



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale Ingegneria Edile (LM24)

Permeabilità e compatibilità chimica di bentoniti naturali e polimerizzate per applicazioni in barriere idrauliche

Permeability and chemical compatibility of natural and polymerized bentonites for applications in hydraulic barriers

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. Francesco Mazzieri

Tesi di Laurea di:

Nazareno Iurescia

Correlatore: Chiar.mo/a

Dott. Ing. Davide Bernardo

A.A. 2022 / 2023

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. GEOCOMPOSITI BENTONITICI.....	2
1.1. Geocompositi bentonitici	2
1.2. Applicazioni dei GCL nell'ingegneria civile	3
1.3. Applicazione dei GCL nell'ingegneria edile.....	7
1.4. Proprietà idrauliche dei geocompositi bentonitici	7
1.5. Approcci per il miglioramento delle proprietà idrauliche delle bentoniti	9
1.6. Obiettivi della tesi.....	11
2. MATERIALI	12
2.1. Bentonite sodica	12
2.1.1. GCL1	13
2.1.2. GCL2	14
2.2. Polimeri.....	15
2.2.1. Poliacrilammide: aspetti generici	17
2.2.1.1. Poliacrilammide lineare (PA)	19
2.2.1.2. Poliacrilammide reticolare (PAx)	22
2.2.2. Carbossimetilcellulosa di sodio: aspetti generici	23
2.2.2.1. Carbossimetilcellulosa di sodio (CMC) utilizzata	24
2.3. Liquidi utilizzati	25
2.3.1. Acqua distillata (DW).....	25
2.3.2. Cloruro di calcio (CaCl ₂).....	26
3. METODI.....	28
3.1. Preparazione dei campioni	28
3.1.1. Campioni con bentonite non additivata	29
3.1.2. Dry-Mix (DM).....	32
3.1.2.1. Campioni con l'additivazione Dry-Mix (DM).....	33
3.1.3. Wet-Mix (WM)	39
3.1.3.1. Campioni con l'additivazione Wet-Mix (WM)	42
3.2. Metodi di prova impiegati.....	44

3.2.1. Prova di rigonfiamento libero (free swelling test).....	44
3.2.2. Aerometria	45
3.2.2.1. Caratteri generali.....	45
3.2.2.2. Apparecchiatura	47
3.2.2.3. Reagenti	48
3.2.2.4. Preparazione dei campioni.....	48
3.2.2.5. Correlazione temperatura - densità	50
3.2.2.6. Procedura	50
3.2.2.7. Calcoli.....	51
3.2.3. Prova di idratazione e rigonfiamento a pressione costante in edometro.....	54
3.2.3.1. Caratteri generali.....	54
3.2.3.2. Apparecchiatura	54
3.2.3.3. Preparazione dei campioni.....	56
3.2.3.4. Procedura	57
3.2.3.5. Calcoli.....	57
3.2.4. Prova di permeabilità.....	58
3.2.4.1. Caratteri generali.....	58
3.2.4.2. Apparecchiatura	60
3.2.4.3. Preparazione dei campioni.....	63
3.2.4.4. Procedura	64
3.2.4.5. Calcoli.....	67
4. RISULTATI.....	68
4.1. Prova di rigonfiamento libero (free swelling test).....	68
4.2. Aerometria	72
4.3. Idratazione e rigonfiamento a pressione costante in edometro	73
4.4. Prove di permeabilità	98
4.4.1. Prove di permeabilità in acqua distillata (DW).....	99
4.4.2. Prove di permeabilità in cloruro di calcio (CaCl ₂) con preidratazione in acqua distillata (DW)	102
4.4.3. Prove di permeabilità in cloruro di calcio (CaCl ₂).....	104
4.4.4. Misura del contenuto di acqua	108

5. ANALISI DEI RISULTATI.....	109
5.1. Rigonfiamento libero	109
5.1.1. Rigonfiamento libero a parità di bentonite in DW	109
5.1.2. Rigonfiamento libero a parità di bentonite in CaCl ₂	110
5.1.3. Conclusioni sul rigonfiamento libero in DW	111
5.1.4. Conclusioni sul rigonfiamento libero in CaCl ₂	112
5.1.5. Conclusioni sul rigonfiamento libero	113
5.2. Idratazione e rigonfiamento a pressione costante in edometro	114
5.2.1. Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL1 in DW	114
5.2.2. Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL2 in DW	116
5.2.3. Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL non additivati in DW.....	118
5.2.4. Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL2 additivati con PA in DW.....	120
5.2.5. Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL1 in CaCl ₂	122
5.2.6. Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL2 in CaCl ₂	123
5.2.7. Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL1 additivati con PA in CaCl ₂	125
5.2.8. Influenza del liquido utilizzato sulla prova di idratazione e rigonfiamento in edometro a pressione costante	128
5.3. Prove di permeabilità.....	138
5.3.1. Permeabilità GCL1	138
5.3.2. Permeabilità GCL2	140
5.3.3. Permeabilità GCL non additivati.....	141
5.3.4. Permeabilità GCL additivati con PA	143
5.3.5. Permeabilità GCL additivati	144
5.3.6. Effetto del liquido utilizzato sulla prova di permeabilità	145
5.4. Correlazione free swell - permeabilità.....	147
 CONCLUSIONI	 151
 BIBLIOGRAFIA.....	 153

INTRODUZIONE

I Geocompositi Bentonitici (GCL) sono barriere idrauliche prefabbricate costituite da uno strato di bentonite accoppiato a geosintetici e sono ampiamente utilizzati in varie applicazioni dell'ingegneria civile e edile quali l'impermeabilizzazione del fondo di bacini artificiali e canali, l'impermeabilizzazione di fondazioni e strutture interrato, nei sistemi di rivestimento di fondo e di copertura delle discariche controllate, come sostituti parziali o totali delle tradizionali barriere in argilla compattata (CCL). L'esteso utilizzo ha dato modo di evidenziare anche alcune criticità, ad esempio la possibilità dell'incremento di permeabilità ed quindi di perdita di efficienza in presenza di liquidi aggressivi (ad es. percolati di discarica o soluzioni elettrolitiche molto concentrate), dovuto alla sensibilità della bentonite alla composizione chimica del liquido permeante. Ciò ha motivato e stimolato la ricerca di tecniche per il miglioramento delle prestazioni idrauliche della bentonite. Una delle linee di ricerca più attuali riguarda l'additivazione della bentonite con polimeri con la finalità di mantenere una bassa permeabilità anche in presenza di liquidi permeanti aggressivi. La seguente tesi ed attività sperimentale si inseriscono in questo contesto. In particolare sono stati utilizzati due geocompositi bentonitici (indicati nel corso del lavoro genericamente come GCL1 e GCL2) presenti sul mercato, Questi due materiali sono stati modificati aggiungendo alla bentonite una percentuale di polimero del 5% o 10%. I polimeri utilizzati sono tre: poliacrilammide lineare (PA), solubile in acqua; poliacrilammide reticolare (PAx), non solubile in acqua; carbossimetilcellulosa di sodio (CMC), solubile in acqua. Le tecniche di additivazione utilizzate sono due: Dry-Mix (DM), miscelazione a secco di bentonite e polimero; Wet-Mix (WM), miscelazione di polimero bentonite in fase liquida e successivo essiccamento. Il comportamento idraulico dei materiali preparati è stato indagato con riferimento a due liquidi permeanti: acqua distillata (DW), che simula ambienti poco aggressivi (es. impermeabilizzazione di fondazioni) ed una soluzione di cloruro di calcio (167 mM CaCl_2), che simula ambienti molto aggressivi (es. percolato fondo discarica). Per indagare il comportamento idraulico e le caratteristiche del materiale sono state svolte varie tipologie di prove di laboratorio: 1) prove di rigonfiamento libero, che fornisce un indice della capacità di rigonfiamento della bentonite in un dato liquido e quindi un'indicazione qualitativa sulla permeabilità; 2) prova di rigonfiamento a pressione costante in cella edometrica, utilizzata sia con lo scopo di valutare la capacità di rigonfiamento delle varie miscele in presenza di confinamento, sia per confezionare i provini da sottoporre alle successive prove di permeabilità; 3) prova di permeabilità, con la quale è stata misurata direttamente la conducibilità idraulica dei materiali permeanti con i due liquidi di interesse; 4) analisi granulometriche per aerometria delle bentoniti di partenza, allo scopo di supportare l'interpretazione dei risultati ottenuti.

Capitolo 1

GEOCOMPOSITI BENTONITICI

1.1 Geocompositi bentonitici

I Geosynthetic Clay Liners (GCL) hanno trovato ampio spazio negli ultimi decenni nell'ingegneria civile, ambientale ed edile come barriere idrauliche compatte. I GCL sono costituiti da un sottile strato (5/10mm) di bentonite di sodio legato a due strati (superiore e inferiore) di geosintetico. I geosintetici, presenti nei GCL, possono essere di due tipologie: geotessili e geomembrane. I GCL a base di geotessili (Figura 1) sono legati tramite agugliatura con la bentonite contenuta tra i geotessili su entrambi i lati. Tale processo fa in modo che alcune fibre del geotessile superiore si estendano attraverso la bentonite ed il geotessile inferiore, legando insieme l'intera struttura. Per il GCL caratterizzato da una geomembrana (Figura 2), quest'ultima viene incollata ad uno strato di geotessile tramite adesivo non inquinante o laminatura. A causa della flessibilità della produzione e della rapida innovazione, le prestazioni dei diversi tipi di GCL possono variare in modo significativo. Le differenze principali riguardano: la mineralogia e la forma della bentonite (polvere o granulare, sodio o calcio, ecc) utilizzata nei GCL, il tipo di geotessile (tessuti o non tessuti), l'utilizzo di geomembrana, i metodi di solidarizzazione del pacchetto geosintetico – bentonite.



Figura 1: Schema GCL con geotessili
(fonte: <https://www.archiexpo.it/prod/cetco-europe/product-60195-427882.html>).

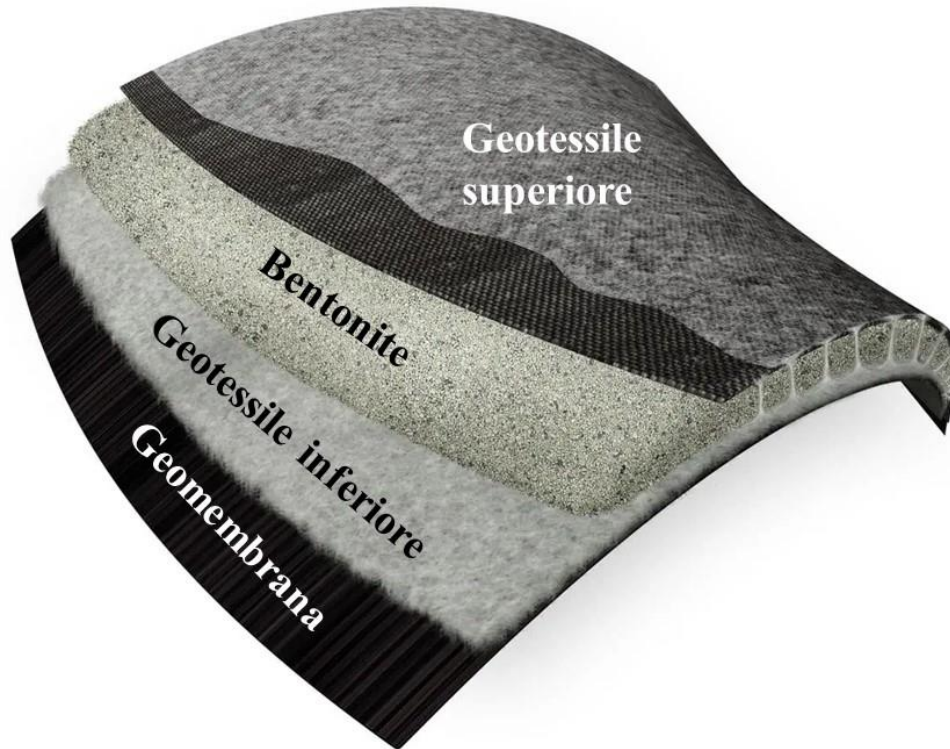
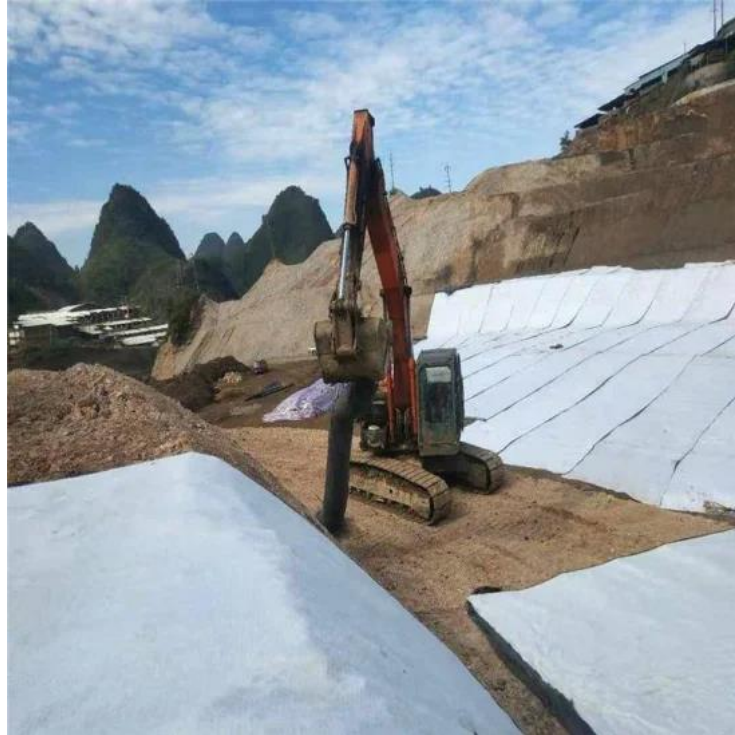


Figura 2: Schema GCL e geomembrana
(fonte: <https://www.archiexpo.it/prod/cetco-europe/product-60195-427897.html>).

1.2 Applicazioni dei GCL nell'ingegneria civile

Come già detto nel paragrafo precedente, i geocompositi bentonitici hanno trovato ampio spazio negli ultimi decenni nell'ingegneria civile ed ambientale. In particolare, i principali usi dei GCL in campo civile ed ambientale sono:

- Impermeabilizzazione delle discariche in abbinamento o in sostituzione delle barriere in argilla compattata (CCL): le barriere in argilla geosintetica vengono utilizzate per rivestire la base ed i lati delle discariche per prevenire la contaminazione del terreno e delle acque sotterranee da parte di liquidi percolati dai rifiuti;
- Serbatoi di stoccaggio: vengono utilizzati per impermeabilizzare i serbatoi di stoccaggio di liquidi come acque reflue, liquami industriali o sostanze chimiche, evitando fuoriuscite e dispersioni nell'ambiente circostante;
- Bacini e stagni: i rivestimenti in argilla geosintetica vengono impiegati per creare superfici impermeabili all'interno dei bacini e stagni per conservare l'acqua per scopi di irrigazione, controllo delle piene o per usi industriali;
- Canali di irrigazione e di drenaggio: vengono utilizzati per rivestire canali di irrigazione o di drenaggio in modo da ridurre le perdite d'acqua e massimizzare l'efficienza dell'irrigazione;
- Tunnel e opere sotterranee: possono essere utilizzati per rivestire tunnel e gallerie per impedire l'infiltrazione dell'acqua.



*Figura 3: Esempio applicazione di GCL all'interno di una discarica
(fonte: https://it.made-in-china.com/co_zhonglu/image_Swelling-Waterproof-Bentonite-Sheet-Bentonite-Mat-Geosynthetic-Clay-Liners-Bentonite-Geotextile-for-Landfill_yssygnhsog_2f1j00cakogHenfybh.html).*



*Figura 4: Esempio di GCL posti all'interno di bacini idrici
(fonte: <https://it.hlgeomembrane.com/geosynthetic-clay-liner/gcl.html>).*

Il loro ampio utilizzo in campo civile ed ambientale è dovuto ad una serie di vantaggi che rendono i GCL dei validi sostituti dei CCL. I principali vantaggi sono: spessore limitato, buona conformità con gli assestamenti del terreno sottostante, facilità di installazione e basso costo. A questi però si aggiungono una serie di svantaggi, che sono: vulnerabilità ad incidenti o tagli dovuti a sforzi meccanici, ridotta efficienza come barriera idraulica se permeata con liquidi aggressivi diversi dall'acqua. In particolare, i principali vantaggi e svantaggi sono elencati nella Tabella 2. Oltre a ciò, per avere un quadro di insieme più completo, nella tabella 1 è riportata l'equivalenza tra i GCL ed i CCL che ci consente di capire in maniera

più critica l'applicabilità dell'uno o dell'altro materiale in campo civile ed ambientale (e non solo).

Tabella 1: Comparazione GCL – CCL nelle applicazioni in discarica (fonte: Manassero et al., 2000).

Categoria	Criterio di valutazione	Equivalenza tra GCL e CCL			
		GCL superiore	GCL equivalente a CCL	CCL superiore	Dipende dal sito
-	-				
Messa in opera	Facilità di posizionamento	X			
	Disponibilità del materiale	X			
	Resistenza alla perforazione			X	
	Controllo di qualità	X			
	Velocità di costruzione	X			
	Condizione del sottofondo	X			
	Fabbisogno idrico				X
Vincoli meteorologici				X	
Presenza di contaminanti	Capacità di attenuazione				X
	Permeabilità ai gas				X
	Flusso di soluti e tempo di penetrazione		X		
Problemi idraulici	Compatibilità	X			
	Acqua di consolidazione	X			
	Flusso costante stazionario		X		
	Tempo di attraversamento dell'acqua		X		
Problemi fisico/meccanici	Gelo/disgelo	X			
	Cedimenti differenziali	X			
	Stabilità dei pendii				X
	Cicli bagnato/asciutto	X			

Tabella 2: Vantaggi e svantaggi nell'utilizzo dei GCL (fonte: Bouazza, 2002).

Vantaggi	Svantaggi
Installazione rapida/manodopera meno qualificata/basso costo	Bassa resistenza al taglio della bentonite idrata (per GCL non rinforzati)
Bassissima conducibilità idraulica all'acqua se correttamente installata	I GCL possono essere forati durante o dopo l'installazione
Può sopportare un grande assestamento differenziale	Possibile perdita di bentonite durante il posizionamento
Eccellenti caratteristiche di auto-guarigione	Bentonite a bassa umidità permeabile ai gas
Non dipende dalla disponibilità di suoli locali	Potenziali problemi di resistenza alle interfacce con altri materiali
Facile da riparare	Minore capacità di attenuazione del percolato
Resistenza agli effetti dei cicli di congelamento/disgelo	Possibile perdita di resistenza al taglio post-picco
Più spazio grazie al minore spessore	Possibile maggiore flusso a lungo termine dovuto a una riduzione dello spessore della bentonite sotto una sollecitazione normale applicata
Test di conducibilità idraulica sul campo non richiesto	Possibile aumento della conducibilità idraulica a causa di problemi di compatibilità con contaminanti se non preidratati con fonte d'acqua compatibile
Il GCL idratato è un'efficace barriera ai gas	Maggiore flusso diffusivo di contaminanti rispetto ai rivestimenti in argilla compattata
Ridurre lo stress da sovraccarico sul substrato comprimibile (RSU)	Incline allo scambio ionico (per GCL con bentonite di sodio)
	Soggetto a disseccamento se non adeguatamente coperto (almeno 0,6 m di terreno)

1.3 Applicazione dei GCL nell'ingegneria edile

In campo edile le principali applicazioni dei geocompositi bentonitici riguardano:

- L'impermeabilizzazione delle strutture di fondazione;
- L'impermeabilizzazione dei piani interrati;
- La protezione alla diffusione dei gas nei piani interrati/piani terra (es. gas Radon);
- La protezione contro l'umidità di risalita nei piani interrati/piano terra.



*Figura 5: Impermeabilizzazione di una platea di fondazione con l'uso di GCL
(fonte: Mapeproof - Bentonite Clay Below-Grade Waterproofing System).*

1.4 Proprietà idrauliche dei geocompositi bentonitici

La conduttività idraulica dei GCL convenzionali è controllata principalmente dal rigonfiamento della bentonite di sodio (Na-B). Il minerale dominante del Na-B è la montmorillite, con Na^+ come catione interstrato dominante. Quando viene idratata con acqua o soluzione diluita, la bentonite inizia il processo di rigonfiamento che si distingue in due fasi: rigonfiamento cristallino ed osmotico. Durante la prima fase, la superficie argillosa interna ed esterna viene idratata insieme i cationi presenti, ciò si traduce in molecole di acqua che si diffondono nelle regioni interstrato delle particelle aggregate di montmorillite per formare dei gusci di idratazione attorno agli ioni Na^+ . Il rigonfiamento cristallino determina una differenza di concentrazione di soluto tra l'interstrato ed il fluido presente nei pori interparticellari, ciò provoca un gradiente osmotico. Questa differenza di potenziale chimico spinge le molecole di acqua aggiuntive nell'interstrato di argilla provocando il rigonfiamento osmotico. Il risultato finale di tale fase è uno strato spesso di molecole immobili di ioni ed acqua (doppio strato diffuso) attorno alle singole particelle di montmorillite che causa la

separazione di queste ultime. Nella Figura 6 vengono mostrati il rigonfiamento cristallino ed osmotico di un minerale argilloso. Nella prima fase, l'idratazione dell'argilla parte da uno stato completamente secco fino a comprendere quattro strati di molecole di acqua. Di conseguenza distanza di interstrato (d_{001}) passa da 0,9 nm a 2,2 nm; invece, la fase osmotica può ospitare diversi strati di molecole di acqua e si traduce in un aumento considerevole dell'altezza del rigonfiamento, $d_{001} > 2,2 \text{ nm}$. Il rigonfiamento osmotico riduce i pori intergranulari nel tessuto bentonitico e produce un percorso di flusso tortuoso del liquido permeato, causando una bassa conduttività idraulica. ($\leq 1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$).

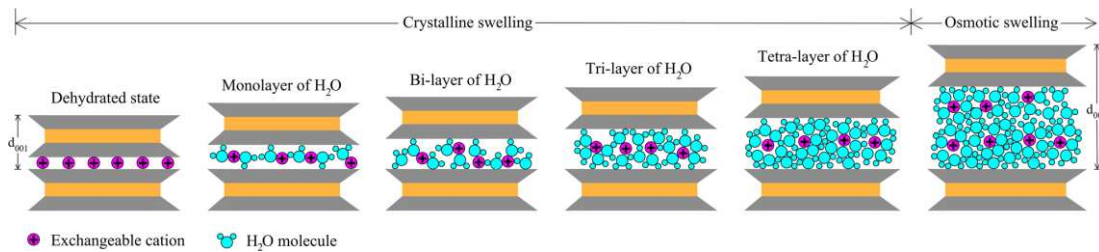


Figura 6: Schema di rigonfiamento (cristallino ed osmotico) della bentonite (fonte: S. Keerthana et al., 2022).

La conduttività idraulica dipende, oltre che dal rigonfiamento della bentonite, anche da altri fattori, quali: la purezza del materiale, la dimensione dell'aggregato, la massa di bentonite per unità di superficie, il tipo di GCL, la natura del permeante, la composizione del catione legato e dallo stress di confinamento. Per quanto riguarda quest'ultimo fattore, in base alla pressione di confinamento la conducibilità idraulica varia tra $2 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ e $2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$. La conducibilità idraulica (k), infatti, è direttamente proporzionale all'indice dei vuoti più bassi del materiale derivanti da sollecitazioni di confinamento più elevate. In Figura 7 viene evidenziata la variazione della conducibilità idraulica in base alla tensione di confinamento, i dati sono presi da varie fonti in letteratura.

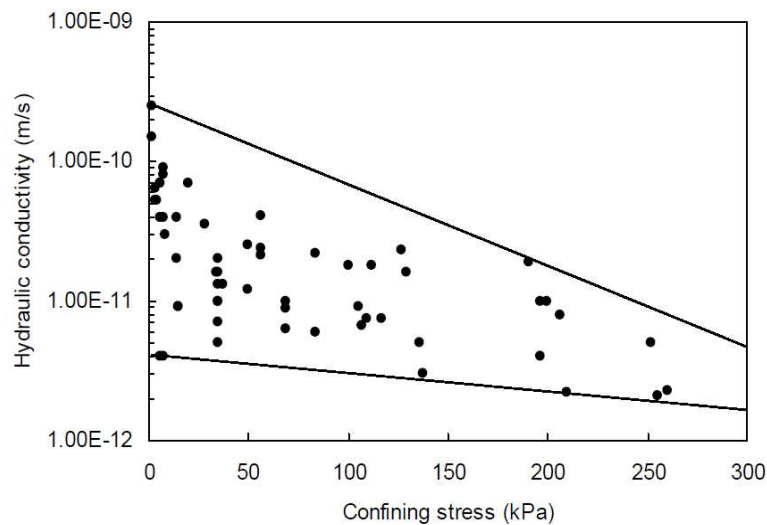


Figura 7: Variazione della conducibilità idraulica rispetto allo stress di confinamento (fonte: Bouazza, 2002).

I GCL utilizzati in alcune applicazioni sono esposti a sostanze permeanti caratterizzate da soluzioni acquose diluite con altri liquidi più aggressivi ed altamente concentrati (es. percolati presenti in discarica). Quando la Na-B viene idratata con questi liquidi aggressivi il rigonfiamento osmotico viene soppresso, lo spessore del doppio strato diffuso viene compresso e la struttura argillosa diventa più flocculata. Questo porta alla formazione di grandi pori intergranulari con conseguente elevata conducibilità idraulica ($> 1 \times 10^{-10}$ m/s).

La permeabilità idraulica (k) rispetto ad un liquido permeato diverso dall'acqua viene valutata tramite un test di compatibilità in cui il materiale (GCL) viene permeato: o con un liquido raccolto in un sito inquinato, oppure con fluido che è in grado di simulare un determinato percolato. Le caratteristiche dei GCL che influenzano la loro conducibilità idraulica rispetto ad un liquido diverso dall'acqua sono: dimensione dell'aggregato, contenuto di motmorillite, preidratazione con acqua e rapporto di vuoto della componente minerale. Invece, i fattori legati al liquido permeante che influenzano la permeabilità idraulica dei GCL sono: concentrazione di cationi monovalenti e bivalenti.

Gli studi sulla compatibilità chimica presenti in letteratura hanno evidenziato una riduzione delle prestazioni idrauliche dei GCL quando questi vengono permeati con soluzioni ad alta concentrazione ionica. Infatti, quando la bentonite di sodio interagisce con ioni multivalenti, le reazioni di scambio cationico sostituiscono gli ioni di sodio monovalenti. Di conseguenza la bentonite non subisce un adeguato rigonfiamento (anche dopo una successiva reidratazione con acqua) e ciò si traduce in un alto valore di conducibilità idraulica k. Le condizioni che favoriscono lo scambio cationico sono: permeanti ad alta forza ionica, condizioni estreme di pH, variazioni di temperatura e di umidità, cicli umido-secco, effetti gelo-disgelo, bassa pressione di confinamento.

1.5 Approcci per il miglioramento delle proprietà idrauliche delle bentoniti

Nel paragrafo precedente sono state analizzate le proprietà idrauliche della bentonite, in particolare ci si è concentrati anche sull'incapacità della stessa di contenere i contaminanti aggressivi. Per questo motivo sono stati eseguiti una serie di studi e sperimentazioni con la necessità di creare una barriera efficace che consenta di proteggere l'ambiente dai contaminanti (es. percolati). Alcuni di questi studi hanno portato all'invenzione di bentoniti modificate tramite la miscelazione della stessa con polimeri organici, dimostrando che questo metodo migliora le prestazioni idrauliche dei GCL, principalmente se permeati con liquidi aggressivi.

L'incorporazione dei polimeri crea un aumento della pressione di rigonfiamento, migliora le proprietà della membrana, limita lo scambio cationico, migliora la capacità di legare l'acqua alle argille. La bentonite polimerizzata ha vari effetti che possono essere riassunti come: una modifica delle superfici argillose e quindi dell'interazione argilla-acqua a causa dell'assorbimento del polimero; l'intasamento di grandi pori idraulicamente attivi da parte di un gel polimerico altamente viscoso; altre interazioni del polimero e del fluido nei pori.

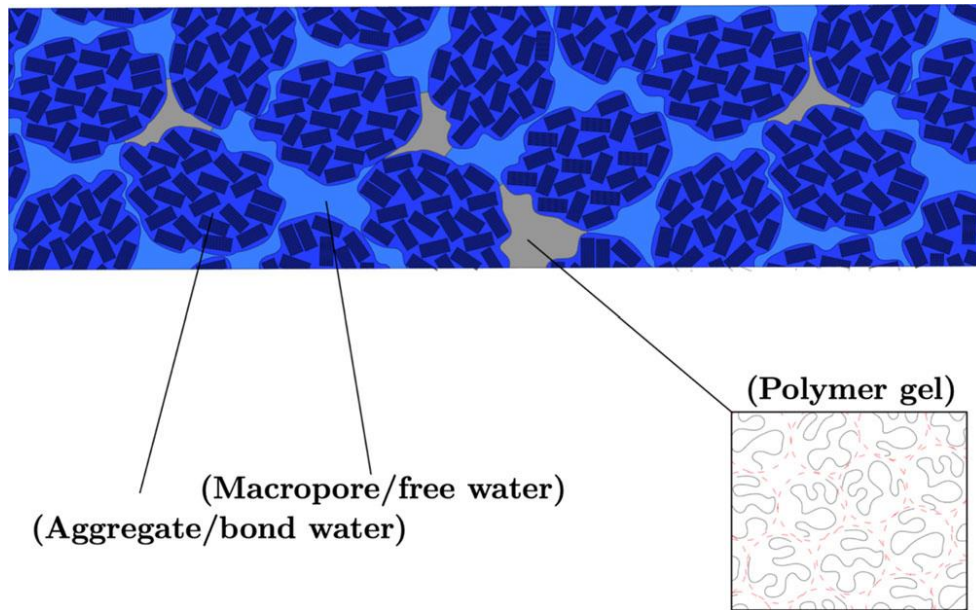


Figura 8: Esempio di intasamento di un'argilla causato da un gel polimerico (fonte: Wolfgang Lieske et al, 2022).

I GCL migliorati vengono realizzati miscelando l'argilla ed il polimero attraverso tre metodologie: miscelazione a secco (dry-mix), miscelazione umida o liquida (wet-mix) ed aspersione secca superficiale (dry-sprinkled). Quest'ultimo non è un metodo di produzione consolidato, ma è stato sperimentato solo al livello di ricerca. In base al tipo di miscelazione si ottengono diverse interazioni polimero-argilla (riassunte nella Figura 9) ed apparentemente ciò potrebbe portare anche a diverse conducibilità idrauliche. Questi aspetti verranno analizzati ed approfonditi nei successivi capitoli.

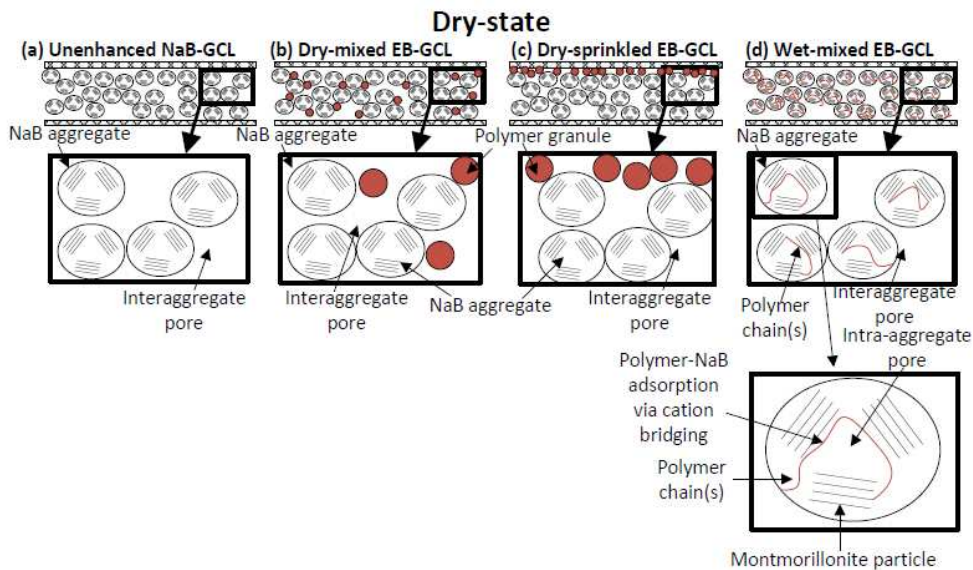


Figura 9: Rappresentazioni schematiche di geocompositi bentonitici (GCL) allo stato secco caratterizzati da (a) bentonite di sodio non potenziata (NaB) o da bentonite potenziata utilizzando (b) dry-mix, (c) dry-sprinkled o (d) wet-mix, con relative interazioni argilla-polimero (fonte: Norris, 2020).

1.6 Obiettivi della tesi

In questo contesto appena descritto si pone la seguente tesi sperimentale, il suo obiettivo è quello di indagare le prestazioni idrauliche di rivestimenti in argilla geosintetica vergine e polimerizzata, confrontando i dati ottenuti tra di loro e con quelli presenti in letteratura. Per raggiungere questo obiettivo sono state utilizzate due tipologie di bentonite disponibili sul mercato (GCL1 e GCL2) e tre tipologie di polimero: poliacrilammide (PA), poliacrilammide reticolata (PAx) e carbossimetilcellulosa (CMC). Le prestazioni idrauliche sono state valutate sia sulla bentonite vergine e su quella polimerizzata. Le tecniche di additivazione utilizzate sono state due: Dry-Mix (DM) e Wet-Mix (WM). Il contenuto in massa di polimero varia tra 5% e 10%. I liquidi permeanti utilizzati sono stati due: acqua distillata (DW) e cloruro di calcio (CaCl_2), quasi tutti i campioni sono stati preidratati e poi permeati con lo stesso fluido, tranne alcuni che hanno subito un processo di preidratazione in DW, e poi un processo di permeazione sempre in acqua distillata per finire con un processo di permeazione in CaCl_2 . Le caratteristiche idrauliche dei materiali utilizzati sono state indagate tramite varie prove di laboratorio: prove di rigonfiamento libero, per indagare il free swell delle miscele utilizzate in modo da avere un'approssimazione quantitativa sull'eventuale comportamento idraulico del materiale; prove di rigonfiamento vincolato in edometro a pressione costante, utilizzata per idratare i pacchetti di materiali ricostruiti e valutarne il rigonfiamento a pressione verticale costante; prova di permeabilità, utilizzata per indagare la velocità di permeazione di un liquido attraverso il materiale in esame; aerometria, per individuare varie differenze tra le bentoniti contenute nei due GCL utilizzati da un punto di vista granulometrico.

Capitolo 2 MATERIALI

2.1 Bentonite sodica

Il termine bentonite fa riferimento ad un'argilla altamente plastica che viene utilizzata per la realizzazione di barriere idrauliche composte da geocompositi bentonitici (GCL). Tuttavia, la bentonite non è il nome del minerale ma è un'argilla smectice composta da un'alta percentuale (70% - 90%) di minerale di motmorillonite. Quest'ultimo è formato da un foglio di unità ottaedriche incorporate tra due fogli di unità tetraedriche, il tutto presenta una carica netta negativa. Questa caratteristica porta all'assorbimento di cationi sulla superficie del materiale, il tipo di cationi che vengono assorbiti dipende dalle condizioni al contorno. Nelle applicazioni ambientali, vengono utilizzate principalmente bentoniti formate da un'alta percentuale di ioni di sodio o calcio. La bentonite di sodio (Na-B) è quella presente nei geocompositi bentonitici utilizzati nella seguente tesi sperimentale.

La dimensione delle particelle di smectice dipende dalle condizioni al contorno (contenuto di acqua, presenza di ioni, vincoli meccanici, ecc.), inoltre lo spazio tra gli strati di una particella può essere espanso attraverso l'idratazione con acqua o con altri fluidi. Tuttavia, una scomposizione al livello di singole particelle non è possibile con le sole azioni meccaniche. La disposizione spaziale delle particelle varia significativamente in base alla configurazione geometrica ed alla dimensione degli aggregati, questo determina anche le proprietà idromeccaniche dell'argilla.

La bentonite presenta due tipologie di pori, questi si distinguono in base alla loro posizione in: pori inter-aggregati, che sono incorporati negli aggregati; pori intra-aggregati, che si trovano tra un aggregato e l'altro. In condizioni di confinamento, lo spazio tra i pori intra-aggregati viene ridotto considerevolmente durante la saturazione, poiché l'idratazione della smectice causa l'espansione degli strati. A causa della dimensione ridotta di questi pori, il flusso idraulico segue dei percorsi tortuosi tra gli aggregati determinando le ottime prestazioni idrauliche delle barriere dei rivestimenti in argilla geosintetica.

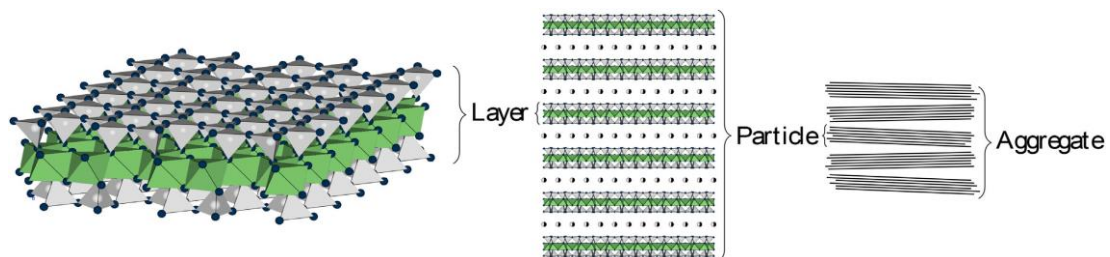


Figura 10: Rappresentazione schematica della smectite come singolo strato, particella ed aggregato.

2.1.1 GCL1

I rivestimenti bentonitici utilizzati nelle prove sperimentali sono due: GCL1; GCL2. Il primo tra questi (GCL1) è commercializzato con il nome di Bentofix, più precisamente presenta la dicitura commerciale: Bentofix BFG 5000. Il GCL1 è composto da due geotessili: quello superiore consistente in un gtx tessuto in polipropilene a maglie larghe; quello inferiore consistente in un gtx non tessuto in polipropilene saturato di bentonite. I due geotessili sono uniti tra loro attraverso un processo di agugliatura (needle punching). Le caratteristiche tecniche del materiale sono elencate in Tabella 3.

Tabella 3: Scheda tecnica GCL1.

Proprietà	Metodo di misura	Unità	Valori
Geotessile			
Massa areica geo. sup.	EN ISO 9864 (EN 965)	g/m ²	200
Massa areica geo. inf.	EN ISO 9864 (EN 965)	g/m ²	300
Bentonite di sodio			
Massa areica	EN 14196	g/m ²	4.200+800
Indice di rigonfiamento	ASTM D 5890	ml/2g	24
Perdita di fluido	ASTM D 5891	ml	≤18
Contenuto d'acqua	DIN 18121/ ISO 11465	%	≈10
Geocomposito bentonitico			
Massa areica	EN 14196	g/m ²	5.500
Spessore	EN ISO 9863-1 (EN 964-1)	mm	7,0
Massima resistenza a trazione: longitudinale/trasversale	EN ISO 10319/ASTM 4595	kN/m	20,0/11,0
Allungamento a rottura: longitudinale/trasversale	EN ISO 10319/ASTM 4595	%	10,0/5,0
Resistenza allo spellamento	ASTM D 6496	N/10cm; N/m	≥60; ≥360
Resistenza al punzonamento	EN ISO 12236	N	2.500
Permeabilità idraulica	DIN 18130/ASTM D 5887	m/s	2 × 10 ⁻¹¹
Indice di flusso	DIN 18130/ASTM D 5887	(m ³ /m ²)/s	5 × 10 ⁻⁹



Figura 11: Immagine del GCL1.

2.1.2 GCL2

Il GCL2 è commercializzato con il nome di Bentomat, più precisamente il materiale utilizzato presenta la dicitura commerciale: Bentomat SS100. Questo è composto da due geotessili: quello superiore costituito da un gtx tessuto in polipropilene; quello inferiore costituito da un gtx non tessuto in polipropilene saturato di bentonite di sodio (Na-B) granulare. I due geotessili sono uniti tra loro da un processo di agugliatura (needle punching). La scheda tecnica del GCL2 è riportata nella seguente Tabella 4.

Tabella 4: Scheda tecnica GCL2.

Proprietà analizzate	Standard di riferimento	Campione di riferimento	Risultati ottenuti
Swell index bentonite	ASTM D 5890	10,000 m ²	24 ml/2g min.
Massa di bentonite per unità di area	ASTM D 5993 EN 14196	5,000 m ²	4.8 kg/m ²
Perdita di flusso della bentonite	ASTM 5891	10,000 m ²	18 ml max.
Resistenza allo spellamento	ASTM D 6496	5,000 m ²	65 N
Indice di flusso GCL	ASTM D 5887	25,000 m ²	$2 \times 10^{-9} (m^3/m^2)/s$
Permeabilità GCL	ASTM D 5887	25,000 m ²	$1 \times 10^{-11} m/s$
Resistenza alla trazione	EN ISO 10319	20,000 m ²	8 kN/m
Allungamento	EN ISO 10319	20,000 m ²	15%
Massa per unità di area del geotessile tessuto (superiore)	ASTM D 5761	1 per 20,000 m ²	100 g/m ²
Massa per unità di area del geotessile non tessuto (inferiore)	ASTM D 5761	1 per 20,000 m ²	200 g/m ²



Figura 12: Immagine del GCL2.



Figura 13: Confronto tra le due bentoniti utilizzate, in ordine da sinistra a destra: GCL1 passante al setaccio n.80 (180 μm); GCL2 granulata e quindi non passante al setaccio n.80 (180 μm); GCL2 sminuzzata con il mortaio e quindi passante al setaccio n.80 (180 μm).

2.2 I polimeri

Il termine polimero descrive una serie di macromolecole complesse composte da diverse unità di ripetizione collegate tra loro da legami covalenti che formano così la struttura di base, questa può essere lineare o reticolata. I polimeri lineari sono solubili in acqua, a differenza di quelli reticolari che in acqua presentano una certa capacità di rigonfiamento (idrogel). Con il termine “polimero organico” viene descritta una categoria di polimero che comprende tutti quelli formati da una struttura di base di carbonio.

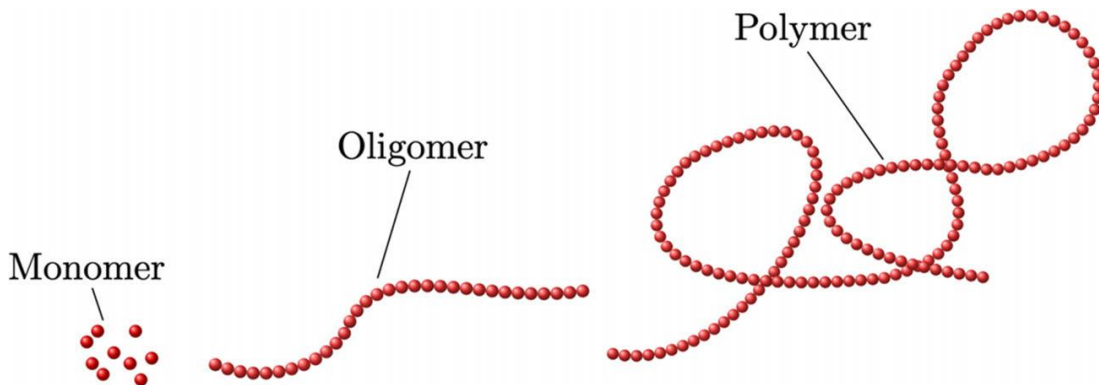


Figura 14: Rappresentazione schematica di un monomero, oligomero e polimero.
(fonte: Wolfgang Lieske et al, 2022).

In Figura 14 viene illustrato in maniera schematica una catena polimerica lineare. Ogni sfera rappresenta un'unità di ripetizione (monomero); i polimeri, infatti, sono costituiti da centinaia di migliaia di monomeri. Sempre in figura 14 sono rappresentati gli oligomeri, che sono caratterizzati da una serie di unità ripetute come

i polimeri. A differenza di questi ultimi però, gli oligomeri sono più corti e non mostrano le stesse caratteristiche di un polimero in soluzione.

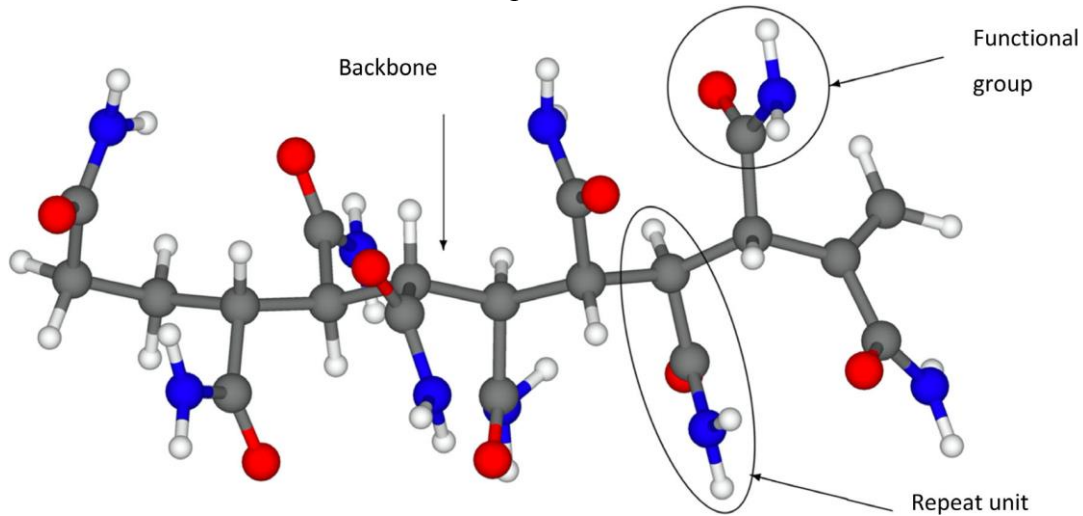


Figura 15: Esempio di una struttura di base di un polimero (poliacrilammide)
(fonte: Wolfgang Lieske et al, 2022).

In Figura 15 è rappresentata una struttura di base di un polimero (in questo caso la poliacrilammide), essa è composta da una serie di atomi di carbonio collegati tra loro. Ai lati della catena principale del polimero, si trovano le molecole laterali che vengono chiamate “gruppi funzionali”. Questi ultimi possono essere non carichi (polimeri non ionici), carichi negativamente (polimeri anionici) o carichi positivamente (polimeri cationici). Questi gruppi funzionali rappresentano i possibili punti di interazione con i minerali argillosi.

Le catene polimeriche composte da combinazioni diverse di unità di ripetizione prendono il nome di co-polimeri, mentre quelle che presentano un unico tipo di monomero prendono il nome di omo-polimeri. Il numero di unità di ripetizione assemblate in un singolo polimero determina il peso molecolare medio, questo parametro è fondamentale per determinare le proprietà macroscopiche delle soluzioni polimeriche, comprese le potenziali interazioni polimero – argilla. Infatti, la viscosità dei polimeri a catena corta è inferiore a quella degli stessi a catena lunga. Alterazioni del peso molecolare possono essere associate a fluttuazioni di qualità o influenze esterne come una degradazione meccanica o biologica.

Le catene polimeriche possono mostrare disposizioni geometriche molto diverse, che sono determinate da meccanismi di interazione all’interno di una singola catena. Effetti elettrostatici fanno sì che le catene polimeriche lineari non cariche si dispongano in spirali dense in soluzione, mentre i polimeri carichi abbiano una geometria più allungata a causa della repulsione all’interno della catena. Più precisamente, il volume occupato da una singola catena polimerica dispersa in un solvente è determinato da diversi fattori, ovvero: caratteristiche del polimero, qualità del solvente e condizioni al contorno. Le caratteristiche tipiche del polimero in questo contesto sono: il peso molecolare medio, le proprietà di carica, la flessibilità della struttura di base e la complessità dei gruppi funzionali. La qualità del solvente a sua volta è influenzata da: il valore di pH, il contenuto di sale, la temperatura, ecc.

Per quanto riguarda invece le condizioni al contorno, un loro cambiamento può influenzare i meccanismi di interazione polimero – argilla nel contesto della formazione dei GCL modificati. Le dimensioni e la forma della catena polimerica giocano un ruolo fondamentale nel processo di intercalazione, di adsorbimento e formazione del micro-tessuto risultante.

Secondo l'origine della materia prima polimerica, è possibile classificare i polimeri in: naturali e sintetici. I polimeri naturali (o biopolimeri) vengono prodotti da microrganismi coltivati appositamente per questo scopo, questa tipologia è solitamente associata ad una produzione più sostenibile ed a prezzi più bassi, sono inoltre materiali biodegradabili. I polimeri sintetici vengono prodotti dai derivati del petrolio, questi offrono una buona uniformità tra i vari lotti e proprietà prevedibili (es. caratteristiche meccaniche e velocità di degradazione).

2.2.1 Poliacrilammide: aspetti generici

La poliacrilammide (PAM) è un polimero organico formato da monomeri di acrilammide. La PAM solitamente si presenta con una struttura a catena lineare (poliacrilammide lineare – PA), tuttavia può essere modificata per formare delle varianti reticolate (poliacrilammide reticolata – PAX). Tipicamente è un polimero non ionico, tuttavia a causa dell'idrolisi di alcuni gruppi ammidici si potrebbero creare alcuni gruppi carbossilici dando alla poliacrilammide alcune deboli proprietà ioniche.

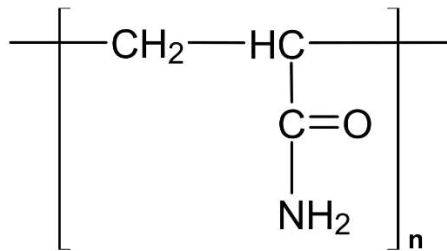


Figura 16: Unità monomerica della poliacrilammide.

(Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Gel_di_poliacrilammide)

La PAM è solubile o rigonfiabile in acqua in base al tipo: lineare (PA) o reticolata (PAX). Nel primo caso, la poliacrilammide lineare a contatto con una soluzione acquosa ne aumenta la viscosità e favorisce la flocculazione delle particelle; nel secondo caso, la poliacrilammide reticolata a contatto con una soluzione acquosa assorbe e trattiene le molecole di H₂O, poiché i gruppi ammidici formano forti legami ad idrogeno con l'acqua, determinando così la formazione di quello che viene definito "idrogel". Il peso molecolare gioca un ruolo fondamentale nella qualità del materiale, infatti la viscosità della soluzione polimerica aumenta all'aumentare del peso molecolare. Dal punto di vista termico, la temperatura di transizione vetrosa della poliacrilammide è di 125 °C, mentre la fusione è intorno ai 300 °C.

Il polimero viene sintetizzato utilizzando la N,N'-metilbisacrilammide. I PAM polimerizzano con l'utilizzo di radicali liberi. Il persolfato di ammonio viene utilizzato tipicamente come iniziatore, la tetrametiletildiammina come stabilizzante ed il bisacrilamide come reticolante. La reazione di polimerizzazione crea così un polimero tipicamente ad alto peso molecolare.

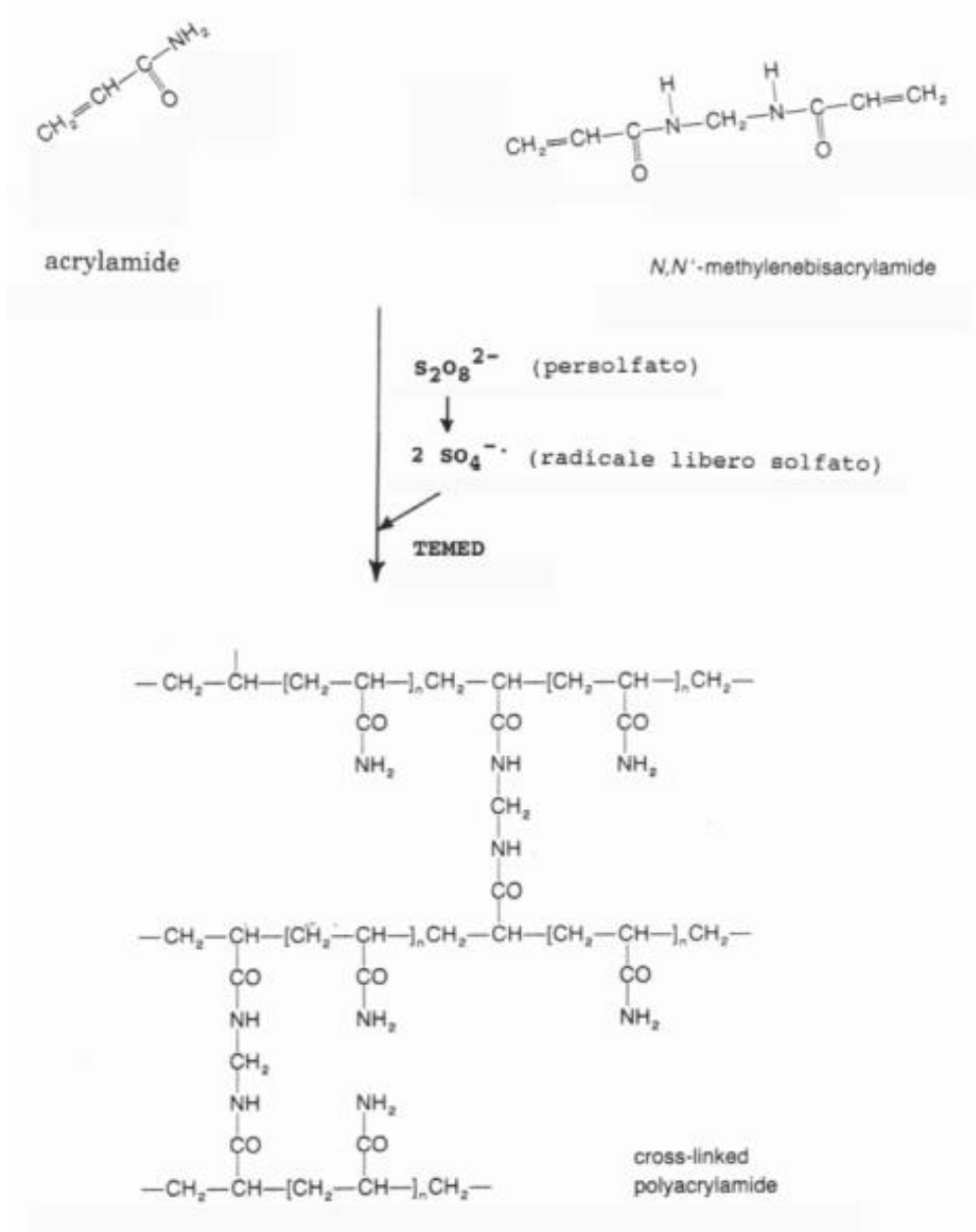


Figura 18: Processo di sintesi della poliacrilammide reticolata (PAx).

2.2.1.1 Poliacrilammide lineare (PA)

La poliacrilammide lineare (PA) anionica ad alto peso molecolare, utilizzata nel seguente studio, è commercializzata con il nome di Polyactive Power e prodotta dalla Micronizzazione Innovativa Srl. È venduta sotto forma di polvere molto fine. In particolare, questo tipo di poliacrilammide viene utilizzata in campo agricolo come addensante nei terreni, essendo infatti ad alto peso molecolare assorbe grandi quantità di acqua creando un gel molto viscoso. Nelle Figure 19 e 20 sono riportate le schede con cui questa PA viene commercializzata.



MICRONIZZAZIONE INNOVATIVA

POLYACTIVE POWDER

Regolato dal D.L. 75/2010 - allegato 6 come "prodotto ad azione sul suolo"



Come si applica?

Azione
1

Distribuzione

Il prodotto va distribuito sotto la superficie dove deve germinare il seme e svilupparsi l'apparato radicale.
Questa operazione può essere fatta in abbinamento con le abituali attività di coltivazione.
Per colture a pieno campo: **min. 6-8 kg/Ha**



Azione
2

Irrigazione

Dopo l'applicazione necessita irrigare per facilitare ed accelerare l'attivazione del prodotto e la gestione dell'acqua nel suolo.



Come funziona


- Polyactive si lega nello strato di suolo esplorato dalle radici
- Con l'irrigazione, le particelle assorbono acqua e nutrienti per circa 300 volte il loro peso, creando un ambiente ideale per lo sviluppo delle piante, radici e microorganismi.
- La sua struttura lineare razionalizza e gestisce l'acqua, riducendone sensibilmente la dispersione
- La sua carica anionica stimola la captazione degli ioni positivi (Calcio, Magnesio, Potassio, Azoto ammoniacale) a beneficio delle colture, diminuendo la quota dilavata persa in falda.
- La struttura, la fertilità del suolo e l'efficienza dei fertilizzanti migliorano. Sensibile riduzione degli stress IDRICI e NUTRIZIONALI

Polyactive si BIODEGRADA NATURALMENTE in:
CO₂, H₂O, NH₃ in tempi variabili da 4/5 anni.



Regolato dal D.L. 75/2010 - allegato 6 come "prodotto ad azione sul suolo"


Figura 19: Polyactive Power; scheda commerciale 1
(Fonte: <https://www.micronizzazioneinnovativa.com/polyactive-powder/>)



MICRONIZZAZIONE INNOVATIVA

POLYACTIVE POWDER

COS'È: Polyactive è un polimero ad azione sul suolo con Poliacrilammide Anionica ad alto peso molecolare e in formula "micronizzata". La sua struttura lineare assorbe acqua e nutrienti per oltre 300 volte il proprio peso. Approvato e classificato "ORGANIC" e "FOOD GRADE" da FDA e USDA negli USA. **Contiene max. 0,05% di mono-acrilato.**



COSA FA:

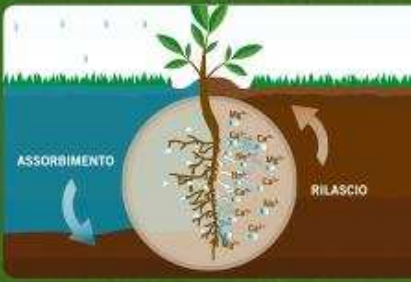
- MIGLIORA L'EFFICIENZA e RIDUCE IL CONSUMO dell'ACQUA di irrigazione; Fino al 55%
- FACILITA la CAPTAZIONE dei NUTRIENTI ORGANICI e MINERALI già presenti nel terreno e forniti per CONCIMAZIONE. Meno perdite in FALDA
- STABILIZZA e RIGENERA IL SUOLO migliorando la struttura, l'aereazione e la resa produttiva;
- AUMENTA lo SVILUPPO delle RADICI e la produzione di BIOMASSA;
- DIMINUISCE i TEMPI di GERMINAZIONE; Da -3 a +20 gg
- RIDUZIONE degli stress IDRICI e NUTRIZIONALI
- AUMENTA la PRODUTTIVITA' Fino al 57%
- RIDUCE lo STRESS da TRAPIANTO e AUMENTA il tasso di GERMINAZIONE Fino al 95%
- INTERROMPE L'EROSIONE di suolo causata da vento e acqua. (Strutturante)

PER COSA È ADATTO:


Efficace su ogni tipo di terreno e coltura. Orticole, Cereali, Leguminose, Prati erbosi, Frutteti ed altro.

BENEFICI:

- Migliora la struttura, la stabilità e la fertilità del suolo
- Aumenta la vigoria delle piante e la qualità dei prodotti ottenuti
- Diminuisce il ristagno superficiale, aumenta la ritenzione idrica.
- Consente un sensibile risparmio idrico (55%)
- Riduce e ottimizza i costi di produzione



ASSORBIMENTO RILASCIO



Micronizzazione Innovativa Srl
 Via E. Torricelli, 2 20090 Buccinasco (MI) - Tel: 02.48841827 E-mail: info@mipolimeri.com
 www.micronizzazioneinnovativa.com - Registrazione MIPAAF Nr. 02051/2017

Figura 20: Polyactive Power, scheda commerciale 2.
 (Fonte: <https://www.micronizzazioneinnovativa.com/polyactive-powder/>)

2.2.1.2 Poliacrilammide reticolare (Pax)

La poliacrilammide reticolare (Pax) utilizzata nella seguente tesi sperimentale è il Medium Stocksorb 660 commercializzata dalla Evonik Industries. In particolare questo materiale è un omopolimero di acido poliacrilico reticolato parzialmente naturalizzato con potassio. La Pax utilizzata non è solubile in acqua, tuttavia a contatto con essa rigonfia in un gel molto viscoso (idrogel). Come la poliacrilammide lineare, questa reticolare viene utilizzata in campo agricolo come addensante. Le caratteristiche tecniche sono riportate nella seguente Tabella 5.

Tabella 5: Scheda tecnica poliacrilammide reticolare (Pax).

Proprietà generali		
Caratteristiche	Unità di misura	Risultati
Dimensione delle particelle	mm	1,0 – 2,5
Densità	g/l	500 ± 100
pH	1 g/l H2O	7,0 – 8,5
Monomeri residui dell'acido acrilico	mg/kg	< 600
Assorbimento minimo in condizioni di rigonfiamento libero		
Liquidi utilizzati	Unità di misura	Risultati
Acqua distillata (DW)	ml/g	> 260
Acqua di rubinetto (1,3 mmol/l CaCO3)	ml/g	> 180
Assorbimento minimo di diversi tipi di terreno		
Tipologie di terreno	Unità di misura	Risultati
Terreno di loess	ml/g	> 120
Terreno sabbioso	ml/g	> 110

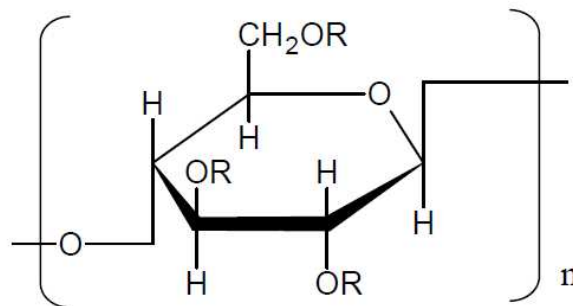


Figura 21: Differenza tra poliacrilammide reticolare (Pax) anidra ed idratata con acqua distillata (DW) con conseguente formazione di idrogel.

(Fonte: <https://www.fluegel-gmbh.de/media/image/e2/7a/67/02-843-Petrieschale.jpg>)

2.2.2 Carbossimetilcellulosa di sodio: aspetti generici

La carbossimetilcellulosa di sodio (CMC) è un polimero lineare anionico sintetico ottenuto dalla modifica della cellulosa, un polisaccaride naturale presente nelle pareti delle piante. Il processo di modifica coinvolge l'introduzione di gruppi carbossimetilici nelle unità di glucosio che costituiscono la struttura della cellulosa. La CMC è solubile in soluzioni acquose grazie ai gruppi carbossimetilici che formano dei legami ionici con l'acqua. Questa caratteristica consente al polimero di poter essere utilizzata come additivo; infatti, quando viene disciolta in soluzioni acquose la CMC forma un gel in cui la viscosità dipende dalla concentrazione del polimero stesso. Questa capacità addensante viene sfruttata in numerosi settori, ad esempio nell'industria alimentare la CMC viene utilizzata per aumentare la consistenza di alcuni prodotti alimentari. Un'altra caratteristica del polimero in esame è la sua capacità stabilizzante; infatti, la CMC contribuisce a mantenere uniforme la distribuzione di particelle in sospensione nei liquidi. Questa caratteristica viene sfruttata nell'industria farmaceutica, dove la carbossimetilcellulosa viene sfruttata per evitare la separazione delle particelle nei farmaci liquidi. Nel settore geotecnico, la carbossimetilcellulosa viene utilizzata principalmente come additivo nei fanghi di trivellazione, infatti la CMC riduce l'acqua libera aumentando la qualità del fango stesso, conferendogli un'ottima termostabilità.



Dove: R = H oppure CH₂COONa

Figura 22: Struttura chimica della carbossimetilcellulosa di sodio (CMC).

(Fonte: <https://www.oiv.int/public/medias/1159/oiv-eno-366-2009-it.pdf>)

La sintesi chimica della carbossimetilcellulosa di sodio (CMC) è caratterizzata da una serie di passaggi. Inizialmente, la cellulosa subisce un pretrattamento con una soluzione alcalina, come l'idrossido di sodio (NaOH), per aumentare la sua reattività (alcalinizzazione). Successivamente, la cellulosa trattata viene fatta reagire con una miscela contenente cloruro di sodio e cloruro acetato di sodio, questo processo introduce i gruppi di cloruro nelle unità di glucosio della cellulosa (clorurazione). Dopo il trattamento descritto, la cellulosa clorurata viene fatta reagire con idrossido di sodio in modo da ottenere il carbossimetilato, questo processo sostituisce i gruppi di cloruro precedentemente introdotti con i gruppi carbossimetilici nelle unità di glucosio della cellulosa (eterificazione). La CMC ottenuta può presentare caratteristiche variabili in base al processo di sintesi, queste proprietà sono: il grado di sostituzione dei gruppi carbossilici rispetto ai gruppi idrossilici ed il peso

molecolare. Queste variazioni suddette influenzano alcune proprietà finali del polimero, come: la viscosità, la capacità di formare gel e la solubilità.

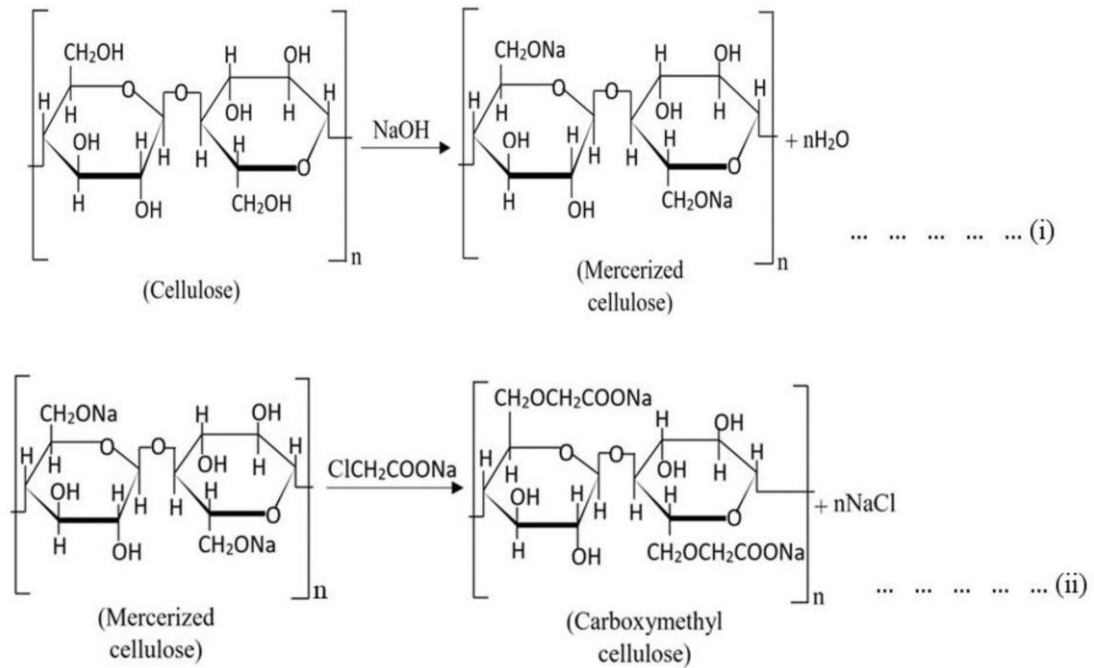


Figura 23: Sintesi carbossimetilcellulosa di sodio (CMC).

(Fonte: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/8/1345>; Md. Saifur Rahman et al. 2021)

2.2.2.1 Carbossimetilcellulosa di sodio (CMC) utilizzata

La carbossimetilcellulosa di sodio (CMC) utilizzata nella seguente tesi sperimentale è un polimero lineare anionico ad alta viscosità. Viene commercializzata dalla Calbiochem e venduta come una polvere molto fine solubile in acqua. Le caratteristiche del materiale utilizzato sono riportate nella seguente Tabella 6.

Tabella 6: Scheda tecnica carbossimetilcellulosa di sodio (CMC) utilizzata.

Test	Tolleranza	Risultato
Solubilità	-	H ₂ O
pH	6,5 – 7,5	7,2
Viscosità	800 – 3100 mPa.s	2096 mPa.s
Perdita all'essiccamento	≤8%	7,4%

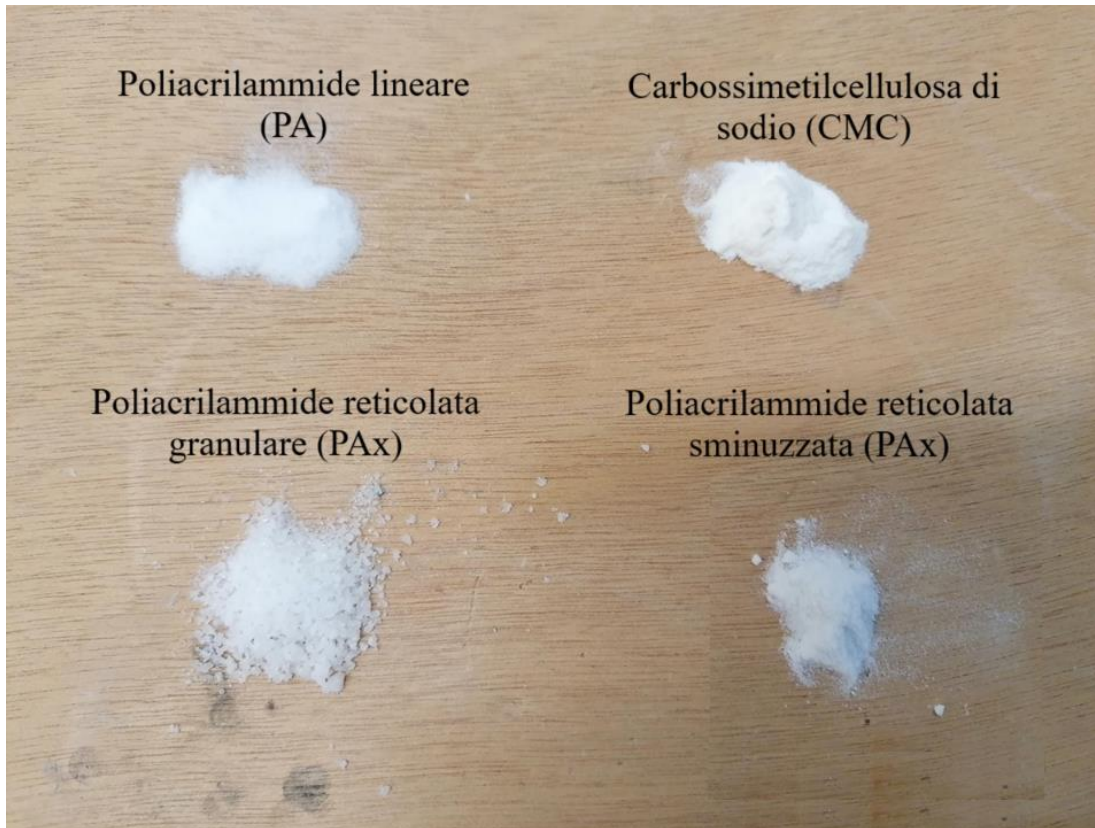


Figura 24: Polimeri utilizzati; Nota: Poliacrilammide reticolata granulare (Pax) = non passante al setaccio n.80 (180 μ m); Poliacrilammide reticolata sminuzzata = passante al setaccio n.80 (180 μ m), ottenuta sminuzzando con un mortaio quella non passante granulare.

2.3 Liquidi utilizzati

I liquidi utilizzati nelle prove di laboratorio (swelling test; rigonfiamento in edometro; permeabilità in permeametri a pareti flessibili) sono due: l'acqua distillata (DW), per simulare condizioni poco aggressive (es. impermeabilizzazione di fondazioni o copertura di discariche); il cloruro di calcio (CaCl_2) disciolto in acqua distillata ad una elevata concentrazione (167 mM), utilizzato per simulare condizioni molto aggressive (es. barriere di fondo delle discariche).

2.3.1 Acqua distillata (DW)

L'acqua distillata utilizzata come liquido nelle prove di laboratorio è ottenuta da acqua di rubinetto trattata con l'utilizzo di un distillatore. La DW è stata utilizzata principalmente per indagare il comportamento della bentonite in condizioni poco aggressive, in particolare per vedere come l'aggiunta di polimero influenzi la permeabilità ed il rigonfiamento (libero ed in edometro) nel liquido in esame. Il suo utilizzo è legato anche alla necessità di avere un riferimento iniziale del comportamento della bentonite (naturale ed additivata) in condizioni poco aggressive. Le caratteristiche dell'acqua distillata utilizzata sono state misurate con l'utilizzo di un conduttimetro e di un pH metro e sono elencate nella seguente Tabella 7.

Tabella 7: Caratteristiche misurate dell'acqua distillata.

Acqua distillata (DW)		
Caratteristiche	Unità di misura	Valori
Conducibilità elettrica (EC)	μS/cm	39,3
pH	-	5,72
Temperatura di riferimento	°C	26,8

2.3.2 Cloruro di calcio (CaCl₂)

Il cloruro di calcio (CaCl₂) utilizzato presenta in realtà la seguente formula chimica completa: CaCl₂·2H₂O (cloruro di calcio diidrato). Il composto, in forma granulare secca, è stato disciolto in acqua distillata per ottenere un liquido con una concentrazione di CaCl₂ di 167 mM. Per ottenere una soluzione con quella concentrazione sono state utilizzate le seguenti relazioni (1):

$$M = \frac{n_{\text{soluto}}}{V_{\text{soluzione}}} \left[\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right]; n_{\text{soluto}} = \frac{m_{\text{soluto}}}{M_{\text{molare}}} \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] \quad (1)$$

Dove:

M = concentrazione molare [mol/L];

n_{soluto} = numero di moli del soluto (CaCl₂) [mol];

$V_{\text{soluzione}}$ = volume della soluzione (DW) [L];

m_{soluto} = massa del soluto (CaCl₂) [g];

M_{molare} = massa molare del soluto (CaCl₂) [g/mol].

Da queste relazioni è stata ricavata la formula (2) necessaria per ottenere la massa di cloruro di calcio da disciogliere in ogni litro di acqua distillata, ovvero:

$$m_{\text{soluto}} = \frac{M_{\text{molare}} \times M}{V_{\text{soluzione}}} [g] \quad (2)$$

Considerando: 1 litro di soluzione, 147,02 g/mol come la massa molare del CaCl₂·2H₂O, 167 mM (0,167 mol/L) come la concentrazione molare, allora dalla precedente relazione otteniamo la relazione (3):

$$m_{\text{soluto}} = \frac{M_{\text{molare}} \times M}{V_{\text{soluzione}}} = \frac{147,02 \times 0,167}{1} = 24,55g \quad (3)$$

che sono i grammi di cloruro di calcio diidrato da disciogliere in un litro di acqua distillata (DW) per ottenere una concentrazione molare di 167 mM.

La soluzione ottenuta ha lo scopo di simulare delle condizioni particolarmente aggressive (es. percolati) in modo tale da studiare il comportamento della bentonite, andando ad indagare come il polimero influenzi la permeabilità ed il rigonfiamento (libero ed in edometro) del materiale in esame. Le caratteristiche del cloruro di calcio utilizzato sono elencate nella seguente Tabella 8.

