10.5	0.143	0.09
03:31:31	3.63	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1434	0.32
04:01:31	3.65	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1441	0.44
04:31:31	3.65	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1439	0.08
05:01:31	3.66	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1446	0.43
05:31:31	3.67	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1447	0.12
06:01:31	3.68	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1453	0.37
06:31:31	3.68	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1452	0.03
07:01:31	3.7	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.146	0.56
07:31:31	3.7	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1461	0.02
08:01:31	3.7	-7.9	2.6	-2.7	10.5	0.1459	0.12
08:31:31	13.86	-5.8	3.6	-1.1	9.4	0.625	100
09:01:31	9.31	-4.9	5	0.1	9.9	0.3908	59.92
09:31:31	8.36	-4.9	5.2	0.1	10	0.3472	12.55
10:01:31	8.23	-4.8	5.2	0.2	10	0.3415	1.67
10:31:31	8.2	-4.8	5.2	0.2	10	0.3399	0.49
11:01:31	8.18	-4.8	5.2	0.2	10	0.3389	0.28
11:31:31	8.19	-4.8	5.2	0.2	10	0.3396	0.18
12:01:31	21.52	-2	6.6	2.3	8.6	1.0693	100
12:31:31	15.38	-0.8	8.4	3.8	9.3	0.6911	54.73
13:01:31	14.2	-0.8	8.6	3.9	9.4	0.6293	9.82

Tabella 6.8 dati relativi alla 3° prova.

<i>Sample</i>	<i>ghiaia- legno</i>						
<i>Material</i>	<i>ghiaia- legno</i>						

<i>Dimension/ weight sample</i>	<i>Dimension/ weight sample (800 x 800 x50) mm</i>						
<i>Height</i>	<i>104 mm</i>						
<i>Start</i>	<i>29.04.2016 / 09:13</i>						
<i>End</i>	<i>30.04.2016 / 02:13</i>						
<i>Time</i>	<i>Heating power (W)</i>	<i>T cold sample surface (°C)</i>	<i>T warm sample surface (°C)</i>	<i>Sample mean T (°C)</i>	<i>Temperature difference on sample (K)</i>	<i>Lambda (W/mK)</i>	<i>Instability</i>
<i>09:43:37</i>	<i>7.85</i>	<i>-4.9</i>	<i>5.2</i>	<i>0.1</i>	<i>10.1</i>	<i>0.3438</i>	<i>100</i>
<i>10:13:37</i>	<i>3.81</i>	<i>-5.3</i>	<i>5.2</i>	<i>0</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1506</i>	<i>100</i>
<i>10:43:37</i>	<i>4.43</i>	<i>-5.4</i>	<i>5.1</i>	<i>-0.2</i>	<i>10.4</i>	<i>0.1765</i>	<i>14.64</i>
<i>11:13:37</i>	<i>5</i>	<i>-5.5</i>	<i>4.9</i>	<i>-0.3</i>	<i>10.4</i>	<i>0.2003</i>	<i>11.92</i>
<i>11:43:37</i>	<i>5.46</i>	<i>-5.5</i>	<i>4.8</i>	<i>-0.3</i>	<i>10.3</i>	<i>0.2199</i>	<i>8.92</i>
<i>12:13:37</i>	<i>5.86</i>	<i>-5.5</i>	<i>4.8</i>	<i>-0.4</i>	<i>10.3</i>	<i>0.2368</i>	<i>7.13</i>
<i>12:43:37</i>	<i>5.98</i>	<i>-5.6</i>	<i>4.7</i>	<i>-0.4</i>	<i>10.3</i>	<i>0.242</i>	<i>2.15</i>
<i>13:13:37</i>	<i>6.17</i>	<i>-5.6</i>	<i>4.7</i>	<i>-0.5</i>	<i>10.3</i>	<i>0.2502</i>	<i>3.26</i>
<i>13:43:37</i>	<i>6.37</i>	<i>-5.6</i>	<i>4.6</i>	<i>-0.5</i>	<i>10.2</i>	<i>0.2589</i>	<i>3.35</i>
<i>14:13:37</i>	<i>6.51</i>	<i>-5.6</i>	<i>4.6</i>	<i>-0.5</i>	<i>10.2</i>	<i>0.2652</i>	<i>2.4</i>
<i>14:43:37</i>	<i>6.66</i>	<i>-5.6</i>	<i>4.6</i>	<i>-0.5</i>	<i>10.2</i>	<i>0.2714</i>	<i>2.26</i>
<i>15:13:37</i>	<i>6.73</i>	<i>-5.6</i>	<i>4.6</i>	<i>-0.5</i>	<i>10.2</i>	<i>0.2745</i>	<i>1.13</i>
<i>15:43:37</i>	<i>6.73</i>	<i>-5.6</i>	<i>4.6</i>	<i>-0.5</i>	<i>10.2</i>	<i>0.2746</i>	<i>0.04</i>
<i>16:13:37</i>	<i>6.75</i>	<i>-5.6</i>	<i>4.6</i>	<i>-0.5</i>	<i>10.2</i>	<i>0.2753</i>	<i>0.28</i>
<i>16:43:37</i>	<i>4.25</i>	<i>-6.1</i>	<i>4.4</i>	<i>-0.9</i>	<i>10.5</i>	<i>0.1694</i>	<i>100</i>
<i>17:13:37</i>	<i>5.16</i>	<i>-6.4</i>	<i>4</i>	<i>-1.2</i>	<i>10.4</i>	<i>0.2073</i>	<i>18.27</i>
<i>17:43:37</i>	<i>5.61</i>	<i>-6.4</i>	<i>3.9</i>	<i>-1.2</i>	<i>10.3</i>	<i>0.226</i>	<i>8.29</i>
<i>18:13:37</i>	<i>5.71</i>	<i>-6.4</i>	<i>4</i>	<i>-1.2</i>	<i>10.3</i>	<i>0.2303</i>	<i>1.87</i>

18:43:37	5.66	-6.4	4	-1.2	10.3	0.2282	0.93
19:13:37	5.67	-6.4	3.9	-1.2	10.3	0.2289	0.28
19:43:37	5.7	-6.4	4	-1.2	10.3	0.23	0.5
20:13:37	5.72	-6.4	3.9	-1.2	10.3	0.2309	0.38
20:43:37	5.7	-6.4	4	-1.2	10.3	0.2299	0.41
21:13:37	5.71	-6.4	3.9	-1.2	10.3	0.2306	0.3
21:43:37	5.73	-6.4	3.9	-1.2	10.3	0.2312	0.25

Tabella 6.9 dati relativi alle 3° prova.

data e ora	T (°C)	data e ora	T (°C)	data e ora	T (°C)
01/02/2012 00	-0.3	06/02/2012 00	-6.3	11/02/2012 00	-2.3
01/02/2012 01	-0.4	06/02/2012 01	-7.2	11/02/2012 01	-2.1
01/02/2012 02	-0.5	06/02/2012 02	-7.4	11/02/2012 02	-2.4
01/02/2012 03	-0.7	06/02/2012 03	-7.3	11/02/2012 03	-2.2
01/02/2012 04	-0.6	06/02/2012 04	-8.2	11/02/2012 04	-1.9
01/02/2012 05	-0.4	06/02/2012 05	-9.1	11/02/2012 05	-1.9
01/02/2012 06	0.2	06/02/2012 06	-9.4	11/02/2012 06	-2.1
01/02/2012 07	0.1	06/02/2012 07	-10	11/02/2012 07	-3
01/02/2012 08	-0.2	06/02/2012 08	-10.6	11/02/2012 08	-3.7
01/02/2012 09	-0.8	06/02/2012 09	-8.7	11/02/2012 09	-3.5
01/02/2012 10	-1.2	06/02/2012 10	-6	11/02/2012 10	-2.5
01/02/2012 11	-1.4	06/02/2012 11	-4	11/02/2012 11	-1.4
01/02/2012 12	-1.3	06/02/2012 12	-2.6	11/02/2012 12	-0.9
01/02/2012 13	-1.6	06/02/2012 13	-2.2	11/02/2012 13	-0.4
01/02/2012 14	-1.4	06/02/2012 14	-1.8	11/02/2012 14	0.2
01/02/2012 15	-1	06/02/2012 15	-1.4	11/02/2012 15	0.6
01/02/2012 16	-0.8	06/02/2012 16	-0.7	11/02/2012 16	-0.4
01/02/2012 17	-0.8	06/02/2012 17	-0.6	11/02/2012 17	-1.2
01/02/2012 18	-1.3	06/02/2012 18	-1.3	11/02/2012 18	-1.3
01/02/2012 19	-1.2	06/02/2012 19	-2.1	11/02/2012 19	-1.7
01/02/2012 20	-0.2	06/02/2012 20	-2.3	11/02/2012 20	-1.9
01/02/2012 21	1	06/02/2012 21	-2.1	11/02/2012 21	-2.6
01/02/2012 22	0.4	06/02/2012 22	-3	11/02/2012 22	-3.2
01/02/2012 23	0.1	06/02/2012 23	-4	11/02/2012 23	-4.9
02/02/2012 00	-0.2	07/02/2012 00	-4	12/02/2012 00	-5.7
02/02/2012 01	-0.3	07/02/2012 01	-3.7	12/02/2012 01	-6
02/02/2012 02	-0.2	07/02/2012 02	-3.9	12/02/2012 02	-6

