



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Indagine sperimentale sulla durabilità di
aggregati da rifiuti di costruzione e demolizione
stabilizzati mediante attivazione alcalina**

*Experimental investigation on durability of alkali-activated stabilized
aggregates from construction and demolition waste*

Relatori

Prof. Marco Bassani

Prof.ssa Paola Palmero

Ing. Luca Tefa

Candidata

Martina Ridolfo

Dicembre 2018

Sommario

Introduzione	5
Capitolo 1 - Analisi bibliografica	11
1.1 CDWA non stabilizzati: caratteristiche meccaniche	11
1.2 CDWA stabilizzati: caratteristiche meccaniche	12
1.2.1. CDWA stabilizzati per idratazione	13
1.2.2. CDWA stabilizzati mediante attivazione alcalina	15
1.3 Degrado termico dei CDWA stabilizzati	18
Capitolo 2 – Obiettivi, materiali e metodi	21
2.1 Obiettivi	21
2.2 Piano sperimentale	22
2.3 Materiali.....	23
2.3.1 Aggregati.....	23
2.3.2 Cemento	24
2.3.3 Soluzione alcalina	24
2.4 Prelievo e caratterizzazione del materiale	26
2.5 <i>Mix design</i> e confezionamento dei campioni	32
2.5.1. Compattazione mediante pressa a taglio giratoria	32

2.5.2.	Lavorabilità delle miscele di CDW	35
2.5.3.	Compattazione dei campioni di misto naturale stabilizzato	40
2.6	Stagionatura e degrado termico	42
2.6.1.	Stagionatura	42
2.6.2.	Degrado termico	43
2.7	Caratteristiche meccaniche	44
2.7.1.	Prova ciclica triassiale	44
2.7.2.	Prova a Compressione Semplice Non Confinata (UCS).....	48
2.7.3.	Prova a Trazione Indiretta (ITS).....	52
2.8	Test di cessione	54
Capitolo 3-	Risultati e analisi dei dati.....	55
3.1	Risultati.....	55
3.1.1	Modulo resiliente (MR)	55
3.1.2	Compressione semplice non confinata (UCS).....	62
3.1.3	Trazione indiretta (ITS).....	63
3.2	Analisi dei dati	64
3.2.1	Effetto del degrado termico.....	65
3.2.2	Confronti tra materiale da riciclo e misto cementato	80
3.2.3	Test di cessione	92
Conclusioni	.....	95
Bibliografia	.....	99
Indice delle figure	.....	105
Indice delle tabelle	.....	109
Indice degli allegati	.....	111

Introduzione

Negli ultimi anni l'attenzione verso il recupero dei materiali derivanti da processi di costruzione e demolizione è in costante crescita. Il Decreto Ministeriale n° 203 del 7/5/2003 [1] e la circolare del Ministero dell'Ambiente n° 5205/05 [2] incentivano la Pubblica Amministrazione e le Società private ad utilizzare aggregati riciclati, i cosiddetti *Construction and Demolition Waste Aggregates* (CDWA), per ridurre tanto il volume di quei potenziali materiali che altrimenti sarebbero destinati alle discariche, quanto il volume dei materiali tradizionali di primo impiego provenienti da cave. A livello europeo, inoltre, la Direttiva n° 2007/97/EC [3] incoraggia un riciclo massivo dei materiali da rifiuto, imponendo un livello minimo di riutilizzo del 70% da raggiungersi entro il 2020 [4]. I dati del "Rapporto Rifiuti Speciali" del 2016 [5] indicano una produzione di circa 721 milioni di tonnellate di scarti provenienti dalla costruzione e demolizione di opere civili in tutta Europa; il solo dato nazionale indica una produzione annua superiore a 50 milioni di tonnellate [5].

I CDWA sono occasionalmente impiegati nei riempimenti, nella costruzione di rilevati stradali, e nella formazione degli strati non legati delle pavimentazioni di strade a basso traffico. Essi sono fortemente eterogenei, con caratteristiche volumetriche e meccaniche molto variabili poiché costituiti da terre, rocce e aggregati, conglomerati bituminosi dalla fresatura delle pavimentazioni stradali (RAP), conglomerati cementizi, mattoni e piastrelle, ma anche da piccole frazioni di vetro, plastica e legno.

Tali aggregati di recupero derivano dalla demolizione selettiva o non-selettiva di opere civili. Nel primo caso, i materiali da rifiuto sono suddivisi in frazioni omogenee della stessa origine;

ciò semplifica il processo di riciclo e aumenta la convenienza del recupero. Nel secondo caso, il materiale è eterogeneo con particelle anche in alcuni casi di frazioni indesiderate (es. carta, plastica, gesso) che impoveriscono la qualità dell'aggregato riciclato.

Un aggregato da rifiuto selezionato all'origine del processo richiede maggiori costi iniziali, ma ciò consente da un lato di risparmiare sui costi di smaltimento o trattamento, variabili che aumentano con l'eterogeneità e la presenza di sostanze inquinanti, dall'altro di garantire al materiale riciclato un adeguato livello di omogeneità [6]. Inoltre, separando all'origine le differenti tipologie di rifiuti è possibile avviare a trattamento non solo materiali tipici delle costruzioni, come laterizi e calcestruzzo, ma anche il legno, la plastica, il vetro e i metalli, che possono essere avviati alle rispettive filiere di recupero [6].

Con la prima metodologia si producono i cosiddetti *Selected CDW Aggregates (SCDWA)*, con la seconda si generano gli *Unselected CDW Aggregates (UCDWA)*, i quali sono a loro volta raggruppati in sottoclassi in funzione della tipologia di materiale presente (calcestruzzo, laterizio, RAP ed aggregato naturale) valutato come percentuale in peso, sulla base della normativa UNI EN 933-11, la quale descrive un metodo semplificato per l'esame degli aggregati grossolani da riciclo in modo da valutare le percentuali di materiali costituenti.

Come detto, i CDWA possono essere utilizzati nei rilevati, nei recuperi ambientali, nei sottofondi stradali, ferroviari e aeroportuali, nei sottofondi di piazzali civili ed industriali, ed anche negli strati di fondazione delle pavimentazioni. La normativa tecnica nazionale consente anche il confezionamento di calcestruzzo con aggregati derivanti dal riciclaggio. Tuttavia, la percentuale massima consentita di sostituzione con aggregati riciclati nei calcestruzzi strutturali comporta un numero elevato di controlli da eseguire che ne ostacolano di fatto l'impiego [6]. Diverso è il caso dei calcestruzzi a bassa resistenza (C 8/10), nei quali è possibile sostituire fino al 100% gli aggregati naturali con quelli da riciclo, in conformità alla norma armonizzata UNI EN 12620:2007 [6].

Prima di poter essere impiegati, però, anche i CDWA devono ricevere la marcatura CE, prescritta e regolamentata dal Regolamento (UE) 305/2011. Tale Regolamento, che ha sostituito la precedente Direttiva Prodotti da Costruzione 79/106, rientra nel processo di armonizzazione del libero scambio nei prodotti all'interno dei Paesi dell'Unione Europea e dei Paesi SEE dello Spazio Economico Europeo [6]. Con la marcatura CE si garantisce il possesso di caratteristiche prestazionali costanti, indipendentemente dalla sua origine o natura.

Diversi sono i vantaggi dovuti all'utilizzo dei materiali da riciclo per pavimentazioni stradali e non solo. L'uso, infatti, dei CDWA riduce l'impiego di risorse non rinnovabili ed evita l'intasamento di discariche dovuto alla presenza di scarti di costruzione [7], abbassando sia i costi di produzione sia quelli di trasporto. Nonostante, alcune volte, gli impatti ambientali

delle strategie di riciclo eccedano i benefici ambientali, nel caso dei CDWA il riciclo è economicamente sostenibile e proficuo sia da un punto di vista energetico che ambientale [7]. L'impiego di tali materiali può limitare le emissioni di CO₂. Alcune proprietà, come il contenuto di solfuri e sali solubili, sono identificate come "proprietà critiche" che limitano notevolmente l'uso dei CDWA come materiali strutturali negli strati non legati delle pavimentazioni; infatti quando questi materiali vengono impiegati nella costruzione delle strade, l'eventuale acqua che si infiltra attraverso gli strati potrebbe entrare in contatto con sostanze potenzialmente pericolose e trascinare in profondità gli inquinanti [7]. È necessario allora valutare la compatibilità ambientale relativa all'uso dei materiali da riciclo. Essa, così come la sua certificazione, è uno degli elementi previsti dalla normativa vigente per stabilire il passaggio dallo stato di rifiuto allo stato di prodotto da costruzione. Inoltre, non può esservi marcatura CE e quindi commerciabilità di un prodotto privo della verifica di compatibilità ambientale [6]. La normativa vigente prevede che sia eseguita una verifica analitica che consenta di valutare l'idoneità del rifiuto in ingresso e la possibilità di lavorarlo per trasformarlo in aggregato riciclato [6]. Il test analitico di laboratorio, finalizzato a verificare la sua compatibilità ambientale, è il cosiddetto test di lisciviazione (o test di cessione) che valuta il contenuto di elementi impattanti presenti nell'acqua percolata dal materiale sciolto, detta "eluato". Tale test è eseguito in conformità al D.M. 05/02/98.

Il possibile rilascio di sostanze pericolose, tuttavia, non è l'unico svantaggio; molte stazioni appaltanti limitano l'impiego dei CDWA per diversi fattori:

- a. l'assenza di una norma unica che regolamenti il trattamento e la messa in opera di tali materiali;
- b. la mancanza di adeguati livelli di informazione e formazione dei tecnici e professionisti che rimangono tutt'oggi diffidenti nei confronti di tali materiali;
- c. grossi dubbi non ancora fugati sulla durabilità in opera dei CDWA;
- d. l'assenza di un prezzario nazionale e regionale che fornisca indicazioni sui costi dei processi e dei materiali al fine di aiutare i progettisti nel proporre anche soluzioni alternative attraverso l'uso dei CDWA [8].

La ricerca di settore ha prodotto numerosi studi di tipo sperimentale in cui sono state investigate le caratteristiche fisico-volumetriche e meccaniche dei CDWA tal quali. Tali ricerche dimostrano che, sebbene siano maggiormente suscettibili ai fenomeni di degrado simulati in laboratorio, i CDWA presentano proprietà meccaniche comunque confrontabili con quelli di aggregati naturali quando osservati in campo. Ciò conferma la possibilità di un loro impiego nelle opere civili e, come detto in precedenza, nella costruzione di varie parti del corpo stradale [9, 10, 11].

A partire dalle buone proprietà dei CDWA, altre ricerche hanno evidenziato le altrettante buone proprietà degli stessi aggregati stabilizzati con leganti idraulici classici, prevalentemente cemento Portland, o con leganti "alternativi". In quest'ultimo caso la lista dei prodotti è ampia e include le loppe d'altoforno, le ceneri volanti, le polveri da elettrofiltro, ed altri materiali ancora. Questi stessi leganti alternativi sono stati considerati sia in reazioni di idratazione con acqua, sia in reazioni di attivazione alcalina (o geopolimerizzazione) a contatto di soluzioni acquose fortemente basiche ($\text{pH} > 12$). In quest'ultimo caso, la presenza di alluminati e silicati permette la formazione di matrici gel-polimeriche con catene stabili del tipo Si-O-Al-O.

I risultati degli studi condotti sui CDWA con leganti idraulici e alternativi sono risultati nel complesso positivi. Dagli studi condotti da Allahverdi e NajafiKani [12], Jha e Tuladhar [13], Zaharaki et al. [14] si evince un incremento delle caratteristiche meccaniche significative (resistenza e rigidità su tutte) tanto da giustificare l'impiego di questi materiali anche in pavimentazioni soggette a elevati livelli di sollecitazione (strade con intenso traffico veicolare anche di mezzi pesanti).

All'interno delle analisi sperimentali condotte sui CDWA stabilizzati con leganti alternativi si inserisce anche il presente elaborato di tesi. L'obiettivo è stato quello di indagare la durabilità nei confronti del degrado termico dei CDWA stabilizzati con soluzioni alcaline in grado di innescare processi di geopolimerizzazione. La presenza di un ambiente fortemente basico induce l'attivazione alcalina dei silico-alluminati presenti nelle frazioni più fini dei CDWA.

L'obiettivo sperimentale è stato perseguito sottoponendo campioni maturati secondo diversi tempi di stagionatura (7, 28, 45 e 60 per i CDWA e 7 e 28 giorni per il misto cementato) a cicli di gelo e disgelo con variazioni di temperatura da -20°C a $+20^{\circ}\text{C}$, con livelli di severità crescente (4, 8 e 12 cicli) considerando anche un livello di riferimento (0 cicli). Le variazioni di resistenza e rigidità prodotte da tali cicli, valutate attraverso prove di laboratorio statiche e dinamiche come la prova ciclica triassiale, di trazione indiretta e di compressione semplice non confinata, ha fornito la misura della durabilità di tali materiali. Un misto cementato con aggregati tradizionali è stato considerato nello stesso programma sperimentale allo scopo di fornire il riferimento utile a giudicare gli effetti del degrado termico sui CDWA.

Il presente lavoro di Tesi si compone di tre capitoli.

Il primo introduce lo stato dell'arte della ricerca. L'analisi bibliografica ha considerato soltanto materiali contenenti gli aggregati da CDW. In particolare, sono valutate le varie tecniche di stabilizzazione degli aggregati da riciclo e la letteratura esistente in merito al degrado termico. Il secondo capitolo illustra gli obiettivi del lavoro, i materiali e le metodologie sperimentali considerate al fine di giudicare la durabilità dei due materiali analizzati. Il terzo capitolo

presenta i risultati ottenuti durante il corso della sperimentazione, l'analisi e la discussione degli stessi. In particolare, quest'ultimo capitolo illustra gli esiti del confronto tra le prestazioni dell'aggregato da CDW stabilizzato per attivazione alcalina e il misto cementato tradizionale preso a riferimento.

Capitolo 1 - Analisi bibliografica

L'aggregato riciclato è utilizzato nelle costruzioni stradali da oltre vent'anni e grazie a numerosi studi condotti negli ultimi anni il suo uso si sta intensificando soprattutto in quelle applicazioni che non necessitano di elevate prestazioni meccaniche [15]. Tale materiale può essere utilizzato in due condizioni differenti: miscelato con sola acqua (non stabilizzato), oppure miscelato con piccole quantità di leganti organici e inorganici, ossia stabilizzato.

1.1 CDWA non stabilizzati: caratteristiche meccaniche

Diversi studi furono condotti sulle caratteristiche meccaniche dei CDWA non stabilizzati. Arulrajah et al. [10] considerarono campioni composti da mattoni frantumati (CB), aggregati provenienti dalla frantumazione del calcestruzzo (RCA) e rocce frantumate (CR) miscelati in percentuali diverse (CB uniti con percentuali dal 10% al 50% di RCA e CR), ma non stabilizzati. I risultati di modulo resiliente ottenuti tramite prova ciclica triassiale, mostrarono come si riducano le caratteristiche meccaniche della miscela proporzionalmente alla quantità di laterizio aggiunta. In generale però, i valori ottenuti hanno permesso di affermare che i materiali testati sono idonei ad essere utilizzati come strato di sottofondo della pavimentazione stradale [10].

In un altro studio di Arulrajah et al. [11] furono ricostruiti campioni, composti da aggregati provenienti dalla frantumazione del calcestruzzo (RCA), non stabilizzati. Con prove cicliche triassiali misurarono il modulo resiliente dei campioni confezionati con diversi contenuti d'acqua. I risultati ottenuti hanno mostrato come le caratteristiche meccaniche ed in particolare il modulo resiliente dei campioni di RCA siano sensibili al contenuto d'acqua ed al livello di compattazione raggiunta. Ciononostante, i valori di modulo osservati hanno confermato che gli RCA possono essere impiegati come materiali per lo strato di sottofondo delle pavimentazioni stradali [11].

La fattibilità di utilizzo del materiale riciclato è confermata anche da prove sul campo. Studi condotti da Lancieri et al. [16] e da Soleimanbeigi et al. [17] dimostrarono che i CDWA presentano valori di rigidità confrontabili con quelli ottenuti da alcuni misti granulari utilizzati nei sottofondi stradali ed inoltre tendono ad irrigidirsi nel lungo termine. Altre sperimentazioni condotte in situ, come quelle di Jiménez et al. [7, 18], Del Rey et al. [19], Herrador et al. [20], Sangiorgi et al. [21] e Park [22] valutarono la capacità portante e le deflessioni superficiali di strati di pavimentazione realizzati in CDWA tal quali. In particolare, i risultati di prove di carico su piastra hanno evidenziato un'ottima capacità portante degli strati costituiti da CDWA [7, 18 e 19]; quelli inerenti alle deflessioni superficiali, ottenuti tramite test con deflettometro a massa battente (FWD e LWD), hanno rivelato una maggiore rigidità per gli strati realizzati con aggregato naturale rispetto a quelli costituiti da materiale da riciclo, le quali, per un basso volume di traffico veicolare, non superano comunque i 10 mm dopo più di due anni dalla messa in opera [19]. Inoltre, la capacità portante degli strati di CDWA tal quale è migliorata con l'applicazione di strati successivi di pavimentazione [20] e con il tempo, grazie alla proprietà di auto-cementazione dei materiali da riciclo [21]. In generale, le sperimentazioni condotte tramite prove sul campo hanno evidenziato le buone caratteristiche meccaniche dei CDWA, rendendoli una valida alternativa all'aggregato naturale nella realizzazione di strati strutturali di strade non pavimentate soggette ad un basso volume di traffico veicolare [18, 19 e 21]. Per quanto concerne le pavimentazioni rigide, la sperimentazione condotta da Park [22], ha evidenziato una similarità tra i bacini di deflessione del materiale riciclato e di quello naturale, sottolineando quindi che anche nel caso di pavimentazioni rigide, i CDWA sono idonei alla realizzazione degli strati di pavimentazione.

1.2 CDWA stabilizzati: caratteristiche meccaniche

Seppur dotati di buone caratteristiche meccaniche, i CDWA tal quali sono, in alcuni casi, stati anche stabilizzati mediante:

- reazioni di idratazione con leganti idraulici tradizionali, come il cemento, o con leganti alternativi, come le polveri da elettrofiltro;
- attivazione alcalina di leganti alternativi provenienti dalla polverizzazione di scarti industriali, come loppe d'altoforno, ceneri volanti [4] attivati con l'impiego di soluzioni fortemente basiche.

1.2.1. CDWA stabilizzati per idratazione

Tradizionalmente la stabilizzazione avviene mediante l'aggiunta di polvere di cemento in grado di adempiere alla funzione di legante dopo la sua idratazione. Xuan et al. [23] condussero alcune sperimentazioni al fine di indagare in laboratorio la resistenza a compressione di questi materiali. Furono analizzati due differenti aggregati da rifiuto: aggregati provenienti dalla frantumazione del calcestruzzo (RCA) e aggregati provenienti dal riutilizzo del laterizio (RMA), entrambi stabilizzati tramite cemento Portland tradizionale (OPC). La resistenza a compressione fu valutata tramite prove di compressione semplice non confinata (UCS) su diversi campioni. I risultati ottenuti hanno rivelato che al diminuire del contenuto di laterizio e all'aumentare del contenuto di cemento e del grado di compattazione, la resistenza a compressione cresce. Incrementare il grado di compattazione rappresenterebbe un metodo economico per migliorare le resistenze ma non efficace per ottimizzare la rigidità flessionale del materiale stabilizzato [23].

Altre sperimentazioni condotte da Dongxing et al. [24], Taha et al. [25], Puppala et al. [26] e Mohammadinia et al. [27] sulle miscele di CDW stabilizzate a cemento, evidenziarono un miglioramento delle prestazioni meccaniche proporzionalmente alla quantità di polvere aggiunta, rendendo il materiale stabilizzato più denso e rigido [27]. Da tali studi si è dedotto, quindi, che i CDWA stabilizzati a cemento possono essere utilizzati nella realizzazione di strati di base e sottofondo delle pavimentazioni stradali in alternativa al tradizionale aggregato naturale.

Anche nel caso di CDWA stabilizzati a cemento numerose furono le prove sul campo condotte. In particolare, gli studi condotti da Agrela et al. [28] e Pérez et al. [29] si focalizzarono sulla realizzazione di una o più sezioni stradali composte da aggregati da CDW stabilizzati a cemento, indagandone la resistenza a compressione [28] e la capacità portante tramite deflettometro [28, 29]. I risultati ottenuti dalle prove sul campo hanno rivelato una resistenza a compressione media comparabile a quella valutata su un misto cementato tradizionale [28]

ed una capacità portante migliore di quella osservata per l'aggregato naturale, con deflessioni superficiali più basse [28, 29].

Altri studi sulla stabilizzazione dei CDWA hanno previsto, invece, la reazione di idratazione con un legante alternativo come le polveri da elettrofiltro o "Cement Kiln Dust (CKD)". I CKD sono scarti del processo di produzione del clinker [15], e sono costituiti da particelle della dimensione dei micron raccolte da un precipitatore elettrostatico e contengono un basso livello di ossidi rispetto al classico cemento Portland (OPC) [15]. Nella sperimentazione condotta da Bassani et al. [15] furono indagati due tipologie di campioni: CDWA stabilizzati con un legante idraulico tradizionale OPC e CDWA stabilizzati mediante CKD. I risultati ottenuti hanno evidenziato che le caratteristiche meccaniche dei CDWA stabilizzati con CKD e OPC sono tra loro confrontabili; l'aggiunta di CKD ha, infatti, rivelato una riduzione di lavorabilità dei CDWA+CKD ed un incremento del valore misurato di modulo resiliente fino a valori comparabili con i misti granulari tradizionali [15]. Le caratteristiche meccaniche osservate sono aumentate leggermente con il tempo di stagionatura, tanto che i valori di modulo sono rimasti pressoché costanti tra i 7 e i 28 giorni di curing. Differentemente dai valori di modulo, nel caso della resistenza a compressione semplice, passando dai 7 ai 28 giorni di curing i valori misurati sono raddoppiati [15].

Relativamente ai CDWA stabilizzati mediante reazione di idratazione con i CKD, altri tre interessanti studi vennero condotti sia in laboratorio che in situ. Miller et al. [30], Solanki et al. [31] e Ebrahimi et al. [32], analizzarono gli effetti indotti dalla stabilizzazione di materiali da riciclo con polveri da elettrofiltro. I risultati ottenuti hanno evidenziato, in generale, un incremento del modulo resiliente proporzionale alla percentuale di CKD aggiunta, fino a 30 volte migliore rispetto ai CDWA tal quali anche se i valori di modulo osservati sono risultati minori di 5-20 volte rispetto a quelli valutati su CDWA stabilizzati a cemento [32]. Infine, è stato registrato un lieve incremento di modulo resiliente legato al tempo di stagionatura sui CDWA stabilizzati con CKD, legato forse all'elevato contenuto di solfati e calce libera contenuti nelle polveri da elettrofiltro [32].

Diversi sono, infine, gli studi condotti sui materiali da riciclo stabilizzati tramite reazione di idratazione delle ceneri volanti miscelati ai CDWA. Li et al. [33, 34] e Wen et al. [35] valutarono sia in laboratorio sia in campo l'effetto indotto dalla stabilizzazione mediante ceneri volanti. I risultati ottenuti hanno evidenziato dei buoni valori di modulo resiliente e resistenza a compressione non confinata sia in situ che in laboratorio, anche se i primi sono risultati lievemente più bassi dei secondi. All'aumentare del contenuto di ceneri volanti è stata

registrato un incremento dei valori di modulo resiliente e resistenza a compressione e un decremento dei valori di deformazione permanente [35].

1.2.2. CDWA stabilizzati mediante attivazione alcalina

Per quanto concerne i leganti alternativi vengono attivati tramite l'utilizzo di una soluzione fortemente basica. La presenza di tale soluzione alcalina dà vita ad una reazione chimica tra i sali presenti in essa e gli alluminati presenti nei CDW che porta alla formazione di un geopolimero. Per la denominazione chimica dei geopolimeri, Davidovits [36] suggerisce il nome "polisialato", in cui sialato è un'abbreviazione per l'ossido alluminosilicato. La rete sialatica è composta da anioni tetraedrici di $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e $[\text{AlO}_4]^{5-}$ uniti tramite atomi di ossigeno, che richiedono ioni positivi come Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ e H_3O^+ , per compensare la carica negativa [37]. Il polisialato presenta la seguente formulazione empirica:

$$M_n\{-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2\}_n$$

in cui n rappresenta il grado di polimerizzazione, z è 1, 2 o 3 ed M è un catione alcalino, come il Potassio o il Sodio, generando differenti tipi di polisialati (Figura 1). In accordo con Davidovits [36], i geopolimeri sono "polimeri" in quanto si trasformano, polimerizzano e si induriscono già a basse temperature e sono "geo" perché sono anche inorganici, robusti e stabili ad alte temperature ed anche non infiammabili [37].

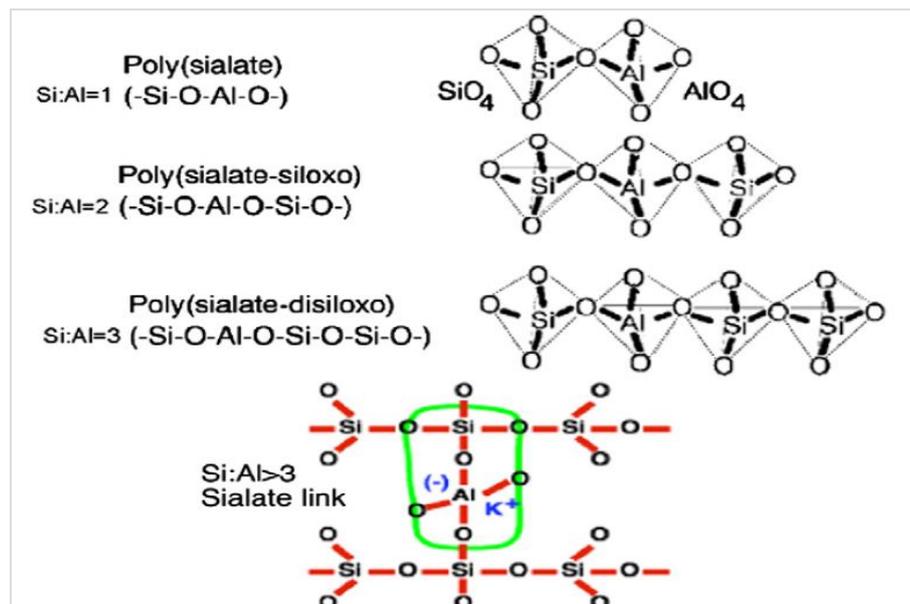


Figura 1: Tipi di polisialati [36].

Il meccanismo di reazione che spiega il fenomeno che si instaura all'interno dei leganti attivati alcalinamente non è ancora abbastanza chiaro, ma si pensa che possa dipendere dalla materia prima e dall'attivatore alcalino utilizzato. In accordo con Glukhovsy [38], il meccanismo di attivazione alcalina è composto da reazioni congiunte di distruzione e condensazione, che includono una distruzione della materia prima in unità strutturali a bassa stabilità, la loro interazione con strutture addensanti e la creazione di nuove strutture condensate [37]. La prima fase consiste nella rottura dei legami covalenti Si-O-Si e Al-O-Si, che ha luogo quando il pH della soluzione alcalina aumenta, cosicché questi gruppi si trasformano in una fase colloidale. Quindi si verifica un accumulo dei prodotti distrutti che interagiscono tra loro fino a formare una struttura addensata, portando nella terza fase ad una struttura condensata [37]. Altri autori sono concordi nel considerare che la maggior parte del meccanismo di reazione consista in una fase iniziale di dissoluzione dei silicati, seguita da fasi di trasporto e policondensazione [39, 40].

Tuttavia, queste fasi si presentano simultaneamente, impedendo un'analisi individuale delle singole fasi [41]. In accordo con Jaarsveld et al. [42], la formazione dei geopolimeri segue lo stesso processo della zeolite:

- a) Dissoluzione degli ioni OH⁻;
- b) Orientazione delle specie dissolte;
- c) Condensazione ed indurimento delle strutture in sistemi polimerici inorganici [37].

Relativamente agli aggregati da CDW stabilizzati con leganti alternativi attivati alcalinamente, Mohammadinia et al. [43] studiarono il comportamento del materiale da rifiuto CDW, stabilizzato mediante leganti alternativi, al fine di valutarne l'idoneità nell'impiego di tali materiali in strati di base e sottofondo delle pavimentazioni stradali. Fu analizzato materiale contenente conglomerato bituminoso fresato (RAP), mattoni frantumati (CB) e aggregati di riciclo comprendenti rocce e calcestruzzo (RCA) di dimensione massima pari a 20 mm e la stabilizzazione avvenne miscelando ai CDWA 3 percentuali diverse e combinate di ceneri volanti (FA) e loppe d'altoforno (S): CDWA+4%FA, CDWA+2%FA+2%S e CDWA+4%S. Queste tre combinazioni di leganti furono attivate alcalinamente mediante 3 diversi rapporti di soluzione alcalina/materiale solido pozzolanico (L/P): 0.3, 0.4 e 0.5. I valori osservati tramite prova di compressione semplice non confinata (UCS) evidenziarono un miglioramento delle resistenze meccaniche proporzionali al contenuto di loppa aggiunto, raggiungendo valori elevati nel caso in cui l'aggregato da CDW sia composto prevalentemente da RCA. Il valore misurato di resistenza a compressione è aumentato, inoltre, proporzionalmente al rapporto

L/P e ciò evidenziò la sensibilità dei CDWA al contenuto di attivante alcalino utilizzato. Per quanto concerne il modulo resiliente, valutato mediante prova ciclica triassiale, essi osservarono valori elevati per il RAP solo nel caso di pochi cicli di carico mentre nelle ultime sequenze di carico, i valori osservati più alti sono relativi ai RCA. Infine, i risultati ottenuti hanno evidenziato come l'aggregato da CDW composto da mattoni frantumati abbia le resistenze più basse sia in termini di compressione semplice che in termini di modulo resiliente. Da tale studio si è dedotto che gli aggregati da rifiuto composti da RCA e RAP stabilizzati alcalinamente rappresentano una valida alternativa nella realizzazione di strati di base e sottofondo delle pavimentazioni stradali [43].

Anche Arulrajah et al. [44] studiarono il comportamento dei CDWA stabilizzati mediante leganti alternativi attivati alcalinamente. In particolare essi indagarono due tipologie di CDWA, aggregati da calcestruzzo riciclato (RCA) e mattoni frantumati (CB), miscelati con 3 leganti alternativi: ceneri volanti (FA), loppa d'altoforno granulata (S) e residuo di carburo di calcio (CCR) attivati alcalinamente attraverso una soluzione fortemente basica. Furono indagate 6 combinazioni di legante per ogni aggregato (RCA e CB): 10%CCR, 10%S, 10%FA, 5%CCR+5%FA, 5%CCR+5%S e 5%FA+5%S. Il modulo resiliente fu valutato tramite prova ciclica triassiale, con 15 sequenze di carico a tensione applicata crescente. I valori ottenuti risultarono simili nel caso in cui RCA e CB venissero legati con il 10% di CCR o 10% di loppa d'altoforno. Si ottennero, invece, i valori più elevati nel caso in cui i due aggregati da CDW furono miscelati con il 5% di CCR e il 5% di loppa. Come nello studio di Mohammadinia et al. [43], anche in questo caso l'aggiunta di loppa d'altoforno ha prodotto gli effetti migliori sulla resistenza a compressione, valutata tramite prova UCS, rispetto agli altri due leganti analizzati, rendendo i due aggregati da rifiuto, RCA e CB, stabilizzati mediante S più adeguati alla realizzazione di strati di base e sottofondo delle pavimentazioni stradali [44].

Altri studi vennero condotti sugli aggregati da CDW stabilizzati mediante attivazione alcalina di leganti alternativi. Allahverdi e Kani [12], mediante prove di compressione semplice, verificarono la possibilità di attivare le sole polveri di CDW ottenendo valori di resistenza a compressione maggiori all'aumentare della quantità di soluzione alcalina utilizzata. Anche Jha e Tuladhar [13] ottennero i medesimi risultati analizzando gli effetti dovuti alle variazioni della concentrazione della soluzione basica e del contenuto di silicato. Essi verificarono l'esistenza di un valore soglia per entrambe le variabili, oltre il quale i valori di resistenza meccanica decrescono. Con maggior dettaglio, Komnitsas et al. [45] studiarono gli effetti della geopolimerizzazione sulle diverse componenti dei CDW, evidenziando la maggior reattività di laterizi e ceramici, portando quindi a migliori prestazioni meccaniche. Inoltre, in una

successiva indagine Komnitsas e Zaharaki [46] e Zaharaki et al. [14] verificarono gli effetti dovuti all'aggiunta di ceneri volanti, fanghi argillosi e loppe alle polveri delle diverse componenti costituenti i CDW, individuando tra le varie combinazioni possibili, i migliori mix design in grado di ottenere le prestazioni meccaniche migliori. In tali casi, le paste di CDW hanno raggiunto valori di resistenze meccaniche maggiori rispetto alle sole polveri di CDW attivate in quanto l'aggiunta degli scarti di origine industriale ha reso disponibile una maggior quantità di allumino-silicati altamente reattivi.

1.3 Degrado termico dei CDWA stabilizzati

In relazione agli obiettivi del presente elaborato, esplicitati nel paragrafo 2.1, di seguito si commenta la letteratura disponibile in tema di resistenza al degrado termico dovuto all'applicazione di cicli di gelo/disgelo su CDWA tal quali e stabilizzati.

Relativamente ai CDWA tal quali, particolare interesse ricoprono due studi: quello svolto da Soleimanbeigi et al. [17] e quello condotto da Bassani e Tefa [47].

Nella sperimentazione di Soleimanbeigi et al. [17] furono preparati quattro campioni di CDW composti da solo materiale fresato dalla pavimentazione (RAP) e quattro provini di CDW costituiti solo da aggregati provenienti dalla frantumazione di calcestruzzo riciclato (RCA). Prima di valutarne le caratteristiche meccaniche, tali campioni sono stati sottoposti a 5, 10 e 20 cicli di gelo/disgelo della durata di circa 24h ciascuno, per individuare un riferimento di laboratorio, e ad un solo ciclo di gelo/disgelo della durata di cinque anni in situ. I risultati ottenuti hanno evidenziato che in laboratorio l'effetto del degrado termico ha indotto una riduzione di circa il 30% nel valore di modulo resiliente dei campioni di RAP, mentre per i provini di RCA si è registrato un aumento del 33% del valore di rigidità a lungo termine dopo 20 cicli di gelo/disgelo. Per quanto concerne la valutazione del modulo in situ, i risultati raccolti hanno rivelato che il degrado termico non ha indotto una significativa variazione né nei campioni di RAP né su quelli di RCA [17].

Nello studio condotto da Bassani e Tefa [47] furono, invece, considerati aggregati non selezionati di CDW (UCDW), confezionati in campioni cilindrici e sottoposti a 4 e 8 cicli di gelo/disgelo tra -18°C e +20°C per circa 24h, dopo aver raggiunto la temperatura desiderata. I risultati ottenuti hanno registrato un netto miglioramento delle caratteristiche di modulo resiliente nei campioni contenenti il contenuto ottimo di acqua, nonostante il degrado

termico; dopo 8 cicli la maggior parte dei campioni confezionati ha raggiunto valori di rigidità più elevati rispetto quelli misurati prima dell'azione degradante dei cicli di gelo/disgelo [47].

In merito ai materiali da riciclo stabilizzati attraverso l'uso di polveri da elettrofiltro soggetti a degrado termico, due sono gli studi esemplificativi condotti: quello di Ebrahimi et al. [32] e quello di Zaman et al. [48].