Tabella 8: Scheda tecnica del cloruro di calcio diidrato ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Cloruro di calcio diidrato ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)		
Caratteristiche	Unità	Risultati
Massa molare	g/mol	147,02
Dosaggio	%	101,01
pH della soluzione al 5%	-	7,1
Materia insolubile in H_2O	%	< 0,01
Ammonio (NH_4)	%	< 0,005
Fosfato (PO_4)	%	< 0,001
Sostanze ossidanti	%	< 0,003
As	%	< 0,0001
Metalli pesanti (es. Pb)	%	< 0,0005
Al	mg/kg (ppm)	< 10
Ba	mg/kg (ppm)	< 50
Bi	mg/kg (ppm)	< 5
Cd	mg/kg (ppm)	< 5
Co	mg/kg (ppm)	< 5
Cr	mg/kg (ppm)	< 5
Cu	mg/kg (ppm)	< 5
Fe	mg/kg (ppm)	< 10
K	mg/kg (ppm)	< 100
Li	mg/kg (ppm)	< 5
Mg	mg/kg (ppm)	< 50
Mn	mg/kg (ppm)	< 5
Mo	mg/kg (ppm)	< 5
Na	mg/kg (ppm)	< 200
Ni	mg/kg (ppm)	< 5
Pb	mg/kg (ppm)	< 5
Sr	mg/kg (ppm)	< 100
Tl	mg/kg (ppm)	< 5
Zn	mg/kg (ppm)	< 10
Cloruro di calcio diidrato ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) disciolto in acqua distillata (DW)		
Caratteristiche	Unità	Risultati
Concentrazione molare	mol/L	0,167
Conducibilità elettrica (EC)	mS/cm	30,7
pH	-	7,20
Temperatura di misura	°C	26,8

Capitolo 3 METODI

3.1 Preparazione dei campioni

I campioni di geocompositi bentonitici simulati (GCL) sono stati preparati secondo tre macrocategorie:

1. Bentonite non additivata: comprende tutti i campioni, ricostruiti e non, caratterizzati da bentonite senza alcuna aggiunta di polimero;
2. Dry-mix (DM): comprende i campioni ricostruiti caratterizzati da bentonite con l'aggiunta di polimero, il metodo di preparazione comprende una miscelazione secca dei due materiali citati;
3. Wet-mix (WM): comprende tutti i campioni ricostruiti caratterizzati da bentonite con l'aggiunta di polimero, il metodo di preparazione comprende una miscelazione umida in acqua distillata dei materiali citati.

In base al tipo di preparazione, possiamo attenderci diversi comportamenti (in prove standard quali: rigonfiamento libero; rigonfiamento vincolato; permeabilità) del materiale preparato. Questa differenza è probabilmente dovuta alle diverse interazioni: argilla-liquido (utilizzato nelle prove di laboratorio); polimero-argilla; polimero-liquido.

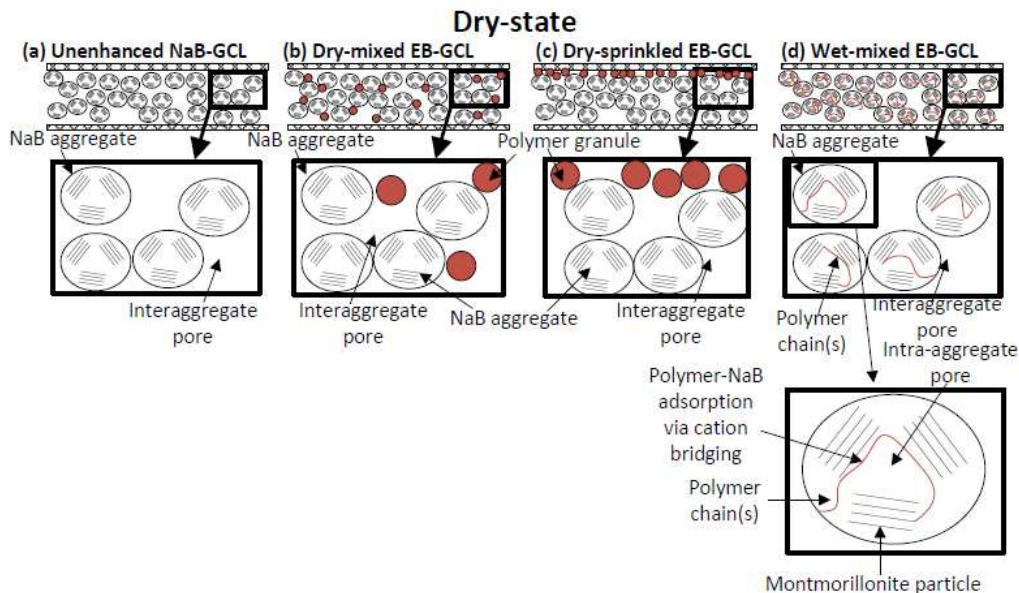


Figura 9: Rappresentazioni schematiche di rivestimenti geosintetici in argilla (GCL) allo stato secco caratterizzati da (a) bentonite di sodio non potenziata (NaB) o da bentonite potenziata utilizzando (b) dry-mix, (c) dry-sprinkled o (d) wet-mix, con relative interazioni argilla-polimero. Nota: il dry-sprinkled (d) non è stato utilizzato come metodo di preparazione nella seguente tesi sperimentale. (Fonte: Norris, 2020)

3.1.1 Campioni con bentonite non additivata

I campioni con bentonite non additivata, come detto in precedenza, contengono Na-B senza alcuna aggiunta di polimero. Per la realizzazione di questi campioni sono state utilizzate due metodologie:

- Campioni non ricostruiti o intatti: GCL tagliati con un diametro di 10cm in cui i due geotessili (superiore e inferiore) non sono stati separati tra loro, ovvero il pacchetto di materiale è rimasto tale nelle prove di laboratorio.
- Campioni ricostruiti: GCL tagliati con un diametro di 10 cm in cui i due geotessili (superiore e inferiore) sono stati separati e la bentonite intermedia è stata: macinata in un mortaio, fatta passare al setaccio n.80 (180µm) per creare uniformità tra i materiali utilizzati (questo passaggio è stato svolto principalmente con la Na-B contenuta nei GCL2, in quanto quella contenuta nel GCL1 risultava passante al 100%), pesata ad una data quantità e riposizionata tra i due geotessili.

I campioni con bentonite non additivata sono i seguenti:

- GCL1.1

Tabella 9: Scheda tecnica GCL1.1

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL1
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/non sminuzzata
Liquido di idratazione in edometro	-	DW
Additivazione	-	Non additivato
Liquido permeante	-	DW prima – CaCl ₂ dopo
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B)	g	32,43
w (Na-B)	%	8
P.s (Na-B)	g	30,04
Altezza	cm	0,70
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	54.98
Peso geotessile superiore	g	1,57
Peso geotessile inferiore	g	2,36

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL1.2

Tabella 10: Scheda tecnica GCL1.2

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL1
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/non sminuzzata
Additivazione	-	Non additivato
Liquido di idratazione in edometro	-	CaCl ₂
Liquido permeante	-	CaCl ₂
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B)	g	32,43
w (Na-B)	%	8
P.s (Na-B)	g	30,04
Altezza	cm	0,60
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	47,12
Peso geotessile superiore	g	1,57
Peso geotessile inferiore	g	2,36

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.1

Tabella 11: Scheda tecnica GCL2.1

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Non ricostruito
Na-B	-	GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Non passante
Additivazione	-	Non additivato
Liquido di idratazione in edometro	-	DW
Liquido permeante	-	DW
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B)	g	43,98
w (Na-B)	%	8
P.s (Na-B)	g	40,72
Altezza	cm	0,78
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	61,26
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.2

Tabella 12: Scheda tecnica GCL2.2

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Non ricostruito
Na-B		GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Non passante
Additivazione	-	Non additivato
Liquido di idratazione in edometro	-	CaCl ₂
Liquido permeante	-	CaCl ₂
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B)	g	43,98
w (Na-B)	%	8
P.s (Na-B)	g	40,72
Altezza	cm	0,83
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	65,19
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.3

Tabella 13: Scheda tecnica GCL2.3

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzato
Additivazione	-	Non additivato
Liquido di idratazione in edometro	-	DW
Liquido permeante	-	DW
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B)	g	43,98
w (Na-B)	%	8
P.s (Na-B)	g	40,72
Altezza	cm	0,70
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	40,09
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.4

Tabella 14: Scheda tecnica GCL2.3

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzato
Additivazione	-	Non additivato
Liquido di idratazione in edometro	-	CaCl ₂
Liquido permeante	-	CaCl ₂
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B)	g	43,98
w (Na-B)	%	8
P.s (Na-B)	g	40,72
Altezza	cm	0,84
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	65,97
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

3.1.2 Dry-Mix (DM)

I metodi di preparazione adottati per la realizzazione di campioni additivati sono due: Dry-Mix (DM) e Wet-Mix (WM). Il primo consiste nella miscelazione a secco tra la bentonite di sodio ed una percentuale in massa di polimero, il secondo (che analizzeremo successivamente) in una miscelazione ad umido. In base alle due tecniche utilizzate si hanno diverse interazioni polimero-argilla. La miscelazione a secco (DM) ha il vantaggio di essere una tecnica relativamente semplice che non richiede eccessivi costi. Allo stato secco, però, i polimeri non interagiscono con l'argilla al livello chimico, infatti se la miscela polimero-argilla viene incorporata in un GCL ed idratata, bentonite e polimero saranno presenti in fasi separate. Nel caso di miscelazione umida, invece, il polimero viene adsorbito nell'argilla, questo aspetto però dipende da varie condizioni che vedremo di seguito.

L'effetto principale dei polimeri nelle miscele preparate con la tecnica Dry-Mix (DM) è la formazione di un gel polimerico immobile altamente viscoso che va a creare un macro-intasamento nei pori delle particelle di bentonite. Un esempio di questa miscela è illustrato nella Figura 8, dove viene rappresentata dell'acqua immobile in una matrice argillosa (blu scuro) e dell'acqua mobile nei pori inter-aggregati (azzurro), il gel polimerico va ad assorbire quest'acqua determinando così un intasamento dei pori stessi. Nel modello rappresentato, inoltre, il flusso dei polimeri all'interno dei pori è indotto da un gradiente idraulico, questo è un processo molto lento che consente al polimero di essere mantenuto per lungo tempo all'interno dei GCL. Nonostante ciò, vari studi (Xing Chen et al. 2023; Norris 2020; Christian Wireko et al. 2021) hanno messo in luce che vari aspetti (come: stress meccanici, agenti esterni e tempi relativamente lunghi) possono portare ad un'eluizione del polimero. Tuttavia per affrontare questo problema si stanno adottando vari approcci, come l'utilizzo di polimeri reticolati (es. PAX).

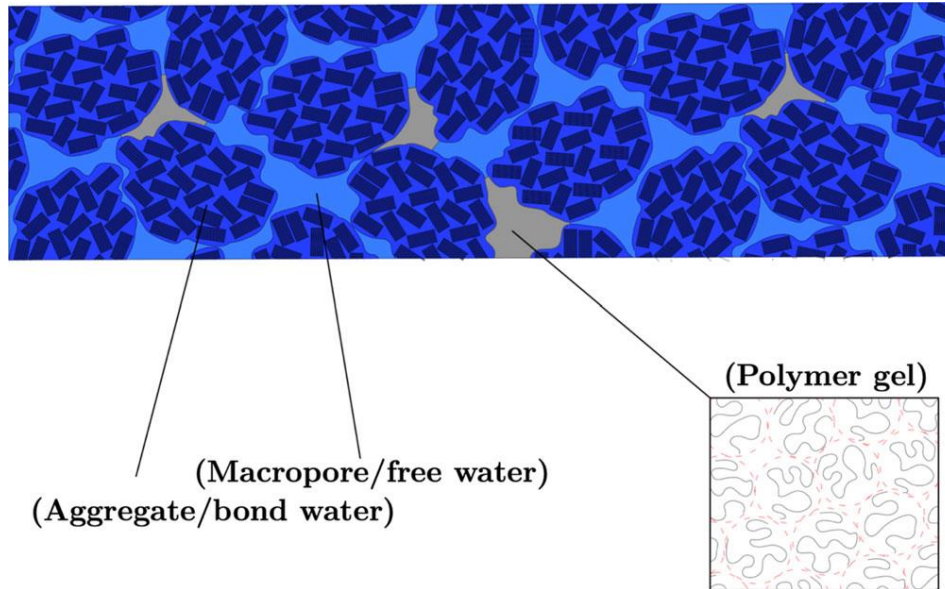


Figura 8: Esempio di intasamento di un'argilla causato da un gel polimerico.
(fonte: Wolfgang Lieske et al. 2022).

3.1.2.1 Campioni con l'additivazione Dry-Mix (DM)

L'additivazione Dry-Mix (DM) consiste nella miscelazione a secco di una determinata percentuale in massa di polimero con un dato quantitativo di bentonite di sodio. Le percentuali utilizzate sono 5% e 10%, le bentoniti sono di due tipologie (denominate GCL1 e GCL2), mentre i polimeri utilizzati sono tre (PA, PAX, CMC). Per garantire uniformità tra i materiali utilizzati i polimeri sono stati fatti passare al setaccio n.80 (180 μ m), tra le tre tipologie: la PA e la CMC sono risultati passanti al 100%; la PAX non è risultata, dunque è stata sminuzzata con un mortaio fino a risultare passante al 100%. La procedura è la seguente: pesare un determinato quantitativo di bentonite (es. 50g), aggiungere la percentuale in massa di polimero (facendo riferimento a 50g di bentonite, aggiungere 2,5g nel caso di 5% o 5g nel caso di 10%), mescolare a secco. Nel nostro caso per la miscelazione a secco è stato utilizzato l'agitatore Heidolph Reax20, ad una velocità di 16 giri/min per almeno 20 minuti.



Figura 25: Agitatore Heidolph Reax20.
(Fonte: <https://www.heidolph-instruments.com/en/start>)

I campioni realizzati con l'additivazione Dry-Mix (DM) sono i seguenti:

- GCL1.3

Tabella 15: Scheda tecnica GCL1.3

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL1
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Additivazione	-	PA (5%) - DM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Liquido di idratazione in edometro	-	DW
Liquido permeante	-	DW prima - CaCl ₂ dopo
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%PA)	g	34,08
w (Na-B+5%PA)	%	8
P.s (Na-B+5%PA)	g	31,56
Altezza	cm	0,65
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	51,05
Peso geotessile superiore	g	1,57
Peso geotessile inferiore	g	2,36

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL1.4

Tabella 16: Scheda tecnica GCL1.4

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL1
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Additivazione	-	PA (5%) - DM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Liquido di idratazione in edometro	-	CaCl ₂
Liquido permeante	-	CaCl ₂
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%PA)	g	34,08
w (Na-B+5%PA)	%	8
P.s (Na-B+5%PA)	g	31,56
Altezza	cm	0,65
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	51,05
Peso geotessile superiore	g	1,57
Peso geotessile inferiore	g	2,36

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL1.5

Tabella 17: Scheda tecnica GCL1.5

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL1
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Additivazione	-	PA (10%) - DM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Liquido di idratazione in edometro	-	CaCl ₂
Liquido permeante	-	CaCl ₂
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+10%PA)	g	35,67
w (Na-B+10%PA)	%	8
P.s (Na-B+10%PA)	g	33,03
Altezza	cm	0,70
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	54,98
Peso geotessile superiore	g	1,57
Peso geotessile inferiore	g	2,36

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.5

Tabella 18: Scheda tecnica GCL2.5

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzata
Additivazione	-	PA (5%) - DM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Liquido di idratazione in edometro	-	DW
Liquido permeante	-	DW
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%PA)	g	46,18
w (Na-B+5%PA)	%	8
P.s (Na-B+5%PA)	g	42,76
Altezza	cm	0,70
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	54,98
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.6

Tabella 19: Scheda tecnica GCL2.6

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzata
Additivazione	-	PA (5%) - DM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Liquido di idratazione in edometro	-	CaCl ₂
Liquido permeante	-	CaCl ₂
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%PA)	g	46,18
w (Na-B+5%PA)	%	8
P.s (Na-B+5%PA)	g	42,76
Altezza	cm	0,84
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	65,97
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.7

Tabella 20: Scheda tecnica GCL2.7

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzata
Additivazione	-	PAX (5%) - DM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzato
Liquido di idratazione in edometro	-	DW
Liquido permeante	-	DW
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%PAX)	g	46,18
w (Na-B+5%PAX)	%	8
P.s (Na-B+5%PAX)	g	42,76
Altezza	cm	0,70
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	54,98
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.8

Tabella 21: Scheda tecnica GCL2.8

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzata
Additivazione	-	PAx (5%) - DM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzato
Liquido di idratazione in edometro	-	DW
Liquido permeante	-	DW
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%PAx)	g	46,18
w (Na-B+5%PAx)	%	8
P.s (Na-B+5%PAx)	g	42,76
Altezza	cm	0,65
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	51,05
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.9

Tabella 22: Scheda tecnica GCL2.9

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzata
Additivazione	-	PAx (5%) - DM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzato
Liquido di idratazione in edometro	-	CaCl ₂
Liquido permeante	-	CaCl ₂
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%PAx)	g	46,18
w (Na-B+5%PAx)	%	8
P.s (Na-B+5%PAx)	g	42,76
Altezza	cm	0,70
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	54,98
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.10

Tabella 23: Scheda tecnica GCL2.10

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzata
Additivazione	-	CMC (5%) - DM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Liquido di idratazione in edometro	-	DW
Liquido permeante	-	DW
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%CMC)	g	46,18
w (Na-B+5%CMC)	%	8
P.s (Na-B+5%CMC)	g	42,76
Altezza	cm	0,80
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	62,83
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL2.11

Tabella 24: Scheda tecnica GCL2.11

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL2
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzata
Additivazione	-	CMC (5%) - DM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Liquido di idratazione in edometro	-	CaCl ₂
Liquido permeante	-	CaCl ₂
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%CMC)	g	46,18
w (Na-B+5%CMC)	%	8
P.s (Na-B+5%CMC)	g	42,76
Altezza	cm	0,80
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	62,83
Peso geotessile superiore	g	0,78
Peso geotessile inferiore	g	1,57

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

3.1.3 Wet-Mix

Come detto precedentemente, l'additivazione della bentonite con il polimero presuppone che questi due materiali vengano miscelati a secco (DryMix-DM) o a umido (WetMix-WM). Considerando quest'ultima tecnica di additivazione, il processo per la realizzazione dei campioni presuppone che i due materiali in uso vengano miscelati con l'utilizzo di una soluzione acquosa. In particolare, il processo richiede che un dato polimero lineare (solubile in acqua) venga disciolto in una soluzione acquosa determinando la formazione di una soluzione polimerica, a questa poi deve essere aggiunta una data quantità di bentonite. Tutto il processo deve presupporre l'utilizzo di un agitatore meccanico in modo tale da consentire alle molecole in movimento di interagire tra loro.

I polimeri idrosolubili, infatti, hanno una varietà di modi di interagire con le superfici cariche di smectite che compone la bentonite di sodio (Na-B). Queste interazioni dipendono da due categorie di fattori: condizioni al contorno (soluzione acquosa utilizzata, velocità dell'agitatore, pH, ecc); condizioni interne come la distribuzione delle cariche in un polimero lineare.

L'interazione delle catene polimeriche con le superfici di smectite porta ad un adsorbimento ed intercalazione del polimero nelle particelle argillose. Questi processi determinano tre disposizioni geometriche del polimero sulla superficie di smectite: treni, segmenti polimerici strettamente legati alla superficie minerale; anelli, segmenti polimerici debolmente legati alla superficie, ma legati ai treni su entrambi i lati; code, segmenti terminali polimerici legati ai treni su un unico lato.

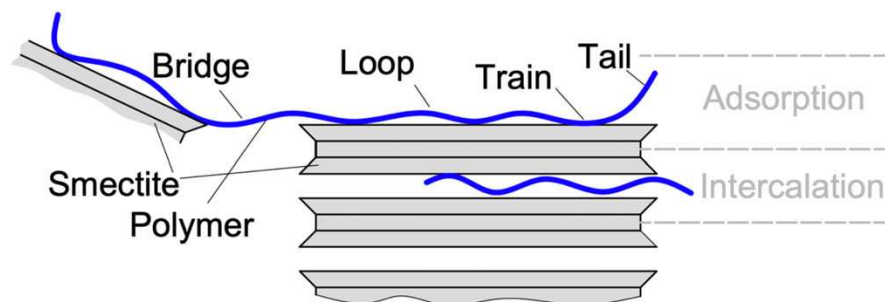


Figura 26: Rappresentazione di intercalazione ed adsorbimento di un polimero lineare sulle superfici argillose. (fonte: Wolfgang Lieske et al. 2022).

Il posizionamento di anelli, code e treni e la conseguente costituzione dell'interfaccia argilla-acqua dipendono fortemente dalla disposizione delle catene polimeriche durante l'adsorbimento.

Nel caso di polimeri carichi, la disposizione geometrica delle cariche sulla superficie di smectite e nella catena polimerica è decisiva per le loro possibili interazioni, in quanto le attrazioni e repulsioni elettrostatiche tra le cariche determinano la posizione delle catene polimeriche sulle superfici di argilla. Il processo di adsorbimento e la conseguente modifica delle proprietà superficiali è ritenuto irreversibile, poiché il distacco dei segmenti polimerici è molto improbabile. Oltre all'adsorbimento, in molti polimeri è stato osservato anche il processo di intercalazione nell'interstrato delle particelle, questo determina un aumento dello spazio di interstrato con relativo aumento del rigonfiamento (libero e vincolato).

In base alla carica del polimero possiamo avere diverse interazioni tra le molecole, per capire meglio ciò dobbiamo contraddistinguere tre categorie di polimero in cui si osservano tre diverse interazioni.

- Polimeri non ionici. I gruppi polari di polimeri non ionici possono essere attratti da una superficie argillosa a causa dell'interazione: dipolo – ione tra i cationi scambiabili; dipolo – dipolo tra l'acqua adsorbita sulla superficie argillosa ed i cationi. La modifica della smectice, utilizzando polimeri non ionici, estende il rigonfiamento del doppio strato diffuso, questo può portare ad un miglioramento delle proprietà idrauliche dei GCL ma anche ad un peggioramento delle proprietà plastiche del materiale finale.
- Polimeri cationici. Quando vengono messi a contatto con le smectice, i polimeri cationici interagiscono, attraverso interazioni elettrostatiche, tra le parti cariche positivamente della catena polimerica e le superfici cariche negativamente delle particelle di argilla. Inoltre, l'attrazione ione – dipolo tra le parti polari non cariche della struttura polimerica ed i cationi scambiabili possono contribuire all'adsorbimento di policationi sulle superfici di smectice. A causa della loro superficie allungata, i polimeri cationici sono in grado di coprire la distanza tra due superfici argillose. Inoltre, le forze di adsorbimento sono forti a causa dell'attrazione tra le parti caricate positivamente del polimero e la superficie argillosa caricata negativamente, motivo per cui i polimeri cationici formano dei forti ponti interparticellari. Pertanto, il miglioramento delle argille mediante l'aggiunta di queste tipologie di polimeri è legato principalmente alla resistenza meccanica. Dal punto di vista della microstruttura, invece, i percorsi di flusso indotti dalla flocculazione ed il ridotto rigonfiamento del doppio strato diffuso porta ad un incremento della permeabilità. Dunque, l'uso di polimeri cationici è consigliato principalmente in condizioni in cui la resistenza meccanica ha un ruolo più rilevante della permeabilità.
- Polimeri anionici (PA e CMC). I polimeri caricati negativamente hanno poche possibilità di interagire con le superfici di smectice, che sono principalmente a carica negativa. Tuttavia, queste tipologie di polimeri possono interagire con i bordi positivi delle particelle di argilla. Nonostante questo aspetto, i polimeri anionici sono stati molto utilizzati nelle additivazioni di argille. L'uso di questo materiale, infatti, è legato principalmente al fenomeno di macro-intasamento che si nota anche nei campioni additivati con la tecnica del dry-mix.

L'adsorbimento e l'intercalazione finora descritti, richiedono che le superfici minerali siano disponibili per il polimero e che i materiali siano mobili, tutte caratteristiche tipiche di una miscelazione umida (WetMix – WM).

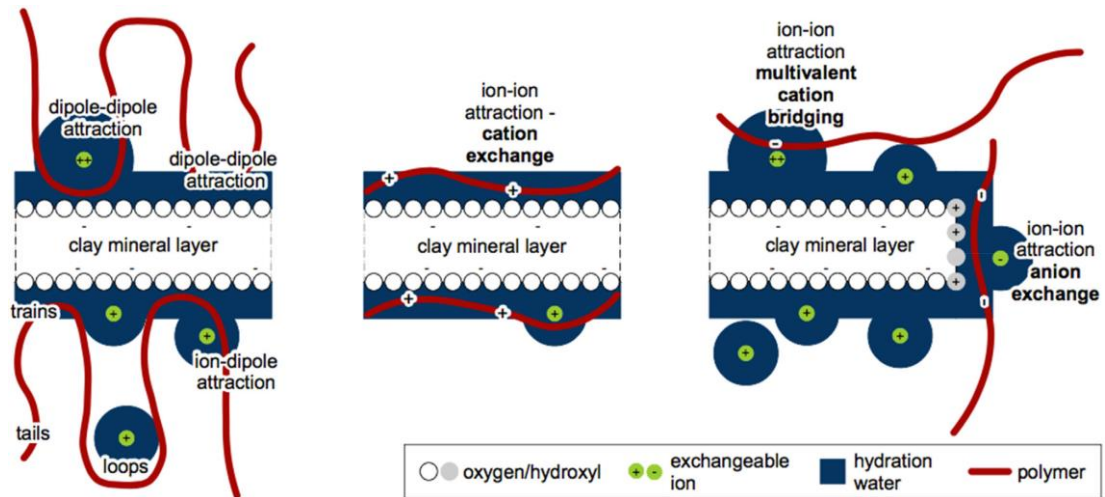


Figura 27: Interazioni tra polimeri lineari e superfici di smectite: polimeri non ionici (a sinistra), polimeri cationici (al centro) e polimeri anionici (a destra). (fonte: Wolfgang Lieske et al. 2022).

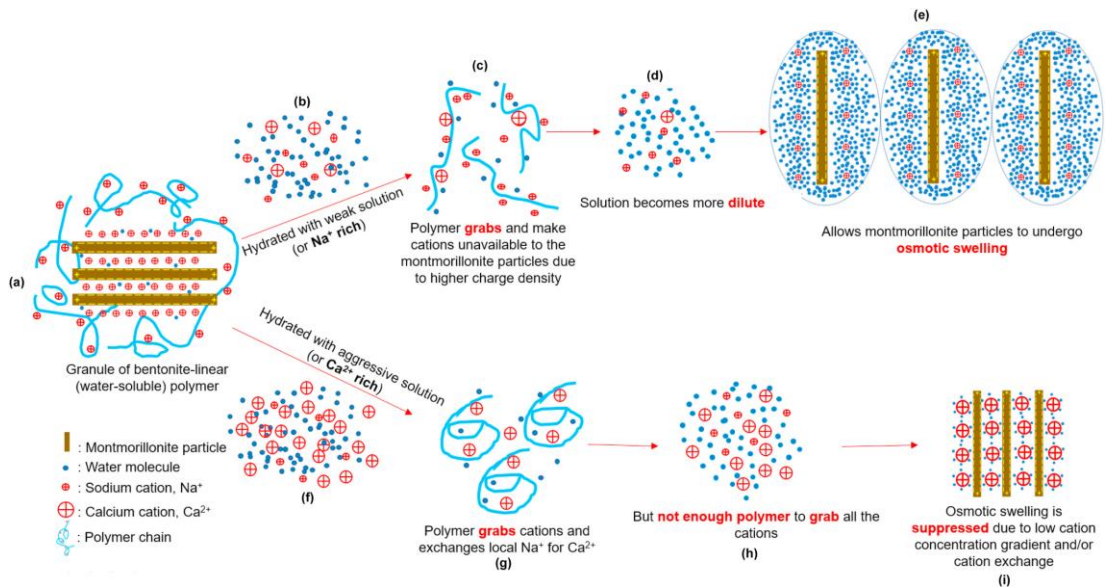


Figura 28: Meccanismo di interazione bentonite – polimero lineare in soluzione idratante. (Wireko et al. 2021)

3.1.3.1 Campioni preparati con l'additivazione Wet-Mix (WM)

L'additivazione Wet-Mix (WM) consiste nella miscelazione umida di una determinata percentuale in massa di un polimero ad un dato quantitativo di bentonite di sodio all'interno di una soluzione acquosa. La percentuale in massa adottata in questo caso è il 5%, la bentonite utilizzata è la GCL1 mentre il polimero è la poliacrilammide lineare (PA). La procedura seguita è la seguente: pesare un determinato quantitativo di bentonite (es. 50g), pesare una percentuale in massa di polimero (facendo riferimento a 50g di bentonite, aggiungere 2,5g nel caso di 5%), prendere 500ml di acqua distillata (DW), disciogliere il polimero (PA) nel DW mescolando il tutto a 2000 giri/min per almeno 5 minuti con un agitatore, disciogliere la bentonite di sodio nella soluzione polimerica (PA+DW) mescolando il tutto a 2000 giri/min per almeno 15 minuti. Il composto umido così ottenuto è stato essiccato in forno per almeno 24h a 110 °C, una volta essiccato, il materiale è stato sminuzzato con l'utilizzo di un mortaio fino a che non è risultato passante al 100% al setaccio n.80 (180µm). In questo caso per la miscelazione a umido è stato utilizzato l'agitatore Heidolph Reax20, ad una velocità di 2000 giri/min per almeno 20 minuti.



Figura 29: Agitatore Heidolph RZR2102.
(Fonte: <https://www.heidolph-instruments.com/en/start>).

I campioni realizzati con l'additivazione Wet-Mix (WM) sono i seguenti:

- GCL1.6

Tabella 25: Scheda tecnica GCL1.6

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL1
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Additivazione	-	PA(5%) - WM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Na-B+PA - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzato
Liquido di idratazione in edometro	-	DW
Liquido permeante	-	DW prima/CaCl ₂ dopo
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%PA)	g	31,67
w (Na-B+5%PA)	%	0
P.s (Na-B+5%PA)	g	31,67
Altezza	cm	0,65
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	51,05
Peso geotessile superiore	g	1,57
Peso geotessile inferiore	g	2,36

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

- GCL1.7

Tabella 26: Scheda tecnica GCL1.6

Caratteristiche	Unità	Dati
Campione	-	Ricostruito
Na-B	-	GCL1
Na-B - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Additivazione	-	PA(5%) - WM
Polimero - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante
Na-B+PA - setaccio n.80 (180µm)	-	Passante/sminuzzato
Liquido di idratazione in edometro	-	CaCl ₂
Liquido permeante	-	CaCl ₂
Diametro	cm	10
P.u. (Na-B+5%PA)	g	31,67
w (Na-B+5%PA)	%	0
P.s (Na-B+5%PA)	g	31,67
Altezza	cm	0,60
Area	cm ²	78,54
Volume	cm ³	47,12
Peso geotessile superiore	g	1,57
Peso geotessile inferiore	g	2,36

Nota: P.u. = Peso lordo umido; w = contenuto di acqua; P.s. = Peso secco; Na-B = Bentonite di sodio.

3.2 Metodi di prova impiegati

Le prove di laboratorio eseguite sono state effettuate in accordo parziale o totale con le seguenti specifiche:

- Prova di rigonfiamento libero (free swelling test) sulla bentonite naturale e quella additivata con il polimero, questo test è stato svolto seguendo lo standard ASTM 5890–19 – Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners;
- Aerometria, svolta sulle due tipologie di bentonite utilizzata (GCL1, GCL2), la prova è stata svolta seguendo lo standard ASTM D7928–21 – Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis;
- Prova di idratazione/rigonfiamento in edometro sui campioni ricostruiti, per questo test non è stato seguito un particolare standard, sono state seguite però parzialmente le linee guida citate nell'ASTM D4546–21 – Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils;
- Prova di permeabilità in permeametro a pareti flessibili, eseguita su tutti i campioni seguendo lo standard ASTM D6766–20 – Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially Incompatible Aqueous Solutions.

3.2.1 Prova di rigonfiamento libero (free swelling test)

La prova di rigonfiamento libero consente di valutare le proprietà di rigonfiamento di un materiale argilloso all'interno di un fluido. L'argilla da valutare deve essere passante al 100% nel setaccio n.100 (150 μ m) o al 65% nel setaccio n. 200 (75 μ m). Lo scopo principale di questa prova è quello di valutare la proprietà di rigonfiamento del materiale in un fluido in modo da avere una prima stima delle sue eventuali prestazioni (che vengono valutate con le altre prove svolte).

La procedura svolta per questo test è la seguente:

- Macinare il materiale per farlo risultare passante al 100% al setaccio n.100 (150 μ m) o al 65% nel setaccio n. 200 (75 μ m), nel nostro caso avendo a che fare con diversi materiali, tutti sono stati fatti passare attraverso il primo setaccio citato, prevedendo l'utilizzo del mortaio laddove necessario (GCL2, PAx).
- Pesare di 2,00g \pm 0,01g di materiale secco;
- Aggiungere di 90ml di fluido ad un cilindro graduato da 100ml;
- Prelevare 0.1g di materiale dai 2,00g precedentemente pesati, spolverare il materiale sulla superficie del fluido nel cilindro per 30s, facendo attenzione a coprire tutta la superficie in maniera uniforme.
- Aspettare 10 minuti in modo tale da consentire al materiale spolverato di idratarsi e di depositarsi sul fondo;
- Aggiungere ulteriori incrementi di 0,1g di materiale e così via fino a quanto non si raggiunge l'intero quantitativo di 2,00g;
- Una volta terminato il materiale da spolverare, aggiungere il fluido nel cilindro fino a raggiungere il livello di 100ml, sciacquando il materiale attaccato ai bordi del cilindro;

- Attendere almeno 16 ore per valutare il rigonfiamento libero finale del materiale, registrando il volume in ml della parte superiore del materiale argilloso depositato.

L'unità di misura da adottare per valutare il rigonfiamento è la seguente: ml/2g; laddove il ml è riferito al rigonfiamento misurato nel cilindro, mentre i 2g sono la quantità di materiale anidro utilizzato.

Nel nostro caso le combinazioni di materiali utilizzate sono elencate nella seguente Tabella 27.

Tabella 27: Prove di rigonfiamento libero svolte

Bentonite	Polimero	Liquidi utilizzati
GCL1	Non additivata	DW/CaCl ₂
GCL1	5% PA (DM)	DW/CaCl ₂
GCL1	5% PA (WM)	DW/CaCl ₂
GCL1	10% PA (DM)	DW/CaCl ₂
GCL2	Non additivata	DW/CaCl ₂
GCL2	5% PA (DM)	DW/CaCl ₂
GCL2	5% PA _x (DM)	DW/CaCl ₂
GCL2	5% CMC (DM)	DW/CaCl ₂

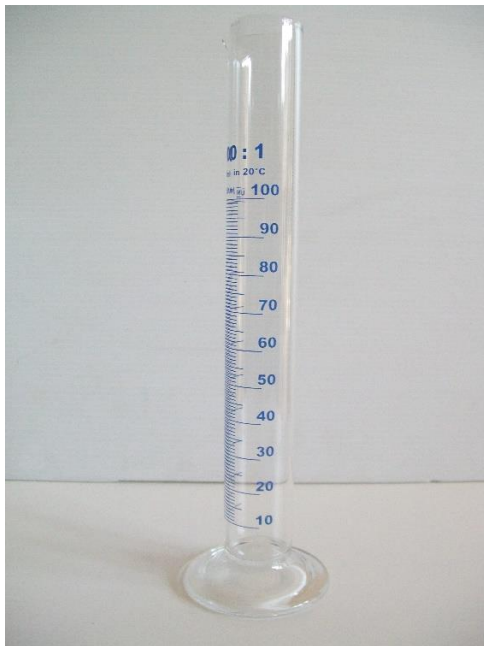


Figura 30: Cilindro da 100ml.



Figura 31: Mortaio in ottone.

3.2.2 Aerometria

3.2.2.1 Caratteri generali

Questa prova consente la determinazione quantitativa della distribuzione granulometrica di terreni a grana fine. Come metodologia è stata utilizzata la sedimentazione, tramite metodo idrometrico, di materiale che è più fine del setaccio n.200 (75µm). Il test è stato eseguito su materiale che supera il setaccio n.10 (2,0mm) ed i risultati sono presentati come percentuale di massa più fine di questa frazione rispetto al diametro delle particelle. Nel nostro caso sia GCL1 che GCL2 risultano

passanti al 100% al setaccio n.10, mentre GCL1 risulta passante al 100% anche al setaccio n.200 a differenza di GCL2 che risulta non passante a questo ultimo setaccio. La distribuzione granulometrica di un terreno è un termine che si riferisce alle proporzioni di massa secca di un suolo distribuite su intervalli di dimensioni delle particelle. La curva granulometrica realizzata con questo metodo fa riferimento a porzioni molto fini di terreno quali limo ed argilla (nel nostro caso la bentonite è un'argilla). Il quantitativo di materiale utilizzato per la sedimentazione è rappresentativo dell'intero campione; dunque, a questa prova non è stata associata una prova granulometrica, in quanto l'argilla è un materiale molto fine ($<2\mu\text{m}$).

Summary of Grain Size Analysis

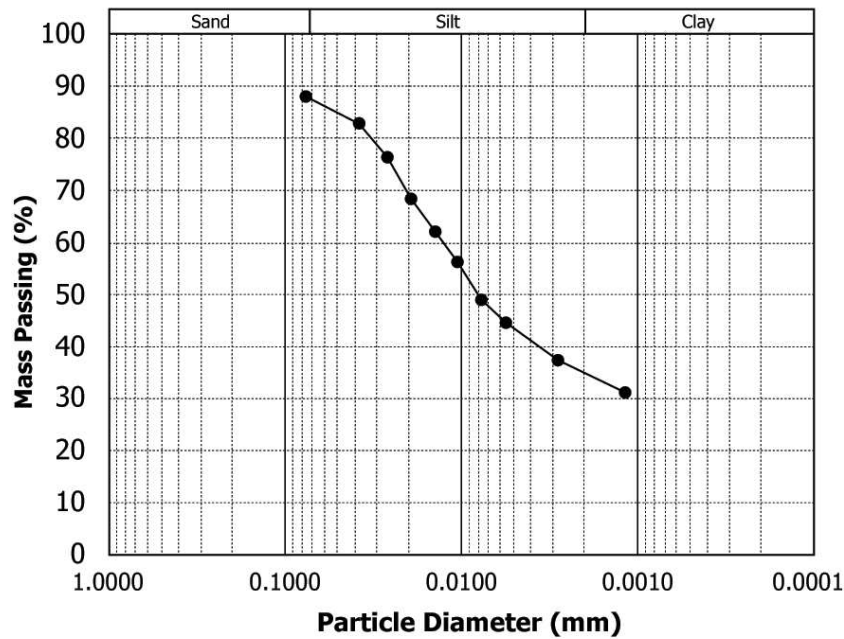


Figura 32: Esempio di curva granulometrica ricavata dall'aerometria. (Fonte: ASTM D7928-21).

L'analisi di sedimentazione si basa sul concetto che le particelle più grandi cadranno attraverso un fluido più velocemente delle particelle più piccole. La legge di Stokes (Formula 4) fornisce un'equazione utilizzata per determinare la velocità di una particella sferica che cade attraverso un liquido stazionario:

$$v = \frac{2R^2(\rho - \rho_f)g}{9\eta} \tag{4}$$

dove:

- v = velocità di sedimentazione [m/s];
- R = raggio delle particelle disperse [m];
- ρ = densità particelle che cadono [kg/m³];
- ρ_f = densità del fluido [kg/m³];
- g = accelerazione di gravità [m²/s];
- η = viscosità dinamica [Ns/m²].

La velocità di sedimentazione è proporzionale al quadrato del diametro delle particelle; pertanto, le particelle vengono ordinate per dimensione sia nel tempo che nella posizione quando si depositano in un contenitore liquido. La legge di Stokes però fa una serie di assunzioni che sono: le particelle sono sferiche e lisce; non vi è alcuna interferenza tra le particelle; il flusso è laminare; le particelle hanno la stessa densità. Per misurare la densità del fluido, e quindi la quantità di particelle in sospensione in un determinato momento, è stato utilizzato un idrometro. La densità della sospensione suolo-acqua dipende dalla concentrazione, dal peso specifico delle particelle di suolo e dalla quantità di disperdente aggiunto (esametafosfato di sodio che vedremo di seguito). Ogni misura dell'idrometro in un tempo trascorso è stata utilizzata per calcolare la percentuale di particelle più fini, la serie di letture ha fornito una distribuzione della massa del materiale in funzione della dimensione delle particelle.

3.2.2.2 Apparecchiatura

L'apparecchiatura utilizzata nella prova di sedimentazione è la seguente:

- Idrometro, uno strumento utilizzato per misurare la densità di un fluido, nel nostro caso la tipologia di idrometro utilizzato è il 151H;
- Tre cilindri di sedimentazione per campione di capacità di 1000ml: cilindro di sedimentazione, cilindro di controllo, cilindro di lavaggio;
- Agitatore, dispositivo che consente la miscelazione del materiale, del disperdente e dell'acqua distillata nei cilindri;
- Vasca termostatica, all'interno sono stati posizionati i cilindri in modo tale da misurare e mantenere la temperatura costante tra i cilindri stessi (sedimentazione, controllo e lavaggio);
- Forno di essiccazione, ventilato capace di mantenere una temperatura costante di $110 \pm 5^\circ\text{C}$;
- Accessori: bilancia, cronometro, termometro.



Figura 33: Vasca termostatica (a sinistra) ed agitatore (a destra).
(Fonte: <http://www.geo3.biz/laboratorio/>)

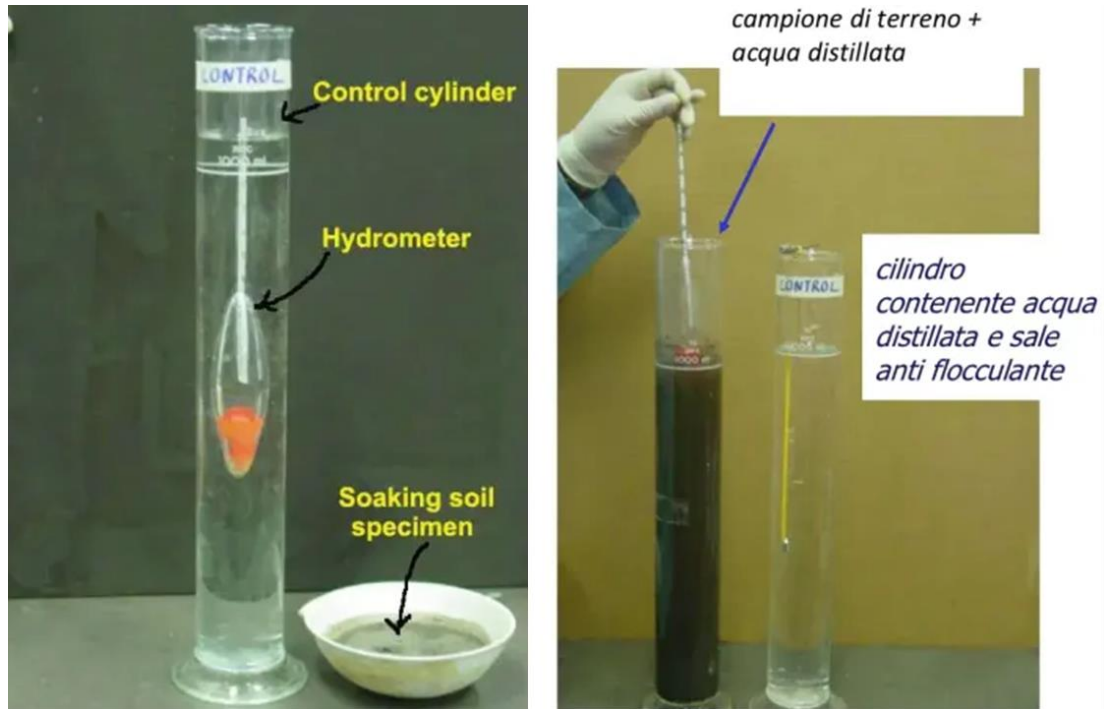


Figura 34: Cilindro di controllo e di sedimentazione con idrometro.
(Fonte: <https://www.notcollapsed.com/granulometria/>)

3.2.2.3 Reagenti

I reagenti utilizzati nell'aerometria sono i seguenti:

- Esametafosfato di sodio (NaPO_3)₆ – agente deflocculante, favorisce la dispersione delle particelle fini in sospensione;
- Alcol isopropilico – utilizzato come inibitore di schiuma durante la miscelazione nell'agitatore;
- Acqua di prova – acqua distillata le cui caratteristiche tecniche sono disponibili al paragrafo 2.3.1

3.2.2.4 Preparazione dei campioni

Lo standard ASTM D7928–21 prevede due metodi di preparazione dell'argilla: ad umido ed essiccata all'aria. La prima viene utilizzata per le prove arbitrali e per i campioni umidi, la seconda viene utilizzata per i campioni ricevuti essiccati all'aria. Trovandoci nella seconda categoria, ovvero avendo a che fare con bentoniti di sodio essiccate, si è seguito il metodo di preparazione secca. La metodologia di preparazione seguita è la seguente:

- Passare l'intero campione al setaccio n.10 (GCL1 e GCL2 passanti al 100%) e verificare che il materiale non contenga aggregazioni di particelle fini, nel caso in cui dovesse contenerle bisogna romperle con l'utilizzo di un mortaio stando attento a rompere le aggregazioni e non le particelle stesse (es. utilizzando un mortaio con pestello rivestito in gomma).
- Controllare che il materiale passante soddisfi i requisiti indicati nella seguente Tabella 28, nel nostro caso sia GCL1 che GCL2 soddisfano i requisiti indicati.

Tabella 28: Requisiti minimi di massa secca.

Alternative Sieve Designation	Maximum Particle Size of Material (smallest sieve that 99% or more passes)		Minimum Dry Mass of Specimen (g or kg)
	Maximum Particle Size, mm	Reporting Results to Nearest 1 %	
No. 40	0.425	50 g	
No. 10	2.00	50 g	
No. 4	4.75	75 g	
3/8 in.	9.50	165 g	
3/4 in.	19.0	1.3 kg	
1 in.	25.4	3 kg	
1 1/2 in.	38.1	10 kg	
2 in.	50.8	25 kg	
3 in.	76.2	70 kg	

- Misurare il contenuto di acqua del materiale pesando prima una frazione di materiale umida e poi secca, quest'ultima si ottiene mettendo in forno il materiale umido precedentemente pesato ad una temperatura costante di $110 \pm 10^\circ\text{C}$ per almeno 24h. Le relazioni per il contenuto di acqua sono le seguenti:

$$P_w = P_u - P_s; W = \frac{P_w}{P_s} \times 100 \quad (5)$$

dove:

P_w = peso acqua [g];

P_u = peso del campione umido [g];

P_s = peso del campione secco dopo essiccazione in forno [g];

W = contenuto di acqua [%].

- Stimare la quantità di massa di materiale umido che può essere utilizzata nella prova di sedimentazione attraverso la seguente relazione (6):

$$M_{mest} = H_c \times \left(\frac{100}{\%est} \right) \times \left(1 + \left(\frac{w_{cest}}{100} \right) \right) \quad (6)$$

dove:

M_{mest} = massa umida massima stimata [g];

H_c = capacità dell'idrometro [g] (pari a 45g nel caso di idrometro 151H);

$\%est$ = percentuale stimata di materiale che passa attraverso il setaccio n.200;

w_{cest} = contenuto di acqua [%].

Nel nostro caso è stata considerata: una percentuale passante al setaccio n.200 pari al 100% per entrambe le tipologie di GCL; un contenuto di acqua misurata pari al 8% su entrambe le bentoniti. Con questi dati otteniamo:

$$M_{mest} = 45 \times \left(\frac{100}{100} \right) \times \left(1 + \left(\frac{8}{100} \right) \right) = 48,6g \quad (7)$$

che è la quantità di bentonite utilizzata nella prova.

3.2.2.5 Correlazione temperatura – densità

Durante il test la densità del fluido di sospensione cambia, pertanto i calcoli per la quantità di particelle in sospensione deve tenere conto anche delle variazioni di densità del fluido dovute alla temperatura ed alla presenza di disperdente. Infatti, l'idrometro 151H misura il peso specifico del fluido rispetto all'acqua distillata ad una temperatura di 20°C, motivo per cui è necessario determinare una correlazione tra densità e temperatura tramite una relazione di calibrazione, a tal fine è stata seguita la seguente procedura:

- Preparare una soluzione di riferimento con lo stesso quantitativo di acqua di prova (1000 ml) e di disperdente utilizzato nel cilindro in sospensione, assicurandosi che il tutto sia adeguatamente miscelato.
- Misurare la densità della soluzione con l'utilizzo dell'idrometro ad una data temperatura.
- Risciacquare l'idrometro e variare la temperatura del cilindro.
- Ripetere la misura per un massimo di 5 valori di densità a 5 temperature differenti.
- Utilizzare le misure prese per calcolare la costante A tramite la seguente relazione:

$$A_n = R_{151,n} + (7,786 \times 10^{-6} \times T_n) + (4,459 \times 10^{-6} \times T_n^2) \quad (8)$$

dove:

A = spostamento medio del peso specifico (idrometro 151H);

$R_{151,n}$ = lettura dell'idrometro a gravità specifica 151H in soluzione di riferimento;

T = lettura della temperatura leggibile a 0,5°C o superiore;

n = pedice che indica il numero di lettura durante la calibrazione.

Dal valore medio di A, derivante dalle cinque letture effettuate, si ottiene la relazione temperatura – densità.

3.2.2.6 Procedura

La procedura seguita per lo svolgimento di questa prova di laboratorio è la seguente:

- Aggiungere $5,0 \pm 0,1$ g di esametafosfato di sodio a circa 500ml di acqua di prova ed aggiungerla alla provetta di sedimentazione.
- Utilizzare un apparecchio di agitazione miscelando la soluzione precedentemente ottenuta con il campione di terreno opportunamente pesato, la miscelazione deve durare almeno 10 minuti.
- Lasciare la soluzione a riposo per un periodo di condizionamento notturno per consentire al terreno di defluccolare.
- Dopo una notte, passare la sospensione di terreno nell'agitatore per 10 minuti.
- Trasferire il liquame disperso dalla provetta al cilindro di sedimentazione ed aggiungere acqua di prova fino ad ottenere una quantità di 1000ml (il cilindro presenta una tacca in corrispondenza di tale quantità).

- Mescolare la soluzione attraverso il metodo di ribaltamento, che è caratterizzato dalle seguenti fasi: posizionare un tappo sul cilindro, prendere il cilindro, ribaltarlo e riposizionarlo dritto, fare questi movimenti per circa 60 volte in un minuto.
- Al termine del ribaltamento posizionare il cilindro nella vasca termostatica ed iniziare le letture con l'idrometro.
- Preparare due cilindri: uno per il controllo della densità aggiungendo 2g di esametafosfato di sodio a 1000ml di acqua distillata, l'altro per il risciacquo dell'idrometro con acqua di rubinetto.
- Posizionare i due cilindri preparati, insieme a quello di sedimentazione, nella vasca termostatica.
- Le letture dell'idrometro devono essere prese nei seguenti tempi: 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 240, 1440 minuti, misure successive sono state prese per definire meglio la distribuzione granulometrica.
- Circa 15/20 secondi prima della lettura bisogna abbassare l'idrometro nel cilindro di sedimentazione, una volta che questo si stabilizza si deve prendere la lettura più vicina a ¼ di una data tacca.
- Rimuovere l'idrometro dal cilindro di sedimentazione e posizionarlo in quello di risciacquo.
- Tra ogni lettura e l'altra ripetere i due punti precedenti e prendere anche la lettura della temperatura, che nel caso di vasca termodinamica è costante per entrambi i cilindri ed è indicata nel termometro integrato nella vasca.
- Ad intervalli regolari prendere anche una lettura nel cilindro di controllo della densità.
- Ottenuta l'ultima lettura dell'idrometro, versare il materiale imbevuto in un setaccio n.200 (75µm), assicurandosi che non vi sia materiale residuo nel contenitore e che l'acqua di lavaggio scorra limpida.
- Essiccare il materiale trattenuto dal setaccio in forno alla temperatura di 110±5°C per almeno 16 ore.
- Togliere il recipiente dal forno, farlo raffreddare in un essiccatore e misurare la massa secca lorda trattenuta dal setaccio (tara + peso secco terreno, il disperdente si è disciolto nell'acqua di lavaggio precedentemente usata).

3.2.2.7 Calcoli

Le formule utilizzate in questa prova sono le seguenti:

- Massa secca del terreno della provetta di sedimentazione partendo dalla massa umida e dal contenuto di acqua:

$$M_d = \frac{M_m}{1 + \left(\frac{w_c}{100}\right)} \quad (9)$$

Dove:

M_d = massa terreno asciutto [g];

M_m = massa terreno umido [g];
 w_c = contenuto di acqua [%].

- Massa secca del terreno utilizzando la provetta di sedimentazione:

$$M_d = M_{dd} - M_{disp} \quad (10)$$

Dove:

M_d = massa di terreno asciutto [g];
 M_{dd} = massa terreno asciutto più disperdente [g];
 M_{disp} = massa del disperdente [g].

- Quando si utilizza la relazione di calibrazione per determinare la lettura offset dell'idrometro, bisogna calcolare la lettura corretta con la seguente equazione che riguarda l'idrometro 151H utilizzato:

$$r_{d,m} = A - 7,784 \times 10^{-6} \times T_m - 4,459 \times 10^{-6} \times T_m^2 \quad (11)$$

dove:

- $r_{d,m}$ = lettura offset dell'idrometro 151H;
 A = spostamento del peso specifico medio dell'idrometro 151H;
 T = temperatura di lettura [°C];
 m = pedice indicante il numero di lettura durante la prova di sedimentazione.
- Per ogni lettura dell'idrometro 151H, la percentuale di massa più fine viene calcolata tramite la seguente equazione:

$$N_m = \left(\frac{G_s}{G_s - 1} \right) \times \left(\frac{V_{sp}}{M_d} \right) \times \rho_c (r_m - r_{d,m}) \times 100 \quad (12)$$

Dove:

- N_m = percentuale di massa di materiale più fine [%];
 V_{sp} = volume della sospensione [cm³];
 ρ_c = densità di massa dell'acqua alla taratura del fabbricante, nel nostro caso la taratura dell'idrometro è impostata a 20°C in acqua distillata quindi il valore della densità è pari a 0,99821 g/cm³;
 M_d = massa del suolo secco della provetta di sedimentazione;
 G_s = peso specifico del suolo;
 r_m = lettura m dell'idrometro in sospensione;
 $r_{d,m}$ = lettura offset dell'idrometro dalla soluzione di riferimento alla stessa temperatura della lettura m;
 m = pedice indicante il numero di lettura durante la prova di sedimentazione.
 La percentuale di massa fine da 152 ore in poi viene calcolata tramite la seguente equazione:

$$N_m = 0,6226 \times \left(\frac{G_s}{G_s - 1} \right) \times \left(\frac{V_{sp}}{M_d} \right) \times (r_m - r_{d,m}) \times \left(\frac{100}{1000} \right) \quad (13)$$

- La profondità effettiva è un valore utilizzato nel calcolo della distanza di caduta delle particelle per ogni lettura dell'idrometro, è stata utilizzata la seguente equazione:

$$H_m = H_{r2} \left(\frac{(H_{r1} - H_{r2})}{(r_2 - r_1)} \times (r_2 - r_m + C_m) \right) - \left(\frac{V_{hb}}{2A_c} \right) \quad (14)$$

dove:

H_m = distanza delle particelle che cadono alla lettura m [cm];

V_{hb} = volume del bulbo idrometrico fino alla base dello stelo [cm³];

A_c = area della sezione trasversale del cilindro di sedimentazione;

H_r = distanza tra il centro di galleggiamento e le letture minime (H_{r1}) e massime (H_{r2}) dell'idrometro più vicine a 0,1cm;

r_m = lettura dell'idrometro 151H in sospensione;

C_m = correzione del menisco;

r = lettura minima (r_1) e massima (r_2) dell'idrometro;

m = pedice indicante il numero di lettura durante la prova di sedimentazione;

- Per ogni lettura calcolare il diametro massimo delle particelle di terreno utilizzando la seguente equazione:

$$D_m = \left(\sqrt{\frac{18\mu}{\rho_w g (G_s - 1)} \times \frac{H_m}{t_m}} \right) \times 100 \quad (15)$$

dove:

D_m = diametro delle particelle [mm];

μ = viscosità dinamica dell'acqua a 20°C, che corrisponde a 0,01 g/(cm × s);

ρ_w = densità di massa dell'acqua a 20°C, che corrisponde a 1,00 g/cm³;

g = accelerazione di gravità, che corrisponde a 980,7 cm/s²;

G_s = peso specifico del suolo in esame;

t_m = tempo di caduta trascorso [s];

H_m = distanza di caduta delle particelle [cm];

m = pedice che indica il numero di lettura durante la prova di sedimentazione.

3.2.3 Prova di idratazione e rigonfiamento a pressione costante in edometro

3.2.3.1 Caratteri generali

La prova di rigonfiamento in edometro ha i seguenti scopi: valutare lo swelling indotto dalla bagnatura di campioni di GCL insaturi sotto una determinata pressione costante, confezionare campioni idratati per le successive prove di permeabilità. I fluidi utilizzati sono: acqua distillata (DW) e cloruro di calcio (CaCl_2). In questo metodo di prova, i campioni ricostruiti di GCL sono stati posti in un'unità edometrica con i bordi rigidi, successivamente sono stati caricati con una pressione verticale costante (35kPa). Dopo aver raggiunto l'equilibrio sotto tale carico, i campioni sono stati inondati con i fluidi utilizzati nelle prove (DW o CaCl_2) e ne è stato misurato il rigonfiamento a pressione costante.

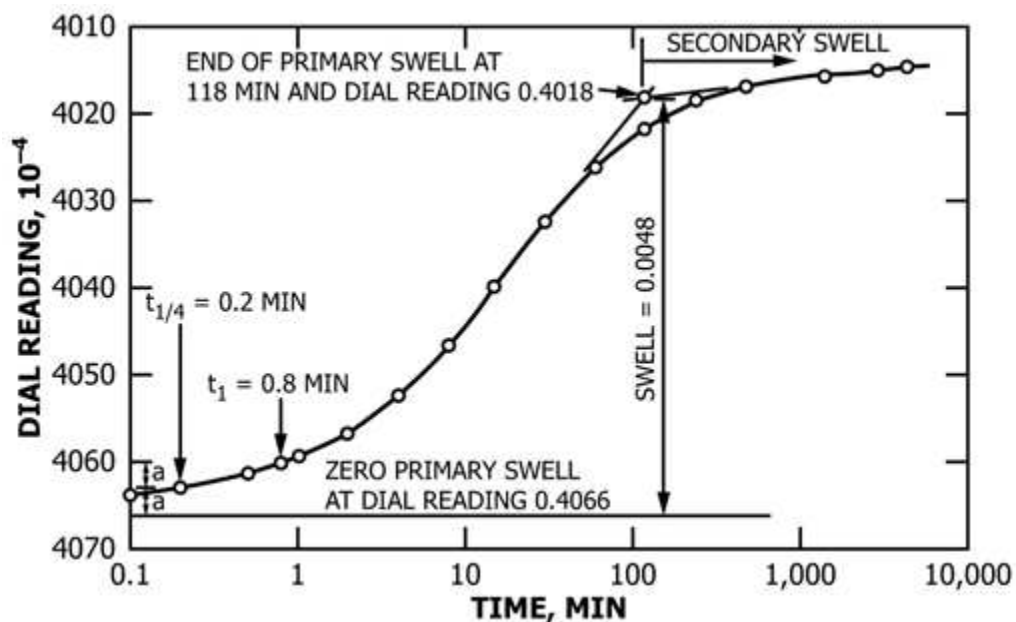


Figura 35: Esempio di curva tempo - rigonfiamento.
(Fonte: ASTM D4546-21)

3.2.3.2 Apparecchiatura

L'apparecchiatura utilizzata durante tale prova è la seguente:

- Pressa edometrica: utilizzato per applicare il carico assiale al campione, il dispositivo deve essere in grado di mantenere la pressione utilizzata per un lungo periodo di tempo e di mantenere una precisione di $\pm 0,5\%$. Nel nostro caso si è applicato un carico di 35 kPa.
- Anello edometrico: dispositivo dalla forma cilindrica cava con delle pareti sufficientemente rigide in grado di impedire la deformazione laterale del campione, presenta dei fori che consentono l'ingresso del fluido di prova nel campione.
- Cella edometrica: è una vaschetta all'interno del quale viene posizionato l'anello edometrico, lo scopo principale della cella è trattenere il fluido di prova per la saturazione del campione.

- Capitello: dispositivo di copertura rigido su cui viene applicato il carico, il suo diametro deve essere leggermente inferiore a quello interno dell'anello edometrico, in modo tale da non impedire il rigonfiamento del campione.
- Trasduttore di deformazione: consente di misurare la deformazione assiale del campione nel tempo.
- Dischi porosi: dispositivi porosi posti al di sotto ed al di sopra del campione. Quello inferiore deve avere lo stesso diametro di quello interno dell'anello edometrico in modo da aderire a quest'ultimo, quello superiore deve avere un diametro leggermente inferiore rispetto a quello interno dell'anello edometrico in modo da non impedire il rigonfiamento del campione.
- Carta filtro: tagliata dello stesso diametro del campione e posta tra questo ed i dischi porosi.
- Bilancia: per la misurazione del peso di materiale da porre nei GCL ricostruiti.
- Fluido di prova: acqua distillata (DW) e cloruro di calcio (CaCl_2).



Figura 36: Edometro.

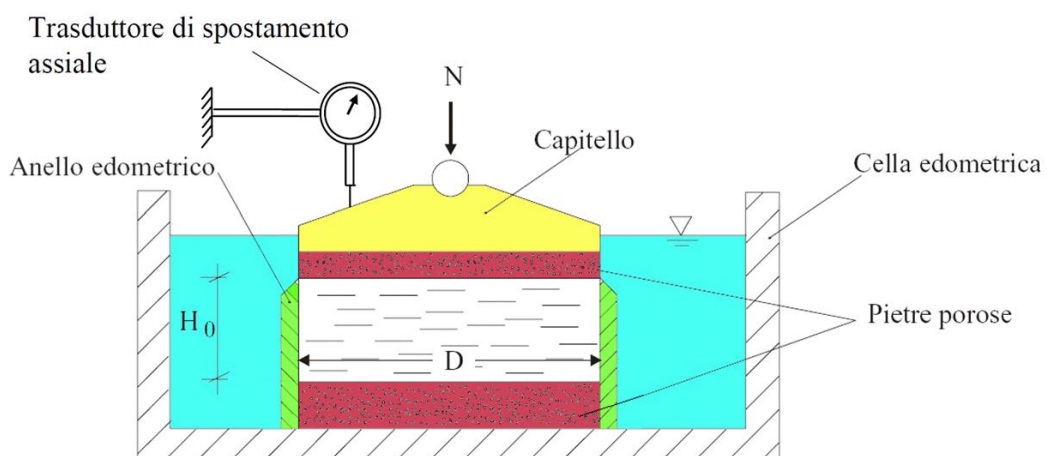


Figura 37: Rappresentazione schematica della prova edometrica.

(Fonte: <https://www.aup.it/wp-content/uploads/2012/04/Lezione7A-D.pdf>)

3.2.3.3 Preparazione dei campioni

I campioni utilizzati in questa prova sono stati ricostruiti con la procedura seguente:

- Preparare la bentonite (tramite additivazione e non) attraverso le procedure che riguardano i campioni ricostruiti descritte nei paragrafi 3.1.1; 3.1.2.1; 3.1.3.1.
- Porre la pietra porosa inferiore alla base dell'anello edometrico e farla aderire alle pareti interne di quest'ultimo.
- Posizionare l'anello edometrico con la pietra porosa nella cella edometrica;
- Porre la carta filtro, precedentemente tagliata allo stesso diametro del campione, sopra la pietra porosa appena posizionata.
- Porre il geotessile non tessuto inferiore sulla carta filtro.
- Pesare la bentonite necessaria per realizzare il campione ricostruito (vedi tabella 28) e spolverarla sul geotessile in maniera più uniforme possibile.
- Porre il geotessile tessuto superiore sulla bentonite appena spolverata.
- Porre la carta filtro, precedentemente tagliata allo stesso diametro del campione, sopra il geotessile superiore;
- Porre la pietra porosa, dal diametro leggermente più piccolo di quello interno dell'anello edometrico, sopra la carta filtro (nota: se il diametro della pietra porosa e quello della parete interna dell'anello edometrico fossero uguali, la pietra porosa impedirebbe il rigonfiamento del campione a causa dell'attrito tra questa e la parete).
- Porre il capitello sulla pietra porosa (nota: anche il capitello ha un diametro inferiore a quello interno dell'anello edometrico, per lo stesso motivo descritto al punto precedente).

Durante tale procedura è utile stimare l'altezza del campione che nel nostro caso (sia per i GCL1 che per i GCL2) è compresa tra 0,60 e 0,85. I campioni ricostruiti con la procedura appena descritta sono elencati nella seguente Tabella 29.

Tabella 29: Campioni utilizzati nella prova edometrica.

Campione	Polimero	Peso del campione (bentonite+polimero)	Liquido utilizzato
GCL1.1	Non additivato	32,43g	CaCl ₂
GCL1.2	Non additivato	32,43g	CaCl ₂
GCL1.3	5% PA (DM)	34,08g	DW
GCL1.4	5% PA (DM)	34,08g	CaCl ₂
GCL1.5	10% PA (DM)	35,67g	CaCl ₂
GCL1.6	5% PA (WM)	31,67g	DW
GCL1.7	5% PA (WM)	31,67g	CaCl ₂
GCL2.3	Non additivato	43,98g	DW
GCL2.4	Non additivato	43,98g	CaCl ₂
GCL2.5	5% PA (DM)	46,18g	DW
GCL2.6	5% PA (DM)	46,18g	CaCl ₂
GCL2.7	5% PA _x (DM)	46,18g	DW
GCL2.8	5% PA _x (DM)	46,18g	DW
GCL2.9	5% PA _x (DM)	46,18g	CaCl ₂
GCL2.10	5% CMC (DM)	46,18g	DW
GCL2.11	5% CMC (DM)	46,18g	CaCl ₂

3.2.3.4 Procedura

La procedura seguita per la prova di rigonfiamento in edometro è la seguente:

- Preparato il campione porre la cella edometrica nel consolidometro e regolare il trasduttore di spostamento assiale ponendolo in una posizione tale da leggere il completo rigonfiamento (ad esempio a metà, circa 500).
- Caricare l'edometro ad una pressione di 35 kPa e prendere le prime letture del campione ancora anidro, regolando la livella posta sul consolidometro mantenendola sempre "in bolla".
- Le letture da prendere con il campione anidro sono: 0,5 min; 1 min; 2 min; 4 min; 8 min.
- Dopo 10 minuti, riempire la parte esterna dell'anello con il fluido di prova e successivamente prendere la lettura dei 15 minuti.
- Dopo 20 minuti, riempire tutta la cella con il fluido di prova (anello edometrico esterno ed interno) riempiendo l'anello esterno fino a far traboccare il fluido all'interno dello stesso.
- Riprendere le letture: 30 min; 1 ora; 2 ore; 4 ore; 24 ore; 48 ore; e così via ogni 48/72 ore fino alla fine del rigonfiamento (curva tempo – rigonfiamento stabile).
- Una volta terminato il rigonfiamento togliere il fluido di prova dall'edometro utilizzando una siringa.
- Smontare la cella dall'edometro ed il campione dalla cella seguendo la seguente procedura: togliere il capitello; spingere la pietra porosa inferiore verso l'alto in modo da far uscire tutto il pacchetto dalla cella edometrica, separare il campione dalla pietra porosa e dalla carta filtro con l'aiuto di una spatolina.
- Pesare il campione e misurare l'altezza, per quest'ultima servirsi di un calibro e registrare l'altezza del campione su quattro lati, ruotando il campione di 90° per ogni misura; L'altezza finale sarà data dalla media delle misure prese.
- Procedere con la prova di permeabilità che vedremo di seguito.

3.2.3.5 Calcoli

Le equazioni utilizzate per arrivare alla curva di rigonfiamento sono le seguenti:

- Utilizzando le letture del trasduttore, bisogna calcolare le seguenti quantità:

$$h_1 = h - \Delta h_1 \quad (16)$$

$$h_2 = h_1 + \Delta h_2 (\text{rigonfiamento}) \quad (17)$$

$$h_2 = h_1 - \Delta h_2 (\text{collasso}) \quad (18)$$

Dove:

h = altezza iniziale del campione [mm];

h_1 = altezza del campione prima della saturazione [mm];

h_2 = altezza finale del campione dopo la saturazione [mm];

Δh_1 = compressione del campione dopo l'applicazione dello sforzo prima della saturazione [mm];

Δh_2 = rigonfiamento del campione causato dalla saturazione [mm];

- Calcolare la deformazione verticale del campione causato dal rigonfiamento o dallo schiacciamento attraverso le seguenti equazioni:

$$\varepsilon_s = \frac{100\Delta h_2}{h_1} \quad (19)$$

$$\varepsilon_c = \frac{-100\Delta h_2}{h_1} \quad (20)$$

Dove:

ε_s = deformazione verticale causata dal rigonfiamento [%];

ε_c = deformazione verticale causata dal collasso iniziale sotto carico [%].

3.2.4 Prova di permeabilità

3.2.4.1 Caratteri generali

La prova di permeabilità consente la misurazione, in laboratorio, della conducibilità idraulica di campioni di geocompositi bentonitici (GCL) permeati con soluzioni acquose (DW) o con liquidi molto aggressivi (CaCl_2) per simulare le condizioni create da un percolato. Questo metodo di prova può essere utilizzato con i provini GCL che hanno una conducibilità idraulica inferiore o uguale a 1×10^{-5} m/s (1×10^{-3} cm/s). Nella prova di permeabilità si applica un flusso laminare unidimensionale, di soluzioni acquose o di soluzioni aggressive (liquido di prova), attraverso un GCL saturo preconsolidato. Questo metodo di prova presuppone che la legge di Darcy sia valida e che la conducibilità idraulica non sia essenzialmente influenzata dal gradiente idraulico. La validità di ciò è stata valutata misurando la conducibilità idraulica del campione con tre diversi gradienti idraulici; se i valori misurati sono risultati simili, allora la legge di Darcy è stata considerata valida. C'è da fare però una considerazione, essendo il provino comprimibile, una variazione del gradiente idraulico influisce sul volume di quest'ultimo, ciò può portare a delle piccole variazioni della conducibilità idraulica.

La legge di Darcy stabilisce che la velocità di un fluido attraverso un mezzo poroso è direttamente proporzionale alla perdita di carico ed inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso:

$$\frac{Q}{A} = v = k \times \frac{\Delta h}{L} = k \times i \quad (21)$$

Dove:

Q = volume del liquido che attraversa la sezione nell'unità di tempo [m^3/s];

v = velocità di filtrazione [m/s];

k = coefficiente di permeabilità [m/s];

i = gradiente idraulico;

A = area trasversale di filtrazione [m^2].

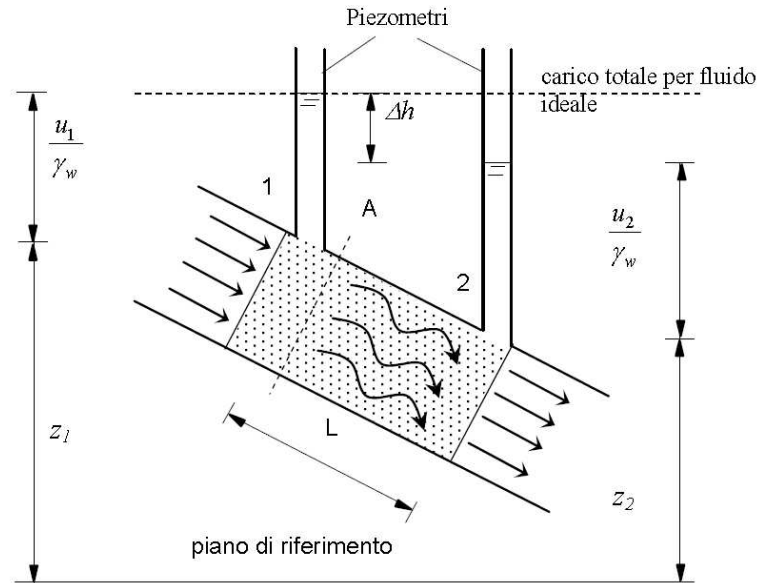


Figura 38: Legge di Darcy.

Per lo svolgimento di questa prova sono state considerate due condizioni:

- Condizione 1 (campioni non preidratati): i campioni sono stati saturati in edometro (tranne i campioni non ricostruiti che sono stati inseriti direttamente nel permeametro) e permeati solo con il fluido di prova (DW o CaCl₂);
- Condizione 2 (campioni preidratati), i campioni sono stati saturati in edometro con acqua distillata e, permeati nel prima con acqua distillata (DW) e poi con il cloruro di calcio (CaCl₂);

Tabella 30: Campioni non preidratati.

Condizione 1 (campioni non preidratati)			
Campioni	Polimero	Edometro	Permeametro
GCL1.2	Non additivato	CaCl ₂	CaCl ₂
GCL1.4	5% PA (DM)	CaCl ₂	CaCl ₂
GCL1.5	10% PA (DM)	CaCl ₂	CaCl ₂
GCL1.7	5% PA (WM)	CaCl ₂	CaCl ₂
GCL2.1	Non additivato	Non ricostruito	DW
GCL2.2	Non additivato	Non ricostruito	CaCl ₂
GCL2.3	Non additivato	DW	DW
GCL2.4	Non additivato	CaCl ₂	CaCl ₂
GCL2.5	5% PA (DM)	DW	DW
GCL2.6	5% PA (DM)	CaCl ₂	CaCl ₂
GCL2.5	5% PA (DM)	DW	DW
GCL2.6	5% PA (DM)	CaCl ₂	CaCl ₂
GCL2.7	5% PA _x (DM)	DW	DW
GCL2.8	5% PA _x (DM)	DW	DW
GCL2.9	5% PA _x (DM)	DW	DW
GCL2.10	5% CMC (DM)	DW	DW
GCL2.6	5% CMC (DM)	CaCl ₂	CaCl ₂

Tabella 31: Campioni preidratati.

Condizione 2 (campioni preidratati)			
Campioni	Polimero	Edometro	Permeometro
GCL1.1	Non additivato	DW	DW→CaCl ₂
GCL1.3	5% PA (DM)	DW	DW→CaCl ₂
GCL1.6	5% PA (WM)	DW	DW→CaCl ₂

3.2.4.2 Apparecchiatura

L'apparecchiatura utilizzata per la prova di permeabilità è la seguente:

- Sistema idraulico a carico variabile: deve consentire di misurare la perdita di carico applicata, quindi il gradiente idraulico, entro il 5%. Inoltre, il rapporto tra la perdita di carico iniziale e quella finale, in un dato intervallo di tempo, deve essere misurata in modo tale che il rapporto calcolato sia entro il 5%. La perdita di carico è stata misurata grazie all'ausilio di una pipetta graduata.
- Sistema de-airing: il sistema idraulico deve essere progettato in modo da consentire una rimozione dell'aria contenuta nelle linee di flusso.
- Sistema di contropressione: il sistema idraulico deve consentire l'applicazione di una contropressione al provino per facilitarne la saturazione.
- Sistema di misurazione del flusso: devono essere misurati sia i volumi di ingresso che quelli di uscita con l'ausilio di una pipetta graduata.
- Deaerazione e conformità del sistema: il sistema di misurazione del flusso deve contenere un minimo di spazio morto ed essere in grado di essere rapidamente e completamente deaerato. La conformità dal sistema in risposta alle variazioni di pressione deve essere ridotta al minimo utilizzando sistemi di misurazione e tubi rigidi (nel nostro caso sono stati utilizzati tubi termoplastici rigidi).
- Perdite di carico: le perdite di carico dovute alla carta filtro o ai dischi porosi possono causare errori, per limitare ciò è consigliabile saturare questi materiali ed ogni tubo entrante nel permeometro prima dell'inizio della prova.
- Accumulatore a vescica (bladder): deve essere utilizzato un dispositivo di interfaccia permanente che mantenga separato il liquido utilizzato nella prova da quello utilizzato nei dispositivi di misurazione (pipette). Questo dispositivo, infatti, deve contenere il liquido di prova in una camera chiusa e non deve consentire né la possibile contaminazione dei dispositivi di misurazione, né il potenziale rilascio di sostanze chimiche. Il bladder è costituito da una camera d'acqua (solitamente di rubinetto o distillata) e da una camera contenente il liquido si prova, questi due volumi sono separati tra di loro da una membrana flessibile.
- Sistema di pressione della cella del permeometro: il sistema di pressurizzazione della cella del permeometro deve essere in grado di applicare e controllare la pressione della cella applicata con un massimo il 5%. Il dispositivo è caratterizzato da un piccolo serbatoio (pipetta graduata) parzialmente riempito di acqua, la cui pressione viene gestita tramite un trasduttore elettronico.
- Cella di permeazione o permeometro: dispositivo all'interno del quale porre il campione in esame con i terminali porosi racchiusi in una membrana, la cella

deve avere una pressione controllata da applicare alla membrana e quindi al campione stesso. La pressione in cella utilizzata nelle prove è di 10psi.