02/02/2012 03	-0.2	07/02/2012 03	-3.9	12/02/2012 03	-6
02/02/2012 04	-0.4	07/02/2012 04	-3.9	12/02/2012 04	-5.5
02/02/2012 05	-0.6	07/02/2012 05	-3.3	12/02/2012 05	-5.5
02/02/2012 06	-0.8	07/02/2012 06	-2.7	12/02/2012 06	-5.4
02/02/2012 07	-0.9	07/02/2012 07	-2.2	12/02/2012 07	-5
02/02/2012 08	-1	07/02/2012 08	-2.7	12/02/2012 08	-4.9
02/02/2012 09	-1	07/02/2012 09	-2.8	12/02/2012 09	-4.4
02/02/2012 10	-1	07/02/2012 10	-2.4	12/02/2012 10	-4
02/02/2012 11	-0.7	07/02/2012 11	-2.1	12/02/2012 11	-3.3
02/02/2012 12	-0.3	07/02/2012 12	-1.3	12/02/2012 12	-2.9
02/02/2012 13	-0.1	07/02/2012 13	-0.3	12/02/2012 13	-2.4
02/02/2012 14	-0.1	07/02/2012 14	0.4	12/02/2012 14	-1.6
02/02/2012 15	-0.1	07/02/2012 15	0.4	12/02/2012 15	-0.7
02/02/2012 16	-0.1	07/02/2012 16	0.8	12/02/2012 16	-0.8
02/02/2012 17	-0.3	07/02/2012 17	0.6	12/02/2012 17	-2.5
02/02/2012 18	-1	07/02/2012 18	0.7	12/02/2012 18	-3.2
02/02/2012 19	-1	07/02/2012 19	2.1	12/02/2012 19	-3.9
02/02/2012 20	-1.8	07/02/2012 20	2.1	12/02/2012 20	-4.3
02/02/2012 21	-2	07/02/2012 21	0.1	12/02/2012 21	-4.6
02/02/2012 22	-2.6	07/02/2012 22	2.5	12/02/2012 22	-4.9
02/02/2012 23	-3.6	07/02/2012 23	2.2	12/02/2012 23	-5
03/02/2012 00	-5	08/02/2012 00	1.7	13/02/2012 00	-5.5
03/02/2012 01	-4.9	08/02/2012 01	0.8	13/02/2012 01	-5.4
03/02/2012 02	-5.1	08/02/2012 02	1.2	13/02/2012 02	-5.8
03/02/2012 03	-5.3	08/02/2012 03	1.1	13/02/2012 03	-6.4
03/02/2012 04	-5.8	08/02/2012 04	1.9	13/02/2012 04	-7.9
03/02/2012 05	-6.2	08/02/2012 05	1.7	13/02/2012 05	-6.5
03/02/2012 06	-6.1	08/02/2012 06	-0.5	13/02/2012 06	-5.4
03/02/2012 07	-6.1	08/02/2012 07	-1.6	13/02/2012 07	-5.5
03/02/2012 08	-6.5	08/02/2012 08	-2	13/02/2012 08	-5.9
03/02/2012 09	-5.9	08/02/2012 09	-1.1	13/02/2012 09	-5.2
03/02/2012 10	-3.7	08/02/2012 10	1.5	13/02/2012 10	-4.5
03/02/2012 11	-2.3	08/02/2012 11	3.8	13/02/2012 11	-4
03/02/2012 12	-1.2	08/02/2012 12	5	13/02/2012 12	-3.3
03/02/2012 13	-0.7	08/02/2012 13	6.1	13/02/2012 13	-1.8
03/02/2012 14	-0.4	08/02/2012 14	6.2	13/02/2012 14	-0.3
03/02/2012 15	-0.9	08/02/2012 15	6.1	13/02/2012 15	0.7
03/02/2012 16	-1.3	08/02/2012 16	5.1	13/02/2012 16	0.6
03/02/2012 17	-1.9	08/02/2012 17	4.3	13/02/2012 17	0.4
03/02/2012 18	-2.7	08/02/2012 18	1.8	13/02/2012 18	-1.3
03/02/2012 19	-3.8	08/02/2012 19	0.8	13/02/2012 19	-2.8

03/02/2012 20	-3.5	08/02/2012 20	-0.3	13/02/2012 20	-3.6
03/02/2012 21	-3.7	08/02/2012 21	-0.9	13/02/2012 21	-3.5
03/02/2012 22	-5	08/02/2012 22	-2.4	13/02/2012 22	-4
03/02/2012 23	-5.4	08/02/2012 23	-2.2	13/02/2012 23	-4.9
04/02/2012 00	-4.9	09/02/2012 00	-2.4	14/02/2012 00	-5.2
04/02/2012 01	-5.1	09/02/2012 01	-2.9	14/02/2012 01	-6
04/02/2012 02	-5.4	09/02/2012 02	-2.9	14/02/2012 02	-5
04/02/2012 03	-4.9	09/02/2012 03	-4.4	14/02/2012 03	-5.5
04/02/2012 04	-4.9	09/02/2012 04	-4.2	14/02/2012 04	-6.4
04/02/2012 05	-4.9	09/02/2012 05	-5.2	14/02/2012 05	-7
04/02/2012 06	-4.7	09/02/2012 06	-6	14/02/2012 06	-7.9
04/02/2012 07	-4.4	09/02/2012 07	-6.5	14/02/2012 07	-9.1
04/02/2012 08	-4.2	09/02/2012 08	-7.3	14/02/2012 08	-9.1
04/02/2012 09	-3.4	09/02/2012 09	-4.8	14/02/2012 09	-7.6
04/02/2012 10	-2.3	09/02/2012 10	-2.2	14/02/2012 10	-5.4
04/02/2012 11	-1.5	09/02/2012 11	-1	14/02/2012 11	-2.9
04/02/2012 12	-1.5	09/02/2012 12	0.6	14/02/2012 12	-0.1
04/02/2012 13	-1.6	09/02/2012 13	1.9	14/02/2012 13	1.6
04/02/2012 14	-2.1	09/02/2012 14	3.1	14/02/2012 14	2
04/02/2012 15	-2.7	09/02/2012 15	3.8	14/02/2012 15	2.3
04/02/2012 16	-2.9	09/02/2012 16	3.2	14/02/2012 16	2.5
04/02/2012 17	-3	09/02/2012 17	2.8	14/02/2012 17	2.5
04/02/2012 18	-3.3	09/02/2012 18	1.3	14/02/2012 18	0.2
04/02/2012 19	-3.7	09/02/2012 19	0.6	14/02/2012 19	-1.3
04/02/2012 20	-4.2	09/02/2012 20	0.1	14/02/2012 20	-1.8
04/02/2012 21	-3.8	09/02/2012 21	0	14/02/2012 21	-3.2
04/02/2012 22	-3.7	09/02/2012 22	1.6	14/02/2012 22	-3.2
04/02/2012 23	-3.9	09/02/2012 23	3.5	14/02/2012 23	-4.3
05/02/2012 00	-4.5	10/02/2012 00	3	15/02/2012 00	-4.4
05/02/2012 01	-5.4	10/02/2012 01	-0.1	15/02/2012 01	-5.3
05/02/2012 02	-5.8	10/02/2012 02	-2.1	15/02/2012 02	-5.4
05/02/2012 03	-6.1	10/02/2012 03	-3.2	15/02/2012 03	-5.9
05/02/2012 04	-5.6	10/02/2012 04	-2.8	15/02/2012 04	-6
05/02/2012 05	-5.4	10/02/2012 05	-2.6	15/02/2012 05	-6.1
05/02/2012 06	-5.7	10/02/2012 06	-3.1	15/02/2012 06	-5.9
05/02/2012 07	-6.3	10/02/2012 07	-3.4	15/02/2012 07	-5.6
05/02/2012 08	-6.4	10/02/2012 08	-3.2	15/02/2012 08	-4.8
05/02/2012 09	-6.2	10/02/2012 09	-3	15/02/2012 09	-3.4
05/02/2012 10	-4.8	10/02/2012 10	-2.7	15/02/2012 10	-1.8
05/02/2012 11	-2.9	10/02/2012 11	-2.3	15/02/2012 11	0.2
05/02/2012 12	-1.6	10/02/2012 12	-1.7	15/02/2012 12	2.6