Nella sperimentazione condotta da Ebrahimi et al. [32], furono confezionati 18 campioni, 9 contenenti materiale proveniente dalla fresatura delle pavimentazioni (RPM) e 9 costituiti da ghiaia del fondo stradale bonificata (RSG) stabilizzati con 0%, 5%, 10% e 15% in peso di CKD più un campione di controllo per RPM e per RSG miscelati con il 4% in peso di cemento Portland. Dopo una stagionatura di 28 giorni, i provini furono immersi in acqua per 5h, lasciati ad asciugare e per 2h, congelati a -5°C per 24h e scongelati per 24h a temperatura ambiente. Dopo 10 cicli di gelo/disgelo, i campioni furono testati per misurarne il valore di modulo resiliente. Dai risultati raccolti, è stato constatato un decremento della rigidità proporzionale al crescere della severità del degrado termico; tale decremento, tuttavia, sembra interessare solo i primi sei cicli di gelo/disgelo, mentre si stabilizza ad un valore pressoché costante nei cicli successivi. In generale, la caduta di rigidità ha interessato maggiormente i campioni stabilizzati con CKD e non quelli stabilizzati a cemento [32].

Nello studio svolto da Zaman et al. [48] furono preparati campioni di roccia frantumata stabilizzata mediante polveri di elettrofiltro (CKD). Stagionati 7 giorni, tali provini furono sottoposti a 4, 8 e 12 cicli di gelo a -15°C per 24h, seguiti da 24h di disgelo a 21,6°C in ambiente fortemente umido (>95%); fu considerato anche un livello di degrado di controllo di 0 cicli. I risultati ottenuti da prove di modulo resiliente sui provini degradati hanno rivelato una caduta della rigidità entro gli 8 cicli di degrado termico proporzionale all'aumento della severità del degrado [48].

Per quanto concerne i CDWA stabilizzati tramite l'aggiunta di sole ceneri volanti non attivate alcalinamente, si riportano due sperimentazioni: lo studio condotto da Li et al. [33] e quello svolto da Camargo et al. [49].

Nella prima sperimentazione [33] vennero considerati materiali provenienti dal riciclo di pavimentazioni stradali stabilizzati mediante ceneri volanti e stagionati 7 giorni prima di essere sottoposti in situ a condizioni climatiche di inverno rigido ed estate molto calda, al fine di valutare al meglio l'effetto indotto da tale degrado termico. I risultati ottenuti hanno permesso di affermare che la stabilizzazione con ceneri volanti non attivate aumenta tanto la

capacità portante quanto la vita in esercizio della pavimentazione. I dati osservati tramite deflettometro a massa battente (FWD) dopo il degrado termico, hanno rivelato un piccolissimo decremento dei valori di modulo resiliente della miscela stabilizzata [33].

Nello studio di Camargo et al. [49], infine, analizzò l'effetto del degrado termico sulle caratteristiche meccaniche di campioni costituiti da materiale da riciclo proveniente dalla dismissione di pavimentazioni stradali (RPM) e campioni di rocce frantumate (RSG), stabilizzati con percentuali in peso di ceneri volanti, non attivate alcalinamente, fino al 10%. Dopo diversi cicli di gelo/disgelo, i valori registrati di resistenza a compressione risultano essere poco influenzati dal degrado termico, soprattutto se il contenuto di ceneri volanti presenti nel campione è prossimo al 10%. Per quanto riguarda il modulo resiliente, questo non è condizionato dalla severità dei cicli di gelo/disgelo, con decrementi del 15% per i campioni di RPM e del 5% per quelli di RSG [49].

Ciò che emerge dagli studi riportati è che l'aggregato da CDW mantenga comunque delle buone caratteristiche meccaniche a valle dell'azione di degrado e, di conseguenza, permetta a questo materiale nelle sue due forme, tal quale e stabilizzata, di poter competere nelle applicazioni con il tradizionale aggregato di origine naturale.

Capitolo 2 – Obiettivi, materiali e metodi

2.1 Obiettivi

Dal precedente capitolo è emerso che l'azione termica mediante cicli di gelo e disgelo non degrada le prestazioni dei CDWA a valori inaccettabili per un loro uso nella realizzazione di strati non legati di pavimentazioni e sottofondi stradali. Ciò però non è stato ancora indagato nel caso di CDWA stabilizzati mediante attivazione alcalina senza aggiunta di altri componenti reattivi. L'indagine sperimentale oggetto della presente tesi ha quindi l'obiettivo di valutare alla scala di laboratorio il comportamento alle azioni di degrado termico dei CDWA stabilizzati mediante la sola attivazione alcalina delle frazioni più fini contenenti alluminosilicati (senza l'aggiunta di altri leganti alternativi o tradizionali). Tale valutazione mira a valutare se le variazioni di temperatura possano alterare le proprietà di rigidità e resistenza dei materiali oggetto di studio. A titolo di confronto, in questo esperimento i risultati ottenuti sugli aggregati di riciclaggio geopolimerizzati sono stati confrontati con quelli di un misto cementato tradizionale anch'esso sottoposto a identici livelli di degrado.

Dopo l'applicazione dei cicli di gelo/disgelo, i campioni sono stati sottoposti a prove meccaniche di tipo statico per la misura della resistenza e di tipo dinamico per la misura della rigidità.

2.2 Piano sperimentale

La fase sperimentale dello studio si compone di quattro parti.

Nella prima sono stati prelevati e caratterizzati i due materiali considerati nell'indagine, gli aggregati da CDW non selezionati e il misto granulare di primo impiego. Tali materiali sono stati caratterizzati sia in termini granulometrici che volumetrici.

Nella seconda è stata definita la miscela composta dagli aggregati da CDW e dalla soluzione alcalina stabilizzante. Lo scopo è stato quello di individuare la migliore percentuale in peso di soluzione alcalina (SA) da impiegare nella miscela al fine di massimizzare la densità secca e la lavorabilità. Per giungere a ciò, lo studio di lavorabilità ha previsto l'uso di 6 diversi contenuti di SA. Per il misto cementato avente un'identica distribuzione granulometrica, è stata definita a priori la percentuale in peso di cemento, pari al 3%, mentre per il contenuto d'acqua di miscela vengono considerate tre diverse percentuali in peso. I campioni dei due materiali sono stati confezionati considerando la percentuale ottima di soluzione alcalina per gli aggregati da CDW e il contenuto d'acqua ottimale per il misto cementato.

Nella terza parte, al confezionamento dei campioni per mezzo della pressa a taglio girevole è seguita la stagionatura dei campioni e il successivo degrado termico. Nello specifico sono stati considerati 4 tempi di stagionatura per il materiale da riciclo (7, 28, 45 e 60 giorni), e 2 tempi di stagionatura per il misto cementato di confronto (7 e 28 giorni). Per quanto concerne il degrado termico, sia per il misto cementato che per la miscela di aggregati da CDW stabilizzati per attivazione alcalina, sono stati considerati 4 diversi livelli di degrado con 0, 4, 8 e 12 cicli di gelo/disgelo successivi alla stagionatura in ambiente umido con variazioni di temperatura da -20°C a +20°C. Per i campioni sottoposti a soli 7 giorni di maturazione è stato valutato, inoltre, un livello di degrado aggiuntivo consistente in soli 3 cicli di gelo/disgelo senza una precedente stagionatura in ambiente umido. L'obiettivo di tali livelli di degrado è stato di valutare l'evoluzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali testati e confrontare tra loro i risultati ottenuti, per comprendere quale fosse la sensibilità degli aggregati da riciclo al degrado termico, e se tale sensibilità non fosse tale da pregiudicare il loro potenziale impiego in alternativa al tradizionale misto cementato.

La quarta parte del lavoro di tesi ha riguardato la misura delle caratteristiche meccaniche di resistenza e di rigidità dei due materiali. A valle della fase di stagionatura e del degrado

termico accelerato sui singoli campioni, sono state eseguite prove di modulo resiliente (MR), compressione semplice non confinata (UCS) e trazione indiretta (ITS).

2.3 Materiali

2.3.1 Aggregati

Tutti i campioni confezionati e testati nel presente lavoro di Tesi sono stati prelevati presso la sede operativa della Cavit S.p.A. di La Loggia (TO), azienda che tratta materiali da rifiuto provenienti prevalentemente da micro-demolizioni di edifici e pavimentazioni stradali; i materiali prelevati sono in possesso di certificazione CE prevista da normativa.

In particolare, è stato prelevato il solo materiale passante ai 25 mm in quanto particelle di dimensioni superiori risultano eccessivamente grandi per confezionare campioni cilindrici di diametro 100 mm.

Il materiale prelevato è risultato composto in prevalenza da calcestruzzo, laterizio, aggregato naturale ed in minima parte da pavimentazione stradale fresata o RAP. Per valutare la percentuale delle componenti presenti, è stata effettuata un'analisi visiva su 3 kg di materiale, scelto in maniera casuale come 1 kg delle tre frazioni granulometriche più grossolane (25-20 mm; 20 - 12.5 mm e 12.5 – 8 mm). La composizione ottenuta è riportata in *Figura 2*.

Anche nel caso del misto cementato, l'aggregato naturale di primo impiego è stato prelevato presso la Cavit S.p.A., considerando il solo passante al setaccio da 25 mm. Tale aggregato si presenta con contorni arrotondanti e pezzatura più regolare rispetto al materiale da costruzione e demolizione.

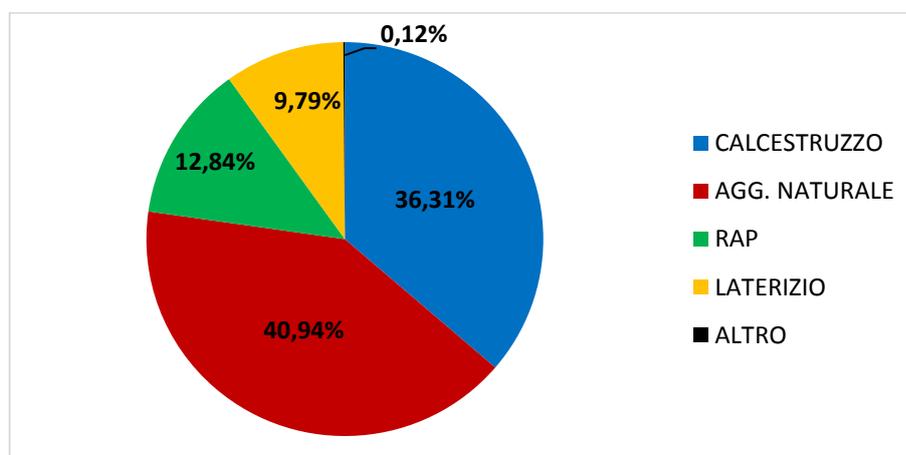


Figura 2: Analisi composizionale dei CDWA prelevati.

2.3.2 Cemento

Il cemento utilizzato per stabilizzare l'aggregato naturale è stato prelevato, invece, dall'impresa Buzzi Unicem di Casale Monferrato (AL), gruppo multi-regionale internazionale che tratta principalmente cemento, calcestruzzo e prodotti derivati. Il legante dispone di marcatura CE attribuita secondo la norma armonizzata EN 197-1 e possiede una classe di resistenza R_{ck} pari a 42.5 MPa.

2.3.3 Soluzione alcalina

Nel presente elaborato si è scelto di stabilizzare alternativamente il materiale da riciclo mediante attivazione alcalina, senza l'aggiunta di altri leganti. Come già detto nel Capitolo 1, tale stabilizzazione prevede la reazione chimica tra alluminosilicati e silicati metallici alcalini presenti sia nei CDWA sia nella soluzione altamente basica utilizzata.

La soluzione in oggetto è composta dal 20% in peso di idrossido di sodio (NaOH) e dall'80% in peso di silicato di sodio (Na_2SiO_3). Mentre il secondo componente si presenta già in forma liquida, il primo viene prodotto disciogliendo scaglie di soda caustica in acqua distillata con un rapporto 1:1, ossia 50% di scaglie e 50% d'acqua distillata (Figura 3).

Per preparare la soluzione completa sono stati utilizzati agitatori magnetici, sui quali sono stati disposti dei becher di plastica e al loro interno delle ancorette magnetiche, che a contatto con l'agitatore ruotano in senso orario e miscelano il composto.

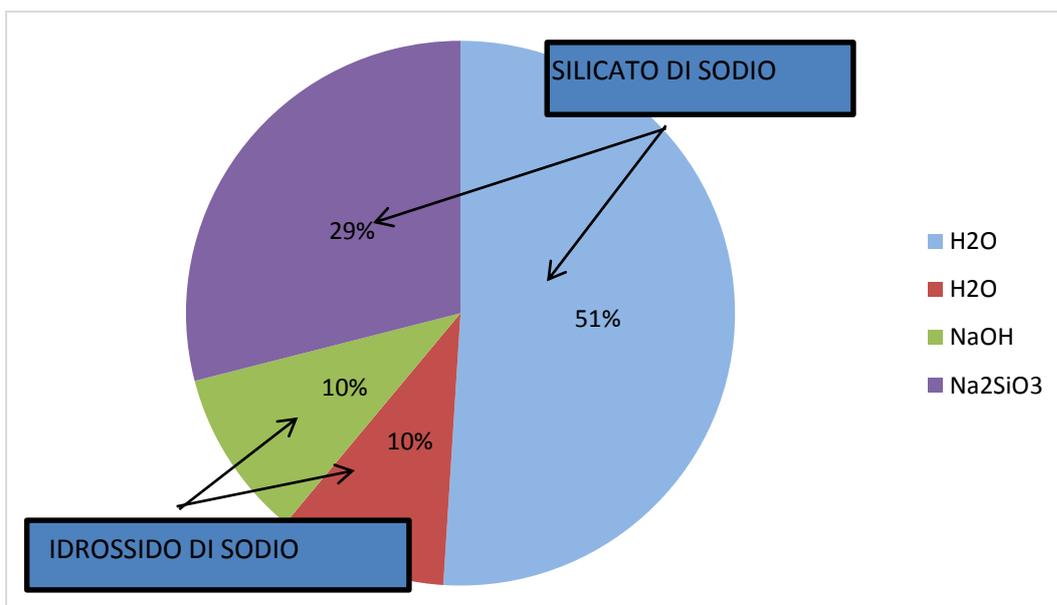


Figura 3: Composizione della soluzione alcalina.

Dato il carattere esotermico della reazione tra acqua e soda caustica, la sua aggiunta alla soluzione deve avvenire ad intervalli regolari per limitare il forte sviluppo di calore; alla fine del processo di miscelazione, inoltre, la soluzione è rimasta in agitazione fino ad abbassare la sua temperatura a quella ambiente prima di essere impiegata come fase fluida nella compattazione dei campioni, in tal modo tutti i campioni vengono confezionati alle stesse condizioni.

La soluzione si presenta sottoforma di gel, di viscosità maggiore rispetto all'acqua. È stata quindi valutata la viscosità della SA tramite viscosimetro rotazionale, presso il Dipartimento di Scienze Applicate e Tecnologia (DISAT) (Figura 4). La procedura di prova consiste nell'immergere nella soluzione alcalina una girante in acciaio; questa, messa in rotazione secondo una velocità fissa, misura la resistenza opposta dalla soluzione al farsi agitare, ossia la sua viscosità. Sono state effettuate due prove su due campioni differenti di SA, preparati secondo la stessa procedura. La prova sul campione 1 è stata eseguita ad una temperatura della soluzione alcalina pari a 27.8 °C. Il test sul campione 2 è stato invece eseguito ad una temperatura della soluzione alcalina di 23°C. Come si può notare dalla Tabella 1, al diminuire della temperatura, la soluzione si presenta sempre meno fluida, con valori di viscosità più alti. I risultati ottenuti vengono di seguito presentati anche come grafico (Figura 5), in cui in ascissa vi è la velocità di rotazione al minuto mentre in ordinata è presente la viscosità, così da sottolineare visivamente l'aumento di quest'ultima proporzionale all'abbassamento di temperatura.



Figura 4: Viscosimetro.

Tabella 1: Specifiche di prova.

velocità [RPM]	Viscosità [cP]	
	Campione 1	Campione 2
40	55	64
100	85	98.4
150	99.7	115.7
200	112.4	129.2

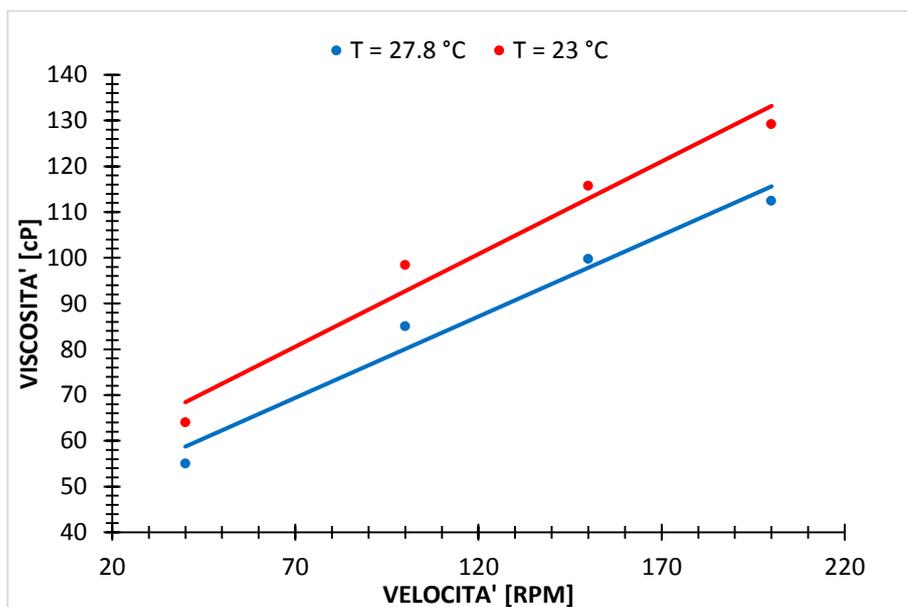


Figura 5: Grafico sulla viscosità dei due campioni di soluzione alcalina.

2.4 Prelievo e caratterizzazione del materiale

Il prelievo presso la Cavit S.p.A. è avvenuto in conformità alle direttive della norma UNI EN 932-1, per quanto concerne le tecniche da utilizzare in base al punto di prelievo (Figura 6). Poiché il materiale si trovava esposto alle condizioni climatiche esterne, si è reso necessario un processo di essiccazione in forno a 105 °C per circa 24 h, per eliminare l'umidità residua.

Una volta asciutto, il materiale è stato diviso in frazioni granulometriche mediante setacciatura, al fine di ricostruire la granulometria relativa ad una curva di riferimento. Si fa riferimento alla curva centrale del fuso granulometrico suggerito nelle norme tecniche CIRS [50] in modo da fissare la variabile "granulometria" ed avere, quindi, la stessa composizione per tutti i campioni (Figura 7).



Figura 6: Stoccaggio in cumuli presso la Cavit S.p.A.

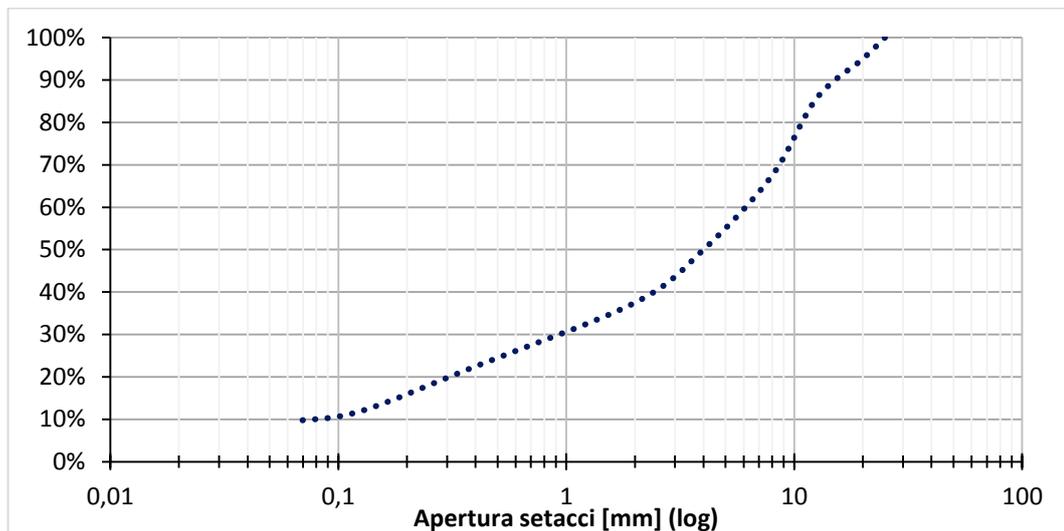


Figura 7: Curva granulometrica di riferimento "centro fuso" CIRS.

Per applicare tale procedura, usata sia per il materiale da riciclo che per l'aggregato di primo impiego, sono stati utilizzati 9 setacci di diametro 304,8 mm e di aperture 25 mm, 20 mm, 12.5 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 0.4 mm, 0.125 mm, 0.063 mm nell'ordine, un fondello di raccolta e un coperchio a chiusura della colonna di setacci e un setacciatore elettromagnetico (Figura 8). Il materiale, inserito dalla sommità della colonna, viene setacciato verso il basso tramite la vibrazione della base del setacciatore per circa 7 – 9 minuti (Figura 9). Al fine di ottenere un campione rappresentativo, il materiale è stato mescolato in maniera casuale tramite procedura di "quartatura": questa consiste nel versare il materiale all'interno di un riduttore a scomparti con divisione a $\frac{1}{2}$ (Figura 10), secondo le normative UNI EN 932-1 e UNI EN 932-2.



Figura 8: Colonna setacci montata sul setacciatore elettromagnetico.



Figura 9: Procedura di setacciatura.



Figura 10: Riduttore a scomparti con divisione a ½. Procedura di quartatura.

La distribuzione granulometrica del “centro fuso” CIRS è in *Tabella 2*.

Tabella 2: Distribuzione granulometrica centro fuso CIRS.

FRAZIONE [mm]	%
25 ÷ 20	5
20 ÷ 12.5	9.4
12.5 ÷ 8	18.1
8 ÷ 4	17.5
4 ÷ 2	12.5
2 ÷ 0.4	15
0.4 ÷ 0.125	10.6
0.125 ÷ 0.063	2.4
< 0.063	9.5

Per valutare la distribuzione granulometrica delle particelle di CDWA di dimensioni inferiori a 0.063 mm è stata eseguita una specifica analisi granulometrica laser presso il Dipartimento di Scienze Applicate e Tecnologia (DISAT). La prova prevede l’inserimento di una piccolissima parte di passante a 63 micron all’interno di una sospensione di acqua distillata o etanolo, in modo da evitare l’aggregarsi delle particelle. Il processo di analisi granulometrica è basata sul principio che particelle di una data grandezza diffrangono la luce con angolo noto che aumenta al diminuire della grandezza delle particelle. Il laser, colpendo la singola particella, ne valuta la dimensione sulla base dell’angolo di diffrazione della luce relativo alla particella colpita. Viene eseguita questa analisi in quanto la frazione più fine dei CDW è quella più reattiva che viene attivata dalla presenza di soluzione alcalina, con i seguenti risultati (*Figura 11*).

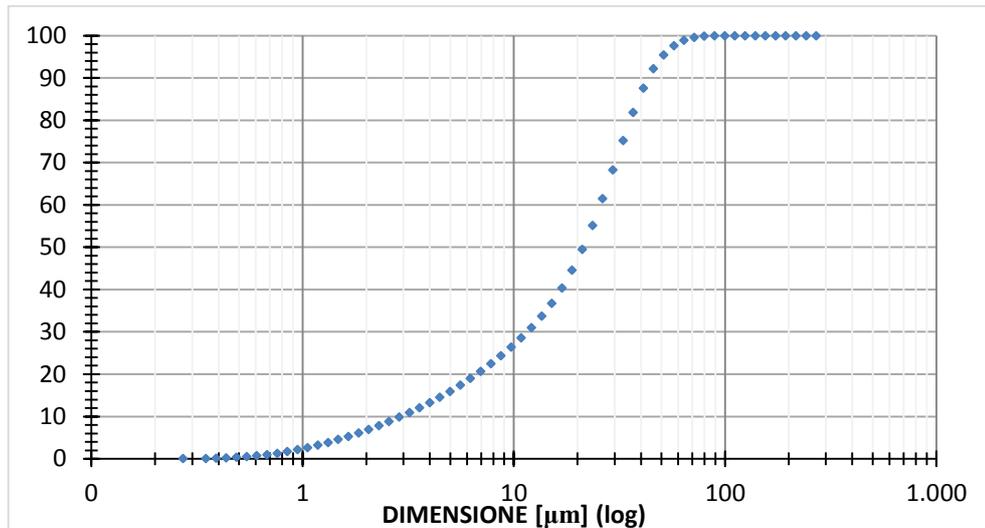


Figura 11: Distribuzione granulometrica del passante a 63 micron.

Un altro parametro necessario alla caratterizzazione del materiale è il peso specifico dei granuli, ossia la massima quantità di aggregato che può essere contenuta in un dato volume. La determinazione di tale rapporto massa/volume, definito Massima Massa Volumica Teorica (MMVT), è stata effettuata mediante l'uso di picnometri secondo la normativa UNI EN 1097-6. Si elencano alcuni aspetti e passaggi salienti della procedura seguita:

- 1) il volume della combinazione tappo – picnometro è stato calcolato come $V = \frac{M_3}{\rho_w}$, essendo M_3 la massa d'acqua, inserita nel picnometro, che riempie il contenitore e il tappo ed ρ_w la densità dell'acqua alla temperatura di prova;
- 2) viene determinata la massa del picnometro e del tappo (M_0);
- 3) è stato pesato il materiale secco da sottoporre a prova (M_1);
- 4) il materiale è stato inserito nel picnometro ed è stata aggiunta una quantità d'acqua distillata tale da coprire l'aggregato;
- 5) la miscela viene lasciata decantare, cosicché le polveri sollevate dall'immissione dell'acqua sedimentino;
- 6) il picnometro contenente l'aggregato è stato posto sotto l'azione di pompe d'aspirazione, in modo da depurare la miscela dall'aria presente in essa;
- 7) rimosse le bolle, il picnometro e il tappo viene rabboccato con acqua distillata e deareata fino al colmo;
- 8) è stato pesato il contenitore con il materiale e acqua (M_2);
- 9) a partire dal rapporto massa del materiale secco/volume di materiale, è stata calcolata la massa volumica (ρ_p), tramite la formula (I):

$$\rho_p = \frac{M_1}{V - \frac{(M_2 - M_1 - M_0)}{\rho_w}} \quad (I)$$

in cui ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova, per tale motivo dopo la prova è stato necessario introdurre un termometro all'interno del picnometro con acqua e materiale così da misurarne la temperatura ed inserire all'interno della formula il giusto valore di densità dell'acqua (Figura 12 e Figura 13).

Per la frazione più fine (< 0.063 mm) è stata utilizzata una procedura leggermente diversa, in conformità alla normativa UNI EN 1097-7 (Figura 14), nella quale si seguono ancora i punti da 1) a 5), cambia la modalità di rimozione dell'aria interna al materiale. Data la dimensione ridotta del picnometro usato, per far evaporare l'aria presente, il contenitore pieno di materiale ed acqua viene messo a bagnomaria, piuttosto che sotto pompa. Dato che la temperatura di prova deve essere di 25 °C, dopo l'evaporazione si pone il picnometro all'interno di un bagno elettrostatico per riportare la temperatura al valore desiderato. Si procede quindi con i punti 8) e 9) sopradescritti.



Figura 12: Procedura MMVT: de-aerazione della miscela tramite aspirazione.

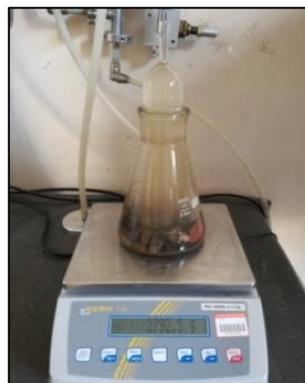


Figura 13: Procedura MMVT: misurazione della massa M_2 .



Figura 14: Procedura MMVT per il filler.

Dato che la misura della MMVT è stata eseguita per ogni frazione granulometrica, si è reso necessario mediare i valori delle densità stimate per ognuna di esse in modo da avere una massa volumica unica per il materiale. Tale densità media viene stimata secondo la formula(II):

$$MMVT = G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{\rho_{p,1}} + \frac{P_2}{\rho_{p,2}} + \dots + \frac{P_n}{\rho_{p,n}}} \quad (II)$$

I risultati della valutazione del peso specifico vengono riportati in tabella. Nella *Tabella 3* sono riportati i valori ottenuti per i CDWA, mentre in *Tabella 4* vengono presentati quelli relativi al misto cementato.

Tabella 3:MMVT per i materiali da riciclo.

FRAZIONE [mm]	P _i [%]	ρ _{p,i} [Kg/m ³]
25 ÷ 20	5	2658
20 ÷ 12.5	9.4	2637
12.5 ÷ 8	18.1	2655
8 ÷ 4	17.5	2665
4 ÷ 2	12.5	2665
2 ÷ 0.4	15	2664
0.4 ÷ 0.125	10.6	2688
0.125 ÷ 0.063	2.4	2707
< 0.063	9.5	2473
G_{sb}		2644

Tabella 4: MMVT per l'aggregato naturale.

FRAZIONE [mm]	P _i [%]	ρ _{p,i} [Kg/m ³]
25 ÷ 20	5	2714
20 ÷ 12.5	9.4	2715
12.5 ÷ 8	18.1	2723
8 ÷ 4	17.5	2653
4 ÷ 2	12.5	2718
2 ÷ 0.4	15	2406
0.4 ÷ 0.125	10.6	2755
0.125 ÷ 0.063	2.4	2808
< 0.063	9.5	2803
G_{sb}		2668

2.5 Mix design e confezionamento dei campioni

Nella realizzazione di sottofondi stradali, rilevati, fondazioni o, in generale, nella realizzazione di infrastrutture civili, è necessario evitare rotture, cedimenti e situazioni di collasso, conferendo un'elevata resistenza al taglio e una bassa compressibilità per garantire un'elevata stabilità all'opera. Tali condizioni possono essere raggiunte tramite compattazione, processo che avvicina tra loro i granuli e ne riduce la porosità, rendendo la struttura meno sensibile all'azione dell'acqua. La riduzione di porosità è legata a diversi fattori: non solo l'avvicinamento tra i granuli, ma anche l'espulsione dell'aria presente nel volume di terreno, la migrazione dell'acqua e la compressione dell'aria interna al terreno che non può essere espulsa.

Esistono diversi metodi di compattazione, ma quello che riesce a simulare interamente l'effetto dinamico indotto dal passaggio dei rulli costipanti in situ è la compattazione tramite pressa a taglio giratoria. Per tale motivo, nel presente studio è stato impiegato questo metodo di compattazione sia per lo studio della lavorabilità della miscela sia per il confezionamento dei campioni.

2.5.1. Compattazione mediante pressa a taglio giratoria

Il materiale granulare è compattato in campioni cilindrici all'interno di fustelle d'acciaio. La pressa a taglio giratoria applica una pressione verticale di 600 kPa sulla testa di carico con una velocità di 0.5 giri/s, mentre l'inclinazione della fustella (secondo un angolo di 1.25°) combinata con la rotazione attorno all'asse verticale della stessa produce un'azione di taglio sui granuli. In questo modo, da un lato viene incentivato l'avvicinamento dei granuli, dall'altro si migliora l'addensamento delle particelle dovuto ad una riorganizzazione delle stesse all'interno del campione (*Figura 15*).



Figura 15: Pressa a taglio giratoria.

La compattazione con pressa a taglio giratorio può avvenire secondo due modalità: in controllo di altezza o in controllo di numero di giri. Il primo implica la definizione dell'altezza finale che il provino deve avere, lasciando libera la variabile "numero di giri" ma imponendo solo un limite massimo oltre il quale si suppone che il provino venga eccessivamente danneggiato dall'azione della pressa. Secondo tale modalità, i provini avranno tutti la stessa altezza finale ma saranno sottoposti ad energie di compattazione differenti. Il numero di giri per ogni provino dipende da molteplici fattori come la morfologia dei granuli presenti (se grossi o di forma allungata o arrotondati) o dalla composizione del campione (nel caso dei CDWA dipende dalla percentuale di calcestruzzo, aggregato naturale, laterizio e RAP presenti). In controllo di giri, invece, si fissa il numero di giri che ogni campione deve subire all'interno della macchina, lasciando libera la variabile "altezza". Secondo questa modalità, alla fine della compattazione, ogni provino avrà un'altezza diversa ma, poiché soggetti allo stesso numero di giri, tutti i campioni saranno stati compattati con la medesima energia di compattazione.

Infine, la procedura di compattazione prevede la compattazione di quattro strati successivi di materiale, in modo da aver campioni quanto più omogenei possibile lungo la loro altezza. Poiché l'altezza minima alla quale la pressa può compattare lo strato più in basso è di 51 mm, si è costretti a compattare il primo strato a 51 mm, il secondo e il terzo a 50 mm ed il quarto a 49 mm, per un'altezza totale di 200 mm.

L'iter di compattazione del materiale è il seguente:

- 1) il volume del materiale da inserire nella fustella è stato stimato come (III):

$$Vol = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot h_f \quad (III)$$

in cui:

- D è il diametro della fustella e del provino, uguale a 100 mm;
 - h_f è l'altezza finale del campione, pari a 200 mm;
 - Vol è il volume totale di materiale da inserire, equivalente a 0.002 m^3 .
- 2) Noto il volume, viene considerata una densità target fornita come massimo Proctor proveniente da prove eseguite in elaborati precedenti [4]. Questa è stata moltiplicata per il volume, ottenendo la massa umida totale da inserire nella fustella.
 - 3) Questa quantità totale viene divisa per i singoli strati; dato che l'altezza di ogni strato è diversa, differente sarà anche il quantitativo di materiale da inserire (IV):

$$\begin{cases} m_1 = m_{umido} \cdot \frac{51}{200} \\ m_2 = m_{umido} \cdot \frac{50}{200} \\ m_3 = m_{umido} \cdot \frac{50}{200} \\ m_4 = m_{umido} \cdot \frac{49}{200} \end{cases} \quad (IV)$$

Per il calcolo delle quantità presenti in *Tabella 5* si è fatto riferimento alla seguente equazione(V):

$$m_{1,\%Passante,i} = \frac{\%granulometrica}{100} \cdot m_1 \cdot 1000 \quad (V)$$

Tabella 5: Composizione granulometrica in [g] di CDW per ogni strato.

FRAZIONE [mm]	%_Passante	STRATO 1 [g]	STRATO 2 [g]	STRATO 3 [g]	STRATO 4 [g]
25 ÷ 20	5	41.06	40.25	40.25	39.45
20 ÷ 12.5	9.4	77.19	75.67	75.67	74.16
12.5 ÷ 8	18.1	148.63	145.71	145.71	142.80
8 ÷ 4	17.5	143.70	140.88	140.88	138.06
4 ÷ 2	12.5	102.64	100.63	100.63	98.62
2 ÷ 0.4	15	123.17	120.75	120.75	118.34
0.4 ÷ 0.125	10.6	87.04	85.33	85.33	83.63
0.125 ÷ 0.063	2.4	19.71	19.32	19.32	18.93
< 0.063	9.5	78.01	76.48	76.48	74.95

2.5.2. Lavorabilità delle miscele di CDW

Al fine di trovare la percentuale in peso di soluzione alcalina che massimizzi la densità secca, ottimizzando la miscela, si è reso necessario uno studio di lavorabilità. Tale indagine viene condotta tramite pressa a taglio giratoria, in quanto la compattazione del materiale è strettamente legata alla sua lavorabilità k .