- La cella permeometrica deve consentire di valutare eventuali variazioni in volume del campione, questo dato può essere tenuto sotto controllo attraverso la pipetta della cella (valutando lo spostamento del livello dell'acqua all'interno della pipetta: se il livello si alza allora il volume del campione è aumentato, se il livello si abbassa allora il volume del campione è diminuito); inoltre in alcune celle è presente trasduttore di spostamento che viene appoggiato sulla testa del campione e che misura il rigonfiamento o il cedimento dello stesso.
- Per facilitare la rimozione dei gas e quindi per facilitare la saturazione del campione, la cella è dotata di 4 linee di drenaggio (due superiori di entrata e due inferiori di uscita) così organizzate: due linee (una superiore ed una inferiore) collegate ai bladder di ingresso e di uscita, le restanti due linee (una superiore ed una inferiore) non collegate a nulla per consentire la rimozione di eventuali gas.
- Piastra superiore e di base: una piastra superiore ed una di molto rigide devono consentire la chiusura del campione all'interno della membrana, entrambi questi elementi sono caratterizzati da appositi fori collegati alle quattro linee di drenaggio descritte sopra.
- Membrana flessibile: utilizzata per chiudere il campione ed isolarlo dalla cella, la membrana deve essere accuratamente ispezionata prima del suo utilizzo per evitare difetti e fori. Questo elemento viene sigillato alla piastra superiore ed a quella di base con l'utilizzo di silicone e di appositi o-ring per evitare l'ingresso di fluidi dalla cella.
- Cilindro cavo in acciaio per il posizionamento della membrana: cilindro rigido cavo in acciaio all'interno del quale viene posizionata la membrana per facilitarne l'inserimento attorno al campione, il cilindro è dotato di un apposito foro di ingresso all'interno del quale si può imporre un vuoto, generato da una pompa, che consente di individuare difetti sulla membrana.
- Terminali porosi o pietre porose: dello stesso tipo utilizzato nella prova edometrica, le pietre porose devono essere sufficientemente rigide da evitare la rottura e devono avere una permeabilità superiore a quella del campione in esame.
- Carta filtro: come nella prova edometrica, la carta filtro deve essere posta tra la pietra porosa ed il campione.
- Pompa a vuoto: utilizzata per consentire la deaerazione del liquido posto nei circuiti e per consentire anche la ricarica dei bladder con i liquidi di prova.
- Attrezzi vari: bilancia, dispositivi per misurare l'altezza del campione (es. calibro), spatoline, tutto ciò che è necessario alla prova.

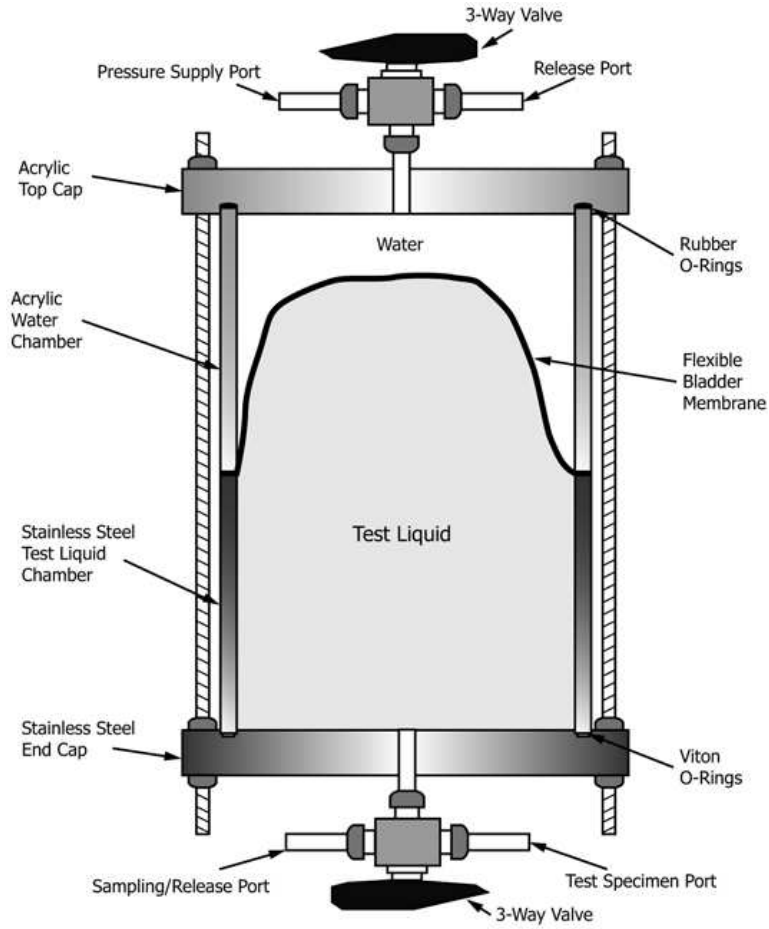


Figura 39: schema rappresentativo di un bladder.
(Fonte: ASTM 6766-20).

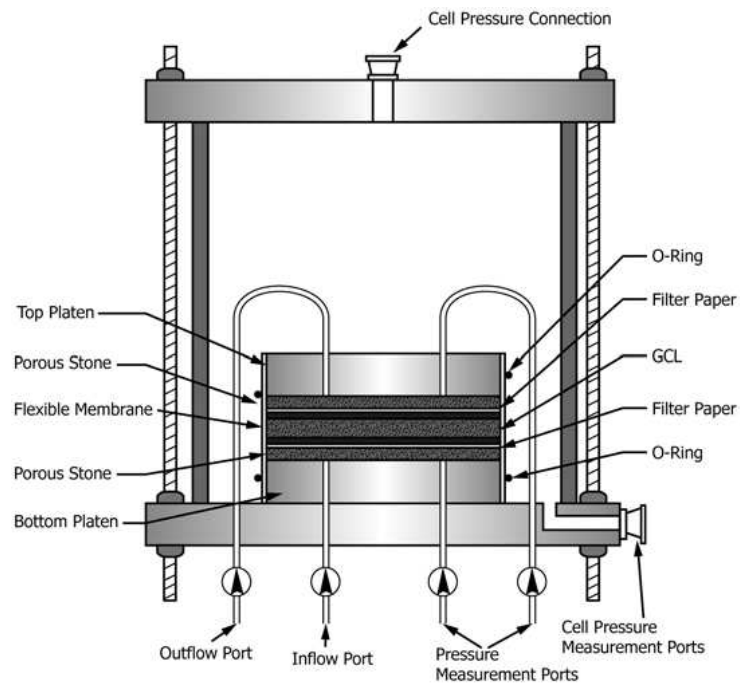


Figura 40: Schema rappresentativo di una cella con il permeametro.
(Fonte: ASTM 6766-20).

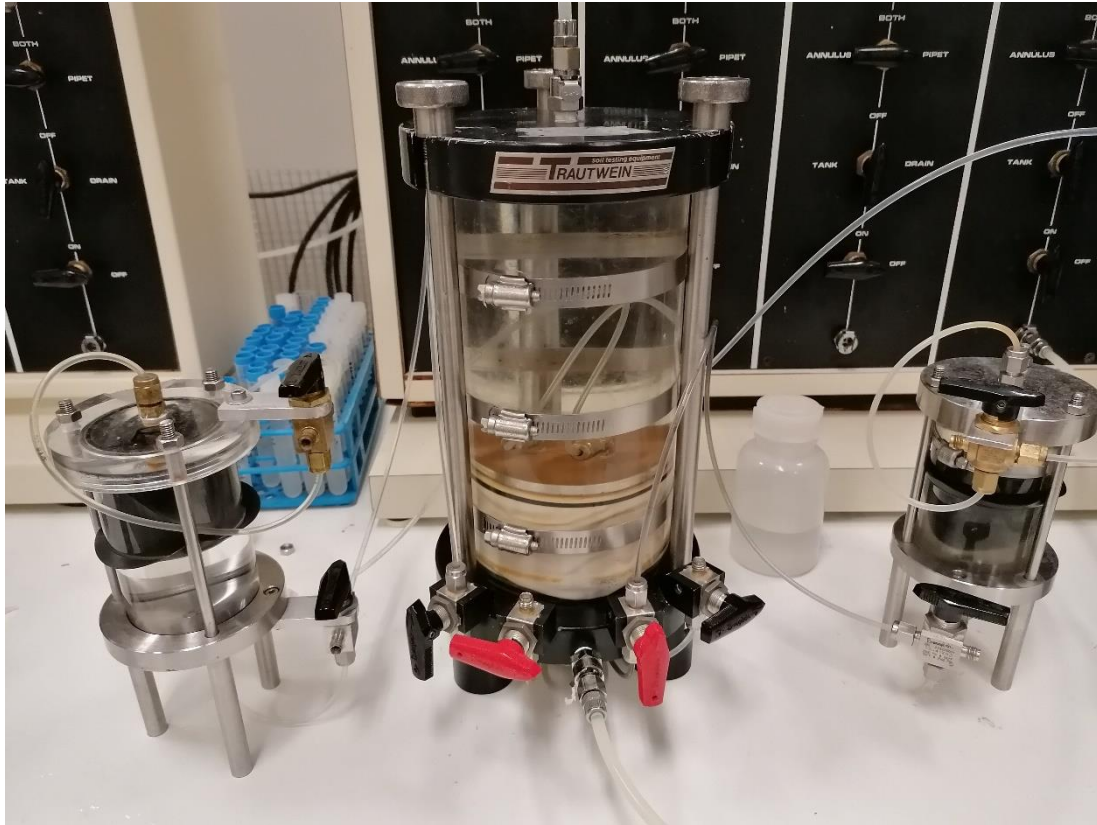


Figura 41: Foto di una cella (al centro) con due bladder laterali (uno di entrata a sinistra ed uno di uscita a destra).

3.2.4.3 Preparazione dei campioni

I metodi di preparazione dei campioni si distinguono in base a due categorie: campioni non ricostruiti e campioni ricostruiti. Dunque, abbiamo due procedure differenti descritte di seguito:

- Campioni non ricostruiti: tagliare da un geotessile un campione dal diametro di 10cm; pesare il campione tagliato e stimare la quantità di bentonite presente all'interno considerando il peso del geotessuto indicato nelle schede tecniche (Tabelle 3 e 4); misurare l'altezza del campione con l'ausilio di un calibro prendendo quattro misure su quattro lati diversi, ruotando il campione di 90° tra una misura e l'altra; stimare l'altezza del campione facendo la media delle quattro misure prese; procedere con il montaggio del campione nel permeametro.
- Campioni ricostruiti: rimuovere il campione dall'edometro; pesare il campione saturo; misurare l'altezza del campione saturo con l'ausilio di un calibro prendendo quattro misure su quattro lati diversi, ruotando il campione di 90° tra una misura e l'altra; stimare l'altezza del campione facendo la media delle quattro misure prese; procedere con il montaggio del campione nel permeametro.

I pesi e le altezze prese per i vari campioni sono elencati nelle Tabelle di seguito.

Tabella 32: Altezze e pesi dei campioni non ricostruiti pre e post prove.

Campioni non ricostruiti						
Campione	Polimero	Liquido	H ₂	H ₃	P ₂	P ₃
[-]	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[g]	[g]
GCL2.1	Non additivato	DW	0,78	IF	46,33	IF.
GCL2.2	Non additivato	CaCl ₂	0,83	0,72	46,33	74

Nota: H₂ e P₂ sono rispettivamente l'altezza ed il peso del campione prima di essere montati nel permeametro; H₃ e P₃ sono rispettivamente l'altezza ed il peso del campione dopo di essere stati smontati dal permeametro; IF = campione in filtrazione, prova ancora in corso.

Tabella 33: Altezze e pesi dei campioni ricostruiti pre e post prove.

Campioni ricostruiti								
Campione	Polimero	Liquido	H ₁	H ₂	H ₃	P ₁	P ₂	P ₃
[-]	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[g]	[g]	[g]
GCL1.1	Non additivato	DW→CaCl ₂	0,70	0,92	0,81	36,36	81,35	84,37
GCL1.2	Non additivato	CaCl ₂	0,60	0,60	0,59	36,36	63,65	65,19
GCL1.3	5% PA (DM)	DW→CaCl ₂	0,65	1,08	0,70	38,01	97,77	78,10
GCL1.4	5% PA (DM)	CaCl ₂	0,65	0,71	0,65	38,01	71,00	79,95
GCL1.5	10% PA (DM)	CaCl ₂	0,70	0,76	0,67	39,60	80,30	76,44
GCL1.6	5% PA (WM)	DW→CaCl ₂	0,65	1,17	0,78	35,60	116,38	80,16
GCL1.7	5% PA (WM)	CaCl ₂	0,60	0,67	0,68	35,60	69,42	70,25
GCL2.3	Non additivato	DW	0,70	1,07	I.F.	46,33	119,16	I.F.
GCL2.4	Non additivato	CaCl ₂	0,84	0,84	0,80	46,33	93,41	92,26
GCL2.5	5% PA (DM)	DW	0,70	1,31	I.F.	48,53	145,64	I.F.
GCL2.6	5% PA (DM)	CaCl ₂	0,84	0,87	0,81	48,53	95,80	93,41
GCL2.7	5% PAX (DM)	DW	0,70	1,17	I.F.	48,53	131,66	I.F.
GCL2.8	5% PAX (DM)	DW	0,75	1,27	I.F.	48,53	135,40	I.F.
GCL2.9	5% PAX (DM)	CaCl ₂	0,70	0,71	0,69	48,53	87,11	83,43
GCL2.10	5% CMC (DM)	DW	0,80	1,30	I.F.	48,53	132,84	I.F.
GCL2.11	5% CMC (DM)	CaCl ₂	0,80	0,84	0,81	48,53	94,27	88,15

Nota: H₁ e P₁ sono rispettivamente l'altezza ed il peso dei campioni ricostruiti prima di essere montati in edometro (H₁ è stata stimata partendo dall'altezza H₂ del campione); H₂ e P₂ sono rispettivamente l'altezza ed il peso del campione prima di essere montati nel permeametro e dopo essere stati idratati in edometro; H₃ e P₃ sono rispettivamente l'altezza ed il peso del campione dopo di essere stati smontati dal permeametro; I.F. = campione ancora in filtrazione.

3.2.4.4 Procedura

La procedura seguita per la prova di permeabilità è la seguente:

- Montare e caricare i bladder con il liquido di prova, avendo cura di eliminare l'aria dai circuiti con l'ausilio della pompa a vuoto.
- Saturare i quattro circuiti del permeametro con il liquido di prova.
- Tagliare due fogli di carta filtro con lo stesso diametro del campione (10cm) e saturarla nel liquido di prova insieme ai dischi porosi.
- Posizionare il campione nel permeametro con il seguente ordine: posizionare il primo disco poroso sulla base del permeametro, posizionare la carta filtro sul disco poroso, posizionare il campione ponendo il geotessile spugnoso e punzonato ad ago sulla carta filtro di base, posizionare la carta filtro di testa sul geotessile a maglie larghe, posizionare la pietra porosa sulla carta filtro di testa ed infine porre la testa de permeametro sulla pietra porosa superiore.

- Distribuire con un dito un sottile strato di silicone sulle pareti laterali della testa e della base del permeometro.
- Posizionare la membrana attorno al campione con l'ausilio del cilindro cavo in acciaio.
- Posizionare gli o-ring per chiudere la membrana alla base ed alla testa del permeometro;
- Posizionare la parete della cella, riempirla di acqua e chiudere la cella con un tappo predisposto;
- Mettere in pressione il sistema per la prima fase di consolidazione per almeno 24h, le pressioni di consolidazione utilizzate sono le seguenti: entrata 5psi; uscita 5psi; cella 10psi.
- Passate almeno 24 ore di consolidazione porre una differenza di pressione tra l'entrata e l'uscita in modo da creare un gradiente che pone il campione nella fase di filtrazione, le pressioni usate in tale fase sono: entrata 6/8psi; uscita 5psi; cella 10psi.
- Registrare l'abbassamento e l'innalzamento delle pipette di entrata e di uscita in un dato arco temporale e in modo da ricavare la permeabilità (k).
- Registrare la temperatura della stanza al momento della lettura in modo da aggiustare la k in base alla temperatura;
- Tutti i campioni sono stati posti in filtrazione dall'alto verso il basso per evitare problemi di intasamento con il liquido in uscita; infatti, con questa tipologia di filtrazione il fluido effluente deve affrontare un percorso nel circuito più breve rispetto a quello che dovrebbe affrontare nel caso in cui la filtrazione fosse dal basso verso l'alto, in questo modo si riducono al minimo eventuali intasamenti dei circuiti dovuti al materiale o al polimero idrosolubile.
- Tra una lettura e l'altra ricaricare la pipetta di entrata e scaricare la pipetta di uscita;
- Ad intervalli regolari ricaricare il bladder di entrata e scaricare quello di uscita, ogni volta che si effettua questa procedura raccogliere un campione di liquido in uscita dal campione in modo da misurare la conduttività elettrica (EC) del fluido prelevato ed il pH, lo scopo di ciò è quello di confrontare questi due valori con quelli del liquido di entrata;
- Terminata la prova, smontare il campione dal permeometro ed effettuare una serie di misure: altezza del campione con la procedura descritta al paragrafo 3.4.2.3, peso del campione e contenuto di acqua.
- Il contenuto di acqua si misura seguendo la seguente procedura: pesare un contenitore per ottenere la tara, tagliare un pezzo di campione e misurarne il peso lordo umido (peso umido + tara), porre il contenitore con il materiale in forno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ per almeno 24h, prelevare il contenitore e porlo in un deumidificatore per almeno 10 minuti; pesare il contenitore con il materiale dentro e ricavare il peso lordo secco (peso secco del campione + tara), ricavarsi il contenuto di acqua attraverso le seguenti relazioni:

$$Plu = Pu + Tr; Pls = Ps + Tr; Pa = Plu - Pls; W = \frac{Pa}{Ps} \times 100 \quad (22)$$

Dove:

Plu = peso lordo umido [g];

Pu = peso netto umido [g];

Pls = peso lordo secco [g];

Ps = peso netto secco [g];

Tr = tara del contenitore [g];

W = contenuto di acqua [%].

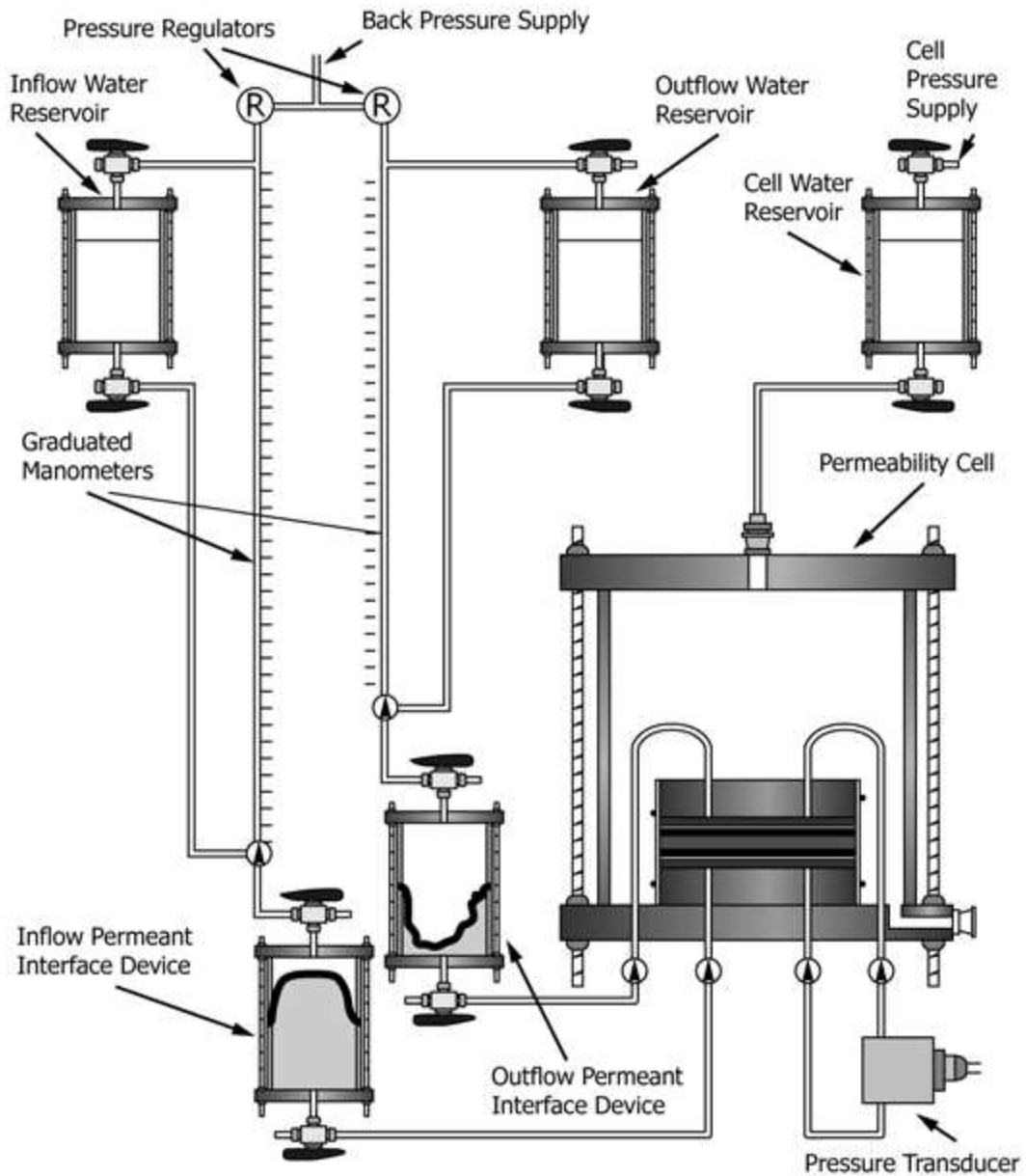


Figura 42: Rappresentazione schematica della prova di permeabilità.

(Fonte: ASTM 6766-20).

3.2.4.5 Calcoli

Le equazioni utilizzate per il calcolo della permeabilità nella presente prova sono le seguenti:

- La conducibilità k è stata ricavata dalla seguente formula:

$$k_T = \frac{a_{in} a_{out} L}{A \Delta t (a_{in} + a_{out})} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (23)$$

dove:

k_T = conducibilità idraulica [m/s];

a_{in} = area della sezione trasversale del serbatoio contenente il liquido influente [m²];

a_{out} = area della sezione trasversale del serbatoio contenente il liquido effluente [m²];

L = lunghezza del campione [m];

A = area della sezione trasversale del campione [m²];

Δt = tempo trascorso tra la determinazione di h_1 ed h_2 [s];

h_1 = perdita di carico attraverso il campione al tempo t_1 [m];

h_2 = perdita di carico attraverso il campione al tempo t_2 [m];

Nel nostro caso assumendo $a_{in} = a_{out}$ = area trasversale della buretta di misura, l'equazione per il calcolo di k diventa:

$$k_T = \frac{aL}{2At} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (24)$$

- La conducibilità idraulica va corretta con quella ottenuta a 20°C, k_{20} , moltiplicando k_T per il rapporto tra la viscosità dell'acqua alla temperatura di prova e la viscosità dell'acqua a 20°C, R_T , come segue:

$$k_{20} = R_T k_T; \quad R_T = \frac{2,2902(0,9842^T)}{T^{0,1702}} \quad (25)$$

dove:

k_{20} = conducibilità idraulica corretta a 20°C [m/s];

R_T = rapporto tra la viscosità dell'acqua alla temperatura di prova e la viscosità dell'acqua alla temperatura di 20°C;

T = temperatura media di prova durante la prova di permeazione $(T_1+T_2)/2$;

T_1 = temperatura di prova all'inizio della prova di permeazione [°C];

T_2 = temperatura di prova all'inizio della prova di permeazione [°C].

Capitolo 4

RISULTATI

4.1 Prova di rigonfiamento libero (free swelling test)

La prova di rigonfiamento libero è stata eseguita su varie miscele di bentonite additivata e non, i risultati sono riassunti nella seguente Tabella 34.

Tabella 34: Rigonfiamento libero per le varie miscele di bentonite utilizzata.

Bentonite	Polimero	Free swell [ml/2g]	
		DW	CaCl ₂
GCL1	Non additivata	35	6
GCL1	5% PA (DM)	50	10
GCL1	5%PA (WM)	65	10
GCL1	10% PA (DM)	68	13
GCL2	Non additivata	29	6
GCL2	5% PA (DM)	55	10
GCL2	5% PA _x (DM)	50	8
GCL2	5% CMC (DM)	47	9

Dalla presente Tabella si nota come l'aggiunta di polimero incrementi il rigonfiamento del materiale: sia in acqua distillata, dove si nota un aumento dello swelling rispetto alla Na-B non additivata; che nel cloruro di calcio, dove il polimero aiuta il rigonfiamento del materiale seppur in maniera meno evidente rispetto alla DW. Di seguito verranno riportate in maniera specifica le prove di rigonfiamento eseguite per ogni tipo di miscela in entrambe le soluzioni (acqua distillata e cloruro di calcio).

- GCL1 non additivato in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

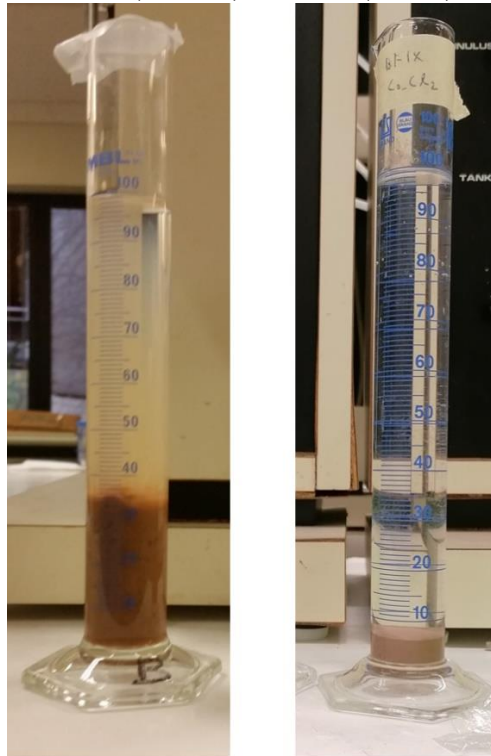


Figura 43: Rigonfiamento libero GCL1 non additivato in DW (a sinistra) e CaCl₂ (a destra).

- GCL1 + 5% PA (DM) in DW (sinistra) ed in CaCl₂ (destra).

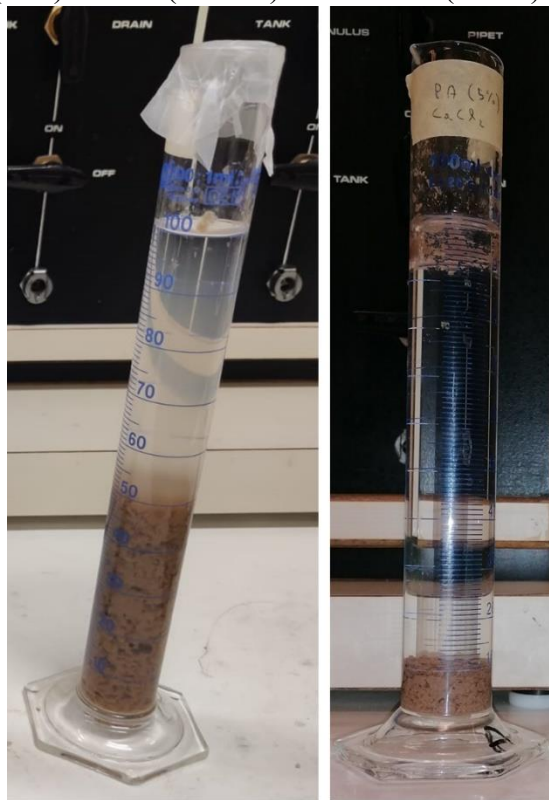


Figura 44: Rigonfiamento libero GCL1 + 5% PA (DM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

- GCL1 + 5% PA (WM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

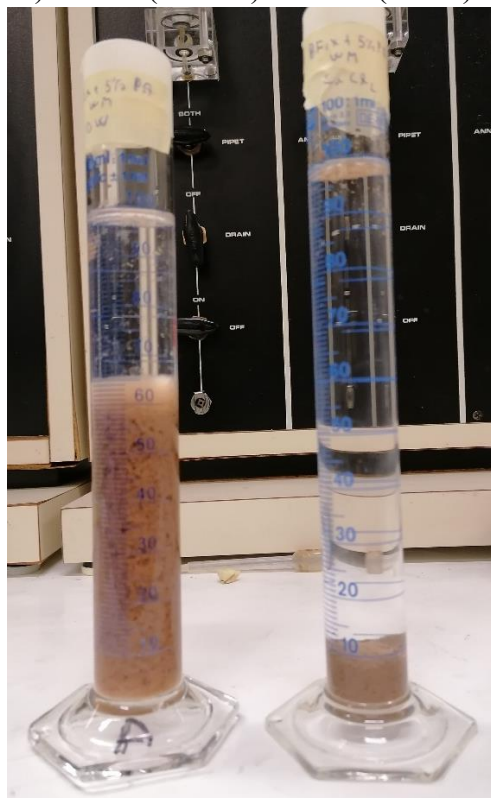


Figura 45: Rigonfiamento libero GCL1 + 5% PA (WM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

- GCL1 + 10% PA (DM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

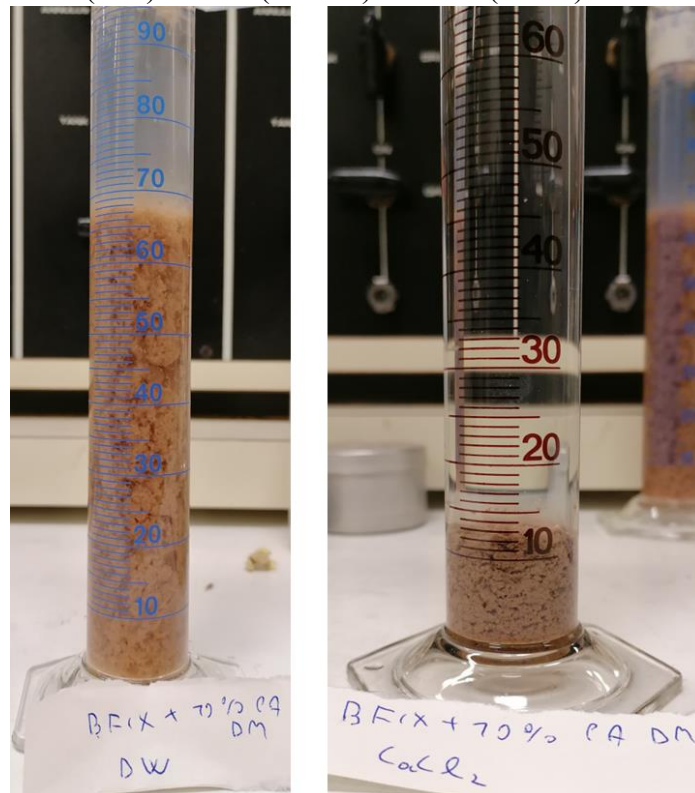


Figura 46: Rigonfiamento libero GCL1 + 10% PA (DM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

- GCL 2 non additivato in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

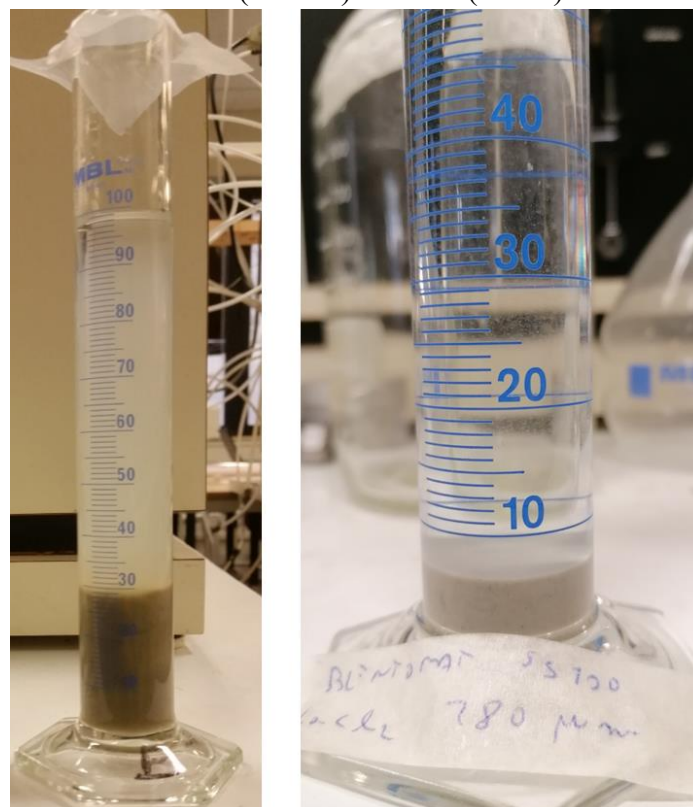


Figura 47: Rigonfiamento libero GCL2 non additivato in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

- GCL2 + 5% PA (DM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

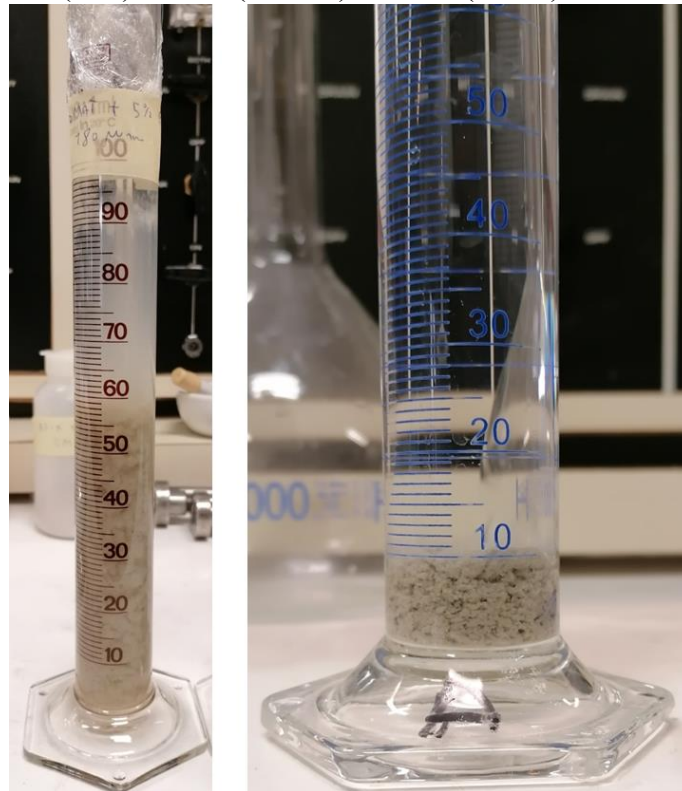


Figura 48: Rigonfiamento libero GCL2 + 5% PA (DM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

- GCL2 + 5% PAx (DM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

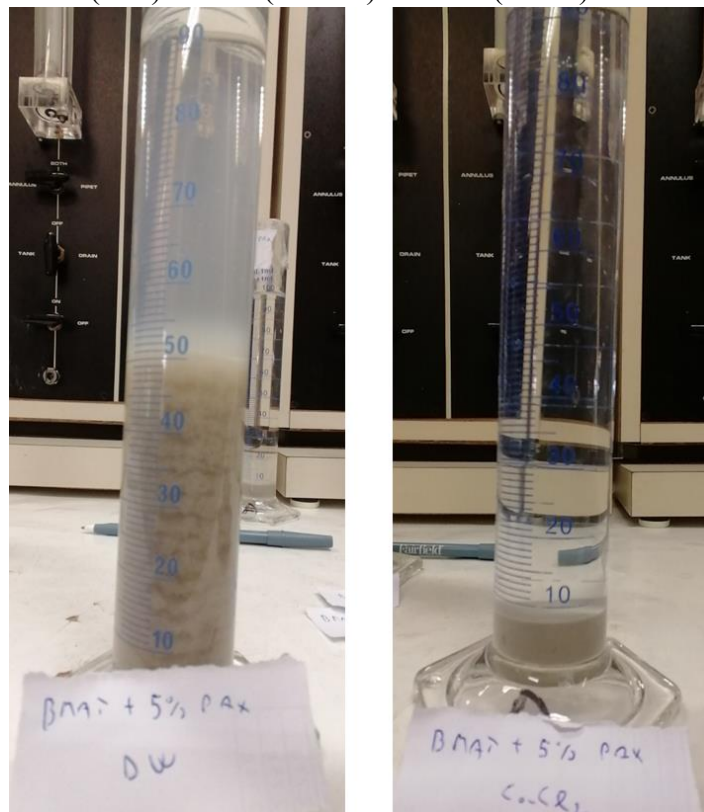


Figura 49: Rigonfiamento libero GCL2 + 5% PAx (DM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

- GCL2 + 5% CMC (DM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

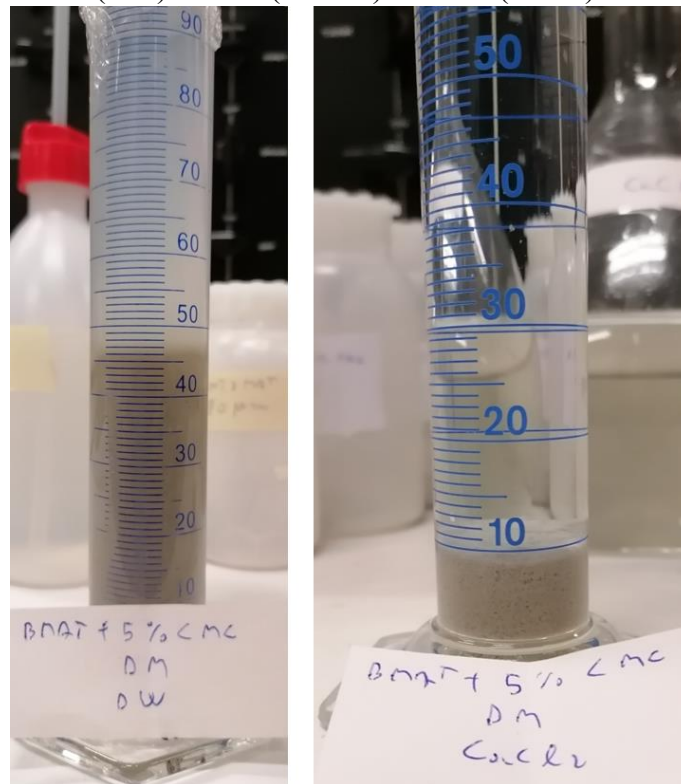


Figura 50: Rigonfiamento libero GCL2 + 5% CMC (DM) in DW (sinistra) e CaCl₂ (destra).

4.2 Aerometria

L'aerometria è stata svolta su entrambe le tipologie di bentonite per avere una stima delle differenze che ci sono tra i due materiali. La prova è ancora in corso, i risultati parziali sono riportati di seguito.

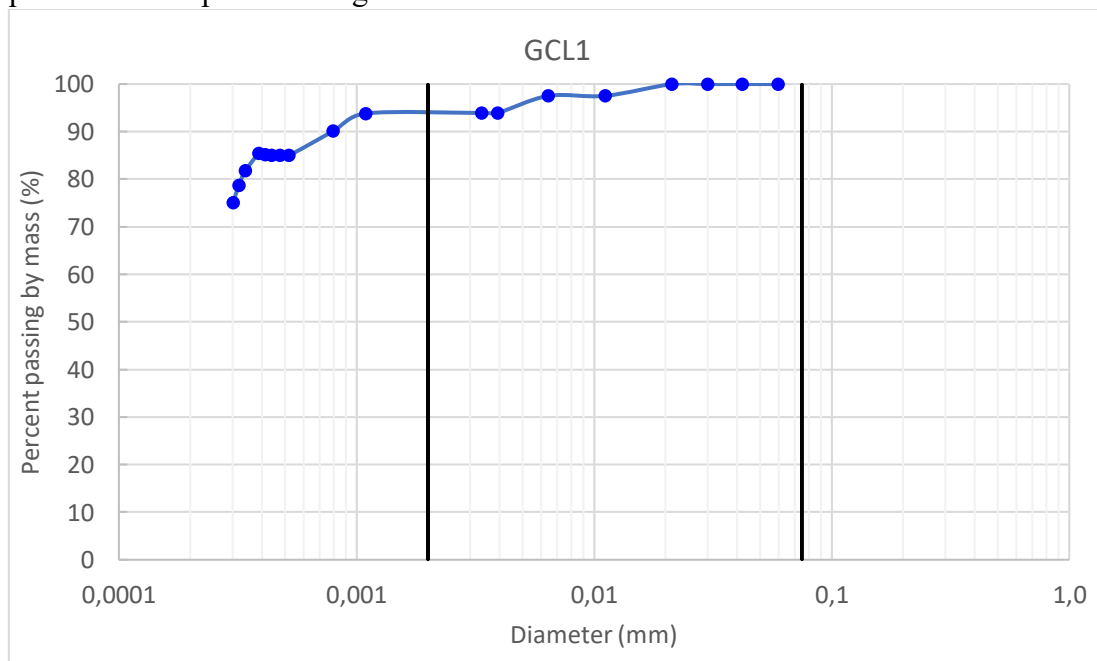


Figura 51: Aerometria GCL1

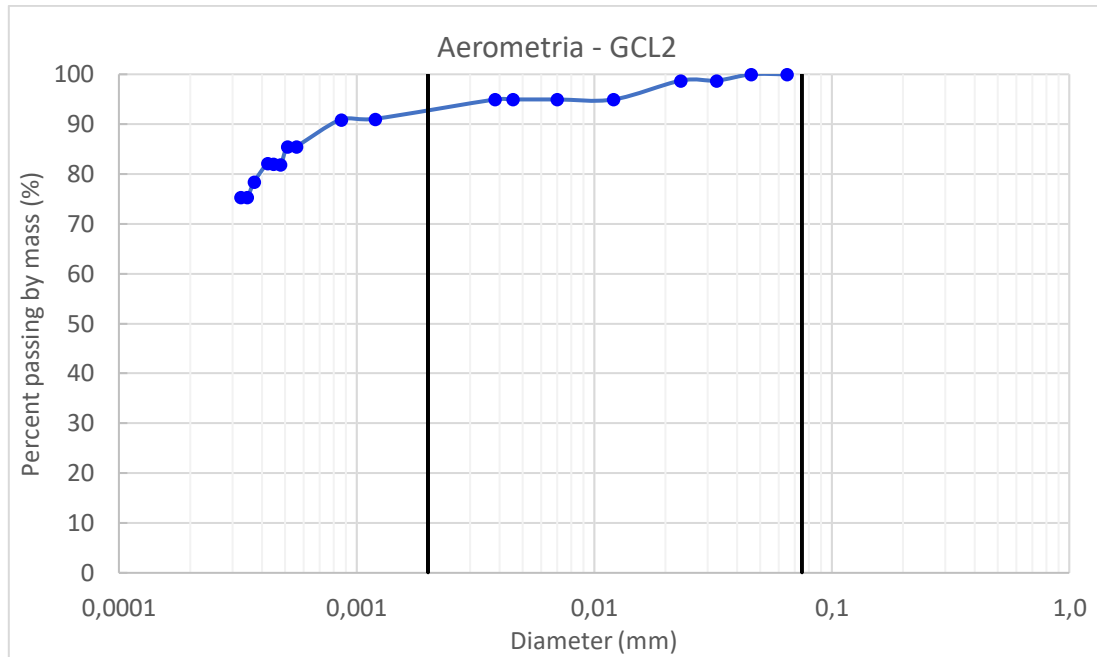


Figura 52: Aerometria GCL2

4.3 Idratazione e rigonfiamento a pressione costante in edometro

La prova di rigonfiamento vincolato (o “idratazione”) in edometro a pressione costante è stata svolta solo sui campioni ricostruiti, di seguito viene riportata la Tabella 34 con le variazioni di altezza e peso dei campioni che sono stati sottoposti a questa prova.

Tabella 35: Variazioni di altezza e peso nella prova edometrica

Variazioni di altezza e peso prova edometrica								
Campione	Polimero	Liq. edometro	H ₁	H ₂	ΔH	P ₁	P ₂	ΔP
[-]	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[g]	[g]	[g]
GCL1.1	Non additivato	DW	0,70	0,92	0,12	36,36	81,35	44,99
GCL1.2	Non additivato	CaCl ₂	0,60	0,60	0,00	36,36	63,65	27,29
GCL1.3	5% PA (DM)	DW	0,65	1,08	0,43	38,01	97,77	59,76
GCL1.4	5% PA (DM)	CaCl ₂	0,65	0,71	0,06	38,01	71,00	32,99
GCL1.5	10% PA (DM)	CaCl ₂	0,70	0,76	0,06	39,60	80,30	40,40
GCL1.6	5% PA (WM)	DW	0,65	1,17	0,52	35,60	116,38	80,78
GCL1.7	5% PA (WM)	CaCl ₂	0,60	0,67	0,07	35,60	69,42	33,82
GCL2.3	Non additivato	DW	0,70	1,07	0,37	46,33	119,16	72,83
GCL2.4	Non additivato	CaCl ₂	0,84	0,84	0,00	46,33	93,41	47,08
GCL2.5	5% PA (DM)	DW	0,70	1,31	0,61	48,53	145,64	97,11
GCL2.6	5% PA (DM)	CaCl ₂	0,84	0,87	0,03	48,53	95,80	47,27
GCL2.7	5% PAx (DM)	DW	0,70	1,17	0,47	48,53	131,66	83,13
GCL2.8	5% PAx (DM)	DW	0,75	1,27	0,52	48,53	135,40	86,87
GCL2.9	5% PAx (DM)	CaCl ₂	0,70	0,71	0,01	48,53	87,11	38,58
GCL2.10	5% CMC (DM)	DW	0,80	1,30	0,50	48,53	132,84	84,31
GCL2.11	5% CMC (DM)	CaCl ₂	0,80	0,84	0,04	48,53	94,27	45,74

Nota: $\Delta H = H_2 - H_1$; $\Delta P = P_2 - P_1$; H₁ = altezza iniziale del campione stimata partendo dall'altezza finale misurata; H₂ = altezza finale del campione; P₁ = Peso iniziale del campione; P₂ = Peso finale del campione.

Dalla Tabella 35 si nota subito che la presenza di Ca²⁺ nel liquido di idratazione inibisce il rigonfiamento della bentonite e che l'aggiunta di un polimero aiuti un

rigonfiamento del materiale sia in acqua distillata che in CaCl₂. Inoltre, si nota anche una differenza di comportamento delle due bentoniti utilizzate (GCL1 e GCL2); in cui la seconda presenta un rigonfiamento maggiore alla prima sia in acqua distillata che in CaCl₂, ovviamente anche qui l'aggiunta di polimero aiuta molto in termini di rigonfiamento del materiale in uso.

Di seguito verranno riportati i risultati che riguardano il rigonfiamento in edometro, i grafici utilizzati sono tre: il primo mette in relazione la variazione dell'altezza del campione con il tempo; il secondo considera la sola fase di rigonfiamento del campione in relazione al tempo; il terzo mette in relazione la variazione dell'altezza del campione con il tempo trascorso su scala logaritmica. I campioni posti in edometro sono i seguenti:

- GCL1.1 bentonite non additivata in DW.

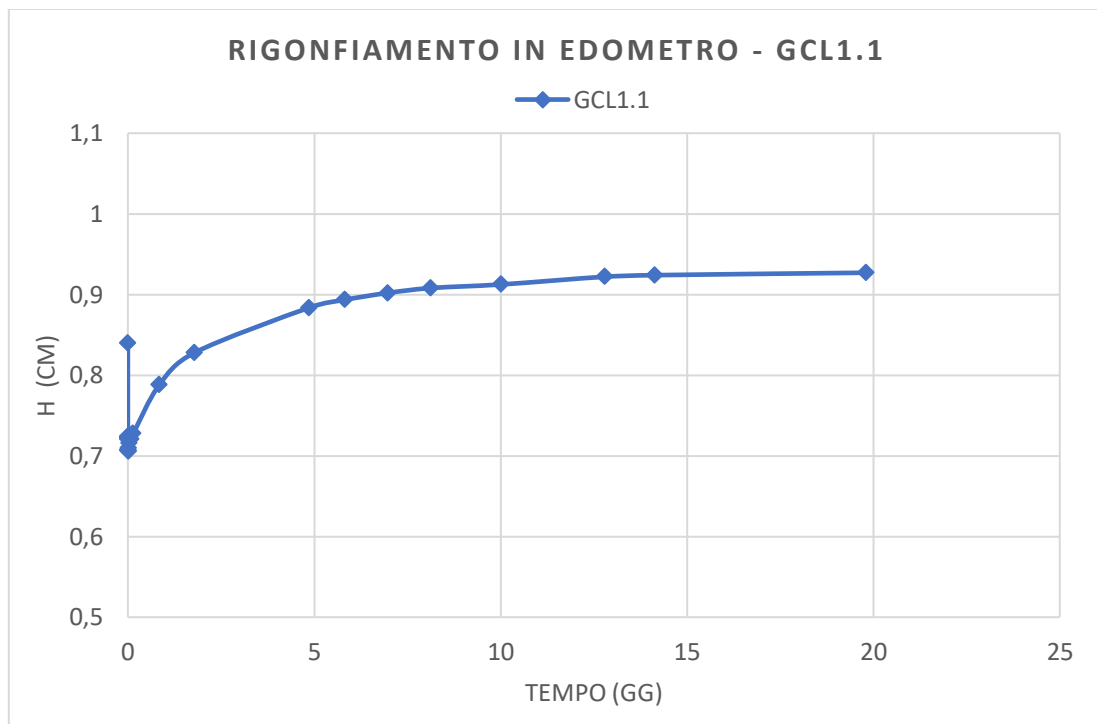


Figura 53: Rigonfiamento in edometro GCL1.1 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

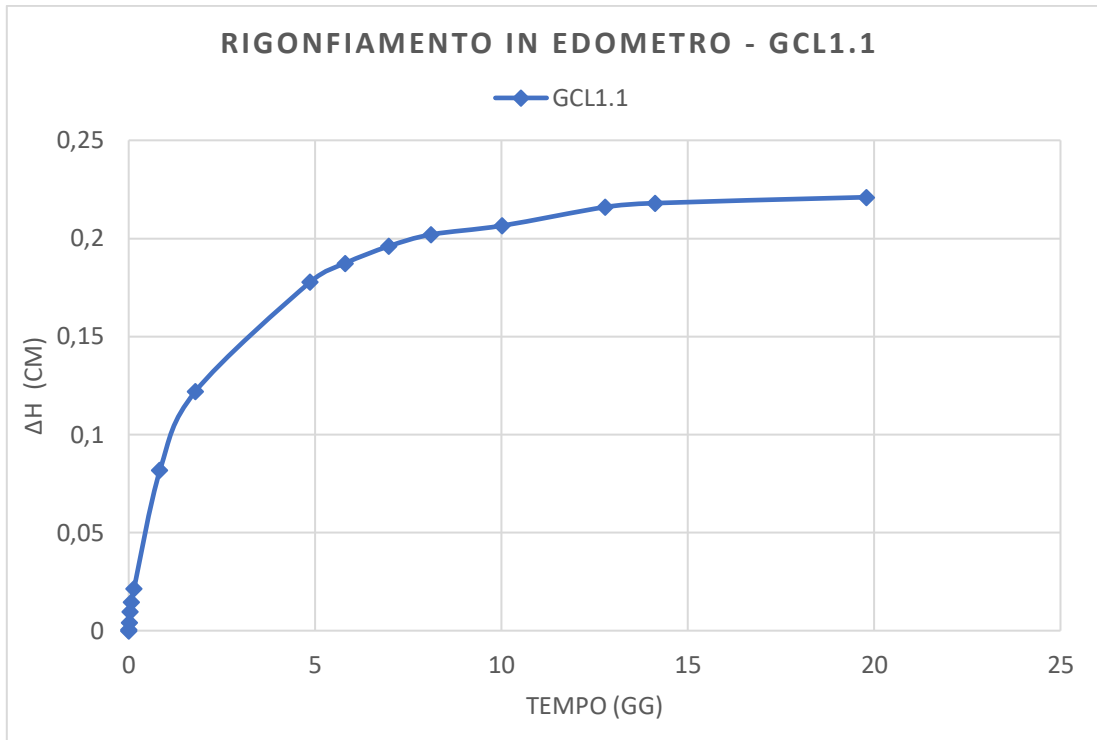


Figura 54: Rigonfiamento in edometro GCL1.1 in DW, rigonfiamento del campione nel tempo.

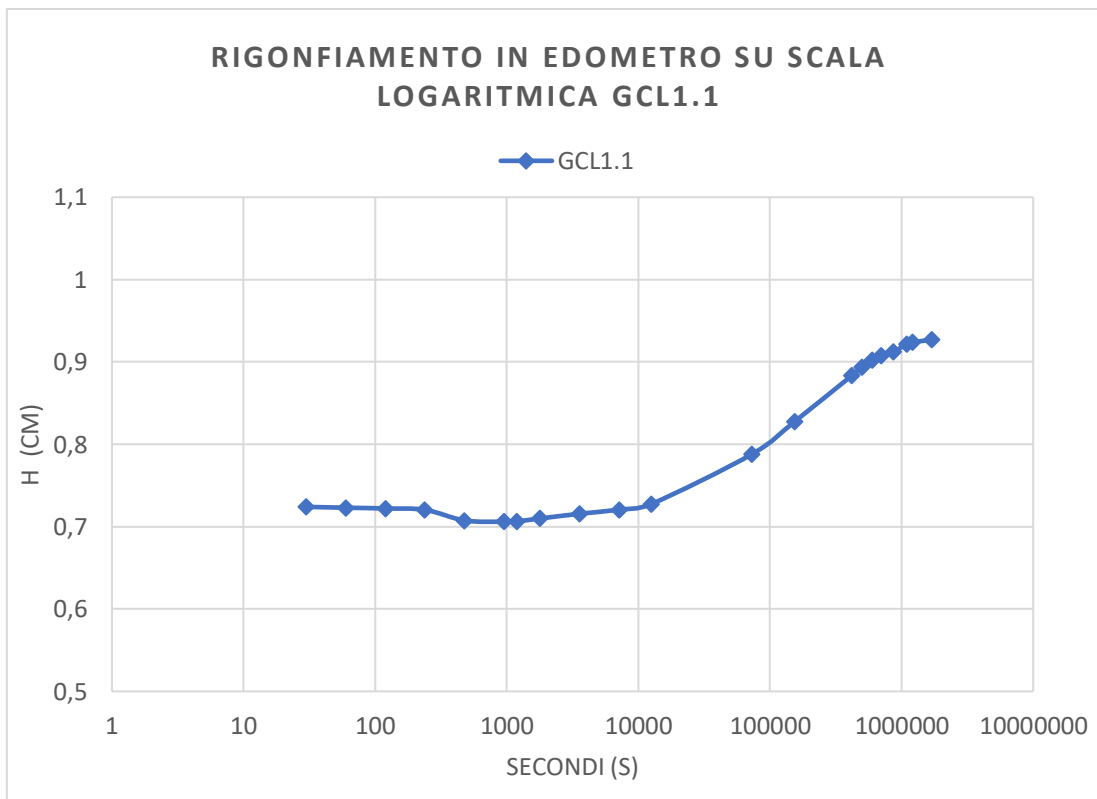


Figura 55: Rigonfiamento in edometro GCL1.1 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL1.2 bentonite naturale in CaCl₂.

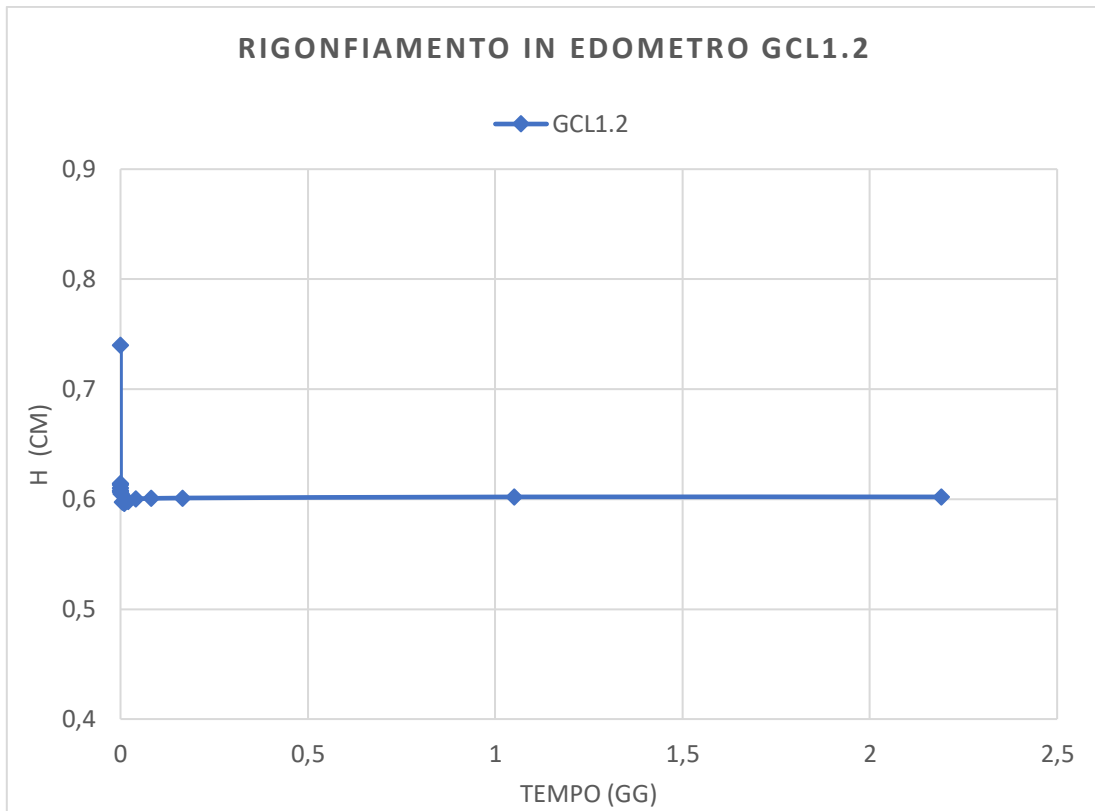


Figura 56: Rigonfiamento in edometro GCL1.2 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

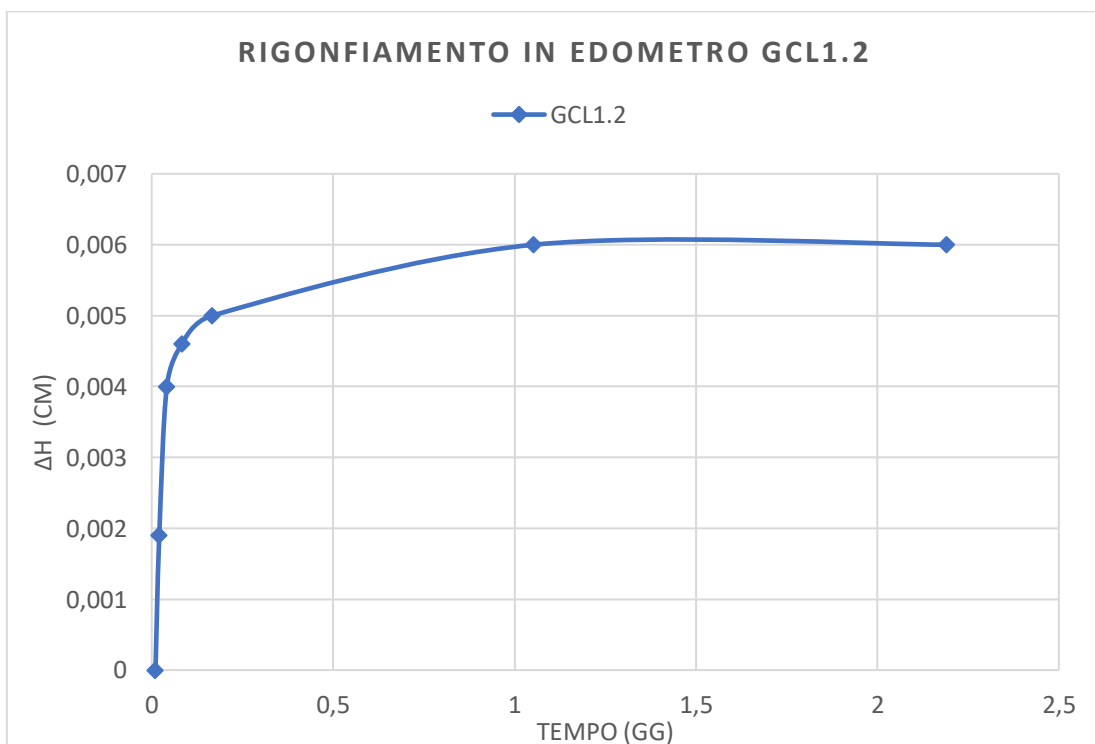


Figura 57: Rigonfiamento in edometro GCL1.2 in CaCl₂, rigonfiamento del campione nel tempo.

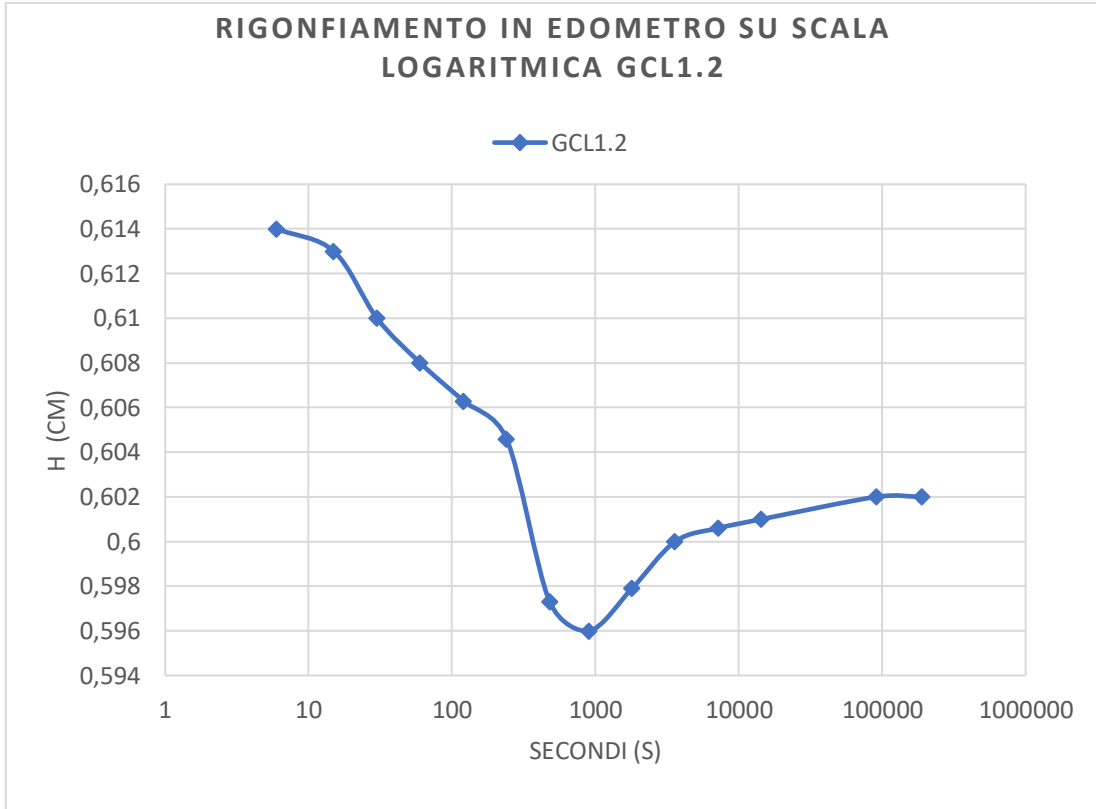


Figura 58: Rigonfiamento in edometro GCL1.2 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL1.3 + 5% PA (DM) in DW.

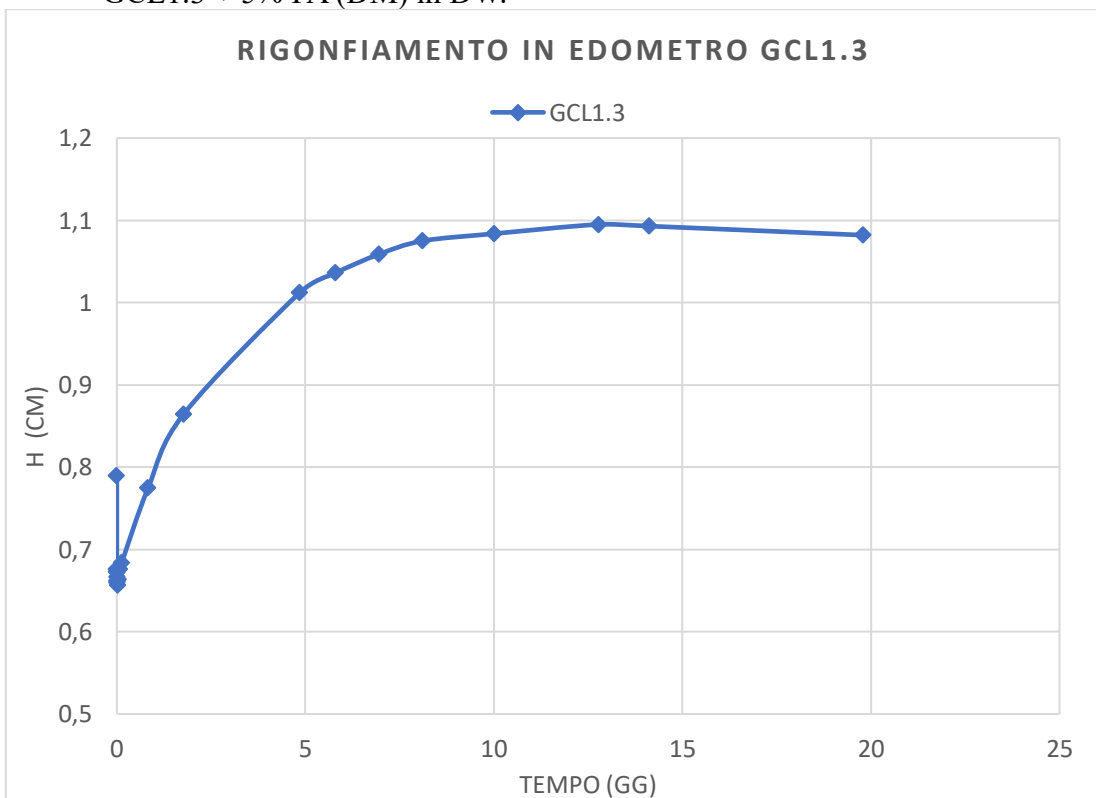


Figura 59: Rigonfiamento in edometro GCL1.3 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

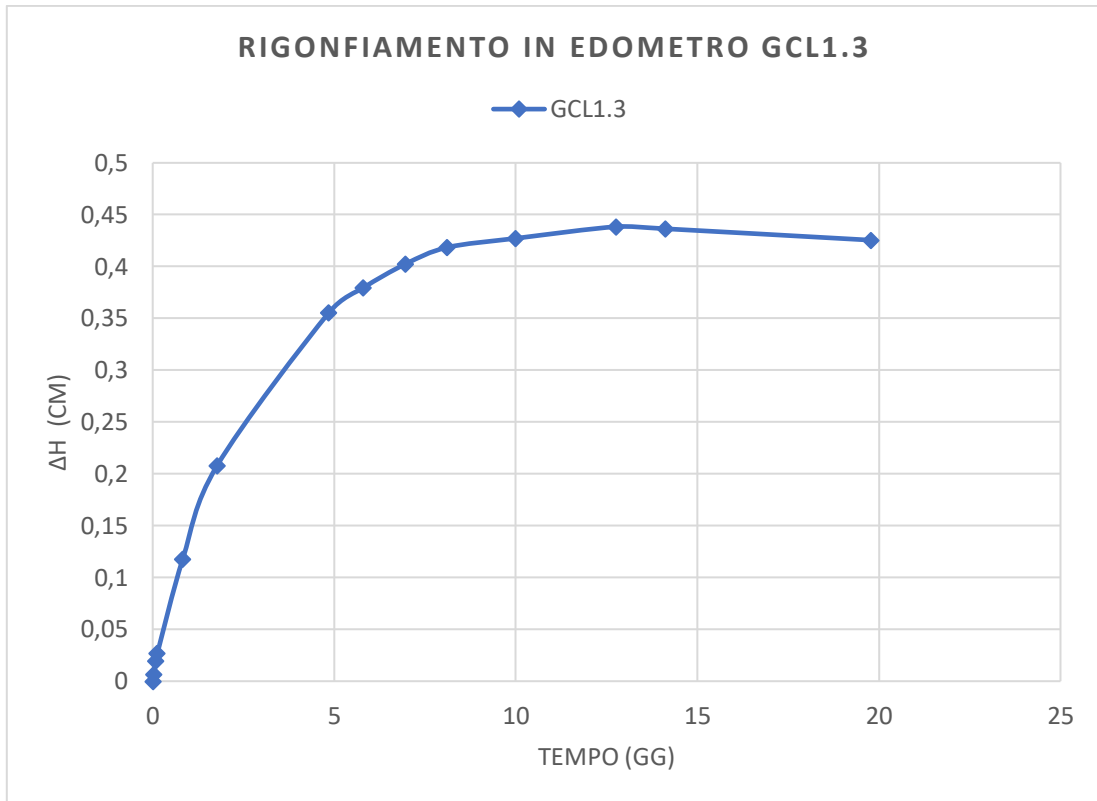


Figura 60: Rigonfiamento in edometro GCL1.3 in DW, rigonfiamento del campione nel tempo.

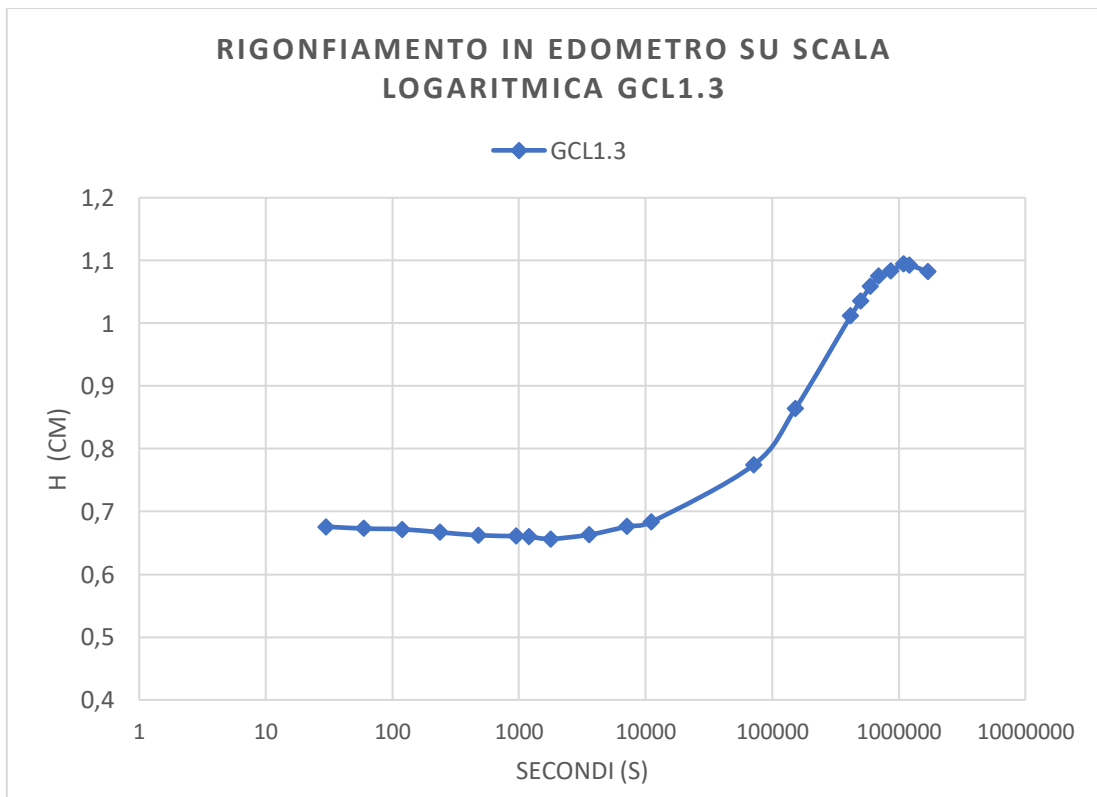


Figura 61: Rigonfiamento in edometro GCL1.3 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL1.4 + 5% PA (DM) in CaCl_2 .

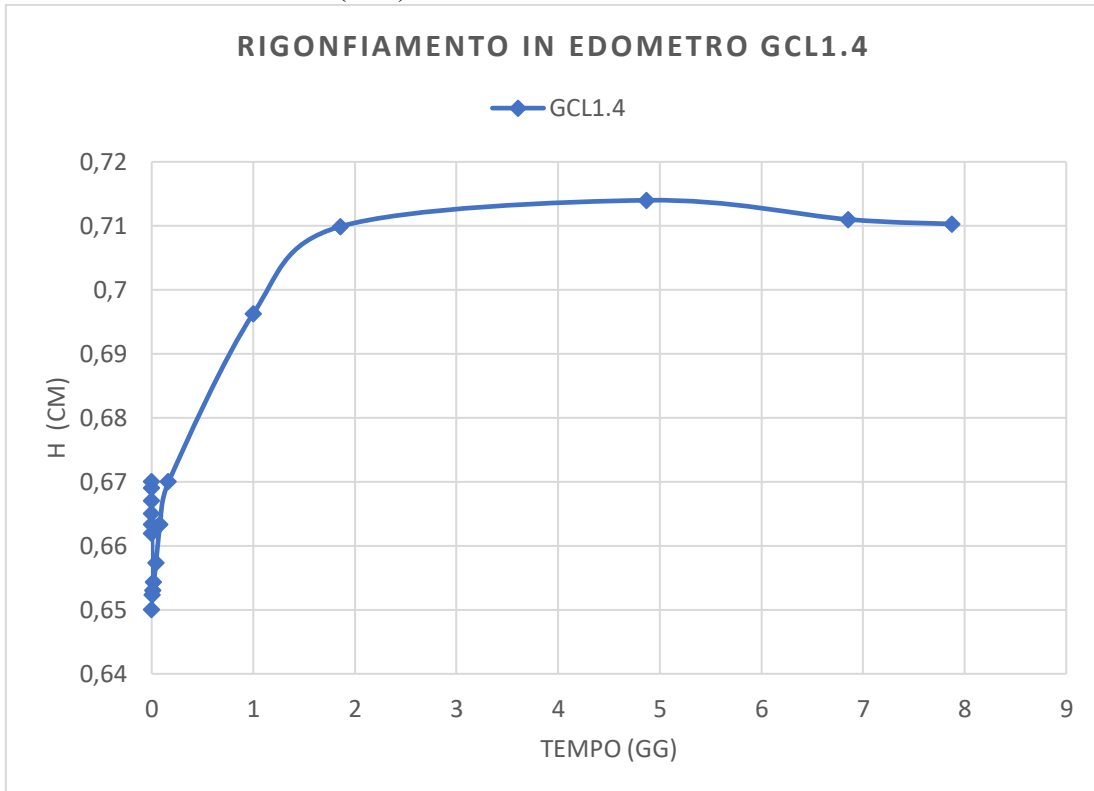


Figure 62: Rigonfiamento in edometro GCL1.4 in CaCl_2 , variazione dell'altezza del campione nel tempo.