05/02/2012 13	-1.2	10/02/2012 13	-0.9	15/02/2012 13	4.5
05/02/2012 14	-0.8	10/02/2012 14	-0.4	15/02/2012 14	5.9
05/02/2012 15	-0.7	10/02/2012 15	-0.5	15/02/2012 15	6.4
05/02/2012 16	-0.8	10/02/2012 16	-0.4	15/02/2012 16	6
05/02/2012 17	-1.6	10/02/2012 17	-0.6	15/02/2012 17	5.6
05/02/2012 18	-2.2	10/02/2012 18	-1	15/02/2012 18	4.3
05/02/2012 19	-2.6	10/02/2012 19	-1.3	15/02/2012 19	5.8
05/02/2012 20	-3	10/02/2012 20	-1.7	15/02/2012 20	4.4
05/02/2012 21	-4	10/02/2012 21	-2	15/02/2012 21	1.7
05/02/2012 22	-4.9	10/02/2012 22	-1.9	15/02/2012 22	0.2
05/02/2012 23	-5.2	10/02/2012 23	-1.8	15/02/2012 23	-0.9

data e ora	T (°C)	data e ora	T (°C)	data e ora	T (°C)
16/02/2012 00	-1.6	21/02/2012 00	3.2	26/02/2012 00	5.6
16/02/2012 01	-2.2	21/02/2012 01	3	26/02/2012 01	4.7
16/02/2012 02	-3	21/02/2012 02	3.2	26/02/2012 02	4.1
16/02/2012 03	-3	21/02/2012 03	3	26/02/2012 03	3.5
16/02/2012 04	-3.4	21/02/2012 04	3.1	26/02/2012 04	3.3
16/02/2012 05	-3.7	21/02/2012 05	3.2	26/02/2012 05	2.8
16/02/2012 06	-3.7	21/02/2012 06	3.3	26/02/2012 06	2
16/02/2012 07	-4.4	21/02/2012 07	3.2	26/02/2012 07	1.1
16/02/2012 08	-3.8	21/02/2012 08	3.4	26/02/2012 08	0.3
16/02/2012 09	-1.7	21/02/2012 09	3.7	26/02/2012 09	2.6
16/02/2012 10	0.8	21/02/2012 10	5.6	26/02/2012 10	6.4
16/02/2012 11	3.1	21/02/2012 11	7	26/02/2012 11	9.9
16/02/2012 12	5.1	21/02/2012 12	7.7	26/02/2012 12	12.1
16/02/2012 13	7.4	21/02/2012 13	8.4	26/02/2012 13	13.7
16/02/2012 14	8.9	21/02/2012 14	9	26/02/2012 14	14.1
16/02/2012 15	9	21/02/2012 15	9.4	26/02/2012 15	13.4
16/02/2012 16	8.7	21/02/2012 16	9.8	26/02/2012 16	12.9
16/02/2012 17	7.9	21/02/2012 17	9.5	26/02/2012 17	12.7
16/02/2012 18	6.2	21/02/2012 18	8.6	26/02/2012 18	10.7
16/02/2012 19	4.1	21/02/2012 19	6.2	26/02/2012 19	9.3
16/02/2012 20	2	21/02/2012 20	4.6	26/02/2012 20	7.6
16/02/2012 21	1.2	21/02/2012 21	4.1	26/02/2012 21	6.8
16/02/2012 22	1.7	21/02/2012 22	4	26/02/2012 22	6.1
16/02/2012 23	1.2	21/02/2012 23	2.7	26/02/2012 23	4.4
17/02/2012 00	0.6	22/02/2012 00	2.5	27/02/2012 00	3.9
17/02/2012 01	-0.7	22/02/2012 01	2.2	27/02/2012 01	3.6
17/02/2012 02	-1.7	22/02/2012 02	1.4	27/02/2012 02	2.8

17/02/2012 03	-2.3	22/02/2012 03	1.2	27/02/2012 03	3.3
17/02/2012 04	-1.9	22/02/2012 04	0.7	27/02/2012 04	4.4
17/02/2012 05	-1.6	22/02/2012 05	0.5	27/02/2012 05	4.4
17/02/2012 06	-1.2	22/02/2012 06	-0.2	27/02/2012 06	3.1
17/02/2012 07	-1.4	22/02/2012 07	-0.4	27/02/2012 07	2.1
17/02/2012 08	-1.5	22/02/2012 08	0.2	27/02/2012 08	2.2
17/02/2012 09	-0.7	22/02/2012 09	1.2	27/02/2012 09	4.5
17/02/2012 10	0.8	22/02/2012 10	2.9	27/02/2012 10	6.6
17/02/2012 11	3.7	22/02/2012 11	4.9	27/02/2012 11	8.4
17/02/2012 12	5.2	22/02/2012 12	7.1	27/02/2012 12	9.6
17/02/2012 13	6.6	22/02/2012 13	8.9	27/02/2012 13	9.8
17/02/2012 14	8	22/02/2012 14	10.1	27/02/2012 14	11.7
17/02/2012 15	9	22/02/2012 15	11	27/02/2012 15	12.8
17/02/2012 16	8.9	22/02/2012 16	11.6	27/02/2012 16	12.4
17/02/2012 17	8.4	22/02/2012 17	11.5	27/02/2012 17	10.8
17/02/2012 18	5.1	22/02/2012 18	10.6	27/02/2012 18	9.5
17/02/2012 19	3.6	22/02/2012 19	9.1	27/02/2012 19	7.3
17/02/2012 20	2.9	22/02/2012 20	7.7	27/02/2012 20	6.3
17/02/2012 21	1.8	22/02/2012 21	7.2	27/02/2012 21	5.7
17/02/2012 22	0.1	22/02/2012 22	6.2	27/02/2012 22	5.1
17/02/2012 23	-0.2	22/02/2012 23	5.9	27/02/2012 23	3.8
18/02/2012 00	0	23/02/2012 00	2.2	28/02/2012 00	3.2
18/02/2012 01	0.4	23/02/2012 01	1.8	28/02/2012 01	3.7
18/02/2012 02	-1.2	23/02/2012 02	1.7	28/02/2012 02	3.9
18/02/2012 03	-1.5	23/02/2012 03	1.3	28/02/2012 03	3
18/02/2012 04	-1.6	23/02/2012 04	1	28/02/2012 04	2.9
18/02/2012 05	-1.5	23/02/2012 05	0.5	28/02/2012 05	3
18/02/2012 06	-1.6	23/02/2012 06	0	28/02/2012 06	1.5
18/02/2012 07	-2	23/02/2012 07	0.3	28/02/2012 07	1.1
18/02/2012 08	-1.3	23/02/2012 08	0.2	28/02/2012 08	1.5
18/02/2012 09	-0.4	23/02/2012 09	1.9	28/02/2012 09	4.4
18/02/2012 10	1.5	23/02/2012 10	4.3	28/02/2012 10	7.7
18/02/2012 11	3.7	23/02/2012 11	6.8	28/02/2012 11	9.5
18/02/2012 12	6.2	23/02/2012 12	9.6	28/02/2012 12	11.2
18/02/2012 13	7.9	23/02/2012 13	11.8	28/02/2012 13	12.4
18/02/2012 14	9.2	23/02/2012 14	12.8	28/02/2012 14	13
18/02/2012 15	9.7	23/02/2012 15	13.4	28/02/2012 15	13.6
18/02/2012 16	9	23/02/2012 16	13.9	28/02/2012 16	13.7
18/02/2012 17	8.6	23/02/2012 17	13.6	28/02/2012 17	13.2
18/02/2012 18	7.4	23/02/2012 18	12.5	28/02/2012 18	11.8
18/02/2012 19	6.4	23/02/2012 19	11.2	28/02/2012 19	9.9

18/02/2012 20	5.6	23/02/2012 20	9.9	28/02/2012 20	8.8
18/02/2012 21	5.2	23/02/2012 21	9.2	28/02/2012 21	8.1
18/02/2012 22	4.4	23/02/2012 22	8.2	28/02/2012 22	7.8
18/02/2012 23	4.1	23/02/2012 23	7.5	28/02/2012 23	5.9
19/02/2012 00	3.7	24/02/2012 00	6.8	29/02/2012 00	5.3
19/02/2012 01	3.6	24/02/2012 01	5.1	29/02/2012 01	5.1
19/02/2012 02	3.6	24/02/2012 02	4.6	29/02/2012 02	4.9
19/02/2012 03	3.5	24/02/2012 03	4.3	29/02/2012 03	4.6
19/02/2012 04	2.9	24/02/2012 04	3.4	29/02/2012 04	5.4
19/02/2012 05	2.8	24/02/2012 05	3.4	29/02/2012 05	5.7
19/02/2012 06	2.9	24/02/2012 06	1.9	29/02/2012 06	5.3
19/02/2012 07	2.6	24/02/2012 07	1.7	29/02/2012 07	5.4
19/02/2012 08	2.5	24/02/2012 08	2	29/02/2012 08	5.1
19/02/2012 09	3.3	24/02/2012 09	4	29/02/2012 09	6.1
19/02/2012 10	4.1	24/02/2012 10	6.9	29/02/2012 10	7.6
19/02/2012 11	4.7	24/02/2012 11	9.7	29/02/2012 11	9.4
19/02/2012 12	5.4	24/02/2012 12	12	29/02/2012 12	11.8
19/02/2012 13	6.1	24/02/2012 13	13.4	29/02/2012 13	14.1
19/02/2012 14	6.4	24/02/2012 14	15.2	29/02/2012 14	15.5
19/02/2012 15	6.8	24/02/2012 15	16	29/02/2012 15	16.6
19/02/2012 16	6.9	24/02/2012 16	16.9	29/02/2012 16	16.2
19/02/2012 17	6.6	24/02/2012 17	17.1	29/02/2012 17	14.7
19/02/2012 18	6.1	24/02/2012 18	15.3	29/02/2012 18	13.5
19/02/2012 19	5.6	24/02/2012 19	13	29/02/2012 19	11.6
19/02/2012 20	4.9	24/02/2012 20	11.3	29/02/2012 20	9.8
19/02/2012 21	4.7	24/02/2012 21	9.2	29/02/2012 21	8.7
19/02/2012 22	4.5	24/02/2012 22	7.7	29/02/2012 22	7.6
19/02/2012 23	4.4	24/02/2012 23	6.7	29/02/2012 23	6.7
20/02/2012 00	4.3	25/02/2012 00	6.1		
20/02/2012 01	4.4	25/02/2012 01	5.2		
20/02/2012 02	4.1	25/02/2012 02	4.7		
20/02/2012 03	4.3	25/02/2012 03	4.1		
20/02/2012 04	4.3	25/02/2012 04	3.2		
20/02/2012 05	4.4	25/02/2012 05	2.7		
20/02/2012 06	4.6	25/02/2012 06	2.1		
20/02/2012 07	4.7	25/02/2012 07	1.8		
20/02/2012 08	3.7	25/02/2012 08	2.2		
20/02/2012 09	2.9	25/02/2012 09	5.1		
20/02/2012 10	2.5	25/02/2012 10	7.9		
20/02/2012 11	2.5	25/02/2012 11	10.3		
20/02/2012 12	3	25/02/2012 12	12.6		