Durante la compattazione, la macchina misura il progressivo abbassamento della testa di carico, ossia il grado di addensamento. Si definisce allora grado di addensamento C il complemento a 100 dei vuoti percentuali (VI):

$$C = 100 \cdot (1 - V) \quad (\text{VI})$$

in cui V è la porosità del materiale. Per valutare quest'ultima, è stata considerata l'altezza raggiunta dal campione ad ogni giro e la conseguente variazione di volume. Note la quantità di materiale inserita nella fustella (ossia la sua massa) e la massa volumica in granuli (MMVT), la massa volumica del campione al giro i -esimo, e quindi la porosità, è stata stimata tramite la seguente espressione (VII):

$$M_v = \frac{M}{Vol_i} \rightarrow V = 100 \cdot \left(1 - \frac{M_v}{MMVT}\right) \quad (\text{VII})$$

Se si diagramma il grado di addensamento C in funzione del numero di giri n_g , in scala semi-logaritmica, si può riconoscere un andamento lineare. Ciò consente di descrivere la curva (Figura 16) secondo l'equazione(VIII):

$$C_{n_g} = C_1 + k \cdot \log(n_g) \quad (\text{VIII})$$

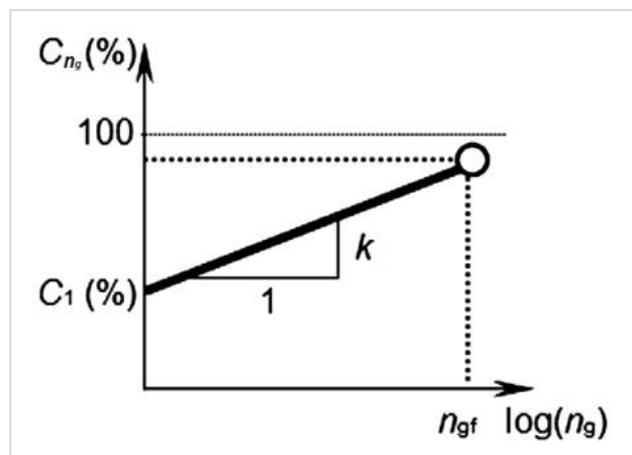


Figura 16: Esempio curva di lavorabilità [51].

In essa i due termini C_1 e k hanno anche un significato fisico:

- C_1 rappresenta l'intercetta della curva con l'asse y . Questo parametro è definito come il grado di compattazione corrispondente al primo giro, detto anche "auto – addensamento", dove l'azione di taglio non ha avuto ancora effetto e la compattazione avviene solo per peso proprio;
- k è il coefficiente angolare della curva e rappresenta il gradiente di compattazione, in scala semi-logaritmica, ossia (IX):

$$k = \frac{\Delta C_{ng}}{\Delta \log(n_g)} \quad \text{(IX)}$$

Il parametro k è indice della lavorabilità del materiale, infatti indica di quanto la miscela è in grado di aumentare il grado di compattazione per unità di energia assorbita o, in termini più semplici, quanto la miscela si lascia addensare in fase di messa in opera.

Prima della fase di confezionamento dei campioni, si è reso necessario nel caso dei CDWA uno studio di miscela, al fine di individuare la percentuale di soluzione alcalina (SA) che massimizzasse la densità secca, si parla quindi di "ottimizzazione della miscela". Si sono indagate sei diverse percentuali di soluzione alcalina, dall'8% al 13%.

Per ogni percentuale di soluzione, nota la distribuzione granulometrica di ogni singolo strato in termini di massa, è stata calcolata la quantità corrispondente in peso di SA e si è proceduto con la realizzazione dei campioni al fine di valutarne il grado di compattazione C_{100} , la lavorabilità k e la massima densità secca γ_d .

Considerando la modalità in controllo di altezza, in modo da avere provini di eguale altezza finale, l'iter seguito è il seguente:

- 1) il materiale da inserire per ogni singolo strato è stato pesato e posto in opportune ciotole;
- 2) viene quindi miscelato con la percentuale in peso di soluzione alcalina;
- 3) è stata pesata la tara della fustella;
- 4) la miscela materiale e SA è stata inserita all'interno della fustella, attraverso un imbuto d'acciaio;
- 5) dopo aver inserito la fustella nella pressa girevole, viene seguita la modalità in controllo d'altezza seppur imponendo un limite superiore ai giri pari a 100;
- 6) si è proceduto così per tutti e quattro gli strati;

- 7) al termine della compattazione dell'intero provino, la fustella e il materiale al suo interno sono stati pesati.
- 8) nota la tara della fustella e il peso finale, a campione finito, per differenza è stata calcolata la massa umida reale del campione;
- 9) conoscendo l'altezza finale, viene stimato il volume totale del campione;
- 10) quindi, la densità umida del campione è stata valutata come (X):

$$\gamma_w = \frac{m_{umido, reale}}{Vol_{reale}} \quad (X)$$

- 11) infine, la densità secca reale è stata calcolata tramite la formula (XI):

$$\gamma_d = \frac{100 \cdot \gamma_w}{100 + w(\%)} \quad (XI)$$

- 12) il grado di compattazione C_{100} è stato ricavato mediante la seguente espressione (XII):

$$C_{100} = 100 \cdot \frac{\gamma_d \cdot h_f}{MMVT \cdot h_N} \quad (XII)$$

dove:

- C_{100} è il grado di compattazione a 100 giri, espresso in percentuale;
- γ_d è la densità secca reale del campione, in kg/m^3 ;
- h_f è l'altezza finale del provino, in mm;
- h_N è l'altezza dello strato al generico giro n_i , espressa in mm.

La lavorabilità k viene invece calcolata con l'equazione (IX) per ogni giro n_g .

I risultati ottenuti hanno permesso di scegliere come percentuale ottima l'11%, in quanto questa ha garantito il raggiungimento del massimo valore di densità secca γ_d (Figura 17) e di lavorabilità k (Figura 18), con un valore intermedio di auto-addensamento C_1 (Figura 19) e di grado di addensamento a 100 giri, C_{100} (Figura 20).

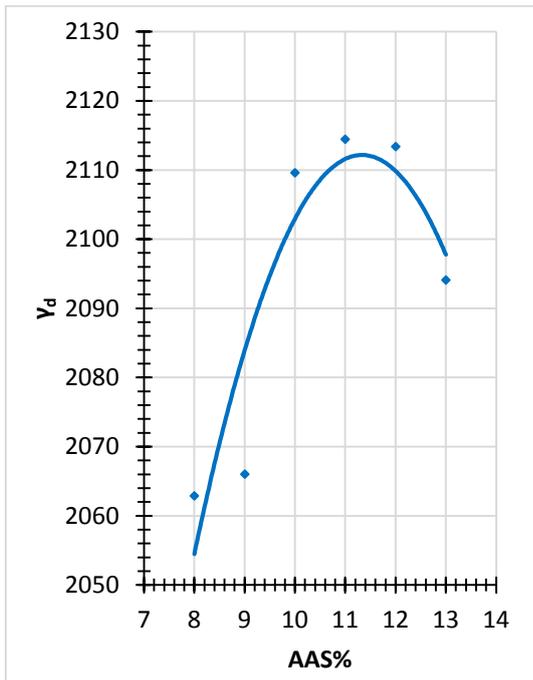


Figura 17: Valori ottenuti di y_d per le sei % di SA.

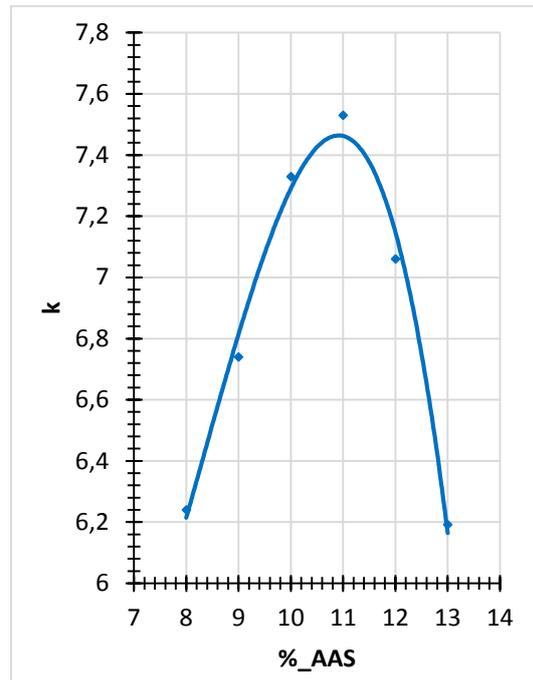


Figura 18: Valori ottenuti di k per le sei % di SA.

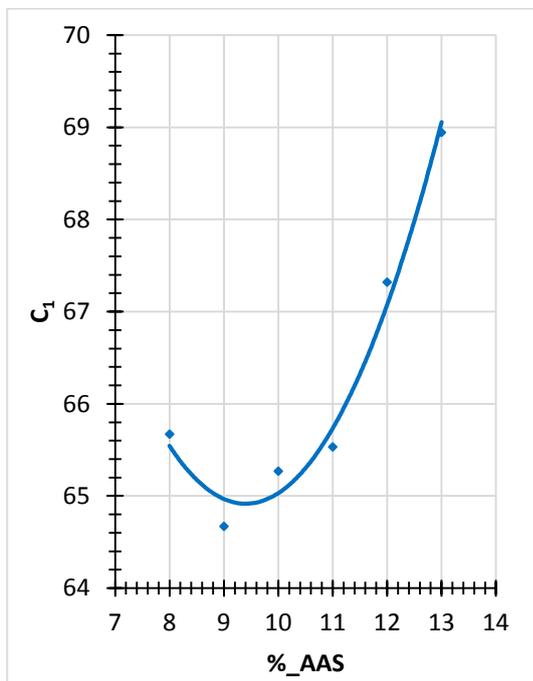


Figura 19: Valori ottenuti di C_1 per le sei % di SA.

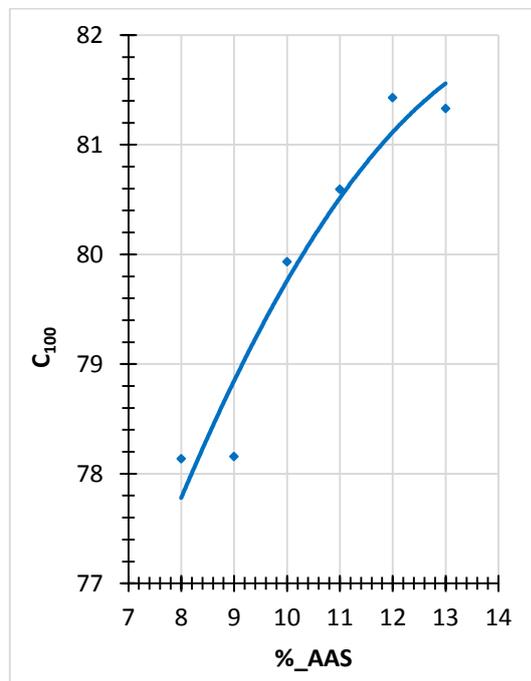


Figura 20: Valori ottenuti di C_{100} per le sei % di SA.

Una volta definita la percentuale ottima di SA, il confezionamento dei campioni CDWA segue lo stesso iter descritto per la produzione dei campioni oggetto dello studio di lavorabilità (Figura 21 e Figura 22). Dopo la compattazione, il campione viene estruso dal basso mediante un martinetto idraulico e inserito all'interno di fustelle in plastica, di tara nota, e posto all'interno di cassoni per la stagionatura e il successivo degrado termico.

Le curve complete di lavorabilità per ogni percentuale di SA indagata, vengono riportati nella Figura 23.



Figura 21: Ciotole di preparazione del materiale.



Figura 22: Fustella + Imbuto per l'inserimento del materiale.

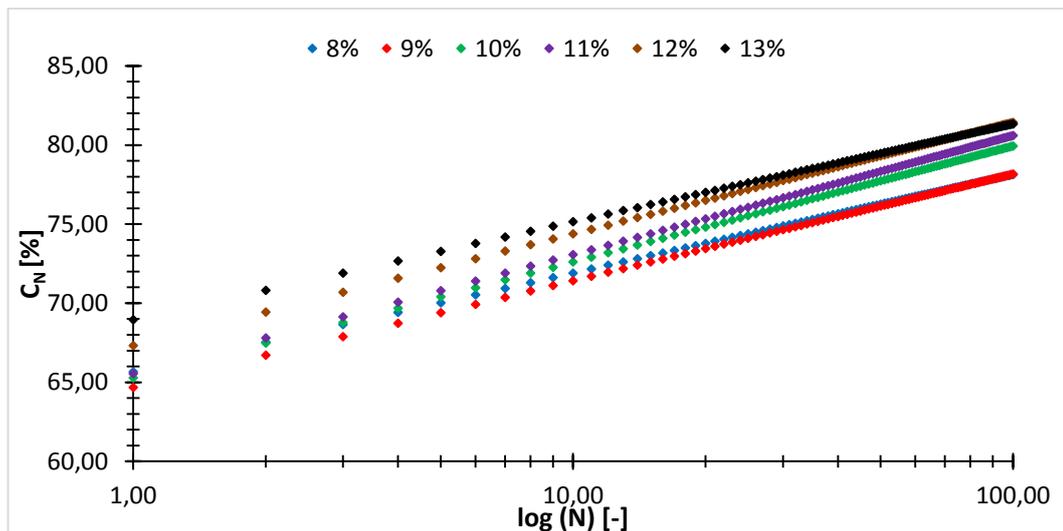


Figura 23: Curve di lavorabilità delle sei miscele indagate di CDWA.

2.5.3. Compattazione dei campioni di misto naturale stabilizzato

Per il confezionamento dell'aggregato naturale, non è stato fatto un vero e proprio studio della miscela per valutare la percentuale ottimale di acqua e cemento da aggiungere all'aggregato. Piuttosto è stato eseguito un procedimento sperimentale, nel quale, partendo dal valore tipico più basso, sono state valutate miscele in cui varia di mezzo punto percentuale il contenuto d'acqua, mantenendo fisso quello di cemento. In questo caso è stata considerata la modalità in controllo di giri, al fine di avere per ogni campione la stessa energia di compattazione.

I valori tipici per la percentuale in peso di acqua e cemento ricadono all'interno dell'intervallo 6% - 8% per la prima e 2% - 4% per il secondo [52]. Fissando al 3% il contenuto di cemento, è stata variata la percentuale di acqua di mezzo punto dal 6% al 7%. La stima della massa totale del campione da inserire nella fustella è stata effettuata secondo la relazione (XIII):

$$V_{TOT} = V_{AGG} + V_{CEM} + V_{H2O} + V_{VUOTI} \quad (XIII)$$

Per il volume dei vuoti è stato considerato il 10% del volume totale. Dato che sia la massa del cemento che quella dell'acqua sono una percentuale della massa degli aggregati, per sostituzione si perviene ad un'equazione in una sola incognita: M_{AGG} . L'espressione usata è quindi (XIV):

$$0.9 \cdot V_{TOT} = \frac{M_{AGG}}{\gamma_{MMVT}} + \frac{0.03 \cdot M_{AGG}}{\gamma_{CEM}} + \frac{x \cdot M_{AGG}}{\gamma_{H2O}} \quad (XIV)$$

dove:

- V_{TOT} è il volume totale della fustella, funzione dell'altezza finale considerata, in m^3 ;
- M_{AGG} è la massa totale di materiale da inserire nella fustella, in kg;
- γ_{MMVT} è la massima massa volumica teorica stimata tramite prova al picnometro, espressa in kg/m^3 ;
- γ_{CEM} è la densità secca del cemento, pari a $3110 kg/m^3$;
- γ_{H2O} è la densità secca dell'acqua, equivalente a $1000 kg/m^3$;
- x è la percentuale d'acqua considerata.

Fissata la percentuale di cemento al 3%, sono state indagate tre diverse percentuali in peso di acqua: 6%, 6.5% e 7%. Considerando un numero di giri di compattazione finale pari a 40, la miscela migliore è risultata quella con il 6.5% in peso di acqua, in quanto la miscela è apparsa sufficientemente umida senza che fuoriuscisse acqua dalla fustella. L'altezza finale, inoltre, è

risultata prossima a quella desiderata inizialmente, ossia 200 mm. Per quanto concerne la miscela con il 7% di acqua, viene registrata una notevole perdita di questa dal campione con un'altezza finale di circa 20 mm in meno rispetto a quella desiderata (200 mm); con il 6% di acqua, invece, si è ottenuta una miscela troppo secca, in cui la bassa percentuale di acqua ha comportato un composto scarsamente amalgamato e che si sgretolava facilmente, con un'altezza finale di 212 mm.

Le curve complete di lavorabilità per ogni percentuale di acqua indagata, sono riportate in *Figura 24*. L'iter seguito per il confezionamento è stato il medesimo riportato per i CDWA, in questo caso però si sono considerate delle altezze uniformi per i 4 strati (*Tabella 6*).

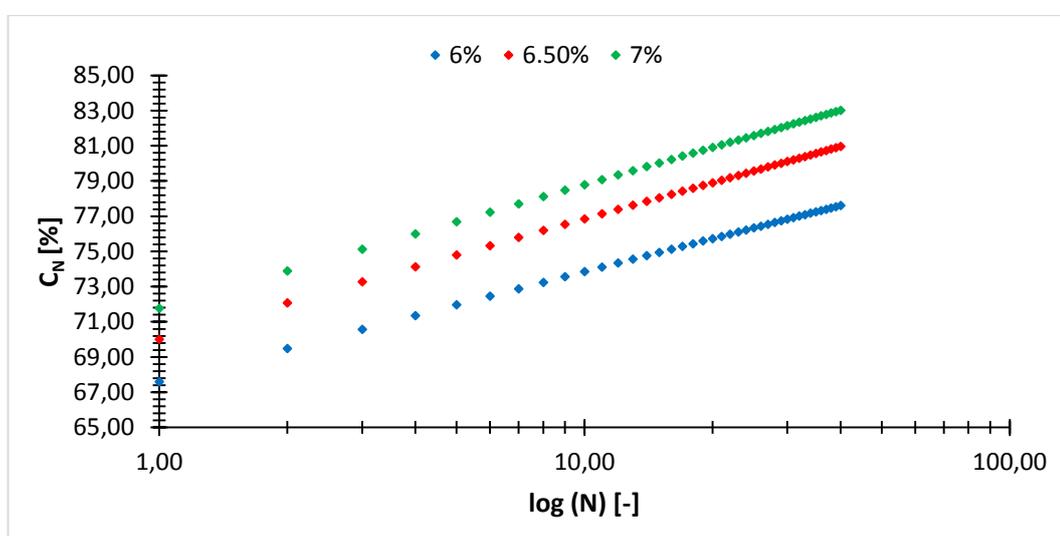


Figura 24: Curve di lavorabilità delle tre miscele indagate di NAT.

Tabella 6: Composizione granulometrica in [g] dell'aggregato naturale.

FRAZIONE [mm]	%	STRATO 1 [g]	STRATO 2 [g]	STRATO 3 [g]	STRATO 4 [g]
25 ÷ 20	5	41.68	41.68	41.68	41.68
20 ÷ 12.5	9.4	78.36	78.36	78.36	78.36
12.5 ÷ 8	18.1	150.89	150.89	150.89	150.89
8 ÷ 4	17.5	145.89	145.89	145.89	145.89
4 ÷ 2	12.5	104.21	104.21	104.21	104.21
2 ÷ 0.4	15	125.05	125.05	125.05	125.05
0.4 ÷ 0.125	10.6	88.37	88.37	88.37	88.37
0.125 ÷ 0.063	2.4	20.01	20.01	20.01	20.01
< 0.063	9.5	79.20	79.20	79.20	79.20

2.6 Stagionatura e degrado termico

2.6.1. Stagionatura

Come già descritto nel paragrafo 2.2, i tempi di stagionatura considerati per gli aggregati da CDW attivati alcalinamente sono 7, 28, 45 e 60 giorni, per evidenziare come le caratteristiche meccaniche variano nel tempo. Nel caso del misto cementato sono stati scelti 2 tempi di stagionatura, 7 e 28 giorni, i quali hanno simulato breve e lungo termine.

Dopo il confezionamento è seguita la stagionatura dei campioni in ambiente umido (percentuale di umidità maggiore del 90%) al fine di evitare che l'acqua presente nel campione evaporasse e, quindi, che il suo contenuto d'acqua potesse subire variazioni notevoli (Figura 25).

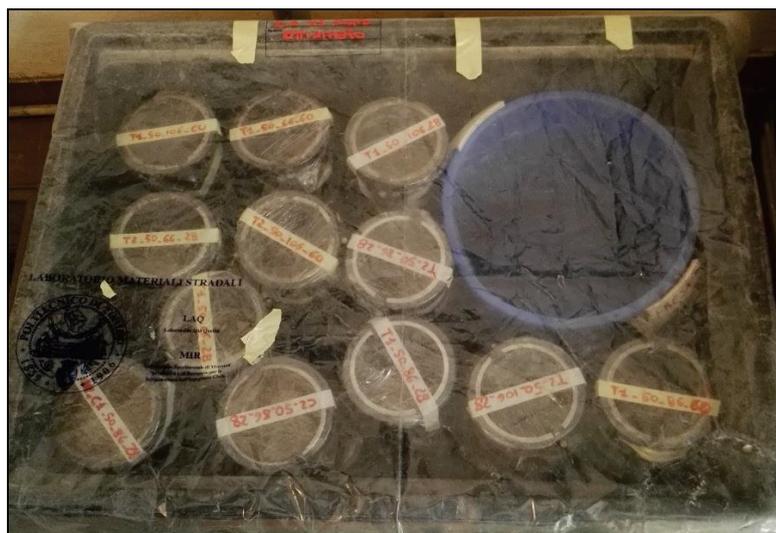


Figura 25: Stagionatura dei campioni in ambiente umido [4].

2.6.2. Degrado termico

Quando la temperatura si abbassa al di sotto dei 4°C, l'acqua contenuta all'interno del materiale comincia a congelare, passando dallo stato liquido a quello solido, con progressivo aumento di volume. Tale espansione induce delle deformazioni impresse all'interno del materiale che si trova quindi soggetto a tensioni interne. Questo fenomeno, se ripetuto ciclicamente, porta ad un progressivo degrado delle caratteristiche meccaniche del materiale e ne riduce la durabilità. Il deterioramento delle proprietà dei campioni può essere indotto anche dalla possibile formazione di lenti di ghiaccio interstiziale tra i granuli del materiale.

Nel presente elaborato, il degrado termico è stato simulato attraverso cicli di gelo e disgelo con variazioni di temperatura da -20°C a +20°C. Gli effetti che questo degrado ha determinato sulla miscela stabilizzata sono stati valutati in termini di variazione delle proprietà meccaniche. Tale approccio è stato adottato sia per i materiali riciclati da CDW e additivati con SA, che sul misto cementato naturale di riferimento.

Come anticipato nel paragrafo 2.2, sono stati presi in esame 3 livelli di severità del degrado (4 cicli di gelo/disgelo, 8 cicli di gelo/disgelo e 12 cicli di gelo/disgelo) sia per i campioni di CDWA stagionati 7, 28, 45 e 60 giorni, che per quelli di misto cementato maturati 7 e 28 giorni. Tra i livelli di degrado viene considerato anche un valore di riferimento, ovvero i campioni non sottoposti a degrado o a 0 cicli di gelo/disgelo.

Per i provini di materiale da riciclo stagionati 7 giorni, è stato scelto un ulteriore livello di deterioramento pari a 3 cicli di gelo/disgelo, poiché si è voluto valutare come l'azione stabilizzante ed attivante della soluzione alcalina fosse influenzata dalla temperatura a cui avviene il curing. Subito dopo la compattazione con pressa giratoria, il campione è stato inserito direttamente in freezer, saltando la fase di maturazione in ambiente umido, per valutare la termo-dipendenza dell'attivazione alcalina. Dopo 3 cicli di gelo/disgelo, il provino è stato testato tramite le stesse prove previste per gli altri provini.

Nello schema seguente si riportano in maniera sintetica i tempi di maturazione e i cicli di degrado applicati ai diversi campioni (*Figura 26*). Si sottolinea che per ogni tempo di stagionatura e per ogni tipo di degrado termico sono stati realizzati due campioni identici, così da avere una doppia ripetizione di ogni misurazione.

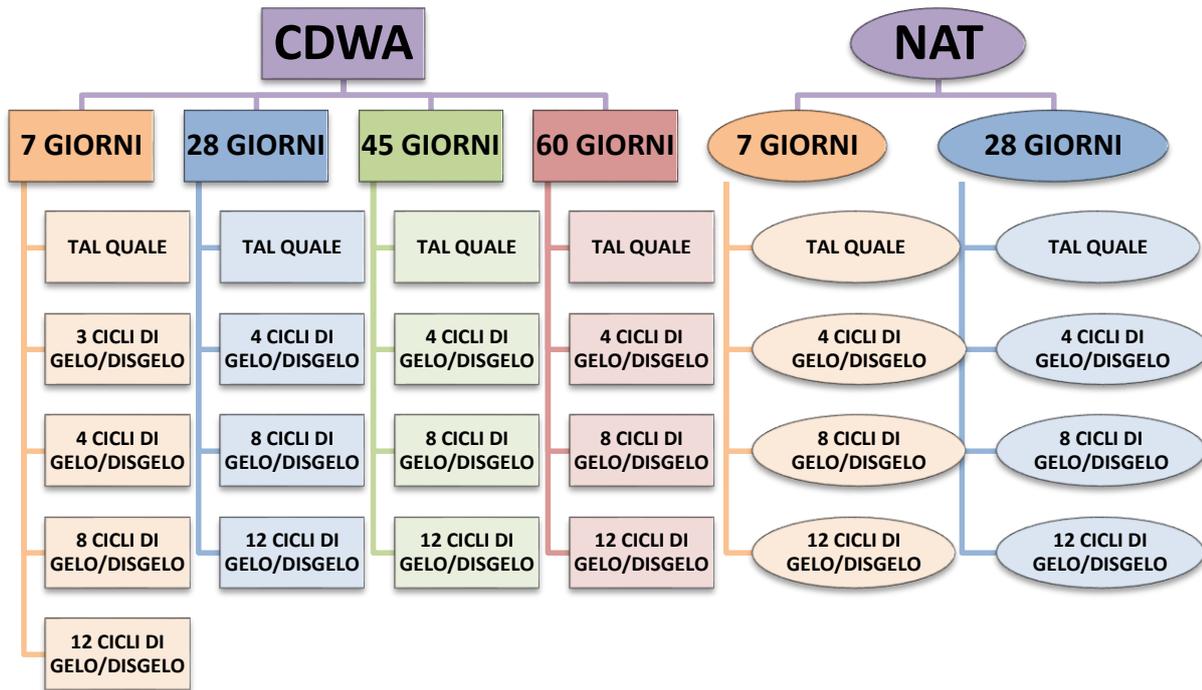


Figura 26: Schema sintetico dell'iter di stagionatura e degrado seguito.

2.7 Caratteristiche meccaniche

Dopo la fase di maturazione e degrado termico, i campioni dei due materiali sono stati sottoposti a prove di laboratorio per la valutazione delle caratteristiche meccaniche: prova ciclica triassiale, prova a compressione semplice non confinata (UCS) e prova a trazione indiretta (ITS). Per i due materiali si è inoltre valutata l'eco-compatibilità tramite test di cessione confrontando poi i risultati con i limiti imposti da normativa.

2.7.1. Prova ciclica triassiale

La deformazione dei materiali granulari sotto l'azione di carichi impulsivi ciclici è caratterizzata da una componente recuperabile, detta "resiliente", e da una permanente. Al crescere del numero di applicazioni del carico a parità di sollecitazione, la componente permanente diminuisce mentre quella resiliente si assesta sino ad assumere un valore pressoché costante.

Per simulare le sollecitazioni indotte dai veicoli sugli strati non legati della pavimentazione stradale e valutare quindi la rigidità di quest'ultima, è stata eseguita una prova ciclica triassiale in conformità alla normativa AASHTO T307 [54], che ha consentito di misurare il

cosiddetto “modulo resiliente” del materiale. Nel corso della prova, il campione è stato confinato da una pressione di cella costante e ha subito l’azione di impulsi ciclici verticali. L’intensità delle sollecitazioni è stata volutamente bassa e simile a quella determinata alla scala reale, e ciò ha evitato il raggiungimento delle condizioni ultime di rottura durante la prova.

Il modulo resiliente viene determinato su un campione cilindrico di altezza 200 mm e diametro 100 mm. Il provino così snello ha portato ad avere una deformazione verticale significativa sotto l’azione della tensione ciclica σ_1 agente lungo l’asse verticale, mentre lateralmente ha agito, come detto, una tensione di confinamento σ_3 .

La prova ciclica triassiale secondo la normativa AASHTO T307 [53] è considerata una prova “non distruttiva”. Le 15 diverse sequenze di carico impresso al provino sono precedute da 500 impulsi di condizionamento e assestamento delle teste di carico sulle facce del provino stesso. In questa fase di condizionamento viene esaurita anche l’aliquota permanente di deformazione. Secondo la normativa AASHTO T307 [53], ogni impulso di carico ha una durata di 0.1 secondi di carico seguito da 0.9 secondi di recupero, in cui il carico assume un valore tensionale pari al 10% della massima tensione applicata durante la fase di carico.

Il modulo resiliente è definito come rapporto tra la tensione deviatorica, calcolata come differenza tra la tensione verticale e quella di confinamento, e la deformazione resiliente verticale ε_r (XV):

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_r} \quad (\text{XV})$$

Poiché la rigidezza del materiale è fortemente influenzata dagli stati tensionali a cui è sottoposto (sintomo di un comportamento non lineare), il comportamento resiliente dei misti granulari può essere descritto da modelli costitutivi dipendenti da parametri tensionali. In questa sperimentazione, i risultati derivati dalla prova di modulo resiliente sono stati impiegati per calibrare i seguenti tre modelli:

- 1) Hicks-Monismith, detto anche modello $k - \vartheta$, in cui il modulo resiliente è dipendente da due parametri costanti k_i , condizionati dalle caratteristiche del materiale, e dal primo invariante ϑ delle sollecitazioni ($\vartheta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), secondo la seguente equazione (XVI):

$$M_R = k_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\vartheta}{p_a} \right)^{k_2} \quad (\text{XVI})$$

- 2) Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (M-EPDG), dove il modulo resiliente è dipendente da tre parametri costanti k_i , dal primo invariante ϑ e dallo sforzo di taglio ottaedrico τ_{oct} ($\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_d$), secondo la relazione (XVII):

$$M_R = k_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\vartheta}{p_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (\text{XVII})$$

- 3) Itani, in cui il modulo resiliente è dipendente da 4 parametri costanti k_i , dal primo invariante ϑ , dalla tensione deviatorica σ_d e dalla tensione di confinamento σ_3 , secondo la seguente formula (XVIII):

$$M_R = k_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\vartheta}{p_a}\right)^{k_2} \cdot (\sigma_d)^{k_3} \cdot (\sigma_3)^{k_4} \quad (\text{XVIII})$$

Le prove cicliche triassiali sono state eseguite in una pressa dinamica (NU – 10 Cooper Research Technology) dotata di cella di carico da 10 kN e trasduttori di deformazione montati esternamente alla cella triassiale. La procedura di prova ha previsto l'inserimento del campione cilindrico snello (100 x 200 mm) all'interno della cella triassiale chiusa da una campana in plexiglass (Figura 27), rivestito con una guaina in lattice (Figura 28). Viene introdotta aria compressa all'interno della cella triassiale per ottenere il confinamento desiderato e sulla sommità del campione una testa di carico ha trasmesso la forza ciclica mediante un impulso di carico.



Figura 27: Cella triassiale caricata.



Figura 28: Rivestimento del provino con guaina in lattice e preparazione del provino da inserire in cella triassiale.

La media dei moduli resilienti misurati negli ultimi 5 cicli di carico di ogni sequenza ha fornito il valore da considerare per la stessa; inoltre sono stati calibrati i parametri dei modelli tensionali sopra elencati mediante regressione, al fine di minimizzare la differenza quadratica tra il valore di modulo osservato e quello modellato. Per valutare la bontà del modello sono stati calcolati, infine, il rapporto tra l'errore e la deviazione standard, Se/Sy , il coefficiente di determinazione, R^2 ed il suo valore corretto, R^2_{adj} . R^2 rappresenta la proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato [54]; esso misura la frazione della varianza della variabile dipendente espressa dalla regressione (XIX).

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad (XIX)$$

In cui:

- $ESS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ è la varianza spiegata dal modello (*Explained Sum of Squares*) [54];
- $TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ è la varianza totale (*Total Sum of Squares*) [54];
- $RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ è la varianza residua (*Residual Sum of Squares*) [54];
- y_i sono i dati osservati;
- \bar{y} è la loro media;
- \hat{y}_i sono i dati stimati dal modello ottenuto dalla regressione [54].

R^2 varia tra 0 ed 1: quando è 0 il modello utilizzato non spiega per nulla i dati; quando è 1 il modello spiega perfettamente i dati. Mentre R^2 semplice è utilizzato per l'analisi di regressione lineare semplice come principale indice di bontà della curva di regressione, R^2_{adj} viene utilizzato per l'analisi di regressione lineare multipla. Esso serve a misurare la frazione di devianza spiegata, cioè la proporzione di variabilità di Y "spiegata" dalla variabile esplicativa X. All'aumentare del numero di variabili esplicative (o predittori) X, aumenta anche il valore di R^2 , per cui spesso è utilizzato al suo posto R^2_{adj} , che serve a misurare

la frazione di varianza spiegata (XX). Il coefficiente R^2_{adj} può essere negativo e vale sempre la disuguaglianza $R^2_{adj} \leq R^2$ [55].

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k-1} \quad (XX)$$

- n è il numero delle osservazioni;
- k è il numero di regressori [55].

2.7.2. Prova a Compressione Semplice Non Confinata (UCS)

La procedura di prova utilizzata ha previsto l'impiego di un campione snello 100x200 mm, il quale viene posto tra due piatti d'acciaio; il piatto inferiore si avvicina a quello superiore progressivamente con una certa velocità di spostamento, caricando gradualmente il provino che si trova così schiacciato tra le due piastre, fino alla sua rottura.

La risposta del provino si esplica sotto forma di deformazioni, le quali inizialmente sono elastiche ma, all'aumentare del carico, si trasformano via via in deformazioni di tipo plastico. L'output di prova è, quindi, rappresentato da una curva sforzo-deformazione (*Figura 29*), in cui in ascissa è presente la deformazione totale del provino espressa in [%], mentre in ordinata vi è la tensione a cui si sottopone il campione in [kPa]. La curva che viene restituita dalla macchina è stata, però, rielaborata in modo da eliminare il tratto iniziale di assestamento del provino e riportare le deformazioni in [mm/mm]. Tale rielaborazione è stata eseguita individuando il tratto lineare elastico della curva, prolungandolo e traslando l'origine degli assi verso destra.

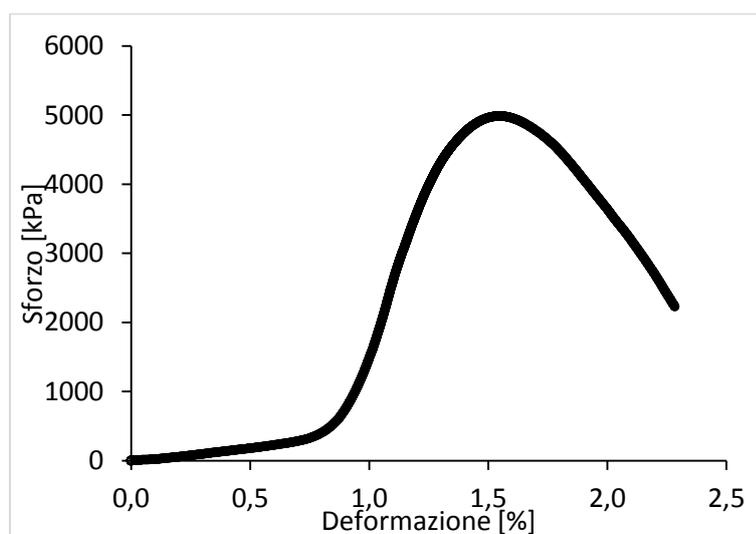


Figura 29: Curva sforzo-deformazione restituita dalla macchina.