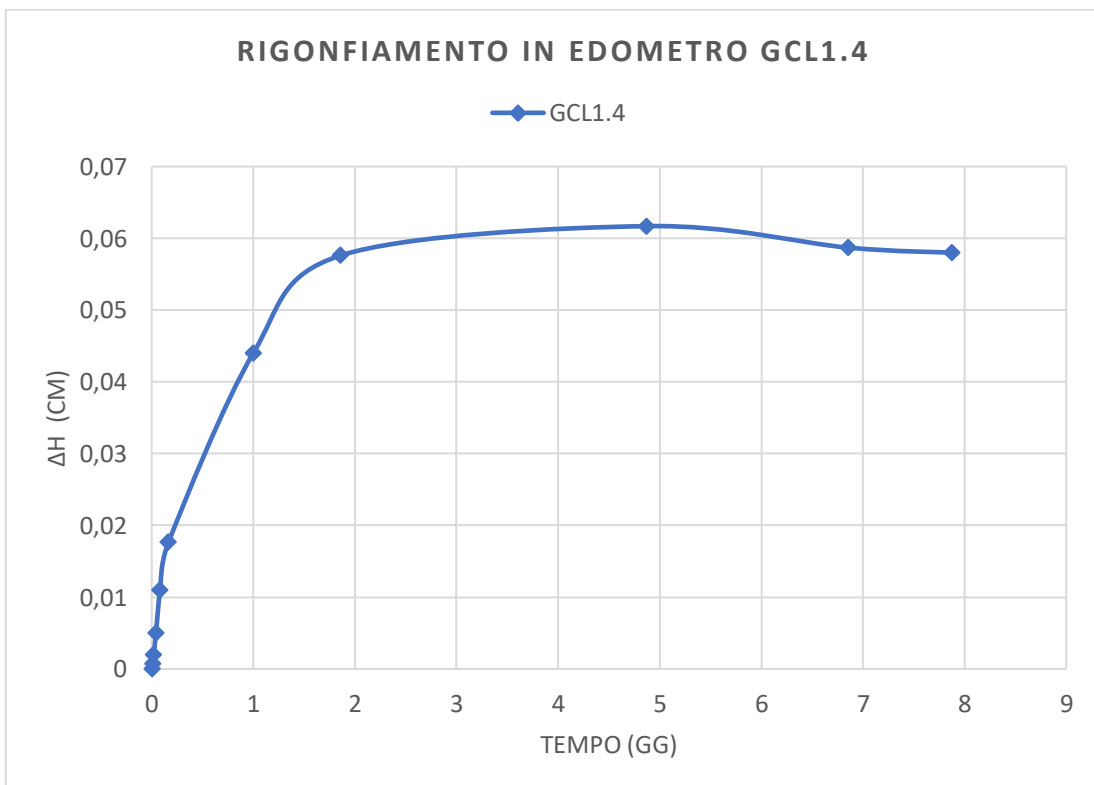


Figure 63: Rigonfiamento in edometro GCL1.4 in CaCl_2 , rigonfiamento del campione nel tempo.

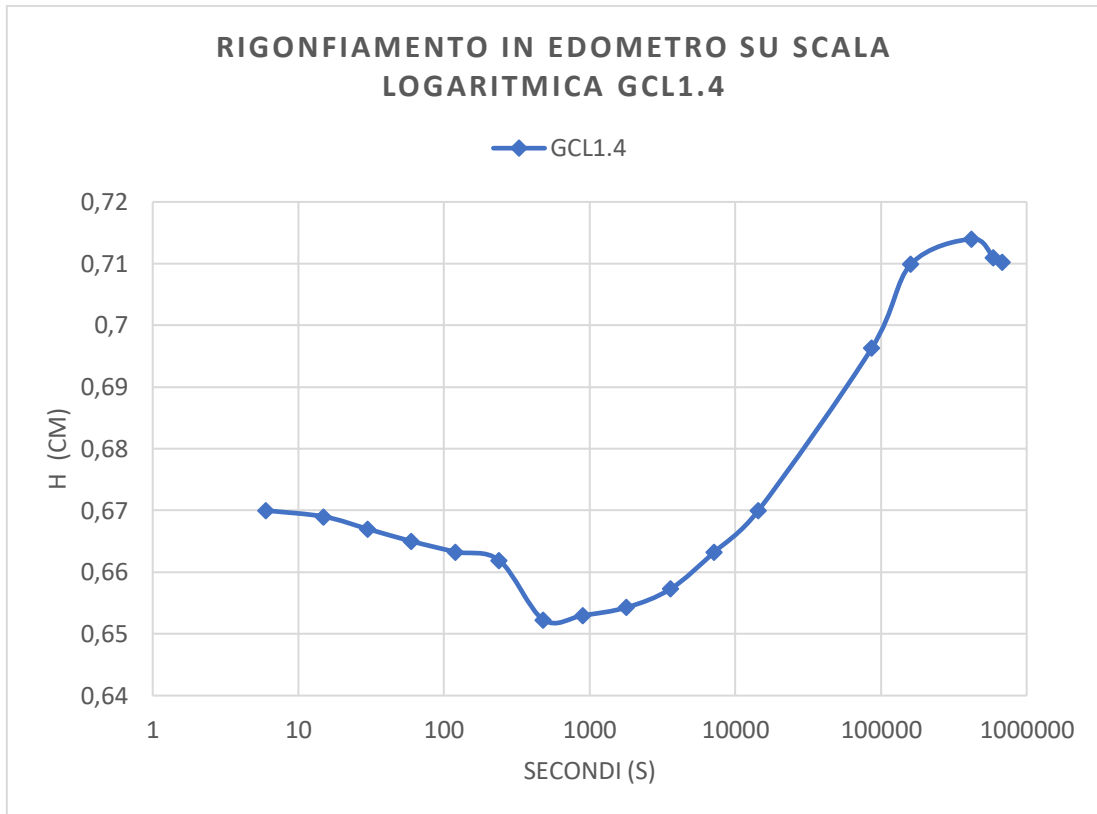


Figure 64: Rigonfiamento in edometro GCL1.4 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL1.5 + 10% PA (DM) in CaCl₂.

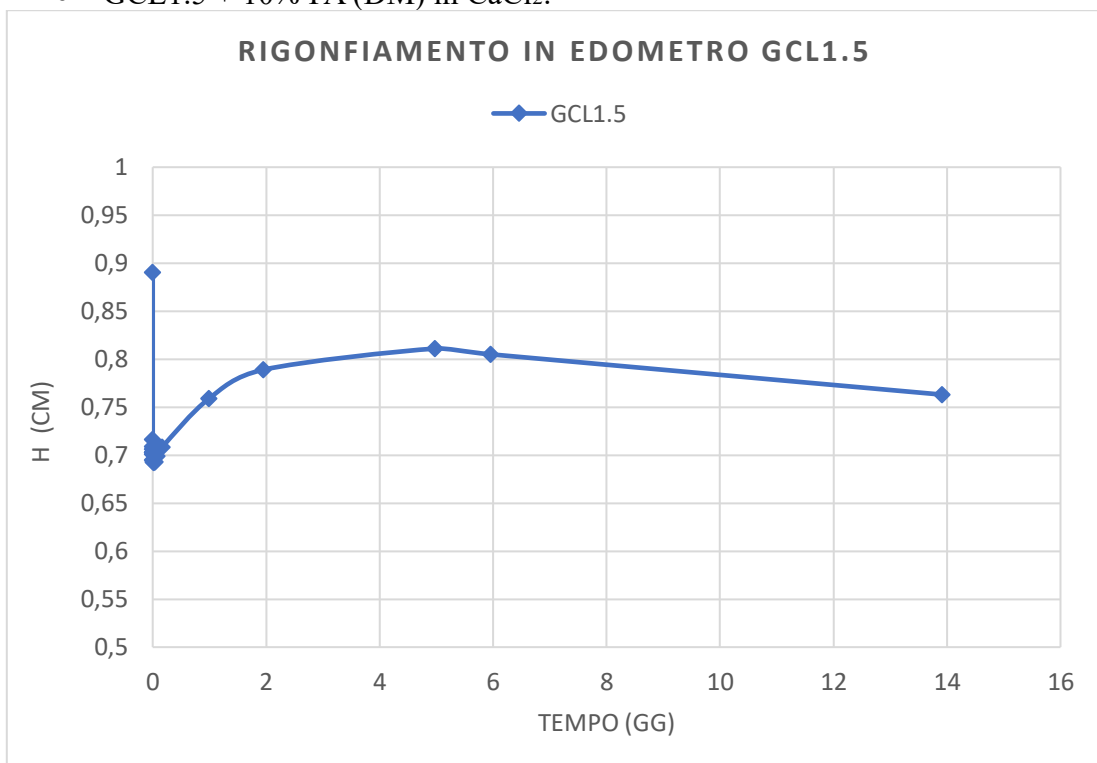


Figure 65: Rigonfiamento in edometro GCL1.5 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

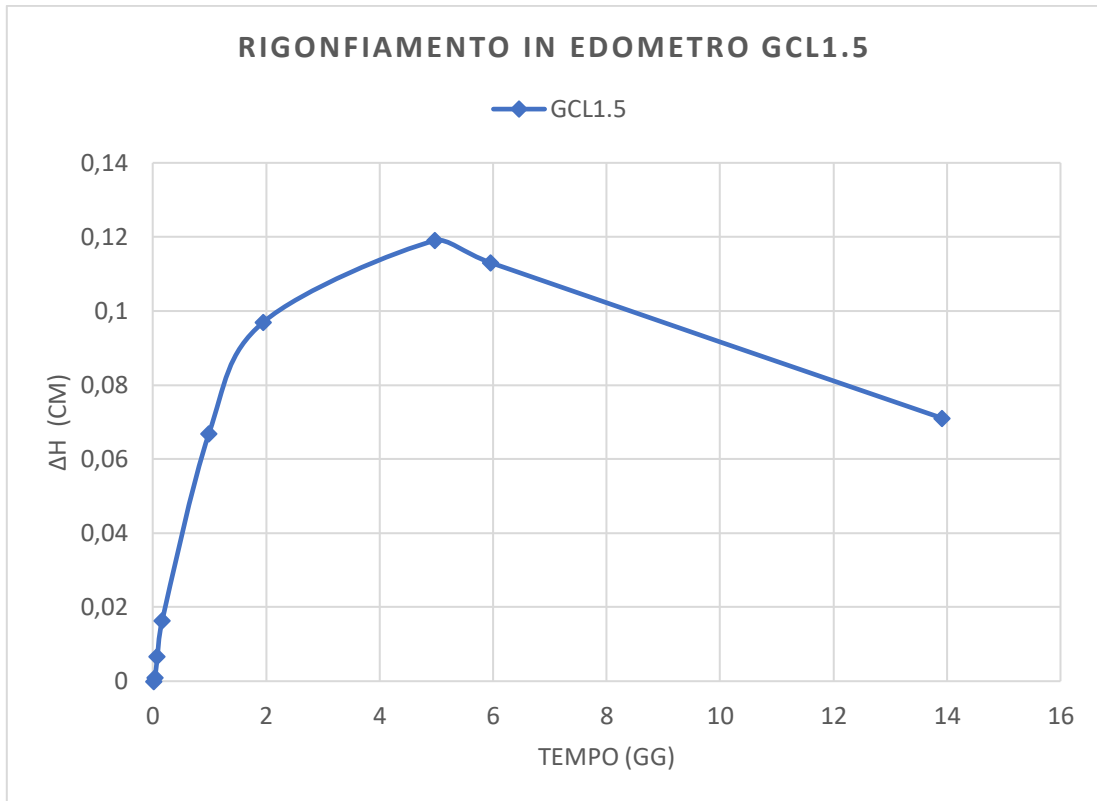


Figure 66: Rigonfiamento in edometro GCL1.5 in CaCl₂, rigonfiamento del campione nel tempo.

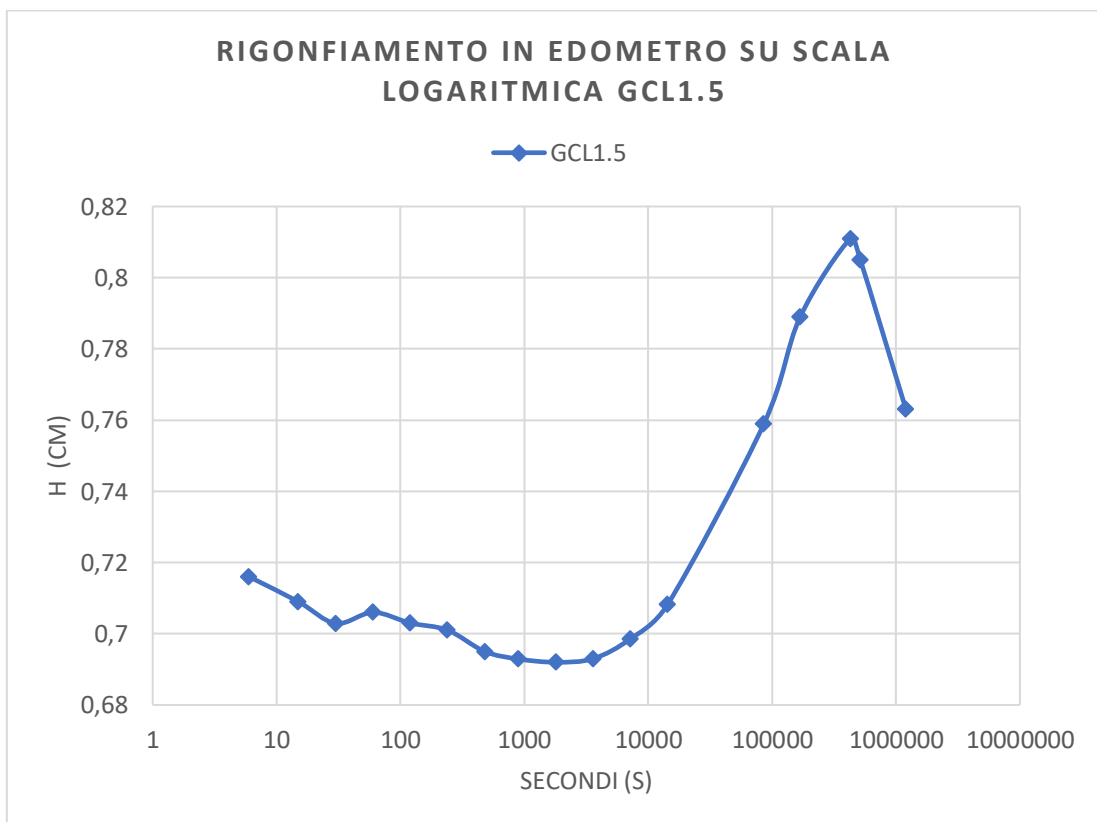


Figure 67: Rigonfiamento in edometro GCL1.5 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL1.6 + 5% PA (WM) in DW.

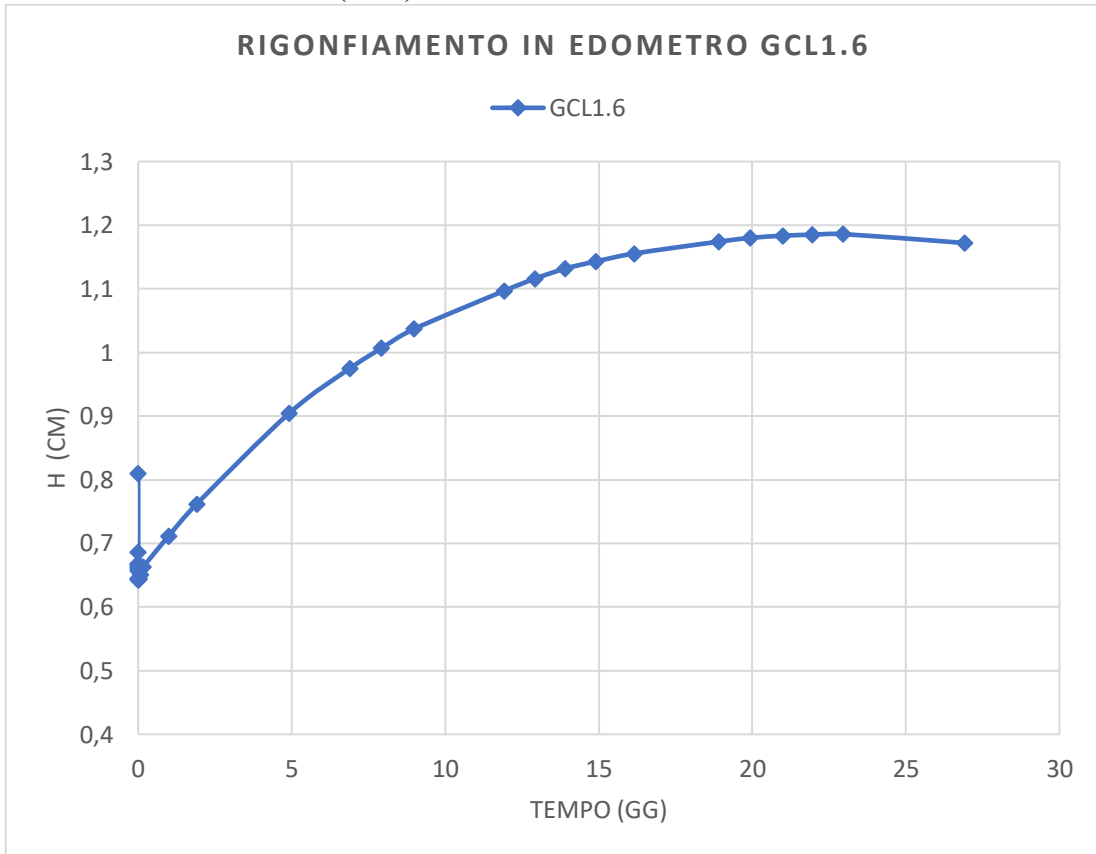


Figure 68: Rigonfiamento in edometro GCL1.6 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

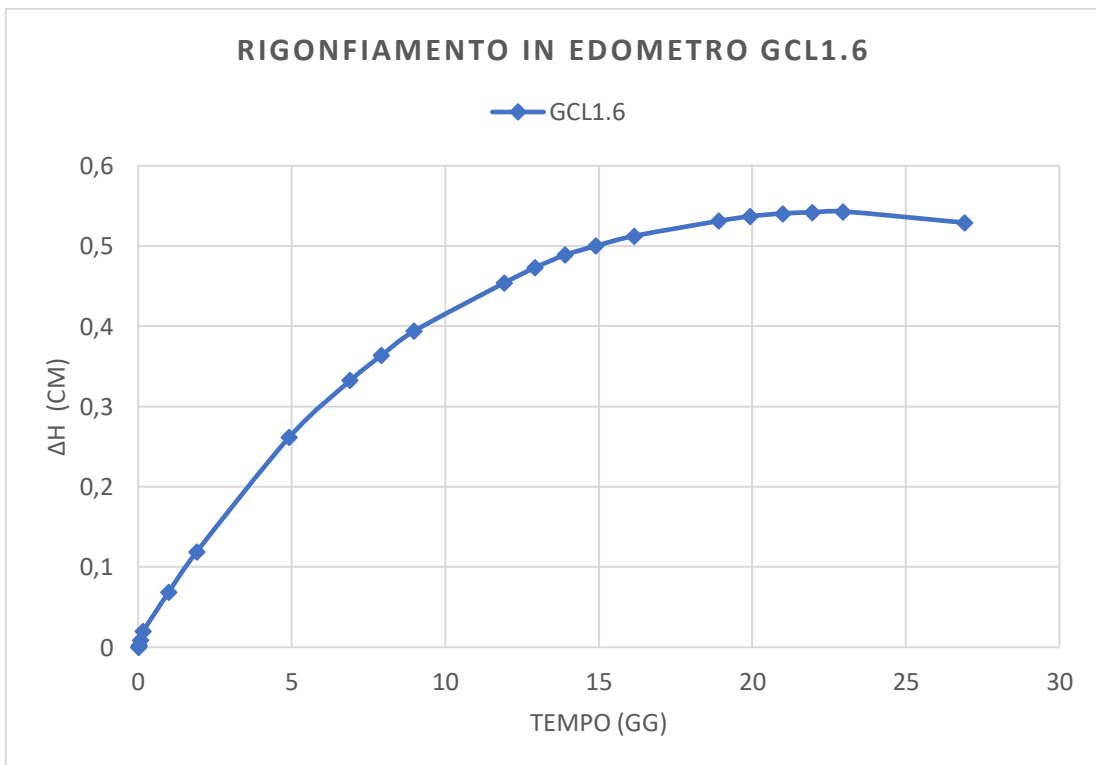


Figure 69: Rigonfiamento in edometro GCL1.6 in DW, rigonfiamento del campione nel tempo.

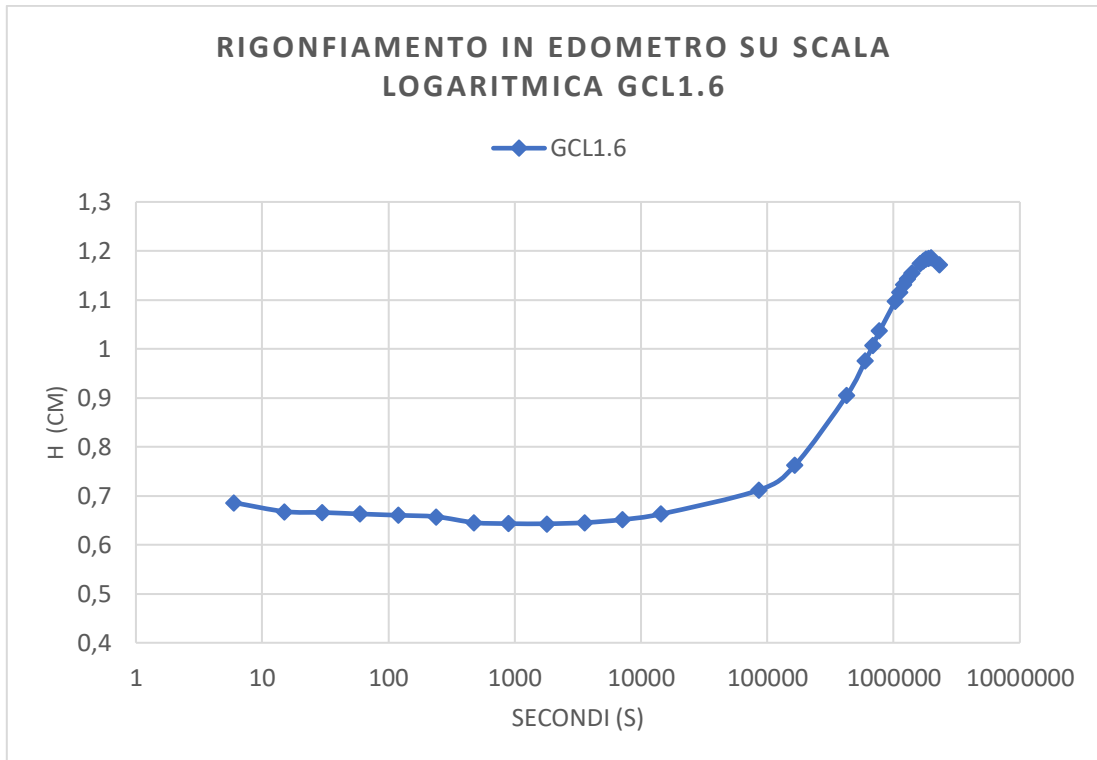


Figure 70: Rigonfiamento in edometro GCL1.6 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL1.7 + 5% PA in (WM) CaCl₂.

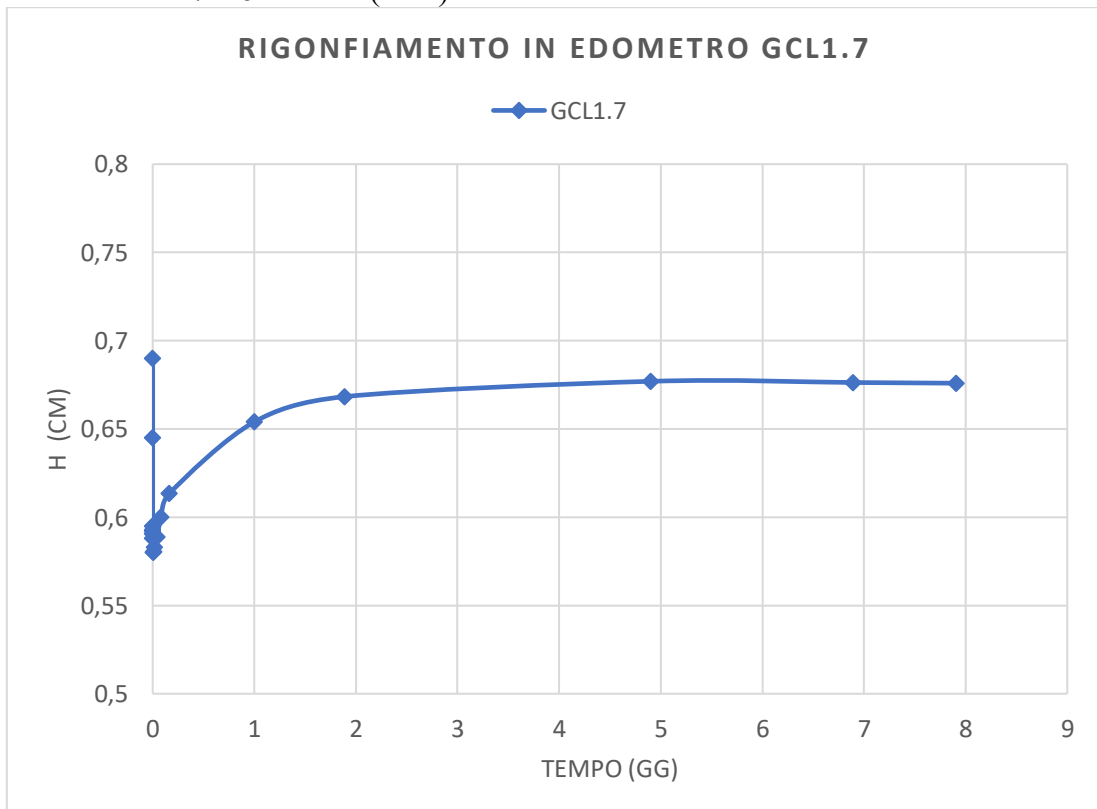


Figure 71: Rigonfiamento in edometro GCL1.7 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

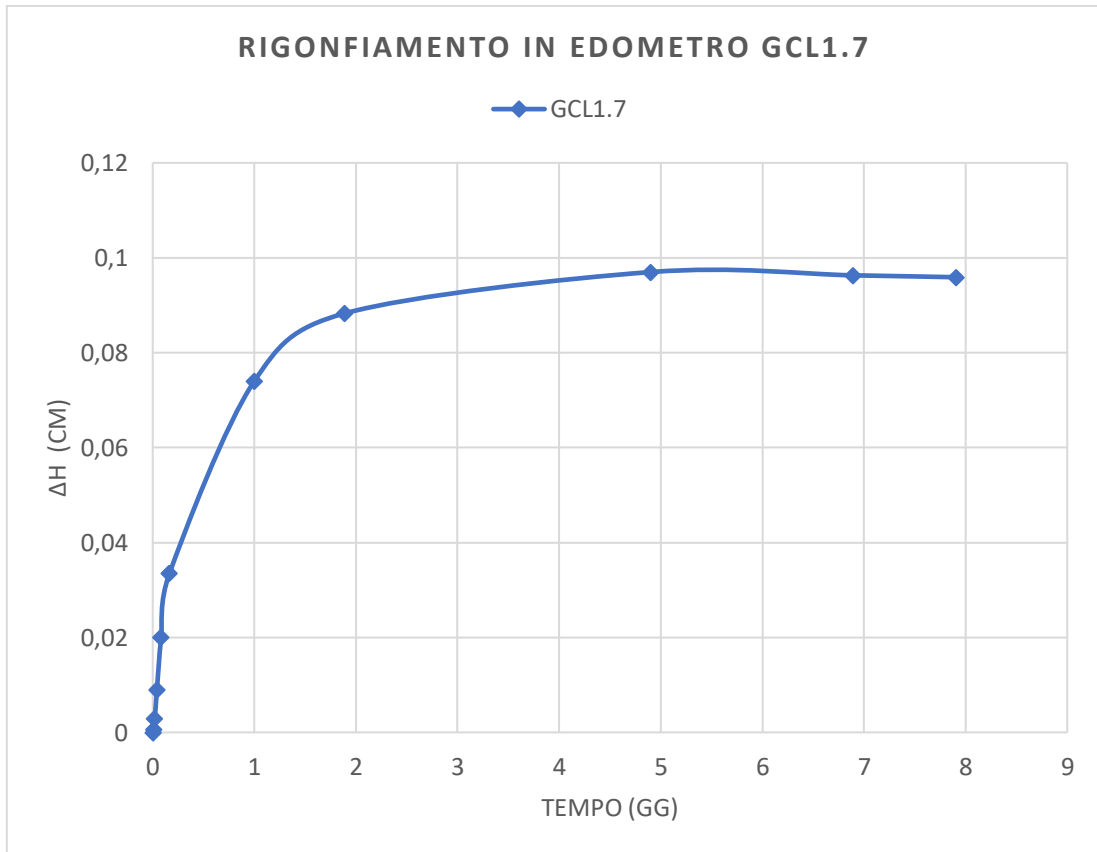


Figure 72: Rigonfiamento in edometro GCL1.7 in CaCl₂, rigonfiamento del campione nel tempo.

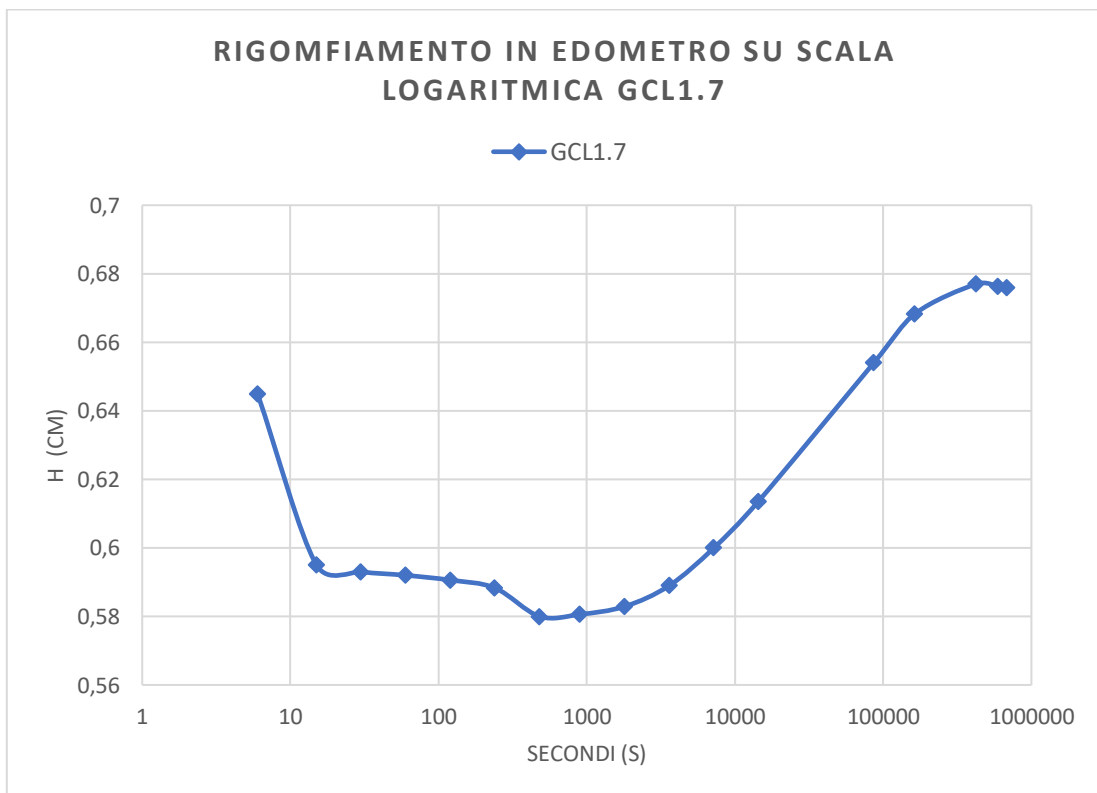


Figure 73: Rigonfiamento in edometro GCL1.7 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2.3 bentonite non additivata in DW.

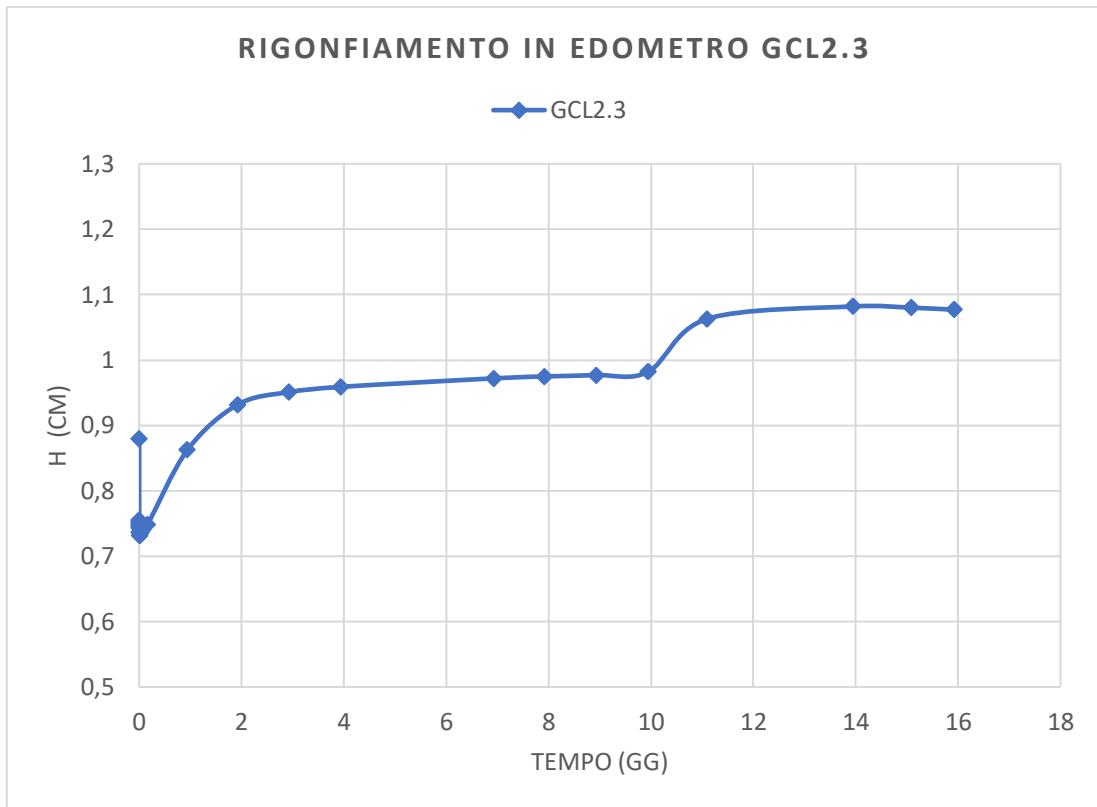


Figure 74: Rigonfiamento in edometro GCL2.3 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

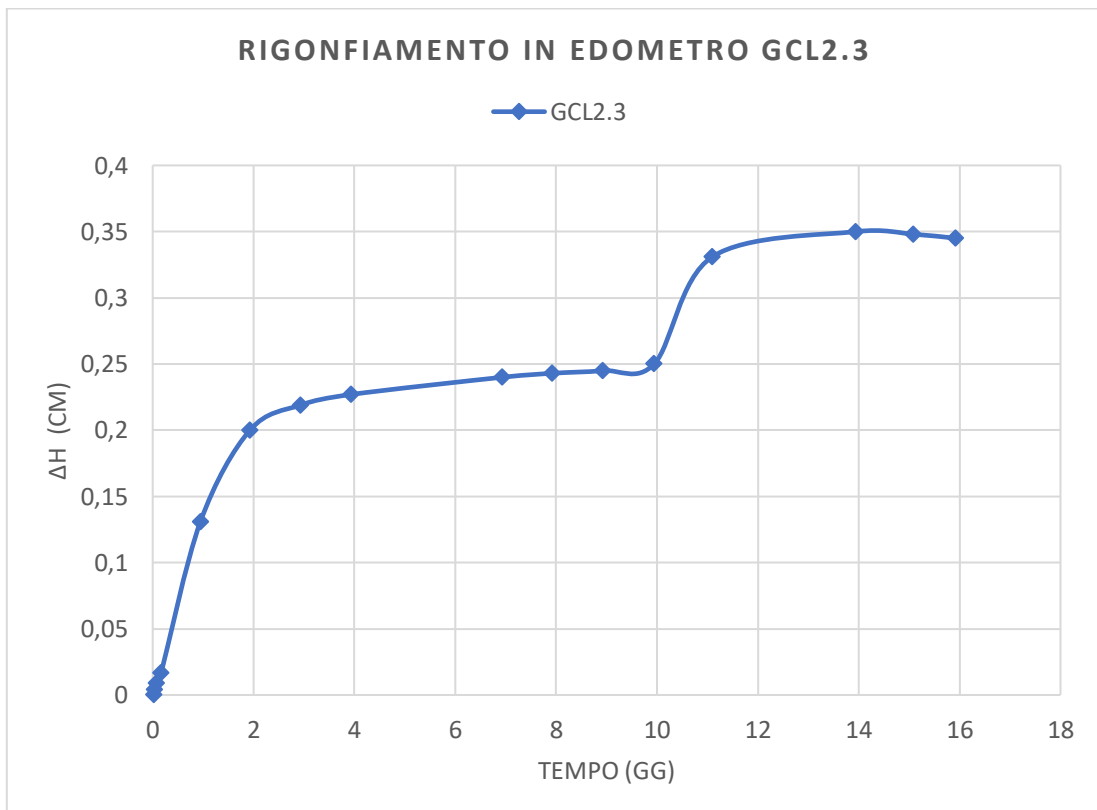


Figure 75: Rigonfiamento in edometro GCL2.3 in DW, rigonfiamento del campione nel tempo.

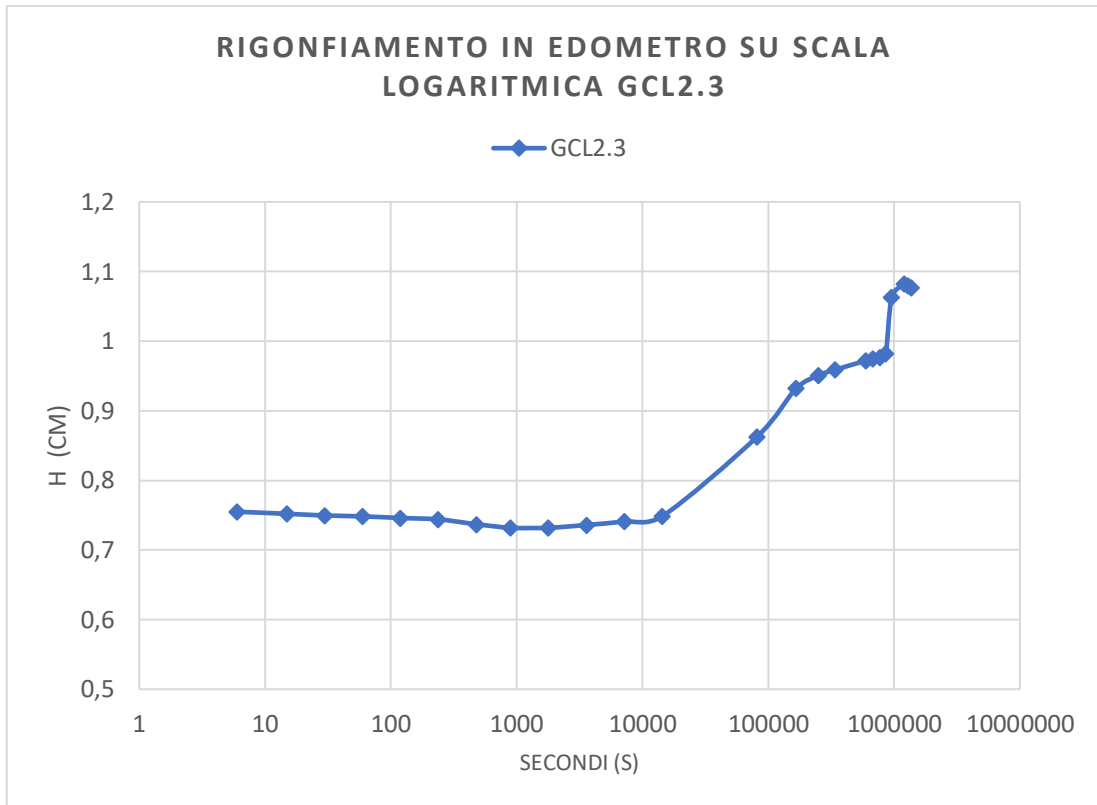


Figure 76: Rigonfiamento in edometro GCL2.3 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2.4 bentonite non additivata in CaCl₂.

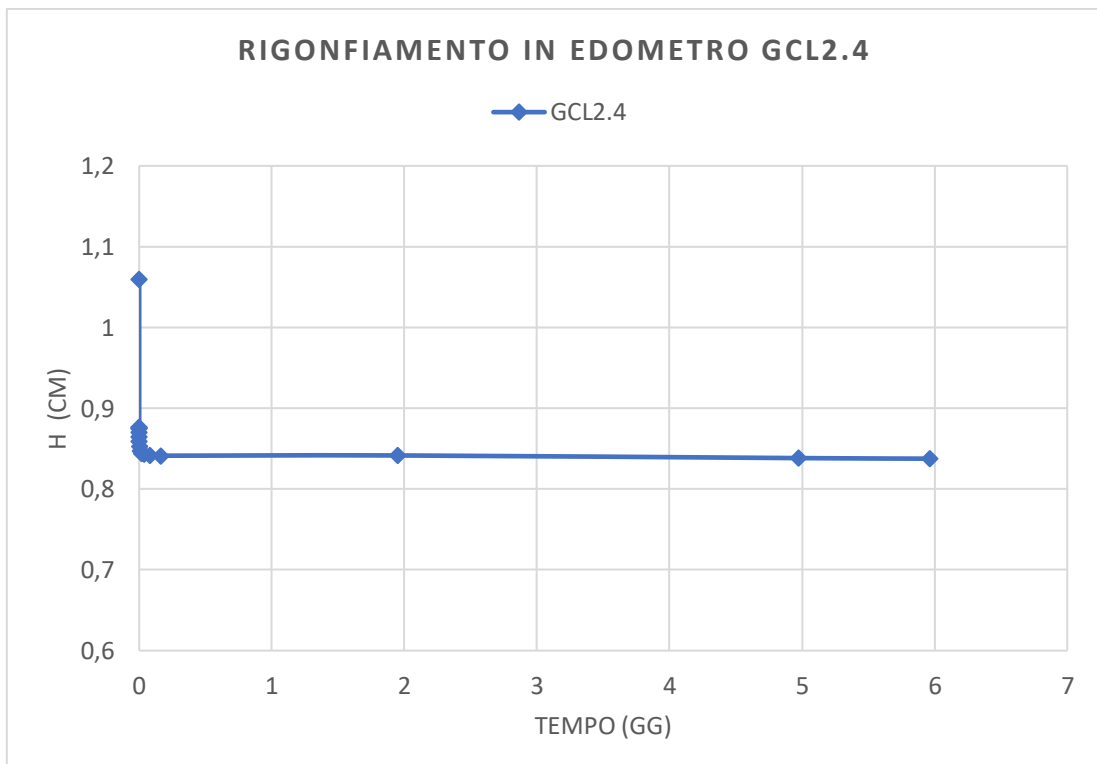


Figure 77: Rigonfiamento in edometro GCL2.4 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

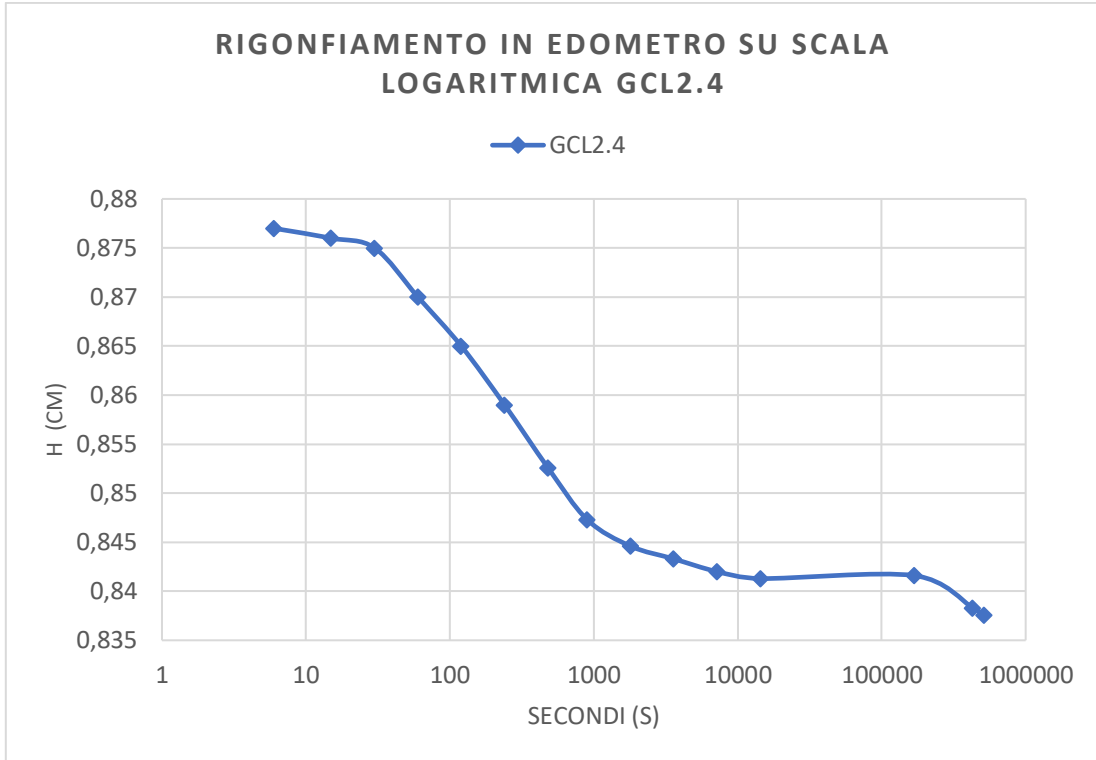


Figure 78: Rigonfiamento in edometro GCL2.4 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2.5 + 5% PA (DM) DW.

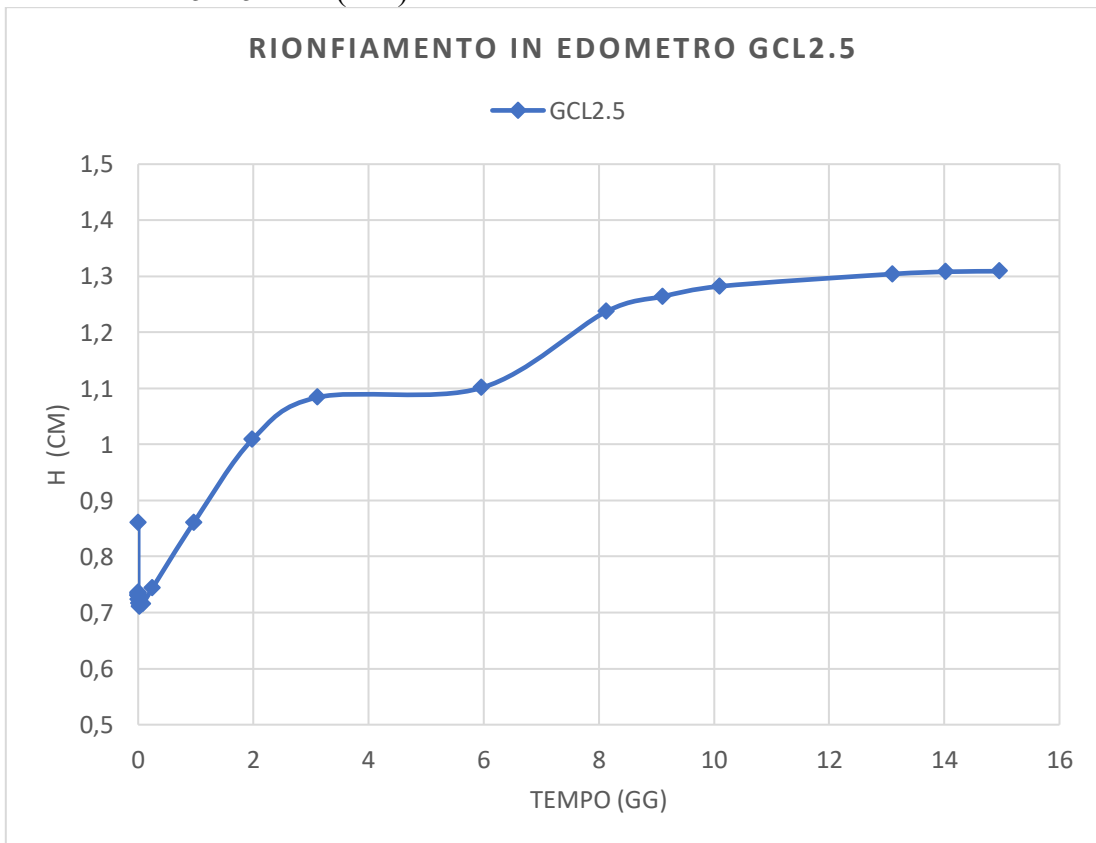


Figure 79: Rigonfiamento in edometro GCL2.5 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

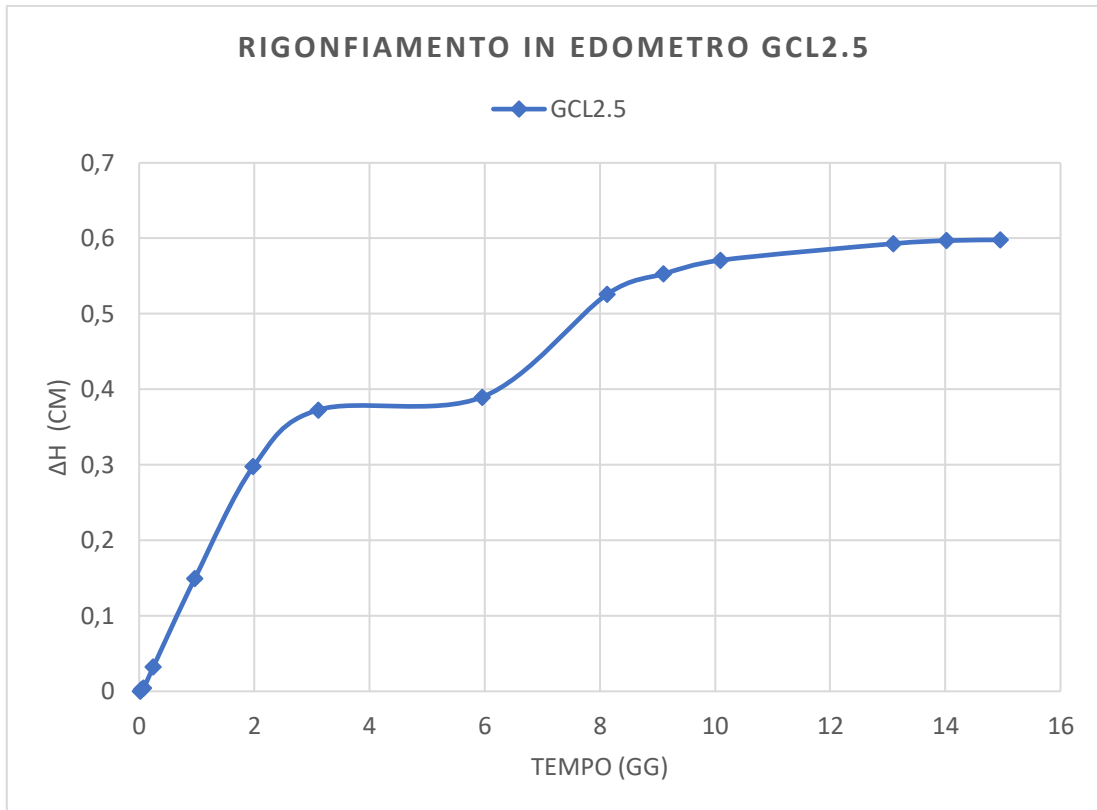


Figure 80: Rigonfiamento in edometro GCL2.5 in DW, rigonfiamento del campione nel tempo.

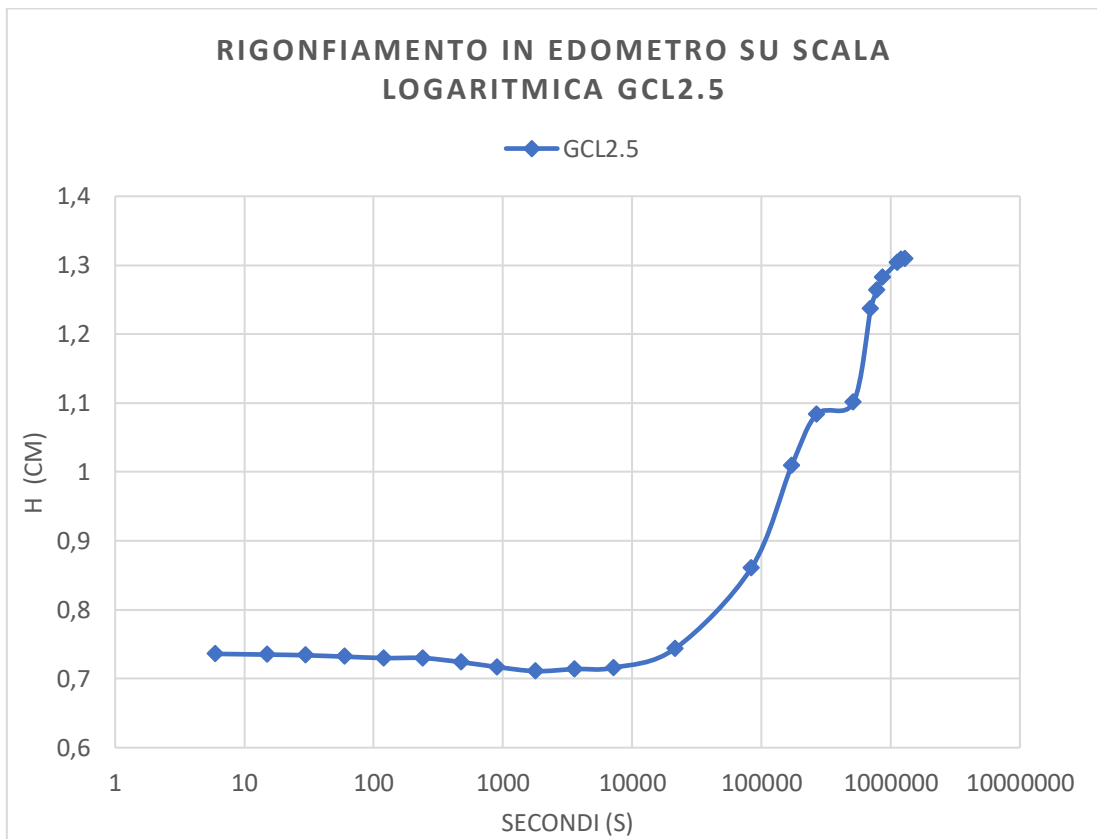


Figure 81: Rigonfiamento in edometro GCL2.5 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2.6 + 5% PA (DM) in CaCl₂.

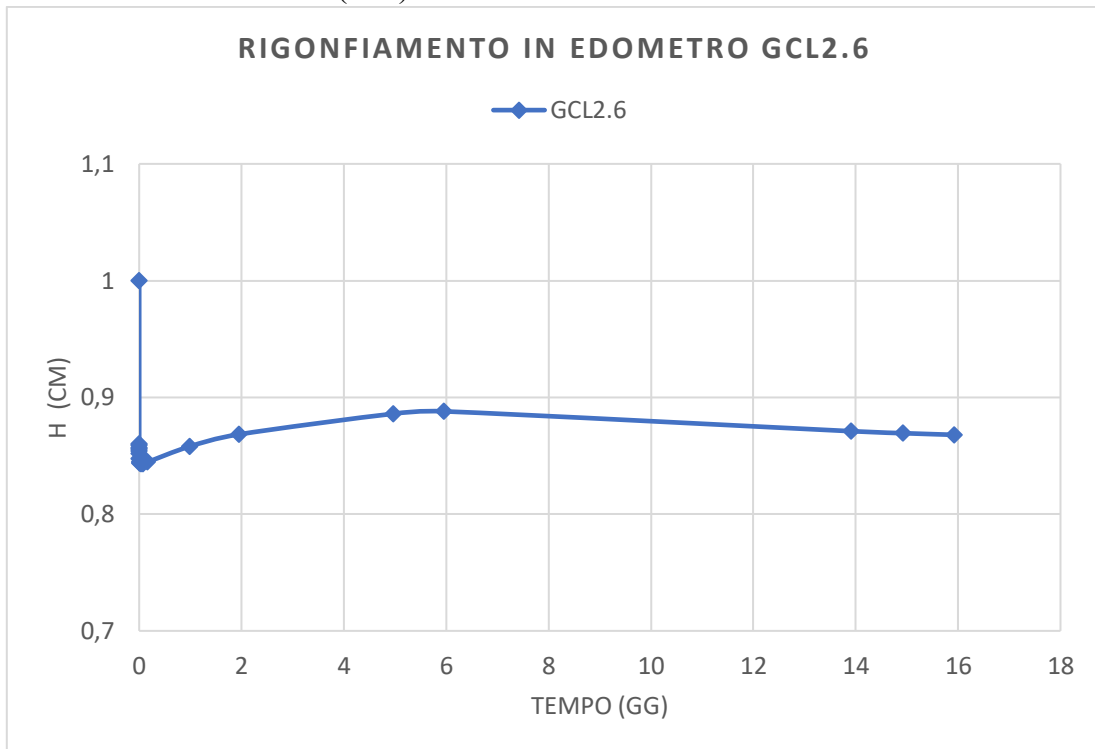


Figure 82: Rigonfiamento in edometro GCL2.6 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

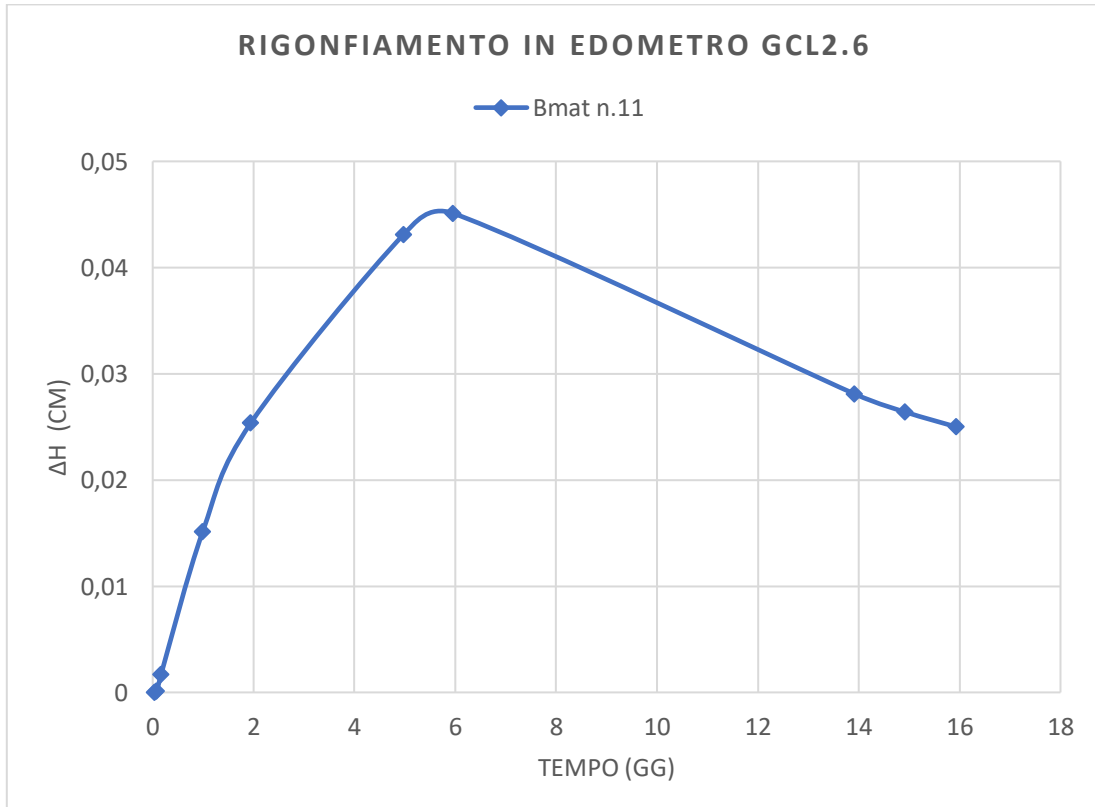


Figure 83: Rigonfiamento in edometro GCL2.6 in CaCl₂, rigonfiamento del campione nel tempo.

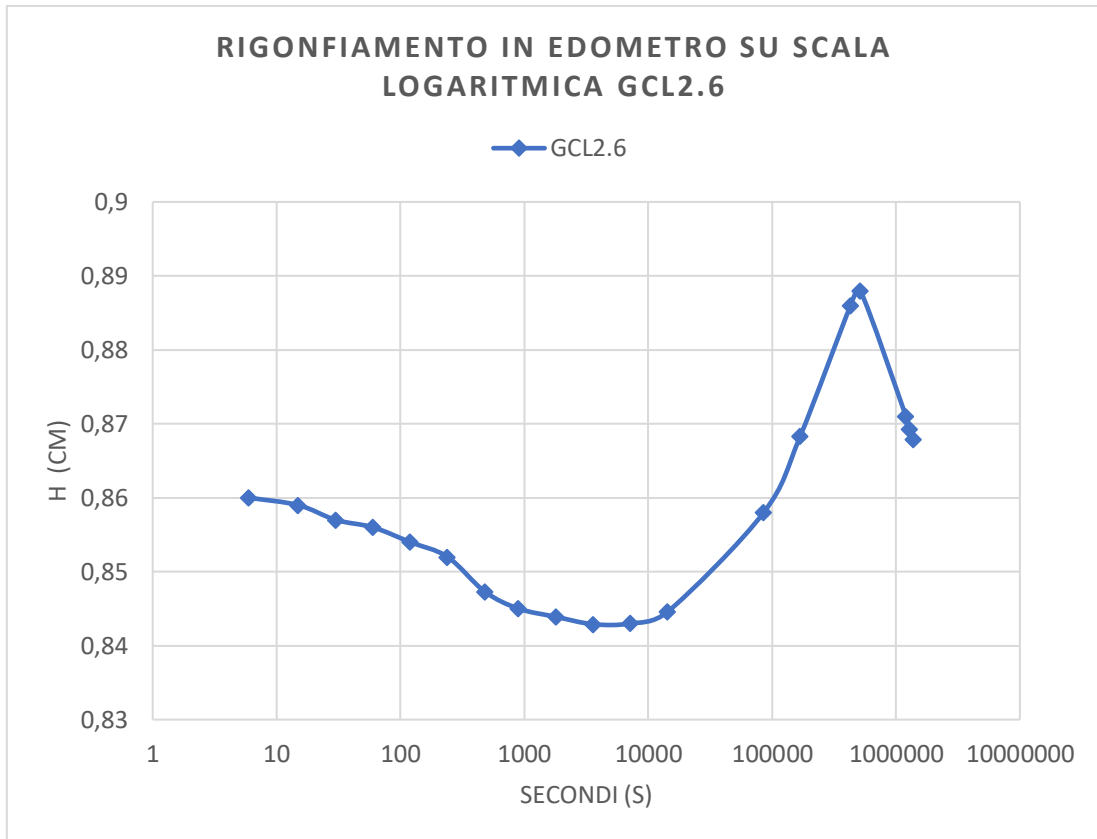


Figure 84: Rigonfiamento in edometro GCL2.6 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2.7 + 5% PA_x (DM) in DW.

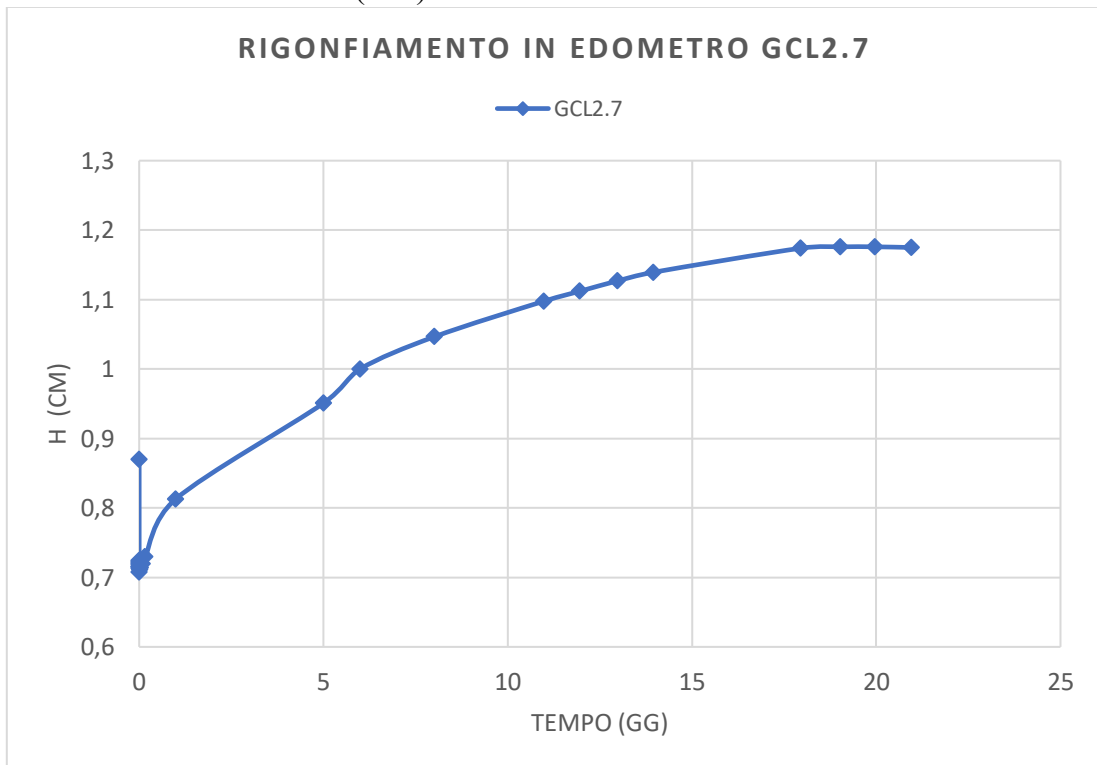


Figure 85: Rigonfiamento in edometro GCL2.7 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

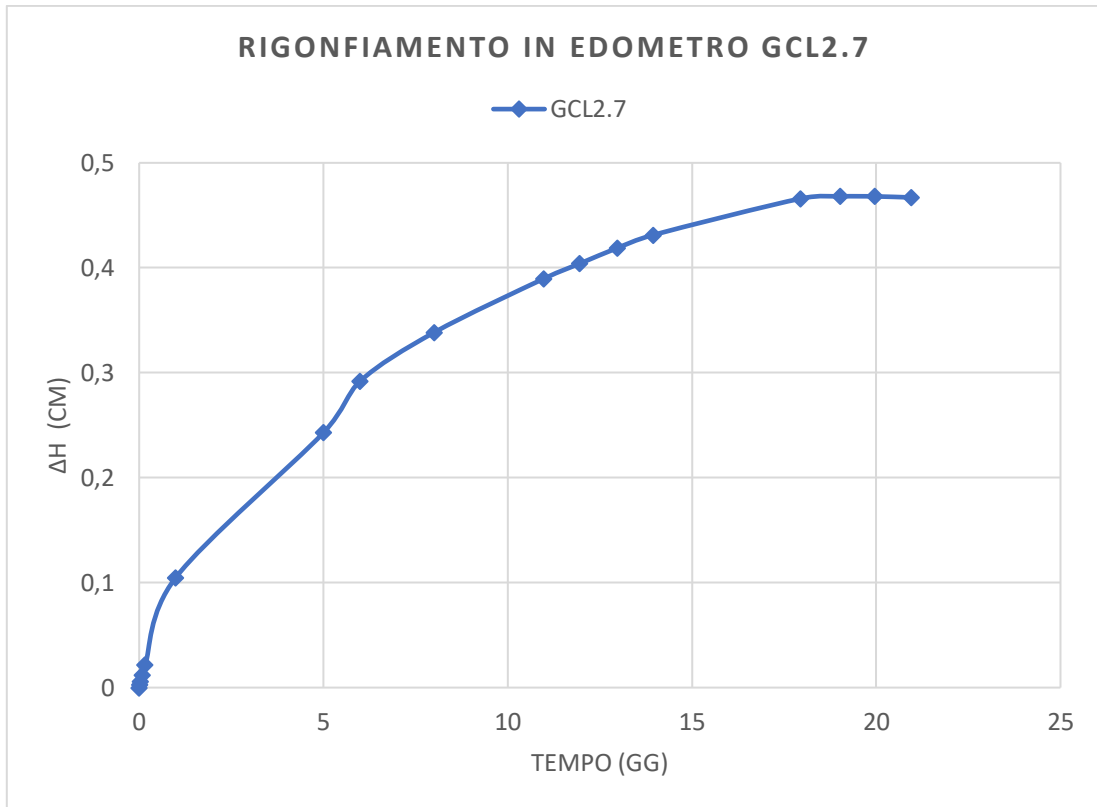


Figure 86: Rigonfiamento in edometro GCL2.7 in DW, rigonfiamento del campione nel tempo.

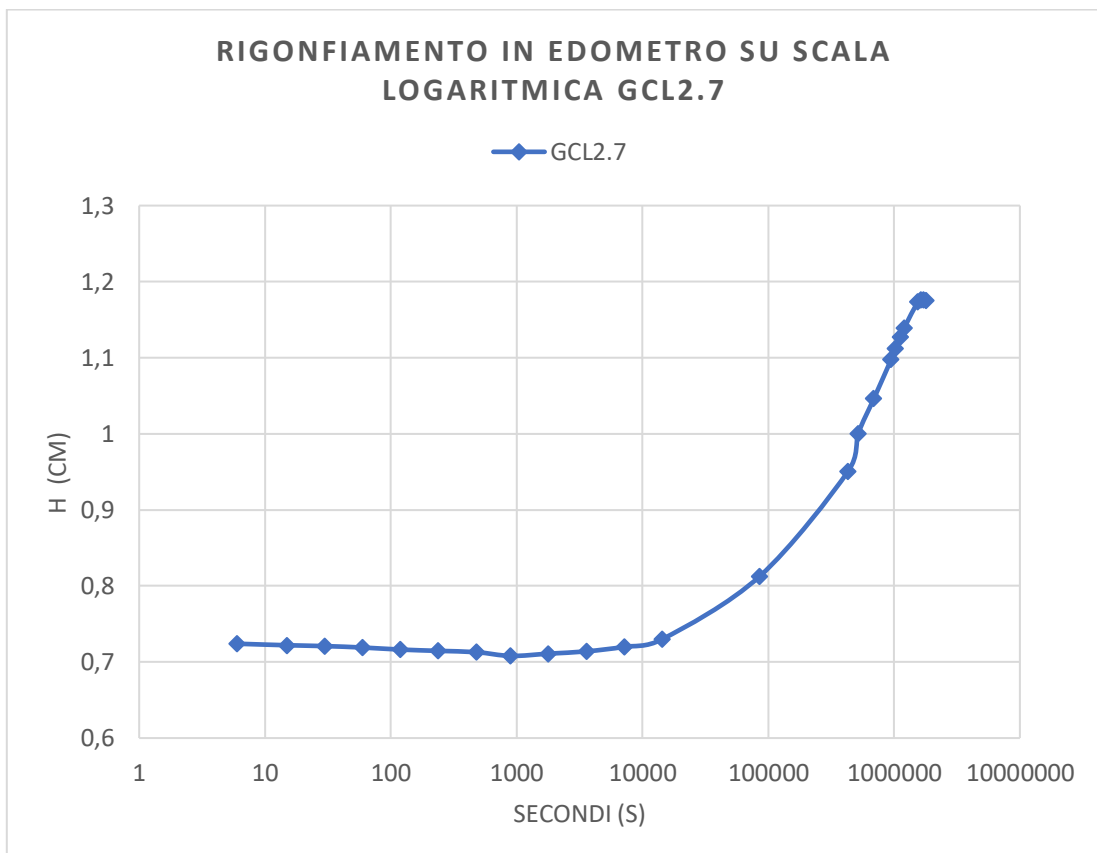


Figure 87: Rigonfiamento in edometro GCL2.7 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2.8 + 5% PA_x (DM) in DW.

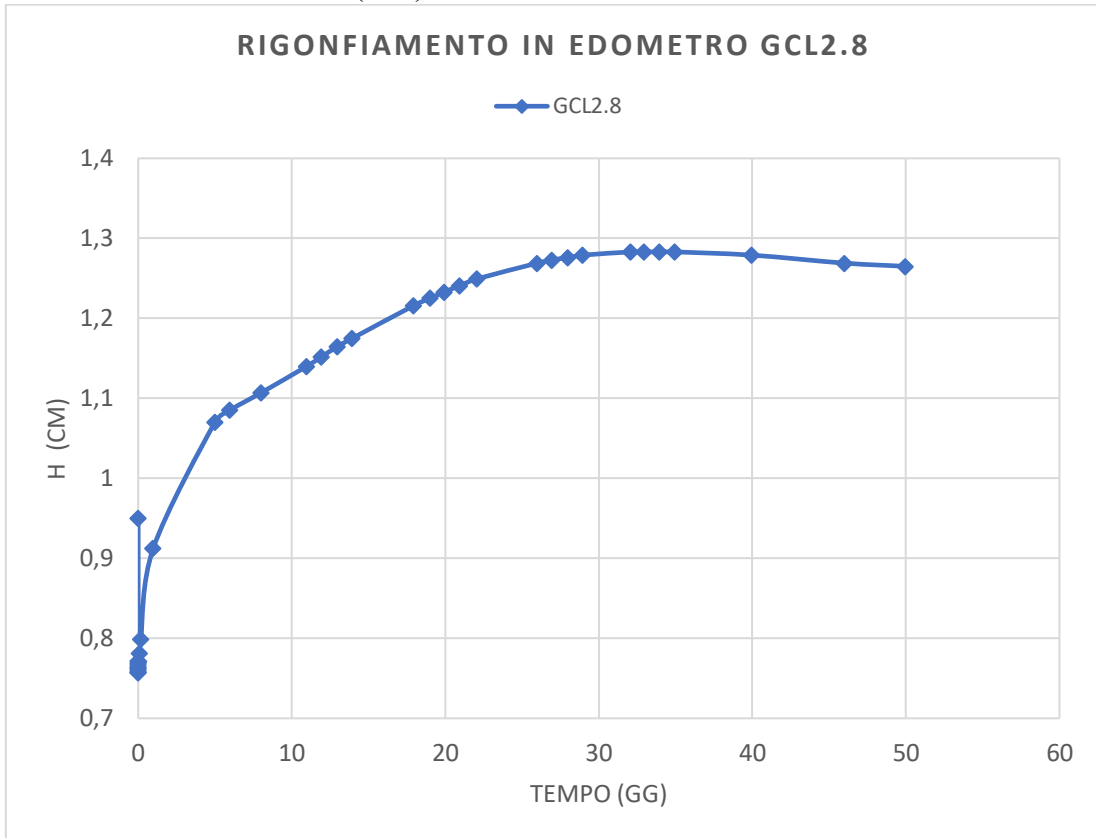


Figure 88: Rigonfiamento in edometro GCL2.8 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

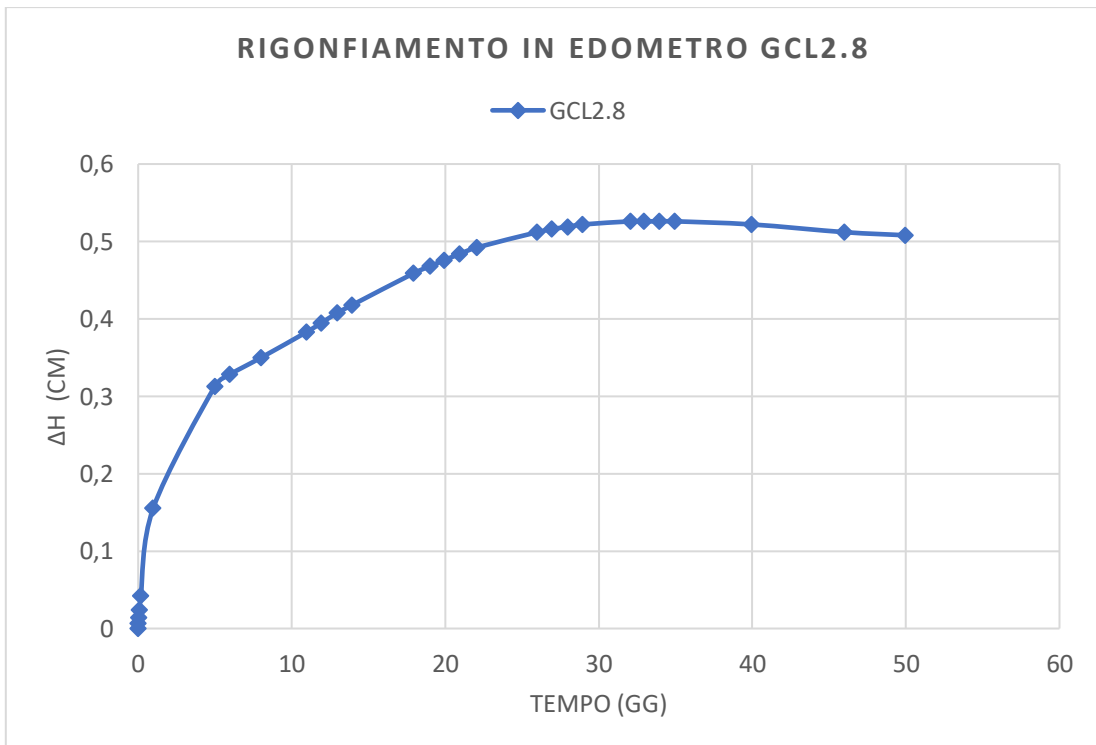


Figure 89: Rigonfiamento in edometro GCL2.8 in DW, rigonfiamento del campione nel tempo.