20/02/2012 13	3.4	25/02/2012 13	13.6
20/02/2012 14	3.8	25/02/2012 14	14.9
20/02/2012 15	4.2	25/02/2012 15	15.6
20/02/2012 16	4.5	25/02/2012 16	15.5
20/02/2012 17	4.6	25/02/2012 17	14.9
20/02/2012 18	4.7	25/02/2012 18	13.8
20/02/2012 19	5	25/02/2012 19	12.3
20/02/2012 20	4.7	25/02/2012 20	10.4
20/02/2012 21	3.4	25/02/2012 21	8.9
20/02/2012 22	3.3	25/02/2012 22	7.3
20/02/2012 23	3.1	25/02/2012 23	6.2

Tabella 6.10 temperature orarie del mese di febbraio 2012 (stazione Arpav di Castelnovo Bariano).

data e ora	T (°C)	data e ora	T (°C)	data e ora	T (°C)
01/08/2012 00	21.7	12/08/2012 00	20.8	23/08/2012 00	24.6
01/08/2012 01	20.7	12/08/2012 01	19.7	23/08/2012 01	24.2
01/08/2012 02	19.7	12/08/2012 02	19	23/08/2012 02	24.2
01/08/2012 03	19.5	12/08/2012 03	18.9	23/08/2012 03	24.4
01/08/2012 04	19.6	12/08/2012 04	18	23/08/2012 04	23
01/08/2012 05	19.3	12/08/2012 05	17.5	23/08/2012 05	22.2
01/08/2012 06	19.6	12/08/2012 06	17.4	23/08/2012 06	22.9
01/08/2012 07	24	12/08/2012 07	19.7	23/08/2012 07	24.5
01/08/2012 08	26.5	12/08/2012 08	22.4	23/08/2012 08	26.3
01/08/2012 09	29.1	12/08/2012 09	24.4	23/08/2012 09	28.9
01/08/2012 10	30.7	12/08/2012 10	26	23/08/2012 10	31.4
01/08/2012 11	31.7	12/08/2012 11	27.5	23/08/2012 11	32.3
01/08/2012 12	32.9	12/08/2012 12	28.5	23/08/2012 12	33.5
01/08/2012 13	33.4	12/08/2012 13	28.5	23/08/2012 13	34.5
01/08/2012 14	33.8	12/08/2012 14	29	23/08/2012 14	35.1
01/08/2012 15	34.7	12/08/2012 15	30	23/08/2012 15	36
01/08/2012 16	34.7	12/08/2012 16	29.9	23/08/2012 16	36.6
01/08/2012 17	34.4	12/08/2012 17	29.1	23/08/2012 17	36.3
01/08/2012 18	34.3	12/08/2012 18	27.6	23/08/2012 18	35.5
01/08/2012 19	32.2	12/08/2012 19	26	23/08/2012 19	33.1
01/08/2012 20	29.9	12/08/2012 20	24.4	23/08/2012 20	31.2
01/08/2012 21	27.1	12/08/2012 21	23.3	23/08/2012 21	29.4
01/08/2012 22	26.3	12/08/2012 22	22.3	23/08/2012 22	28.7
01/08/2012 23	23.8	12/08/2012 23	20.4	23/08/2012 23	26.8
02/08/2012 00	22	13/08/2012 00	19.3	24/08/2012 00	24.6

02/08/2012 01	19.6	13/08/2012 01	18.2	24/08/2012 01	24.2
02/08/2012 02	18.5	13/08/2012 02	17.3	24/08/2012 02	24.3
02/08/2012 03	17.7	13/08/2012 03	17.4	24/08/2012 03	24.6
02/08/2012 04	17.5	13/08/2012 04	16.7	24/08/2012 04	23.4
02/08/2012 05	18.1	13/08/2012 05	16.1	24/08/2012 05	22
02/08/2012 06	18.9	13/08/2012 06	17.1	24/08/2012 06	21.9
02/08/2012 07	23	13/08/2012 07	19.5	24/08/2012 07	23.6
02/08/2012 08	28.3	13/08/2012 08	22.1	24/08/2012 08	25.6
02/08/2012 09	29.9	13/08/2012 09	25	24/08/2012 09	28.2
02/08/2012 10	31.6	13/08/2012 10	27	24/08/2012 10	30.1
02/08/2012 11	32.8	13/08/2012 11	28.2	24/08/2012 11	32.4
02/08/2012 12	33.8	13/08/2012 12	29.4	24/08/2012 12	34.5
02/08/2012 13	34.9	13/08/2012 13	29.2	24/08/2012 13	35
02/08/2012 14	35.8	13/08/2012 14	29.3	24/08/2012 14	36.3
02/08/2012 15	35.8	13/08/2012 15	30.3	24/08/2012 15	36.9
02/08/2012 16	36.2	13/08/2012 16	30.7	24/08/2012 16	37.2
02/08/2012 17	36.3	13/08/2012 17	30.9	24/08/2012 17	37.5
02/08/2012 18	35.2	13/08/2012 18	30.4	24/08/2012 18	36.4
02/08/2012 19	33.4	13/08/2012 19	28.7	24/08/2012 19	33.1
02/08/2012 20	30.7	13/08/2012 20	26.3	24/08/2012 20	29.9
02/08/2012 21	28.4	13/08/2012 21	24.6	24/08/2012 21	27
02/08/2012 22	25.6	13/08/2012 22	22.9	24/08/2012 22	24.5
02/08/2012 23	23.3	13/08/2012 23	21.5	24/08/2012 23	22.5
03/08/2012 00	21.5	14/08/2012 00	20.5	25/08/2012 00	21.8
03/08/2012 01	21.3	14/08/2012 01	20.5	25/08/2012 01	20.9
03/08/2012 02	20.8	14/08/2012 02	20.8	25/08/2012 02	20.4
03/08/2012 03	19.8	14/08/2012 03	20.7	25/08/2012 03	20.3
03/08/2012 04	18.9	14/08/2012 04	20.9	25/08/2012 04	19
03/08/2012 05	18.7	14/08/2012 05	20.1	25/08/2012 05	18.6
03/08/2012 06	19.2	14/08/2012 06	19.8	25/08/2012 06	18.5
03/08/2012 07	22.9	14/08/2012 07	21.3	25/08/2012 07	22
03/08/2012 08	26.4	14/08/2012 08	24	25/08/2012 08	27.1
03/08/2012 09	28.7	14/08/2012 09	26.2	25/08/2012 09	29.7
03/08/2012 10	30.1	14/08/2012 10	27.6	25/08/2012 10	31.1
03/08/2012 11	31.9	14/08/2012 11	29.3	25/08/2012 11	33.3
03/08/2012 12	32.4	14/08/2012 12	30.2	25/08/2012 12	34.4
03/08/2012 13	33.8	14/08/2012 13	30.4	25/08/2012 13	35.3
03/08/2012 14	34.5	14/08/2012 14	31.3	25/08/2012 14	35.5
03/08/2012 15	35.4	14/08/2012 15	32.8	25/08/2012 15	35.8
03/08/2012 16	35.1	14/08/2012 16	32.4	25/08/2012 16	36.4
03/08/2012 17	35.4	14/08/2012 17	32.4	25/08/2012 17	36.6