Mediante la curva sforzo-deformazione rielaborata, è stato possibile valutare cinque importanti parametri (Figura 30):

- la tensione massima, la quale corrisponde alla resistenza massima che il provino offre subito prima di giungere a rottura;
- la deformazione relativa allo sforzo massimo, che è la deformazione totale raggiunta dal campione in corrispondenza della resistenza massima;
- l'energia di rottura, ossia l'energia necessaria per portare a rottura il provino che è rappresentata dall'area sottesa dalla curva sforzo-deformazione tra l'origine e il punto massimo;
- il modulo tangente, il quale è il coefficiente angolare della retta, passante per l'origine, tangente al tratto elastico. Tale modulo dà un'indicazione sull'elasticità del materiale;
- il modulo secante, coefficiente angolare della retta passante per l'origine e il punto di massimo della curva sforzo-deformazione. Tale parametro permette di avere una stima della rigidità media del materiale.

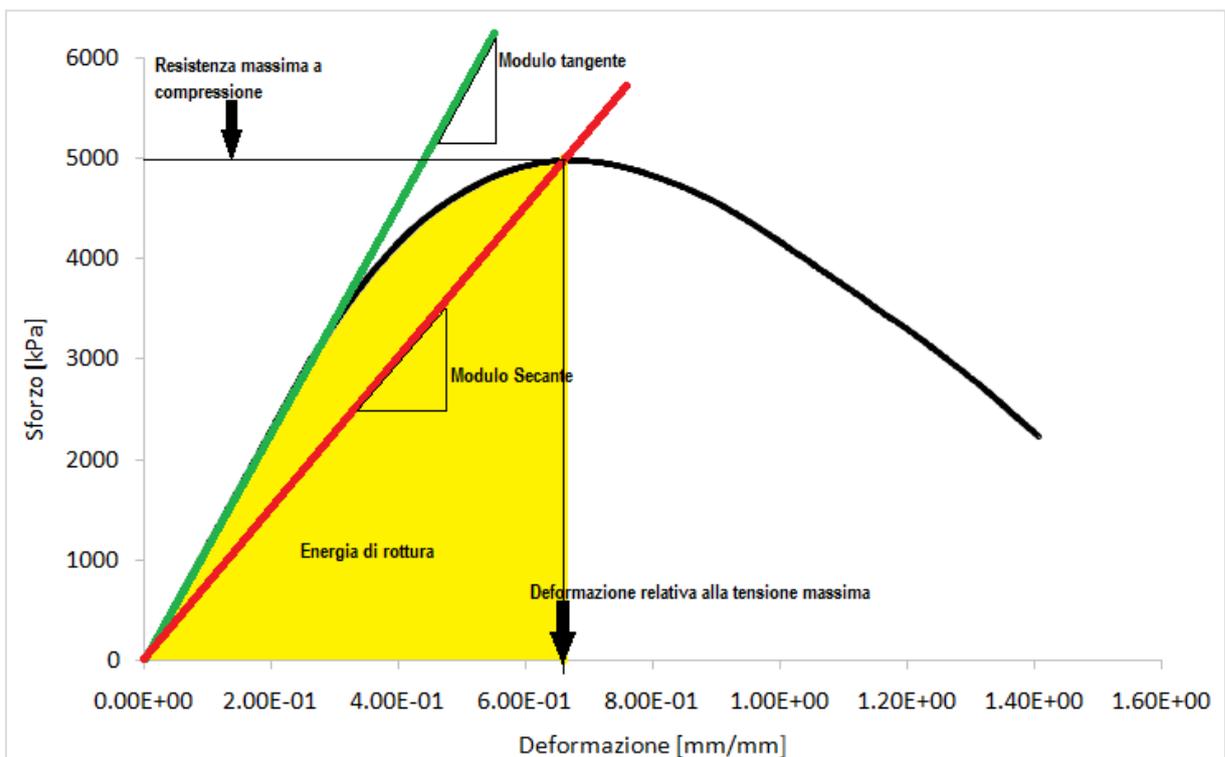


Figura 30: Curva sforzo-deformazione rielaborata.

Tale prova può essere eseguita sia in controllo di carico che in controllo di spostamento; nel primo caso si fissa il valore di carico a cui sottoporre il provino, con una variazione continua della velocità di spostamento in modo da mantenere la forza costante fino alla rottura del campione; nel secondo caso si impone un valore di spostamento costante, che porta progressivamente a rottura il provino.

Nell'ambito di questa sperimentazione, le prove di UCS sono state eseguite fissando una velocità di spostamento di 0.5 mm/min e registrando tramite trasduttori gli abbassamenti del provino con una frequenza di 5 Hz.

L'entità del carico applicato e la conseguente deformazione vengono registrati da una cella di carico e un trasduttore di deformazione, rispettivamente, posti sulla macchina e in stretto contatto con il provino. Durante la prova il campione è libero di deformarsi in quanto è assente ogni tipo di confinamento laterale, oltre alla presenza della pressione atmosferica (*Figura 31*).



Figura 31: Procedura di prova a compressione non confinata.

Nota la geometria del provino, in particolare altezza e sezione trasversale, è stato possibile valutare la tensione e la deformazione secondo le seguenti espressioni (XXI e XXII):

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (\text{XXI})$$

$$\varepsilon_c = \frac{\delta}{H} \quad (\text{XXII})$$

in cui:

- σ_c è la tensione di compressione applicata, in MPa;
- F è il carico applicato al provino, in N;
- A è l'area della sezione trasversale, pari a 7584 mm².
- ε_c è la deformazione dovuta alla compressione, in mm/mm;
- δ è lo spostamento verticale registrato dal trasduttore, in mm;
- H è l'altezza nota del provino, anch'essa in mm.

La rottura del provino è dovuta alla formazione di una fessura nella parte più sollecitata del campione. La fessurazione segue una linea diagonale che attraversa tutto il provino dal centro alle estremità, fino alla rottura che si raggiunge quando la fessura tocca contemporaneamente la superficie superiore ed inferiore (*Figura 32*).

Prima di essere sottoposti alla prova di compressione semplice non confinata che porta il provino a rottura, i campioni sono stati testati tramite prova ciclica triassiale per indagarne il modulo resiliente.



Figura 32: Rottura del provino dovuta alla progressiva fessurazione.

2.7.3. Prova a Trazione Indiretta (ITS)

Tale prova detta anche “alla brasiliana” consiste nel misurare la massima tensione a rottura su campioni cilindrici di dimensione 100 mm in diametro e 100 mm di altezza. Il test è stato effettuato ponendo il provino tra due lame che trasferiscono su quest’ultimo uno sforzo di compressione lungo la sua altezza; la resistenza a trazione viene quindi valutata nella direzione perpendicolare a quella di carico secondo la formula (XXIII):

$$R_{it} = \frac{2F}{\pi HD} \quad \text{(XXIII)}$$

in cui

- R_{it} è la resistenza a trazione indiretta, in MPa;
- F è la massima forza a rottura misurata dalla pressa statica, in N;
- H è l’altezza reale del provino, in mm;
- D è il diametro del provino: 100mm.

Nel corso della prova avviene la formazione di una fessura nella direzione ortogonale a quella di carico; l’apertura di tale fessura e il tempo necessario affinché il provino collassi, in seguito alla fessurazione, forniscono indicazioni sulla resistenza a trazione del campione. Tale fessurazione si esplica in quanto il provino cilindrico viene sollecitato lungo la sua altezza, per cui si genera una cricca nella parte centrale del campione che risulta essere la più sollecitata (*Figura 33*). All’aumentare del carico, la fessura si ingrandisce fino a raggiungere contemporaneamente le due superfici esterne del provino e quindi la rottura dello stesso (*Figura 34*).

Come per la prova a compressione, anche per il test a trazione è possibile agire in controllo di carico o in controllo di spostamento, poiché la macchina di prova impiegata è la medesima. Le prove ITS sono state eseguite in controllo di spostamento, impostando una velocità di 0.5 mm/min e registrando i dati con una frequenza di campionamento di 5 Hz (*Figura 35*). Una cella di carico da 50 kN ha permesso di registrare la forza impressa al campione durante il test.

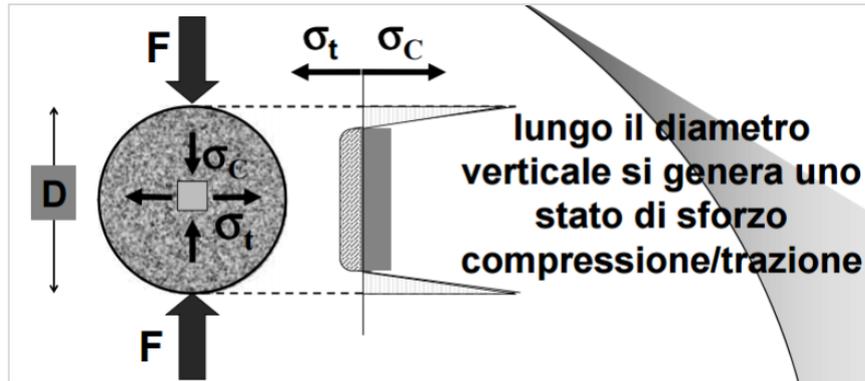


Figura 33: Stato tensionale a cui il provino è sottoposto durante la prova.



Figura 34: Campione rotto a trazione indiretta.



Figura 35: Procedura di prova per la trazione indiretta.

2.8 Test di cessione

Le norme vigenti indicano come necessaria la verifica di eco-compatibilità ambientale dei materiali da riciclo per poter sancire la cessazione dello stato di rifiuto e la contemporanea promozione a prodotto del materiale recuperato [55]. Per valutare ciò, si esegue il test di lisciviazione (o di cessione) che identifica e quantifica gli ioni metallici e le sostanze rilasciate nell'eluato. Il rilascio di composti solubili al contatto con l'acqua rappresenta uno dei potenziali rischi ambientali legato al riciclo e allo smaltimento dei rifiuti [56].

Le prove di cessione si suddividono in tre grandi categorie [56]:

- 1) per la *caratterizzazione di base*, utilizzate per raccogliere informazioni sull'attitudine alla cessione a breve e lungo termine e sulle proprietà caratteristiche dei rifiuti. Tali prove considerano fattori quali il rapporto liquido/solido (L/S), il pH, la composizione dell'agente lisciviante e il potenziale di ossidoriduzione [56];
- 2) di *conformità*, utilizzate per valutare se il rifiuto sia conforme a valori di riferimento. Queste prove sono basate sull'attitudine alla lisciviazione valutata dai test di caratterizzazione di base [56];
- 3) di *verifica sul campo*, utilizzate come controllo rapido per confermare o meno il fatto che il materiale sia lo stesso analizzato nelle prove di conformità [56].

La UNI EN 12457-2 tratta le prove di conformità. Tale norma italiana nacque per esaminare i composti inorganici presenti nei materiali testati.

In questa tesi sono stati preparati e analizzati tre diversi campioni: uno di CDWA non stabilizzato (CDWA_NS), uno di CDWA stabilizzato con soluzione alcalina e stagionato 28 giorni senza aver subito nessun tipo di degrado termico (CDWA_28_OFT), e uno di aggregato naturale stabilizzato a cemento, anch'esso stagionato 28 giorni e non degradato (NAT_28_OFT). La prova è stata condotta dal laboratorio EUROLAB di Nichelino (TO). I risultati riportati nel capitolo successivo permettono non solo un confronto con le normative vigenti relativamente alle quantità limite previste per ogni composto pericoloso, ma soprattutto consentono di valutare l'effetto della stabilizzazione alcalina sul materiale da riciclo e di eseguire un confronto con il materiale di riferimento (misto cementato).

Capitolo 3-Risultati e analisi dei dati

3.1 Risultati

3.1.1 Modulo resiliente (MR)

Al termine del degrado termico, per ogni provino cilindrico di dimensioni 100x200 mm è stato valutato il modulo resiliente tramite prova ciclica triassiale, la cui procedura è presentata nel paragrafo 2.7.1. Per meglio valutare l'andamento del modulo resiliente (MR), funzione dello stato tensionale applicato, i risultati sono forniti in funzione del primo invariante delle tensioni ϑ (in scala logaritmica). Si riportano, nel seguito, per ogni livello di degrado e tempo di stagionatura, solo le curve ottenute come media dei valori di modulo resiliente di ogni coppia di campioni:

- CDWA stagionato 7 giorni (Figura 36 - Figura 40);
- CDWA stagionato 28 giorni (Figura 41 - Figura 45);
- CDWA stagionato 45 giorni (Figura 44 - Figura 49);
- CDWA stagionati 60 giorni (Figura 48 - Figura 53);
- misto cementato (NAT) stagionato 7 giorni (Figura 52 - Figura 57);
- misto cementato (NAT) stagionato 28 giorni (Figura 56 - Figura 60).

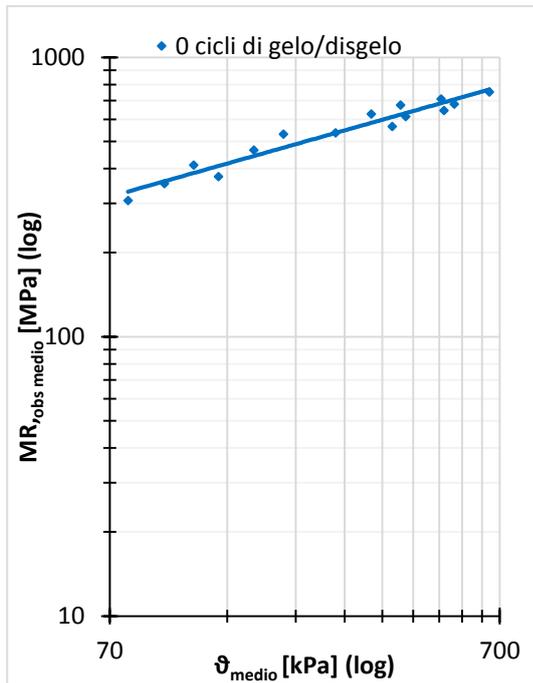


Figura 36: Modulo resiliente CDWA 0 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

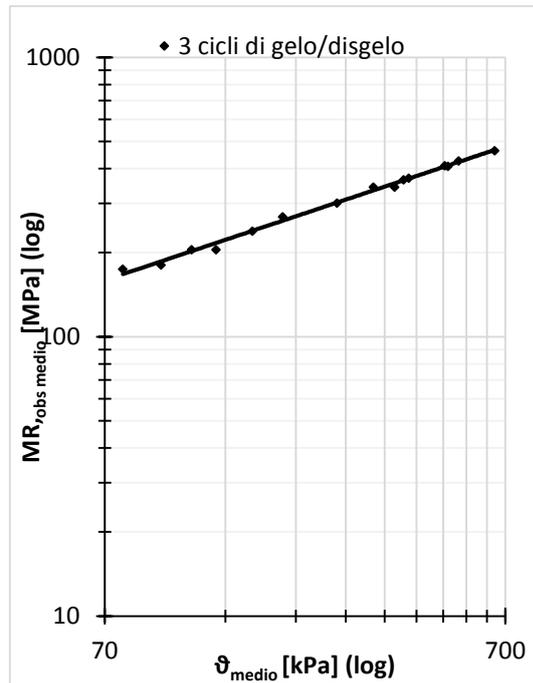


Figura 387: Modulo resiliente CDWA 3 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

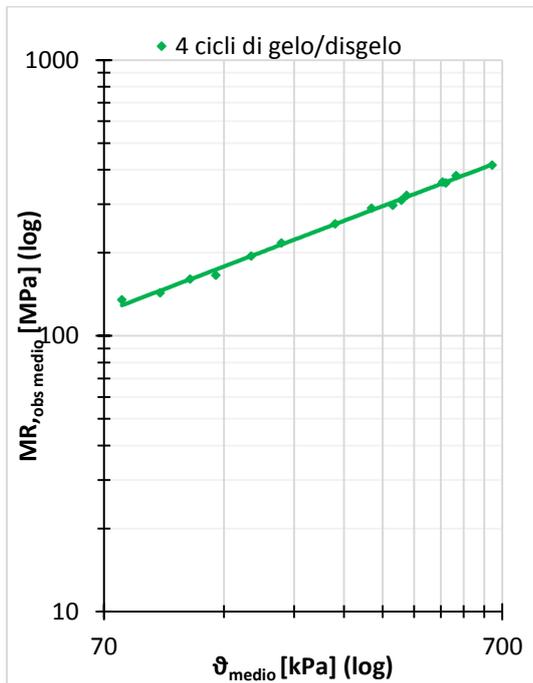


Figura 378: Modulo resiliente CDWA 4 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

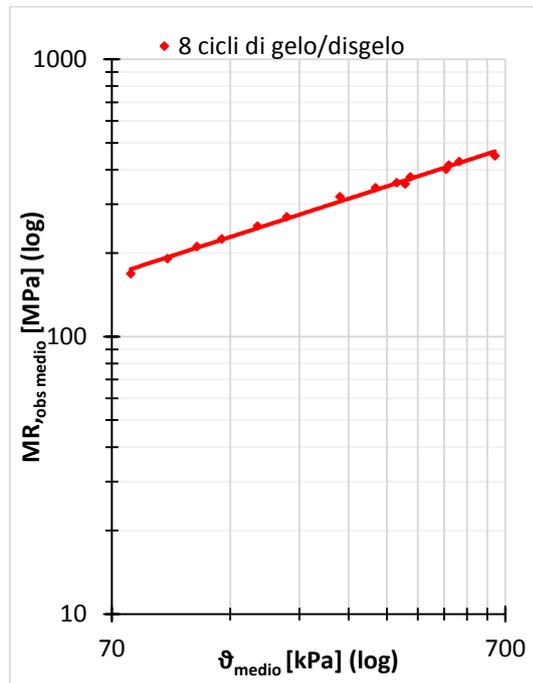


Figura 39: Modulo resiliente CDWA 8 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

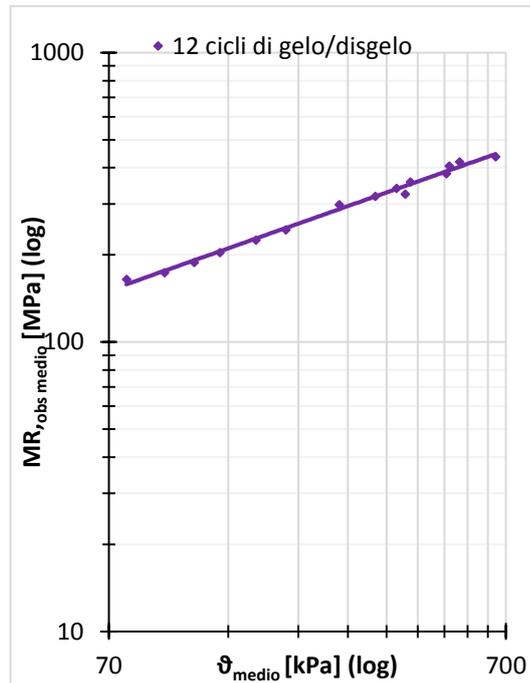


Figura 40: Modulo resiliente CDWA 12 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

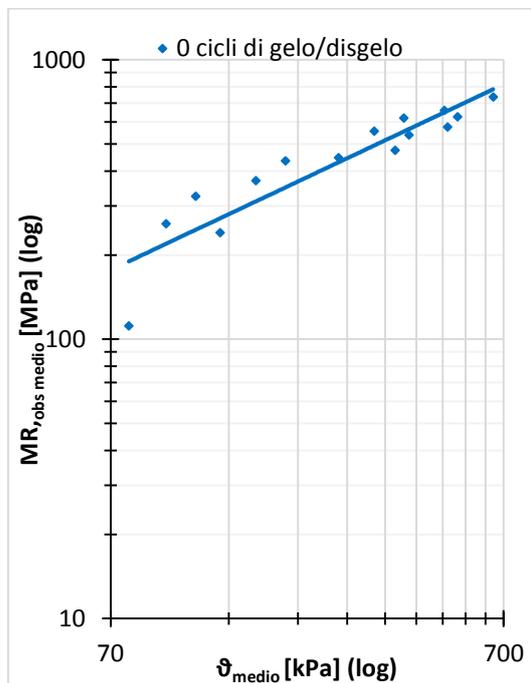


Figura 41: Modulo resiliente CDWA 0 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

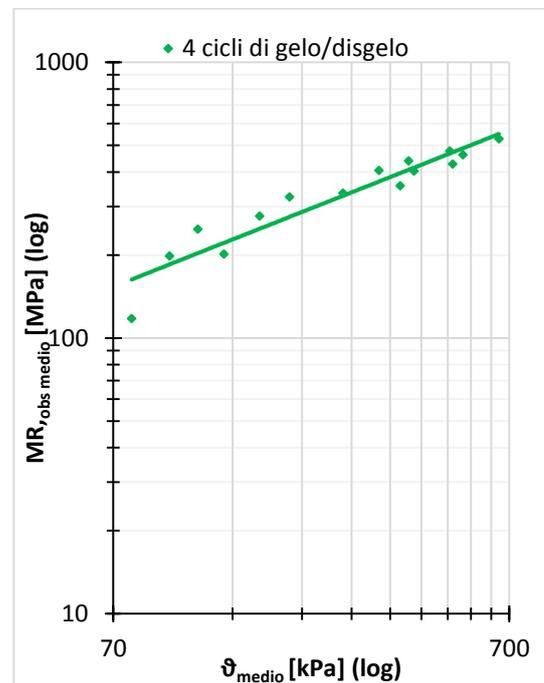


Figura 42: Modulo resiliente CDWA 4 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

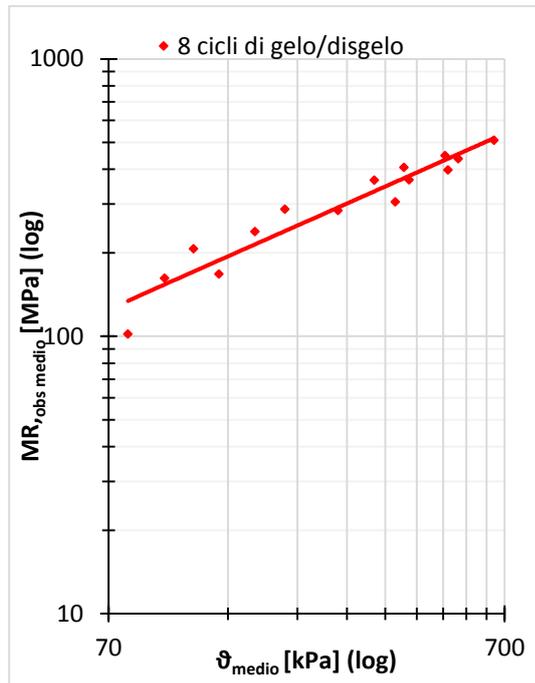


Figura 43: Modulo resiliente CDWA 8 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

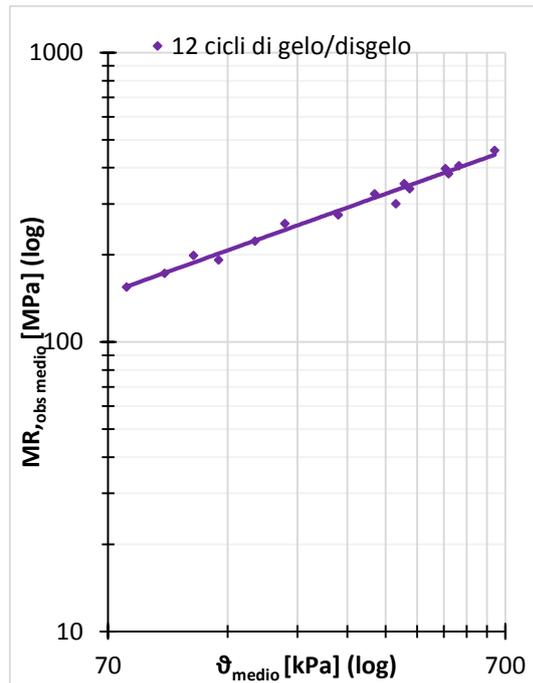


Figura 45: Modulo resiliente CDWA 12 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

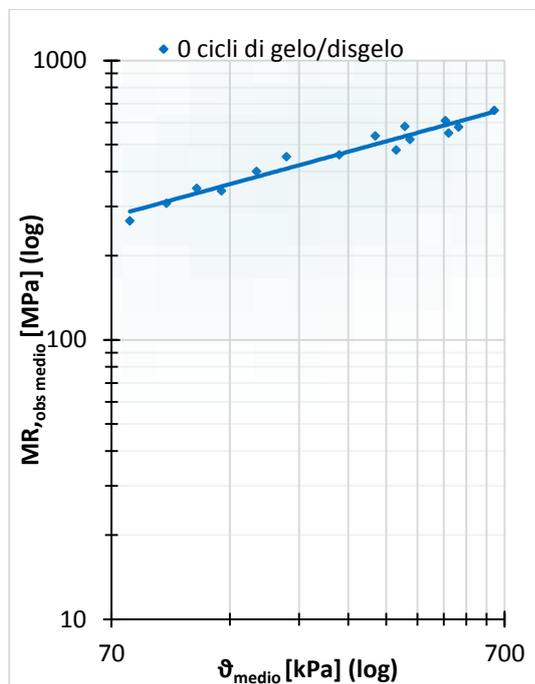


Figura 44: Modulo resiliente CDWA 0 cicli di gelo/disgelo (45 giorni).

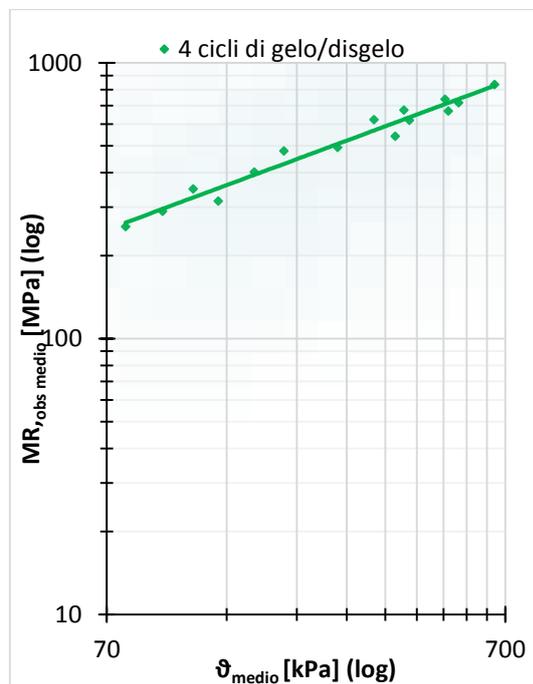


Figura 46: Modulo resiliente CDWA 4 cicli di gelo/disgelo (45 giorni).

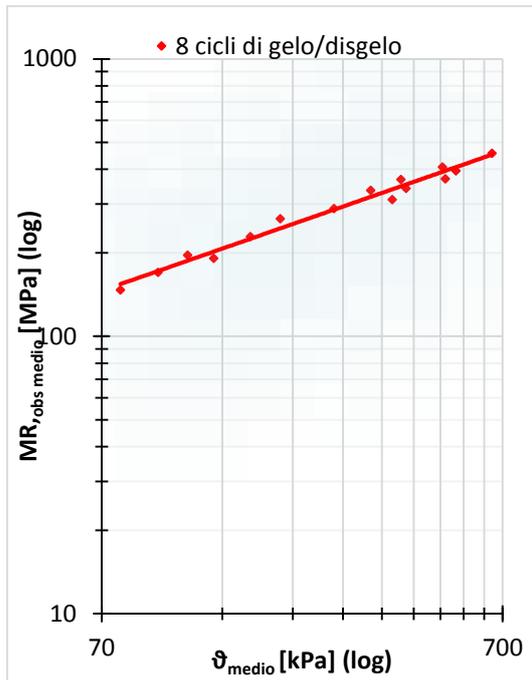


Figura 47: Modulo resiliente CDWA 8 cicli di gelo/disgelo (45 giorni).

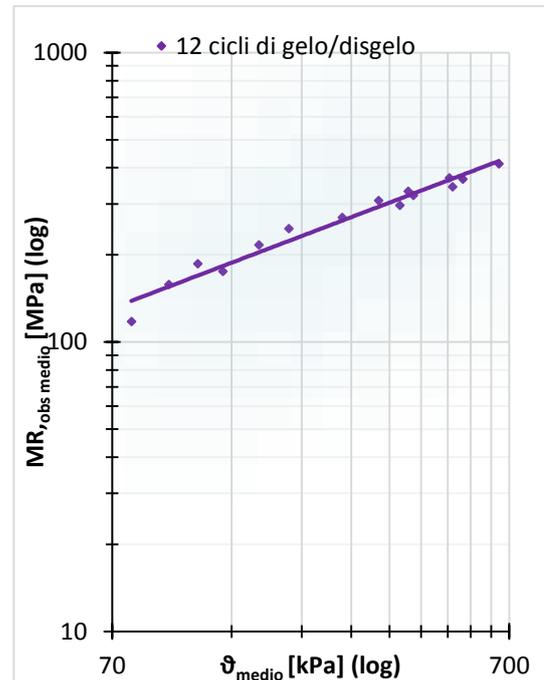


Figura 49: Modulo resiliente CDWA 12 cicli di gelo/disgelo (45 giorni).

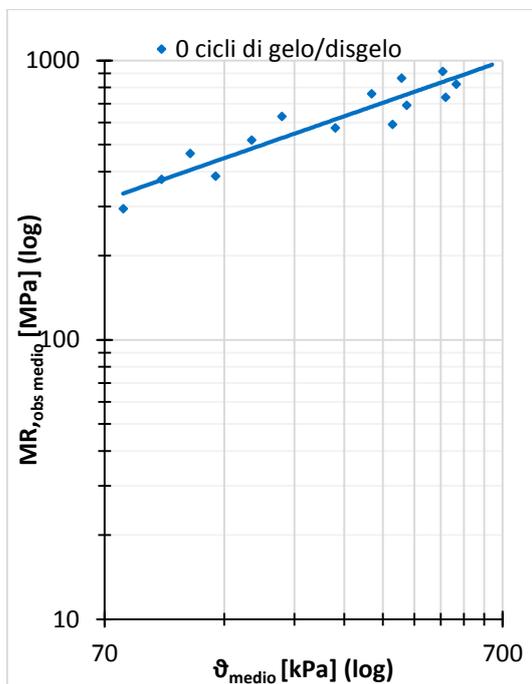


Figura 48: Modulo resiliente CDWA 0 cicli di gelo/disgelo (60 giorni).

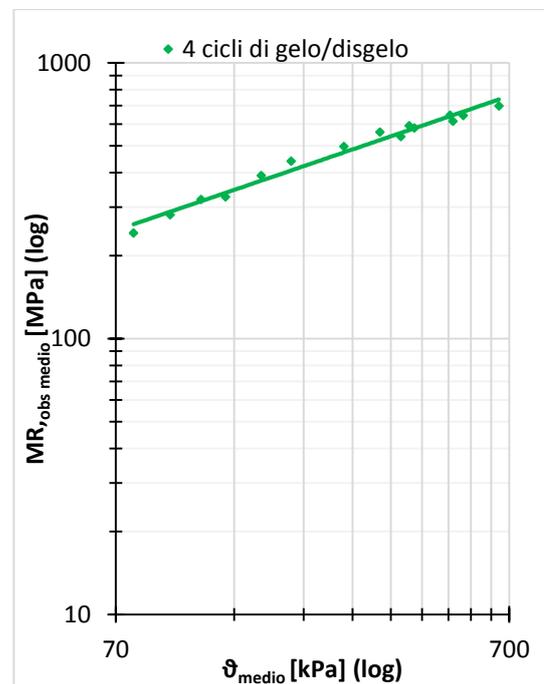


Figura 50: Modulo resiliente CDWA 4 cicli di gelo/disgelo (60 giorni).

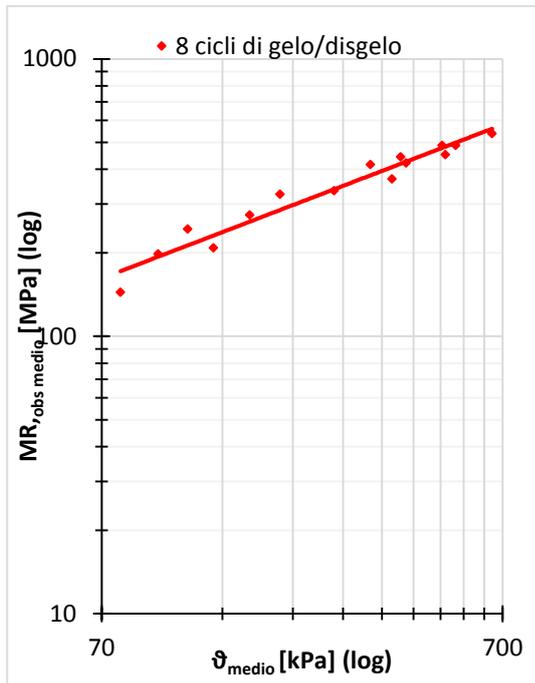


Figura 51: Modulo resiliente CDWA 8 cicli di gelo/disgelo (60 giorni).

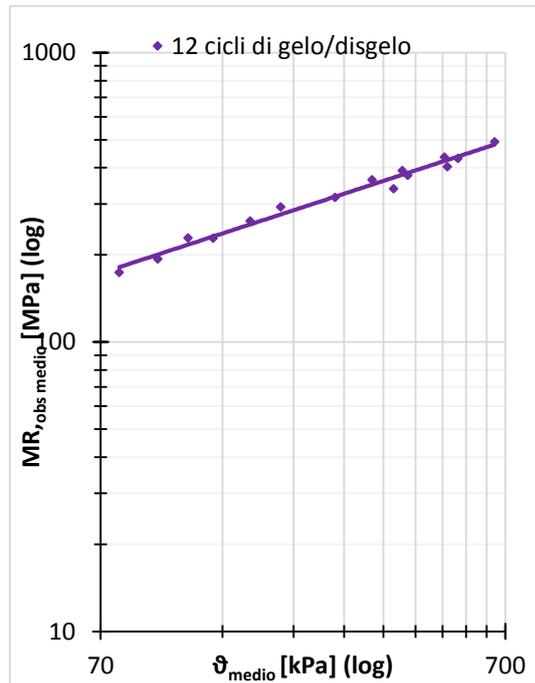


Figura 53: Modulo resiliente CDWA 12 cicli di gelo/disgelo (60 giorni).