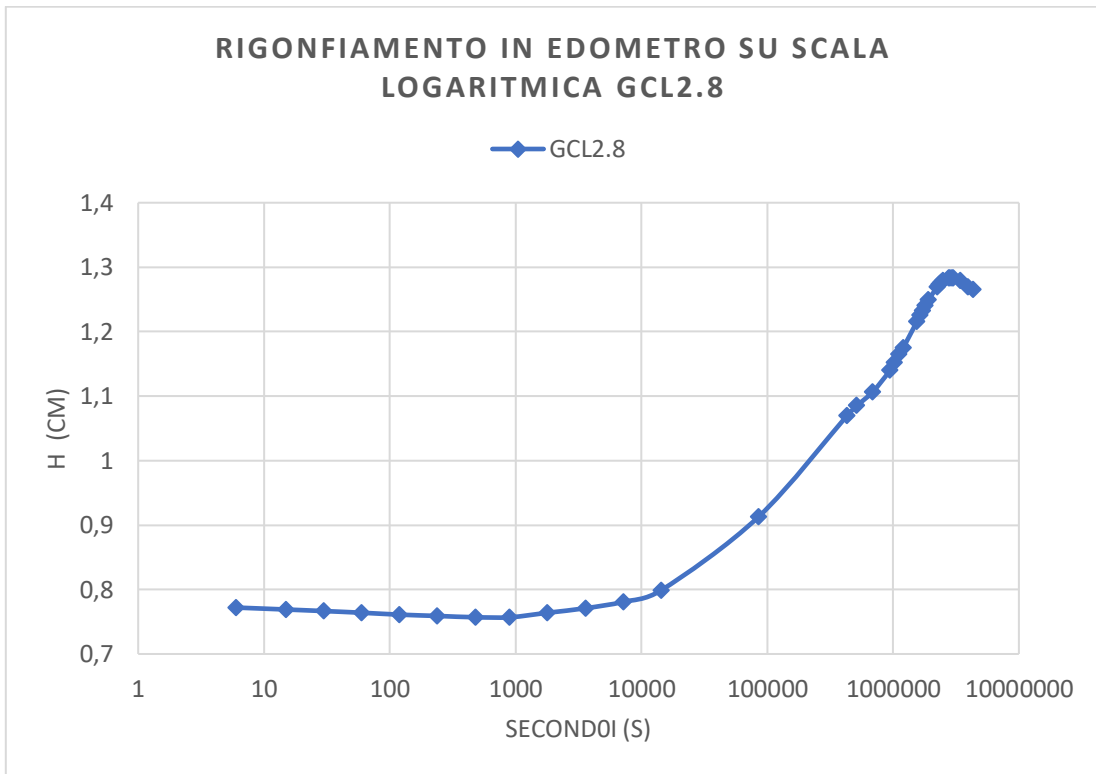


Figure 90: Rigonfiamento in edometro GCL2.8 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2.9 + 5% PA_x (DM) in CaCl₂.

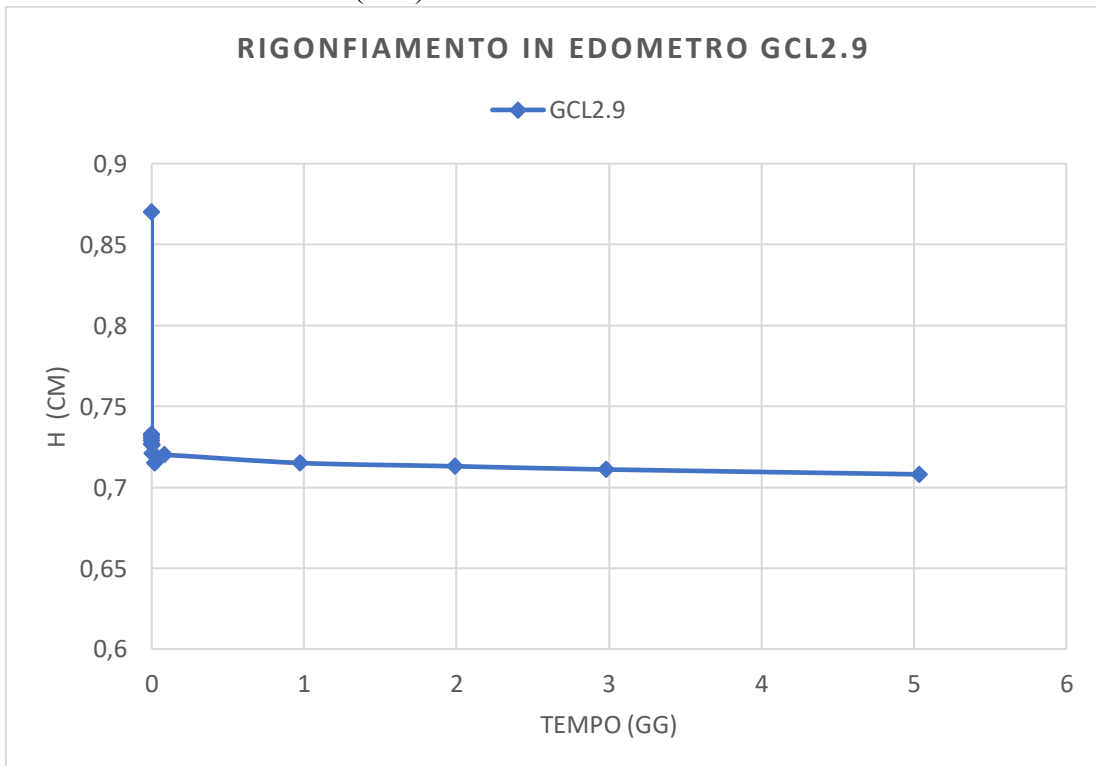


Figure 91: Rigonfiamento in edometro GCL2.9 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

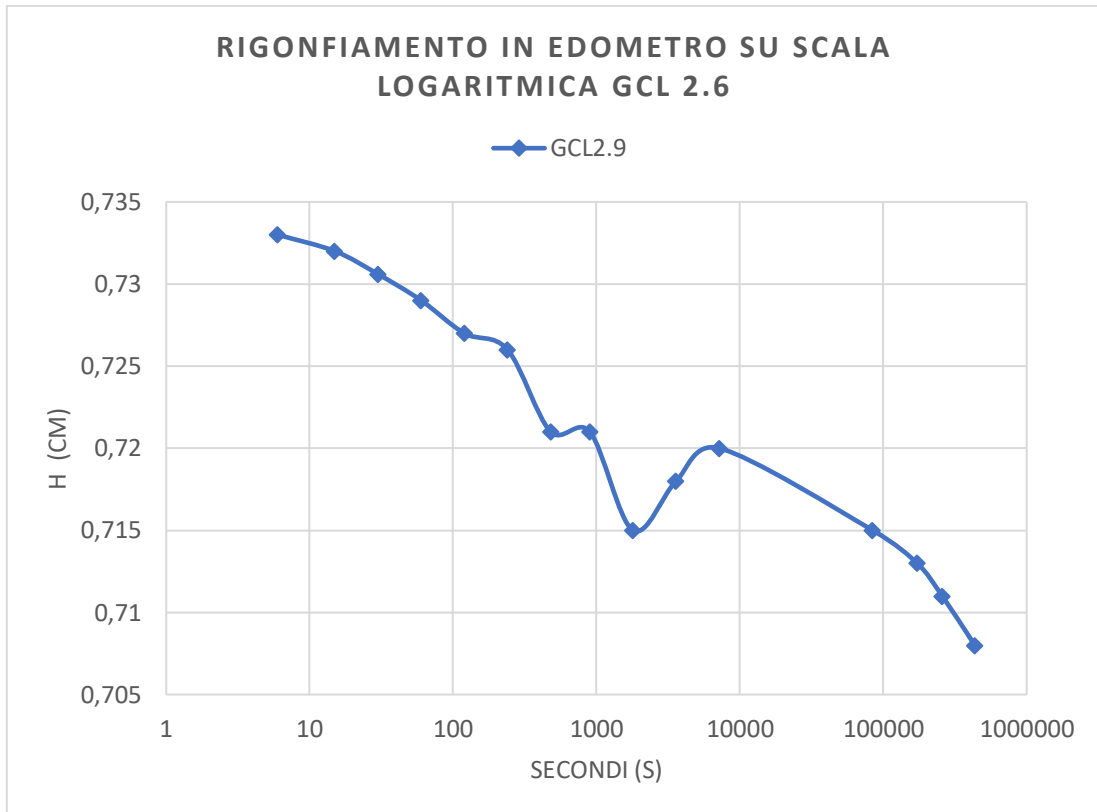


Figure 92: Rigonfiamento in edometro GCL2.9 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2.10 + 5% CMC (DM) in DW.

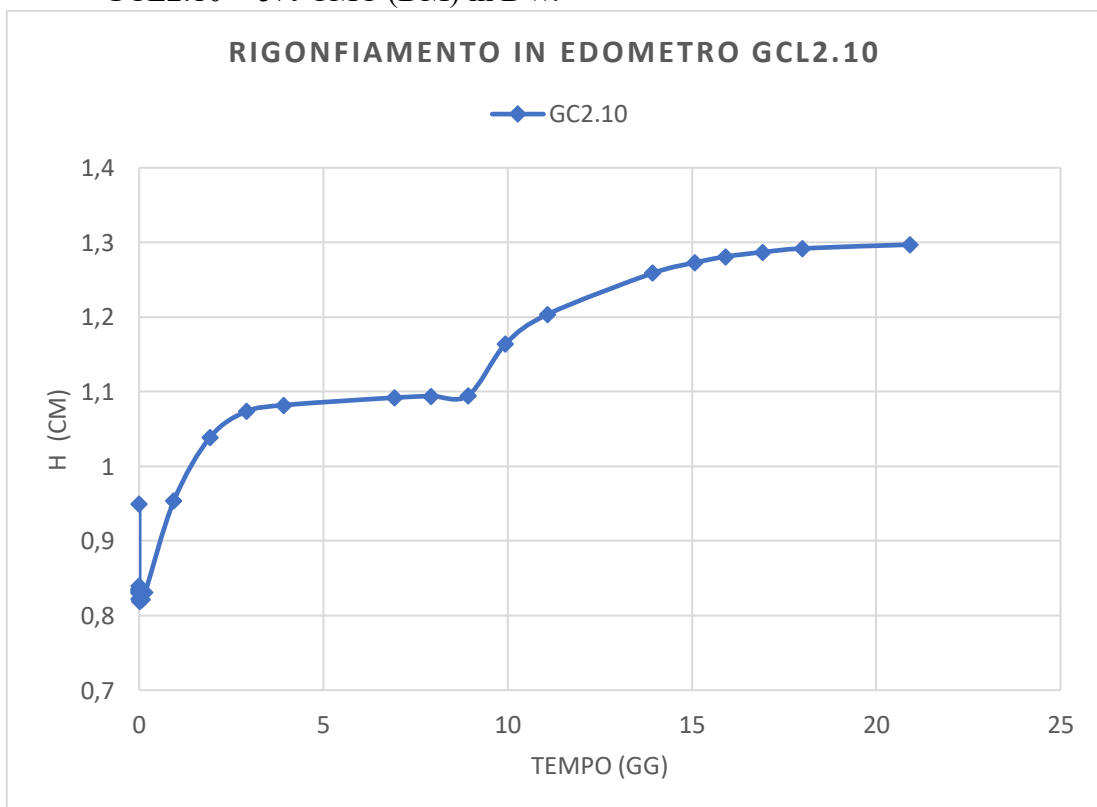


Figure 93: Rigonfiamento in edometro GCL2.10 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

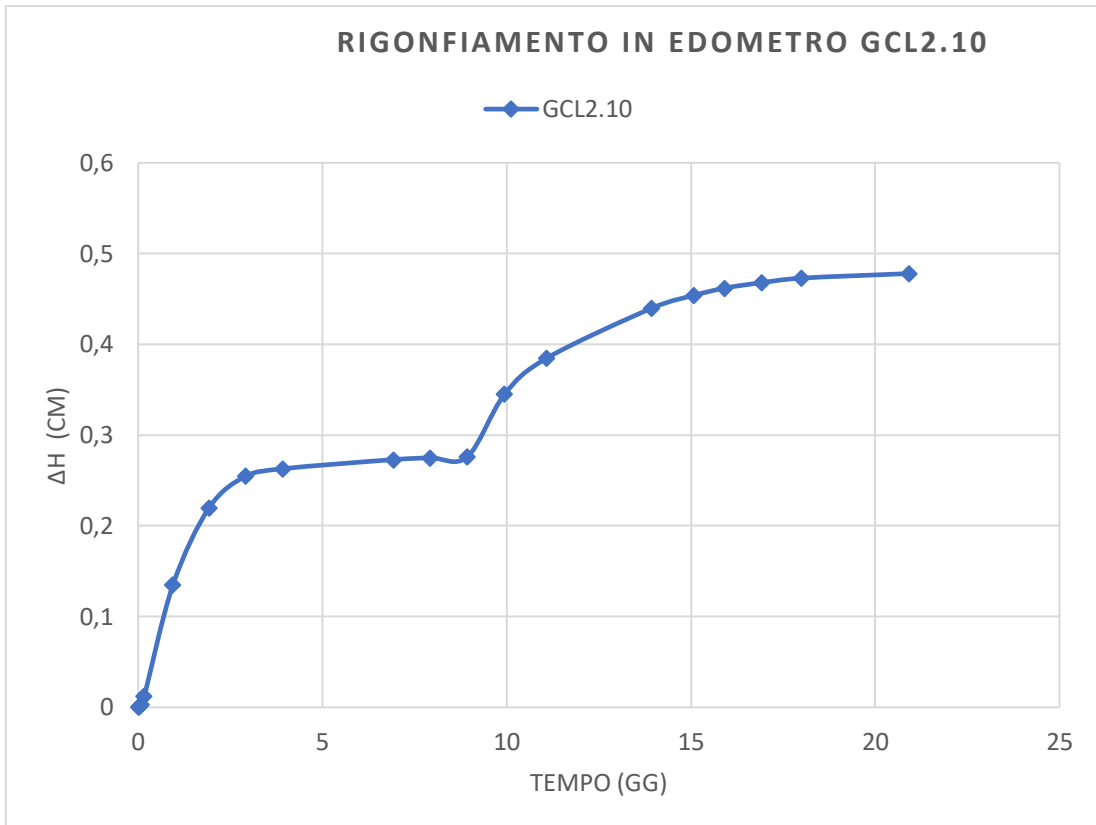


Figure 94: Rigonfiamento in edometro GCL2.10 in DW, rigonfiamento del campione nel tempo.

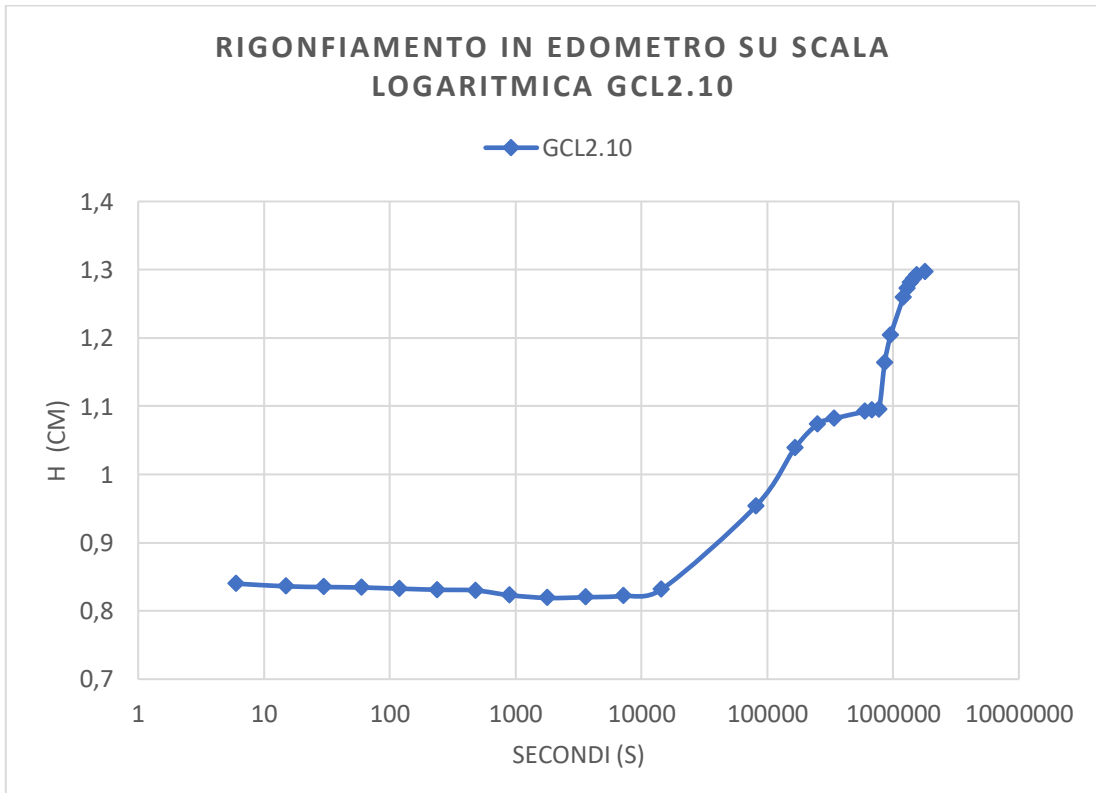


Figure 95: Rigonfiamento in edometro GCL2.10 in DW, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2.11 + 5% CMC (DM) in CaCl₂.

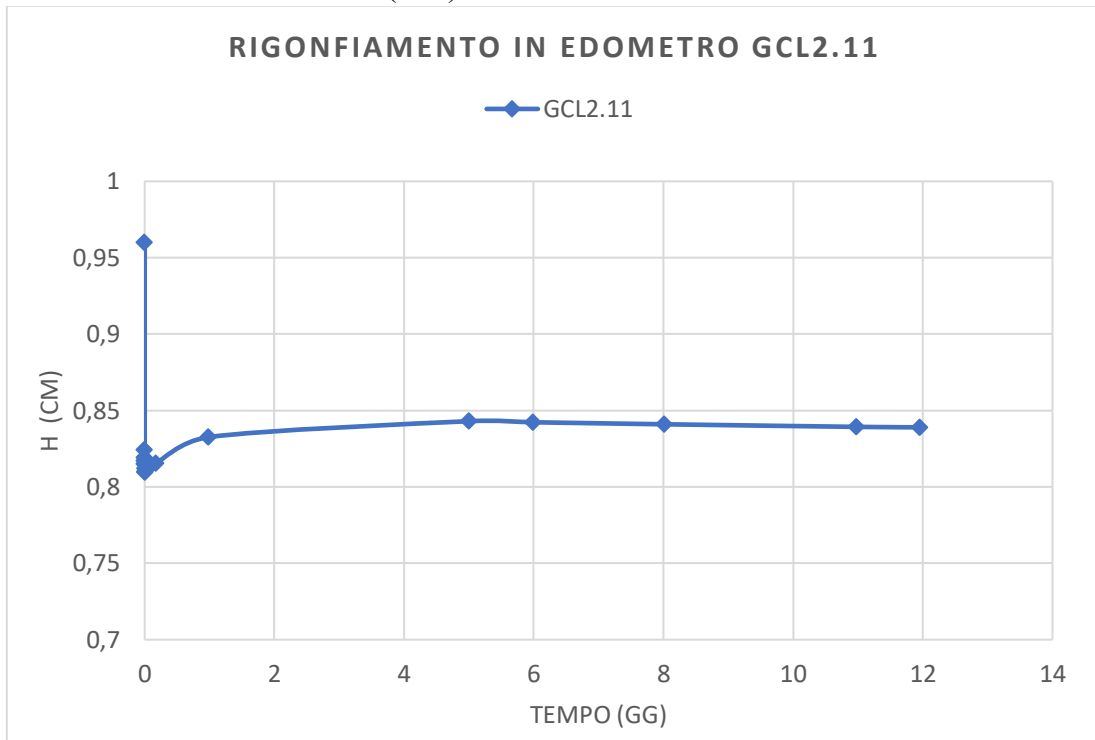


Figure 96: Rigonfiamento in edometro GCL2.11 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo.

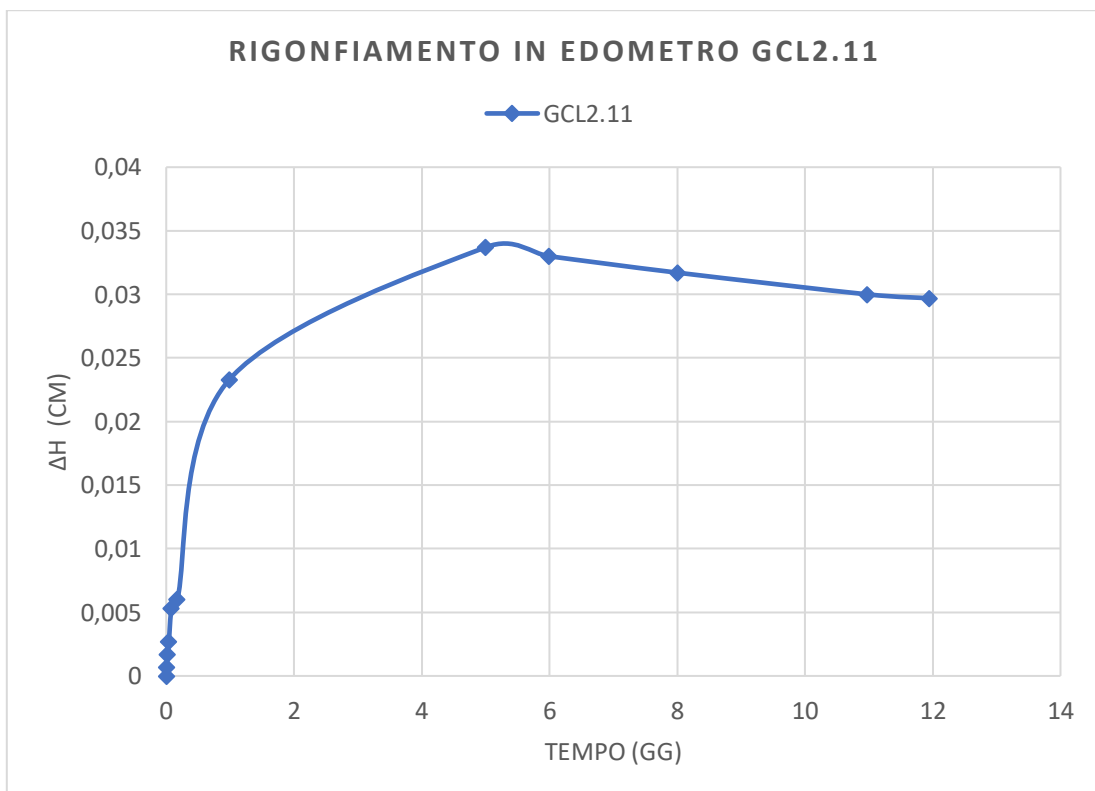


Figure 97: Rigonfiamento in edometro GCL2.11 in CaCl₂, rigonfiamento del campione nel tempo.

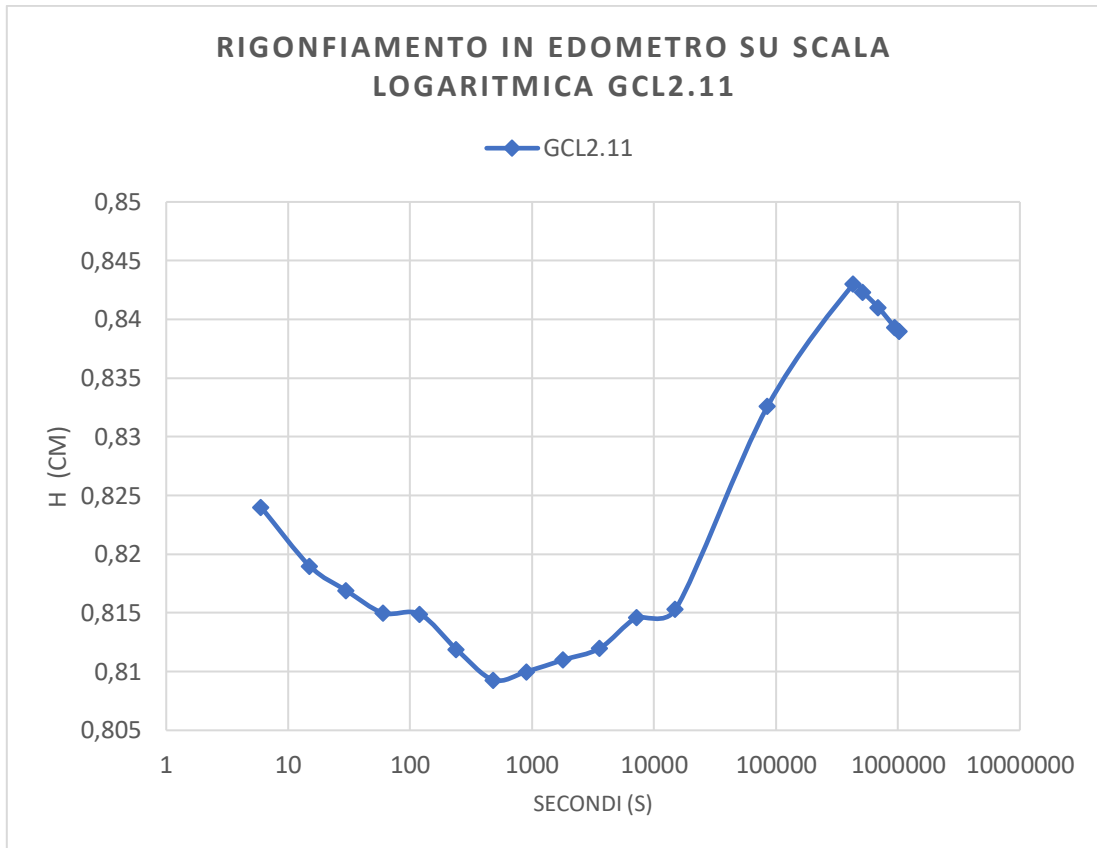


Figure 98: Rigonfiamento in edometro GCL2.11 in CaCl₂, variazione dell'altezza del campione nel tempo su scala logaritmica.

4.4 Prove di permeabilità

La prova di permeabilità è stata svolta su tutti i campioni (ricostruiti e non). Come già detto, alcuni campioni sono stati permeati prima in DW (preidratazione) e poi in CaCl₂, in questo modo è stato possibile valutarne sia il comportamento in acqua distillata che quello in cloruro di calcio dopo aver subito il processo di preidratazione. I restanti campioni hanno subito una preidratazione ed una permeazione con lo stesso liquido di prova. I risultati della prova in esame sono riportati nelle seguenti Tabelle 36 e 37.

Tabella 36: Risultati prove di permeabilità in DW.

Permeabilità in DW							
Campione	Polimero	Liquido	H ₂	H ₃	Giorni	PV	k
[-]	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[gg]	[-]	[m/s]
GCL1.1	Non additivato	DW→ CaCl ₂	0,92	0,81	43,5	1,52	3,61 × 10 ⁻¹¹
GCL1.3	5% PA (DM)	DW→ CaCl ₂	1,08	0,70	42,5	1,43	2,50 × 10 ⁻¹¹
GCL1.6	5% PA (WM)	DW→ CaCl ₂	1,17	0,78	78,4	1,29	2,18 × 10 ⁻¹¹
GCL2.1*	Non additivato	DW	0,78	IF	436,7	1,29	8,66 × 10 ⁻¹²
GCL2.3	Non additivato	DW	1,07	IF	88,7	6,03	1,39 × 10 ⁻¹¹
GCL2.5	5% PA (DM)	DW	1,31	IF	59,7	0,63	4,69 × 10 ⁻¹²
GCL2.7	5% PAx (DM)	DW	1,17	IF	148,7	2,76	1,49 × 10 ⁻¹¹
GCL2.8	5% PAx (DM)	DW	1,26	IF	148,6	6,07	1,20 × 10 ⁻¹¹
GCL2.10	5% CMC (DM)	DW	1,30	IF	88,7	1,15	6,93 × 10 ⁻¹²

Nota: *=campioni non ricostruiti con bentonite granulare e non passante al setaccio n.80 (GCL con fibre agugliate intatte); PV = Numero volume dei pori; IF = Campione ancora in filtrazione – prova ancora in corso.

Tabella 37: Risultati prove di permeabilità in CaCl₂.

Permeabilità in CaCl ₂							
Campione	Polimero	Liquido	H ₂	H ₃	Giorni	PV	k
[-]	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[gg]	[-]	[m/s]
GCL1.1	Non additivato	DW→ CaCl ₂	0,92	0,81	62,7	5,74	1,59 × 10 ⁻¹⁰
GCL1.2	Non additivato	CaCl ₂	0,60	0,59	49,5	8,11	2,77 × 10 ⁻⁸
GCL1.3	5% PA (DM)	DW→ CaCl ₂	1,17	0,78	132,4	3,43	6,71 × 10 ⁻¹¹
GCL1.4	5% PA (DM)	CaCl ₂	0,71	0,65	40,5	9,29	2,19 × 10 ⁻⁸
GCL1.5	10% PA (DM)	CaCl ₂	0,71	0,65	41,4	7,10	2,09 × 10 ⁻⁸
GCL1.6	5% PA (WM)	DW→ CaCl ₂	1,17	0,78	163,6	4,47	5,53 × 10 ⁻¹¹
GCL1.7	5% PA (WM)	CaCl ₂	0,67	0,78	49,5	9,58	1,81 × 10 ⁻⁸
GCL2.2*	Non additivato	CaCl ₂	0,83	0,72	8,4	2,25	2,19 × 10 ⁻⁷
GCL2.4	Non additivato	CaCl ₂	0,84	0,80	50,6	8,88	4,02 × 10 ⁻⁹
GCL2.6	5% PA (DM)	CaCl ₂	0,87	0,81	57,5	8,91	7,28 × 10 ⁻⁹
GCL2.9	5% PAx (DM)	CaCl ₂	0,71	0,69	56,6	12,51	5,61 × 10 ⁻¹⁰
GCL2.11	5% CMC (DM)	CaCl ₂	0,84	0,81	76,6	8,90	3,44 × 10 ⁻¹⁰

Nota *=campioni non ricostruiti con bentonite granulare e non passante al setaccio n.80 (GCL con fibre agugliate intatte); PV = Numero volume dei pori;

Dalle Tabelle riportate si nota come il polimero contribuisca a mantenere un certo livello di permeabilità della bentonite nonostante la presenza di un liquido aggressivo come il cloruro di calcio. In acqua distillata invece si nota un miglioramento marginale della conducibilità idraulica del materiale additivato rispetto a quello non additivato. Tra le due bentoniti utilizzate, GCL2 mostra un comportamento migliore in termini di permeabilità e sembra interagire meglio con i polimeri rispetto a GCL1, questo lo si nota dal fatto che GCL2 mostra un miglioramento della permeabilità in CaCl₂ quando

viene additivato con il polimero. Inoltre, la bentonite di questo ultimo materiale mostra un comportamento migliore se risulta passante al setaccio n.80 (180 μ m) rispetto a quella granulare. Per ultimo si può notare come la preidratazione in acqua distillata riduca (in questo caso GCL1) la permeabilità in CaCl₂. Ulteriori discussioni e confronti tra i materiali sono contenuti nel capitolo 5.

4.4.1 Prove di permeabilità in acqua distillata (DW)

Di seguito vengono riportati le variazioni della permeabilità in funzione del tempo dei materiali che sono stati permeati in acqua distillata.

- GCL2.1 non additivato con bentonite granulare (non passante al setaccio n.80), permeato in DW.

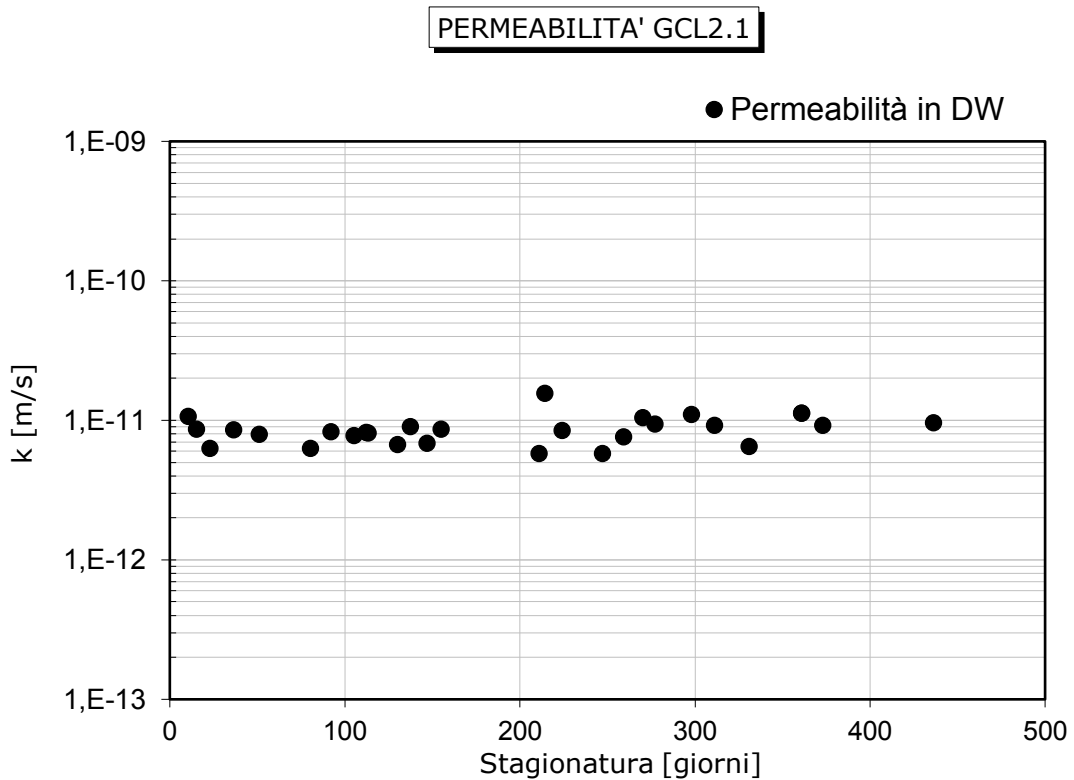


Figura 99: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.1

- GCL2.3 non additivato con bentonite passante al setaccio n.80, permeato in DW.

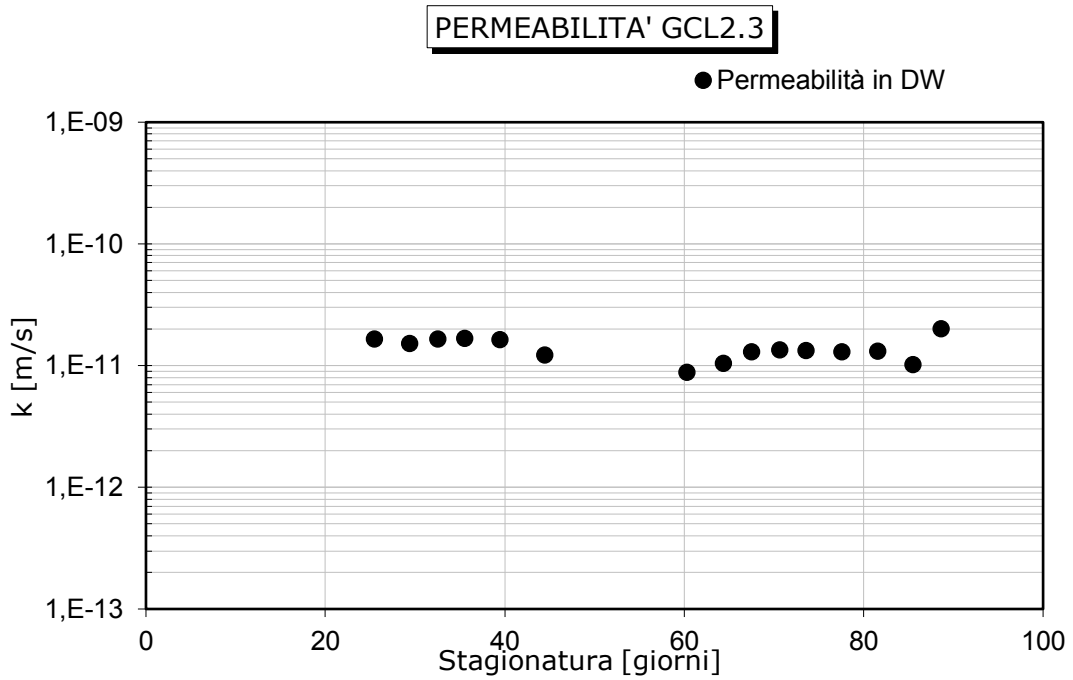


Figura 100: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.3

- GCL2.5 + 5% PA (DM) permeato in DW.

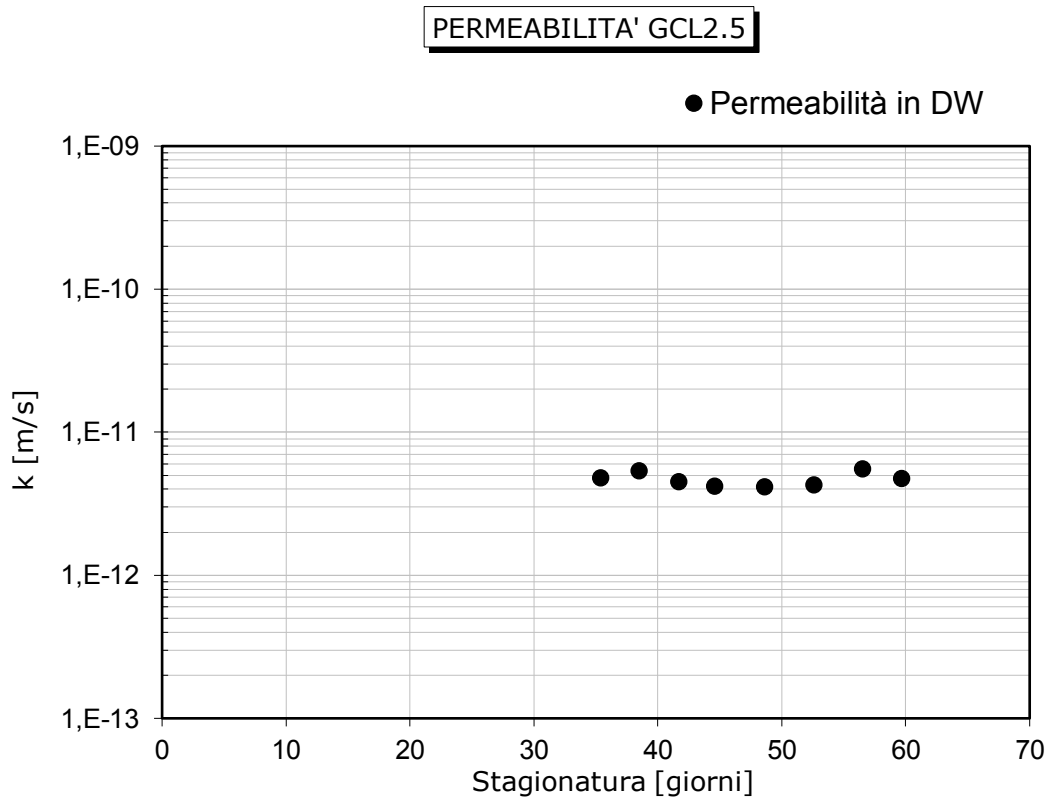


Figura 101: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.5

- GCL2.7 + 5% PAx (DM) permeato in DW.

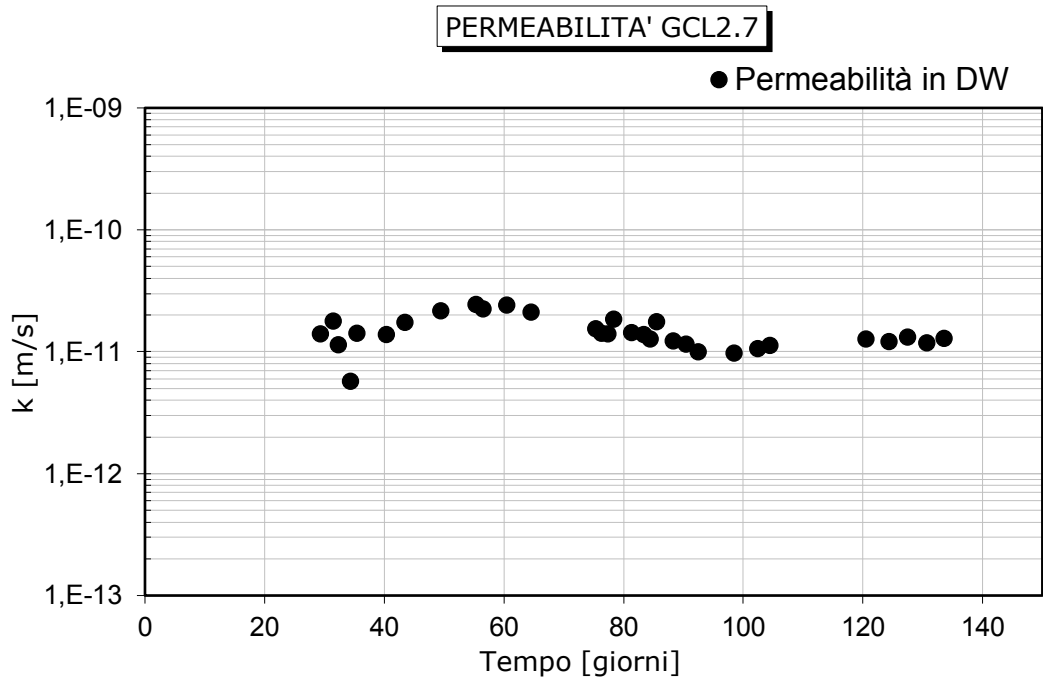


Figura 102: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.7

- GCL2.8 + 5% PAx (DM) permeato in DW.

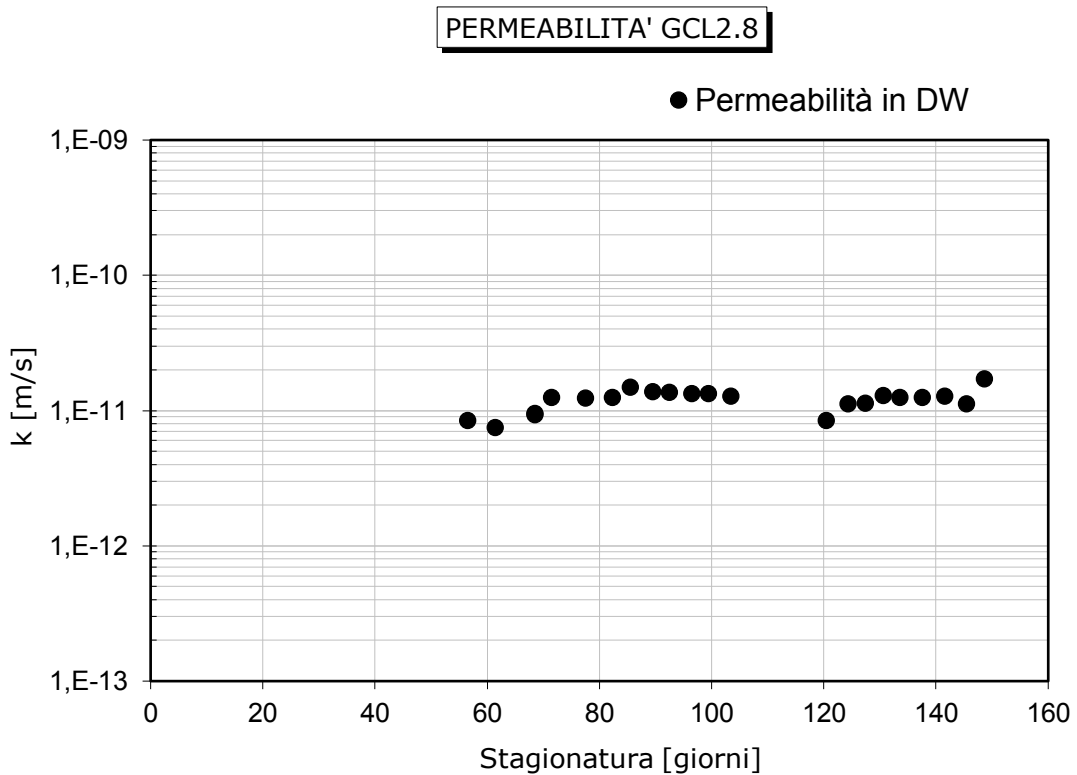


Figura 103: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.8

- GCL2.10 + 5% CMC (DM) permeato in DW.

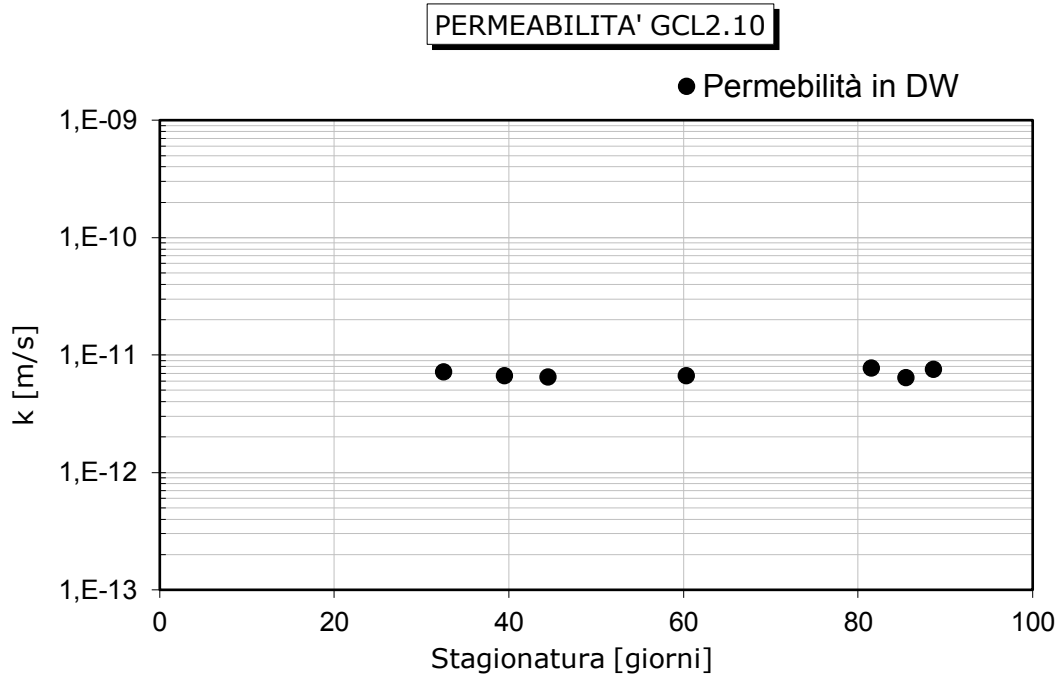


Figura 104: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.10

4.4.2 Prove di permeabilità in cloruro di calcio (CaCl₂) con preidratazione in acqua distillata (DW)

Di seguito vengono riportati le variazioni della permeabilità in funzione del tempo dei materiali che hanno subito il processo di preidratazione in acqua distillata, i liquidi permeanti sono: DW prima, CaCl₂ dopo.

- GCL1.1 non additivato preidratato in acqua distillata e permeato prima in DW e poi in CaCl₂.

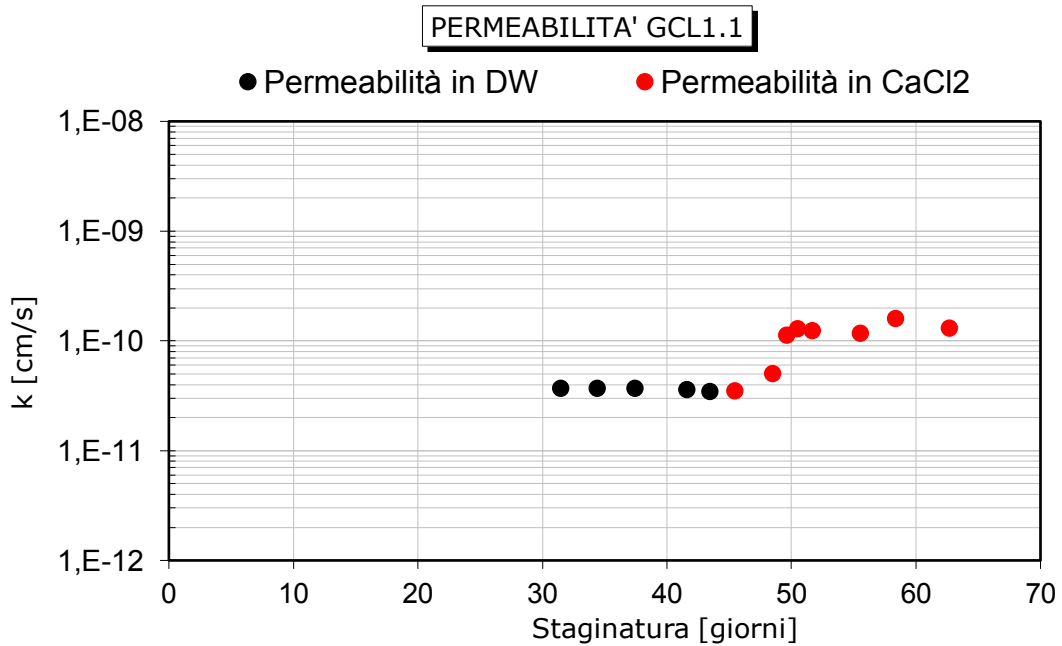


Figura 105: Variazione della permeabilità nel tempo GCL1.1

- GCL1.3 + 5% PA (DM) preidratato in acqua distillata e permeato prima in DW e poi in CaCl₂.

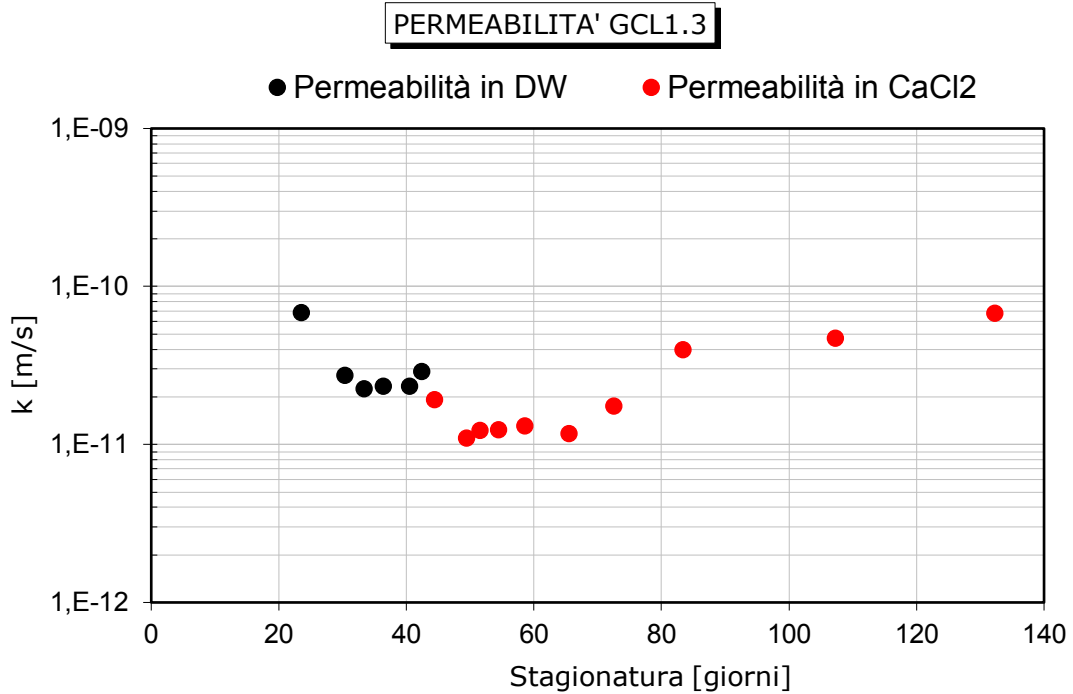


Figura 106: Variazione della permeabilità nel tempo GCL1.3

- GCL1.6 + 5% PA (WM) preidratato in acqua distillata e permeato prima in DW e poi in CaCl₂.

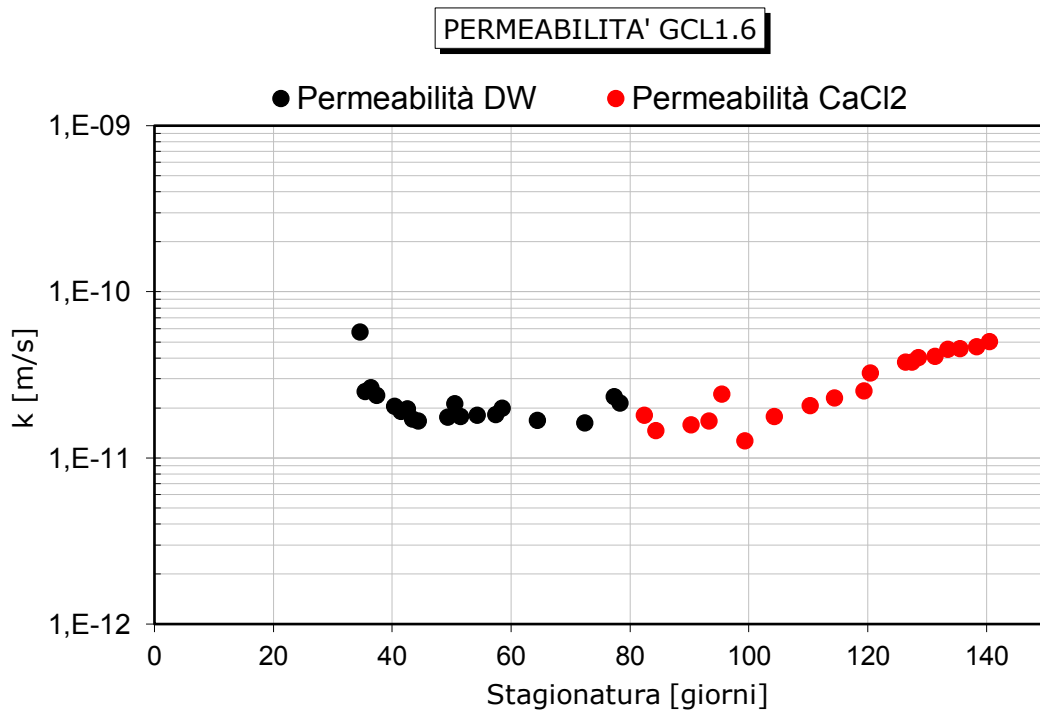


Figura 107: Variazione della permeabilità nel tempo GCL1.6

4.4.3 Prove di permeabilità in cloruro di calcio (CaCl₂)

Di seguito vengono riportati le variazioni della permeabilità in funzione del tempo dei materiali che sono stati permeati in cloruro di calcio.

- GCL1.2 non additivato permeato in CaCl₂.

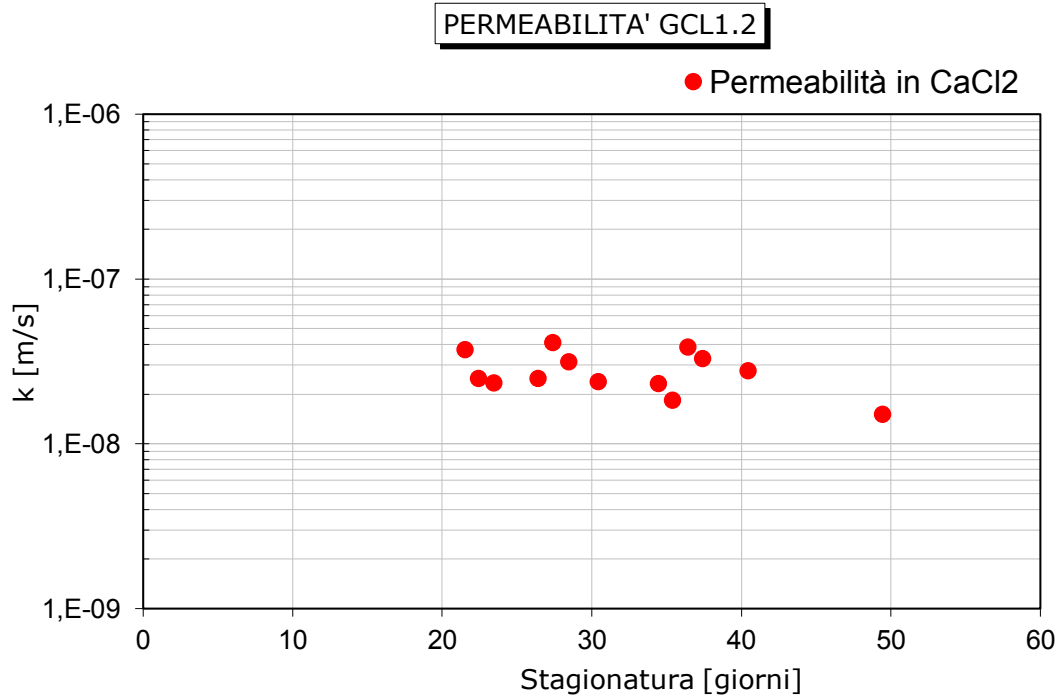


Figura 108: Variazione della permeabilità nel tempo GCL1.2

- GCL1.4 + 5% PA (DM) permeato in CaCl₂.

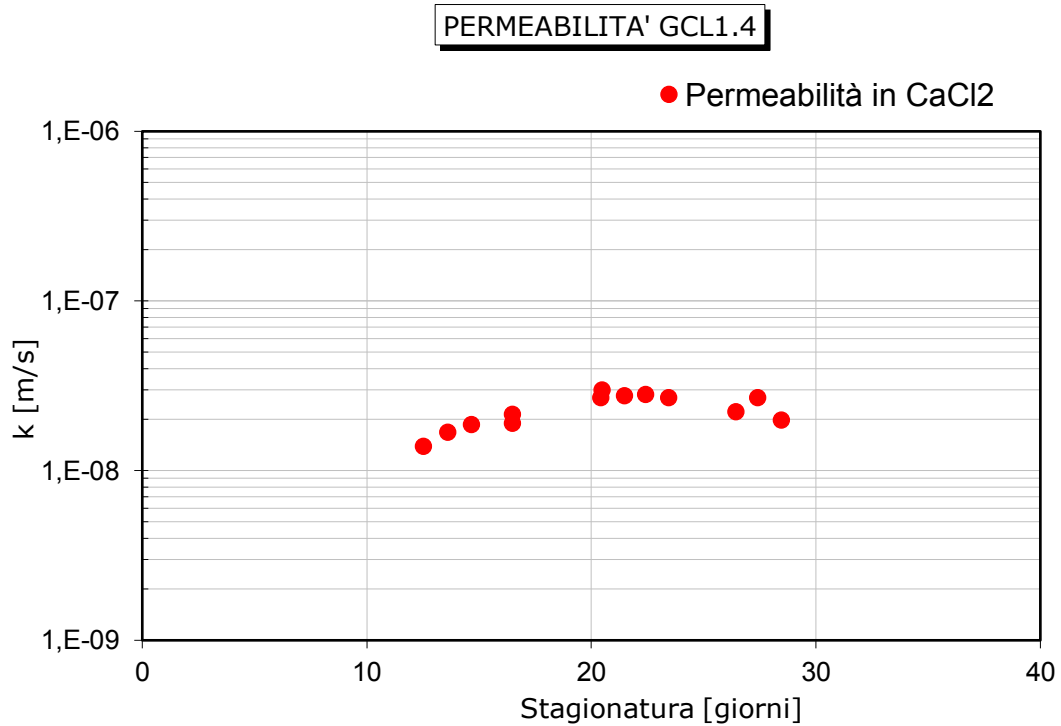


Figura 109: Variazione della permeabilità nel tempo GCL1.4

- GCL1.5 + 10% PA (DM) permeato in CaCl₂.

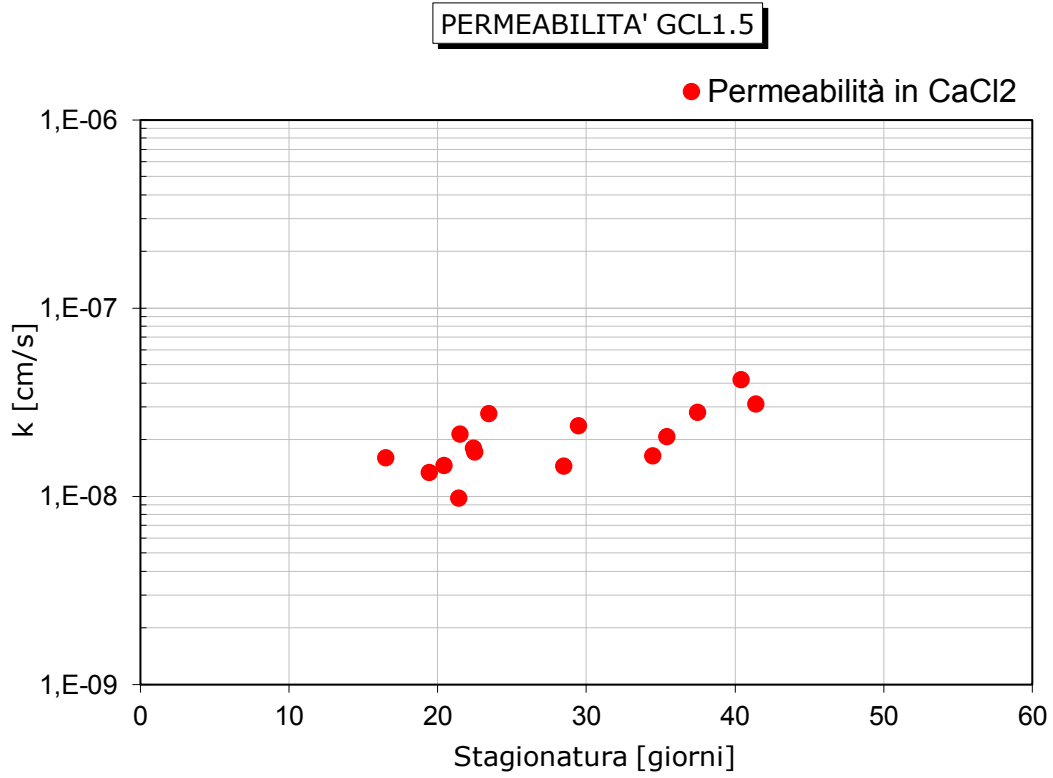


Figura 110: Variazione della permeabilità nel tempo GCL1.5

- GCL1.7 + 5% PA (WM) permeato in CaCl₂.

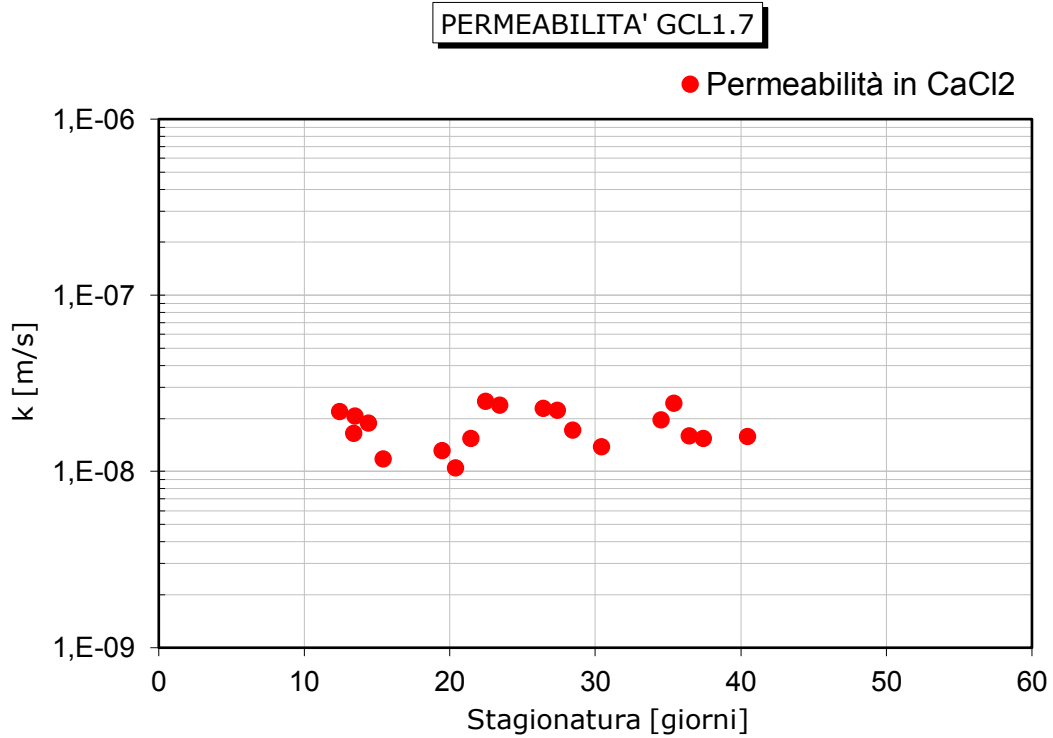


Figura 111: Variazione della permeabilità nel tempo GCL1.7

- GCL2.2 bentonite naturale granulare (non passante al setaccio n.80) permeato in CaCl₂.

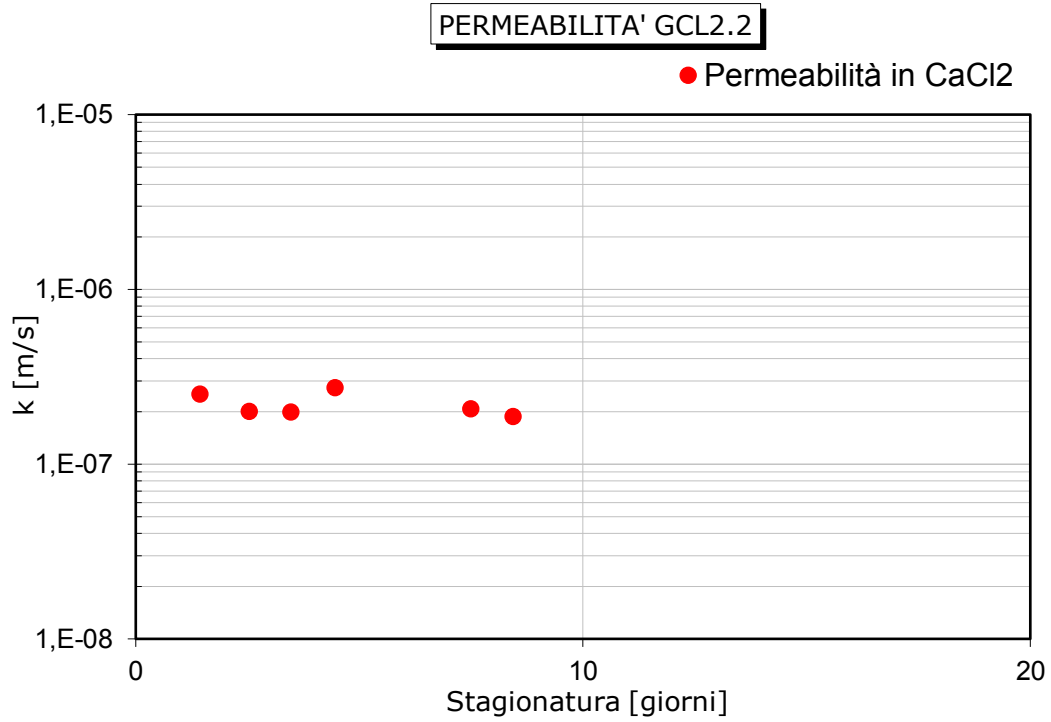


Figura 112: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.2

- GCL2.4 con bentonite naturale sminuzzata e passante al setaccio n.80, permeato in CaCl₂.

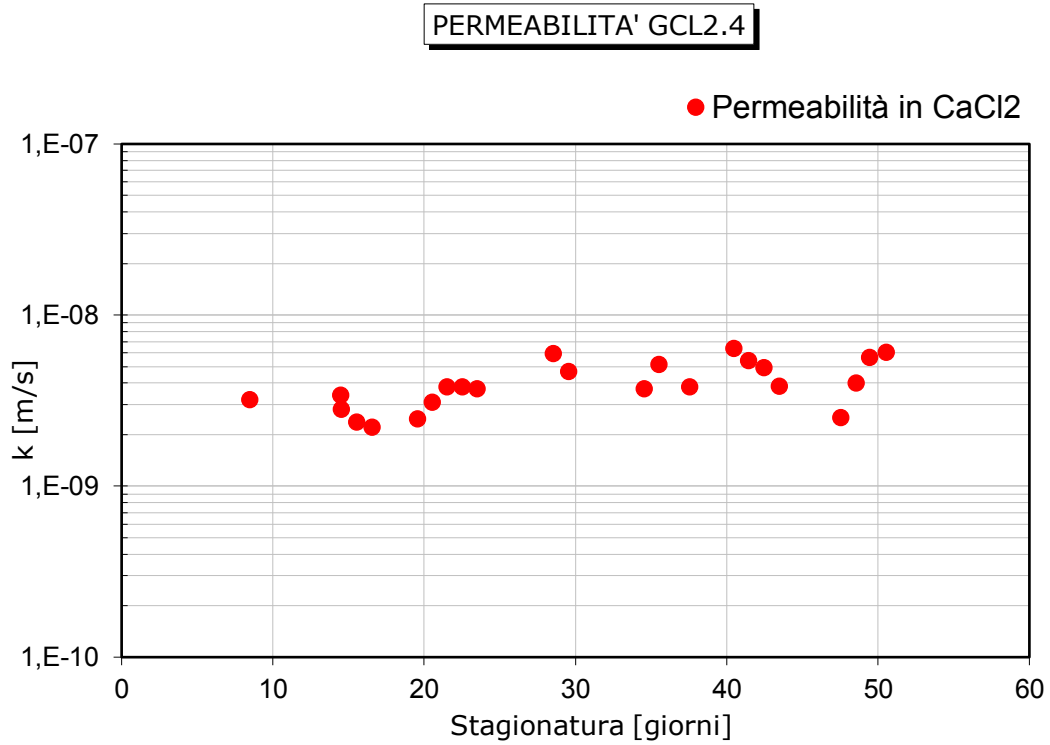


Figura 113: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.4

- GCL2.6 + 5% PA (DM) permeato in CaCl₂.

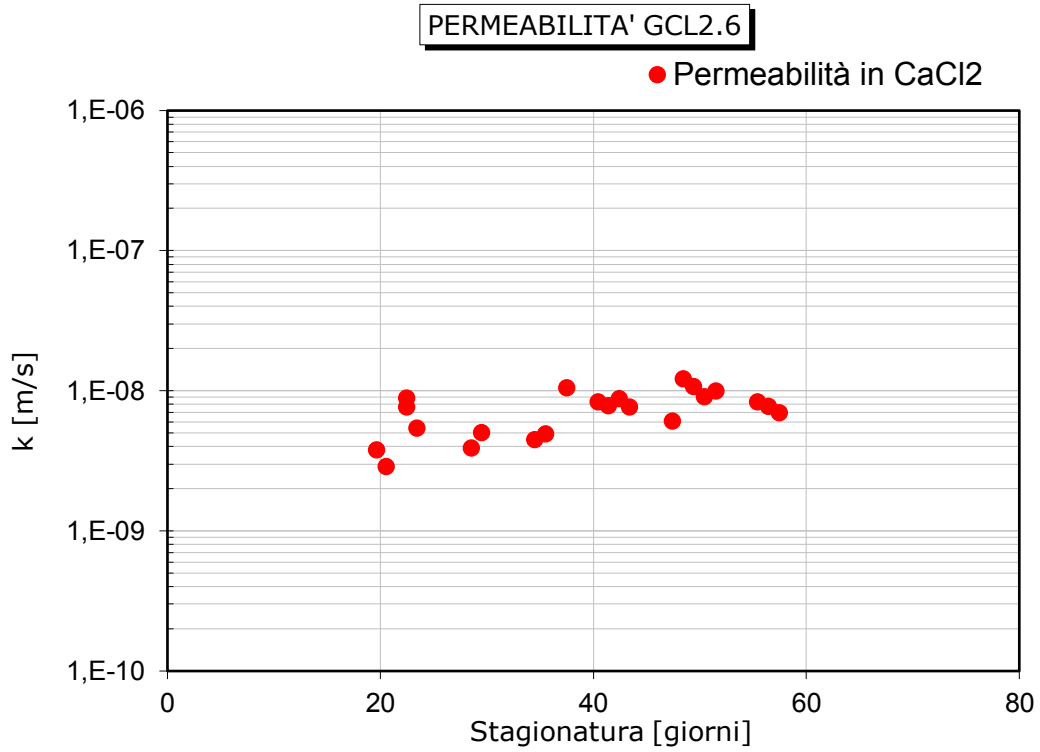


Figura 114: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.6

- GCL2.9 + 5% PAx (DM) permeato in CaCl₂.