03/08/2012 18	35.6	14/08/2012 18	31.3	25/08/2012 18	36.1
03/08/2012 19	34.2	14/08/2012 19	29.4	25/08/2012 19	32.6
03/08/2012 20	29.9	14/08/2012 20	27.7	25/08/2012 20	29.8
03/08/2012 21	27.5	14/08/2012 21	26	25/08/2012 21	28.2
03/08/2012 22	25.3	14/08/2012 22	24.2	25/08/2012 22	26.1
03/08/2012 23	23.8	14/08/2012 23	23	25/08/2012 23	24.8
04/08/2012 00	22.5	15/08/2012 00	22.1	26/08/2012 00	24.5
04/08/2012 01	21.3	15/08/2012 01	20.9	26/08/2012 01	23.8
04/08/2012 02	20.7	15/08/2012 02	20	26/08/2012 02	23.2
04/08/2012 03	20.5	15/08/2012 03	20.1	26/08/2012 03	23.4
04/08/2012 04	19.8	15/08/2012 04	21	26/08/2012 04	22.3
04/08/2012 05	19.8	15/08/2012 05	20.6	26/08/2012 05	22.4
04/08/2012 06	21	15/08/2012 06	20.4	26/08/2012 06	23.6
04/08/2012 07	23.3	15/08/2012 07	22.3	26/08/2012 07	23.6
04/08/2012 08	26.2	15/08/2012 08	25	26/08/2012 08	23.3
04/08/2012 09	28.5	15/08/2012 09	27.4	26/08/2012 09	22.4
04/08/2012 10	30.6	15/08/2012 10	29.3	26/08/2012 10	22.2
04/08/2012 11	32.2	15/08/2012 11	30.5	26/08/2012 11	23.3
04/08/2012 12	33.3	15/08/2012 12	31.8	26/08/2012 12	25.9
04/08/2012 13	34	15/08/2012 13	33.5	26/08/2012 13	28.3
04/08/2012 14	34.6	15/08/2012 14	34.3	26/08/2012 14	29.6
04/08/2012 15	35.1	15/08/2012 15	34.7	26/08/2012 15	29.7
04/08/2012 16	35.1	15/08/2012 16	35.2	26/08/2012 16	31.1
04/08/2012 17	35	15/08/2012 17	35.3	26/08/2012 17	32
04/08/2012 18	34	15/08/2012 18	34.6	26/08/2012 18	30.5
04/08/2012 19	32.4	15/08/2012 19	33.1	26/08/2012 19	23.7
04/08/2012 20	30.2	15/08/2012 20	30.1	26/08/2012 20	19.9
04/08/2012 21	28.5	15/08/2012 21	28.5	26/08/2012 21	19.1
04/08/2012 22	25.9	15/08/2012 22	25.8	26/08/2012 22	18.9
04/08/2012 23	23.6	15/08/2012 23	24.6	26/08/2012 23	17.8
05/08/2012 00	23.3	16/08/2012 00	23.3	27/08/2012 00	15.8
05/08/2012 01	22.9	16/08/2012 01	23	27/08/2012 01	14.9
05/08/2012 02	22.8	16/08/2012 02	21.9	27/08/2012 02	15
05/08/2012 03	23.2	16/08/2012 03	21.1	27/08/2012 03	14.7
05/08/2012 04	23.4	16/08/2012 04	20.6	27/08/2012 04	14.2
05/08/2012 05	23.1	16/08/2012 05	20.1	27/08/2012 05	14
05/08/2012 06	22.7	16/08/2012 06	19.8	27/08/2012 06	13.8
05/08/2012 07	24	16/08/2012 07	21.5	27/08/2012 07	16.2
05/08/2012 08	26.2	16/08/2012 08	25.5	27/08/2012 08	19.6
05/08/2012 09	28.9	16/08/2012 09	27.4	27/08/2012 09	22.9
05/08/2012 10	30.6	16/08/2012 10	29.8	27/08/2012 10	24.7

05/08/2012 11	31.9	16/08/2012 11	31.1	27/08/2012 11	25.8
05/08/2012 12	33	16/08/2012 12	32.9	27/08/2012 12	27.2
05/08/2012 13	34.2	16/08/2012 13	34	27/08/2012 13	27.6
05/08/2012 14	35	16/08/2012 14	34.1	27/08/2012 14	28
05/08/2012 15	35.4	16/08/2012 15	34.4	27/08/2012 15	29.1
05/08/2012 16	35.9	16/08/2012 16	34.1	27/08/2012 16	28.8
05/08/2012 17	36.1	16/08/2012 17	34.1	27/08/2012 17	29
05/08/2012 18	35.1	16/08/2012 18	32.7	27/08/2012 18	29.2
05/08/2012 19	33	16/08/2012 19	29.4	27/08/2012 19	27.1
05/08/2012 20	29.9	16/08/2012 20	27.5	27/08/2012 20	25
05/08/2012 21	27.6	16/08/2012 21	26.8	27/08/2012 21	23.7
05/08/2012 22	25.8	16/08/2012 22	25.6	27/08/2012 22	22.8
05/08/2012 23	24.4	16/08/2012 23	24.2	27/08/2012 23	21.1
06/08/2012 00	24.2	17/08/2012 00	23.1	28/08/2012 00	16.9
06/08/2012 01	23.6	17/08/2012 01	22	28/08/2012 01	15.6
06/08/2012 02	23.3	17/08/2012 02	21.1	28/08/2012 02	15.1
06/08/2012 03	23.4	17/08/2012 03	20.5	28/08/2012 03	15
06/08/2012 04	23.6	17/08/2012 04	20.1	28/08/2012 04	14.6
06/08/2012 05	23.3	17/08/2012 05	19.3	28/08/2012 05	13.9
06/08/2012 06	23.3	17/08/2012 06	19.2	28/08/2012 06	13.9
06/08/2012 07	24.2	17/08/2012 07	23.1	28/08/2012 07	17
06/08/2012 08	26.4	17/08/2012 08	26.4	28/08/2012 08	20.5
06/08/2012 09	28.5	17/08/2012 09	28.7	28/08/2012 09	24.3
06/08/2012 10	29.9	17/08/2012 10	30.2	28/08/2012 10	25.9
06/08/2012 11	30.5	17/08/2012 11	31	28/08/2012 11	27.8
06/08/2012 12	31.2	17/08/2012 12	32.2	28/08/2012 12	28.3
06/08/2012 13	31.7	17/08/2012 13	33.2	28/08/2012 13	29.4
06/08/2012 14	31.5	17/08/2012 14	33.9	28/08/2012 14	30.2
06/08/2012 15	32.1	17/08/2012 15	34.6	28/08/2012 15	30.4
06/08/2012 16	32.4	17/08/2012 16	34.5	28/08/2012 16	30.9
06/08/2012 17	32.9	17/08/2012 17	35	28/08/2012 17	31.2
06/08/2012 18	33.7	17/08/2012 18	34.1	28/08/2012 18	30.6
06/08/2012 19	32.3	17/08/2012 19	32.1	28/08/2012 19	29.5
06/08/2012 20	30.6	17/08/2012 20	29.2	28/08/2012 20	26.3
06/08/2012 21	28.9	17/08/2012 21	28.3	28/08/2012 21	24.6
06/08/2012 22	27.1	17/08/2012 22	26.2	28/08/2012 22	20.7
06/08/2012 23	26.7	17/08/2012 23	23.6	28/08/2012 23	19.2
07/08/2012 00	25.6	18/08/2012 00	22.4	29/08/2012 00	18.4
07/08/2012 01	24.9	18/08/2012 01	21.1	29/08/2012 01	17.5
07/08/2012 02	23.4	18/08/2012 02	20.5	29/08/2012 02	16.7
07/08/2012 03	22.8	18/08/2012 03	19.7	29/08/2012 03	16.2

07/08/2012 04	22.1	18/08/2012 04	19.1	29/08/2012 04	15.8
07/08/2012 05	22.3	18/08/2012 05	19	29/08/2012 05	15.5
07/08/2012 06	21.3	18/08/2012 06	19.6	29/08/2012 06	15.5
07/08/2012 07	24.2	18/08/2012 07	23.1	29/08/2012 07	17.7
07/08/2012 08	25.8	18/08/2012 08	25.8	29/08/2012 08	20.5
07/08/2012 09	27.7	18/08/2012 09	28.8	29/08/2012 09	23.5
07/08/2012 10	29.2	18/08/2012 10	30.9	29/08/2012 10	26.2
07/08/2012 11	30.2	18/08/2012 11	32.4	29/08/2012 11	27.9
07/08/2012 12	31.6	18/08/2012 12	33.4	29/08/2012 12	29.5
07/08/2012 13	32.5	18/08/2012 13	34.5	29/08/2012 13	30
07/08/2012 14	33.2	18/08/2012 14	34.8	29/08/2012 14	31.3
07/08/2012 15	34.5	18/08/2012 15	35.7	29/08/2012 15	32.1
07/08/2012 16	34.9	18/08/2012 16	36	29/08/2012 16	32.2
07/08/2012 17	34.7	18/08/2012 17	36.1	29/08/2012 17	32.4
07/08/2012 18	34.4	18/08/2012 18	35.1	29/08/2012 18	31.9
07/08/2012 19	32.7	18/08/2012 19	32.5	29/08/2012 19	29.6
07/08/2012 20	29.3	18/08/2012 20	30	29/08/2012 20	26.2
07/08/2012 21	27.5	18/08/2012 21	27.9	29/08/2012 21	24.8
07/08/2012 22	26.1	18/08/2012 22	25.3	29/08/2012 22	23.8
07/08/2012 23	23.4	18/08/2012 23	23.8	29/08/2012 23	23.2
08/08/2012 00	20.7	19/08/2012 00	22.2	30/08/2012 00	23.4
08/08/2012 01	19.8	19/08/2012 01	21.2	30/08/2012 01	21.6
08/08/2012 02	19.3	19/08/2012 02	20.8	30/08/2012 02	19.5
08/08/2012 03	18.7	19/08/2012 03	20.3	30/08/2012 03	19.2
08/08/2012 04	18.5	19/08/2012 04	20	30/08/2012 04	18.8
08/08/2012 05	18.2	19/08/2012 05	19.5	30/08/2012 05	19.2
08/08/2012 06	19.2	19/08/2012 06	19.5	30/08/2012 06	19.2
08/08/2012 07	22.2	19/08/2012 07	24.8	30/08/2012 07	21.2
08/08/2012 08	25.9	19/08/2012 08	28	30/08/2012 08	23.2
08/08/2012 09	27.8	19/08/2012 09	30.6	30/08/2012 09	25.4
08/08/2012 10	29.5	19/08/2012 10	32.3	30/08/2012 10	27.2
08/08/2012 11	31.3	19/08/2012 11	33.4	30/08/2012 11	29.1
08/08/2012 12	32.1	19/08/2012 12	34.5	30/08/2012 12	30.7
08/08/2012 13	33.1	19/08/2012 13	35	30/08/2012 13	31.1
08/08/2012 14	33.9	19/08/2012 14	36	30/08/2012 14	32
08/08/2012 15	33.9	19/08/2012 15	36.3	30/08/2012 15	32.7
08/08/2012 16	34	19/08/2012 16	36.7	30/08/2012 16	31.9
08/08/2012 17	33.8	19/08/2012 17	36.4	30/08/2012 17	31.3
08/08/2012 18	33.5	19/08/2012 18	35.1	30/08/2012 18	29.6
08/08/2012 19	32.1	19/08/2012 19	33.4	30/08/2012 19	27.2
08/08/2012 20	28.4	19/08/2012 20	30.9	30/08/2012 20	23.3