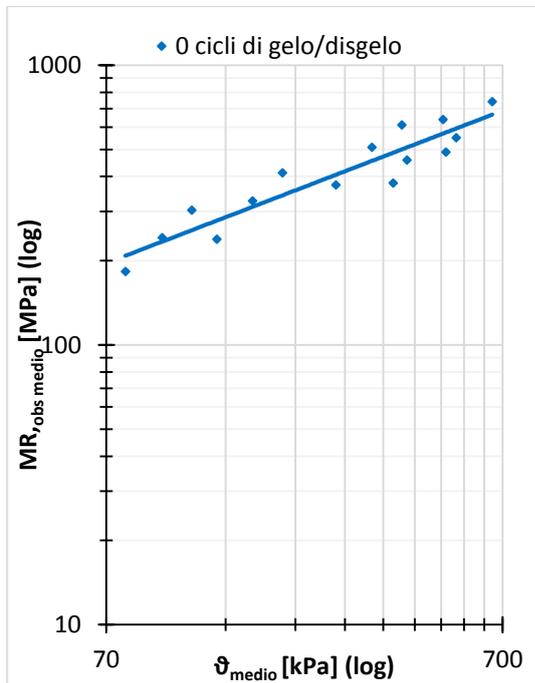


Figura 52: Modulo resiliente NAT 0 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

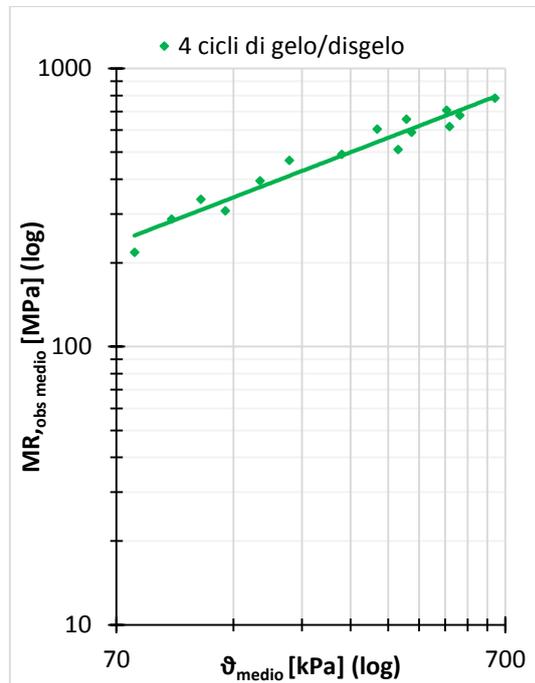


Figura 54: Modulo resiliente NAT 4 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

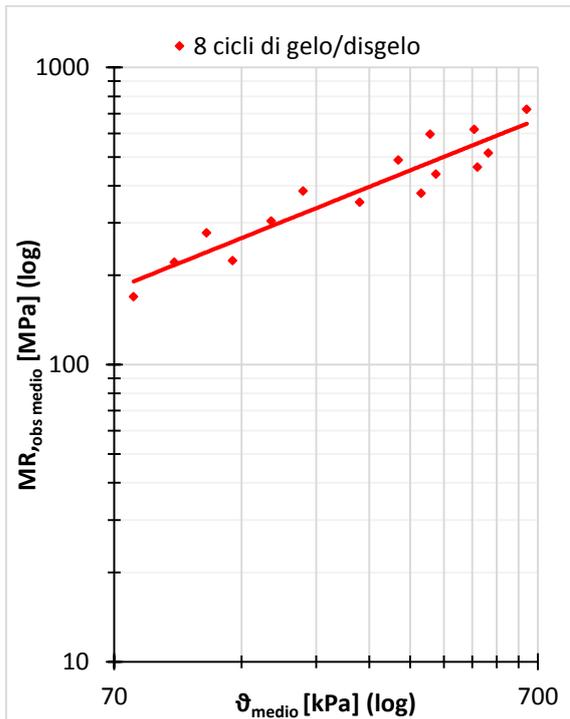


Figura 55: Modulo resiliente NAT 8 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

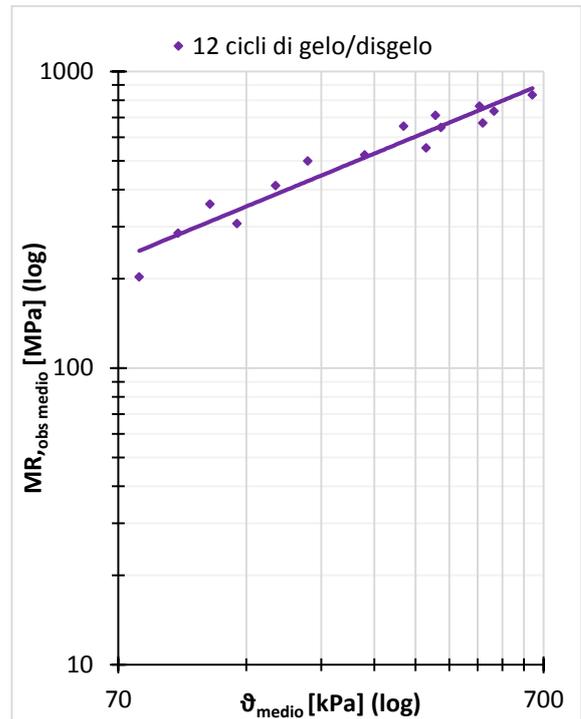


Figura 57: Modulo resiliente NAT 12 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

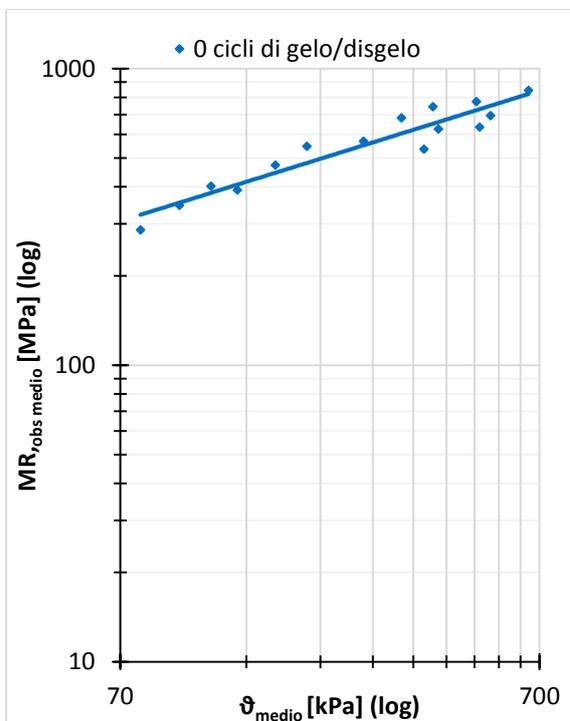


Figura 56: Modulo resiliente NAT 0 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

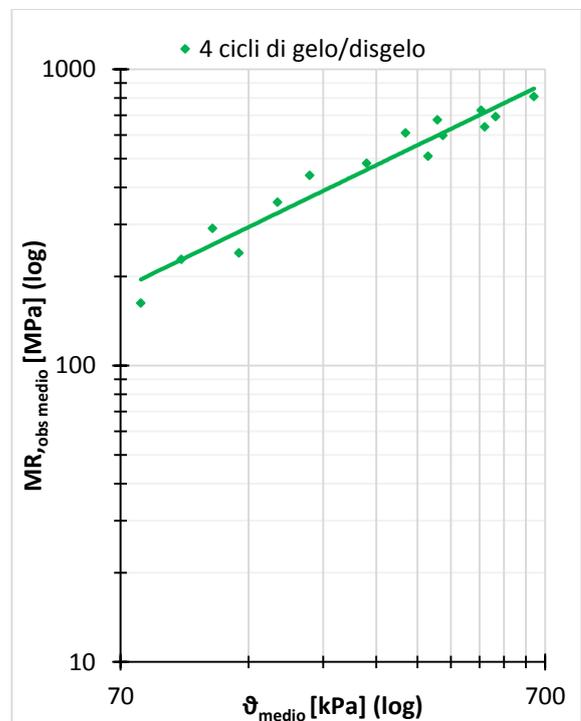


Figura 58: Modulo resiliente NAT 4 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

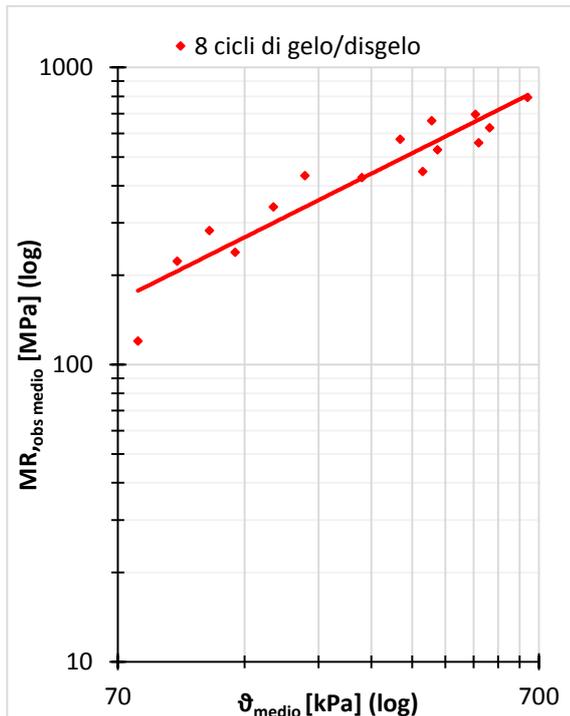


Figura 59: Modulo resiliente NAT 8 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

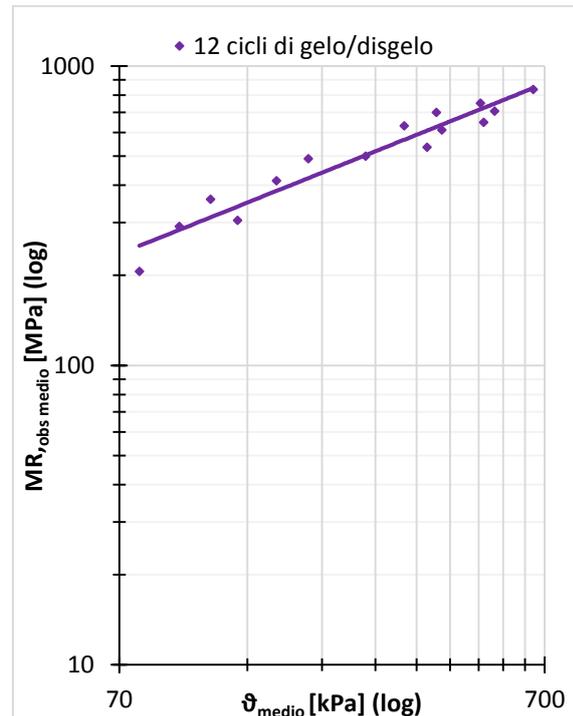


Figura 60: Modulo resiliente NAT 12 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

3.1.2 Compressione semplice non confinata (UCS)

Terminata la prova ciclica triassiale, che non compromette l'integrità del campione, ogni singolo provino è stato sottoposto alla prova di compressione semplice non confinata secondo la procedura di prova descritta nel paragrafo 2.7.2. La *Tabella 7* riporta i valori medi di resistenza massima a compressione, deformazione a rottura, modulo secante, modulo tangente ed energia di rottura di ogni coppia di campioni per ogni tempo di stagionatura e livello di degrado indotto a seguito dell'applicazione di cicli di gelo e disgelo.

I dati registrati durante la prova, sono inoltre presentati in istogrammi e commentati nei paragrafi seguenti. Le curve sforzo-deformazione relative alla singola coppia di campioni sono invece riportate in Allegato. Ciò che risulta molto interessante, più che il dato del singolo campione, è il confronto che se ne fa con il tradizionale aggregato di primo impiego; confronto che si focalizza sia sul valore puro di resistenza massima raggiunto, sia sugli altri parametri descritti nel paragrafo 2.7.2.

Tabella 7: Valori medi di resistenza a compressione, modulo secante, modulo tangente, deformazione a rottura ed energia di rottura.

Mat.	Giorni di stagionatura	Cicli di gelo/disgelo	Resistenza a compr. [MPa]	Def. a rottura [mm/mm]	Modulo secante [MPa]	Modulo tangente [MPa]	Energia di rottura [kPa*mm/mm]
CDWA	7	0	2.47	0.010	268	422	15.27
		3	1.57	0.010	156	204	9.73
		4	1.73	0.009	194	250	9.70
		8	2.05	0.009	231	285	10.70
		12	1.64	0.010	171	211	9.18
	28	0	4.20	0.005	859	1435	13.70
		4	3.26	0.009	368	530	18.20
		8	2.95	0.007	433	638	12.88
		12	3.16	0.007	480	576	12.50
	45	0	3.81	0.005	727	1458	14.60
		4	3.11	0.009	357	503	16.91
		8	2.63	0.008	345	491	12.45
		12	2.46	0.009	268	351	13.85
	60	0	5.03	0.005	993	1370	17.09
		4	4.05	0.004	1095	1463	9.65
		8	3.21	0.007	467	606	13.54
12		2.97	0.007	432	533	11.97	
NAT	7	0	2.33	0.009	257	481	14.66
		4	2.45	0.006	395	1642	11.35
		8	3.59	0.003	1507	2417	8.17
		12	3.33	0.005	705	1457	11.50
	28	0	4.16	0.005	795	1327	14.86
		4	3.98	0.004	968	1875	10.09
		8	4.19	0.002	2635	4513	4.48
		12	4.22	0.005	943	1256	13.36

3.1.3 Trazione indiretta (ITS)

La prova di trazione indiretta, così come indicato al paragrafo 2.7.3, è stata condotta su provini cilindrici di dimensione 100x100 mm. Si riportano in *Tabella 8* i valori medi di resistenza massima a trazione indiretta ottenuti per ogni coppia di campioni testati.

Tabella 8: Resistenza massima a trazione indiretta.

Mat.	Giorni di stagionatura	Camp.	Livelli di degrado termico			
			0 cicli di gelo/disgelo	4 cicli di gelo/disgelo	8 cicli di gelo/disgelo	12 cicli di gelo/disgelo
			σ_{MAX} [MPa]	σ_{MAX} [MPa]	σ_{MAX} [MPa]	σ_{MAX} [MPa]
CDWA	7	1	0.343	0.159	0.221	0.183
		2	0.458	0.178	0.240	0.178
		Media	0.401	0.169	0.230	0.180
	28	1	0.691	0.345	0.398	0.319
		2	0.553	0.478	0.442	0.333
		Media	0.622	0.411	0.420	0.326
	45	1	0.640	0.357	0.323	0.222
		2	0.632	0.367	0.362	0.161
		Media	0.636	0.362	0.343	0.192
	60	1	0.785	0.664	0.373	0.515
		2	0.849	0.493	0.348	0.379
		Media	0.817	0.578	0.361	0.447
NAT	7	1	0.329	0.313	0.623	0.544
		2	0.270	0.398	0.563	0.545
		Media	0.299	0.356	0.593	0.544
	28	1	0.700	0.786	0.709	0.647
		2	0.671	0.589	0.621	0.667
		Media	0.685	0.687	0.665	0.657

3.2 Analisi dei dati

Di seguito vengono commentati i risultati ottenuti, focalizzati sulla valutazione degli effetti prodotti dai diversi livelli di severità di degrado termico sulle caratteristiche meccaniche dei campioni ottenuti con l'impiego del CDWA e del misto granulare (NAT), il primo stabilizzato per via alcalina, il secondo per l'aggiunta di cemento.

3.2.1 Effetto del degrado termico

A) Modulo resiliente

Per quanto concerne il modulo resiliente sono riportati i grafici per ogni tempo di stagionatura analizzato; all'interno di ogni grafico viene presentata la variazione della rigidità ad ogni livello di degrado termico, da 0 a 12 cicli di gelo/disgelo.

➤ Materiale da riciclo (CDWA)

In *Figura 61* viene rappresentato l'andamento del modulo resiliente per il materiale da rifiuto stagionato 7 giorni. Appare chiaro che, sottoponendo il campione a successivi livelli di degrado, la sua rigidità decade fortemente rispetto al provino non degradato. Si nota, infatti, un distacco netto tra la curva attinente a 0 cicli di gelo/disgelo e le altre relative alle diverse sequenze di degrado termico, con gap variabili da 290 MPa a 340 MPa tra la prima e l'ultima sequenza di carico. Quando il campione viene sottoposto a degrado di severità crescente, i dati di modulo resiliente osservati sono tutti prossimi tra loro e le curve risultano sovrapposte, come se questo parametro meccanico non dipendesse dalla severità del degrado termico ma solo dal fatto che esso sia presente. Questo andamento potrebbe essere legato alla situazione per cui, degradandosi, il provino da un lato continua a maturare, ma, dall'altro, l'ambiente non umido che si crea nella fase di gelo e successivo disgelo influenza la rigidità del materiale molto più di quanto si vedrà per la resistenza massima a compressione e a trazione. Ciò detto potrebbe indicare una maggiore sensibilità del modulo resiliente alle condizioni di stagionatura e alla temperatura a cui il provino si trova.

Diverso è l'andamento del modulo resiliente che si riscontra già dopo 28 giorni di maturazione. Dalla *Figura 62* è possibile notare come, nelle prime sequenze di carico, la rigidità è simile per tutti i campioni, mentre al crescere dello stato tensionale applicato, le curve si separano l'un l'altra. Ancora una volta i valori di modulo registrati per i campioni tal quali sono notevolmente più alti rispetto a quelli relativi ai provini degradati, anche se in questo caso le curve attinenti i diversi livelli di degrado non sono sovrapposte. Si osserva che aumentando il tempo di stagionatura, da 7 a 28 giorni, la rigidità del materiale da rifiuto è meno sensibile alle condizioni di maturazione, ma viene influenzato maggiormente dalla severità del degrado a cui è sottoposto il provino. Infatti, si ottengono dati di modulo sempre più bassi al crescere dei cicli di gelo/disgelo a cui il materiale è soggetto, con gap crescenti da 210 MPa (tra 0 e 4 cicli di gelo/disgelo) a 280 MPa (tra 0 e 12 cicli di gelo/disgelo) relativamente all'ultima sequenza di carico. Le variazioni registrate a 28 giorni sono più basse rispetto a quelle viste a

7 giorni, sintomo del fatto che al materiale viene dato più tempo per sviluppare le sue proprietà meccaniche e, quindi, recuperare parzialmente la caduta di rigidità osservata tra il campione non degradato e quelli soggetti a degrado termico.

Dalla *Figura 63* si evince un andamento simile a quanto detto nel caso dei provini stagionati a 28 giorni solo nelle prime tre sequenze di carico, con variazioni di modulo, relativamente alla prima sequenza di carico, fino a 150 MPa tra il campione soggetto a 0 cicli di gelo/disgelo e quello più severamente degradato. Al crescere delle sequenze di carico si nota un'inversione dell'andamento del modulo resiliente tra il provino non degradato e quello sottoposto a 4 cicli di gelo/disgelo, mentre si mantiene forte il distacco con gli altri due livelli di degrado (8 e 12 cicli di gelo/disgelo). Valutando i dati osservati per la quindicesima sequenza di carico, si sottolinea una piccola differenza (di solo 175 MPa) tra le due curve più alte, e un elevato gap compreso tra 380 MPa e 425 MPa, tra la curva più alta (in verde) e le due più basse relative ai livelli di degrado più severi. Tale andamento potrebbe essere spiegato considerando che è presente un effetto contrastante tra stagionatura e degrado termico. Al crescere dei giorni di stagionatura, si sviluppano sempre più le caratteristiche meccaniche del materiale. Tale fenomeno, in questo caso, contribuisce favorevolmente solo nei cicli più bassi di gelo/disgelo, mentre al crescere della severità di degrado l'effetto della stagionatura è sempre meno efficace e si impone maggiormente quello indotto dal degrado termico, sottolineando in maggior misura la sensibilità del materiale da rifiuto ai cicli di gelo/disgelo.

Il contributo favorevole della stagionatura in opposizione al degrado termico sembra, invece, diventare nullo nel caso di campioni stagionati a 60 giorni. Come si evince dalla *Figura 64*, l'andamento del modulo resiliente è legato solo al livello di degrado raggiunto dal provino. Si registrano, infatti, i valori maggiori di rigidità per il campione non degradato e sempre più bassi per le altre tre curve relative ai cicli di gelo/disgelo via via più severi. Se alla prima sequenza di carico, il gap tra la curva relativa al campione non degradato e le altre attinenti ai provini degradati va da 52 MPa a 150 MPa, all'ultima sequenza di carico la differenza tra i moduli registrata è la più alta tra tutti i tempi di stagionatura indagati, arrivando fino a valori di 550 MPa tra il provino non degradato e quello soggetto a 12 cicli di gelo/disgelo. Quanto detto sottolinea la forte sensibilità dei CDWA al degrado termico a lungo termine.

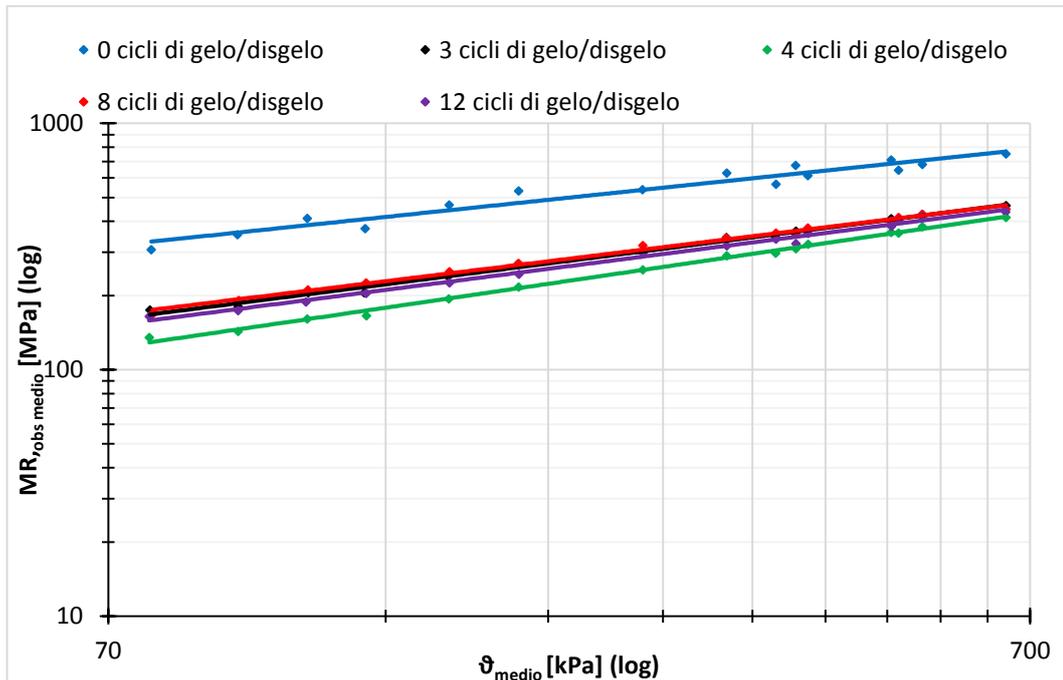


Figura 61: Modulo resiliente per CDWA stagionato 7 giorni.

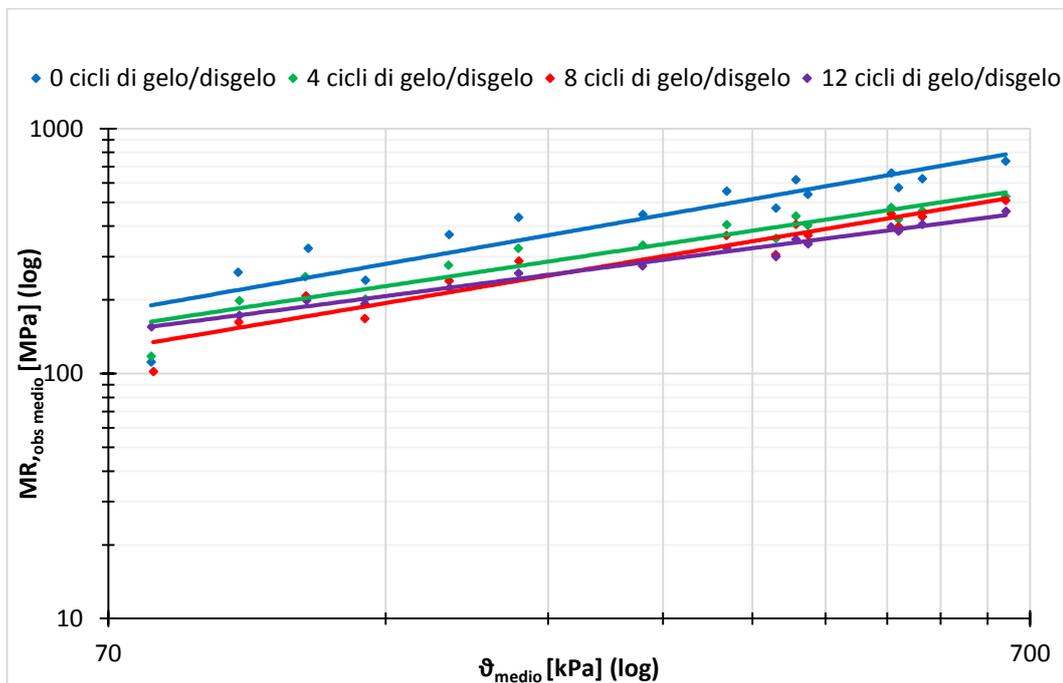


Figura 62: Modulo resiliente per CDWA stagionato 28 giorni.

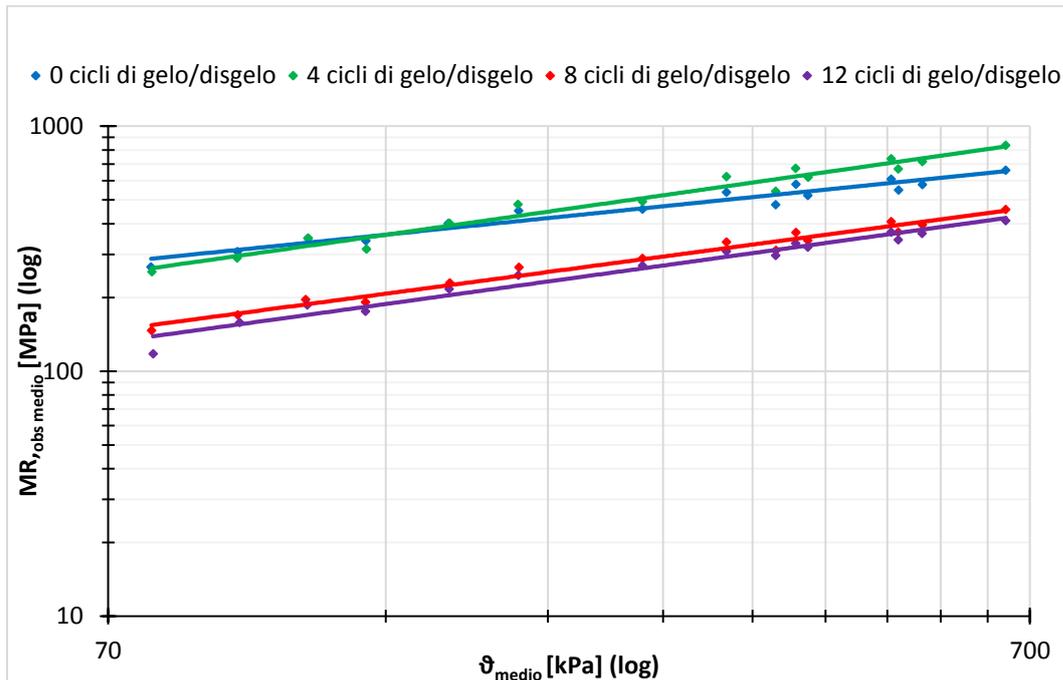


Figura 63: Modulo resiliente per CDWA stagionato 45 giorni.

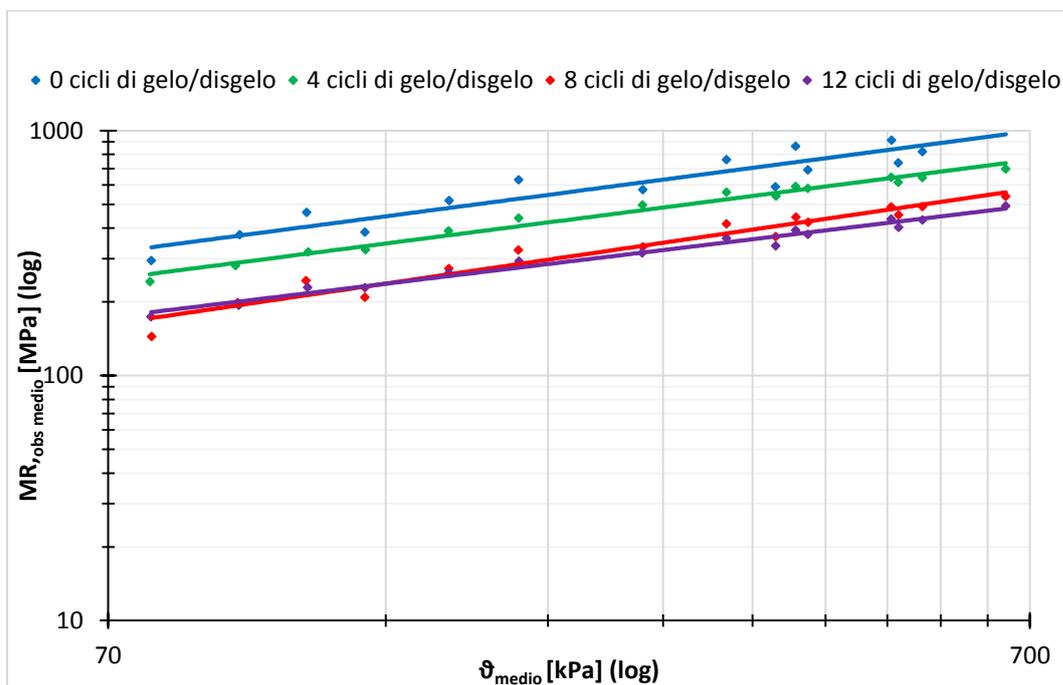


Figura 64: Modulo resiliente per CDWA stagionato a 60 giorni.

➤ Misto cementato (NAT)

Come si evince dalla *Figura 65*, i campioni di misto cementato stagionati a 7 giorni presentano un andamento di modulo resiliente influenzato maggiormente dal tempo di maturazione che dalla severità del degrado termico. A supporto di quanto detto, si sottolinea come i campioni soggetti al degrado più severo, 12 cicli di gelo/disgelo, mostrano valori di rigidità più elevata rispetto agli altri provini; ciò si può spiegare considerando che, come per i materiali da riciclo, anche per il misto cementato si esplica una maturazione “non convenzionale” durante le fasi di gelo e disgelo. Tale stagionatura “non convenzionale” permette al campione di continuare ad accrescere le sue resistenze, cosicché un provino soggetto a 12 cicli di gelo/disgelo abbia valori di modulo resiliente maggiori in ogni punto rispetto al campione non degradato.

L’andamento del modulo resiliente per i campioni a 28 giorni viene mostrato in *Figura 66*. Si osserva che, se nelle prime sequenze di carico i valori di modulo sono lievemente distanti l’un l’altro, con variazioni in numero, relative alla prima sequenza di carico, comprese tra 80 MPa e 170 MPa, spostandosi verso sequenze di carico più alte, le curve si avvicinano progressivamente l’un l’altra, sovrapponendosi. Raggiunti i 28 giorni di maturazione, l’effetto indotto dal degrado termico è meno influente sui campioni, in quanto il materiale stabilizzato a cemento ha avuto un tempo sufficiente per sviluppare appieno le sue caratteristiche meccaniche, diventando così meno sensibile al degrado termico.

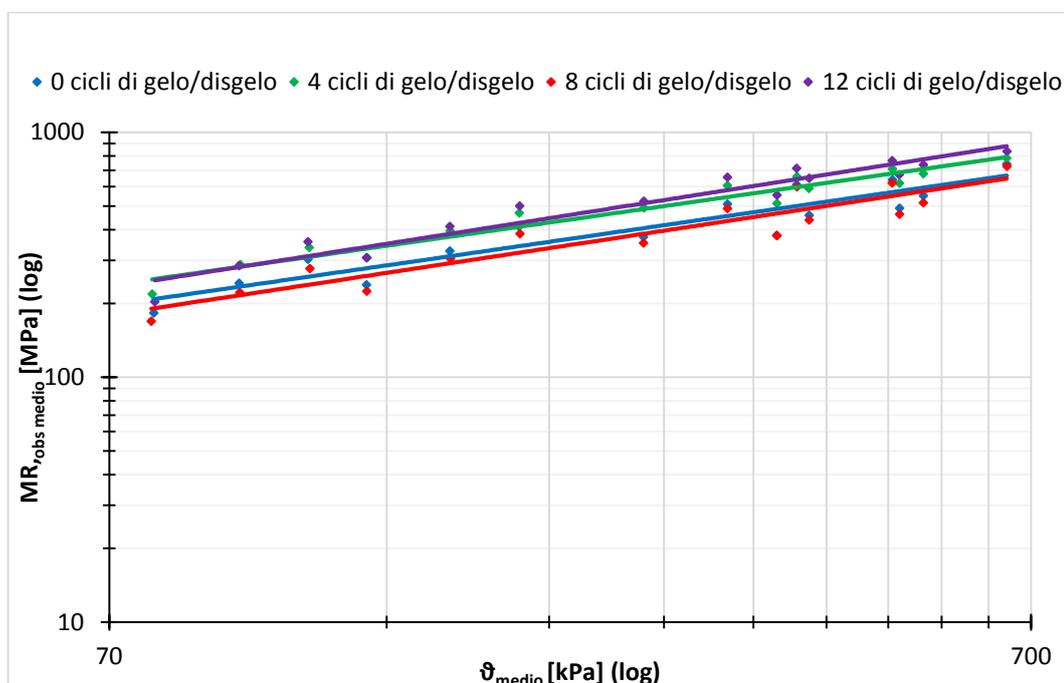


Figura 65: Modulo resiliente per NAT stagionato a 7 giorni.

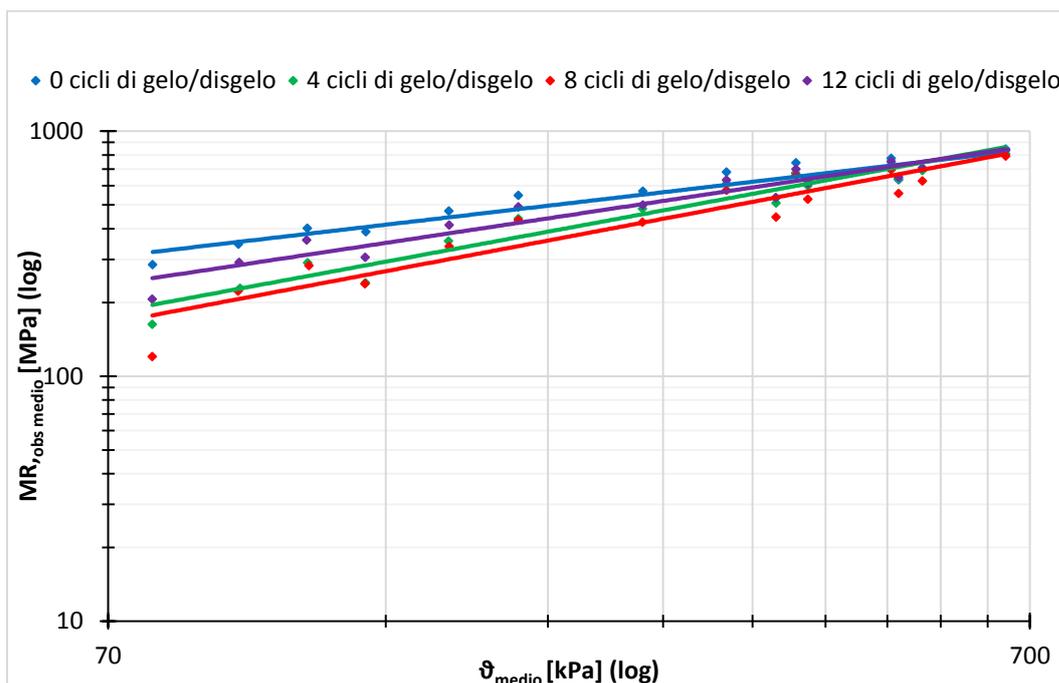


Figura 66: Modulo resiliente per NAT stagionato 28 giorni.

B) Compressione semplice non confinata

➤ Materiale da riciclo (CDWA)

Dalla *Figura 67* è possibile notare come, passando da 0 cicli di gelo/disgelo a 12 cicli di degrado, sia presente solo un lieve decadimento della resistenza massima a compressione, relativamente al breve e medio periodo (7 e 28 giorni). Infatti, si registra una variazione di circa il 29% per il breve termine e del 22% per i 28 giorni, tra il valore di resistenza a 0 cicli di gelo/disgelo e quello relativo al primo livello di degrado termico, ossia 4 cicli di gelo/disgelo. Tale variazione di resistenza massima a compressione non aumenta notevolmente passando dai 4 ai 12 cicli di degrado termico, ma solo di alcuni punti percentuali. Ciò è dovuto al fatto che il provino, seppur degradandosi, continua a maturare e tale stagionatura si oppone al degrado termico, permettendo di ridurre il gap di resistenza tra il campione non degradato e quello degradato con 12 cicli di gelo/disgelo. Per quanto riguarda i campioni stagionati più a lungo, ossia a 45 e 60 giorni, l'andamento delle resistenze segue un decadimento graduale. I gap di resistenza registrati tra 0 cicli e 12 cicli di degrado sono più elevati rispetto a quanto visto per i 7 e 28 giorni di maturazione, con valori percentuali di circa il 35% per i 45 giorni di stagionatura e il 41% per i 60 giorni.