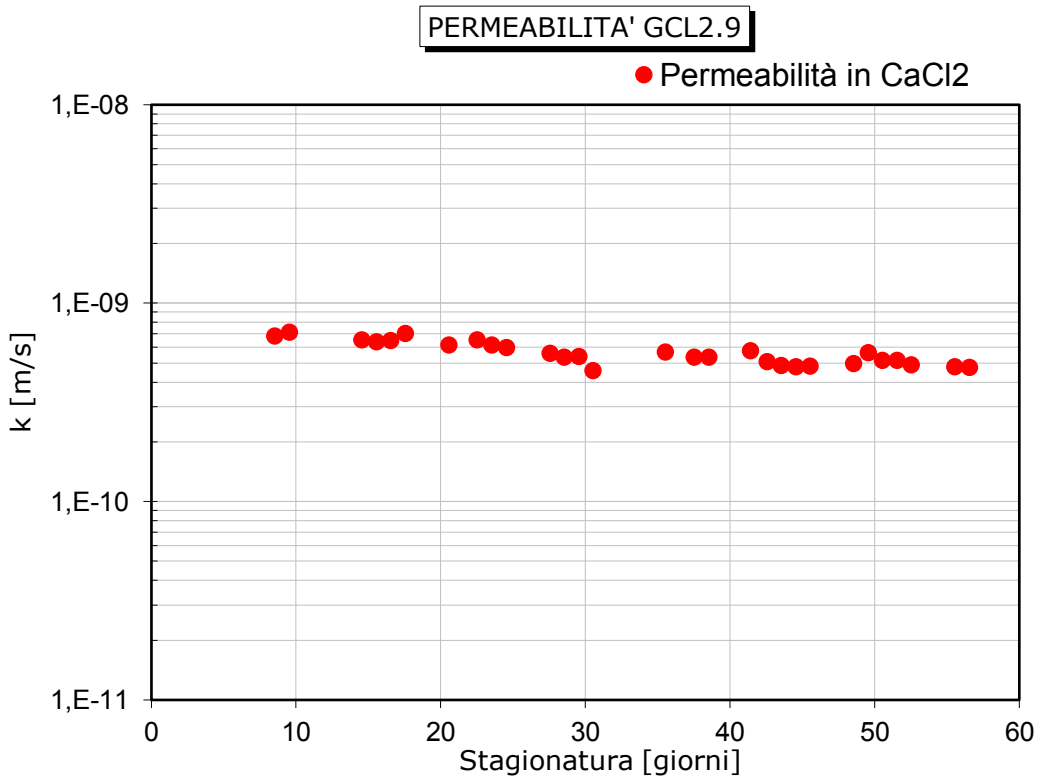


Figura 115: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.9

- GCL2.11 + 5% CMC (DM) permeato in CaCl₂.

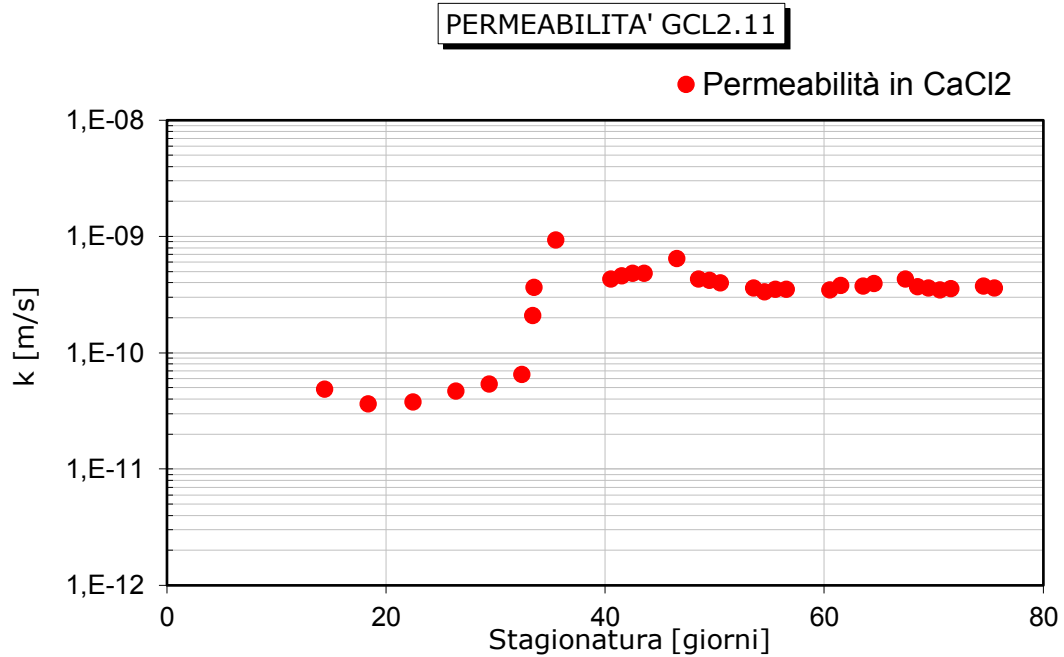


Figura 116: Variazione della permeabilità nel tempo GCL2.11

4.4.4 Misura del contenuto di acqua

Alla fine di ogni prova di permeabilità è stato misurato il contenuto di acqua del campione, i risultati sono indicati nella seguente Tabella 38.

Tabella 38: Contenuto d'acqua misurato nei campioni di GCL dopo la prova di permeabilità.

Campione	Polimero	Liquido	W ₁	W ₂
[-]	[-]	[-]	[%]	[%]
GCL1.1	Non additivato	DW→CaCl ₂	8	156
GCL1.2	Non additivato	CaCl ₂	8	99
GCL1.3	5% PA (DM)	DW→ CaCl ₂	8	158
GCL1.4	5% PA (DM)	CaCl ₂	8	90
GCL1.5	10% PA (DM)	CaCl ₂	8	135
GCL1.6	5% PA (WM)	DW→ CaCl ₂	8	151
GCL1.7	5% PA (WM)	CaCl ₂	8	102
GCL2.1	Non additivato	DW	8	N.P.
GCL2.2	Non additivato	CaCl ₂	8	98
GCL2.3	Non additivato	DW	8	I.F.
GCL2.4	Non additivato	CaCl ₂	8	96
GCL2.5	5% PA (DM)	DW	8	I.F.
GCL2.6	5% PA (DM)	CaCl ₂	8	90
GCL2.7	5% PA _x (DM)	DW	8	I.F.
GCL2.8	5% PA _x (DM)	DW	8	I.F.
GCL2.9	5% PA _x (DM)	CaCl ₂	8	81
GCL2.10	5% CMC (DM)	DW	8	I.F.
GCL2.11	5% CMC (DM)	CaCl ₂	8	89

Nota: W₁ e W₂ sono rispettivamente il contenuto d'acqua di inizio e fine prova dei campioni indicati; I.F. = campione ancora in filtrazione.

Capitolo 5

ANALISI DEI RISULTATI

5.1 Rigonfiamento libero

I risultati delle prove di rigonfiamento libero sono riportati nella Tabella 34.

Tabella 34: Rigonfiamento libero per le varie miscele di bentonite utilizzate.

Bentonite	Polimero	Free swell [ml/2g]	
		DW	CaCl ₂
GCL1	Non additivata	35	6
GCL1	5% PA (DM)	50	10
GCL1	5%PA (WM)	65	10
GCL1	10% PA (DM)	68	13
GCL2	Non additivata	29	6
GCL2	5% PA (DM)	55	10
GCL2	5% PA _x (DM)	50	8
GCL2	5% CMC (DM)	47	9

5.1.1 Rigonfiamento libero a parità di bentonite in DW

Confrontando il rigonfiamento libero a parità di bentonite (GCL1 e GCL2) in DW si osserva che l'additivazione con il polimero vada ad incrementa il rigonfiamento del materiale nella prova di free swell. In particolare, la bentonite additivata con la poliacrilammide conferisce una spiccata capacità di free-swell. Confrontando inoltre i metodi di preparazione dei campioni, si nota come il Wet-Mix con il 5% di PA aumenti il rigonfiamento del materiale portandolo ad un livello simile a quello del Dry-Mix ma con una quantità di PA doppia (10%).

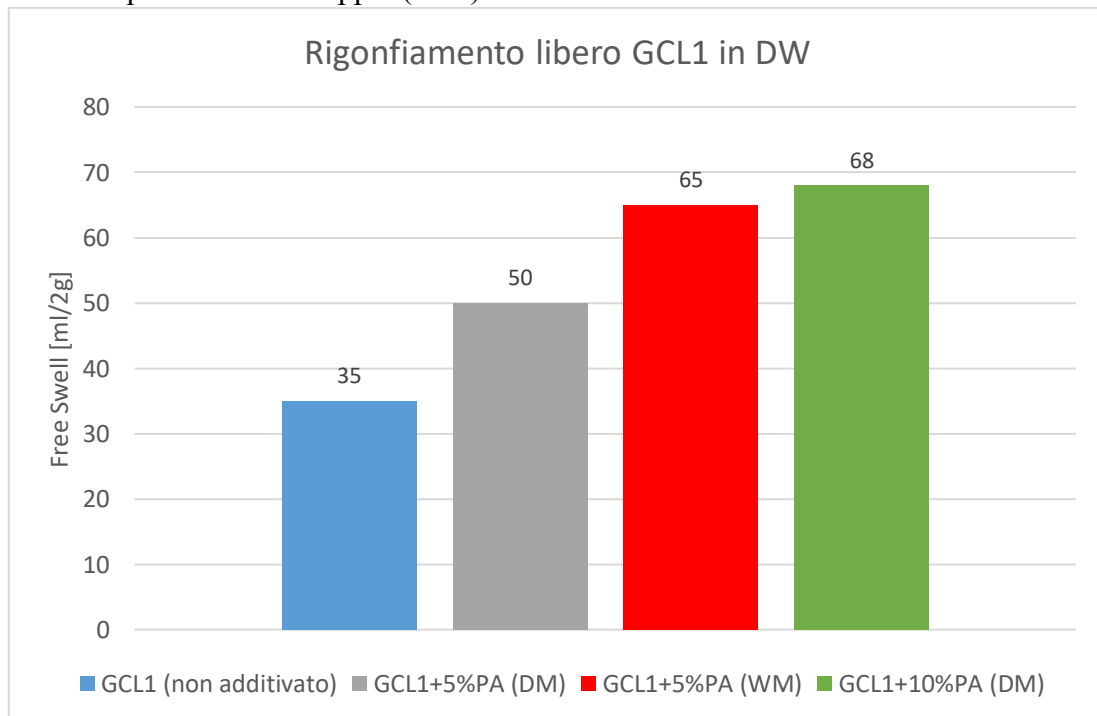


Figura 117: Confronti rigonfiamento libero dei campioni GCL1 in DW.

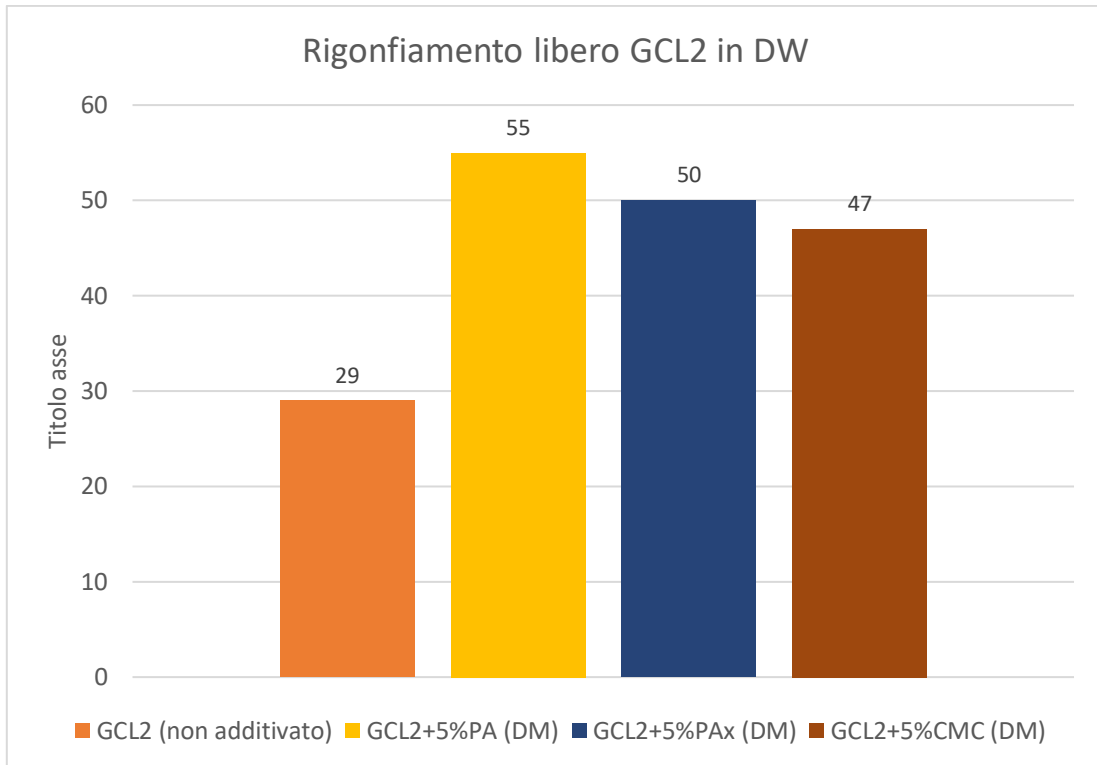


Figura 118: Confronti rigonfiamento libero dei campioni GCL2 in DW.

5.1.2 Rigonfiamento libero a parità di bentonite in CaCl₂

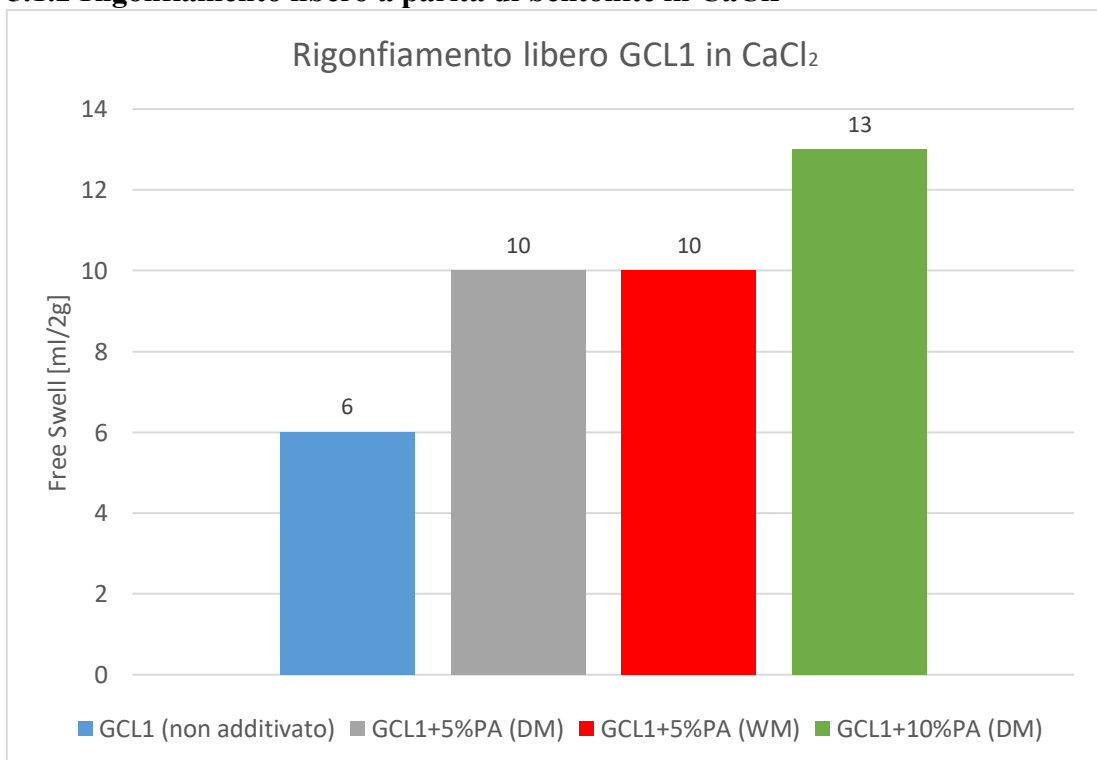


Figura 119: Confronti rigonfiamento libero dei campioni GCL1 in CaCl₂.

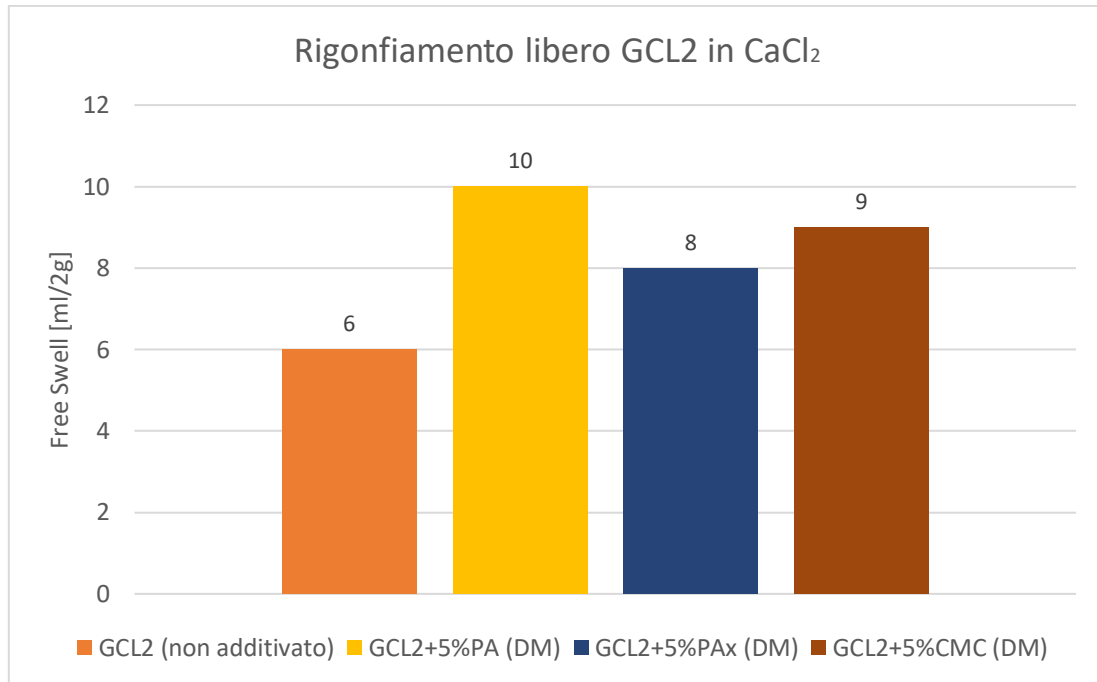


Figura 120: Confronti rigonfiamento libero dei campioni GCL2 in CaCl₂.

In soluzioni aggressive, come quelle ricche di ioni calcio, la ridotta capacità della bentonite di rigonfiare è ben nota. L'aggiunta di polimero aiuta il rigonfiamento del materiale portandolo a dei livelli più elevati rispetto alla bentonite non additivata. In CaCl₂ non si nota tuttavia una differenza di swell rilevante tra i vari polimeri utilizzati, però vi è una differenza tra GCL naturale e bentonite additivata. L'aggiunta di poliacrilammide produce un risultato migliore in termini di free-swell. A differenza dell'acqua distillata, non si nota una differenza di rigonfiamento tra il Dry-Mix ed il Wet-Mix, vi è però un incremento dello swell all'aumentare del polimero, anche se non è così marcato come la differenza di quantità di PA utilizzata (5%→10%; 10→13 [g/2ml]).

5.1.3 Conclusioni sul rigonfiamento libero in DW

Confrontando lo swell tra il materiale additivato e non additivato, si nota subito come l'aggiunta di polimero aiuti il rigonfiamento libero della bentonite. Poi, prendendo in considerazione il free-swell sui due materiali utilizzati, la bentonite non additivata utilizzata nei GCL1 presenta migliori capacità di rigonfiamento rispetto a quella dei GCL2. Inoltre, a parità di tipologia (poliacrilammide-PA), percentuale in massa (5%) e metodo di preparazione (DM) la PA fornisce una migliore capacità di rigonfiamento se miscelata con la GCL2 rispetto alla GCL1. Confrontando invece lo swelling tra i vari materiali additivati con i polimeri, anche qui la PA presenta un rigonfiamento più spiccato rispetto alla CMC ed alla PAX, con uno stacco marcato nel caso di miscele additate con percentuali maggiori di PA (10%) o con il Wet-Mix. Le bentoniti additate con CMC e PAX risultano molto vicine in termini di free swell (≈50 ml/2g).

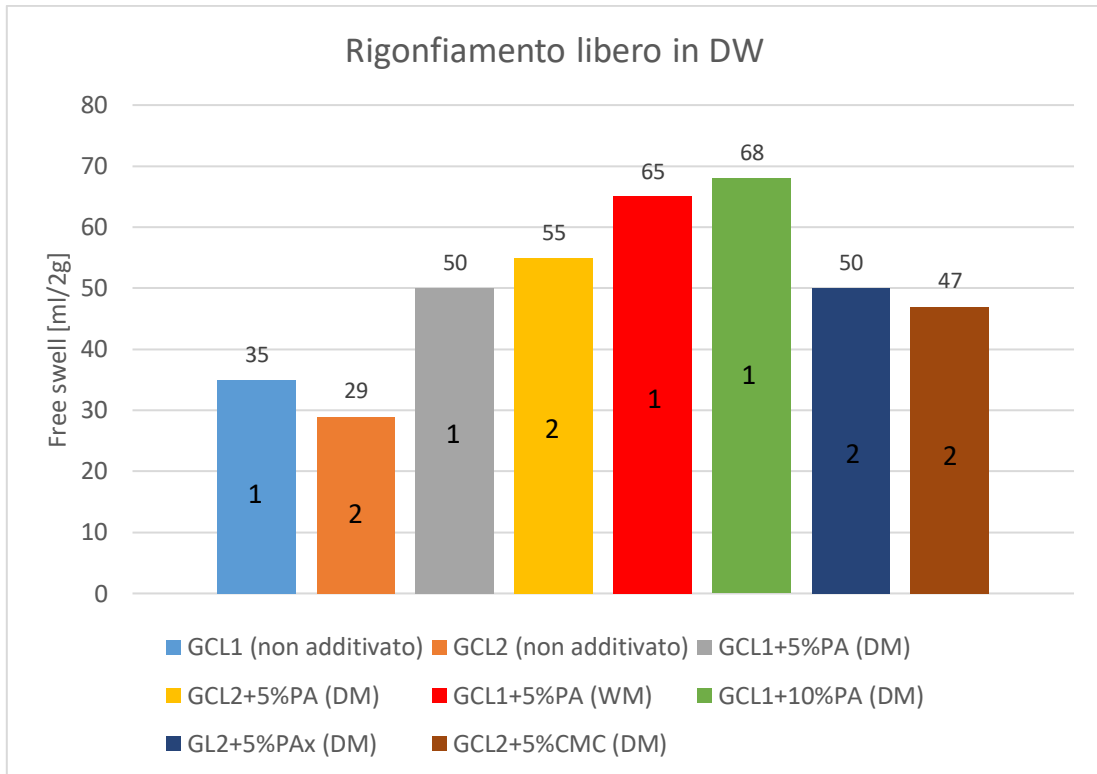


Figura 121: Rigonfiamento libero di tutte le miscele in DW.

5.1.4 Conclusioni sul rigonfiamento libero in CaCl₂

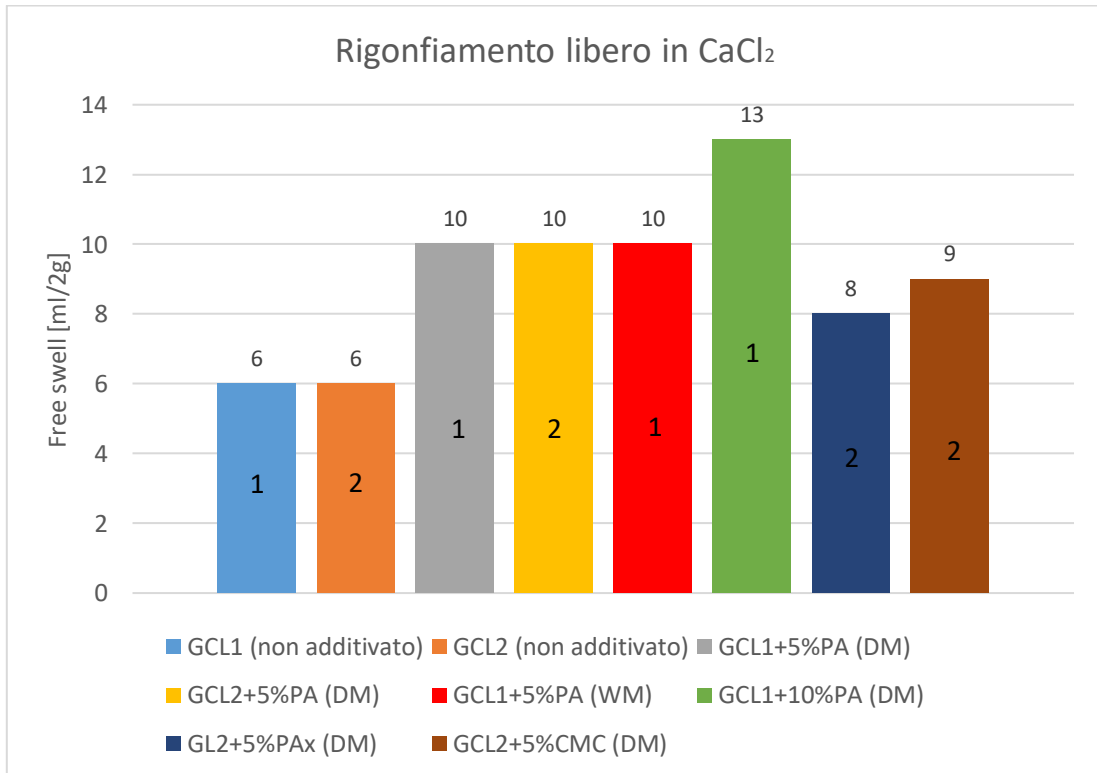


Figura 122: Rigonfiamento libero di tutte le miscele in CaCl₂.

Confrontando il rigonfiamento delle varie miscele in CaCl₂ si nota come l'aggiunta di polimero aiuti il rigonfiamento del materiale. Considerando la bentonite non additivata, non vi sono differenze di rigonfiamento tra i due materiali utilizzati (GCL1 e GCL2). Considerando le miscele con i polimeri, queste presentano un rigonfiamento maggiore rispetto alla bentonite naturale. Invece, tra i GCL additivati non si notano differenze rilevanti di swell nel passaggio da un polimero ad un altro e da una tecnica di mix ad un'altra (dry e wet). Tranne la poliacrilammide al 10% che presenta un rigonfiamento maggiore rispetto alle altre miscele ma non così rilevante come la differenza di percentuale in massa di polimero (5%→10%; 10→13 [g/2ml]).

5.1.5 Conclusioni generali sul rigonfiamento libero

Di seguito è riportato un grafico riassuntivo che ha lo scopo di sottolineare come l'utilizzo di liquidi molto aggressivi (nel nostro caso la CaCl₂ a 167mM) inibisca il rigonfiamento di materiali costituiti da bentonite di sodio rispetto alla DW, portando di conseguenza anche ad un peggioramento della permeabilità. L'additivazione con polimero invece aumenta lo swelling nei due liquidi utilizzati, anche se l'incremento più drastico si nota in DW rispetto alla CaCl₂.

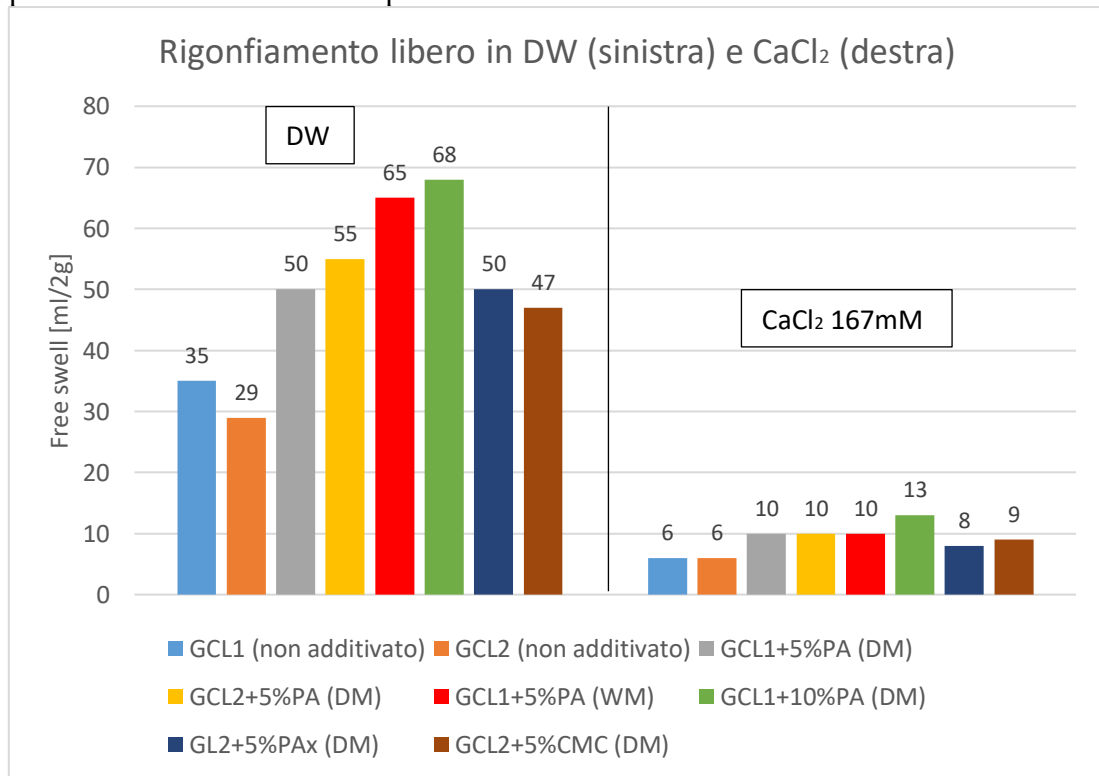


Figura 123: Rigonfiamento libero di tutte le miscele in DW e CaCl₂.

5.2 Idratazione e rigonfiamento a pressione costante in edometro

I risultati della prova di idratazione e rigonfiamento in edometro a pressione costante (35kPa) sono riassunti nella seguente Tabella 35.

Tabella 35: Variazioni di altezza e peso nella prova edometrica a pressione costante.

Variazioni di altezza e peso prova edometrica								
Campione	Polimero	Liq. edometro	H ₁	H ₂	ΔH	P ₁	P ₂	ΔP
[-]	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[g]	[g]	[g]
GCL1.1	Non additivato	DW	0,70	0,92	0,22	36,36	81,35	44,99
GCL1.2	Non additivato	CaCl ₂	0,60	0,60	0,00	36,36	63,65	27,29
GCL1.3	5% PA (DM)	DW	0,65	1,08	0,43	38,01	97,77	59,76
GCL1.4	5% PA (DM)	CaCl ₂	0,65	0,71	0,06	38,01	71,00	32,99
GCL1.5	10% PA (DM)	CaCl ₂	0,70	0,76	0,06	39,60	80,30	40,40
GCL1.6	5% PA (WM)	DW	0,65	1,17	0,52	35,60	116,38	80,78
GCL1.7	5% PA (WM)	CaCl ₂	0,60	0,67	0,07	35,60	69,42	33,82
GCL2.3	Non additivato	DW	0,70	1,07	0,37	46,33	119,16	72,83
GCL2.4	Non additivato	CaCl ₂	0,84	0,84	0,00	46,33	93,41	47,08
GCL2.5	5% PA (DM)	DW	0,70	1,31	0,61	48,53	145,64	97,11
GCL2.6	5% PA (DM)	CaCl ₂	0,84	0,87	0,03	48,53	95,80	47,27
GCL2.7	5% PAx (DM)	DW	0,70	1,17	0,47	48,53	131,66	83,13
GCL2.8	5% PAx (DM)	DW	0,75	1,27	0,52	48,53	135,40	86,87
GCL2.9	5% PAx (DM)	CaCl ₂	0,70	0,71	0,01	48,53	87,11	38,58
GCL2.10	5% CMC (DM)	DW	0,80	1,30	0,50	48,53	132,84	84,31
GCL2.11	5% CMC (DM)	CaCl ₂	0,80	0,84	0,04	48,53	94,27	45,74

Nota: $\Delta H = H_2 - H_1$; $\Delta P = P_2 - P_1$; H_1 = altezza iniziale del campione stimata partendo dall'altezza finale misurata; H_2 = altezza finale del campione; P_1 = Peso iniziale del campione; P_2 = Peso finale del campione.

5.2.1 Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL1 in DW

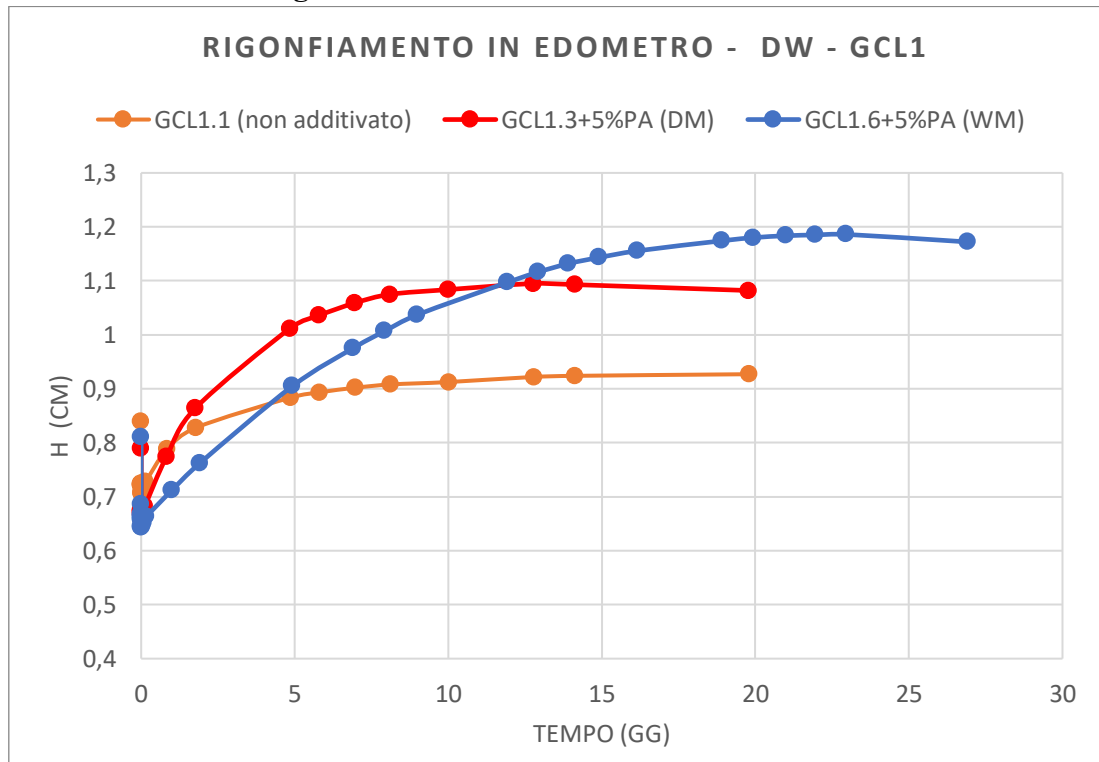


Figura 124: Rigonfiamento in edometro GCL1 in DW, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

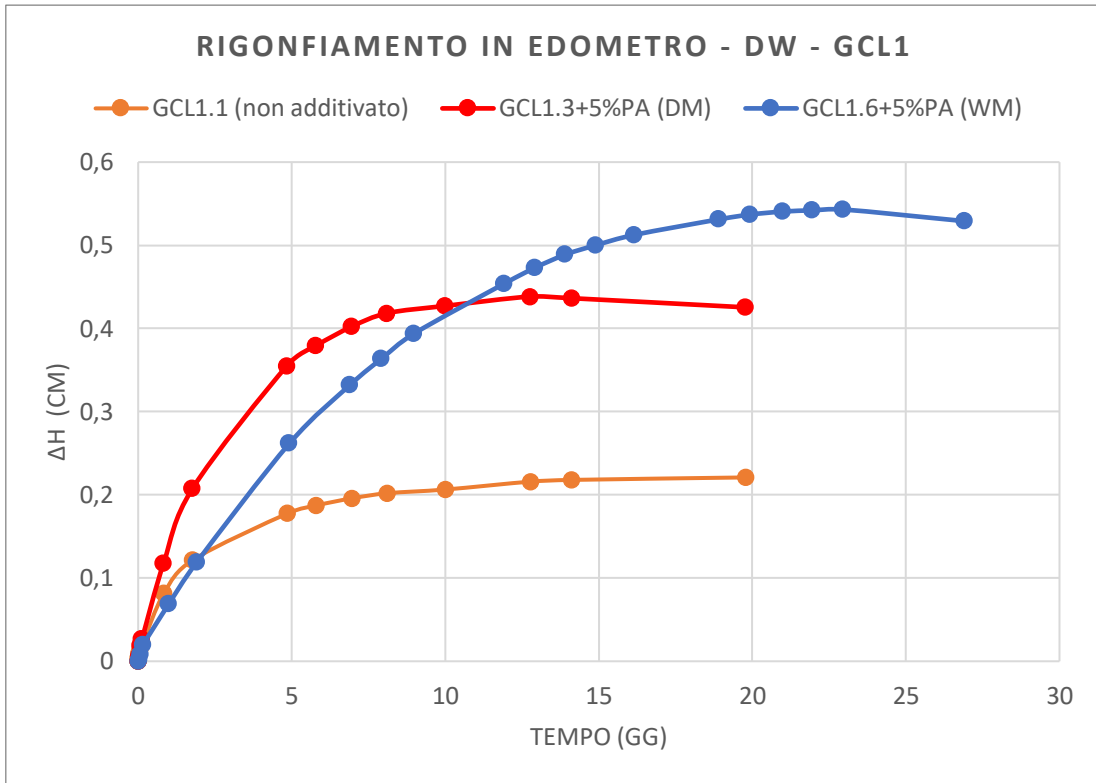


Figura 125: Rigonfiamento in edometro GCL1 in DW, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

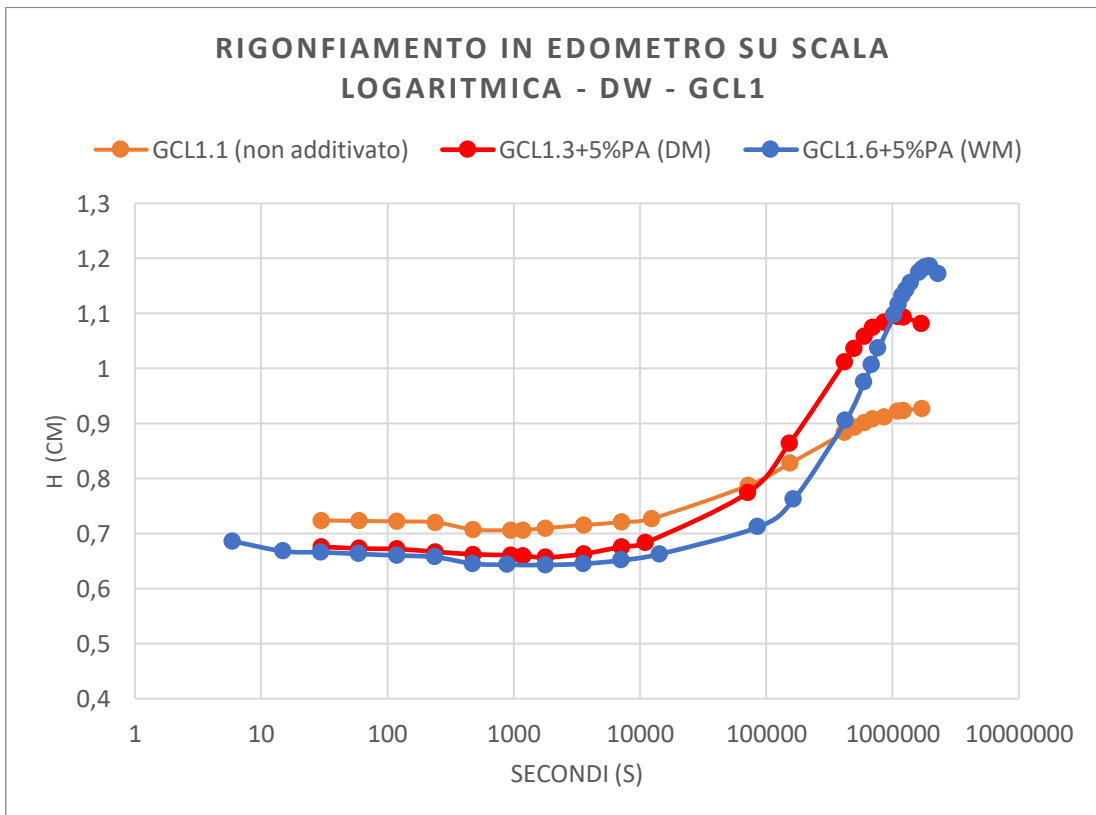


Figura 126: Rigonfiamento in edometro GCL1 in DW, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

Confrontando i risultati della prova di rigonfiamento in edometro della bentonite GCL1 in DW, si nota subito come l'additivazione del materiale con i polimeri aumenti lo swell sotto una pressione costante (35 kPa). Tra i due campioni additivati, quello realizzato con la tecnica Wet-Mix presenta una maggiore capacità di rigonfiamento rispetto a quello realizzato con il Dry-Mix.

5.2.2 Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL2 in DW

Confrontando i risultati della prova di idratazione e rigonfiamento in edometro della bentonite GCL2 in DW (Figure 127, 128, 129), si nota anche qui come l'additivazione con i polimeri aumenti lo swell sotto una pressione costante (35 kPa). Nel seguente caso, tra tutti i polimeri utilizzati, la poliacrilammide consente un maggiore rigonfiamento del materiale rispetto agli altri polimeri (CMC e PAX). Tra questi ultimi due, invece, lo swell sotto pressione risulta quasi paragonabile.

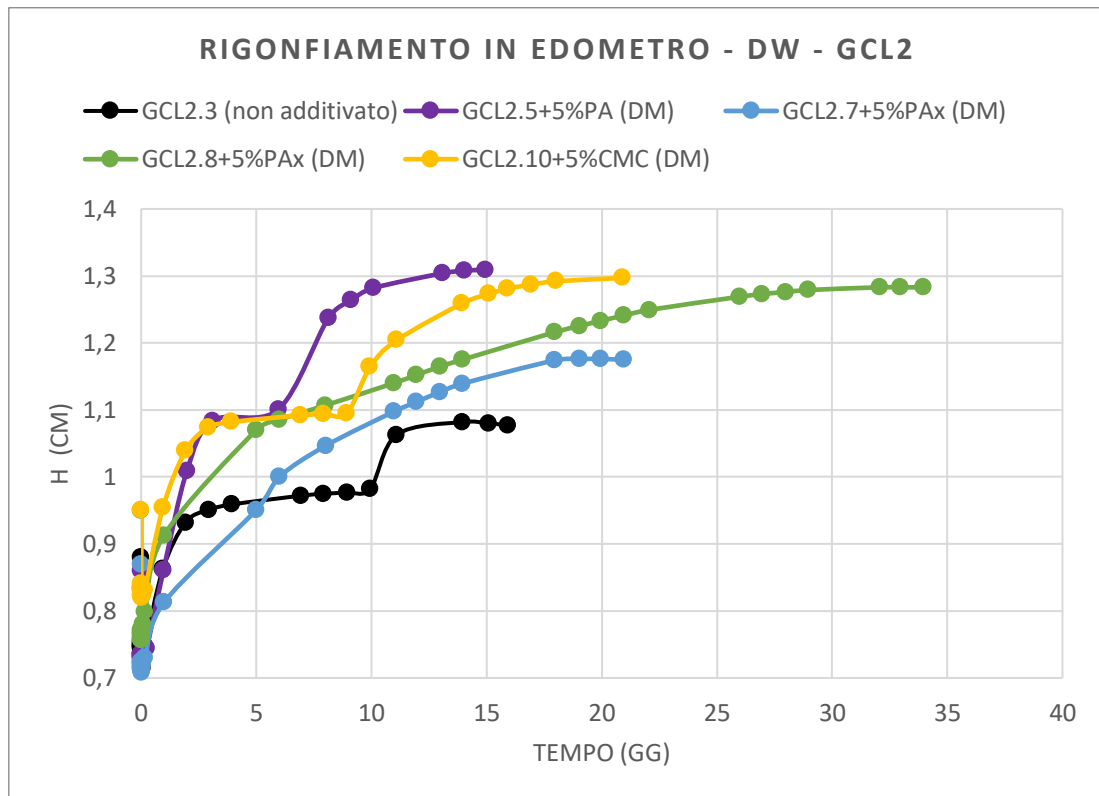


Figura 127: Rigonfiamento in edometro GCL2 in DW, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

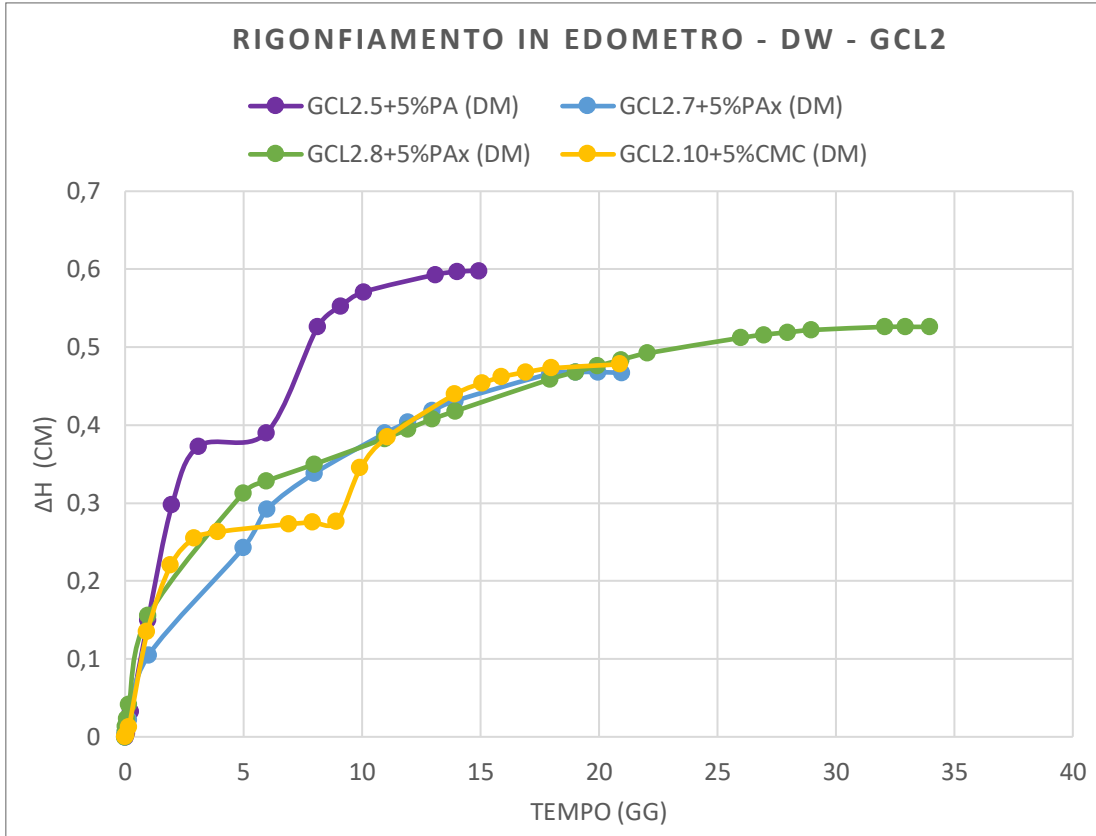


Figura 128: Rigonfiamento in edometro GCL2 in DW, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

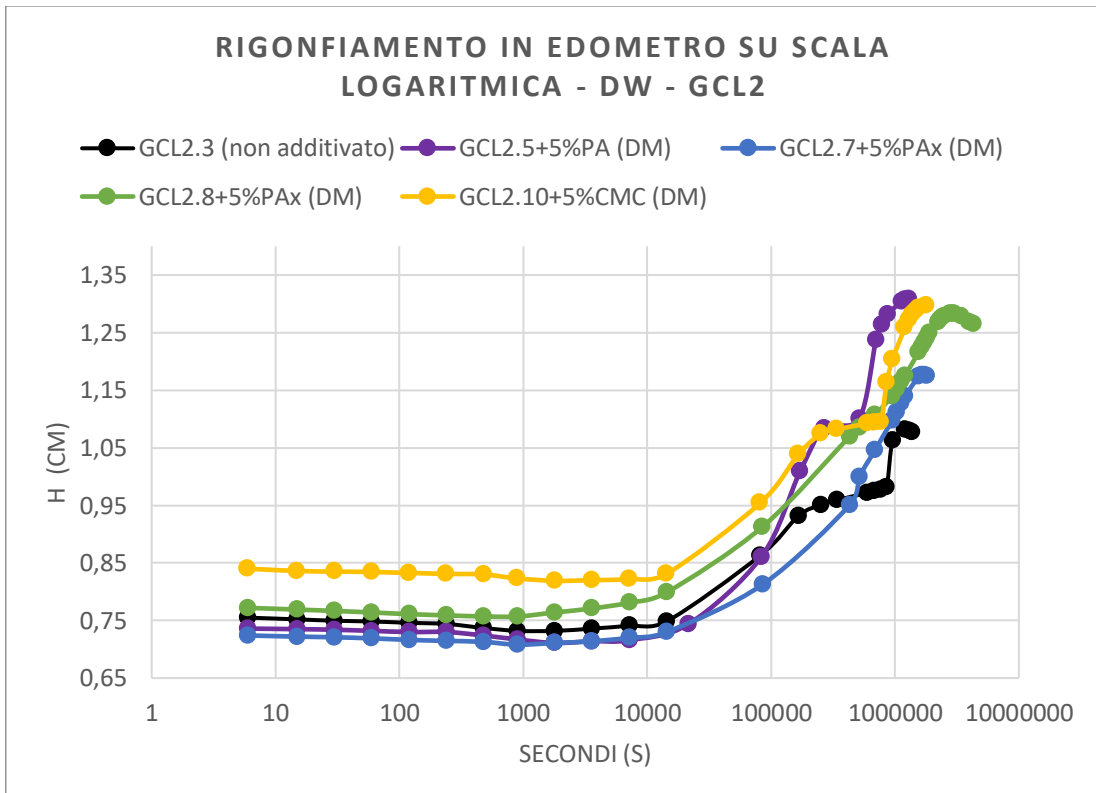


Figura 129: Rigonfiamento in edometro GCL2 in DW, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

5.2.3 Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL non additivati in DW

Confrontando i risultati della prova di idratazione e rigonfiamento in edometro a pressione costante tra i due campioni di GCL non additivati, si nota come GCL2 presenti migliori capacità di rigonfiamento rispetto a GCL1 a parità di massa di bentonite (Figura 132).

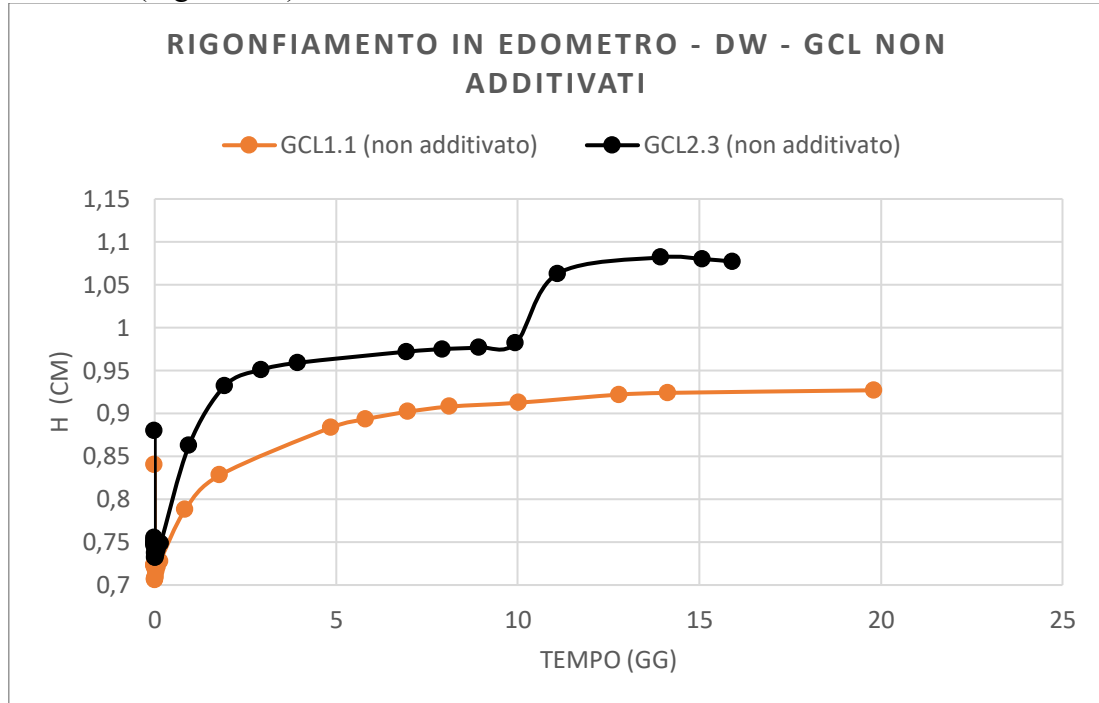


Figura 130: Rigonfiamento in edometro GCL non additivati in DW, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

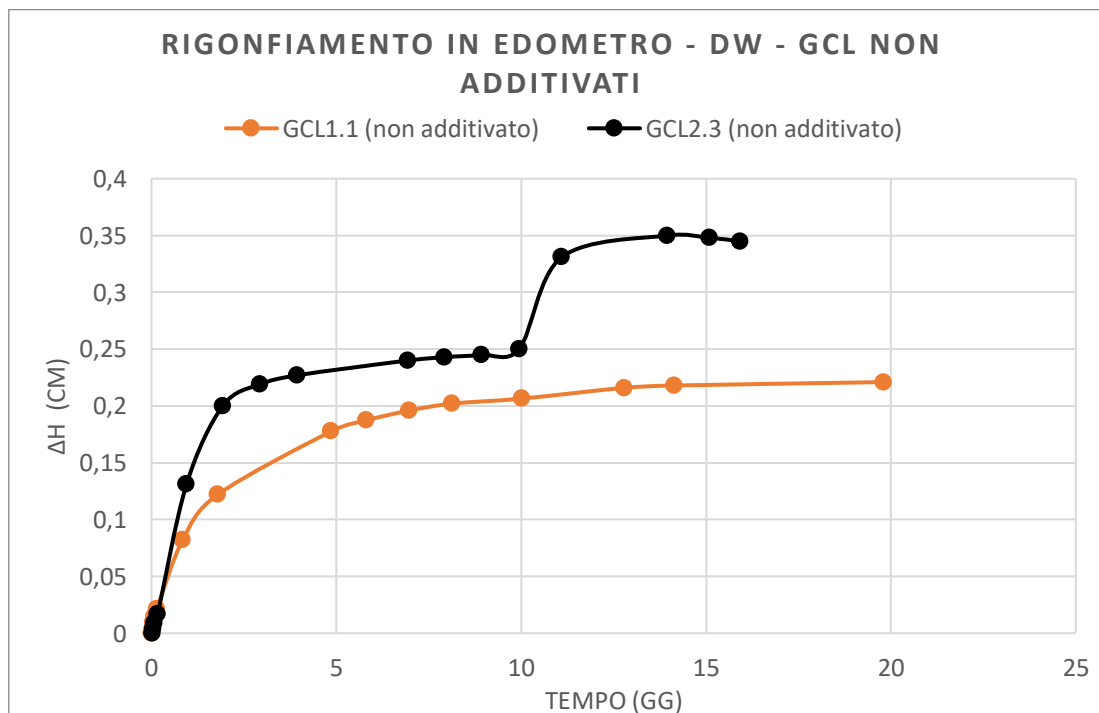


Figura 131: Rigonfiamento in edometro GCL non additivati in DW, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

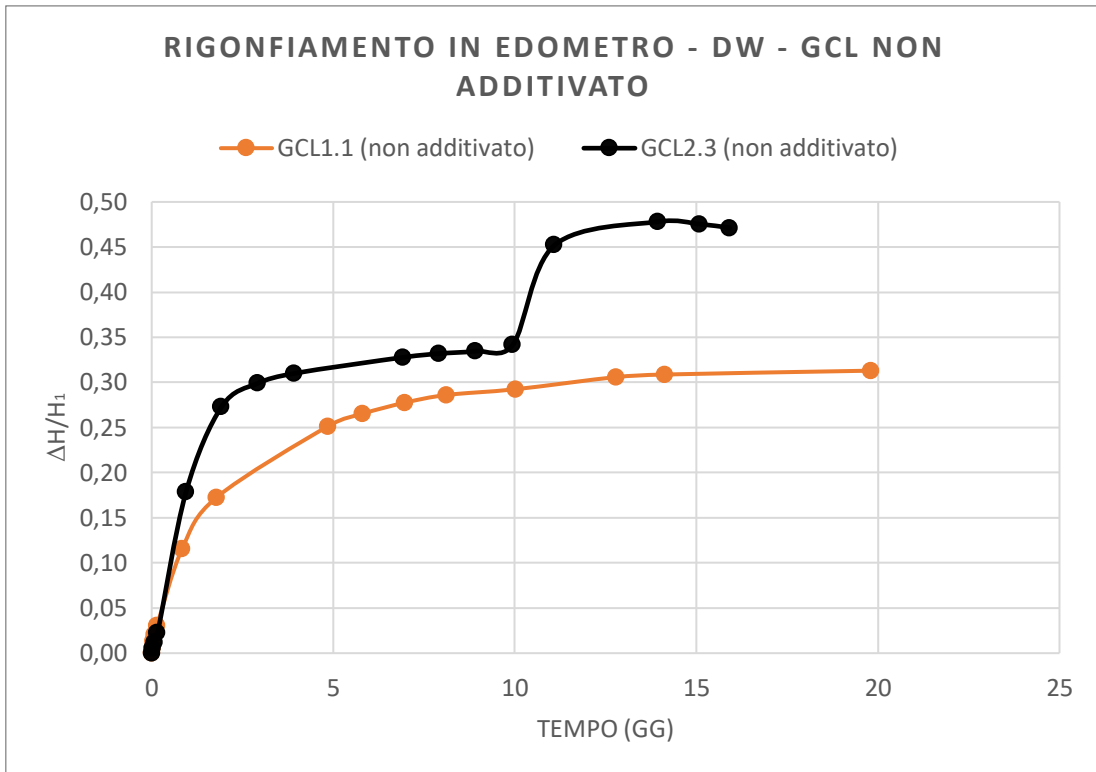


Figura 132: Rigonfiamento in edometro GCL non additivati, rapporto rigonfiamento – altezza iniziale del campione nel tempo. Nota: la relazione $\Delta H/H_1$ consente di confrontare il rigonfiamento di campioni contenenti masse di materiali diverse.

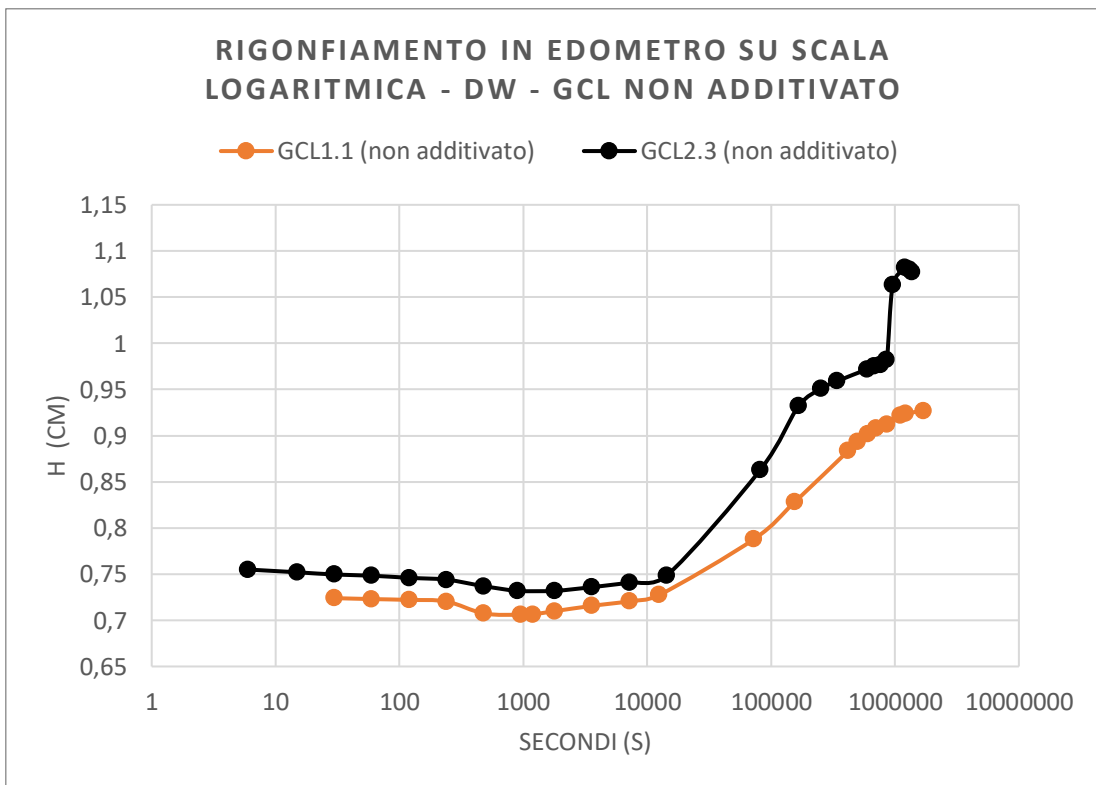


Figura 133: Rigonfiamento in edometro GCL non additivati in DW, variazione dell' altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

5.2.4 Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL additivati con PA in DW

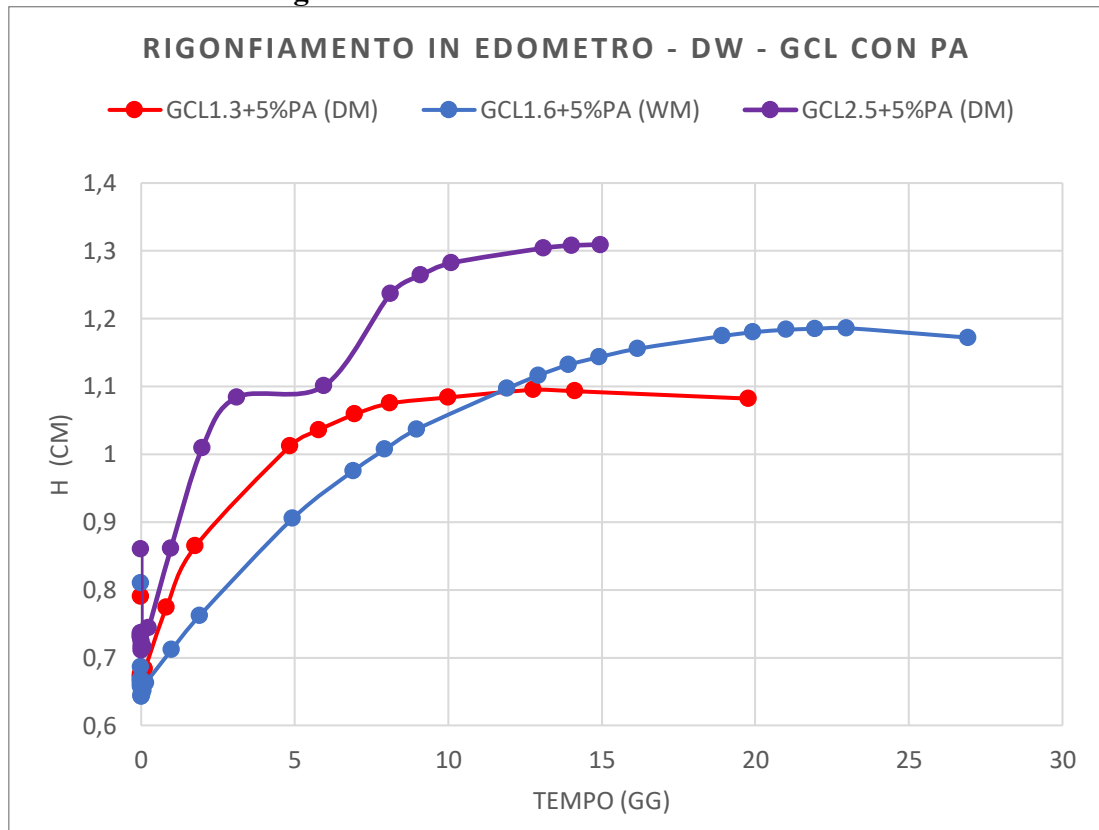


Figura 134: Rigonfiamento in edometro GCL additivati con PA in DW, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

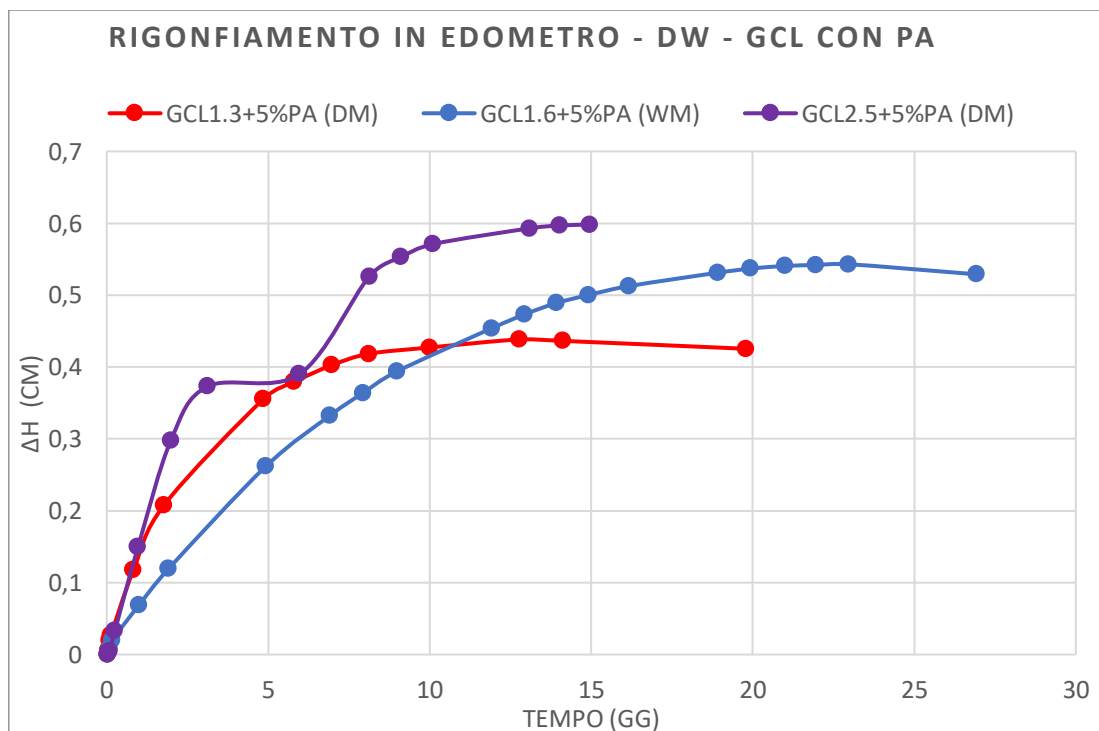


Figura 135: Rigonfiamento in edometro GCL additivati con PA in DW, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

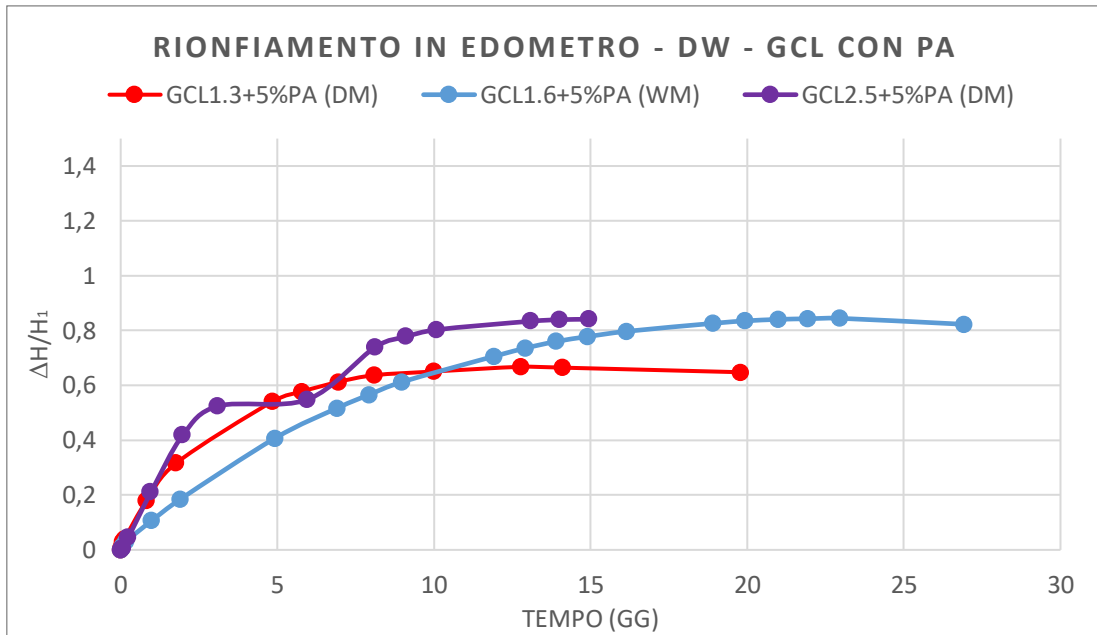


Figura 136: Rigonfiamento in edometro GCL con PA, rapporto rigonfiamento – altezza iniziale del campione nel tempo. Nota: la relazione $\Delta H/H_1$ consente di confrontare il rigonfiamento di campioni contenenti masse di materiali diverse.

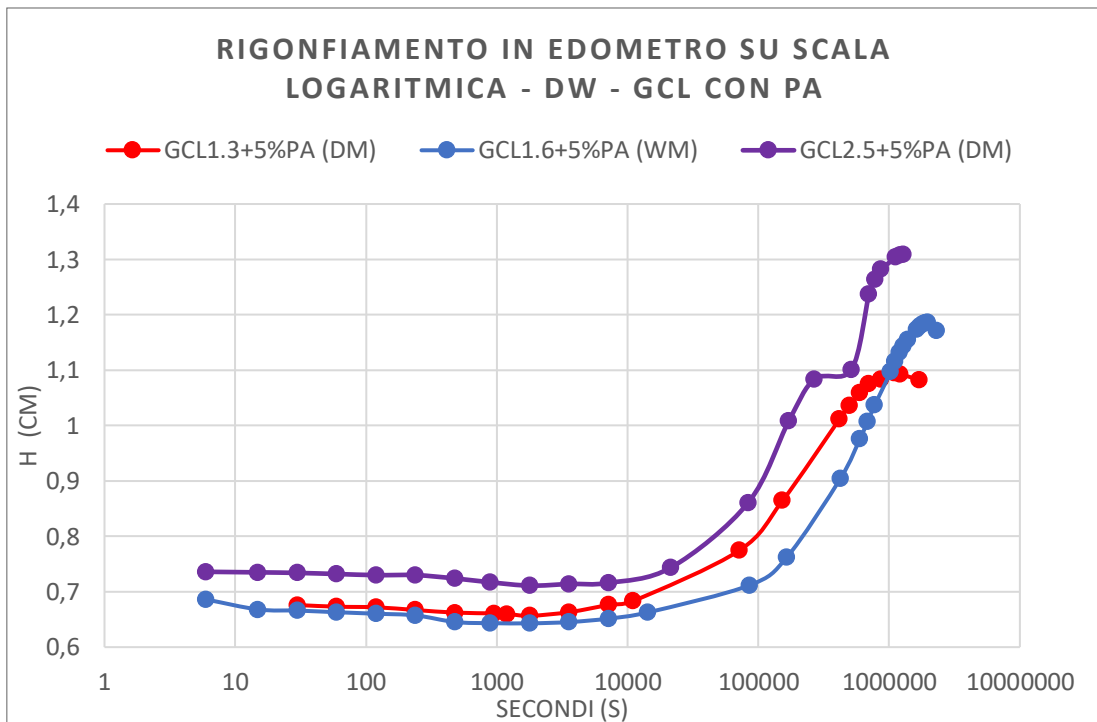


Figura 137: Rigonfiamento in edometro GCL additivati con PA in DW, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

Confrontando i risultati della prova di idratazione e rigonfiamento in edometro a pressione costante in DW tra i GCL additivati con PA, notiamo come le due GCL presentino un rigonfiamento quasi simile a parità di massa di bentonite (Figura 136). In particolare, GCL2.5+5%PA (DM) e GCL1.6+5%PA (WM) hanno un rigonfiamento molto vicino tra loro.