08/08/2012 21	25.5	19/08/2012 21	28.5	30/08/2012 21	22
08/08/2012 22	24.1	19/08/2012 22	25.1	30/08/2012 22	21.8
08/08/2012 23	22	19/08/2012 23	23.4	30/08/2012 23	21.8
09/08/2012 00	20.5	20/08/2012 00	22.3	31/08/2012 00	21.6
09/08/2012 01	19.4	20/08/2012 01	21.5	31/08/2012 01	21.4
09/08/2012 02	19	20/08/2012 02	21	31/08/2012 02	21
09/08/2012 03	19.3	20/08/2012 03	20.1	31/08/2012 03	20.9
09/08/2012 04	19	20/08/2012 04	19.6	31/08/2012 04	20.8
09/08/2012 05	18.5	20/08/2012 05	19.5	31/08/2012 05	20.9
09/08/2012 06	18.6	20/08/2012 06	19.5	31/08/2012 06	21
09/08/2012 07	22.1	20/08/2012 07	23.1	31/08/2012 07	20.8
09/08/2012 08	25.8	20/08/2012 08	28.4	31/08/2012 08	20.8
09/08/2012 09	28.2	20/08/2012 09	30.5	31/08/2012 09	21
09/08/2012 10	29.7	20/08/2012 10	32.7	31/08/2012 10	21.9
09/08/2012 11	30.5	20/08/2012 11	34.1	31/08/2012 11	22.4
09/08/2012 12	31.5	20/08/2012 12	35.7	31/08/2012 12	24.3
09/08/2012 13	32.2	20/08/2012 13	36.5	31/08/2012 13	25.9
09/08/2012 14	33.1	20/08/2012 14	37	31/08/2012 14	26.1
09/08/2012 15	33.3	20/08/2012 15	37.5	31/08/2012 15	23.8
09/08/2012 16	33.2	20/08/2012 16	37.8	31/08/2012 16	17.4
09/08/2012 17	33.2	20/08/2012 17	37.9	31/08/2012 17	18.8
09/08/2012 18	32.1	20/08/2012 18	38	31/08/2012 18	19.5
09/08/2012 19	31.3	20/08/2012 19	34.1	31/08/2012 19	18.6
09/08/2012 20	28.5	20/08/2012 20	31.2	31/08/2012 20	17.4
09/08/2012 21	25.9	20/08/2012 21	28.1	31/08/2012 21	16.3
09/08/2012 22	25	20/08/2012 22	27.3	31/08/2012 22	16.3
09/08/2012 23	23.8	20/08/2012 23	25.1	31/08/2012 23	16.4
10/08/2012 00	22.2	21/08/2012 00	23.3		
10/08/2012 01	21.2	21/08/2012 01	22		
10/08/2012 02	20.6	21/08/2012 02	21.1		
10/08/2012 03	19.4	21/08/2012 03	20.5		
10/08/2012 04	19.4	21/08/2012 04	20.3		
10/08/2012 05	19.2	21/08/2012 05	20.7		
10/08/2012 06	18.9	21/08/2012 06	20.1		
10/08/2012 07	20.6	21/08/2012 07	23.9		
10/08/2012 08	23.5	21/08/2012 08	28.2		
10/08/2012 09	25.7	21/08/2012 09	30.3		
10/08/2012 10	27.8	21/08/2012 10	33.1		
10/08/2012 11	29.4	21/08/2012 11	35.1		
10/08/2012 12	30.3	21/08/2012 12	36.4		
10/08/2012 13	31	21/08/2012 13	37.3		

10/08/2012 14	31.6	21/08/2012 14	37.8
10/08/2012 15	31.5	21/08/2012 15	38.3
10/08/2012 16	31.2	21/08/2012 16	38.6
10/08/2012 17	31.1	21/08/2012 17	39.1
10/08/2012 18	30.6	21/08/2012 18	37.8
10/08/2012 19	28.7	21/08/2012 19	34
10/08/2012 20	25.9	21/08/2012 20	31.6
10/08/2012 21	22.8	21/08/2012 21	29.1
10/08/2012 22	21.8	21/08/2012 22	25.2
10/08/2012 23	19.8	21/08/2012 23	24.4
11/08/2012 00	20.3	22/08/2012 00	23.1
11/08/2012 01	20.2	22/08/2012 01	21.9
11/08/2012 02	18.1	22/08/2012 02	21.6
11/08/2012 03	17.6	22/08/2012 03	21.9
11/08/2012 04	17.8	22/08/2012 04	20.7
11/08/2012 05	16.9	22/08/2012 05	19.9
11/08/2012 06	17.1	22/08/2012 06	19.7
11/08/2012 07	20.6	22/08/2012 07	23.3
11/08/2012 08	23.9	22/08/2012 08	26.4
11/08/2012 09	26.2	22/08/2012 09	29.9
11/08/2012 10	27.8	22/08/2012 10	32
11/08/2012 11	29.2	22/08/2012 11	33.9
11/08/2012 12	30.4	22/08/2012 12	35.7
11/08/2012 13	31.5	22/08/2012 13	37.4
11/08/2012 14	32.1	22/08/2012 14	37.9
11/08/2012 15	32.2	22/08/2012 15	38.6
11/08/2012 16	32.3	22/08/2012 16	39.2
11/08/2012 17	32.3	22/08/2012 17	39.1
11/08/2012 18	31.9	22/08/2012 18	36.7
11/08/2012 19	30.1	22/08/2012 19	33.9
11/08/2012 20	27.8	22/08/2012 20	31.3
11/08/2012 21	25.7	22/08/2012 21	28.1
11/08/2012 22	24.9	22/08/2012 22	26.2
11/08/2012 23	23.1	22/08/2012 23	25.7

Tabella 6.11 temperature orarie del mese di agosto 2012 (stazione Arpav di Castelnovo Bariano).

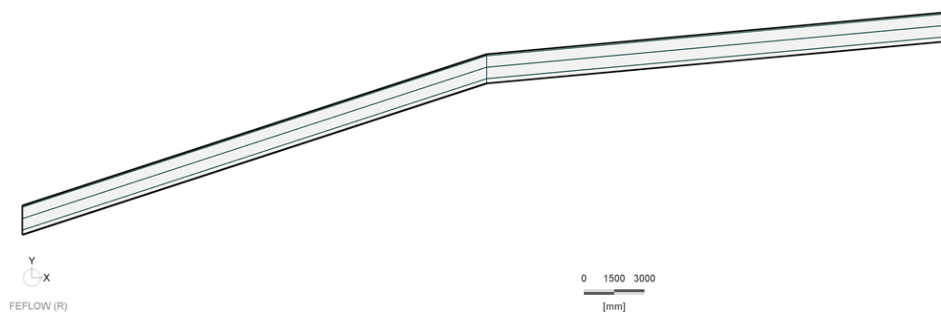


Figura 6.3 tentativo di supermesh 1: ogni strato composto da un poligono.

Triangle	
Property	Value
Quality Mesh	<input checked="" type="checkbox"/> True
Minimum Angle	30.00
Forces Delaunay	<input checked="" type="checkbox"/> True
Fill Holes	<input checked="" type="checkbox"/> True
Delaunay Algorithms	Incremental
Quiet Mode	<input checked="" type="checkbox"/> True
Steiner Points Insert...	Allow at all borders
Mesh Anisotropy	1.00
Refine Polygons	<input checked="" type="checkbox"/> True
Edge Refine Mode	ALL
Polygon Gradation	3
Polygon Target Size	0.01
Refine Lines	<input type="checkbox"/> False
Line Gradation	2
Line Target Size	0.20
Refine Points	<input type="checkbox"/> False
Point Gradation	2
Point Target Size	0.20
From Supermesh Elements	
Property	Value
Element name	Supermesh
Proposed elements	50000
Meshing density	1.00

Tabella 6.12 pannello di controllo per il tentativo di mesh 1.