Anche per l'energia di rottura, si registra un andamento che sembra confermare quanto detto in precedenza. Dalla *Figura 68*, infatti, si può notare come l'energia necessaria a portare a rottura il campione sia influenzata dagli effetti contrastanti di stagionatura e degrado termico. Si osserva, appunto, un abbassamento dell'energia di rottura seguito da un parziale recupero della stessa, legato al continuo maturare del campione seppur in un ambiente sfavorevole (non umido). Si sottolinea una caduta di tale parametro di circa il 40% tra 0 e i 12 cicli di gelo/disgelo, se il campione ha un ridotto periodo di stagionatura (solo 7 giorni), e una variazione del 5% circa, se al provino viene garantito un tempo maggiore (45 giorni) per sviluppare tutte le sue resistenze e quindi richiedere un quantitativo di energia più elevato per condurlo a rottura. Se, invece, si passa al periodo più lungo, ossia 60 giorni, l'effetto favorevole del tempo di stagionatura si riduce, mentre quello indotto dal degrado termico aumenta; si registra infatti una caduta percentuale del 30% passando da 0 a 12 cicli di gelo/disgelo.

In merito al modulo secante, è possibile notare dalla *Figura 69* che la rigidezza media dei campioni decresca con i successivi livelli di degrado termico, seppur in alcuni casi tale valore venga in parte recuperato. Se nel breve periodo (7 giorni) la variazione del modulo secante, tra un livello di degrado ed un altro, è minima, per tempi di stagionatura più alti, il livello di degrado influisce notevolmente sulla rigidezza raggiunta dal campione. In quest'ultimo caso, infatti si registrano cadute di rigidezza tra il campione non degradato e il massimo livello di degrado (12 cicli di gelo/disgelo) fino anche al 63% nel caso di provini stagionati 45 giorni.

Per quanto concerne il livello di degrado aggiunto per i soli campioni a 7 giorni, i risultati riportati in *Figura 70* dimostrano che l'assenza del tempo di stagionatura in ambiente umido induce degli esiti peggiori di quelli che si hanno con il livello di degrado più severo, ossia 12 cicli di gelo/disgelo. Quanto ottenuto sottolinea come l'azione attivante della soluzione alcalina sulle polveri reattive dei materiali da riciclo sia strettamente legata alle condizioni di umidità e, quindi, fortemente dipendente dalla temperatura.

Quanto detto per la resistenza massima a compressione vale anche per l'energia di rottura. Se la resistenza del campione è alta, ci si aspetta una maggiore energia richiesta per condurre a rottura il provino. Dato che l'assenza dell'ambiente umido, necessario alla stagionatura, induce delle forti cadute di resistenza, a queste corrisponderanno ridotte energie di rottura. Dalla *Figura 71*, appunto, si notano valori di energia a rottura prossimi a quelli registrati per il massimo livello di degrado termico (12 cicli di gelo/disgelo), in accordo con quanto detto prima.

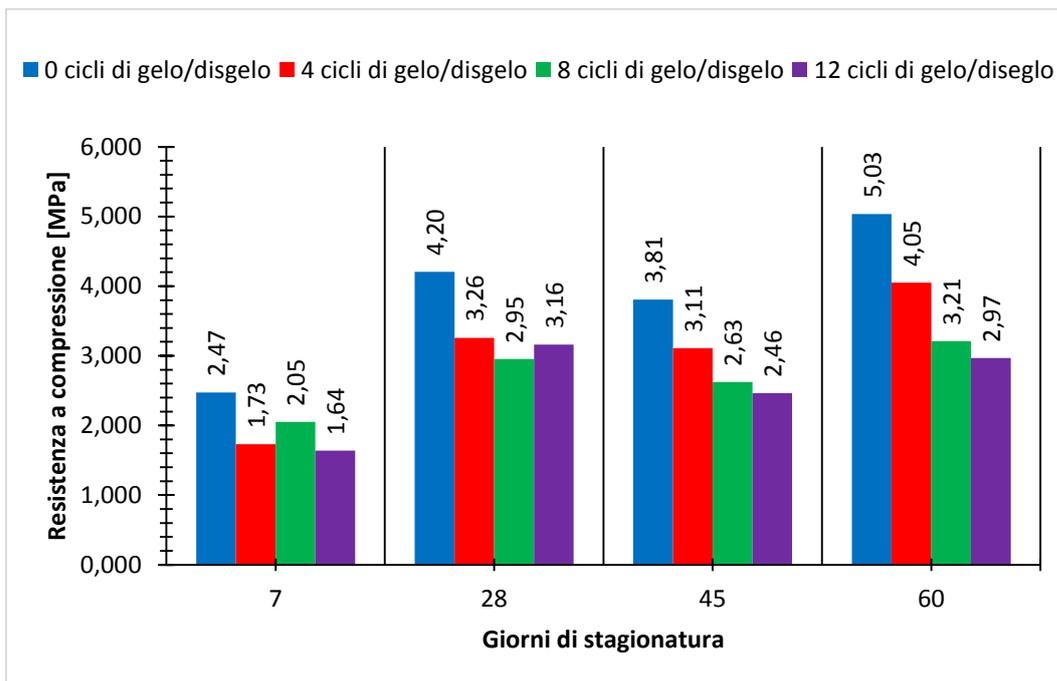


Figura 67: Valori medi di resistenza massima a compressione per il CDWA al variare dei livelli di degrado termico.

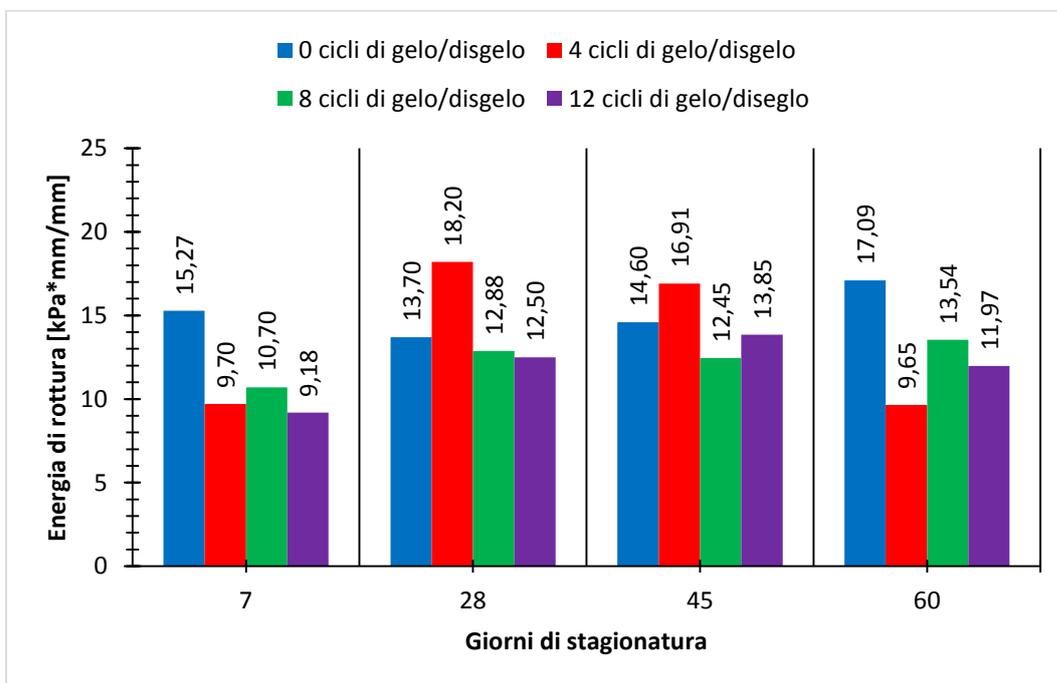


Figura 68: Valori medi di energia a rottura dei CDWA al variare dei livelli di degrado termico.

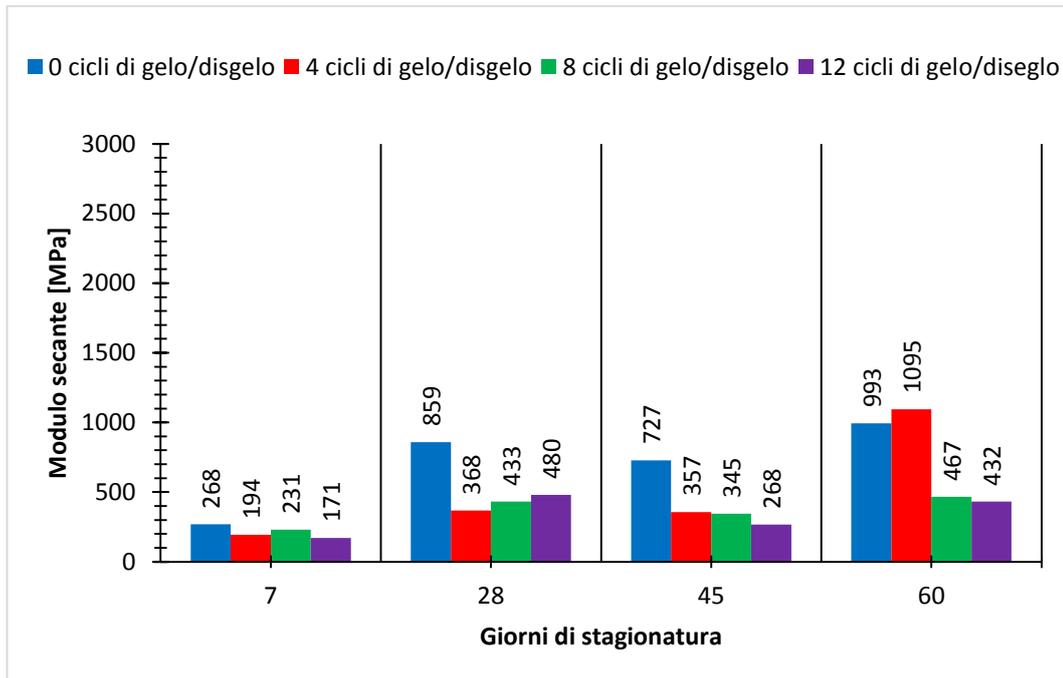


Figura 69: Valori medi di modulo secante dei CDWA al variare dei livelli di degrado termico.

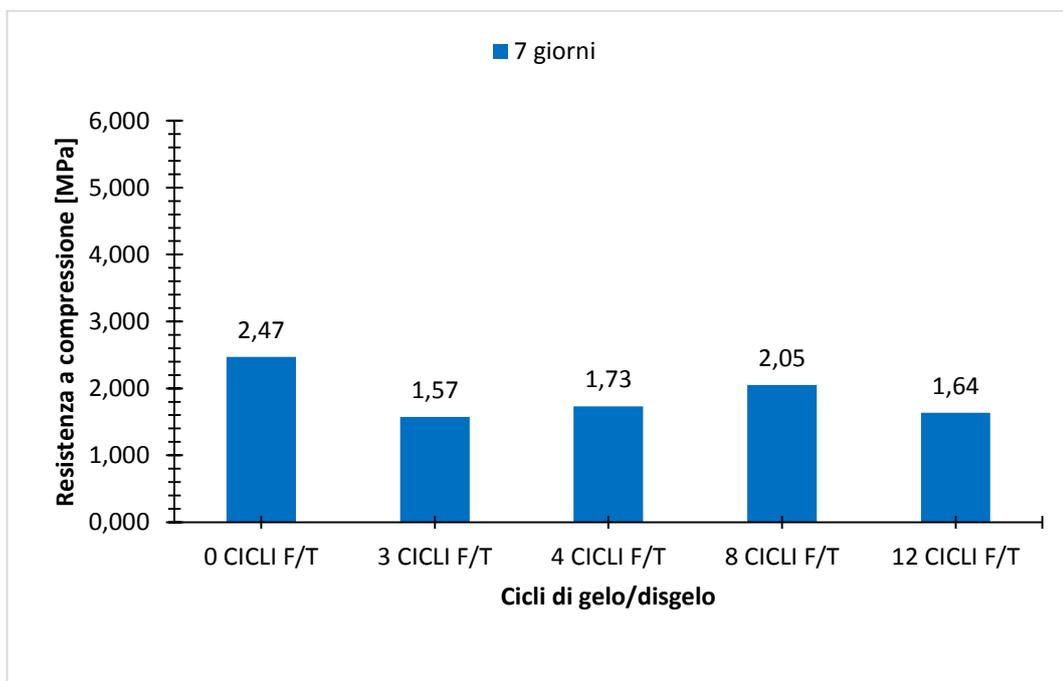


Figura 70: Valori medi di resistenza massima a compressione per il CDWA stagionato 7 giorni al variare dei livelli di degrado termico.

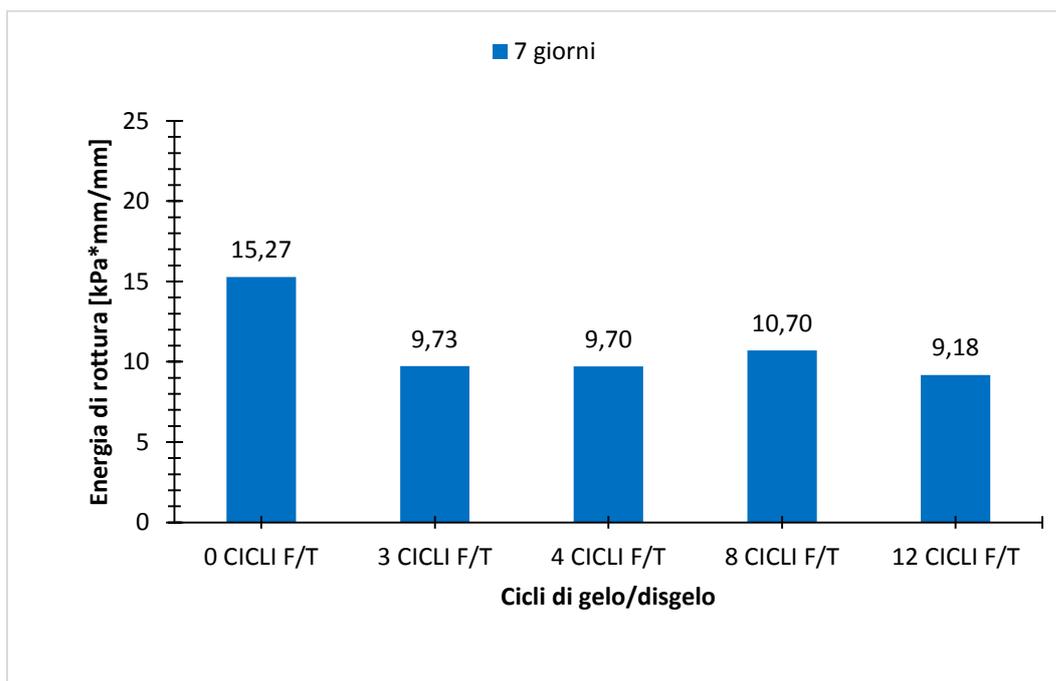


Figura 71: Valori medi di energia di rottura per il CDWA stagionato 7 giorni al variare dei livelli di degrado termico.

➤ Misto cementato (NAT)

Come detto per il modulo resiliente, anche per la resistenza a compressione, raggiunti i 28 giorni di stagionatura, si riscontra un assestamento dei valori, indipendentemente dal livello di degrado termico a cui si sottopone il provino. Come si evince dalla *Figura 72*, tutti i valori di resistenza a 28 giorni si attestano intorno ai 4 MPa. Ciò conferma il fatto che il misto cementato sia poco sensibile all'azione di degrado termico. Differente è invece l'andamento delle resistenze nel breve termine (7 giorni). Qui, infatti, si nota un andamento crescente da 0 a 12 cicli di degrado, sintomo del fatto che il materiale non ha avuto tempo sufficiente per sviluppare per intero le sue resistenze nei primi cicli di degrado. A conferma di ciò si registra un aumento delle resistenze fino a 3.59 MPa dopo 8 cicli di gelo/disgelo e un valore simile a 12 cicli di degrado termico, proprio perché il materiale seppur degradandosi continua a sviluppare le sue caratteristiche meccaniche. Si raggiungono, infatti, valori prossimi a quelli che si ottengono a 28 giorni e quindi il campione di aggregato naturale risulta sensibile al degrado termico solo nel breve termine e solo se lievemente degradato (0 o 4 cicli di gelo/disgelo); mentre nel lungo termine (28 giorni) l'effetto del degrado termico è pressoché nullo sui valori di resistenza.

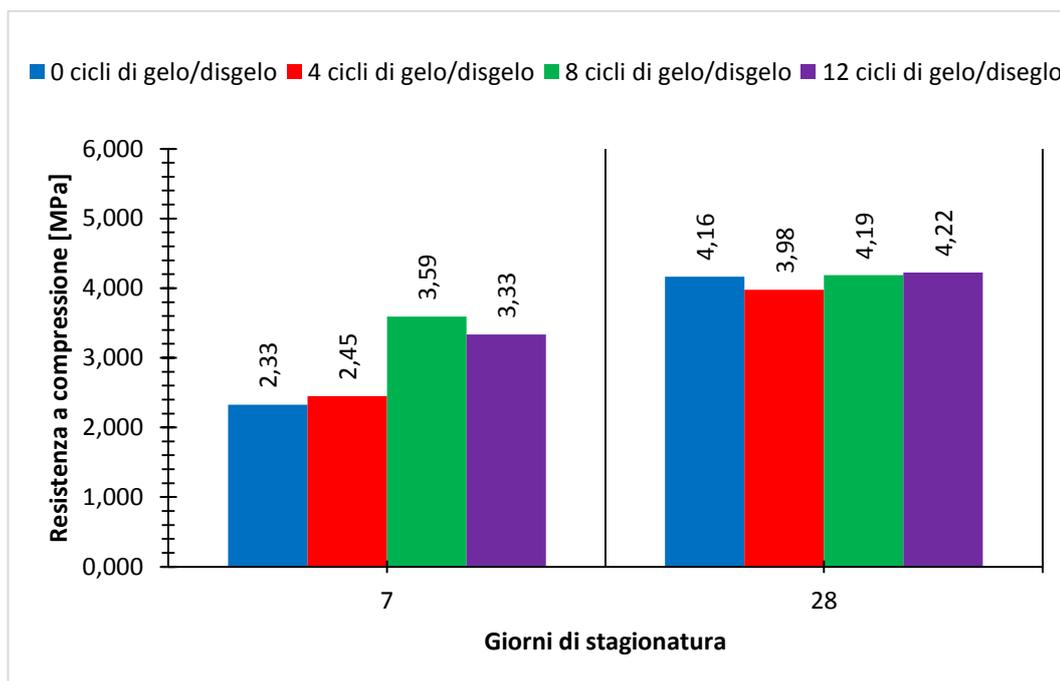


Figura 72: Valori medi di resistenza massima a compressione per il NAT al variare dei livelli di degrado termico.

Diversamente da quanto ci si aspetterebbe, i valori di energia richiesti per portare a rottura il provino sono decrescenti con il livello di degrado e non del tutto recuperati. Come si nota in *Figura 73*, si registra una forte caduta dell'energia di rottura tra il 45 e il 70% tra il campione non degradato e quello degradato con 8 cicli di gelo/disgelo e un successivo recupero di questa tra gli 8 e 12 cicli di degrado termico. Tale recupero consente di risanare in parte la perdita di energia registrata, ottenendo variazioni percentuali del 20% e 10% nel breve e nel lungo termine rispettivamente, valutate tra il campione non degradato e quello sottoposto a 12 cicli di gelo/disgelo.

In analogia a quanto detto per le resistenze, anche nel caso del modulo secante e, quindi, delle rigidità, si registra un trend crescente nei valori misurati. Dalla *Figura 74* è possibile notare come a resistenze massime più elevate corrispondano rigidità maggiori. Inoltre, se si esclude il dato relativo a 8 cicli di gelo/disgelo, si nota anche in questo caso, un andamento costante della rigidità nel lungo termine (28 giorni), con valori prossimi a 900 MPa. Mentre nel breve termine (7 giorni) si riscontra ancora un trend altalenante come nel caso delle rigidità con variazioni percentuali del 22% tra il provino non degradato e quello soggetto a 12 cicli di gelo/disgelo.

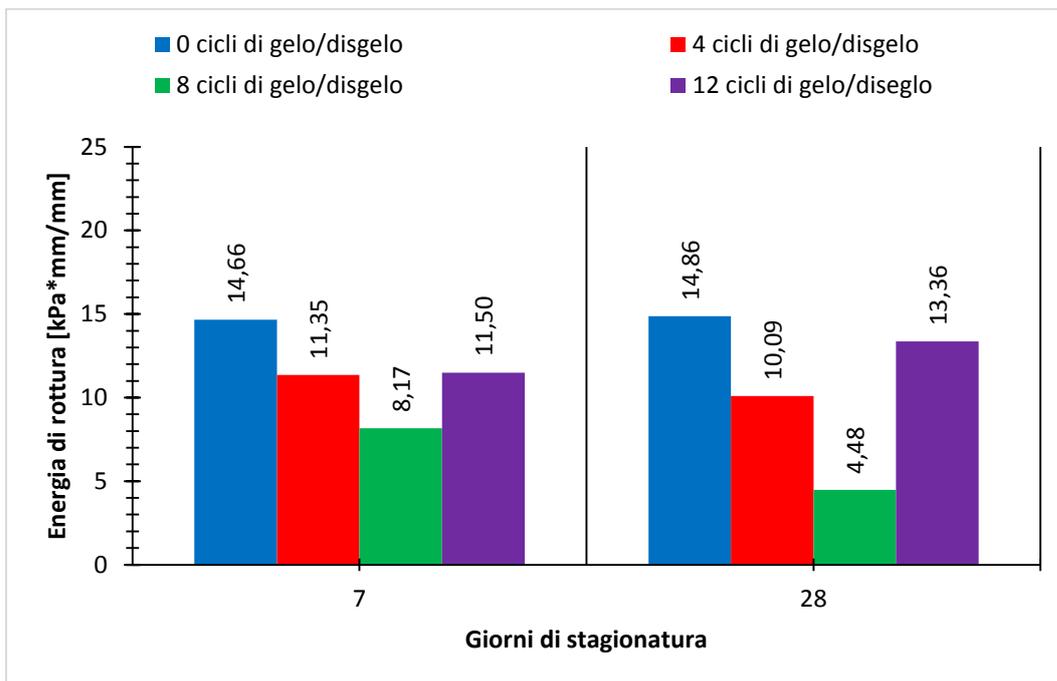


Figura 73: Valori medi di energia a rottura dei NAT al variare dei livelli di degrado termico.

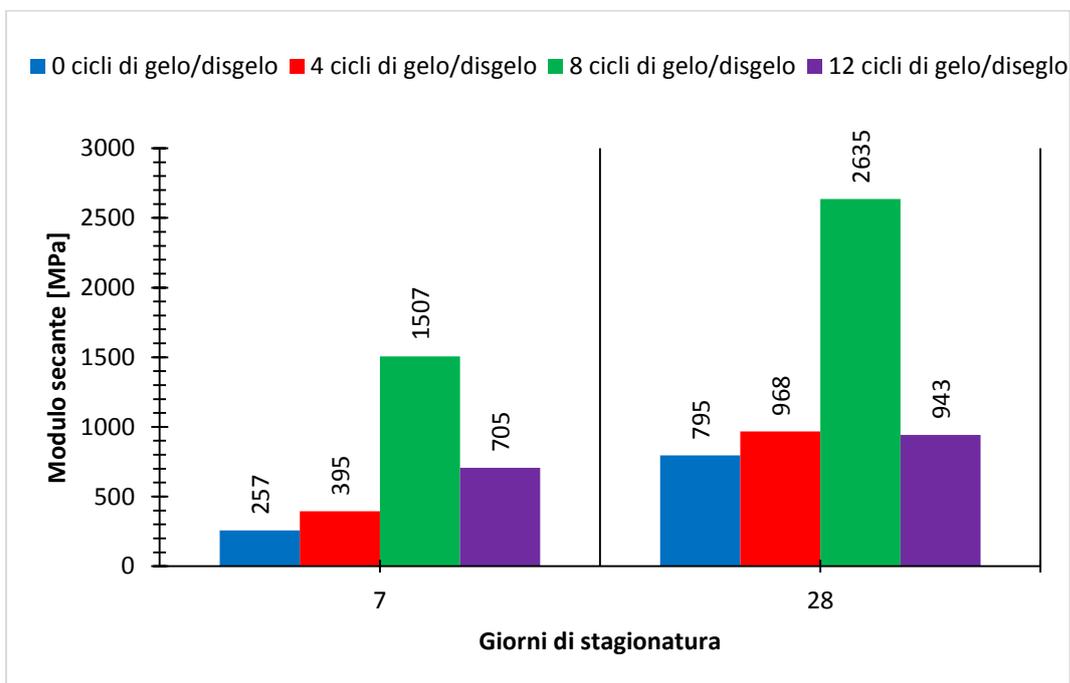


Figura 74: Valori medi di modulo secante dei NAT al variare dei livelli di degrado termico.

C) Resistenza a trazione indiretta

➤ Materiale da riciclo (CDWA)

Dalla *Figura 75* appare evidente come ci sia una caduta importante di resistenza (di circa il 50%) solo tra il materiale non degradato e quello soggetto ai cicli di gelo/disgelo. Tra un livello di degrado ed un altro, tale perdita di resistenza non risulta così elevata. Come si evince dai valori presenti nell'istogramma, se da un lato il materiale si degrada, dall'altro continua a maturare; infatti tra i 4 e gli 8 cicli di gelo/disgelo si denota un lieve incremento delle resistenze a compressione, legate appunto al fenomeno appena descritto, fino a raggiungere, a 12 cicli di degrado, gli stessi valori misurati a 4 cicli. Tale comportamento è evidente nel breve e medio termine (7 e 28 giorni), mentre l'effetto della stagionatura si fa meno importante spostandosi verso tempi di maturazione più lunghi (45 e 60 giorni). Infatti, a 45 giorni, il materiale subisce un continuo decremento delle resistenze, fino ad una perdita totale, tra il campione non degradato e quello soggetto a 12 cicli di degrado, di circa il 70%. Nel caso, invece, del massimo tempo di stagionatura indagato, ossia 60 giorni, si registra un lieve recupero delle resistenze tra i 4 e i 12 cicli di gelo/disgelo, sintomo del fatto che se il materiale continuasse la sua maturazione sarebbe in grado di "rigenerarsi" e continuare ad offrire un margine di resistenza. Si passa, infatti, da una perdita del 70% a 45 giorni ad una pari al 45% a 60 giorni.

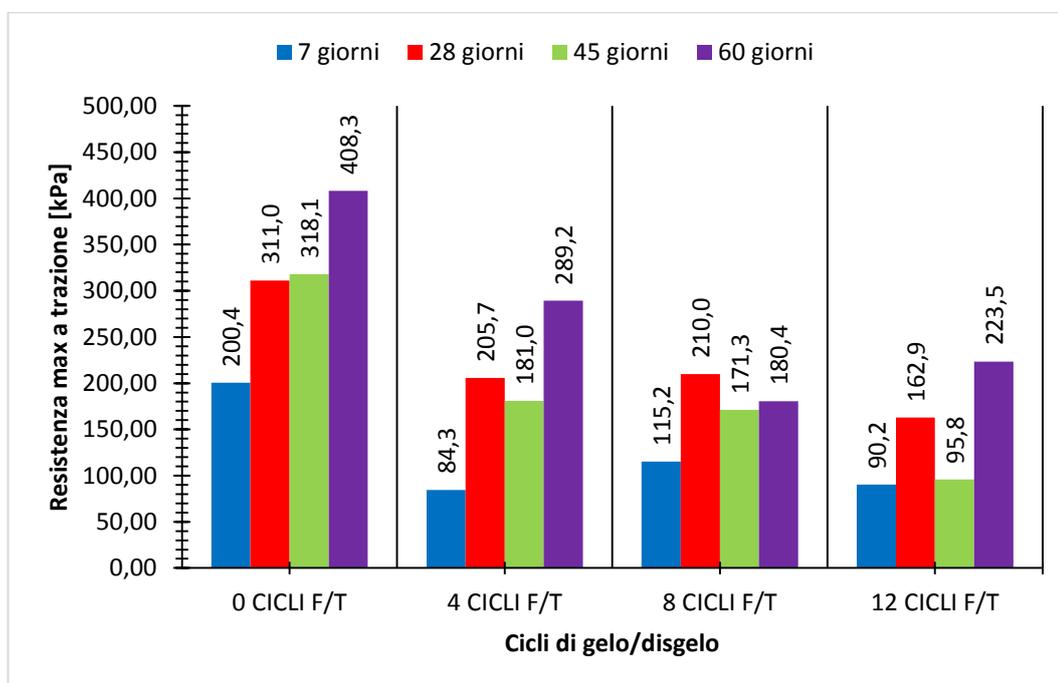


Figura 75: Valori di resistenza massima a trazione per il CDWA al variare dei livelli di degrado termico.

Per quanto concerne il livello di degrado aggiuntivo, valutato per i CDWA stagionati a 7 giorni, ossia 3 cicli di gelo/disgelo, i risultati sono riportati in *Figura 76*.

Appare evidente come l'assenza del periodo di maturazione in ambiente umido comporti un abbattimento della resistenza a trazione di circa il 62% rispetto al materiale stagionato non degradato. Il valore ottenuto è, inoltre, più basso anche della resistenza registrata al massimo livello di degrado, ossia 12 cicli, con una differenza di circa il 15%; ciò sottolinea come l'azione attivante della soluzione alcalina sia fortemente dipendente dalla temperatura, soprattutto negli istanti subito successivi al confezionamento del campione.

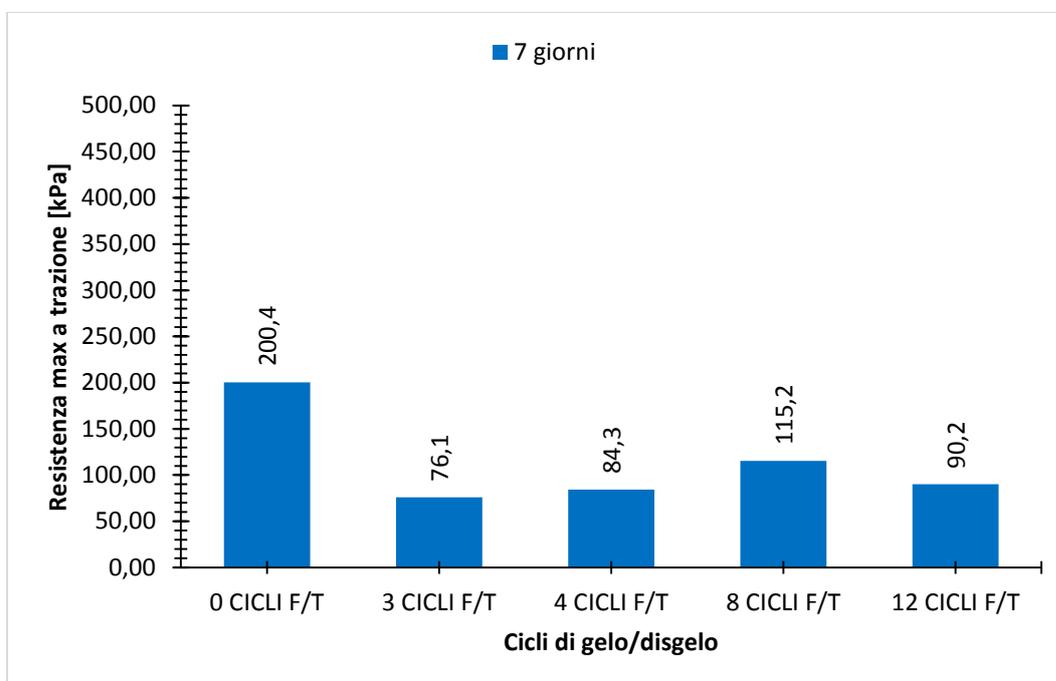


Figura 76: Valori di resistenza massima a trazione per il CDWA stagionato 7 giorni al variare dei livelli di degrado termico.

➤ Misto cementato (NAT)

Comportamento leggermente differente si registra invece nei misti cementati tradizionali. Dai valori presenti in *Figura 77* appare chiaro che le resistenze seguono un andamento pressoché costante quando il materiale ha avuto un tempo sufficiente per sviluppare appieno le sue proprietà meccaniche. Infatti, se a 7 giorni l'andamento di tali caratteristiche è oscillatorio, a 28 giorni i valori raggiunti sono tutti prossimi a 330kPa – 340 kPa e non risultano quindi influenzati dal livello di degrado a cui il campione viene sottoposto. Nel caso, invece, di breve termine (7 giorni), non si registra una caduta di resistenze come visto nel caso dei CDW tra il campione non degradato e quello sottoposto a diversi livelli di degrado. Quello che si nota, invece, è un andamento oscillante delle proprietà meccaniche, sintomo che, anche in questo caso, il misto cementato continua la sua stagionatura, la quale contribuisce favorevolmente allo sviluppo delle resistenze, nonostante il degrado termico. A conferma di quanto appena detto, si nota un lieve incremento delle caratteristiche meccaniche tra 0 e i 4 cicli di gelo/disgelo, un successivo decremento delle resistenze tra 4 e 8 cicli, che riporta il materiale agli stessi livelli di resistenza del caso non degradato, e un'ulteriore perdita di resistenza tra gli 8 e i 12 cicli di gelo/disgelo.

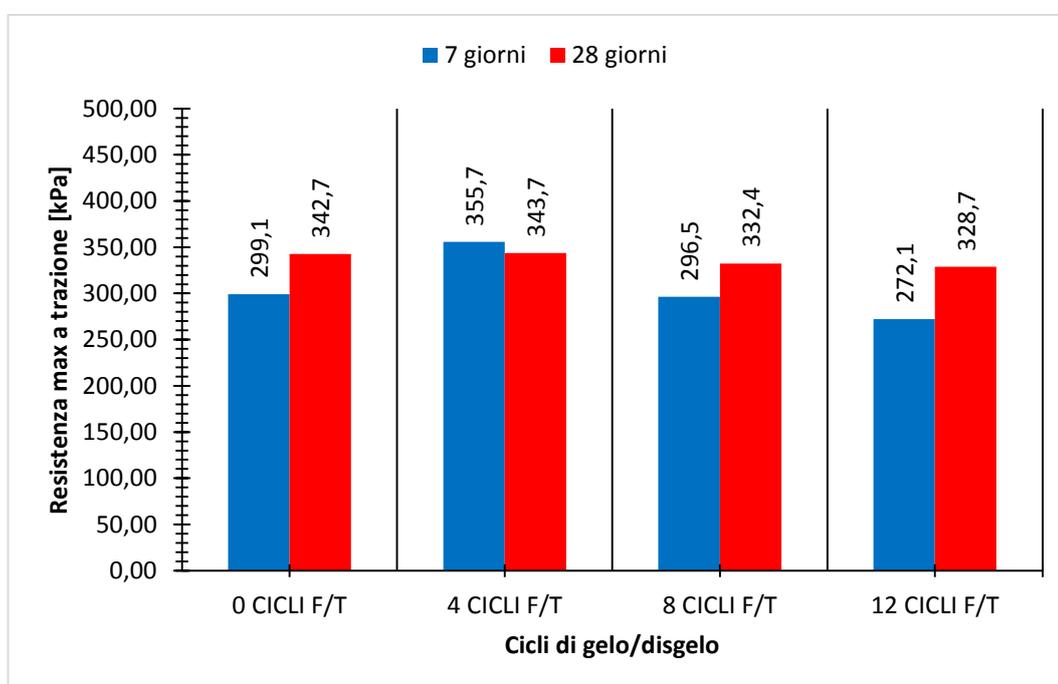


Figura 77: Valori di resistenza massima a trazione per il NAT al variare dei livelli di degrado termico.