5.2.5 Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL1 in CaCl₂

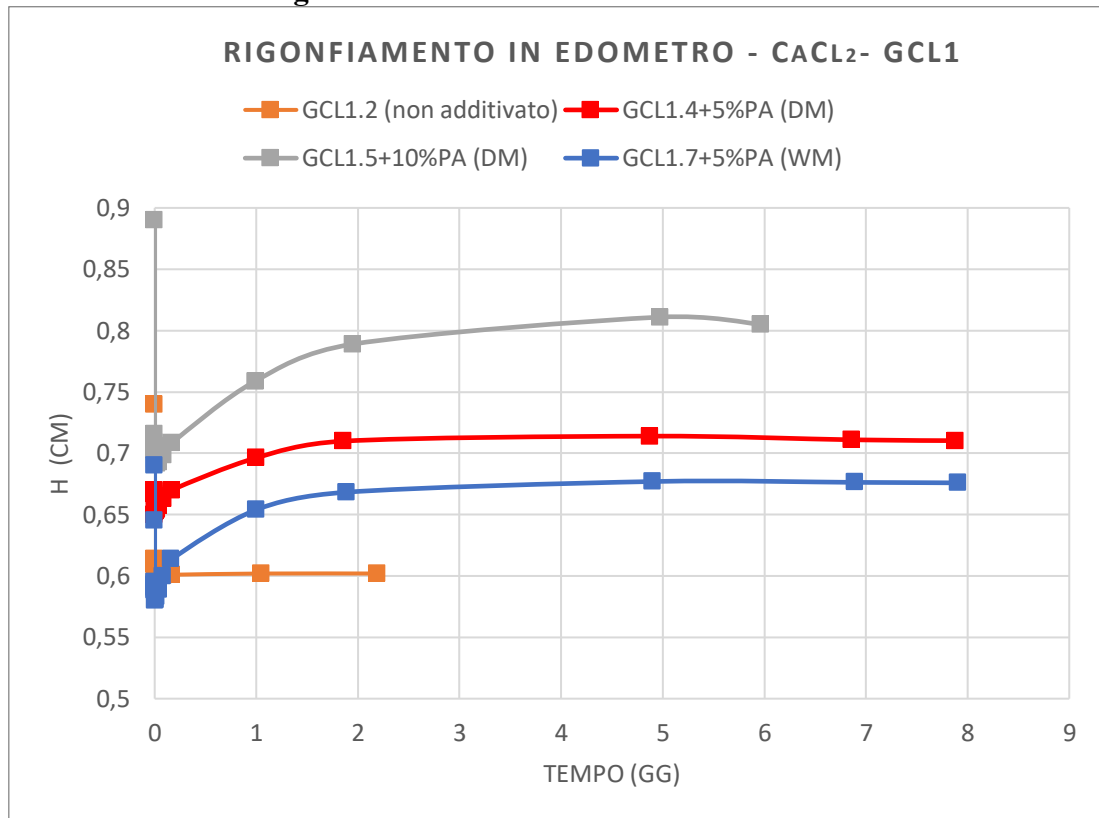


Figura 138: Rigonfiamento in edometro GCL1 in CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

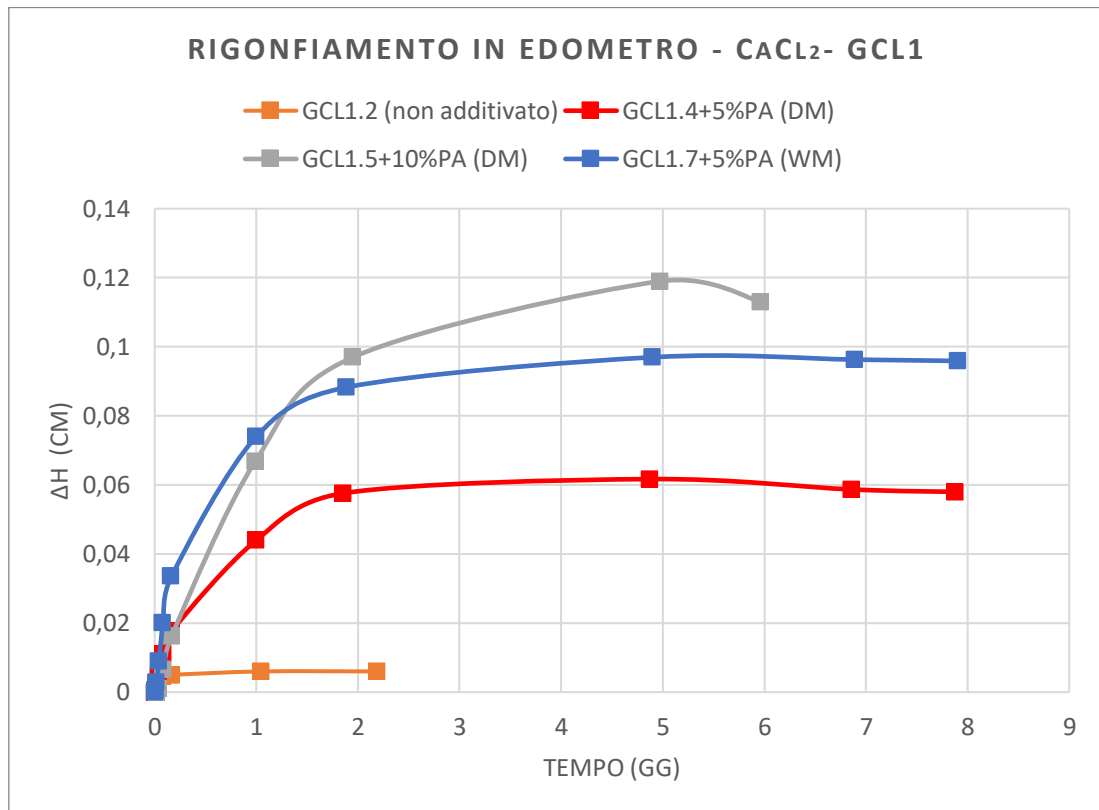


Figura 139: Rigonfiamento in edometro GCL1 in CaCl₂, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

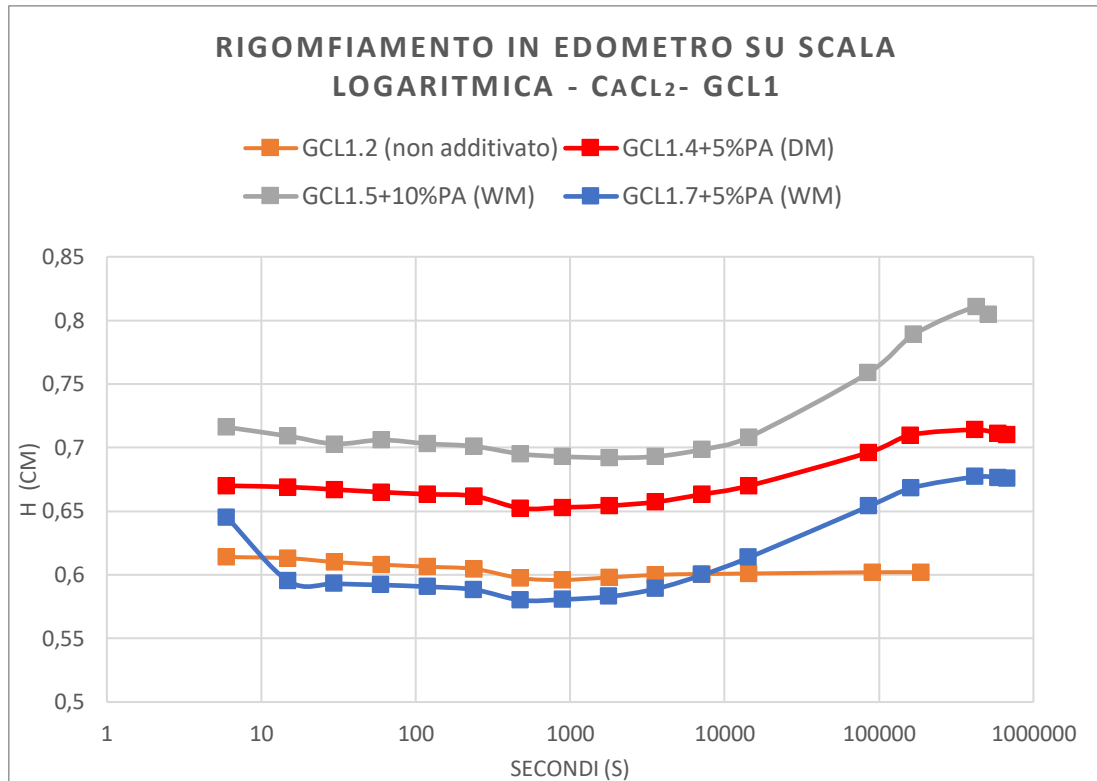


Figura 140: Rigonfiamento in edometro GCL1 in CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

Confrontando i risultati della prova di idratazione e rigonfiamento in edometro a pressione costante in CaCl₂ della bentonite GCL1, si nota come l'utilizzo di un liquido aggressivo inibisca lo swelling del materiale. L'additivazione con i polimeri determina un incremento del rigonfiamento della bentonite, in particolare si può notare come il Wet-Mix e l'utilizzo di una percentuale maggiore di PA (10%) in Dry-Mix vadano ad influenzare lo swelling del materiale in maniera più rilevante rispetto all'utilizzo di una percentuale minore (5%) di PA. Inoltre, il Wet-Mix con una percentuale in massa di poliacrilammide al 5% ed il Dry-Mix con una percentuale in massa del 10% presentano un rigonfiamento quasi uniforme tra loro.

5.2.6 Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL2 in CaCl₂

Confrontando i risultati della prova di idratazione e rigonfiamento in edometro a pressione costante in CaCl₂ della bentonite GCL2 (Figure 140, 141, 142), si nota come l'utilizzo di polimeri (PA e CMC) incrementi il rigonfiamento in presenza di liquidi aggressivi. In particolare, l'additivazione con PA conferisce una capacità di rigonfiamento migliore rispetto alla CMC. Un dato particolare è la totale assenza di swelling nella bentonite additivata con la PAX, comportamento che risulta identico a quello della Na-B non additivata. Questo dato è molto probabilmente associato all'incapacità della PAX di formare un idrogel in presenza di un liquido aggressivo come quello utilizzato.

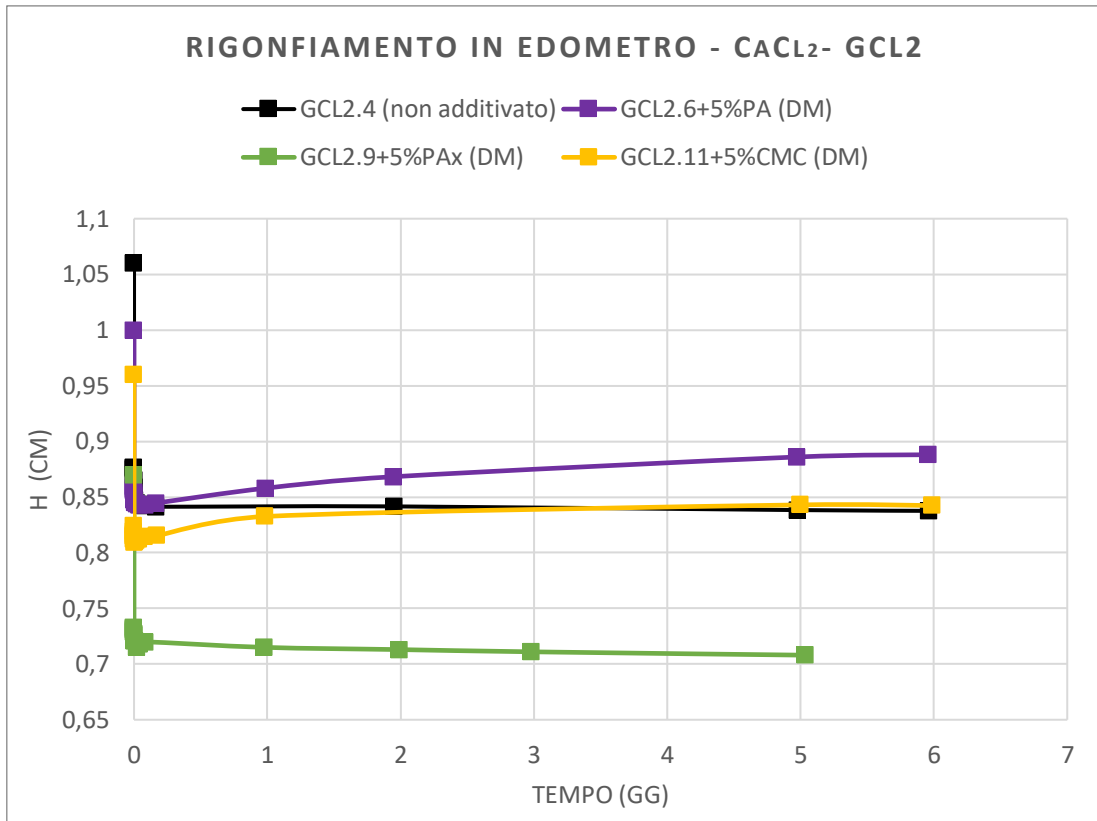


Figura 141: Rigonfiamento in edometro GCL2 in $CaCl_2$, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

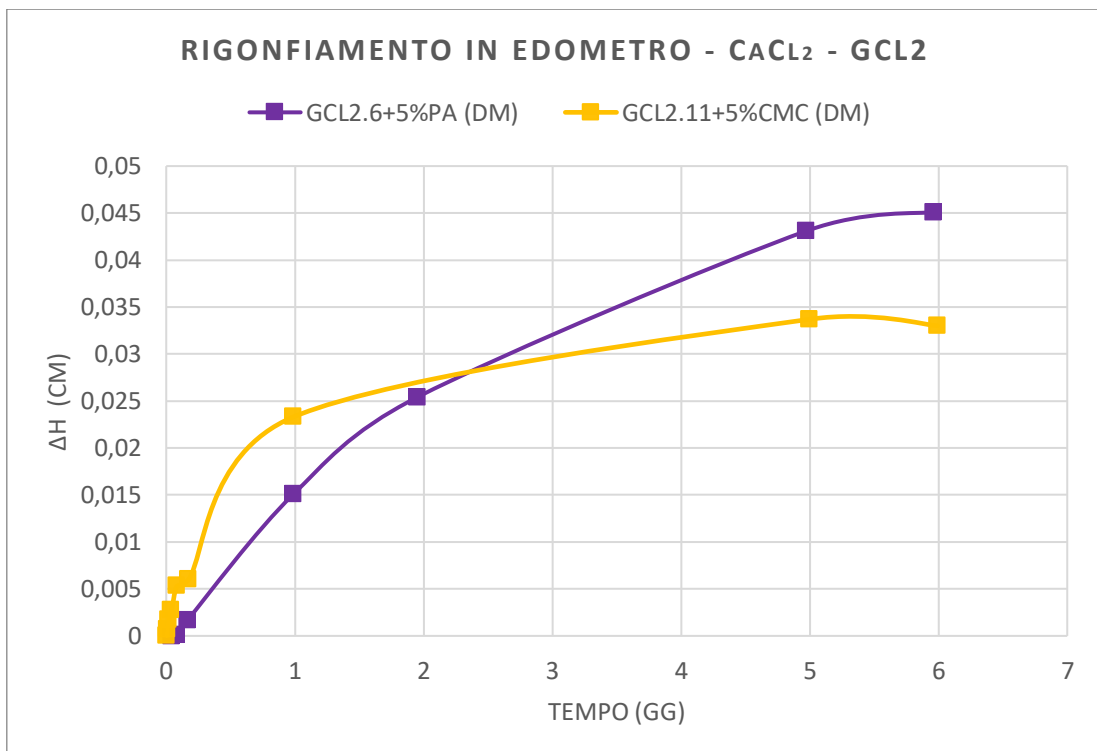


Figura 142: Rigonfiamento in edometro GCL1 in $CaCl_2$, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

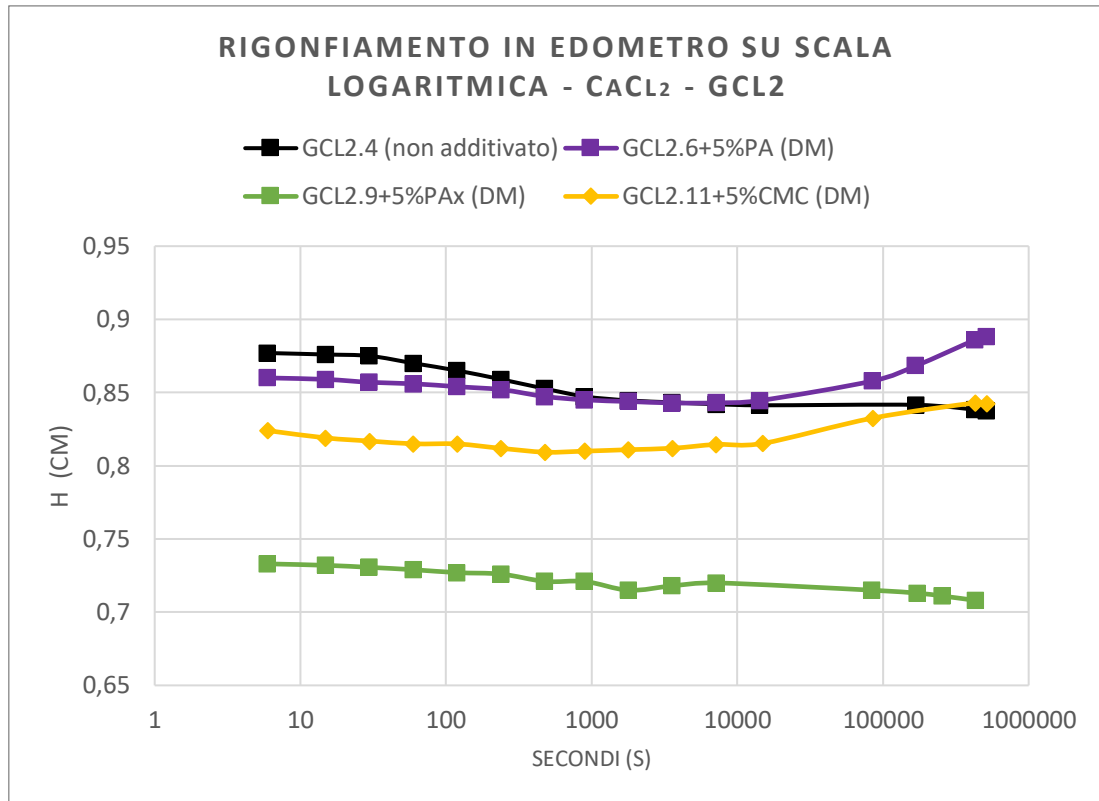


Figura 143: Rigonfiamento in edometro GCL1 in $CaCl_2$, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

5.2.7 Idratazione e rigonfiamento in edometro dei GCL additivati con PA in $CaCl_2$

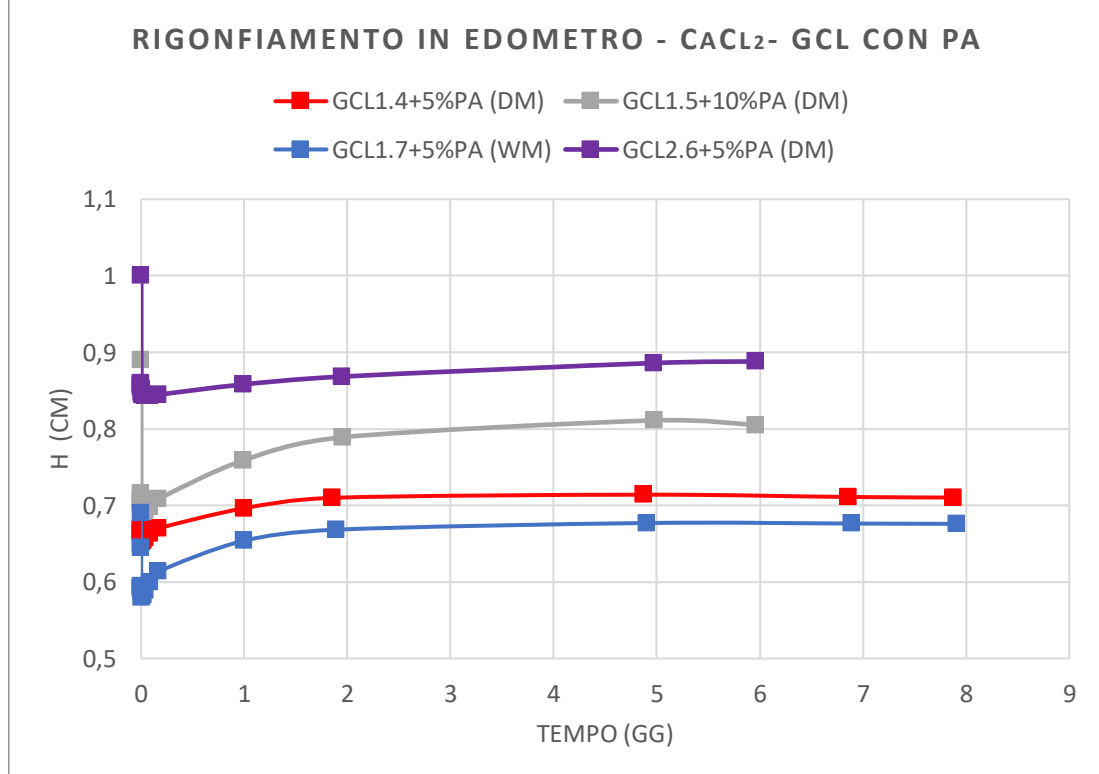


Figura 144: Rigonfiamento in edometro GCL additivati con PA in $CaCl_2$, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

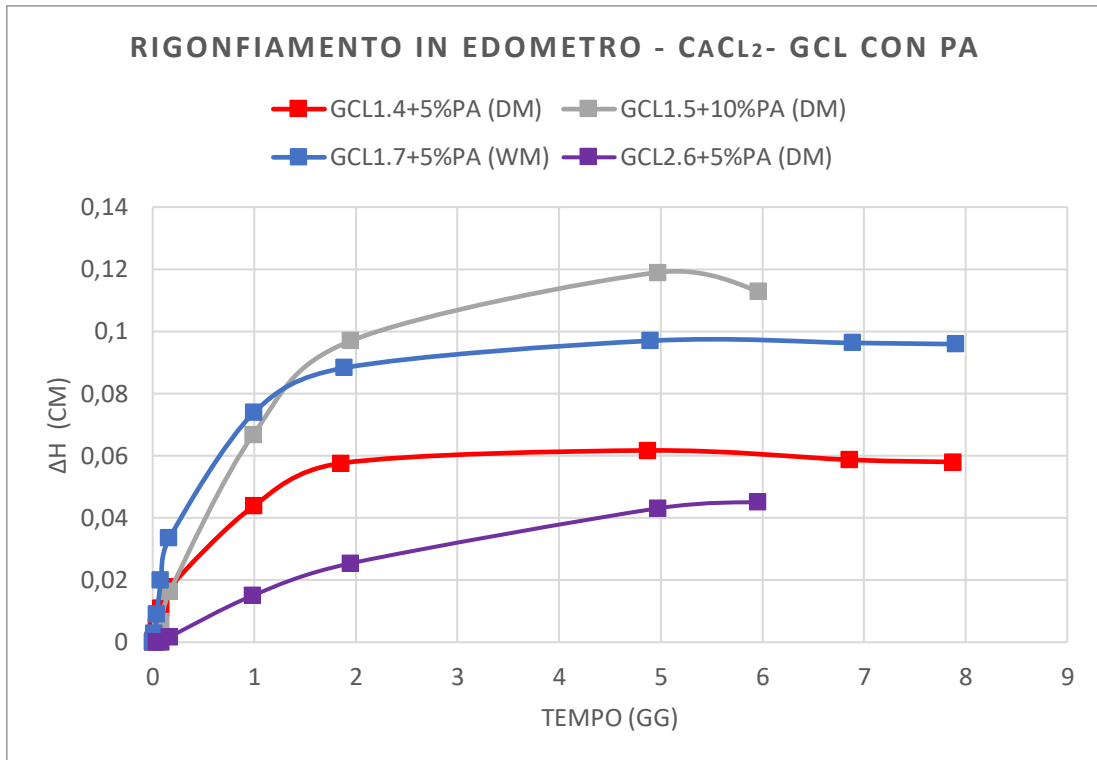


Figura 145: Rigonfiamento in edometro GCL additivati con PA in CaCl_2 , rigonfiamento del campione nel tempo.

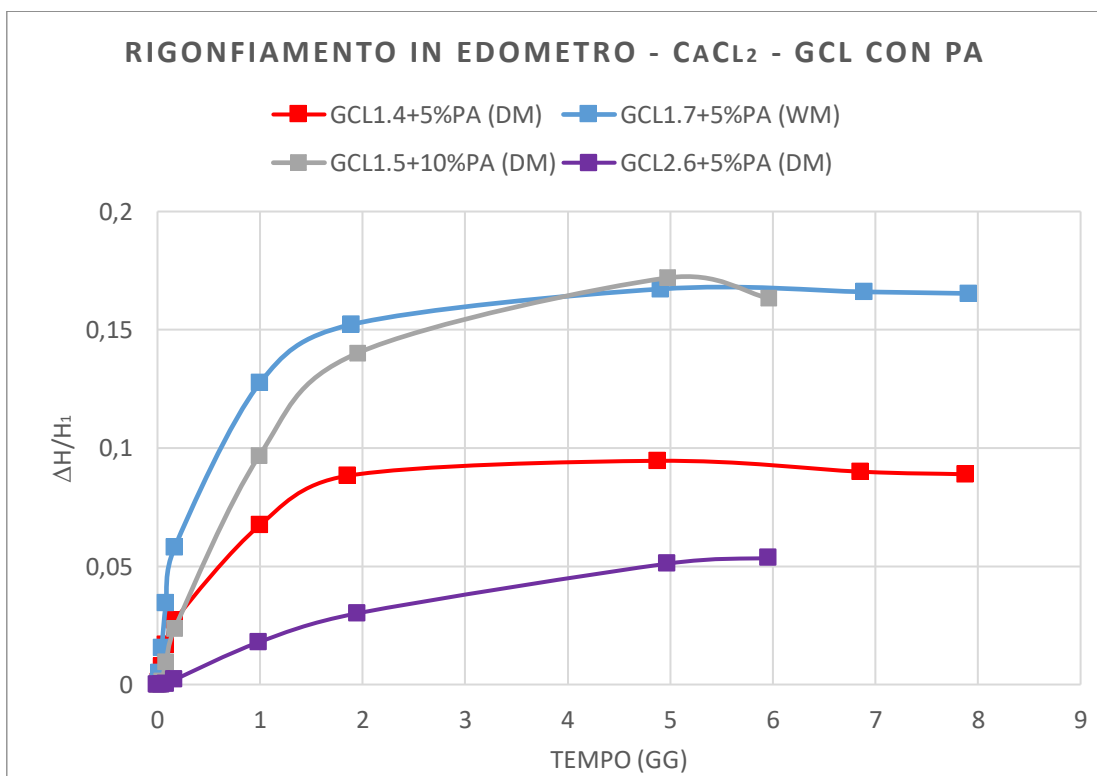


Figura 146: Rigonfiamento in edometro GCL con PA, rapporto rigonfiamento – altezza iniziale del campione nel tempo. Nota: la relazione $\Delta H/H_1$ consente di confrontare il rigonfiamento di campioni contenenti masse di materiali diverse.

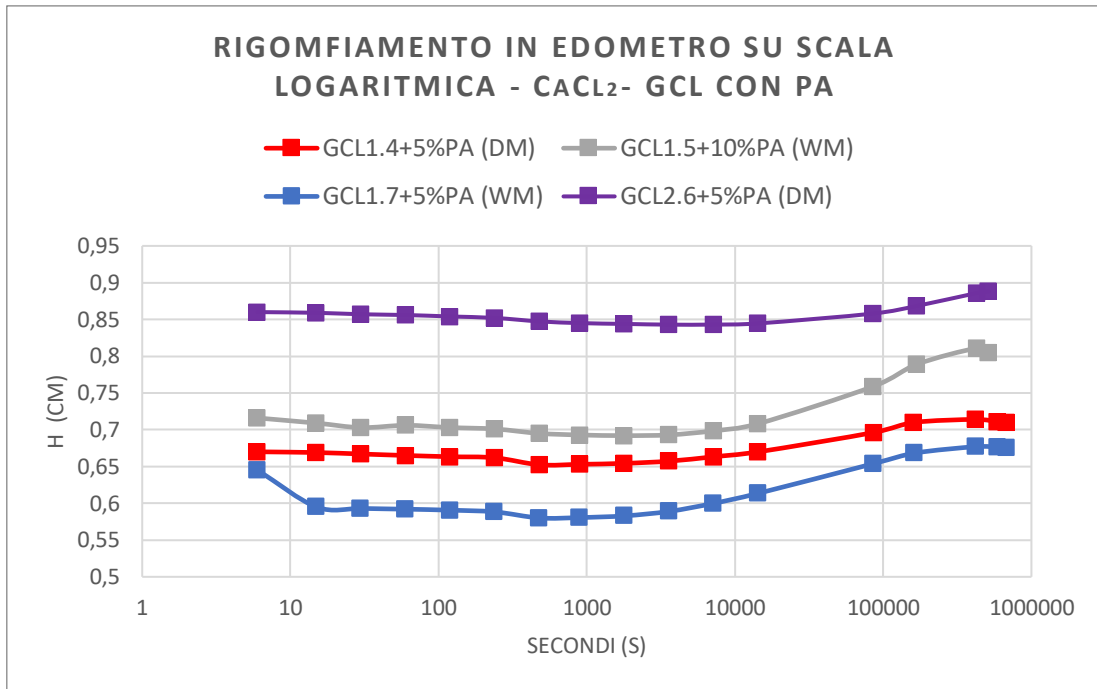


Figura 147: Rigonfiamento in edometro GCL additivati con PA in CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

Confrontando i risultati della prova di idratazione e rigonfiamento in edometro a pressione costante in CaCl₂ dei GCL additivati con PA, si nota come la GCL1+PA presenti delle migliori capacità di miglioramento rispetto alla GCL2+PA.

5.2.8 Influenza del liquido utilizzato sulla prova di idratazione e rigonfiamento in edometro a pressione costante

La scarsa capacità della bentonite di rigonfiare quando viene a contatto con liquidi aggressivi (come la soluzione di CaCl₂ a 167 mM) è ben nota, di seguito viene sottolineata tale condizione mettendo a confronto i campioni preparati con lo stesso metodo (additivati e non) ma idratati con liquidi diversi (DW e CaCl₂).

- GCL1 non additivati in DW e CaCl₂.

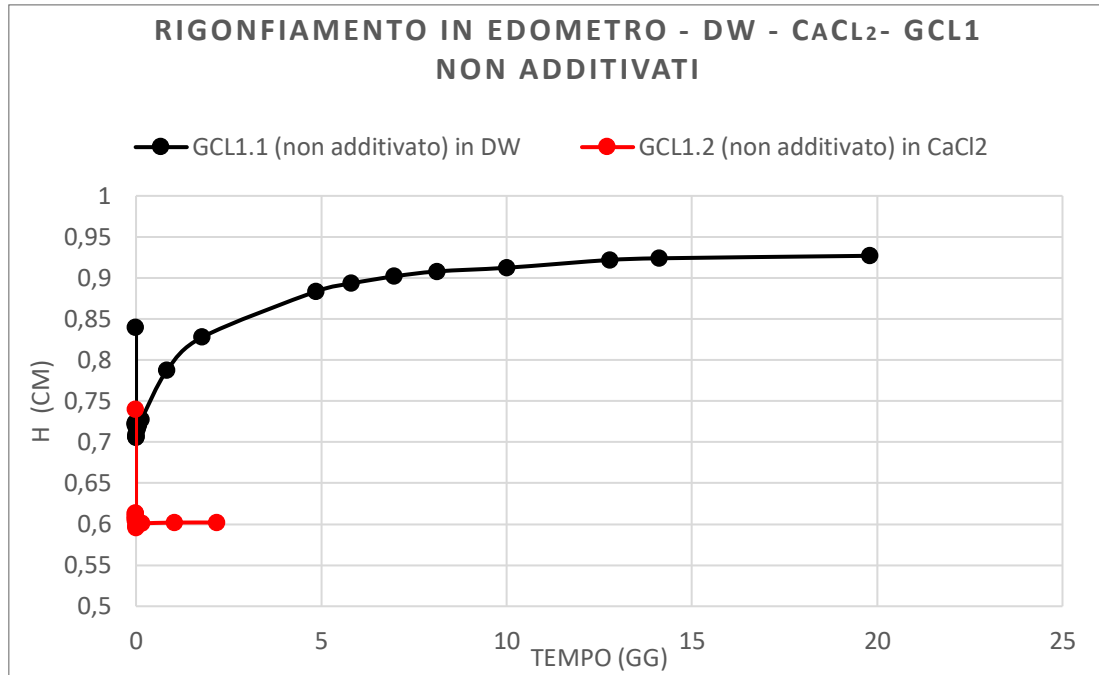


Figura 148: Rigonfiamento in edometro GCL1 non additivati in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

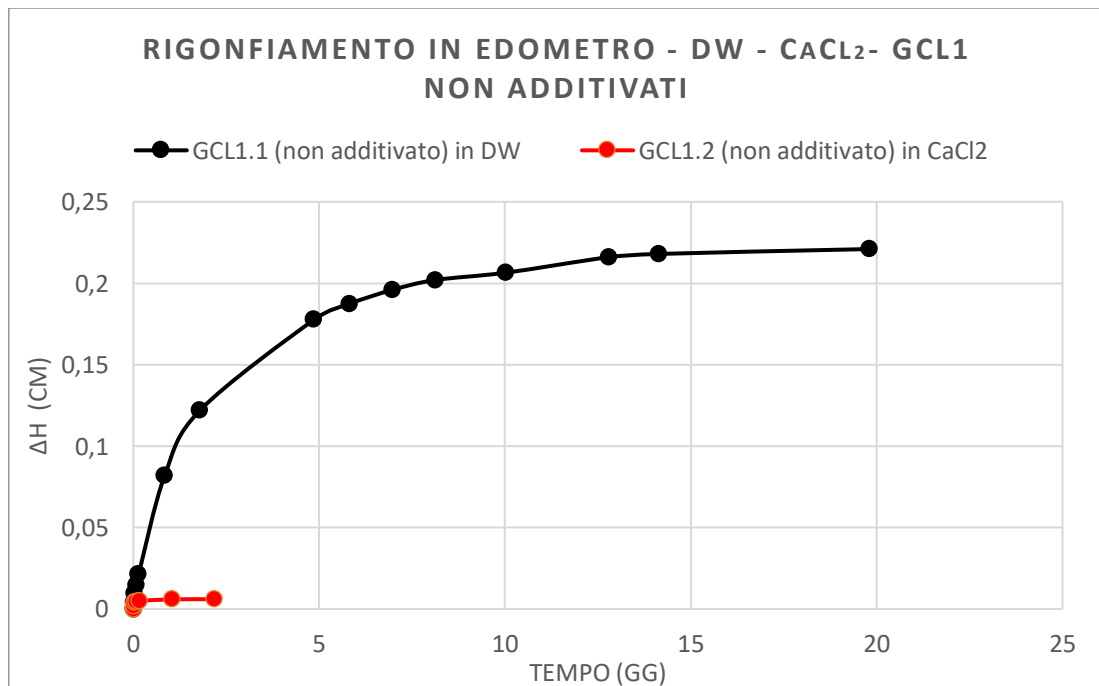


Figura 149: Rigonfiamento in edometro GCL1 non additivati in DW e CaCl₂, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

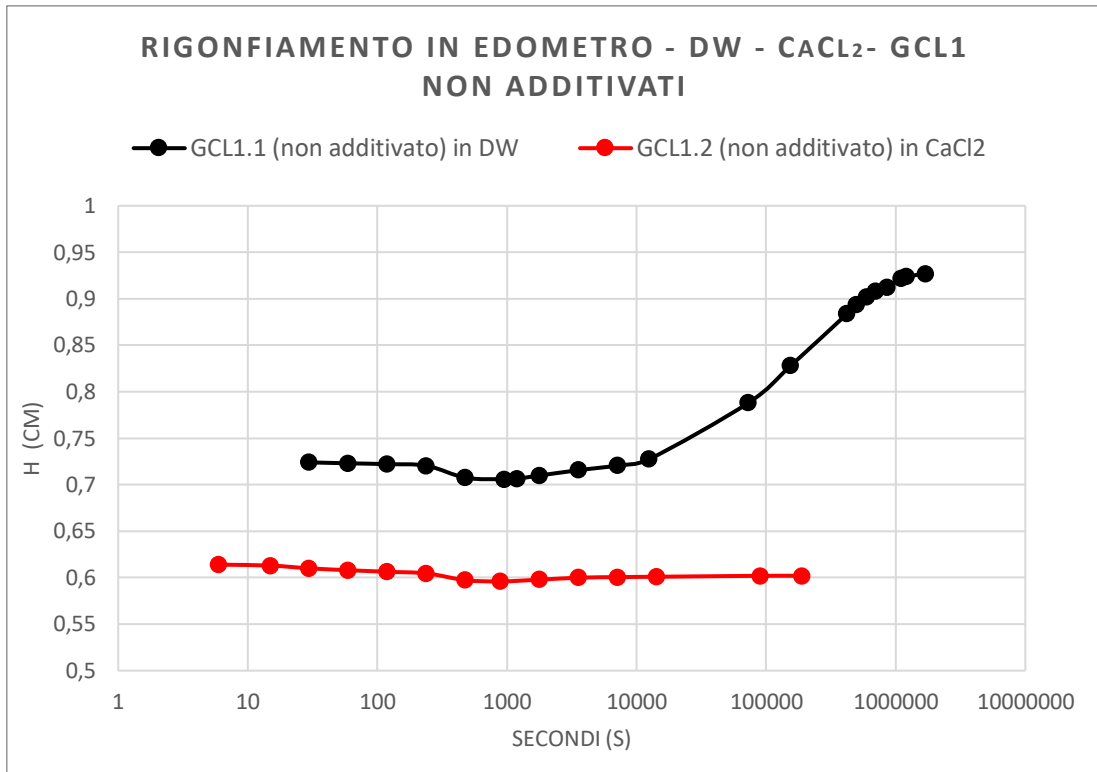


Figura 150: Rigonfiamento in edometro GCL1 non additivati in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

- GCL1+5%PA (DM) in DW e CaCl₂.

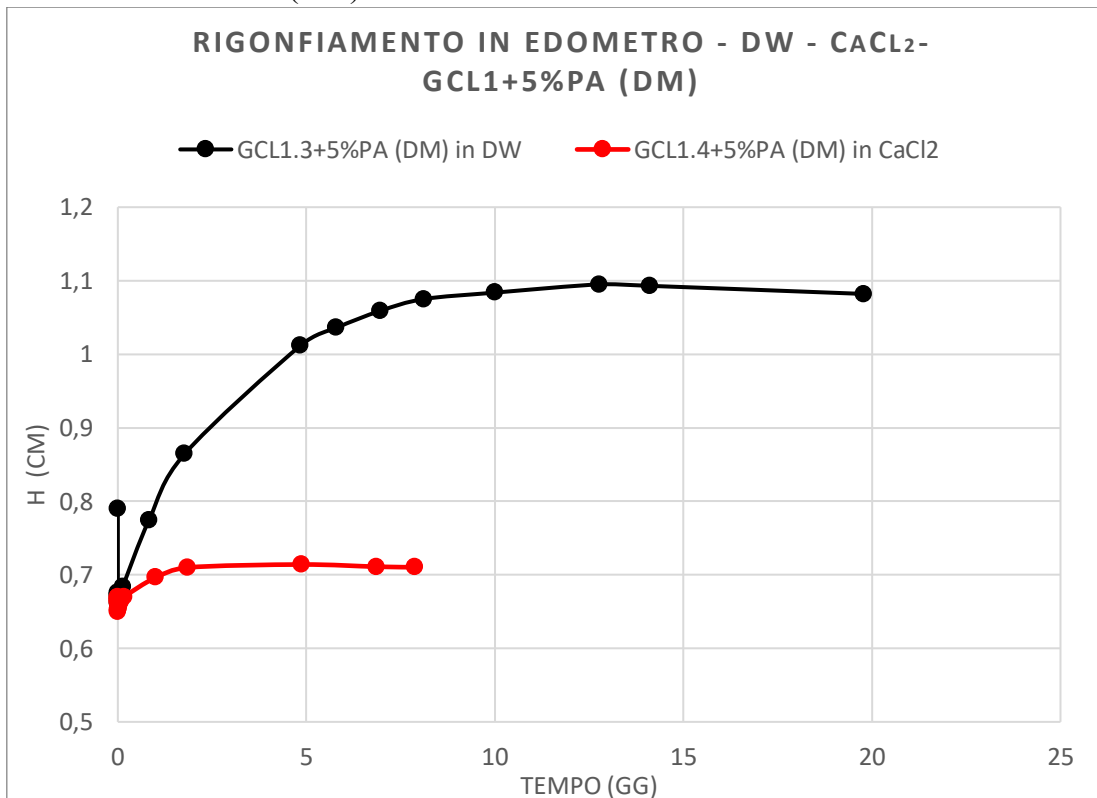


Figura 151: Rigonfiamento in edometro GCL1+5%PA (DM) in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

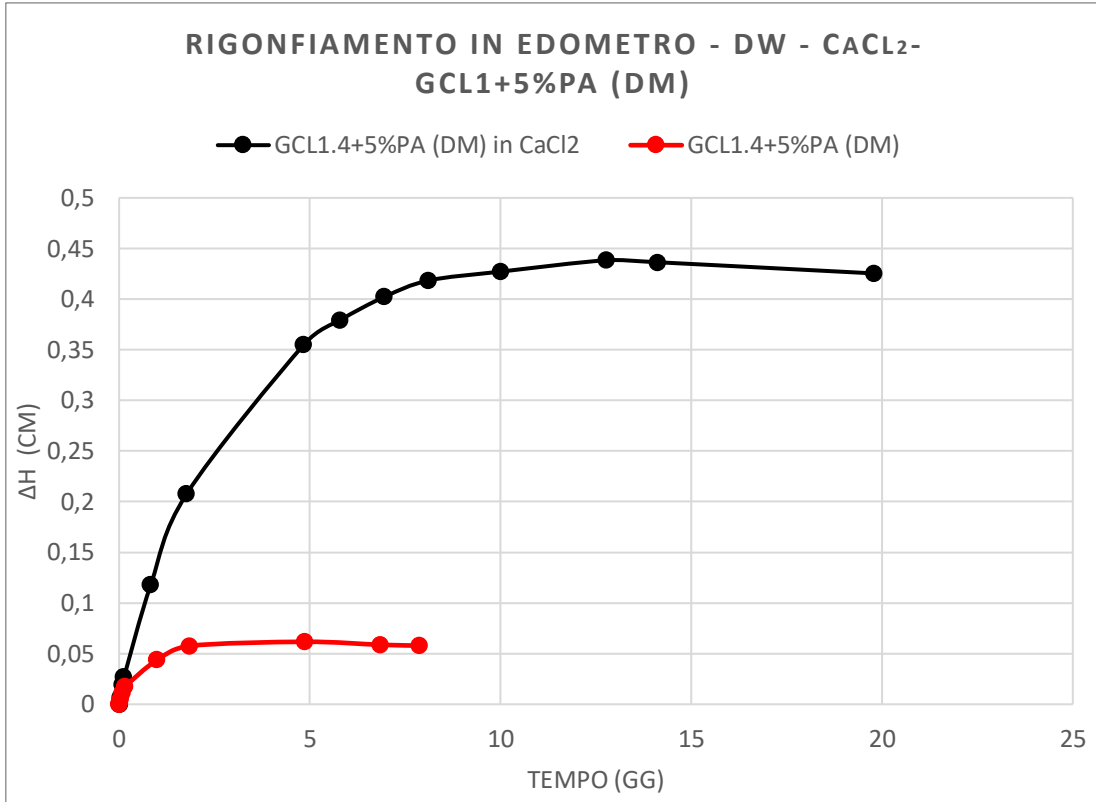


Figura 152: Rigonfiamento in edometro GCL1 +5%PA (DM) in DW e CaCl₂, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

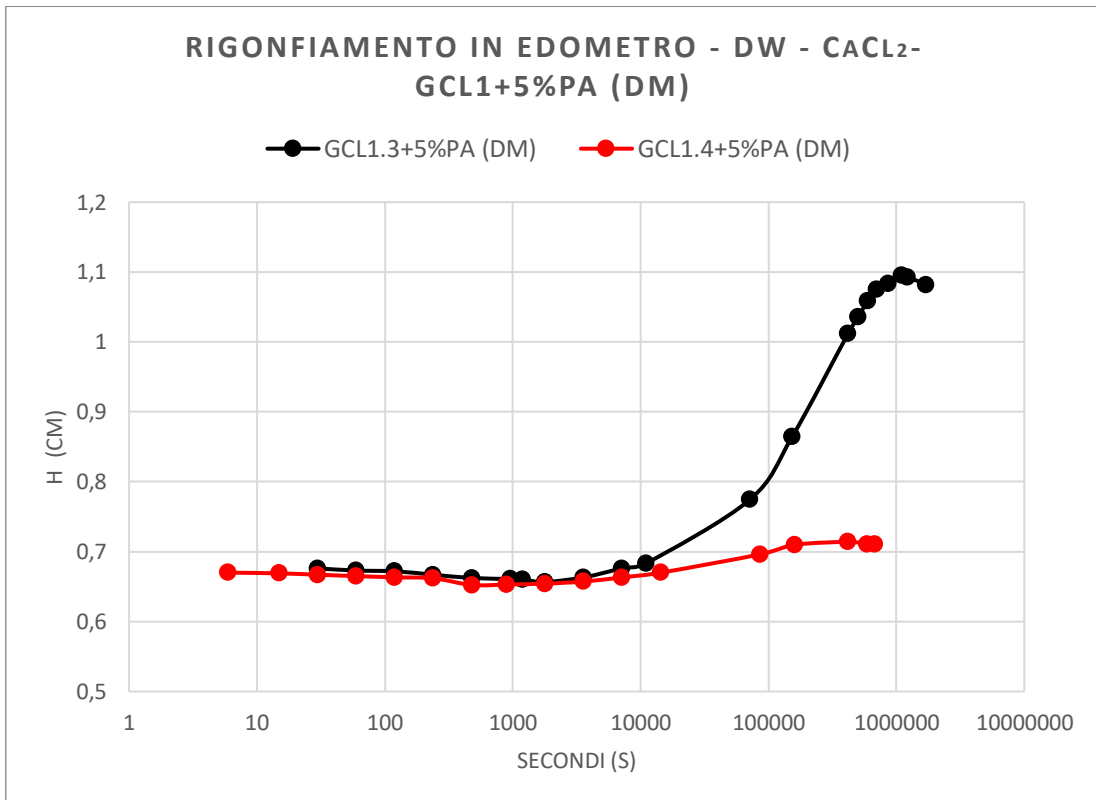


Figura 153: Rigonfiamento in edometro GCL1+5%PA (DM) in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

- GCL1+5%PA (WM) in DW e CaCl₂.

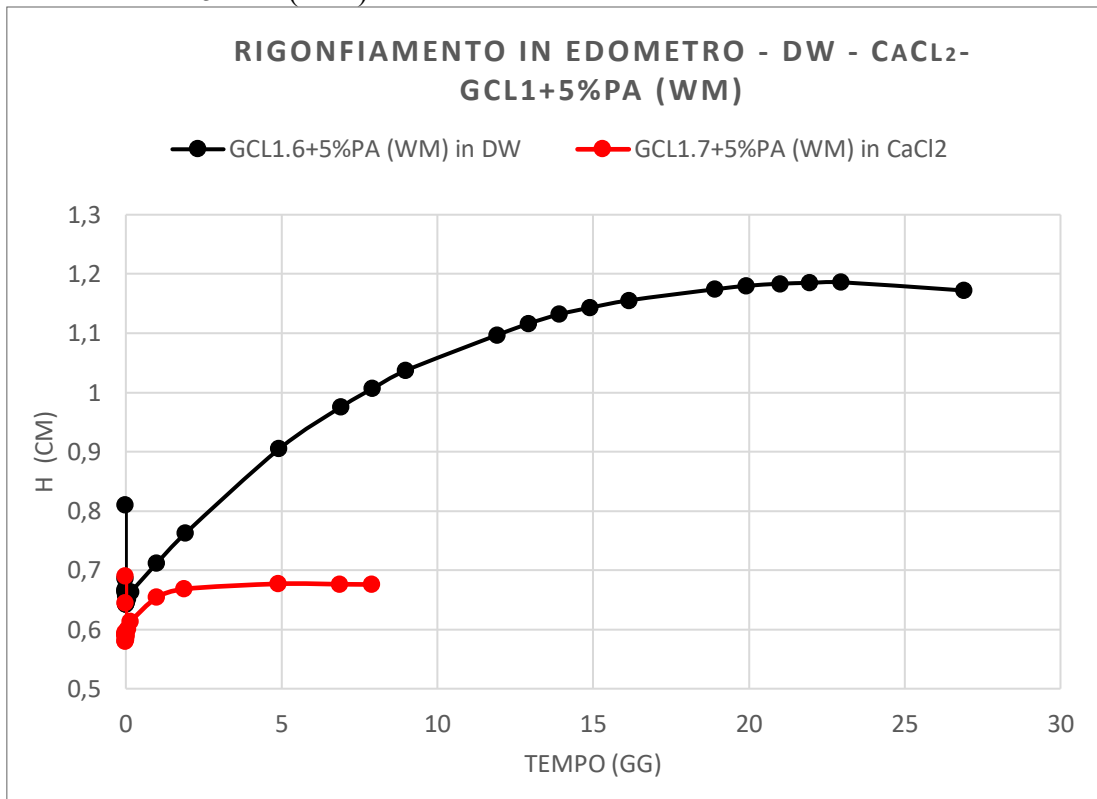


Figura 154: Rigonfiamento in edometro GCL1+5%PA (WM) in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

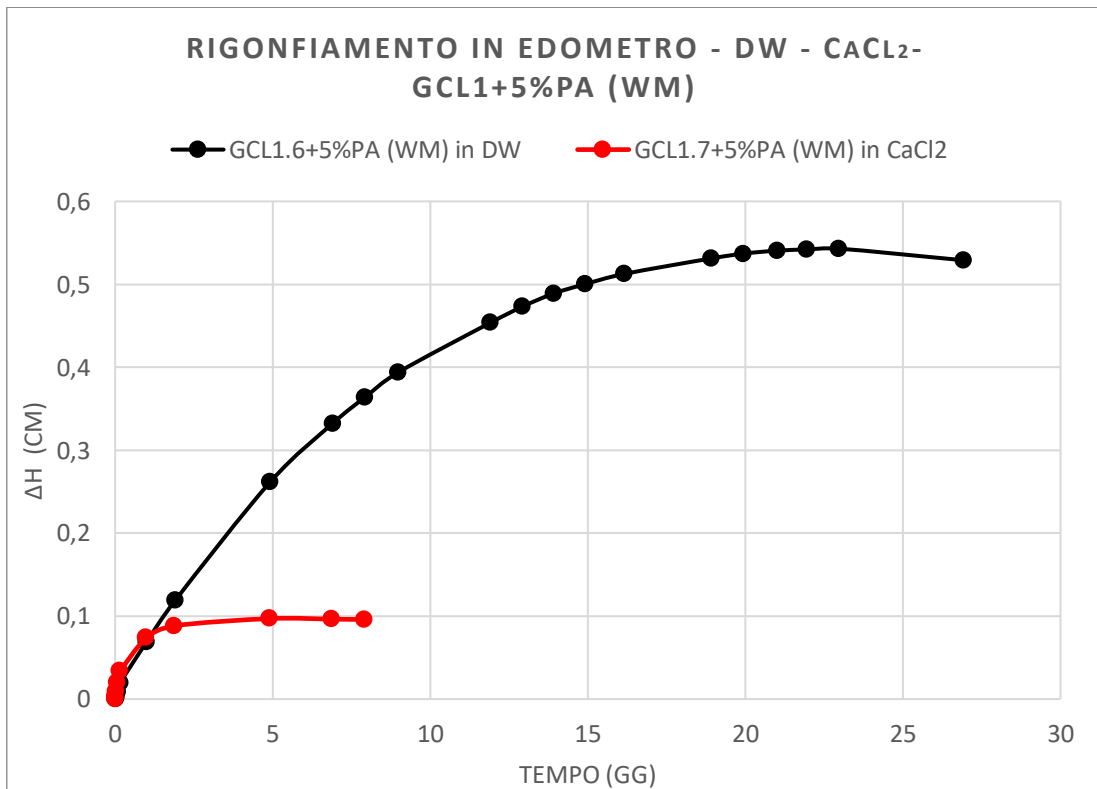


Figura 155: Rigonfiamento in edometro GCL1+5%PA (WM) in DW e CaCl₂, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

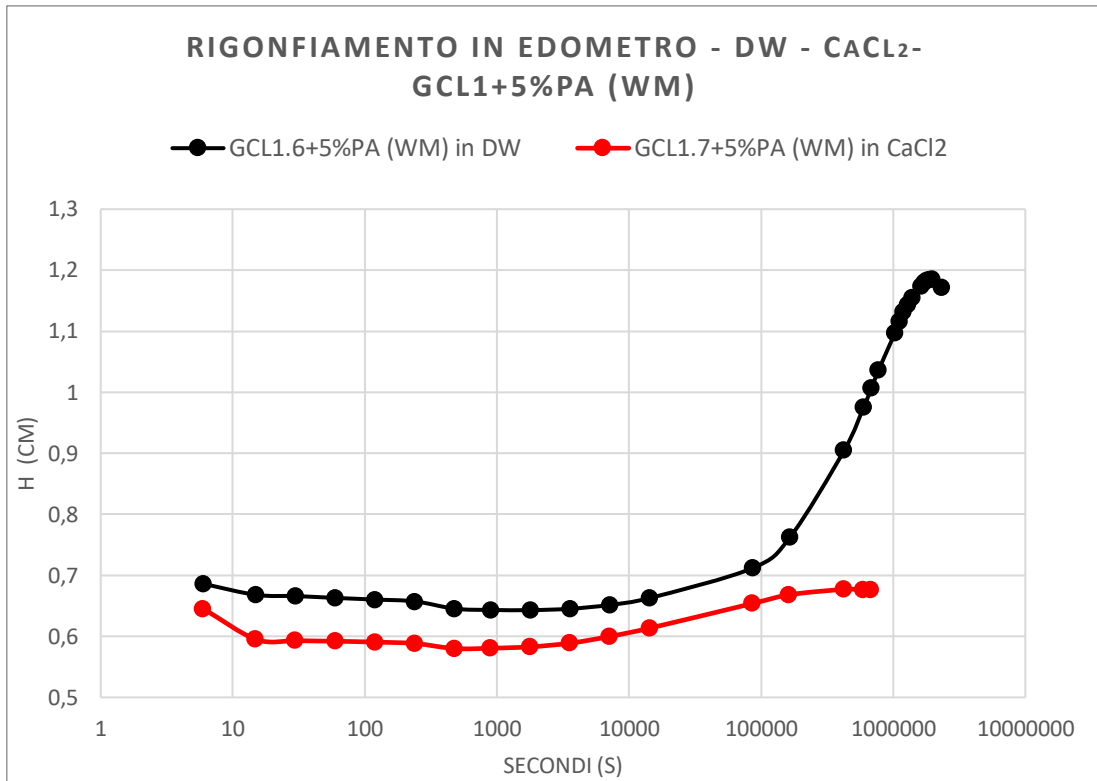


Figura 156: Rigonfiamento in edometro GCL1+5%PA (WM) in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2 non additivati in DW e CaCl₂.

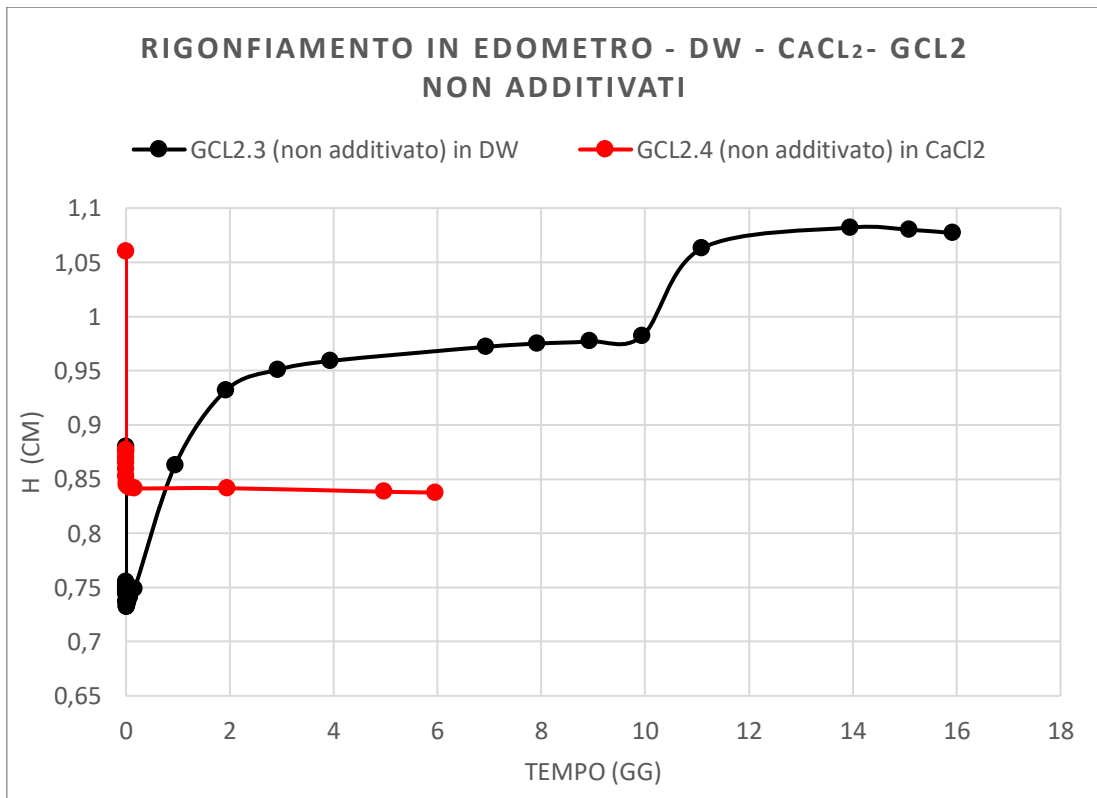


Figura 157: Rigonfiamento in edometro GCL2 non additivati in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

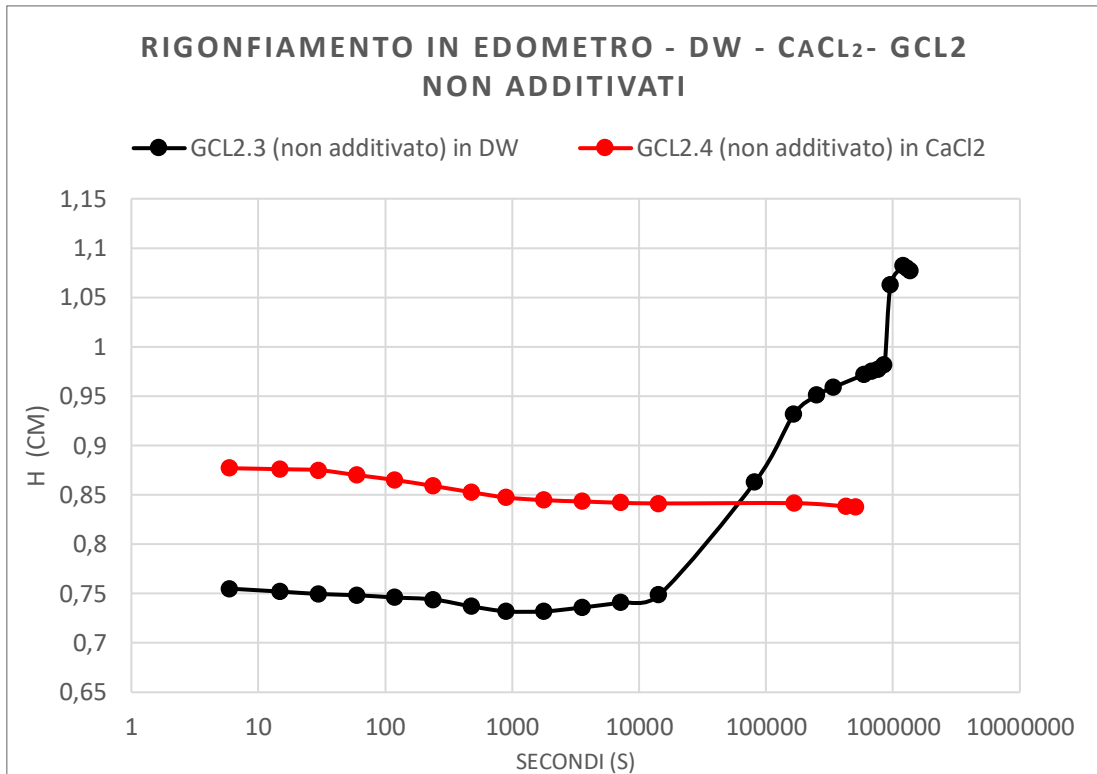


Figura 158: Rigonfiamento in edometro GCL2 non additivati in DW e $CaCl_2$, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2+5%PA (DM) in DW e $CaCl_2$.

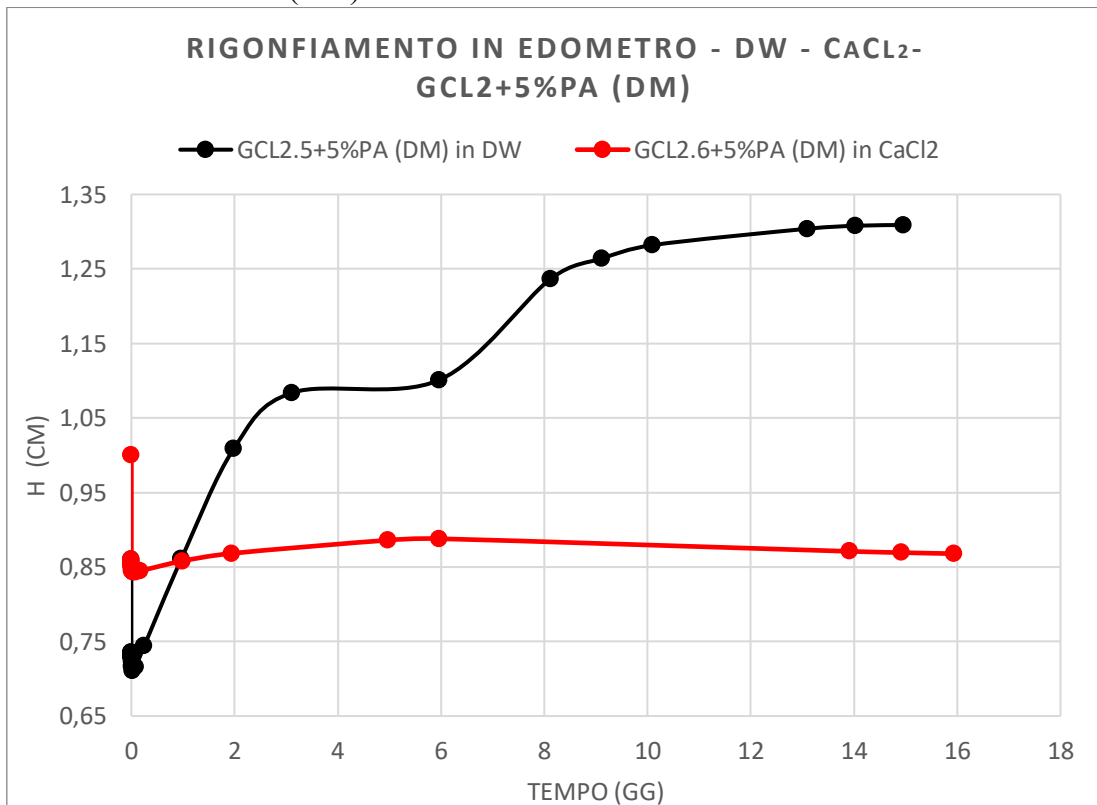


Figura 159: Rigonfiamento in edometro GCL2+5%PA (DM) in DW e $CaCl_2$, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

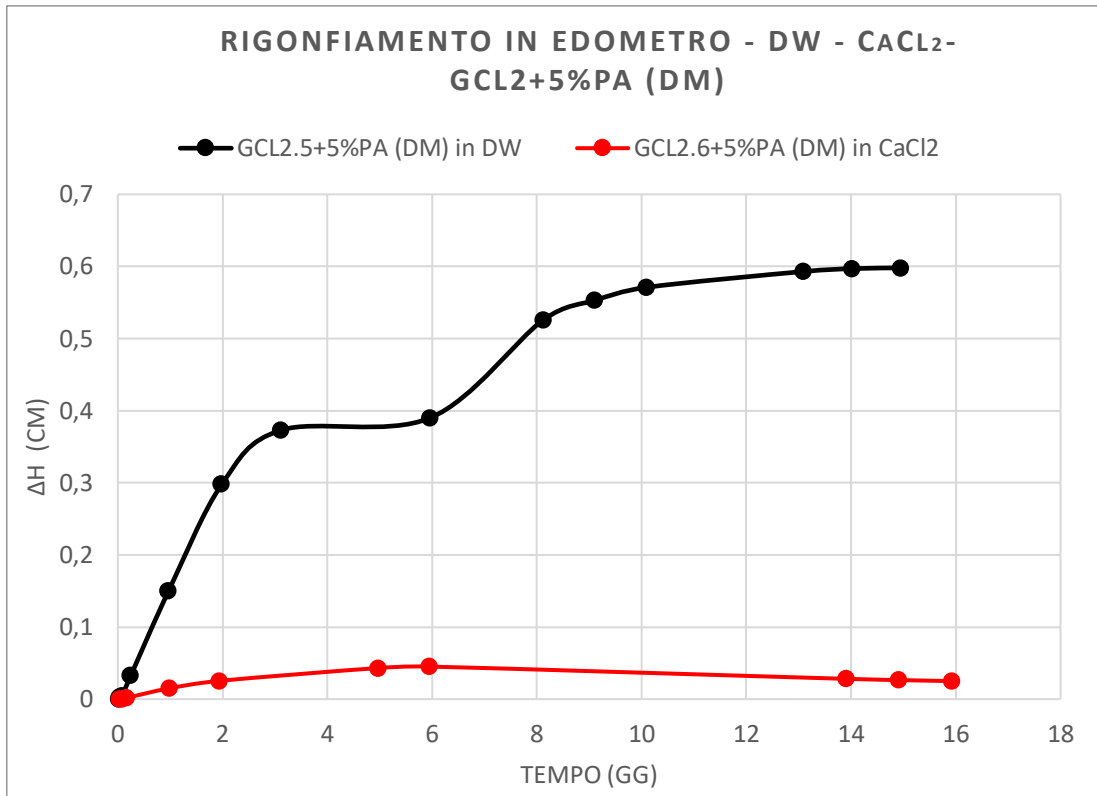


Figura 160: Rigonfiamento in edometro GCL2+5%PA (DM) in DW e CaCl₂, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

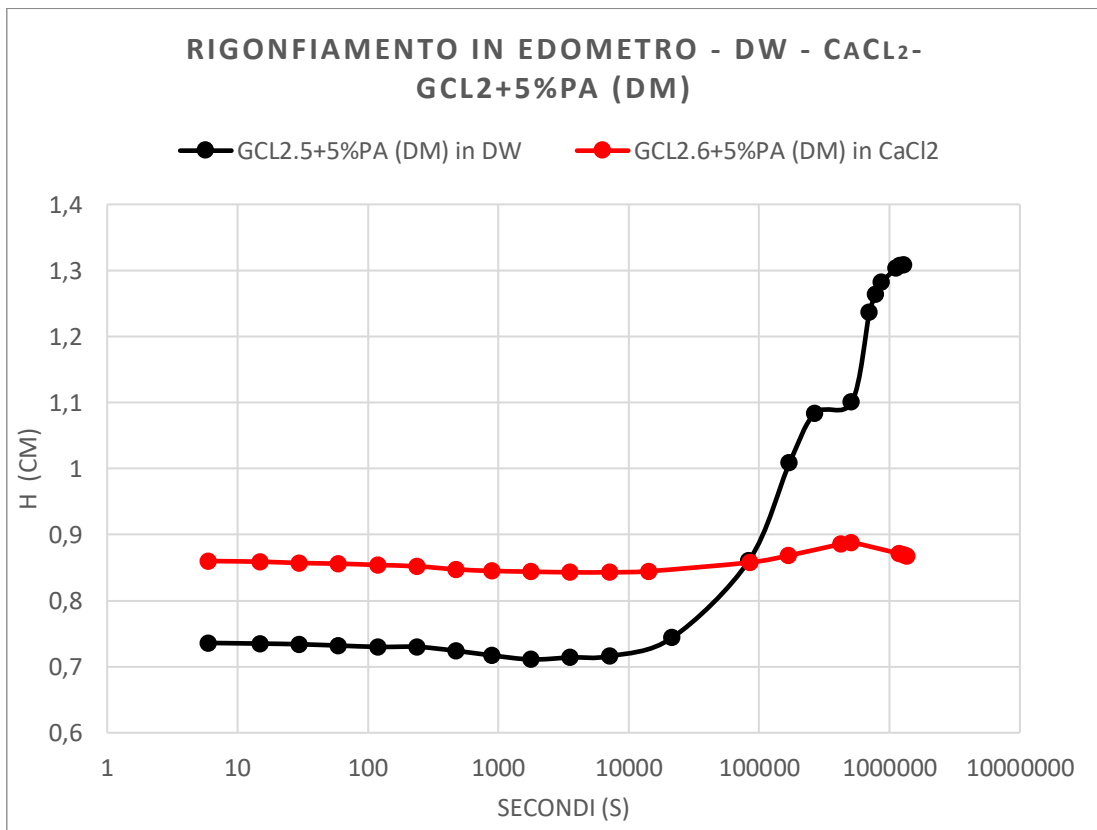


Figura 161: Rigonfiamento in edometro GCL2+5%PA (DM) in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2+5%PAx (DM) in DW e CaCl₂.

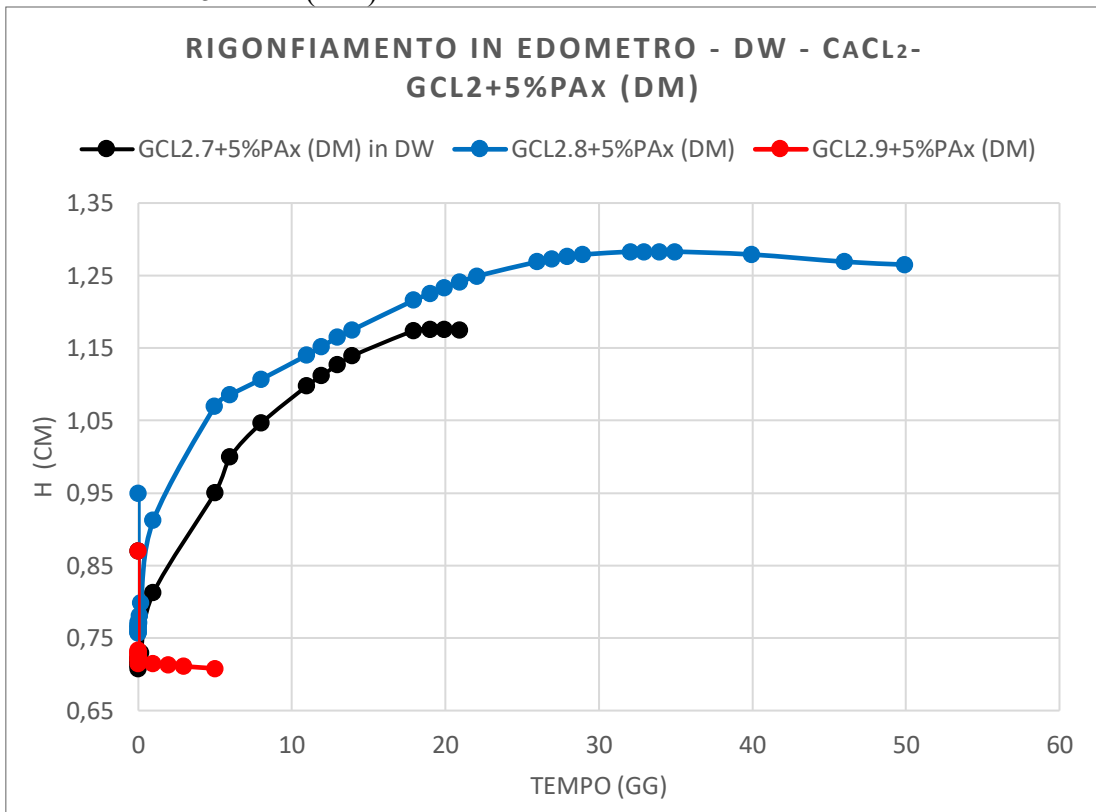


Figura 162: Rigonfiamento in edometro GCL2+5%PAx (DM) in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

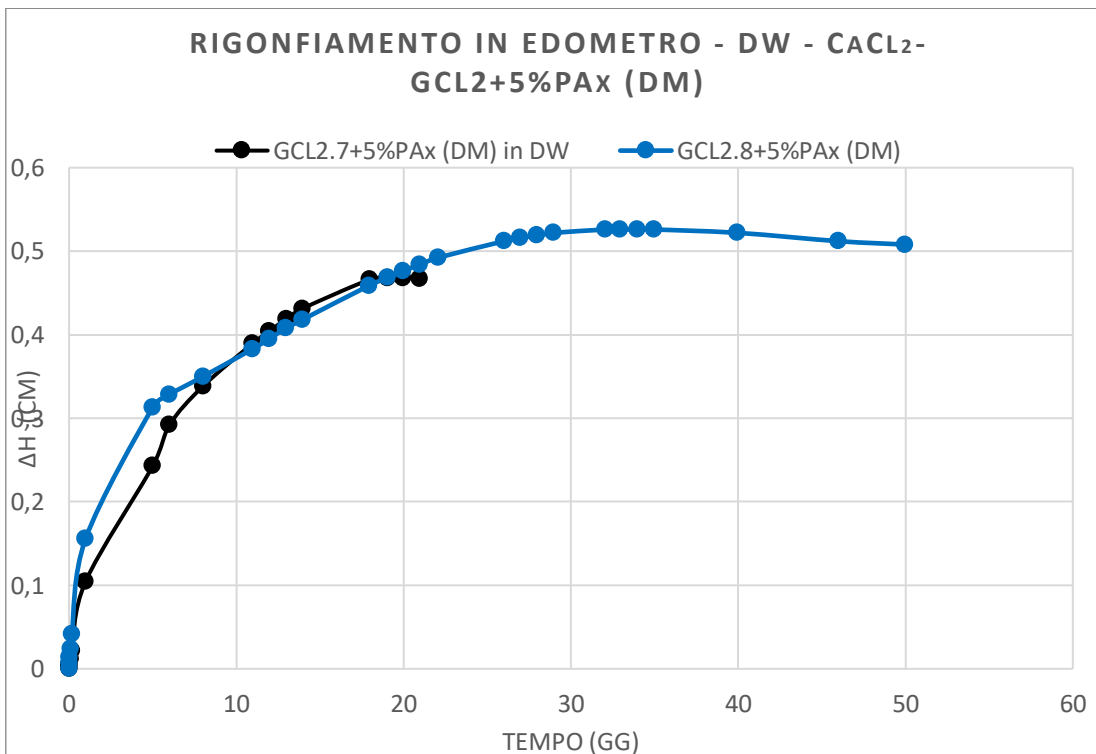


Figura 163: Rigonfiamento in edometro GCL2+5%PAx (DM) in DW e CaCl₂, rigonfiamento dei campioni nel tempo. Nota: In CaCl₂ la miscela in esame non presenta alcun tipo di rigonfiamento.

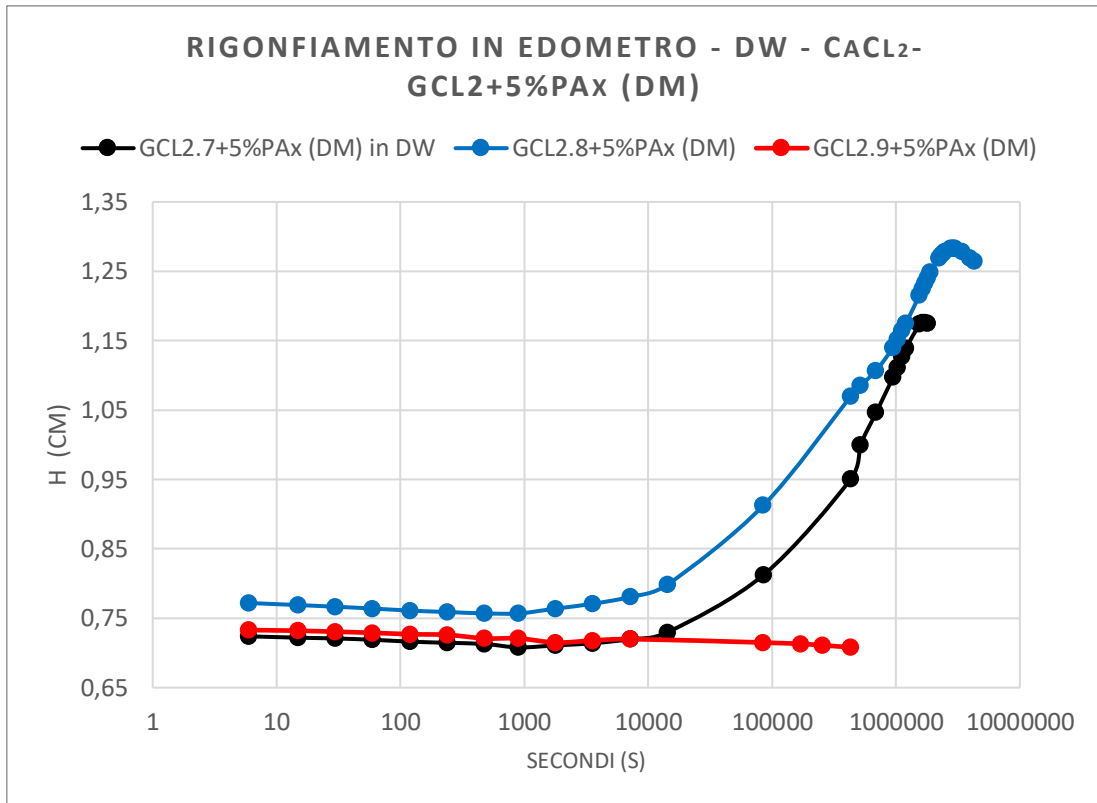


Figura 164: Rigonfiamento in edometro GCL2+5%PAx (DM) in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

- GCL2+5%CMC (DM) in DW e CaCl₂.