Si è ottenuta una griglia di calcolo composta da 241518 elementi e 121839 nodi.

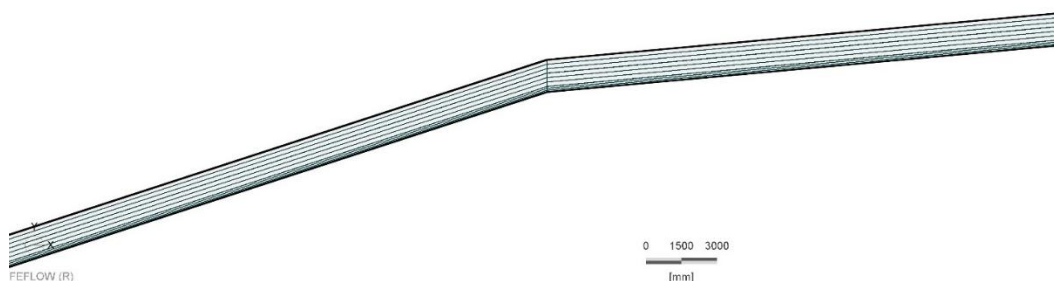


Figura 6.4 tentativo di supermesh 2: ogni strato composto da più poligoni.

Triangle	
Property	Value
Quality Mesh	<input checked="" type="checkbox"/> True
Minimum Angle	30.00
Forces Delaunay	<input checked="" type="checkbox"/> True
Fill Holes	<input checked="" type="checkbox"/> True
Delaunay Algorithms	Divide-and-conquer
Quiet Mode	<input checked="" type="checkbox"/> True
Steiner Points Insert...	Allow at all borders
Mesh Anisotropy	1.00
Refine Polygons	<input checked="" type="checkbox"/> True
Edge Refine Mode	ALL
Polygon Gradation	5
Polygon Target Size	0.02
Refine Lines	<input type="checkbox"/> False
Line Gradation	2
Line Target Size	0.20
Refine Points	<input type="checkbox"/> False
Point Gradation	2
Point Target Size	0.20
From Supermesh Elements	
Property	Value
Element name	Supermesh
Proposed elements	500000
Meshing density	1.00

Tabella 6.13 pannello di controllo per il tentativo di mesh 2.

Si è ottenuta una griglia di calcolo composta da 1123006 elementi e 565123 nodi.

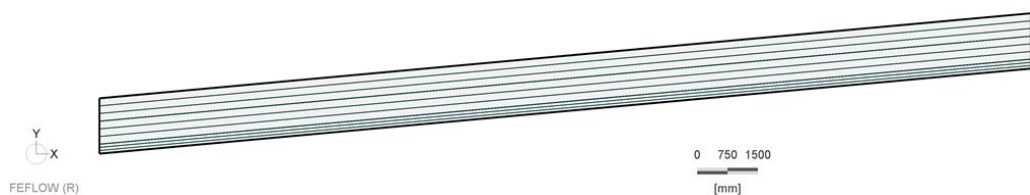





Figura 6.5 tentativo di supermesh 3: stato impermeabile, strado di drenaggio del biogas e tout-venant formati da tre poligoni ciascuno; geotessili formati da due poligoni ciascuno. Pacchetto inclinato.

Triangle			
Property	Value		
Quality Mesh	<input checked="" type="checkbox"/>	True	
Minimum Angle		30.00	
Forces Delaunay	<input checked="" type="checkbox"/>	True	
Fill Holes	<input checked="" type="checkbox"/>	True	
Delaunay Algorithms		Divide-and-conquer	
Quiet Mode	<input checked="" type="checkbox"/>	True	
Steiner Points Insert...		Allow at all borders	
Mesh Anisotropy		1.00	
Refine Polygons	<input checked="" type="checkbox"/>	True	
Edge Refine Mode		ALL	
Polygon Gradation		2	
Polygon Target Size		0.02	
Refine Lines	<input type="checkbox"/>	False	
Line Gradation		2	
Line Target Size		0.20	
Refine Points	<input type="checkbox"/>	False	
Point Gradation		2	
Point Target Size		0.20	

From Supermesh Elements

Property	Value
Element name	Supermesh
Proposed elements	150000
Meshing density	1.00

Tabella 6.14 pannello di controllo per il tentativo di mesh 3.

Si è ottenuta una griglia di calcolo composta da 515948 elementi e 259907 nodi.

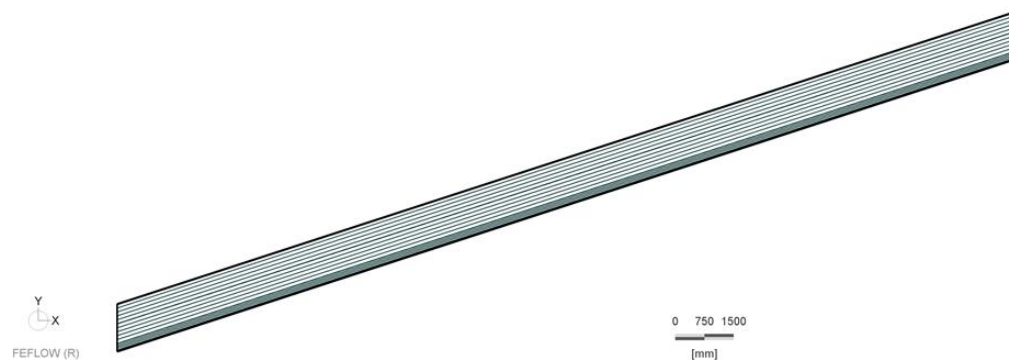





Figura 6.6 tentativo di supermesh 4: stato impermeabile, strado di drenaggio del biogas e tout-venant formati da cinque poligoni ciascuno; geotessili formati da tre poligoni ciascuno. Pacchetto inclinato.

Triangle




Property	Value
Quality Mesh	<input checked="" type="checkbox"/> True
Minimum Angle	30.00
Forces Delaunay	<input checked="" type="checkbox"/> True
Fill Holes	<input checked="" type="checkbox"/> True
Delaunay Algorithms	Incremental
Quiet Mode	<input checked="" type="checkbox"/> True
Steiner Points Insert...	Allow at all borders
Mesh Anisotropy	1.00
Refine Polygons	<input checked="" type="checkbox"/> True
Edge Refine Mode	ALL
Polygon Gradation	4
Polygon Target Size	0.02
Refine Lines	<input type="checkbox"/> False
Line Gradation	2
Line Target Size	0.20
Refine Points	<input type="checkbox"/> False
Point Gradation	2
Point Target Size	0.20

From Supermesh Elements

Property	Value
Element name	Supermesh
Proposed elements	300000
Meshing density	1.00

Tabella 6.15 pannello di controllo per il tentativo di mesh 4.

Si è ottenuta una griglia di calcolo composta da 722478 elementi e 363468 nodi.

Bibliografia

Abuel-Naga H M, Bergado D T, Bouazza A (2007), *Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay*. Eng Geol 89(1): 144-154

Abuel-Naga H M, Bergado D T, Bouazza A (2008), *Thermal conductivity evolution of saturated clay under consolidation process*. International Journal of Geomechanics.

Aldaeef A. A., Rayhani M. T. (2015), *Hydraulic performance of compacted clay liners under simulated daily thermal cycles*. Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada, Journal of Environmental Management 171-178

Apat, Agenzia per la protezione dell'ambiente e per I servizi tecnici (2006), *I quaderni della formazione ambientale, Rifiuti*.

Aronica S., Bonanno A., *Estimation of biogas produced by the landfill of Palermo, applying a Gaussian model*. Waste Management, Elsevier, 2009, pp. 233-239

Arpav (2014), *Produzione e gestione dei rifiuti urbani nel Veneto*.

Associazione Industrie Italiane Nontessuti Geotessili, *Tabelle sintetiche per il dimensionamento dei geotessili nelle applicazioni di ingegneria civile*.

Baclocchi R. (2012-2013), *Barriere Impermeabili*. Università di Roma "Tor Vergata"

Boeckx P., van Cleemput O., De Visscher A. (1999), *Methane Oxidation in simulated landfill cover soil environments*. Environmental Science and Technology

Bouazza A., Freund M, Nahlawi H., W (2006), *Water retention of nonwoven polyester geotextiles*. Science Direct, 25 (2006) 1038-1043

Calabresi G., *Terreni argillosi consistenti: esperienze italiane*

Campanella R G, Mitchell J K (1968), *Influence of temperature variations on soil behavior*. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 94(SM3): 709-734.

Chamberlain E J, Gow A J (1979), *Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils*. Eng Geol 13(1): 73-92

Dalla Santa G., Galgaro A., Tateo F., Cola S. (2016), *Modified compressibility of cohesive sediments induced by thermal anomalies due to a borehole heat exchanger*. Engineering Geology

Decreto Legislativo 13 gennaio 2003, n.36

Di Bartolo D., *Raccomandazioni tecniche per la progettazione geotecnica e strutturale delle discariche*.