3.2.2 Confronti tra materiale da riciclo e misto cementato

A) Modulo resiliente

Dalla *Figura 78* alla *Figura 81* è possibile notare come, nel breve termine, il misto cementato presenti valori più alti di modulo resiliente rispetto al materiale da rifiuto, per ogni livello di degrado termico tranne nel caso di campione non degradato. Ciò dimostra come il CDWA sia fortemente influenzato dalle condizioni termiche alle quali si trova ad operare se non sufficientemente stagionato, diversamente dall'aggregato naturale di primo impiego che risulta prestante anche in condizioni di degrado molto severo. Confrontando le curve relative ai due materiali non degradati (*Figura 78*), si osserva come, nel breve termine, il materiale da rifiuto abbia sviluppato una rigidità notevolmente più alta rispetto al misto cementato. Questo potrebbe essere spiegato dal fatto che le polveri di CDWA attivate alcalinamente, accelerino il processo di evoluzione delle caratteristiche meccaniche del materiale; mentre la stabilizzazione a cemento prevista per l'aggregato naturale di primo impiego richieda dei tempi più lunghi per raggiungere prestazioni apprezzabili. Il gap registrato tra le due curve, infatti, relativo alla prima e all'ultima sequenza di carico ricade all'interno di un intervallo compreso tra i 100 MPa e i 200 MPa.

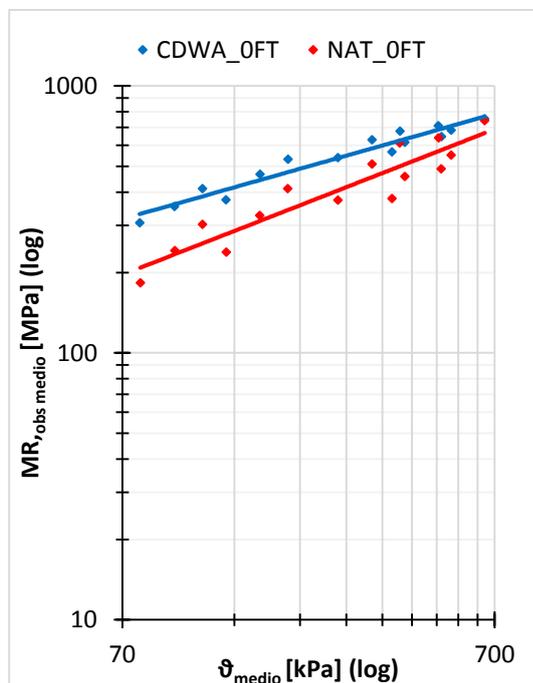


Figura 78: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 0 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

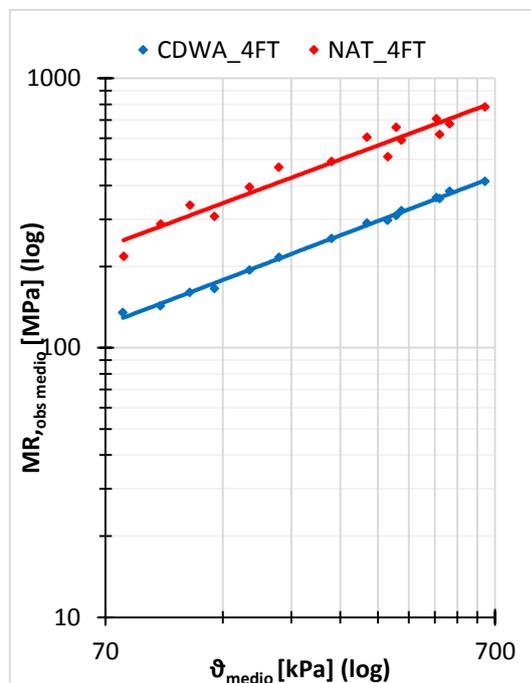


Figura 79: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 4 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

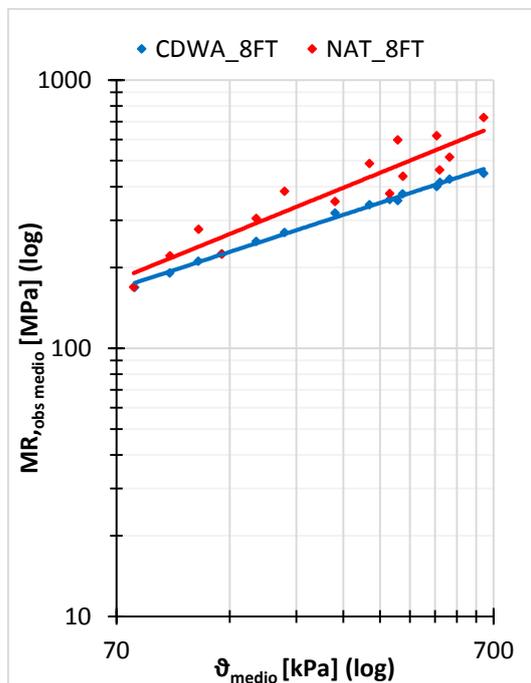


Figura 80: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 8 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

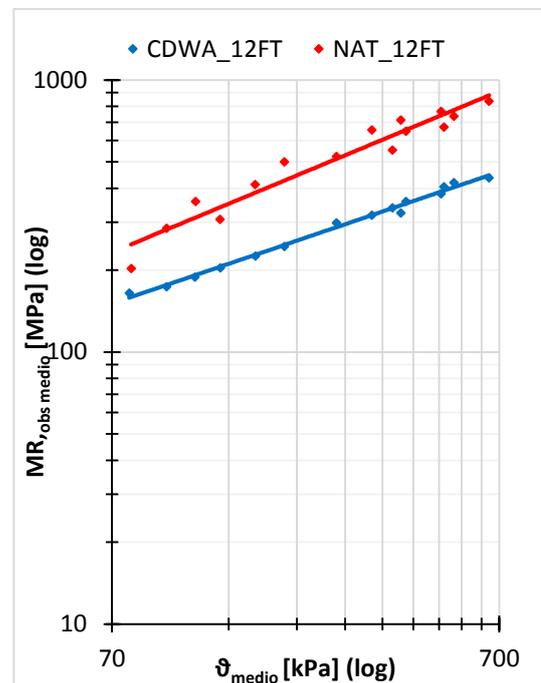


Figura 81: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 12 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).

Differente è l'andamento osservato per i due materiali stagionati 28 giorni. Dalla *Figura 82* alla *Figura 85* si nota, infatti, che il misto cementato ha sviluppato appieno le sue caratteristiche meccaniche, raggiungendo valori notevoli di modulo resiliente ad ogni sequenza di carico. Mentre i campioni di CDWA degradati presentano valori di rigidità ovunque inferiori rispetto all'aggregato di primo impiego, nel caso del provino di CDWA soggetto a 0 cicli di gelo/disgelo i valori di modulo raggiunti sono prossimi a tutte le curve attinenti l'aggregato di primo impiego, degradato e non. Tali valori, inoltre, sono elevati e competitivi rispetto al misto cementato, in quanto il gap tra i campioni a 0 cicli di gelo/disgelo dei due materiali non supera i 150 MPa alla prima sequenza di carico, e i dati di modulo osservati arrivano a valori prossimi ai 740 MPa, nelle ultime sequenze di carico.

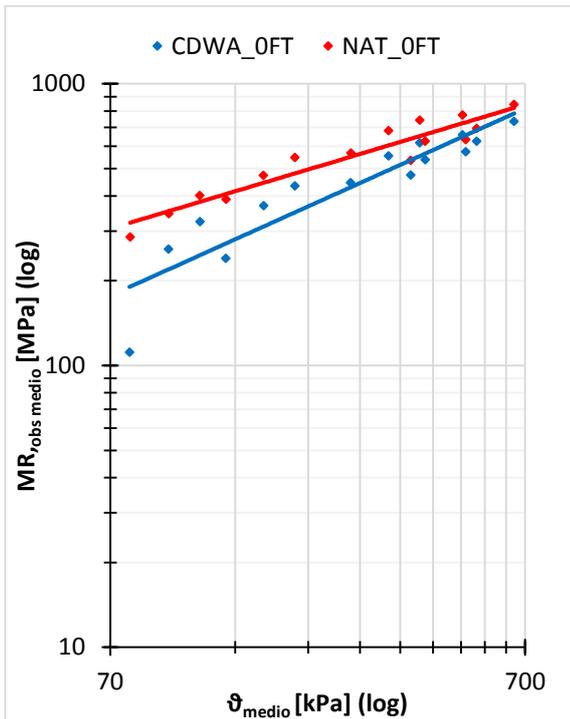


Figura 82: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 0 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

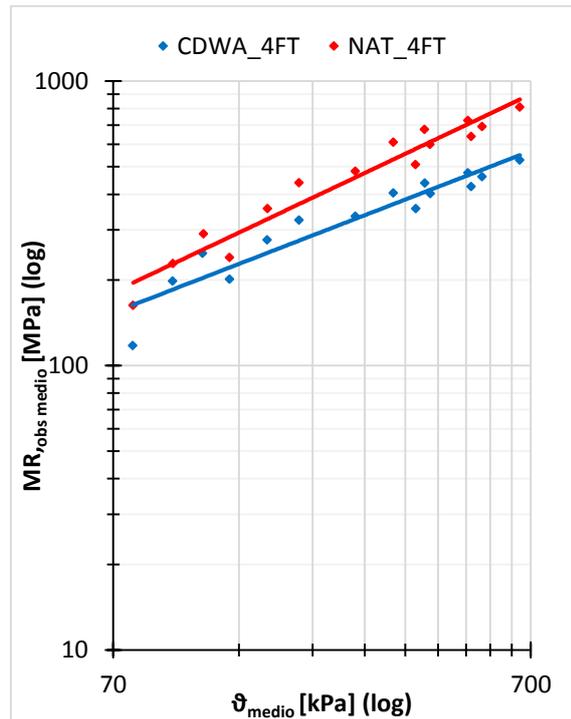


Figura 84: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 4 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

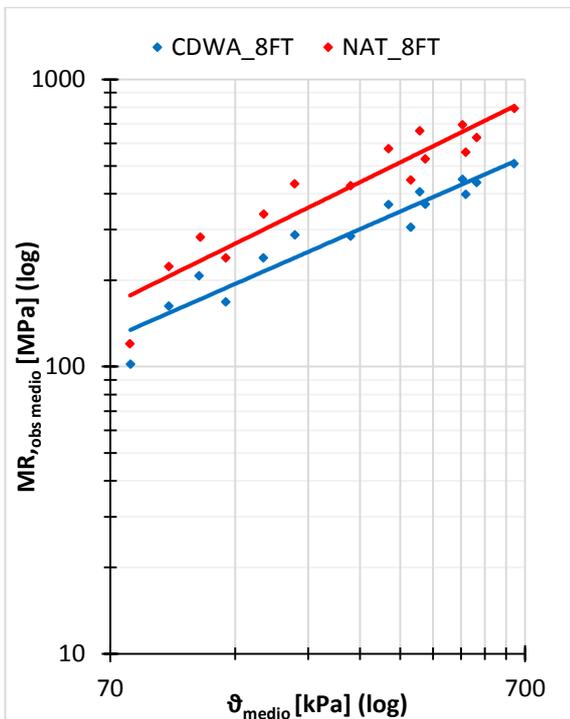


Figura 83: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 8 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

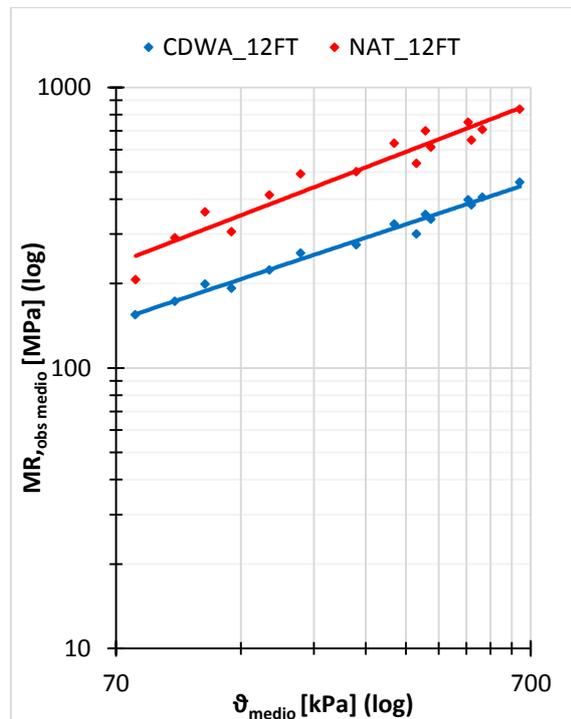


Figura 85: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 12 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).

Oltre i grafici sopra esposti, si riportano anche i parametri stimati tramite regressione lineare. Come citato nel paragrafo 2.7.1, i modelli scelti sono 3: Hicks-Monismith, M-EPDG e Itani. L'analisi dei dati verrà fatta considerando sia i singoli modelli che il solo valore di R^2_{adj} , in modo da spiegare adeguatamente qual è il peso di ciascun parametro presente nel modello e quali di questi consentono di avere valori modellati prossimi a quelli osservati. I risultati si riportano in *Tabella 9, Tabella 10, Tabella 11 e Tabella 12*.

Tabella 9: Parametri del modello Hicks-Monismith derivanti dalla procedura di regressione.

Mat.	Stagionatura	Degrado termico	Hicks-Monismith			
			k_1	k_2	S_e/S_y	R^2
CDWA	7 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	3703,01	0,3758	0,244	0,940
		3 cicli di gelo/disgelo	1880,15	0,4789	0,080	0,993
		4 cicli di gelo/disgelo	1471,19	0,5517	0,060	0,996
		8 cicli di gelo/disgelo	1973,43	0,4456	0,078	0,994
		12 cicli di gelo/disgelo	1776,96	0,4894	0,104	0,989
	28 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	2540,53	0,5613	0,316	0,899
		4 cicli di gelo/disgelo	2010,11	0,5081	0,272	0,920
		8 cicli di gelo/disgelo	1658,22	0,5857	0,256	0,932
		12 cicli di gelo/disgelo	1728,88	0,4981	0,173	0,956
	45 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	3194,63	0,3727	0,247	0,939
		4 cicli di gelo/disgelo	3036,02	0,5226	0,221	0,938
		8 cicli di gelo/disgelo	1760,19	0,4953	0,176	0,960
		12 cicli di gelo/disgelo	1625,95	0,4904	0,166	0,973
	60 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	3818,25	0,4913	0,370	0,862
		4 cicli di gelo/disgelo	3023,30	0,4572	0,147	0,978
		8 cicli di gelo/disgelo	2049,15	0,5172	0,199	0,959
12 cicli di gelo/disgelo		2032,75	0,4498	0,164	0,970	
NAT	7 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	2387,94	0,5450	0,409	0,833
		4 cicli di gelo/disgelo	2965,96	0,5056	0,255	0,933
		8 cicli di gelo/disgelo	2206,60	0,5711	0,407	0,831
		12 cicli di gelo/disgelo	3054,50	0,5418	0,250	0,937
	28 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	3658,16	0,4181	0,359	0,871
		4 cicli di gelo/disgelo	2532,82	0,6259	0,244	0,940
		8 cicli di gelo/disgelo	2341,93	0,6283	0,363	0,857
		12 cicli di gelo/disgelo	3021,67	0,5301	0,265	0,930

Tabella 10: Parametri del modello M-EPDG derivanti dalla procedura di regressione.

Mat.	Stagionatura	Degrado termico	M-EPDG				
			k_1	k_2	k_3	S_e/S_y	R^2
CDWA	7 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	3585,96	0,2970	0,2999	0,194	0,965
		3 cicli di gelo/disgelo	1870,64	0,4665	0,0467	0,076	0,995
		4 cicli di gelo/disgelo	1470,45	0,5499	0,0065	0,060	0,997
		8 cicli di gelo/disgelo	1997,67	0,4775	-0,1202	0,056	0,997
		12 cicli di gelo/disgelo	1808,65	0,5400	-0,1878	0,066	0,996
	28 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	2449,59	0,4289	0,4658	0,264	0,935
		4 cicli di gelo/disgelo	1945,71	0,4082	0,3620	0,227	0,951
		8 cicli di gelo/disgelo	1601,47	0,4563	0,4516	0,193	0,965
		12 cicli di gelo/disgelo	1687,38	0,4204	0,2827	0,102	0,989
	45 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	3070,23	0,2775	0,3642	0,161	0,976
		4 cicli di gelo/disgelo	2931,46	0,4131	0,3959	0,140	0,981
		8 cicli di gelo/disgelo	1715,41	0,4081	0,3139	0,107	0,989
		12 cicli di gelo/disgelo	1596,49	0,4389	0,1903	0,142	0,981
	60 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	3546,66	0,2675	0,8049	0,175	0,971
		4 cicli di gelo/disgelo	3001,50	0,4379	0,0722	0,148	0,980
		8 cicli di gelo/disgelo	2006,32	0,4483	0,2467	0,178	0,969
12 cicli di gelo/disgelo		1977,76	0,3775	0,2712	0,091	0,992	
NAT	7 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	2190,80	0,2603	1,0031	0,159	0,975
		4 cicli di gelo/disgelo	2851,27	0,3893	0,4235	0,176	0,971
		8 cicli di gelo/disgelo	2020,94	0,2687	1,0582	0,152	0,977
		12 cicli di gelo/disgelo	2962,62	0,4394	0,3642	0,212	0,957
	28 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	3430,56	0,2557	0,6097	0,226	0,951
		4 cicli di gelo/disgelo	2462,25	0,5156	0,3811	0,210	0,959
		8 cicli di gelo/disgelo	2223,84	0,3899	0,8124	0,219	0,955
		12 cicli di gelo/disgelo	2896,66	0,3979	0,4743	0,188	0,967

Tabella 11: Parametri del modello Itani derivanti dalla procedura di regressione.

Mat.	Stagionatura	Degrado termico	Itani					R ²
			k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	S _e /S _y	
CDWA	7 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	2368,43	0,6788	0,0115	-0,30	0,131	0,985
		3 cicli di gelo/disgelo	2103,34	0,3953	0,0431	0,04	0,071	0,996
		4 cicli di gelo/disgelo	2411,26	0,1987	0,1110	0,24	0,055	0,997
		8 cicli di gelo/disgelo	2129,34	0,3952	-0,0075	0,05	0,072	0,995
		12 cicli di gelo/disgelo	3157,03	0,0940	0,0693	0,32	0,061	0,997
	28 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	1071,30	1,1416	-0,0014	-0,56	0,199	0,965
		4 cicli di gelo/disgelo	1190,54	0,8599	0,0303	-0,37	0,168	0,976
		8 cicli di gelo/disgelo	1453,18	0,6505	0,1378	-0,19	0,134	0,984
		12 cicli di gelo/disgelo	3229,49	0,0367	0,2198	0,25	0,093	0,991
	45 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	3199,42	0,3579	0,1177	-0,09	0,103	0,991
		4 cicli di gelo/disgelo	3403,93	0,4190	0,1564	-0,04	0,093	0,993
		8 cicli di gelo/disgelo	2241,06	0,3030	0,1558	0,05	0,068	0,996
		12 cicli di gelo/disgelo	1320,24	0,6261	0,0321	-0,16	0,114	0,988
	60 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	5609,31	0,2414	0,3151	-0,04	0,068	0,996
		4 cicli di gelo/disgelo	2465,63	0,6144	-0,0066	-0,14	0,137	0,984
		8 cicli di gelo/disgelo	1509,83	0,7566	0,0259	-0,25	0,139	0,983
12 cicli di gelo/disgelo		3669,69	0,0214	0,2096	0,23	0,073	0,995	
NAT	7 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	3134,89	0,2983	0,3660	-0,08	0,073	0,995
		4 cicli di gelo/disgelo	3655,73	0,3767	0,1802	-0,04	0,115	0,987
		8 cicli di gelo/disgelo	2224,90	0,5233	0,3197	-0,23	0,057	0,997
		12 cicli di gelo/disgelo	2120,57	0,7837	0,0628	-0,29	0,163	0,977
	28 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	8309,91	-0,1561	0,3614	0,24	0,157	0,977
		4 cicli di gelo/disgelo	1506,92	1,0325	0,0197	-0,41	0,168	0,976
		8 cicli di gelo/disgelo	1911,98	0,8022	0,2094	-0,35	0,137	0,980
		12 cicli di gelo/disgelo	2274,26	0,7041	0,1063	-0,26	0,118	0,988

Per quanto concerne l'andamento del coefficiente k_1 , il quale è direttamente proporzionale alla rigidità del materiale, è possibile notare un trend del tutto simile a quanto visto nel dettaglio per il modulo resiliente comune a tutti i modelli considerati. Anche in questo caso, si riscontra un apporto contrastante offerto da un lato dal tempo di stagionatura (apporto positivo) e dall'altro quello dovuto al degrado termico (contributo negativo). A conferma di quanto detto si registra una piccola caduta del valore di k_1 passando dal campione non degradato a quello soggetto a 4 cicli di gelo/disgelo seguita da un parziale recupero di tale costante muovendosi verso livelli di degrado più severo. Ciò sottolinea, ancora una volta, che anche durante il degrado il materiale continua a sviluppare la sua rigidità, seppur con una velocità evolutiva ridotta. Relativamente, invece, al misto cementato si evince un andamento simile a quello relativo all'aggregato da CDW solo nel breve termine, sintomo del fatto che il materiale non ha ancora sviluppato appieno le sue resistenze. Se si confrontano i valori ottenuti per i CDWA e l'aggregato naturale, i primi sono maggiori dei secondi solo nel breve termine e solo nel caso di campione non degradato, mentre sono sempre inferiori a quelli relativi al NAT nel caso in cui il provino a 7 giorni venga degradato e per ogni livello di degrado nel caso in cui il campione stagioni 28 giorni.

In merito al parametro k_2 , questo rappresenta la dipendenza del modulo resiliente dal primo invariante; ciò implica che se tale parametro è positivo, il materiale è soggetto ad un comportamento di tipo "hardening", ossia il materiale si irrigidisce al crescere di \mathfrak{I} , se invece k_2 è negativo, il materiale avrà un comportamento di tipo "softening", ossia di infragilimento. Dato che nei tre modelli considerati tutti i valori stimati di k_2 sono positivi si deduce che, relativamente allo stato tensionale, sia i CDWA che i campioni di NAT si irrigidiscono al crescere dello stato tensionale.

Per quanto concerne il parametro k_3 , vale il medesimo discorso fatto per k_2 , cambia solo la variabile di dipendenza; in questo caso, infatti, non si parlerà di primo invariante ma di sforzo di taglio ottaedrico. Ciò implica che se tale parametro è positivo, il materiale si irrigidisce al crescere dello sforzo di taglio, se invece è negativo si infragilisce. In generale, esclusi alcuni campioni, nei due modelli in cui k_3 è presente, M-EPDG ed Itani, il materiale tende ad avere un comportamento di "hardening" anche nel caso di τ_{oct} .

Tabella 12: Valori di R^2_{adj} per i tre modelli per ogni tempo di stagionatura e ogni livello di degrado termico

		Hicks-Monismith	M-EPDG	Itani		
	Stagionatura	Degrado termico	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	
	CDWA	7 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	0.94	0.96	0.98
3 cicli di gelo/disgelo			0.99	0.99	0.99	
4 cicli di gelo/disgelo			1.00	1.00	1.00	
8 cicli di gelo/disgelo			0.99	1.00	0.99	
12 cicli di gelo/disgelo			0.99	1.00	1.00	
28 giorni		0 cicli di gelo/disgelo	0.90	0.93	0.96	
		4 cicli di gelo/disgelo	0.92	0.95	0.97	
		8 cicli di gelo/disgelo	0.93	0.96	0.98	
		12 cicli di gelo/disgelo	0.96	0.99	0.99	
45 giorni		0 cicli di gelo/disgelo	0.94	0.97	0.99	
		4 cicli di gelo/disgelo	0.94	0.98	0.99	
		8 cicli di gelo/disgelo	0.96	0.99	1.00	
		12 cicli di gelo/disgelo	0.97	0.98	0.99	
60 giorni		0 cicli di gelo/disgelo	0.86	0.97	1.00	
		4 cicli di gelo/disgelo	0.98	0.98	0.98	
		8 cicli di gelo/disgelo	0.96	0.97	0.98	
		12 cicli di gelo/disgelo	0.97	0.99	0.99	
NAT		7 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	0.83	0.97	0.99
			4 cicli di gelo/disgelo	0.93	0.97	0.98
			8 cicli di gelo/disgelo	0.83	0.98	1.00
	12 cicli di gelo/disgelo		0.94	0.95	0.97	
	28 giorni	0 cicli di gelo/disgelo	0.87	0.95	0.97	
		4 cicli di gelo/disgelo	0.94	0.96	0.97	
		8 cicli di gelo/disgelo	0.86	0.95	0.98	
		12 cicli di gelo/disgelo	0.93	0.96	0.99	

Come si evince dalla *Tabella 12*, i valori di affidabilità del modello di Hicks-Monismith, $k-\vartheta$, sono i più bassi, arrivando in alcuni casi anche al di sotto dell'85%. Pur essendo il più utilizzato per la sua semplicità, tale modello risulta senza dubbio insufficiente nel valutare adeguatamente l'andamento del modulo resiliente al variare dello stato tensionale. Tale modello, infatti, considera gli effetti delle tensioni attraverso un unico parametro, ϑ , lasciando quindi alle due costanti k_1 e k_2 tutte le variabili che influenzano l'andamento della rigidezza del materiale, come la dipendenza dalla tensione deviatorica σ_d , presente sia nel modello a 4 parametri di Itani che, in forma tridimensionale come sforzo ottaedrico τ_{oct} , nel modello a 3 parametri M-EPDG. Questi ultimi due modelli tensionali presentano valori di affidabilità prossimi tra loro e notevolmente più alti rispetto al primo citato; questo induce a considerarli entrambi nella valutazione dell'andamento del modulo resiliente dei due materiali. Ciò è legato al fatto che, non solo sono presenti più parametri di regressione lineare, ma si sottolinea anche la dipendenza della rigidezza da diversi stati tensionali. Nei due modelli, infatti, il modulo resiliente è direttamente proporzionale non solo al primo invariante, ϑ , ma anche alle tensioni verticali e di confinamento, σ_1 e σ_3 rispettivamente.

B) Compressione semplice non confinata

Anche nel caso della compressione semplice non confinata, si osserva una forte sensibilità del materiale da costruzione e demolizione al degrado termico. Nella *Figura 86* si riportano i dati di resistenza massima registrati per i diversi campioni. Si nota come, sia nel breve che nel lungo periodo (7 e 28 giorni) i provini di CDWA e NAT tal quali presentino tra loro valori molto simili, conferma del fatto che, se non degradato, il materiale da rifiuto è competitivo rispetto al tradizionale misto cementato. Risente maggiormente dell'effetto indotto dai diversi cicli di gelo/disgelo in quanto, all'interno dei CDWA, è presente una percentuale maggiore d'acqua rispetto al misto di aggregato naturale, la quale congelando e sciogliendosi induce degli sforzi maggiori e più estesi all'interno del campione, deteriorandolo e riducendo le sue resistenze meccaniche.

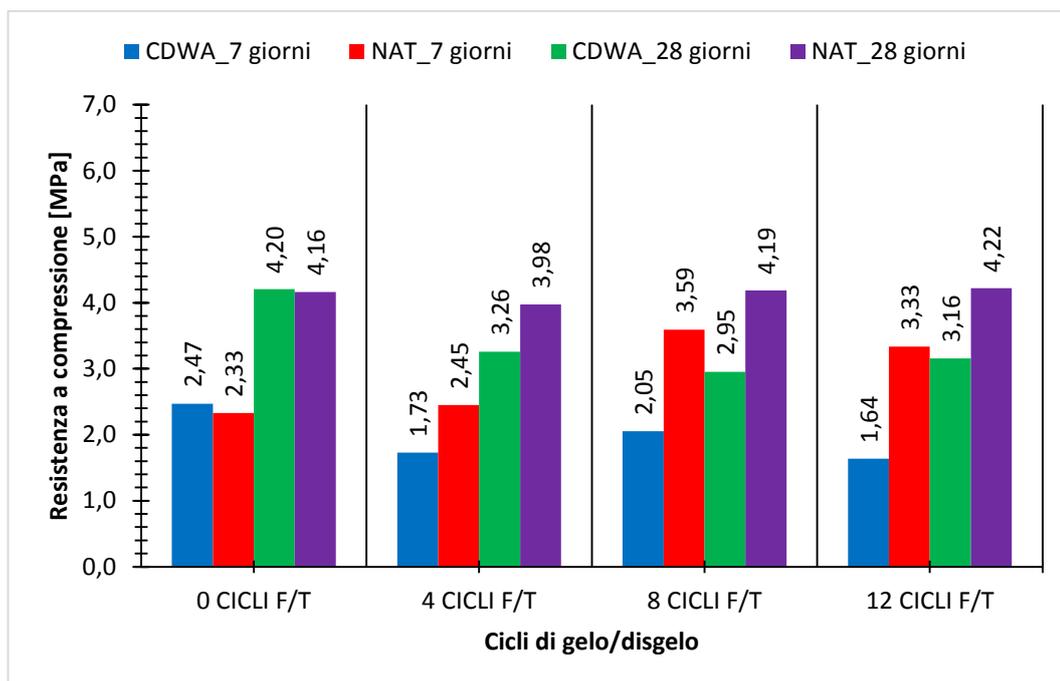


Figura 86: Valori medi di resistenza a compressione per CDWA e NAT.

Per quanto concerne l'energia di rottura, la *Figura 87* mostra i dati osservati per i due materiali. In generale, si registrano bassi valori di tale parametro per il misto cementato degradato rispetto al CDWA, mentre sono prossimi tra loro nel caso di provini tal quali. Quanto osservato potrebbe essere spiegato sulla base della definizione di "energia di rottura". Essendo questa l'area sottesa dalla curva sforzo-deformazione tra il punto d'origine e il punto relativo alla tensione massima, si potrebbe affermare che l'aggregato naturale di primo impiego raggiunga più velocemente la rottura rispetto al materiale da rifiuto, anche se con valori di tensione massima maggiori, nel caso in cui si trova sottoposto a degrado termico. Ciò detto non implica però una maggiore sensibilità ai cicli di gelo/disgelo e quindi non contraddice quanto detto in precedenza.

All'interno della *Figura 88* sono presentati i valori di modulo secante registrati. Dato che questo parametro dà una stima del valore medio di rigidità del materiale, si può dedurre che il misto cementato è più rigido rispetto al materiale da rifiuto, nel breve e nel lungo termine. Tale comportamento è più evidente nel caso in cui il campione di aggregato naturale di primo impiego viene sottoposto a livelli di degrado più severi, mentre risulta meno rigido nel caso di campioni tal quali.

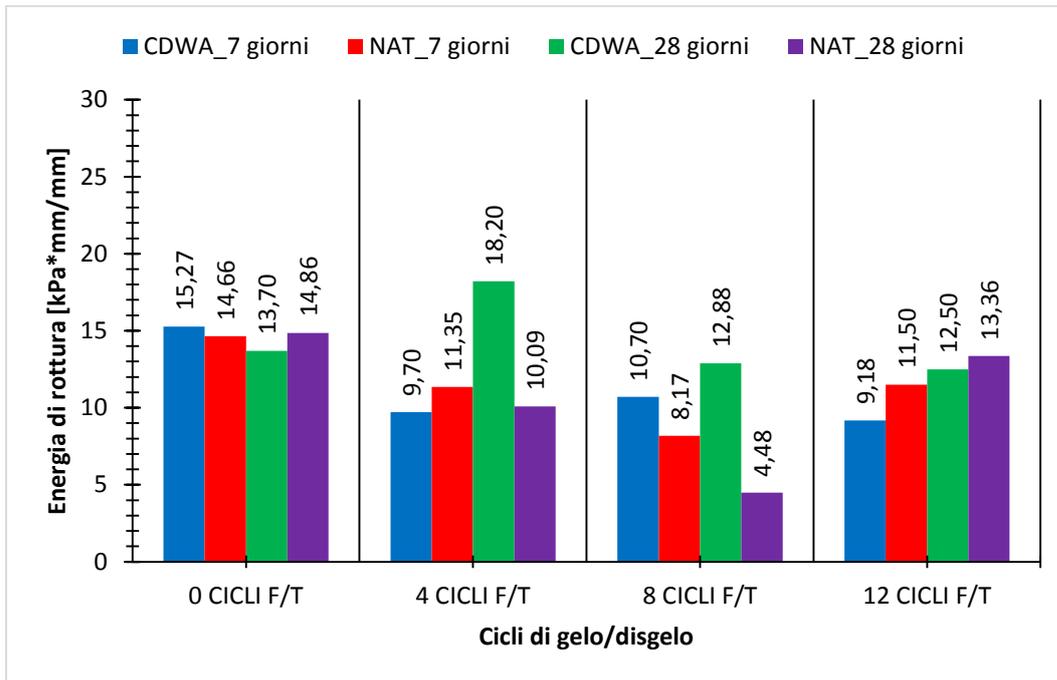


Figura 87: Valori medi di energia di rottura per CDWA e NAT.

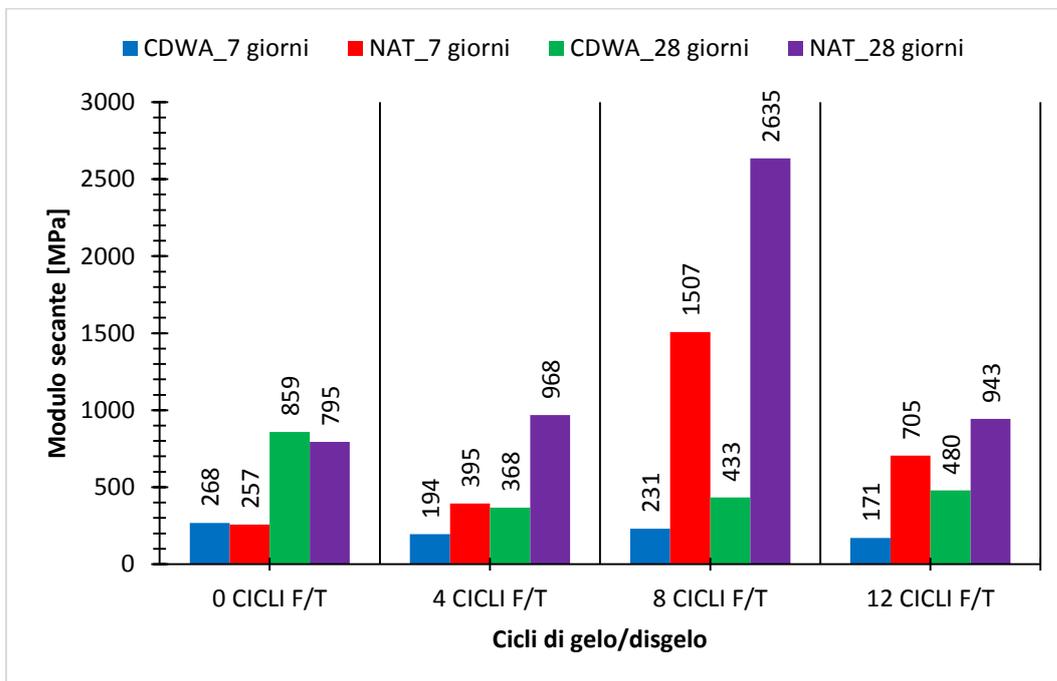


Figura 88: Valori medi di modulo secante per CDWA e NAT.