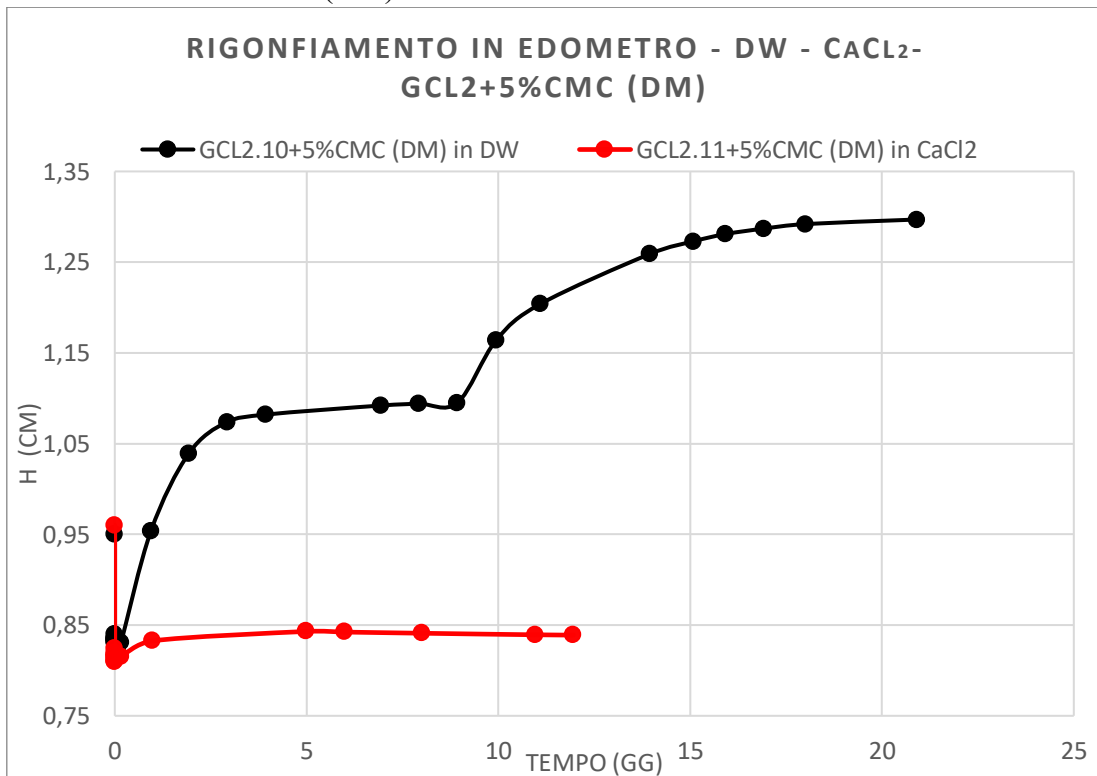


Figura 165: Rigonfiamento in edometro GCL2+5%CMC (DM) in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo.

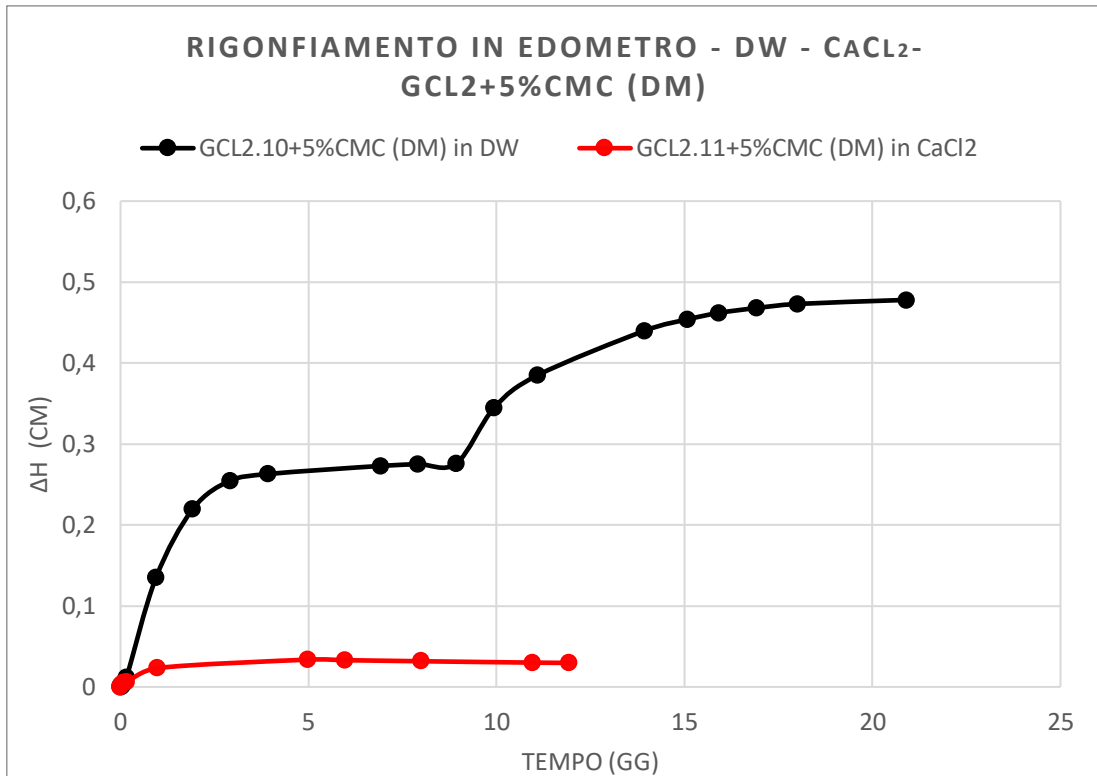


Figura 166: Rigonfiamento in edometro GCL2+5%CMC (DM) in DW e CaCl₂, rigonfiamento dei campioni nel tempo.

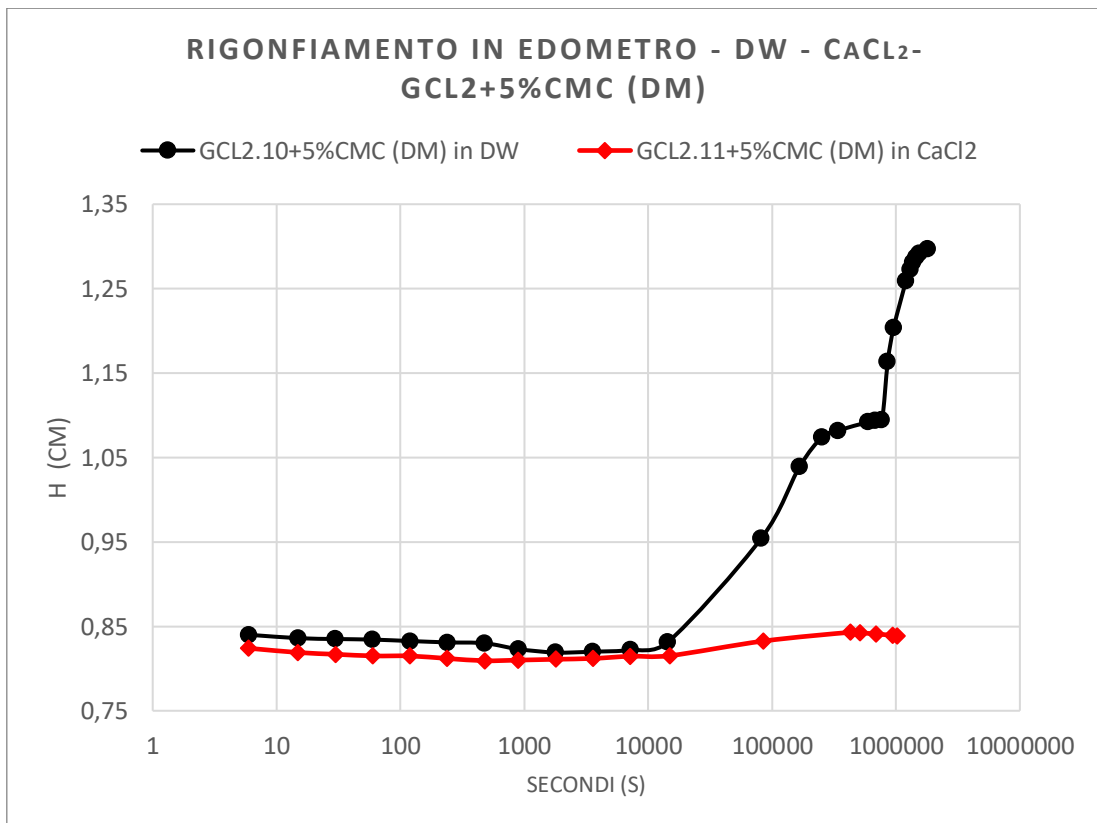


Figura 167: Rigonfiamento in edometro GCL2+5%CMC (DM) in DW e CaCl₂, variazione dell'altezza dei campioni nel tempo su scala logaritmica.

5.3 Prove di permeabilità

I risultati delle prove di permeabilità su cui verranno elaborate le discussioni sono riassunti nelle seguenti Tabelle 36 e 37.

Tabella 36: Risultati prove di permeabilità in DW.

Permeabilità in DW							
Campione	Polimero	Liquido	H ₂	H ₃	Giorni	Pori	k
[-]	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[gg]	[-]	[m/s]
GCL1.1	Non additivato	DW→ CaCl ₂	0,92	0,81	43,5	1,52	3,61 × 10 ⁻¹¹
GCL1.3	5% PA (DM)	DW→ CaCl ₂	1,08	0,70	42,5	1,43	2,50 × 10 ⁻¹¹
GCL1.6	5% PA (WM)	DW→ CaCl ₂	1,17	0,78	78,4	1,29	2,18 × 10 ⁻¹¹
GCL2.1*	Non additivato	DW	0,78	IF	436,7	1,29	8,66 × 10 ⁻¹²
GCL2.3	Non additivato	DW	1,07	IF	88,7	6,03	1,39 × 10 ⁻¹¹
GCL2.5	5% PA (DM)	DW	1,31	IF	59,7	0,63	4,69 × 10 ⁻¹²
GCL2.7	5% PAx (DM)	DW	1,17	IF	148,7	2,76	1,49 × 10 ⁻¹¹
GCL2.8	5% PAx (DM)	DW	1,26	IF	148,6	6,07	1,20 × 10 ⁻¹¹
GCL2.10	5% CMC (DM)	DW	1,30	IF	88,7	1,15	6,93 × 10 ⁻¹²

Nota: *=campioni non ricostruiti con bentonite granulare e non passante al setaccio n.80 (GCL con fibre agugliate intatte); IF = Campione ancora in filtrazione – prova ancora in corso.

Tabella 37: Risultati prove di permeabilità in CaCl₂.

Permeabilità in CaCl ₂							
Campione	Polimero	Liquido	H ₂	H ₃	Giorni	Pori	k
[-]	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[gg]	[-]	[m/s]
GCL1.1	Non additivato	DW→ CaCl ₂	0,92	0,81	62,7	5,74	1,59 × 10 ⁻¹⁰
GCL1.2	Non additivato	CaCl ₂	0,60	0,59	49,5	8,11	2,77 × 10 ⁻⁸
GCL1.3	5% PA (DM)	DW→ CaCl ₂	1,17	0,78	132,4	3,43	6,71 × 10 ⁻¹¹
GCL1.4	5% PA (DM)	CaCl ₂	0,71	0,65	40,5	9,29	2,19 × 10 ⁻⁸
GCL1.5	10% PA (DM)	CaCl ₂	0,71	0,65	41,4	7,10	2,09 × 10 ⁻⁸
GCL1.6	5% PA (WM)	DW→ CaCl ₂	1,17	0,78	163,6	4,47	5,53 × 10 ⁻¹¹
GCL1.7	5% PA (WM)	CaCl ₂	0,67	0,78	49,5	9,58	1,81 × 10 ⁻⁸
GCL2.2*	Non additivato	CaCl ₂	0,83	0,72	8,4	2,25	2,19 × 10 ⁻⁷
GCL2.4	Non additivato	CaCl ₂	0,84	0,80	50,6	8,88	4,02 × 10 ⁻⁹
GCL2.6	5% PA (DM)	CaCl ₂	0,87	0,81	57,5	8,91	7,28 × 10 ⁻⁹
GCL2.9	5% PAx (DM)	CaCl ₂	0,71	0,69	56,6	12,51	5,61 × 10 ⁻¹⁰
GCL2.11	5% CMC (DM)	CaCl ₂	0,84	0,81	76,6	8,90	3,44 × 10 ⁻¹⁰

Nota: *=campioni non ricostruiti con bentonite granulare e non passante al setaccio n.80 (GCL con fibre agugliate intatte).

5.3.1 Permeabilità GCL1

La permeabilità dei campioni preparati con la bentonite GCL1 presenta una certa stabilità di comportamento in DW, con risultati molto vicini tra i campioni additivati e non additivati e con una lieve diminuzione della permeabilità per i campioni polimerizzati.

In CaCl₂, invece, vi è una drastica differenza di permeabilità (2/3 ordini di grandezza) tra i campioni preidratati con acqua distillata e quelli permeati direttamente in cloruro di calcio, dimostrando come la preidratazione sia un metodo efficace per mantenere bassa la permeabilità della bentonite quando viene permeata con liquidi aggressivi sia per campioni additivati che non additivati. Confrontando la categoria dei preidratati tra di loro, anche qui si nota un miglioramento delle permeabilità in CaCl₂ dei

campioni polimerizzati. I campioni permeati direttamente con cloruro di calcio, invece, presentano un lieve miglioramento della permeabilità grazie all'additivazione.

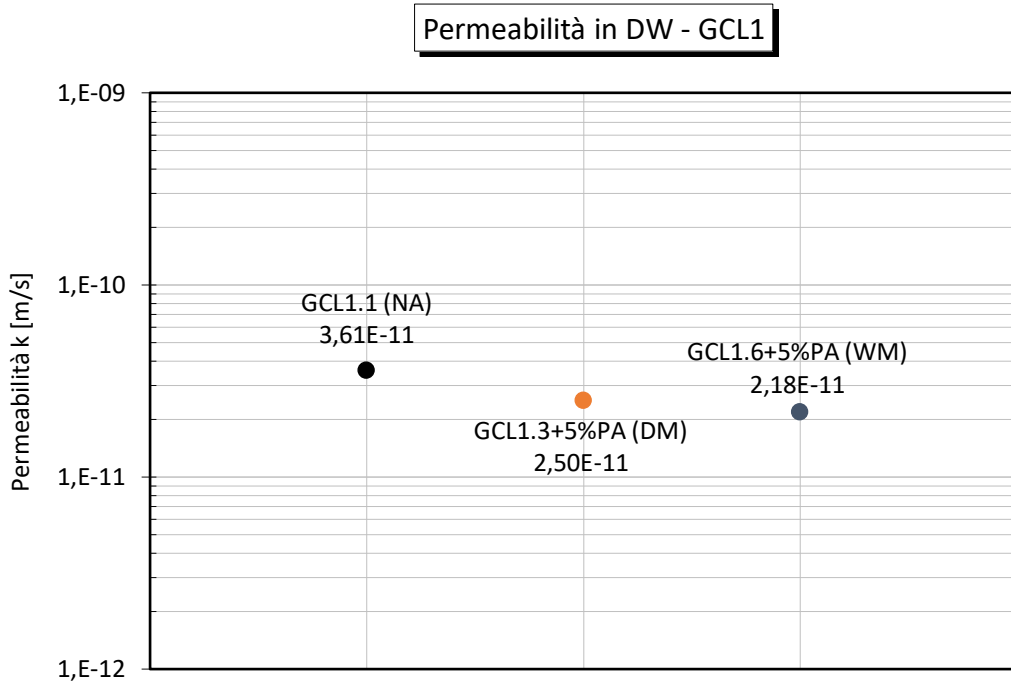


Figura 168: Permeabilità dei campioni GCL1 in DW.

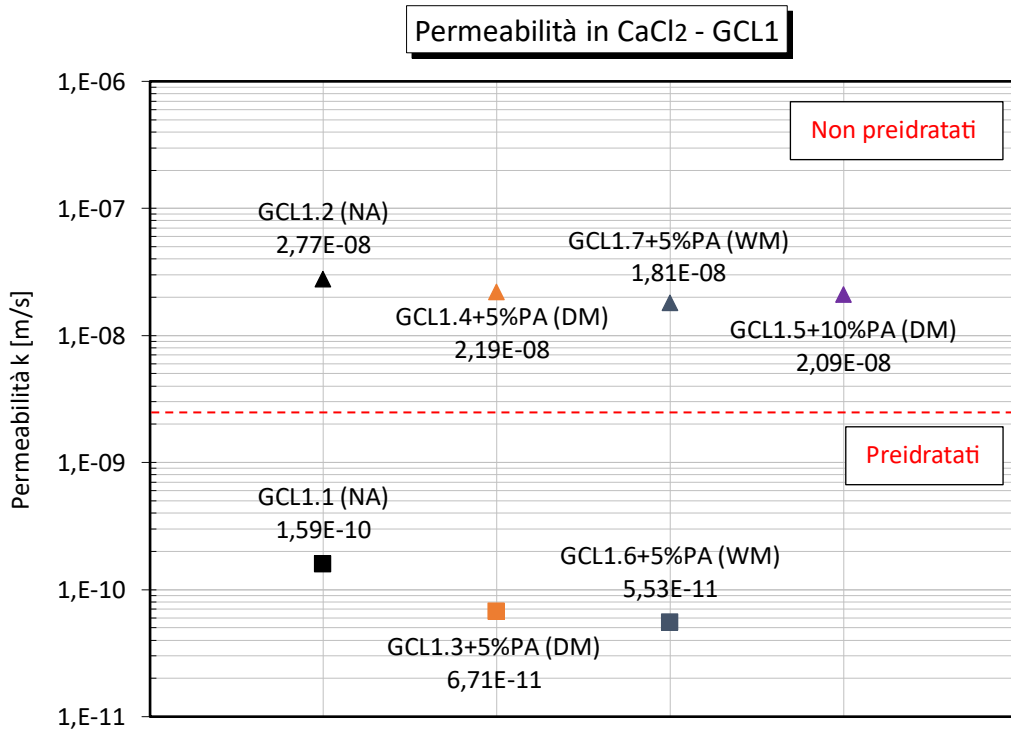


Figura 169: Permeabilità dei campioni GCL1 in CaCl2.

5.3.2 Permeabilità GCL2

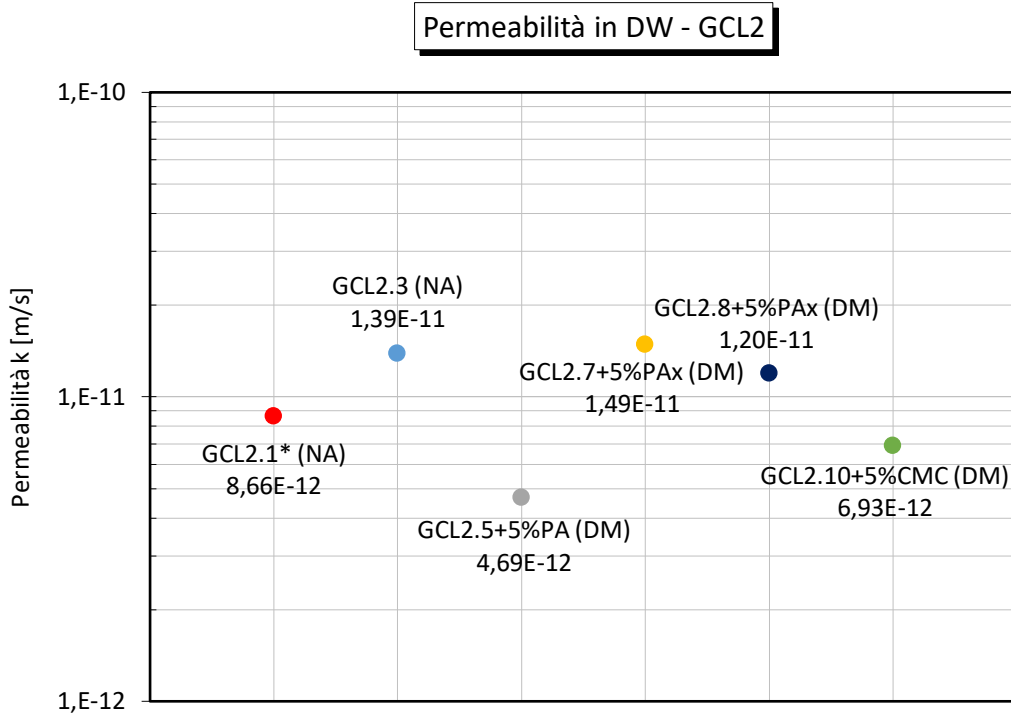


Figura 170: Permeabilità dei campioni GCL2 in DW.

Nota: *=campioni non ricostruiti con bentonite granulare e non passante al setaccio n.80 (GCL con fibre agugliate intatte).

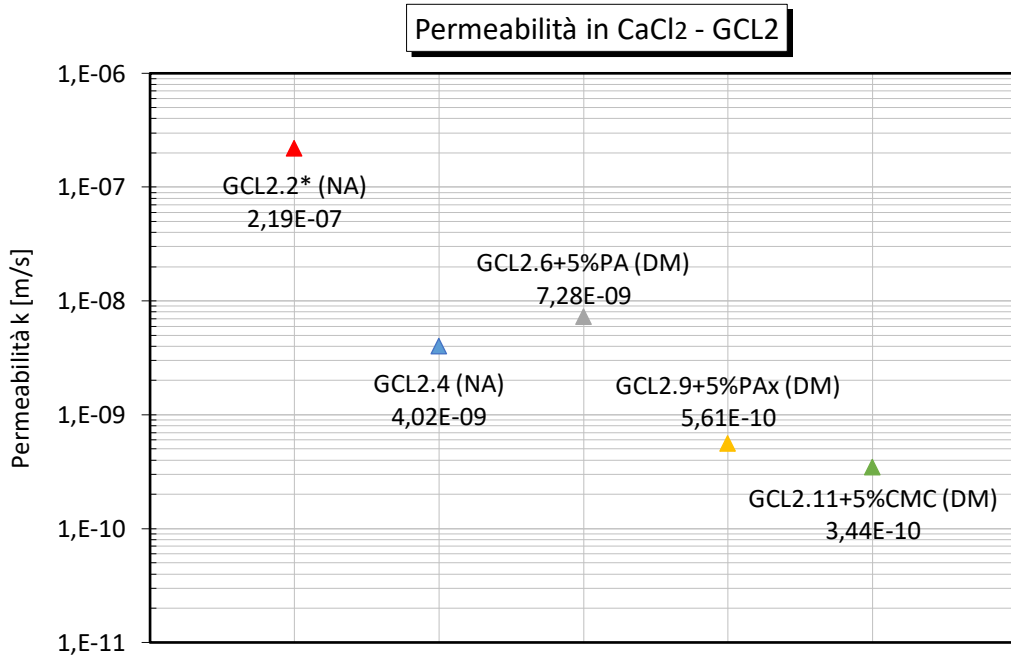


Figura 171: Permeabilità dei campioni GCL2 in CaCl2.

Nota: *=campioni non ricostruiti con bentonite granulare e non passante al setaccio n.80 (GCL con fibre agugliate intatte).

La permeabilità dei campioni preparati con GCL2 in DW presenta dei miglioramenti grazie all'additivazione, in particolare l'aggiunta di PA e di CMC comporta una diminuzione della permeabilità di un ordine di grandezza rispetto al campione non additivato. L'additivazione con PAX, invece, mostra una permeabilità paragonabile al campione non polimerizzato. Tra i campioni non additivati viene preso come riferimento iniziale il campione ricostruito e passante al setaccio n.80, dato che la tecnica di preparazione è la stessa dei campioni additivati. Il campione non ricostruito (GCL2.1) presenta ottime caratteristiche in termini di permeabilità, poichè le fibre che tengono insieme i due geotessili impediscono il rigonfiamento del materiale verso l'alto, questo però avviene tra i due geotessili stessi portando ad una diminuzione dei pori intergranulari (dato il poco spazio presente), ciò genera un percorso più tortuoso per l'acqua. Questa caratteristica si traduce in una diminuzione della permeabilità rispetto al campione non additivato ricostruito (cioè senza fibre) e, per questa ragione, non può essere utilizzato come riferimento rispetto ai campioni polimerizzati.

In CaCl₂ l'aggiunta di CMC e PAX presenta una diminuzione della permeabilità (1 ordine di grandezza) rispetto alla non additivazione, al contrario l'aggiunta di PA non mostra significativi miglioramenti rispetto alla sola bentonite. Tra i campioni non additivati viene preso in considerazione come riferimento quello con la bentonite passante al setaccio n.80, poiché (come già spiegato) la tecnica di preparazione del campione è la stessa di quelli polimerizzati. Il campione non ricostruito (GCL2.2) non può essere preso come riferimento in quanto: la scarsa capacità della bentonite di rigonfiare in liquidi aggressivi (CaCl₂) e la presenza di una bentonite granulare portano ad un incremento sostanziale della dimensione dei pori intergranulari, che si associa ad un aumento drastico della permeabilità del campione.

5.3.3 Permeabilità GCL non additivati

La permeabilità dei GCL non additivati in DW risulta lievemente più bassa nella bentonite dei GCL2 rispetto alla GCL1, a parità di metodo di preparazione (campioni ricostruiti con bentonite passante al setaccio n.80). Prendendo in considerazione anche il campione non ricostruito, qui abbiamo una permeabilità ancora più bassa rispetto ai campioni ricostruiti per il motivo spiegato al paragrafo precedente (5.3.2) ovvero: il campione non ricostruito a contatto con la DW non avendo la possibilità di rigonfiare in altezza (a causa delle fibre che tengono i due geotessili), lo fa nel poco spazio presente andando a chiudere maggiormente i pori intergranulari.

In CaCl₂, invece, abbiamo una differenza sostanziale di permeabilità tra i campioni non ricostruiti e quelli ricostruiti, con questi ultimi che presentano una permeabilità inferiore di 1 o 2 ordini di grandezza. Questo fenomeno (come spiegato nel paragrafo precedente 5.3.2) trova la seguente spiegazione, i campioni presentano ampi pori intergranulari a causa: della bentonite granulare contenuta tra di essi e della scarsa capacità della bentonite di rigonfiare in CaCl₂. Confrontando le due GCL a parità di metodo di preparazione (campioni ricostruiti con bentonite passante al setaccio n.80), notiamo come la GCL2 presenti una permeabilità più bassa (più o meno di 1 ordine di grandezza) rispetto alla GCL1 quando viene permeata direttamente in cloruro di calcio. Infine, lo stacco maggiore lo notiamo nel campione preidratato, che presenta una

permeabilità inferiore rispetto agli altri campioni ricostruiti di 1 o 2 ordini di grandezza.

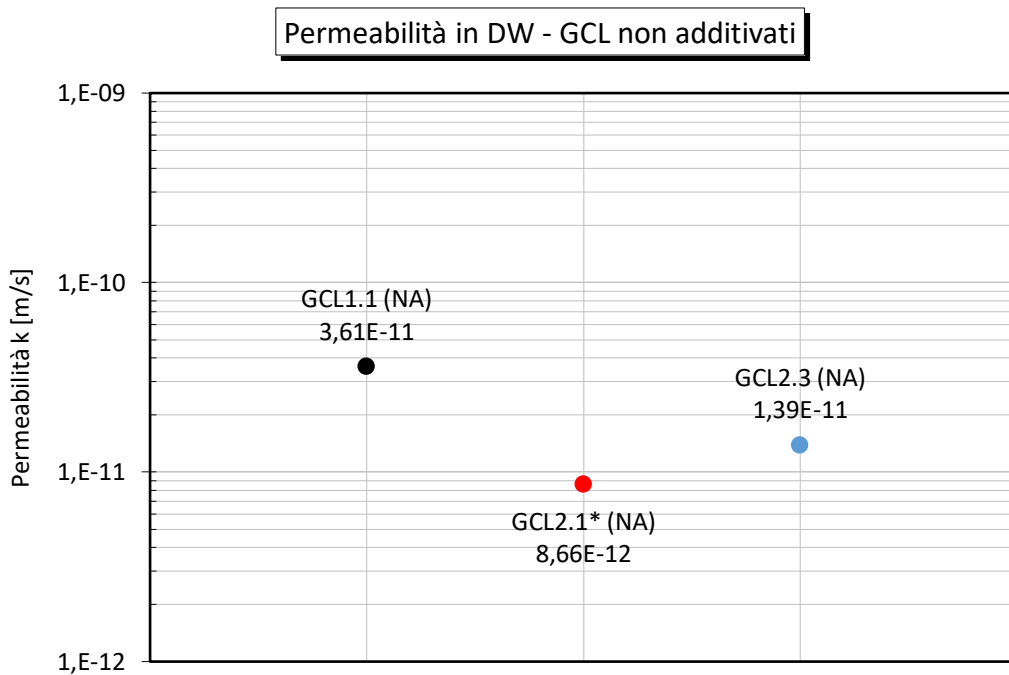


Figura 172: Permeabilità dei GCL non additivati in DW.

Nota: *=campioni non ricostruiti con bentonite granulare e non passante al setaccio n.80 (GCL con fibre agugliate intatte).

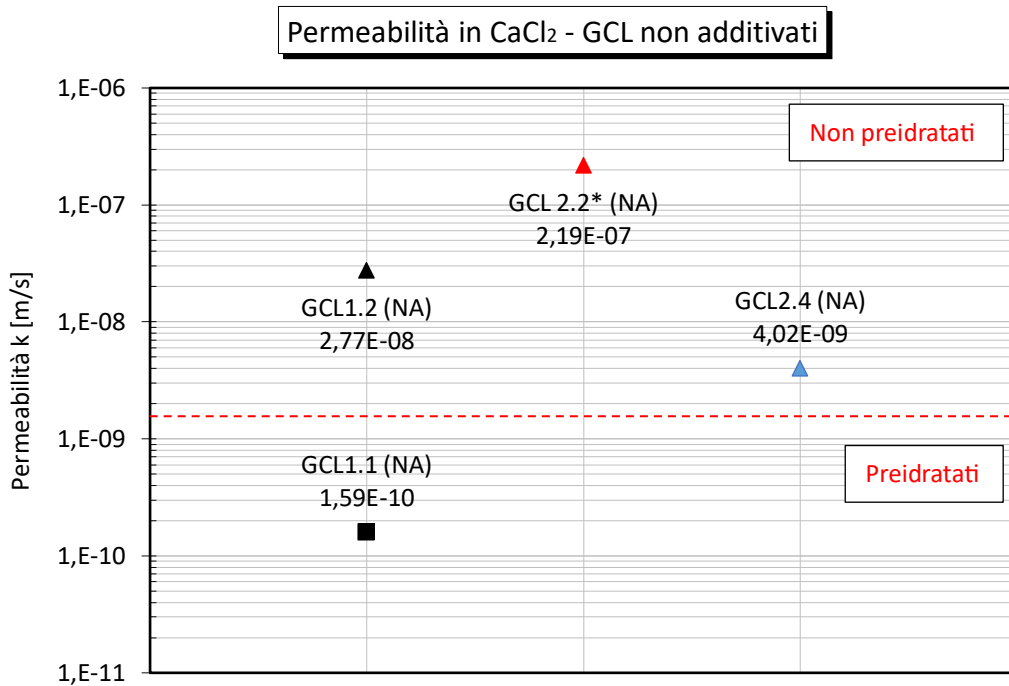


Figura 173: Permeabilità dei GCL non additivati in CaCl₂.

Nota: *=campioni non ricostruiti con bentonite granulare e non passante al setaccio n.80 (GCL con fibre agugliate intatte).

5.3.4 Permeabilità GCL additivati con PA

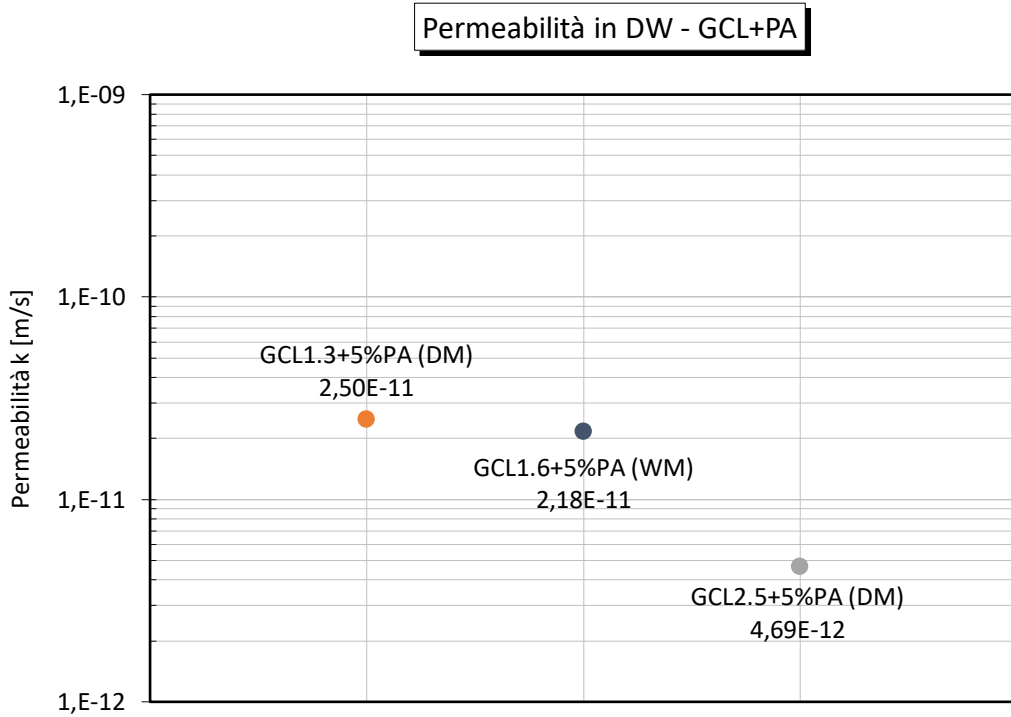


Figura 174: Permeabilità dei GCL+PA in DW.

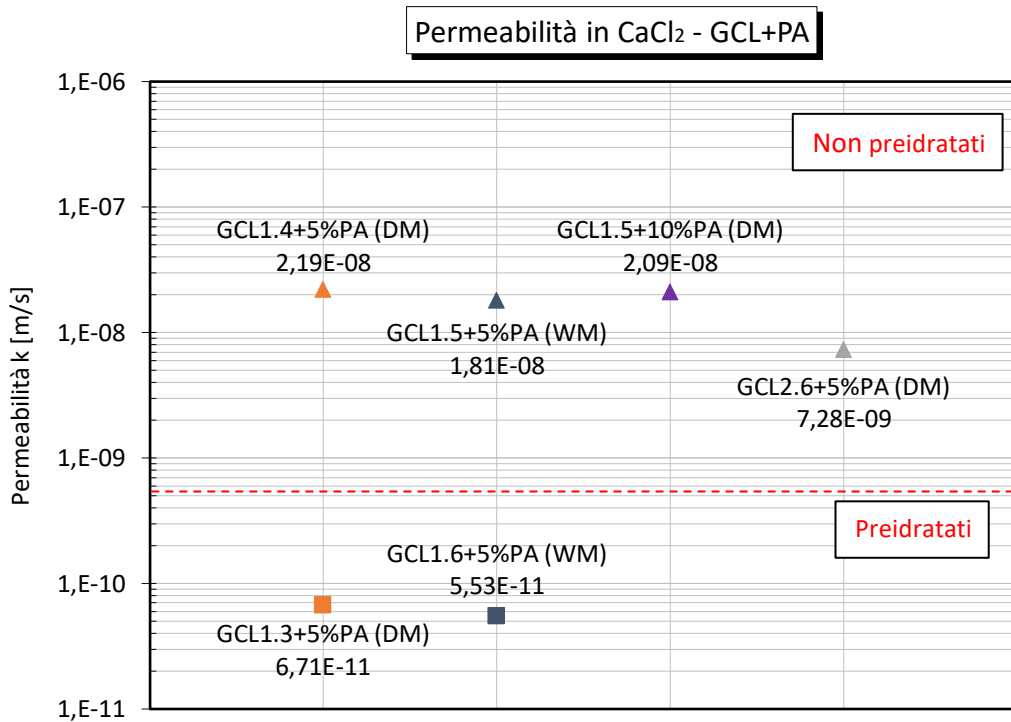


Figura 175: Permeabilità dei GCL +PA in CaCl₂.

L'additivazione con poliacrilammide in DW sembra dare risultati migliori (in termini di permeabilità) sulla GCL2, che presenta una k inferiore alla GCL1 indicativamente di 1 ordine di grandezza. Confrontando invece le GCL1 additivate con PA, non si notano particolari differenze in termini di permeabilità al variare del metodo di preparazione (DM e WM).

In CaCl_2 vi è una drastica differenza tra i campioni preidratati in DW e quelli permeati direttamente in cloruro di calcio. Tra di loro, i campioni additivati con PA e preidratati non presentano particolari differenze in termini di k . Confrontando invece i campioni permeati direttamente in CaCl_2 , notiamo come la GCL2 additivata con PA (DM) presenti una permeabilità minore rispetto alla GCL1 additivata con PA (DM o WM). I GCL1+PA in CaCl_2 , infine, non presentano una particolare differenza in termini di k al variare della percentuale in massa (5% e 10%) o del metodo di preparazione (DM o WM).

5.3.5 Permeabilità dei GCL additivati

In DW l'additivazione sembra dare risultati migliori se eseguita sulla GCL2 rispetto alla GCL1. In particolare, sono le miscele GCL2+5%PA e GCL2+5%CMC a dare una permeabilità inferiore rispetto alle altre, approssimativamente di un ordine di grandezza.

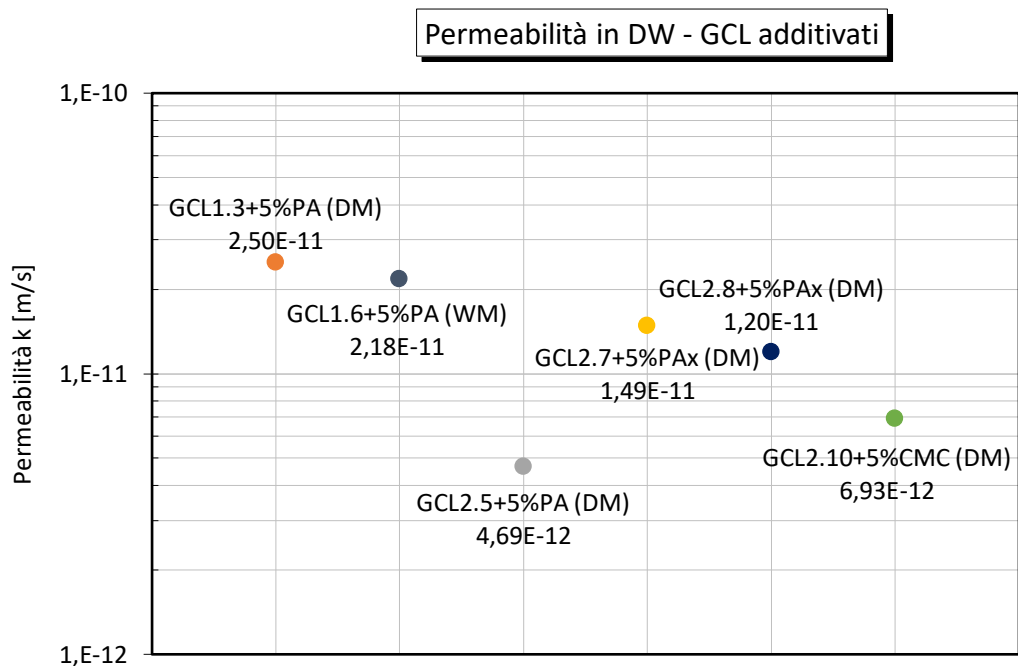


Figura 176: Permeabilità dei GCL additivati in DW.

Anche in CaCl_2 l'additivazione sembra dare risultati migliori per la GCL2 rispetto alla GCL1. In particolare, le miscele di GCL2 additivate e permeate direttamente in cloruro di calcio, presentano una permeabilità inferiore approssimativamente di 1 o 2 ordini di grandezza rispetto a quelle di GCL1 additivate. Infine, in CaCl_2 si nota come i campioni preidratati presentino le prestazioni migliori con una permeabilità inferiore che va da 1 a 3 ordini di grandezza in meno rispetto agli altri campioni.

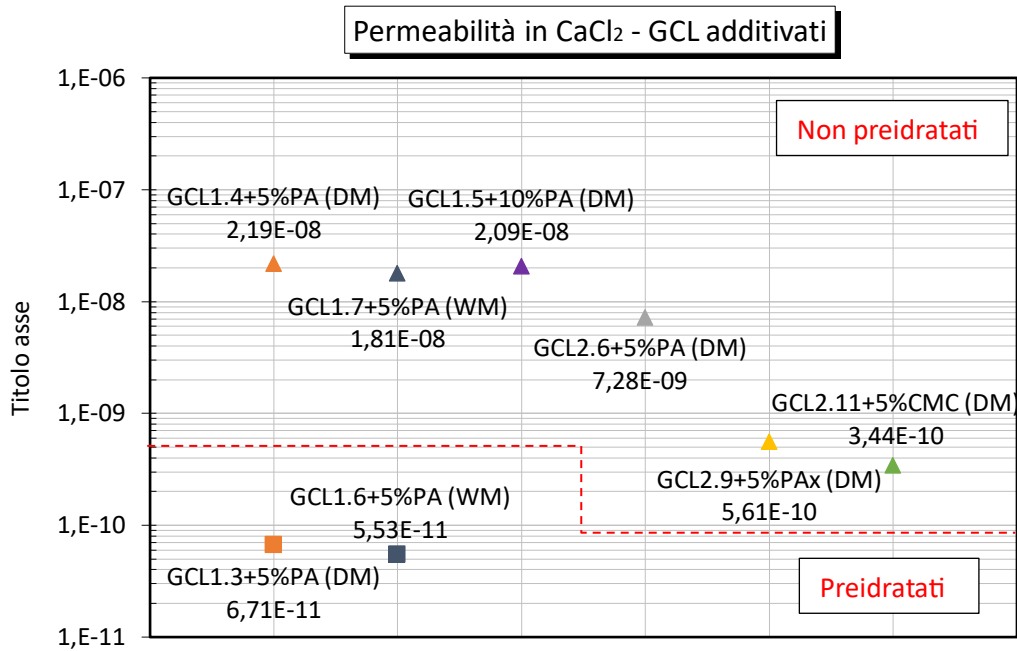


Figura 177: Permeabilità dei GCL additivati additivati in CaCl₂.

5.3.6 Effetto del liquido utilizzato sulla prova di permeabilità

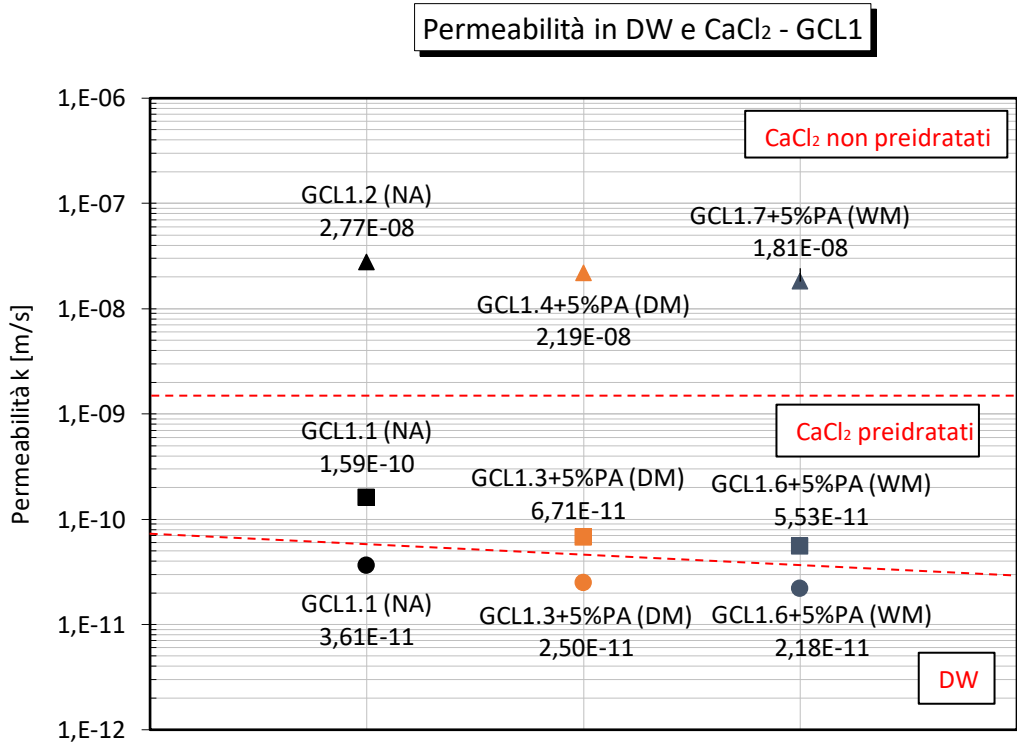


Figura 178: Permeabilità dei GCL1 in DW e CaCl₂.

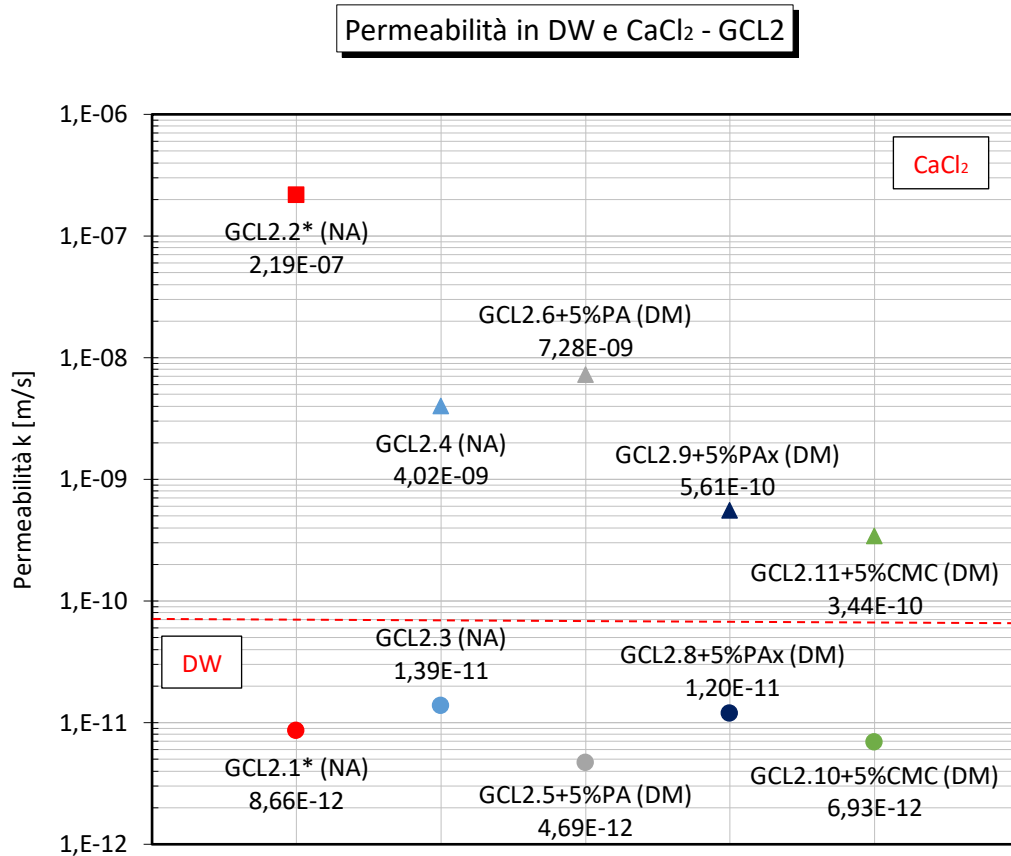


Figura 179: Permeabilità dei GCL2 in DW e CaCl₂.

Nota: *=campioni non ricostruiti con bentonite granulare e non passante al setaccio n.80 (GCL con fibre agugliate intatte).

La ridotta capacità della bentonite di rigonfiare quando viene a contatto con liquidi aggressivi è ben nota in letteratura, questo fenomeno ovviamente va ad aumentare la permeabilità dei GCL. Qui sopra viene sottolineato questo fenomeno, evidenziando come la permeabilità dei campioni permeati direttamente in un liquido aggressivo (CaCl₂) presenti un incremento che va da 1 a 5 ordini di grandezza rispetto alla bentonite permeata in DW. Inoltre, qui sopra si sottolinea anche come la preidratazione in DW abbia degli effetti migliorativi sulla k in CaCl₂ rispetto alla permeabilità di materiali permeati direttamente in cloruro di calcio.

5.4 Correlazione free swell – permeabilità

L'indice di rigonfiamento libero (free swell index) è una proprietà indice ampiamente utilizzata in quanto riflette le proprietà chimiche tra la bentonite presente nei GCL e le sostanze permeanti di interesse. L'indice di rigonfiamento è regolamentato dalla specifica ASTM D5890 e la sua determinazione è ampiamente spiegata nel paragrafo 3.2.1. L'indice di rigonfiamento viene spesso utilizzato come indicatore del comportamento idraulico dei geocompositi bentonitici. Tuttavia, il vero comportamento idraulico non può essere garantito fino all'esecuzione di una prova di permeabilità. Le bentoniti con elevata capacità di rigonfiamento sono generalmente associate ad un basso valore di k. In letteratura sono presenti vari tentativi di correlazione tra l'indice di rigonfiamento e la permeabilità dei GCL, però poche sono quelle che riguardano i geocompositi bentonitici trattati con polimeri, considerando le molte variabili in gioco: liquido permeato, tipo di bentonite, tipo di polimero utilizzato, contenuto di polimero e stress di confinamento. Di seguito, per semplificare questo contesto sono state sviluppate sei correlazioni così suddivise: GCL1 non additivato; GCL1 additivato; GCL2 non additivato; GCL2 additivato GCL non additivato; GCL additivato. Per svolgere queste correlazioni è stata adottata la seguente equazione come riferimento:

$$\log\left(\frac{k}{k^*}\right) = e^{[A \times (SI - B)]} \tag{26}$$

dove:

k = permeabilità [m/s]

SI = indice di rigonfiamento della bentonite [mL/2g]

A, B, k* = parametri di adattamento (vedi Tabella 39).

I parametri A, B e k* descrivono la forma della curva che descrive la variazione di SI con il valore k. In particolare, la pendenza della porzione iniziale della curva è regolata dal parametro A; il parametro B è definito in modo tale che il valore di k sia associato sempre ad un valore positivo di SI; il parametro k* descrive la natura asintotica della curva. In base alle correlazioni fatte, i valori descritti sono indicati nella Tabella 39.

Tabella 39: Parametri di adattamento che descrivono la curva di correlazione di SI con il valore k.

Tipologia di bentonite	Parametri		
	A	B	k*
GCL1 non additivata	-0,19	11,74	$3,50 \times 10^{-11}$
GCL1 additivata	-0,09	25,74	$2,00 \times 10^{-11}$
GCL2 non additivata	-0,18	12,16	$8,50 \times 10^{-12}$
GCL2 additivata	-0,06	25,21	$4,00 \times 10^{-12}$
GCL non additivata	-0,14	14,19	$8,50 \times 10^{-12}$
GCL additivata	-0,04	39,01	$4,00 \times 10^{-12}$

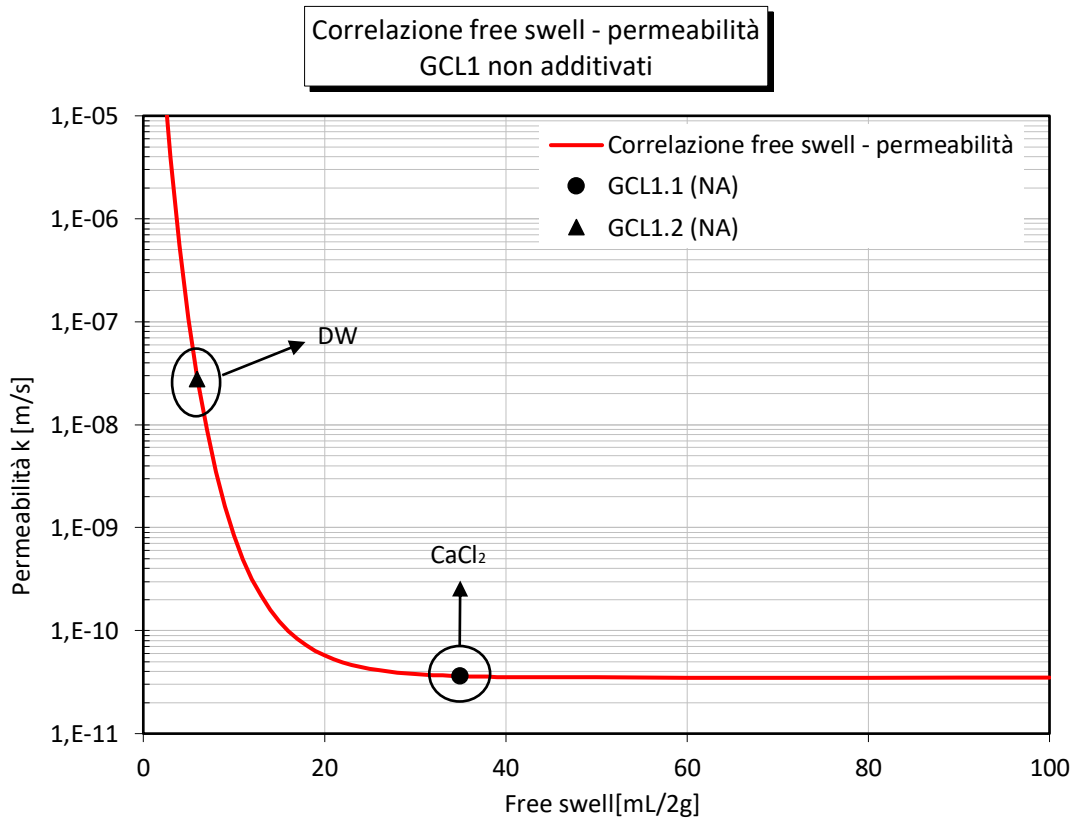


Figura 180: Correlazione indice di rigonfiamento libero con la permeabilità – GCL1 non additivati.

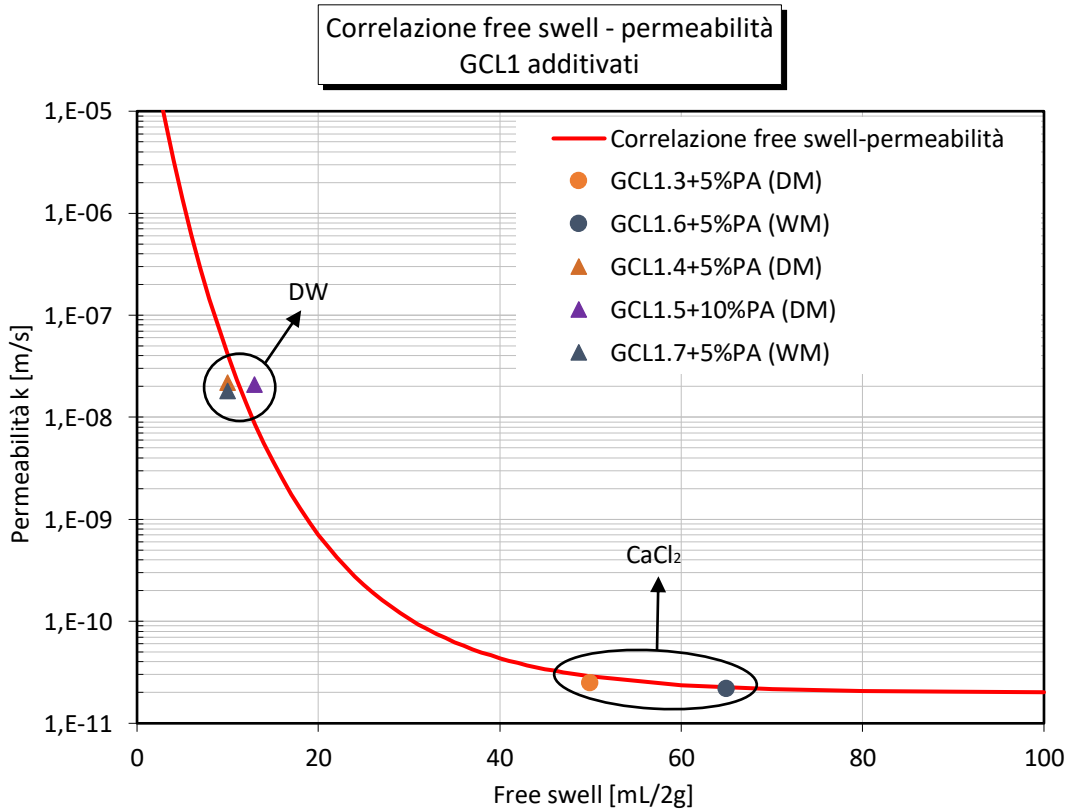


Figura 181: Correlazione indice di rigonfiamento libero con la permeabilità – GCL1 additivati.

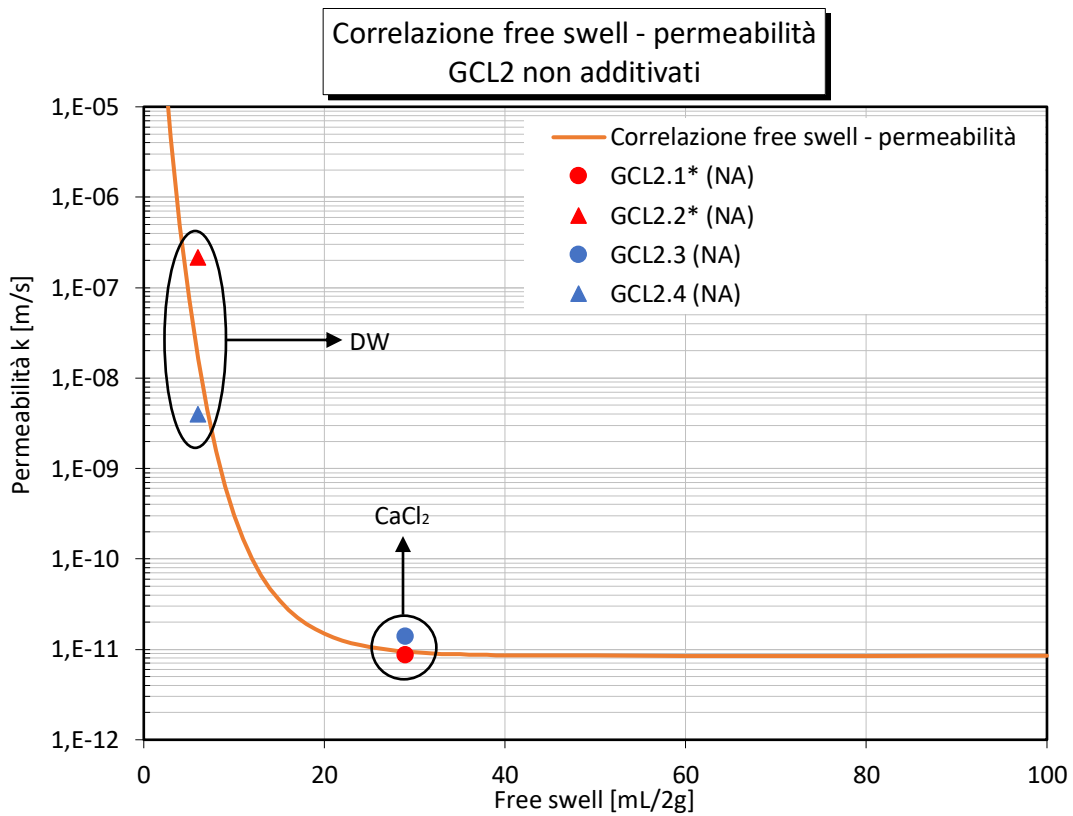


Figura 182: Correlazione indice di rigonfiamento libero con la permeabilità – GCL2 non additivati.

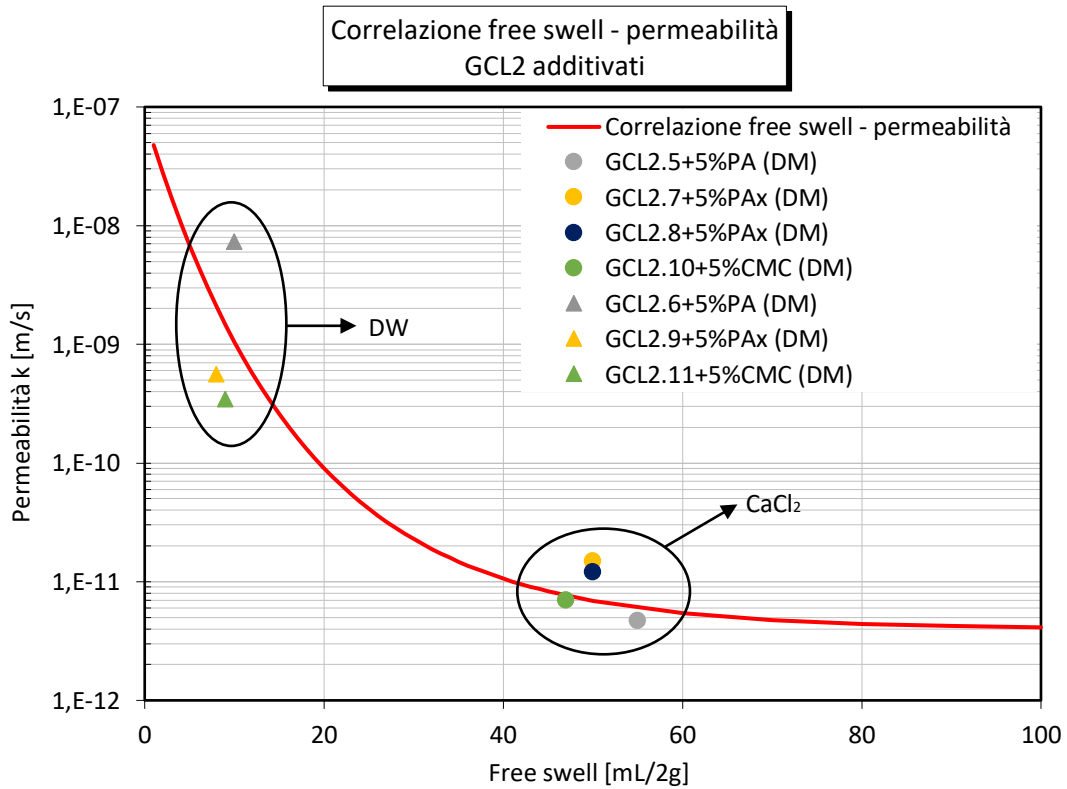


Figura 183: Correlazione indice di rigonfiamento libero con la permeabilità – GCL2 additivati.

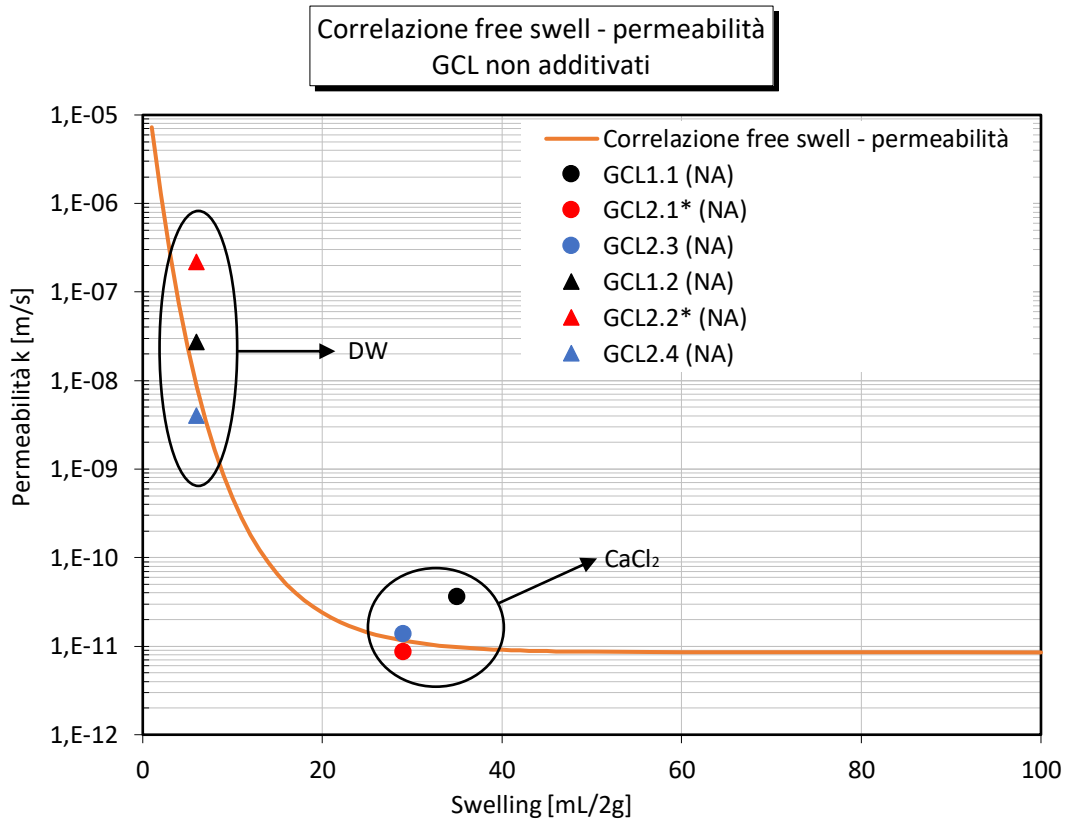


Figura 184: Correlazione indice di rigonfiamento libero con la permeabilità – GCL non additivati.

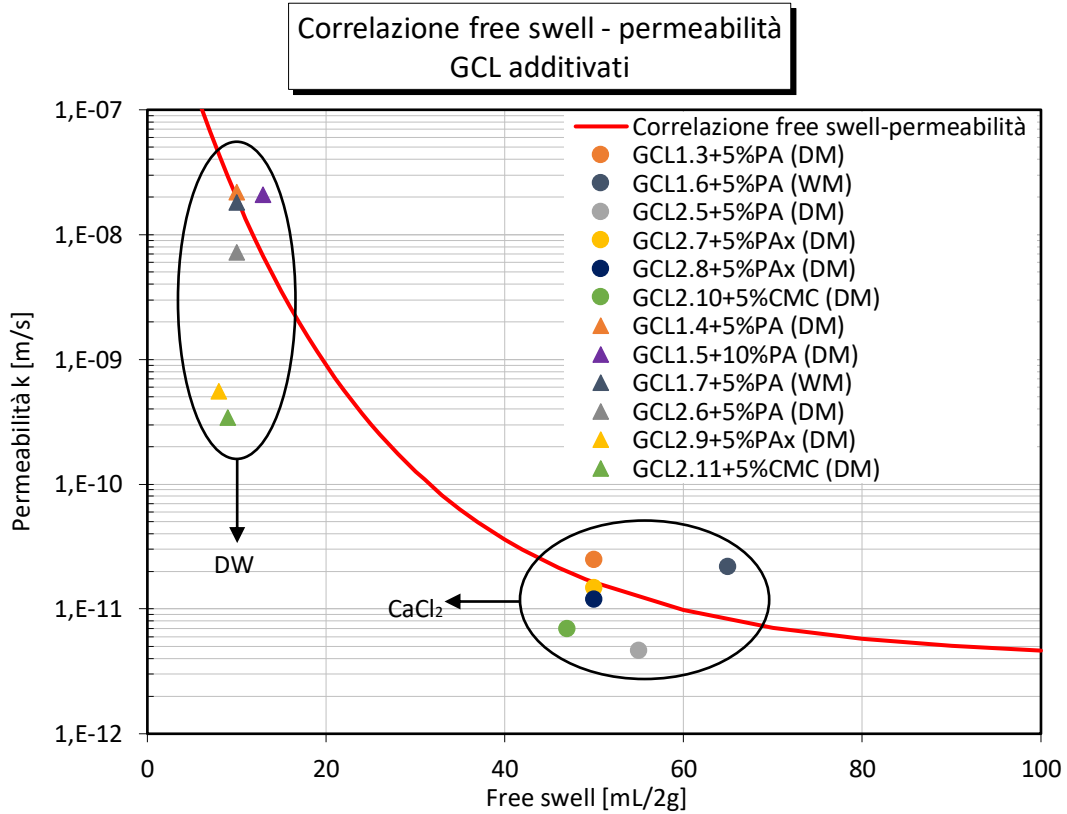


Figura 185: Correlazione indice di rigonfiamento libero con la permeabilità – GCL additivati.

CONCLUSIONI

Il lavoro presentato in questa tesi ha utilizzato due geocompositi bentonitici (indicati nel corso del lavoro genericamente come GCL1 e GCL2) presenti sul mercato. Questi due materiali sono stati modificati aggiungendo alla bentonite una percentuale di polimero del 5% o 10%. I polimeri utilizzati sono tre: poliacrilammide lineare (PA) (solubile in acqua); poliacrilammide reticolare (PAX), non solubile in acqua; carbossimetilcellulosa di sodio (CMC), solubile in acqua. Le tecniche di additivazione utilizzate sono due: Dry-Mix (DM), miscelazione a secco di bentonite e polimero; Wet-Mix (WM), miscelazione di polimero bentonite in fase liquida e successivo essiccamento. Il comportamento idraulico dei materiali preparati è stato indagato con riferimento a due liquidi permeanti: acqua distillata (DW), che simula ambienti poco aggressivi ed una soluzione di cloruro di calcio (167 mM CaCl₂), che simula ambienti molto aggressivi. Alla luce dei risultati ottenuti ed illustrati nei capitoli precedenti si possono trarre le seguenti conclusioni.

- Le due tecniche di additivazione utilizzate (Dry-Mix e Wet-Mix) hanno portato (almeno con riferimento al GCL1 ed alla PA) risultati molto simili tra di loro in termini di prestazioni idrauliche, nell'ambito dei tempi di prova sperimentati in questo studio. Questo ha suggerito di adottare la tecnica di additivazione dry-mix in quanto offre una maggiore semplicità e quindi economicità nella preparazione.
- Sempre con riferimento al GCL1 ed alla PA, l'incremento della percentuale di polimero additivato dal 5% al 10% non ha prodotto un miglioramento significativo delle prestazioni idrauliche, nell'ambito dei tempi di prova sperimentati in questo studio. Questo ha suggerito di adottare la percentuale di additivazione del 5%.
- Con riferimento al GCL2 l'additivazione con PA ha portato a risultati nettamente migliori nelle prove di rigonfiamento libero rispetto all'additivazione con gli altri polimeri, sia nelle prove condotte in DW che in CaCl₂. Tuttavia, il miglioramento delle caratteristiche di rigonfiamento libero, confermato anche dalle prove in condizione confinate, non ha avuto riscontro in termini di permeabilità al CaCl₂, in quanto i campioni additivati con la PA hanno evidenziato i risultati peggiori rispetto agli altri campioni additivati.
- Con riferimento al GCL2, tra i polimeri utilizzati, i risultati migliori in CaCl₂ sono stati ottenuti con l'additivazione con poliacrilammide reticolata (PAX) comparabili con quelli ottenuti con la CMC, il cui effetto migliorativo sulla permeabilità in presenza di soluzioni aggressive era atteso ed ampiamente documentato nella letteratura specialistica.

- La preidratazione in acqua distillata si è dimostrata la tecnica migliore in termini di prestazioni idrauliche finali in presenza di liquidi aggressivi; infatti, sia i campioni additivati che non presentano una permeabilità molto inferiore rispetto ai campioni idratati direttamente in CaCl_2 .
- La correlazione elaborata tra il free swell e la permeabilità dei GCL additivati e non (indipendentemente dal liquido permeante) evidenzia che tale correlazione è molto sensibile al valore del free swell nel range dei bassi valori (ad esempio passando da un rigonfiamento di 6ml/2g ad uno di 5ml/2g la permeabilità può variare di uno o due ordini di grandezza), mentre è praticamente insensibile nel campo degli altri valori (ad esempio passando da un free swell di 40 ml/2g a 80 ml/2g si ottiene una permeabilità quasi identica). Quindi tale prova, pur utile come indicazione qualitativa, soprattutto nel campo dei bassi valori deve essere sempre associata ad una misura diretta della permeabilità.

Nel proseguimento di questo studio, oltre alla prosecuzione di alcune delle prove descritte che sono ancora in corso, sarà verificata la possibile eluizione dei polimeri durante la permeazione mediante misure della LOI (perdita al fuoco), allo scopo di valutare il comportamento a lungo termine dei materiali additivati.

BIBLIOGRAFIA

Articoli

- Bouazza – Geosynthetic clay liners (2001).
- Christian Wireko, Tarek Abichou – Investigating factors influencing polymer elution and the mechanism controlling the chemical compatibility of GCLs containing linear polymers (2021).
- Wolfgang Lieske, Rowena Verst, Kent von Maubeuge, Torsten Wichtmann – A brief introduction to polymers and concepts of polymer modification of bentonite for barrier applications (2022).
- Michael A. Malusis, Charles D. Shackelford – Chemico-Osmotic Efficiency of a Geosynthetic Clay Liner (2002).
- Anna Norris, Neelufar Aghazamani, Joseph Scalia, Charles D. Shackelford – Hydraulic performance of geosynthetic clay liners comprising anionic polymer-enhanced bentonites (2021).
- S. Keerthana, Dali Naidu Arnepalli – Hydraulic Performance of Polymer-Modified Bentonites for Development of Modern Geosynthetic Clay Liners (2023).
- Xing Chen, Yu Tan, Tim Copeland, Jiannan Chen, Daoping Peng, Tao Huang – Polymer elution and hydraulic conductivity of polymer-bentonite geosynthetic clay liners to bauxite liquors (2023).
- Hakki O. Ozhan , Aykut Erkal – Internal erosion and permeability of Na CMC-treated and PAM-treated geosynthetic clay liners (2023).
- Md. Saifur Rahman, Md. Saifur Rahman, Md. Saif Hasan, Sunghyun Nam, Aneek Krishna Karmakar, Md. Shameem Ahsan, Muhammad J. A. Shiddiky, Mohammad Boshir Ahmed – Recent Developments of Carboxymethyl Cellulose (2021).
- Davide Bernardo – Tesi di dottorato in fase di stesura (data presunta 2024).

Standard

- ASTM 5890–19 – Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners (2019).
- ASTM D7928–21 – Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis (2021).
- D4546–21 – Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils (2021).
- ASTM D6766–20 – Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially Incompatible Aqueous Solutions (2020).

Link e siti internet

- <http://www.galenotech.org/stokes.htm#:~:text=dimostrazione%20della%20formula%20di%20Stokes&text=fr%20%3D%20%CF%80%20%CE%B7%20R%20v.&text=dove%20con%20di%20si,in%20cui%20le%20ordinate%20crescono>
- https://moodle2.units.it/pluginfile.php/213527/mod_resource/content/0/03%20LIT%202016%20-%20Sedimenti.pdf
- <https://www.chimica-online.it/fisica/legge-di-darcy.htm>

- <https://www.aup.it/wp-content/uploads/2012/04/Lezione7A-D.pdf>
- <https://www.xpolymers.it/pam.html>
- <http://www.geo3.biz/laboratorio/>
- <https://www.notcollapsed.com/granulometria/>
- <https://www.mapei.com/it/it/home-page>
- <https://heidolph-instruments.com/en/start>
- <https://it.hlgeomembrane.com/geosynthetic-clay-liner/geosynthetic-clay-liners-in-landfills.html>
- https://it.made-in-china.com/co_zhonglu/image_Swelling-Waterproof-Bentonite-Sheet-Bentonite-Mat-Geosynthetic-Clay-Liners-Bentonite-Geotextile-for-Landfill_yssygnhsog_2f1j00cakogHenfybh.html
- https://it.wikipedia.org/wiki/Gel_di_poliacrilammide
- <https://www.dbt.univr.it/documenti/Avviso/all/all401831.pdf>
- <https://www.micronizzazioneinnovativa.com/>
- <https://www.fluegel-gmbh.de>
- <https://www.alquera.com/wp-content/uploads/2016/02/td-stockosorb-660-ev-1.pdf>
- <https://www.sytec.ch/it/prodotti/impermeabilizzazioni-interrate-con-geomembrane-sytec/stuoia-bentonitica-sytec-bentofix>
- <https://www.mineralstech.com/business-segments/performance-materials/cetco/environmental-products/products/gcl/bentomat>
- <https://www.oiv.int/public/medias/1159/oiv-eno-366-2009-it.pdf>
- https://www.merckmillipore.com/IT/it/product/Carboxymethylcellulose-Sodium-Salt-High-Viscosity-CAS-9004-32-4-Calbiochem,EMD_BIO-217274?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F#anchor_COA