Di Ciaula A, Valerio Federico, *Il trattamento della frazione organica dei rifiuti urbani (FORSU)*.

Dierickx W. (1999), *Opening size determination of technical textiles used in agricultural applications*. Geotextiles and Geomembranes 17, 231-245

Elghezal L., Trabelsi H., Jamei M., Romero E., *Desiccation effects on clay-based engineered barriers*.

Esposito L., Ferrante A. P., *Sull'impiego delle argille costipate per la impermeabilizzazione dei fondi delle discariche controllate*.

Faitli J., Magyar T., Erdélyi A., Muranyi A. (2014), *Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills*. Waste Management 36 (2015) 213-221

Favaretti M., *Comportamento a lungo termine dei sistemi di impermeabilizzazione*. Dipartimento di Ingegneria Idraulica; Marittima e Geotecnica; Università di Padova

Fricke B A, Misra A, Becker B R, Stewart Jr W E (1997), *Soil thermal conductivity: Effects of saturation and dry density*, Chicago: University of Missouri.

Gowing April Lee (2001), *Measuring and modelling of landfill gas emissions*. University of Waterloo, Ontario, Canada

Hanson J. L., Yesiller N., Swarbrick D. E. (2005), *Thermal analysis of GCLs at a municipal solid waste landfill*. Geotechnical Special Publication

Hanson J. L., Yesiller N., Oettle N. K. (2010), *Spatial and temporal temperature distributions in municipal solid waste landfills*. Geotechnical Special Publication

Horiguchi K (1979), *Studies on the behavior of unfrozen interlamellar water in frozen soil, in: Contributions from the Institute of Low Temperature Science A28*. The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 55 – 78.

Horai K. I. (1971), *Thermal conductivity of rock-forming minerals*. Journal of Geophysical Research, 76 (5), 1278-1308

Johansson T (2009), *Artificial ground freezing in clayey soils: laboratory and field studies of deformations during thawing at the Bothnia line*.

Kask U., Introduzione alla biomassa biodegradabile.

Keelson K. B. (2013), *Estimation of landfill methane gas emissions from the Mallam No.1 and Oblogo No.1 dumpsites in Ghana*. International Journal Of Engineering and Technology Innovation, vol.3, no.4, pp.279-288

Kim e Daniel (1992), *Effects of freezing oh hydraulic conductivity of compacted clay*. ASCE

Konrad J M (1989a), *Effect of freeze-thaw cycles on the freezing characteristics of a clayey silt at various overconsolidation ratios*. Canadian Geotechnical Journal, 26(2), 217-226.

Konrad J M (1989b), *Influence of overconsolidation on the freezing characteristics of a clayey silt*. Canadian Geotechnical Journal, 26(1), 9-21.

Konrad J M (1989c), Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts. *Cold Reg Sci Technol* 16(3): 291-303

Konrad J M (1990), *Unfrozen water as a function of void ratio in a clayey silt*. *Cold Reg Sci Technol* 18(1): 49-55

Konrad J M, Morgenstern N R (1980), *A Mechanistic Theory of Ice Lens Formation in Fine-Grained Soils*. *Can Geotech J* 17:473–486

Yesiller N., Hanson J. L. (2003), *Analysis of temperatures at a municipal solid waste landfill. Ninth International Waste Management and Landfill Symposium*

Yesiller N., Hanson J. L., Oettle N. K., Liu E.L. (2008), *Thermal analysis of cover system in municipal solid waste landfills*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*

Yesiller N., Hanson J. L., Liu E.L. (2005), *Heat generation in municipal solid waste landfills*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*

ISPRA, *Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale* (2014), *Rapporto Rifiuti Urbani, rapporto di sintesi*.

Lu H., Liu S. (2016), *Fractal analysis of cracking in a clayey soil under freeze-thaw cycles*. *Engineering Geology*

Marabese M. (2013-2014), *Assessment of biogas production models for municipal solid waste landfills through a case study in Veneto*. Master Thesis, ICEA Department, Univesità degli Studi di Padova

Miller C. J., Mi H., Yesiller N. (1998), *Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners*.

Nicolaev I. V., Leong W H, Rosen M A (2013) *Experimental investigation of soil thermal conductivity over a wide temperature range*. *International Journal of Thermophysics*, 34(6), 1110-1129.

Othman M A, Benson C H (1993), *Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay*. Can Geotech J 30(2): 236-246

Othman M A, Benson C H, Chamberlain E J, Zimmie T F(1994), *Laboratory testing to evaluate changes in hydraulic conductivity of compacted clays caused by freeze-thaw: state-of-the-art*. ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION, 1142, 227-227.

Piccinini S. (2004), *La digestione anaerobica dei rifiuti organici e di altre biomasse: situazione e prospettive in Europa e in Italia*.

Pierobon A., *Drenaggi di copertura di discarica e soluzioni equivalenti*.

Priyankara N., Thenuware T. A. U. D., Kumara O. D. L., Kawamoto K., Alagiyawanna A. M. N. (2006), *Shrinkage behavior of landfill clay liner material in dry zone*. ReserchGate

Relazione conclusiva del tavolo tecnico (21 gennaio 2000), *Putrescibilità dei rifiuti: definizione e determinazione analitica. Norme in materia di gestione dei rifiuti*, Capo VI, Artt. 32 e segg.

Singh R. M., Bouazza A. (2013), *Thermal conductivity of geosynthetics, Geotextile and Geomembranes*.

Solisio C., Reverberi A. P. (2011-2012), *Inverse estimation of temperature profiles in landfills using heat recovery fluids measurements*. Journal of Applied Mathematics, vol. 2012

Southen J. M., Rowe R. K., *Desiccation behavior of composite landfill lining systems under thermal gradients*.

Sterpi D. (2015), *Effect of freeze-thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey silt and influence of the compaction energy*. Soils and Foundations

Stormont J.C., Henry K.S., Evans T.M. (1997), *Water retention functions of four nonwoven polypropylene geotextiles*. Geosynthetics International, Vol.4 no.6

Witt K. J., Zeh R. M. (2005), *Cracks due to desiccation in cover lining systems phenomena and design strategy*. Internation Workshop “Hydro-Physico _mechanics of Landfills” LIRIGM, Grenoble University; France

Materiale didattico, Busana Stefano (2012), *Barriere minerali*.

Materiale didattico, Carrubba P. (2013), *Aspetti geotecnici nella realizzazione delle discariche RSU*. Università degli Studi di Padova

Materiale didattico, Cestaro, *Copertura della discariche*.

Materiale didattico, Cossu R. (2006), *Gestione dei rifiuti solidi*. Corso di Ingegneria Ambientale

Materiale didattico, *Processi in discarica*.

Materiale didattico, *Sistemi Barriera*.

Materiale didattico, *Sistemi di impermeabilizzazione delle discariche*.

Materiale didattico, *Rifiuti*.

Materiale didattico, *Terreni insaturi*.

Sitografia

www.wikipedia.it, *La raccolta differenziata*

www.wikipedia.it, *Come funziona una moderna discarica*

www.wikipedia.it, *Come funziona un impianto di selezione*

www.wikipedia.it, *Gestione dei rifiuti*

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Dott. Antonio Galgaro per avermi indirizzata a intraprendere questo lavoro di tesi, l'Ing. Giorgia Dalla Santa per avermi trasmesso la sua passione e vitalità per questo lavoro e il Dott. Matteo Cultrera per avermi consigliata con la pazienza e la gentilezza che lo contraddistinguono.

Ringrazio l'Ing. S. Busana per la disponibilità e competenza, i tecnici della società Le.Se. che gestiscono la discarica di Torretta di Legnago (VR) per averci gentilmente fornito i materiali e per averci dato la possibilità di accedere al sito, il Prof. M. Favaretti per i consigli, i tecnici del laboratorio ICEA Mattia e Paolo per le loro preziose spiegazioni, il Prof. F. Peron dell'Università IUAV di Venezia per aver risposto positivamente alle nostre richieste, i tecnici del laboratorio IUAV M. Celebrin e M. De Bei per la loro competenza e disponibilità nell'impostare i nuovi esperimenti e per i caffè offerti.

Ringrazio i miei genitori con tutto il cuore per avermi aiutata in questo percorso fatto di gioie, emozioni, fatiche e ansie. Grazie a mia sorella Alessia, per riuscire a farmi ridere sempre anche per le piccole cose. Voi, famiglia, mi siete stati vicini sempre e se sono arrivata fino a qui è anche merito vostro. Ringrazio il mio fidanzato Nicola, per avermi consigliata e assecondata in tante scelte, per aver ascoltato le mie insicurezze e aiutato a superarle. Ringrazio le mie amiche Giulia, Marilena, Chiara, Elena e Valeria, la mia amica Chiara cas-cas, i miei compagni di università con i quali ho trascorso momenti bellissimi, i miei parenti e cugini.

Questa è la parte dei ringraziamenti, ma vorrei salutare un ragazzo che è stato per me un punto di riferimento nei primi anni di università. Ciao Alessandro. Sono sicura che avresti fatto grandi cose nella vita e nel campo della geologia. Quegli appunti che mi avevi chiesto, non ho fatto in tempo a darteli...ma questa tesi è anche per te.