C) Trazione indiretta

Per la trazione indiretta, i valori di resistenza massima vengono presentati in *Figura 89*. Come già visto per il modulo resiliente dei campioni a 7 giorni, anche in questo caso il materiale da rifiuto è più prestante del misto cementato nel breve termine se non degradato. Nel lungo termine è competitivo solo nel caso di provini tal quali, mentre mostra ancora una volta una caduta delle resistenze se sottoposto a cicli di gelo/disgelo. Se da un lato il misto cementato a 28 giorni presenta valori prossimi tra loro, indipendentemente dalla severità del degrado termico, dall'altro il materiale da rifiuto presenta valori decrescenti di resistenza all'aumentare dei cicli di gelo/disgelo, fino a raggiungere valori che sono la metà di quelli registrati per il misto cementato dopo 12 cicli.

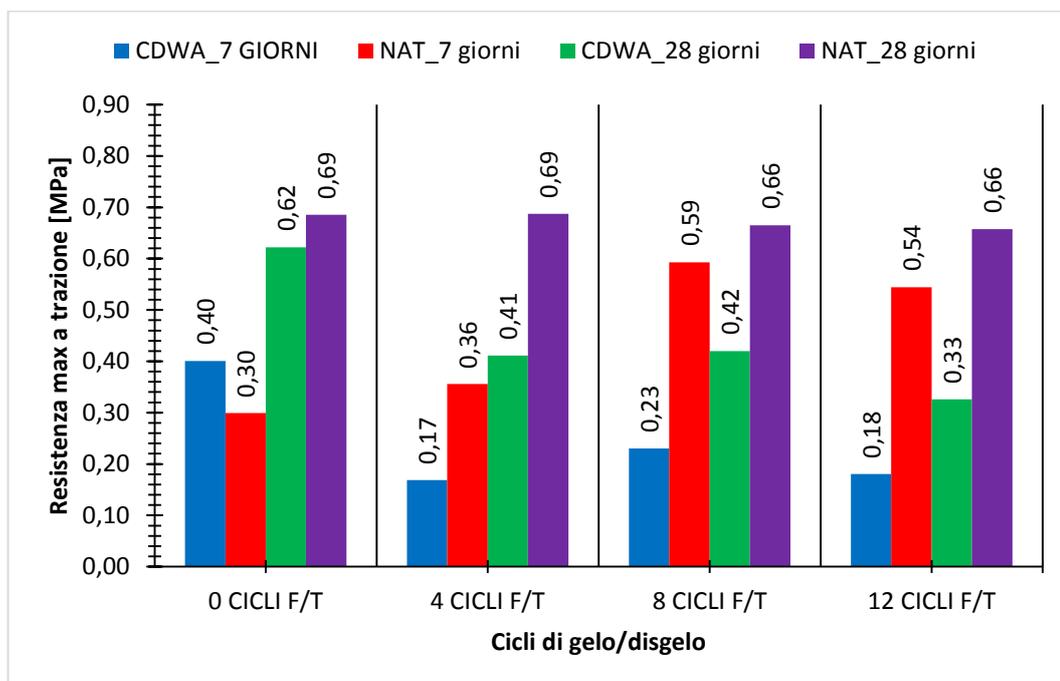


Figura 89: Resistenza massima a trazione per CDWA e NAT.

3.2.3 Test di cessione

Di seguito vengono riportati in maniera sintetica i risultati del test di cessione, presentando anche i limiti imposti da normativa. Come già detto nel paragrafo 2.8 sono stati preparati 3 campioni per il test: CDWA non stabilizzato (CDWA_NS), CDWA stabilizzato, stagionato 28 giorni e non degradato (CDWA_28_OFT) e un campione di misto cementato dopo 28 giorni di maturazione e non degradato (NAT_28_OFT) (Tabella 13).

Tabella 13: Valori ottenuti dal test di cessione, confrontati con i limiti imposti da normativa

Parametri analitici su eluati da test di cessione in acqua deionizzata	Limiti imposti dalla normativa DM 05/02/98 (compreso il DM 186 del 05/04/06) [58]	Limiti imposti dalla normativa europea 2003/33/EC [59]	Campione		
			CDWA_NS	CDWA_28_OFT	NAT_28_OFT
pH	5,5-12,0	-	10.9	11.4	12
Conducibilità mS/m a 25°C	-	-	62.5	250	175
Richiesta chimica di ossigeno (ST-COD) mg O ₂ /l	30	-	24	63*	19
Arsenico µg/l	50	500	1.6	76*	0.35
Bario mg/l	1	20	0.017	0.0046	0.02
Berillio µg/l	10	-	0	0.02	0
Cadmio µg/l	5	40	0.01	0.69	0.01
Cobalto µg/l	250	-	0.25	2.7	3.4
Cromo totale µg/l	50	500	25	13	40
Mercurio µg/l	1	10	0.07	0.08	0.09
Nichel µg/l	10	400	2	17*	5.8
Piombo µg/l	50	500	0.25	130*	0.47
Rame mg/l	0.05	2	0.012	0.046	0.0074
Selenio µg/l	10	100	0.71	2	0
Vanadio µg/l	250	-	22	310*	2.4
Zinco mg/l	3	4	0.026	0.036	0.0034
Cianuri (CN) µg/l	50	-	0	0	0
Cloruri mg/l	100	800	6	5.4	1.3
Fluoruri mg/l	1.5	10	0.3	0.26	0.13
Nitrati mg/l	50	-	7.3	3.4	0
Solfati mg/l	250	1000	180	110	18
Amianto mg/l	30	-	0	0	0

(*) il valore eccede il limite imposto dalla normativa italiana DM 05/02/98 [58].

Come si evince dalla *Tabella 13*, la stabilizzazione mediante attivazione alcalina ha degli effetti positivi e negativi, in termini di rilascio di componenti in atmosfera. Si osserva un forte aumento del rilascio di arsenico, nichel, piombo e vanadio e una crescita nella richiesta chimica di ossigeno, i quali superano i limiti imposti dalla normativa italiana D.M. 05/02/98 [58]. Quanto si evince potrebbe essere spiegato supponendo che il processo di attivazione alcalina produce degli incrementi nella reattività di alcuni elementi che tendono ad essere rilasciati più facilmente a contatto con gli agenti liscivianti. Inoltre, si registra un decremento del rilascio di cloruri, fluoruri, nitrati e solfati nel campione stabilizzato CDWA_28_OFT rispetto a quello non trattato. Ciò potrebbe essere legato alla reazione che interessa l'idrossido di sodio NaOH, la quale dà vita a composti come il cloruro di sodio, il fluoruro di sodio, il nitrato di sodio e il solfato di sodio.

Per quanto concerne il confronto tra il materiale da rifiuto e l'aggregato di primo impiego, si considera da un lato il campione di CDWA stabilizzato e dall'altro quello di misto cementato. Nel primo si osserva un minor contenuto di bario, cobalto, cromo e mercurio rispetto al secondo e maggiori valori di arsenico, berillio, cadmio, nichel, piombo, rame, selenio, vanadio, zinco, cloruri, fluoruri, nitrati e solfati.

Di maggior interesse riguardo alla compatibilità ambientale è il contenuto di tre elementi: arsenico, metalli pesanti (nichel e piombo) e sali solubili. Il primo e i secondi sono notevolmente più alti del misto cementato ed eccedono i limiti imposti dalla normativa italiana vigente; il terzo, rappresentato dai cloruri, fluoruri, nitrati e solfati, pur essendo di molto maggiore rispetto all'aggregato naturale di primo impiego, rientra comunque nelle imposizioni di legge.

Confrontando i risultati ottenuti con i limiti imposti dalla normativa europea 2003/33/EC [59], tutti i valori di rilascio dei diversi elementi ricadono all'interno dei limiti imposti. Ciò permette di affermare che gli aggregati da CDW stabilizzati mediante attivazione alcalina sono inerti, rendendo così tale tecnica di stabilizzazione "environmental friendly".

Conclusioni

Il presente lavoro di Tesi ha avuto l'obiettivo di indagare la durabilità di aggregati riciclati da rifiuti di costruzione e demolizione (*Construction and Demolition Waste Aggregates*, CDWA) stabilizzati mediante soluzione alcalina che attiva gli alumino-silicati contenuti nella frazione fine. La durabilità è stata valutata in termini di variazione di resistenza e rigidità in seguito al degrado prodotto dalle variazioni di temperatura da -20°C a $+20^{\circ}\text{C}$.

Non v'è dubbio che il congelamento dell'acqua presente nel materiale, con la conseguente espansione, è responsabile dei possibili fenomeni di degrado che in questa sperimentazione sono stati osservati come variazione tra prima e dopo il trattamento termico sia delle resistenze a compressione e a trazione, sia del modulo resiliente. Nel corso della sperimentazione i campioni di CDWA stabilizzati sono stati sottoposti a quattro diversi livelli di azione termica, di severità crescente, considerando il livello "non degradato" come riferimento. La fase di degrado termico è stata successiva a quella di stagionatura per tutti i provini, tranne che per i campioni stagionati 7 giorni e sottoposti a 3 cicli di gelo/disgelo, subito dopo il confezionamento.

La variazione delle prestazioni dei CDWA stabilizzati è stata confrontata con quella di un materiale di riferimento, nella fattispecie un misto granulare stabilizzato con cemento Portland.

Sono stati scelti quattro diversi tempi di stagionatura per l'aggregato da CDW (7, 28, 45 e 60 giorni) e due per il misto cementato (7 e 28 giorni). Dopo la fase di stagionatura e di degrado termico, tutti i provini sono stati sottoposti alle prove statiche e dinamiche. Tali test meccanici

sono stati effettuati sul campione integro, miscelato con opportuni leganti e compattato tramite pressa a taglio giratoria, per simulare meglio le operazioni di messa in opera del materiale.

I dati raccolti nel corso della sperimentazione hanno rivelato che i materiali da riciclo presentano una spiccata sensibilità al degrado termico. L'effetto sfavorevole indotto dai cicli di gelo e disgelo è in parte contrastato dal tempo di stagionatura che favorisce l'evoluzione del processo di stabilizzazione ed attivazione delle particelle più fini presenti nei CDWA, il quale induce un incremento delle caratteristiche meccaniche del materiale. Seppur condizionato dal degrado termico, il materiale da riciclo continua però la sua maturazione secondo un processo più lento nella fase in cui lo stesso degrado sta avendo luogo, in quanto posto a una temperatura niente affatto favorevole rispetto a quelle che favoriscono in modo spiccato l'attivazione alcalina (come indicato dalla letteratura scientifica si ottengono forti reazioni dei silico-alluminati a temperature maggiori dei 65°C).

I CDWA stabilizzati per via alcalina migliorano le loro proprietà con il tempo di stagionatura, poiché esso permette l'evolversi del processo di formazione dei legami nei fini del CDWA; ciò è evidenziato dall'incremento delle caratteristiche meccaniche del materiale. Il degrado termico comporta un decadimento della resistenza dei CDWA. L'acqua introdotta con la soluzione agisce disgregando i pori superficiali dei granuli, soprattutto quelli maggiormente idro-assorbenti (particelle di laterizi), e rigonfia i pori tra grano e grano, amplificando così le deformazioni conseguenti l'applicazione delle sollecitazioni nel corso delle prove. Dalla combinazione dei due effetti si deduce che il CDWA, seppur degradandosi, può continuare il processo di maturazione e di incremento della resistenza che deriva dalla stagionatura.

Differente è invece il comportamento del misto cementato. Raggiunti i 28 giorni di maturazione, le resistenze sono prossime tra un campione e l'altro, indipendentemente dai livelli degrado imposto. Ciò significa che l'aggregato naturale, stabilizzato a cemento, è meno sensibile al degrado termico rispetto al materiale da riciclo.

Confrontando le caratteristiche meccaniche dei campioni di CDWA stagionati 7 giorni con i valori minimi richiesti dal capitolato CIRS [51] (*Tabella 14*), si riscontrano buoni valori di resistenza a compressione e a trazione indiretta solo nel caso in cui il materiale non venga degradato, mentre ci si trova al di sotto dei limiti imposti da normativa se il campione viene sottoposto a cicli di gelo/disgelo. I dati riferiti ai materiali dopo gelo e disgelo, sebbene abbiano subito processi di degrado non previsti dalla norma tecnica considerata, possiedono caratteristiche non così lontane da quelle stabilite dalla stessa norma.

Tabella 14: Confronto con i limiti richiesti dal capitolato CIRS [51].

	Resistenza a compressione [MPa]	Resistenza a trazione indiretta [MPa]
Capitolato CIRS	2.5 ÷ 4.5	≥ 0.25
CDW + 11%SA - 0 cicli gelo/disgelo	2.47	0.40
CDWA + 11%SA - 4 cicli gelo/disgelo	1.73	0.17
CDWA + 11%SA – 8 cicli gelo/disgelo	2.05	0.23
CDWA + 11%SA – 12 cicli gelo/disgelo	1.64	0.18

Dalla sperimentazione condotta è possibile giungere alle seguenti considerazioni:

- i tempi di evoluzione delle proprietà meccaniche dei materiali da rifiuto, stabilizzati mediante la sola attivazione alcalina, sono notevolmente più lunghi rispetto a quelli riscontrati per il tradizionale misto cementato. Ciò si deve al fatto che la maturazione a 25°C non facilita l'attivazione dei silico-alluminati. Le prove statiche e dinamiche condotte nella sperimentazione forniscono valori di modulo resiliente, di resistenza massima a compressione e resistenza massima a trazione prossimi a quelli riscontrati a 28 giorni per i campioni di aggregato naturale, solo nel caso in cui i provini di CDWA stagionino 60 giorni;
- il materiale da riciclo è fortemente influenzato dalle condizioni ambientali; ripetuti cicli di gelo e disgelo condizionano le sue caratteristiche meccaniche;
- i campioni analizzati continuano a sviluppare resistenza nonostante il degrado termico; quanto più maturano tanto più queste prestazioni meccaniche crescono fino a riprendere in buona parte le prestazioni meccaniche iniziali;
- l'attivazione alcalina delle polveri di CDWA aumenta la quantità di elementi rilasciati nell'eluato quali arsenico, nichel, piombo e vanadio nonché una crescita nella richiesta chimica di ossigeno;
- parimenti, si nota una riduzione nelle quantità rilasciate di elementi quali cloruri, fluoruri, nitrati e solfati grazie alle reazioni che si innescano tra l'idrossido di sodio NaOH e i sali presenti, che legandosi non sono più in soluzione e non vengono rilasciati nell'eluato.

Future sperimentazioni si rendono necessarie per poter comprendere meglio il comportamento alle azioni ambientali. Oltre a una valutazione delle proprietà meccaniche dovute a una maggiore stagionatura precedente al degrado prodotto dall'azione di gelo e disgelo, la ricerca potrebbe estendersi anche agli effetti prodotti dall'aggressione chimica (es. sali antigelo) sulle medesime proprietà meccaniche. Il passaggio poi alla sperimentazione su

scala reale potrebbe permettere di verificare quale variazioni si possano attendere per effetto di fenomeni non riproducibili alla scala di laboratorio. Ulteriori indagini sarebbero necessarie per limitare il rilascio dei metalli pesanti su citati (es. attraverso l'introduzione di inibitori specifici), e per valutare la convenienza economica nel ricorso alla tecnica di stabilizzazione per attivazione alcalina considerando l'intero ciclo di vita utile del materiale.

Bibliografia

- [1] Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio. Indicazioni per l’operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del decreto ministeriale 8 maggio 2003, n. 203 (2005)
- [2] Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio. Norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo. (2003). Retrieved from <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2003/08/05/003G0228/sg>
- [3] Parlamento Europeo. (2008). Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive) – Environment – European Commission. Retrieved August 15, 2017, from <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework>
- [4] Russo, A., (2017). Indagine sperimentale sulla stabilizzazione di aggregati di riciclaggio da costruzione e demolizione mediante attivazione alcalina. *Politecnico di Torino*.
- [5] ISPRA, Rapporto Rifiuti Speciali, Istituto Superiore per la protezione e la ricerca ambientale, Roma, Italia, 2016.
- [6] ANPAR Piemonte. (2018). Gli aggregati riciclati nelle opere edili pubbliche e private: le opportunità ambientali ed economiche.
- [7] Jiménez, J. R., Ayuso, J., Galvín, A. P., López, M., & Agrela, F. (2012b). Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Construction and Building Materials*, 34, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.042>

- [8] Convegno regionale “gli aggregati riciclati nelle opere edili pubbliche e private: le opportunità ambientali ed economiche, Torino, 10 ottobre 2018
- [9] Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., & Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*, 25(2), 742-748.
- [10] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M. W., & Sivakugan, N. (2012). Geotechnical Characteristics of Recycled Crushed Brick Blends for Pavement Sub-Base Applications. *Canadian Geotechnical Journal*, 49, 796-811.
- [11] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali, M. M. Y., & Bo, M. W. (2015). Geotechnical Properties of Recycled Concrete Aggregate in Pavement Sub-Base Applications. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 35 No. 5.
- [12] Allahverdi, A., & Najafikani, E. (2009). Construction wastes as raw materials for geopolymers binders. *International Journal of Civil Engineering*, 7(3), 154–160.
- [13] Jha, V. K., & Tuladhar, A. (2011). An Attempt of Geopolymer Synthesis from Construction Waste, 28, 29–33.
- [14] Zaharaki, D., Galetakis, M., & Komnitsas, K. (2016). Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation. *Construction and Building Materials*, 121, 686–693.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.051>
- [15] Bassani, M., Riviera, P. P., & Tefa, L., (2017). Short-Term and Long-Term Effects of Cement Kiln Dust Stabilization of Construction and Demolition Waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 4016286.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001797](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001797)
- [16] Lancieri, F., Marradi, A., & Mannucci, S. (2006). C&D waste for road construction: long time performance of roads constructed using recycled aggregate for unbound pavement layers. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 92.
- [17] Soleimanbeigi, A., Shedivy, R. F., Tinjum, J. M., & Edil, T. B. (2015). Climatic effect on resilient modulus of recycled unbound aggregates. *Road Materials and Pavement Design*, 16(4), 836–853.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1060250>
- [18] Jiménez, J. R., Ayuso, J., Agrela, F., Lòpez, M., & Galvìn, A. P. (2012a). Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 88–97.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.012>
- [19] Del Rey, I., Ayuso, J., Galvìn, A. P., Jiménez, J., & Barbudo, A. (2016). Feasibility of using unbound mixed recycled aggregates from CDW over expansive clay subgrade in unpaved rural roads. *Materials*, 9, 931.

- [20] Herrador, R., Pérez, P., Garach, L., & Ordònez, J. (2012). Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road course surfacing. *Journal of Transportation Engineering*, 138 (2): 182-190.
- [21] Sangiorgi, C., Lantieri, C., & Dondi, G. (2015). Construction and demolition waste recycling: an application for road construction. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 16, No. 6., 530-537.
<http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2014.943134>
- [22] Park, T. (2003). Application of Construction and Building Debris as Base and Subbase Materials in Rigid Pavement. *Journal of Transportation Engineering*, 129(5), 558–563.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:5\(558\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:5(558))
- [23] Xuan, D.X., Houben, L. J. M., Molenaar, A. A. A., & Shui, Z. H., (2012). Mixture optimization of cement treated demolition waste with recycled masonry and concrete. *Materials and Structures*, 45, 143-51.
- [24] Dongxing, X., Houben, L., Molenaar, A., & Zhonghe, S. (2010). Cement Treated Recycled Demolition Waste as a Road Base Material.
<https://doi.org/10.1007/s11595-010-0073-4>
- [25] Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K., & Al-Zubeidi, M. (2002). Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14, 239–245.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:3\(239\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:3(239))
- [26] Puppala, A. J., Hoyos, L. R., & Potturi, A. K. (2011). Resilient Moduli Response of Moderately Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 990–998.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000268](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000268)
- [27] Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M. M., Bo, M. W., & Darmawan, S. (2014). Laboratory evaluation of the use of cement-treated construction and demolition waste in pavement base and subbase applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04014186: 1-12.
- [28] Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M. D., & Jiménez, J. R. (2012). Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 98-106.
- [29] Pérez, P., Agrela, F., Herrador, R., & Ordóñez, J. (2013). Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain. *Construction and Building Materials*, 44, 593-599.
- [30] Miller, A. G., & Zaman, M. M. (2000) Field and laboratory evaluation of cement kiln dust as a soil stabilizer. *Transportation Research Record*, 1714, 25-32.

- [31] Solanki, P., Zaman, M. M., & Dean, J. (2010). Resilient modulus of clay subgrades stabilized with lime, class C fly ash, and cement kiln dust for pavement design. *Transportation Research Record*, 2186, 101-110.
- [32] Ebrahimi, A., Edil, T. B., & Son, Y.-H. (2011). Effectiveness of cement kiln dust in stabilizing recycled base materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(8), 1059–1066.
- [33] Li, L., Benson, C. H., Edil, T. B., & Hatipoglu, B. (2008). Sustainable construction case history: fly ash stabilization of recycled asphalt pavement material. *Geotechnical Geological Engineering*, 26: 177-187.
- [34] Li, L., Edil, T. B., & Benson, C. H. (2009). Mechanical performance of pavement geomaterials stabilized with fly ash in field applications. *Coal Combustion and Gasification Products*, 1, 43-49.
- [35] Wen, H., Warner, J., Edil, T. B., & Wang, G. (2010). Laboratory comparison of crushed aggregate and recycled pavement material with and without high carbon fly ash. *Geotechnical Geological Engineering*, 28:405-411.
- [36] Davidovits, J. (1979). Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites. *SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers*, Brookfield Center; p. 151–154.
- [37] Pacheco-torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22, 1305-1314.
- [38] Glukhovskiy, V.D., Rostovskaja, G.S., & Rumyna, G.V. (1980). High strength slag alkaline cements. *Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement*, vol. 3, 164–168.
- [39] Davidovits, J. (1988). Geopolymer chemistry and properties. *Proceedings of 1988 geopolymere conference*, vol. 1, 25–48.
- [40] Jaarsveld, J.G.S., Deventer, J.S.J., & Lorenzen, L. (1998). Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerised fly ash. *Metal Mater TransB*, 29B, 283–291.
- [41] Palomo, A., Grutzeck, M.W., & Blanco, M.T. (1999) Alkali-activated fly ashes. A cement for the future. *Cement Concrete Res*, 29, 1323–1329.
- [42] Jaarsveld, J.G.S., Deventer, J.S.J., & Lukey, G.C. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymers. *ChemEng*, 89, 63–73.
- [43] Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J., Disfani, M. M., Win Bo, M., & Darmawan, S. (2016). Stabilization of Demolition Materials for Pavement Base/Subbase Applications Using Fly Ash and Slag Geopolymers: Laboratory Investigation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 4016033.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001526](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001526)

- [44] Arulrajah, A., Mohammadinia, A., Phummiphan, I., Horpibulsuk, S. & Samingthong, W. (2016). Stabilization of Recycled Demolition Aggregates by Geopolymers comprising Calcium Carbide Residue, Fly Ash and Slag precursors. *Construction and Building Materials*, 114, 864-873.
- [45] Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., & Galetakis, M. (2015). Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. *Advanced Powder Technology*, 26(2), 368–376.
<https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.11.012>
- [46] Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2015). Co-utilization of construction and demolition with industrial wastes for the production of geopolymers. In *Inter. Conference on Industrial Waste & Wastewater Treatment & Valorization, President Hotel, Athens* (pp. 21–23).
- [47] Bassani, M., & Tefa, L. (2018). Compaction and freeze-thaw degradation assessment of recycled aggregates from unseparated construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 160, 180-195.
- [48] Zaman, M. M., Zhu, J-H., & Laguros, J. G. (1999). Durability effects on resilient moduli of stabilized aggregate base. *Transportation Research Record*, 29-38.
- [49] Camargo, F. F., Edil, T. B., & Benson, C. H. (2013). Strength and stiffness of recycled materials stabilised with fly ash: a laboratory study. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 14, No. 3, 504-517.
<http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.779299>
- [50] Centro Interuniversitario Sperimentale di Ricerca Stradale (CIRS), Norme Tecniche Prestazionali per Capitolati Speciali d'Appalto, 2001.
- [51] Riviera, P. P., Bellopede, R., Marini, P., & Bassani, M. (2014). Performance-based re-use of tunnel muck as granular material for subgrade and sub-base formation in road construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 160–173.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.10.002>
- [52] Santagata, F. A. (2016). *Strade : teoria e tecnica delle costruzioni stradali*. Pearson.
- [53] AASHTO. Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials - T 307-99 (2007).
- [54] Coefficiente di determinazione.
https://it.wikipedia.org/wiki/Coefficiente_di_determinazione
- [55] Lekarp, F., Isacsson, U., & Dawson, A. (2000). State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1), 66–75.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66))
- [56] Normativa UNI EN 12457-2: Lisciviazione – prova di conformità per la lisciviazione di rifiuti granulari e di fanghi. Parte 2: prova a singolo stadio, con un rapporto liquido/solido di 10 l/kg, per materiali con particelle di dimensione minori di 4 mm (con o senza riduzione delle dimensioni), Ottobre 2004.

- [57] Decreto Ministeriale del 5 febbraio 1998. Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del D. Lgs 5 febbraio 1997, n.22.
- [58] Council of the European Union, & 2003/33/EC. (2003). Council Decision establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC. *Official Journal of the European Communities*, 27–49.

Indice delle figure

Figura 1: Tipi di polisialati [36].....	15
Figura 2: Analisi composizionale dei CDWA prelevati.....	23
Figura 3: Composizione della soluzione alcalina.....	24
Figura 4: Viscosimetro.....	25
Figura 5: Grafico sulla viscosità dei due campioni di soluzione alcalina.....	26
Figura 6: Stoccaggio in cumuli presso la Cavit S.p.A.....	27
Figura 7: Curva granulometrica di riferimento “centro fuso” CIRS.....	27
Figura 8: Colonna setacci montata sul setacciatore elettromagnetico.....	28
Figura 9: Procedura di setacciatura.....	28
Figura 10: Riduttore a scomparti con divisione a ½. Procedura di quartatura.....	28
Figura 11: Distribuzione granulometrica del passante a 63 micron.....	29
Figura 12: Procedura MMVT: de-areazione della miscela tramite aspirazione.....	30
Figura 13: Procedura MMVT: misurazione della massa M_2	30
Figura 14: Procedura MMVT per il filler.....	30
Figura 15: Pressa a taglio giratoria.....	33
Figura 16: Esempio curva di lavorabilità [51].....	35
Figura 17: Valori ottenuti di γ_d per le sei % di SA.....	38
Figura 18: Valori ottenuti di k per le sei % di SA.....	38
Figura 19: Valori ottenuti di C_1 per le sei % di SA.....	38
Figura 20: Valori ottenuti di C_{100} per le sei % di SA.....	38
Figura 21: Ciotole di preparazione del materiale.....	39

Figura 22: Fustella + Imbuto per l'inserimento del materiale.	39
Figura 23: Curve di lavorabilità delle sei miscele indagate di CDWA.	39
Figura 24: Curve di lavorabilità delle tre miscele indagate di NAT.	41
Figura 25: Stagionatura dei campioni in ambiente umido [4].	42
Figura 26: Schema sintetico dell'iter di stagionatura e degrado seguito.	44
Figura 27: Cella triassiale caricata.	46
Figura 28: Rivestimento del provino con guaina in lattice e preparazione del provino da inserire in cella triassiale.	47
Figura 29: Curva sforzo-deformazione restituita dalla macchina.	48
Figura 30: Curva sforzo-deformazione rielaborata.	49
Figura 31: Procedura di prova a compressione non confinata.	50
Figura 32: Rottura del provino dovuta alla progressiva fessurazione.	51
Figura 33: Stato tensionale a cui il provino è sottoposto durante la prova.	53
Figura 34: Campione rotto a trazione indiretta.	53
Figura 35: Procedura di prova per la trazione indiretta.	53
Figura 36: Modulo resiliente CDWA 0 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	56
Figura 38: Modulo resiliente CDWA 4 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	56
Figura 37: Modulo resiliente CDWA 3 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	56
Figura 39: Modulo resiliente CDWA 8 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	56
Figura 40: Modulo resiliente CDWA 12 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	57
Figura 41: Modulo resiliente CDWA 0 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	57
Figura 42: Modulo resiliente CDWA 4 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	57
Figura 43: Modulo resiliente CDWA 8 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	58
Figura 45: Modulo resiliente CDWA 0 cicli di gelo/disgelo (45 giorni).	58
Figura 44: Modulo resiliente CDWA 12 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	58
Figura 46: Modulo resiliente CDWA 4 cicli di gelo/disgelo (45 giorni).	58
Figura 47: Modulo resiliente CDWA 8 cicli di gelo/disgelo (45 giorni).	59
Figura 49: Modulo resiliente CDWA 0 cicli di gelo/disgelo (60 giorni).	59
Figura 48: Modulo resiliente CDWA 12 cicli di gelo/disgelo (45 giorni).	59
Figura 50: Modulo resiliente CDWA 4 cicli di gelo/disgelo (60 giorni).	59
Figura 51: Modulo resiliente CDWA 8 cicli di gelo/disgelo (60 giorni).	60
Figura 53: Modulo resiliente NAT 0 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	60
Figura 52: Modulo resiliente CDWA 12 cicli di gelo/disgelo (60 giorni).	60
Figura 54: Modulo resiliente NAT 4 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	60
Figura 55: Modulo resiliente NAT 8 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	61
Figura 57: Modulo resiliente NAT 0 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	61
Figura 56: Modulo resiliente NAT 12 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	61
Figura 58: Modulo resiliente NAT 4 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	61

Figura 59: Modulo resiliente NAT 8 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	62
Figura 60: Modulo resiliente NAT 12 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	62
Figura 61: Modulo resiliente per CDWA stagionato 7 giorni.	67
Figura 62: Modulo resiliente per CDWA stagionato 28 giorni.	67
Figura 63: Modulo resiliente per CDWA stagionato 45 giorni.	68
Figura 64: Modulo resiliente per CDWA stagionato a 60 giorni.	68
Figura 65: Modulo resiliente per NAT stagionato a 7 giorni.	69
Figura 66: Modulo resiliente per NAT stagionato 28 giorni.	70
Figura 67: Valori medi di resistenza massima a compressione per il CDWA al variare dei livelli di degrado termico.	72
Figura 68: Valori medi di energia a rottura dei CDWA al variare dei livelli di degrado termico.	72
Figura 69: Valori medi di modulo secante dei CDWA al variare dei livelli di degrado termico.	73
Figura 70: Valori medi di resistenza massima a compressione per il CDWA stagionato 7 giorni al variare dei livelli di degrado termico.	73
Figura 71: Valori medi di energia di rottura per il CDWA stagionato 7 giorni al variare dei livelli di degrado termico.	74
Figura 72: Valori medi di resistenza massima a compressione per il NAT al variare dei livelli di degrado termico.	75
Figura 73: Valori medi di energia a rottura dei NAT al variare dei livelli di degrado termico.	76
Figura 74: Valori medi di modulo secante dei NAT al variare dei livelli di degrado termico.	76
Figura 75: Valori di resistenza massima a trazione per il CDWA al variare dei livelli di degrado termico.	77
Figura 76: Valori di resistenza massima a trazione per il CDWA stagionato 7 giorni al variare dei livelli di degrado termico.	78
Figura 77: Valori di resistenza massima a trazione per il NAT al variare dei livelli di degrado termico.	79
Figura 78: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 0 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	80
Figura 79: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 4 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	80
Figura 80: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 8 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	81
Figura 81: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 12 cicli di gelo/disgelo (7 giorni).	81
Figura 82: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 0 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	82

Figura 84: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 8 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	82
Figura 83: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 4 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	82
Figura 85: Confronto sul modulo resiliente tra CDWA e NAT 12 cicli di gelo/disgelo (28 giorni).	82
Figura 86: Valori medi di resistenza a compressione per CDWA e NAT.	89
Figura 87: Valori medi di energia di rottura per CDWA e NAT.	90
Figura 88: Valori medi di modulo secante per CDWA e NAT.	90
Figura 90: Resistenza massima a trazione per CDWA e NAT.	91

Indice delle tabelle

Tabella 1: Specifiche di prova.....	26
Tabella 2: Distribuzione granulometrica centro fuso CIRS.....	28
Tabella 3:MMVT per i materiali da riciclo.	31
Tabella 4: MMVT per l'aggregato naturale.	31
Tabella 5: Composizione granulometrica in [g] di CDW per ogni strato.....	34
Tabella 6: Composizione granulometrica in [g] dell'aggregato naturale.....	41
Tabella 7: Valori medi di resistenza a compressione, modulo secante, modulo tangente, deformazione a rottura ed energia di rottura.....	63
Tabella 8: Resistenza massima a trazione indiretta.	64
Tabella 9: Parametri del modello Hicks-Monismith derivanti dalla procedura di regressione.	83
Tabella 10: Parametri del modello M-EPDG derivanti dalla procedura di regressione.....	84
Tabella 11: Parametri del modello Itani derivanti dalla procedura di regressione.....	85
Tabella 12: Valori di R^2_{adj} per i tre modelli per ogni tempo di stagionatura e ogni livello di degrado termico	87
Tabella 13: Valori ottenuti dal test di cessione, confrontati con i limiti imposti da normativa	92
Tabella 14: Confronto con i limiti richiesti dal capitolato CIRS [51].....	97

Indice degli allegati

Allegato 1: Curve di lavorabilità per le sei miscele di CDWA indagate (ottimizzazione della miscela)

Allegato 2: Curve di lavorabilità per le tre miscele di NAT indagate (contenuto variabile di acqua)

Allegato 3: Tabella dei coefficienti di lavorabilità dei campioni di CDWA 100x200 mm

Allegato 4: Curve di lavorabilità dei CDWA stagionati 7 giorni 100x200 mm

Allegato 5: Curve di lavorabilità dei CDWA stagionati 28 giorni 100x200 mm

Allegato 6: Curve di lavorabilità dei CDWA stagionati 45 giorni 100x200 mm

Allegato 7: Curve di lavorabilità dei CDWA stagionati 60 giorni 100x200 mm

Allegato 8: Tabella dei coefficienti di lavorabilità dei NAT 100x200 mm

Allegato 9: Curve di lavorabilità dei NAT stagionati 7 giorni 100x200 mm

Allegato 10: Curve di lavorabilità dei NAT stagionati 28 giorni 100x200 mm

Allegato 11: Tabella dei coefficienti di lavorabilità dei campioni di CDWA 100x100 mm

Allegato 12: Curve di lavorabilità dei CDWA stagionati 7 giorni 100x100 mm

Allegato 13: Curve di lavorabilità dei CDWA stagionati 28 giorni 100x100 mm

Allegato 14: Curve di lavorabilità dei CDWA stagionati 45 giorni 100x100 mm

Allegato 15: Curve di lavorabilità dei CDWA stagionati 60 giorni 100x100 mm

Allegato 16: Tabella dei coefficienti di lavorabilità dei NAT 100x100 mm

Allegato 17: Curve di lavorabilità dei NAT stagionati 7 giorni 100x100 mm

Allegato 18: Curve di lavorabilità dei NAT stagionati 28 giorni 100x100 mm

Allegato 19: Andamento della temperatura durante i cicli di gelo/disgelo

Allegato 20: Tabelle di modulo resiliente per CDWA stagionati 7 giorni

Allegato 21: Tabelle di modulo resiliente per CDWA stagionati 28 giorni

Allegato 22: Tabelle di modulo resiliente per CDWA stagionati 45 giorni

Allegato 23: Tabelle di modulo resiliente per CDWA stagionati 60 giorni

Allegato 24: Tabelle di modulo resiliente per NAT stagionati 7 giorni

Allegato 25: Tabelle di modulo resiliente per NAT stagionati 28 giorni

Allegato 26: Curve di compressione semplice non confinata per i CDWA stagionati 7 giorni

Allegato 27: Curve di compressione semplice non confinata per i CDWA stagionati 28 giorni

Allegato 28: Curve di compressione semplice non confinata per i CDWA stagionati 45 giorni

Allegato 29: Curve di compressione semplice non confinata per i CDWA stagionati 60 giorni

Allegato 30: Curve di compressione semplice non confinata per i NAT stagionati 7 giorni

Allegato 31: Curve di compressione semplice non confinata per i NAT stagionati 28 giorni

Allegato 32: Scheda tecnica della Soda Caustica