



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Infrastrutture e Sistemi di Trasporto

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Effetto della snellezza del campione sulla resistenza a
compressione non confinata di misti cementati con
aggregato naturale e riciclato**

Relatori

prof. Marco Bassani
ing. Luca Tefa

Candidato

Alessandro Gancitano

Luglio 2023

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	1
2. STATO DELL'ARTE	3
2.1. Pavimentazioni Semi-rigide	3
2.2. Rifiuti da costruzione e demolizione	4
2.3. Uso del CDW in ambito stradale.....	5
2.4. Effetti sulla resistenza a compressione dei misti cementati	5
3. OBIETTIVI	8
3.1. Motivazione	8
3.2. Indagine sperimentale.....	10
4. MATERIALI E METODI	12
4.1. Materiali	12
4.1.1. Aggregati.....	12
4.1.2. Cemento	14
4.1.3. Misti stabilizzati: confezionamento e maturazione dei provini	14
4.2. Metodi	20
4.2.1. Costipamento Proctor	20
4.2.2. Test di resistenza a compressione.....	23
4.2.3. Analisi dei dati	26
4.2.4. Valutazione del tipo di rottura	27
5. RISULTATI	29
5.1. Caratterizzazione meccanica	29
5.2. Tipologia di rottura	31
6. ANALISI DEI RISULTATI.....	34
6.1. Effetto della snellezza.....	34
6.2. Effetto della tipologia di aggregato	36
6.3. Effetto della densità	37
6.4. Relazioni resistenza - geometria.....	39

6.4.1. Analisi di regressione lineare e relazioni matematiche	39
6.4.2. Fattori di conversione	44
6.5. Effetto della modalità di prova	45
7. CONCLUSIONI	48
8. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	51
9. ALLEGATI.....	53

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Classificazione delle pavimentazioni	3
Figura 2 - Frazioni granulometriche dell'aggregato da CDW.....	13
Figura 3 - Frazioni granulometriche dell'aggregato naturale	13
Figura 4 - Vagliatura CDW e suddivisioni in frazioni granulometriche.....	14
Figura 5 - Stoccaggio delle frazioni granulometriche in sacchetti impermeabili	14
Figura 6 - Fuso granulometrico B (Linee guida SIIV).....	15
Figura 7 - Sequenza di preparazione delle miscele	17
Figura 8 - Schema di funzionamento della "Pressa a taglio giratoria"	18
Figura 9 - Pressa a taglio giratoria	18
Figura 10 - Fustelle cilindriche utilizzate per la fase di stoccaggio	19
Figura 11 - Provini di diametro 100 mm sigillati dopo il confezionamento	20
Figura 12 - Curva Proctor.....	20
Figura 13 - Umidificazione delle miscele per lo studio Proctor	21
Figura 14 - Fase di esecuzione dello studio Proctor	21
Figura 15 - Distribuzione dei colpi	22
Figura 16 - Campione al termine del costipamento Proctor	22
Figura 17 - Pressa in configurazione compressione non confinata	23
Figura 18 - Schema di carico del provino.....	24
Figura 19 - Esecuzione del test di compressione su provino di diametro 100 mm.....	25
Figura 20 - Esecuzione del test di compressione su provini di diametro 150 mm	25
Figura 21 - Curva sforzo deformazione e schema di traslazione dell'asse delle ordinate	26
Figura 22 - Esempi di rotture per compressione soddisfacenti di provini cilindrici	28
Figura 23 - Esempi di rotture per compressione non soddisfacenti di provini cilindrici.....	28
Figura 24 - Valori medi di UCS e deformazione a resistenza massima	30
Figura 25 - Valori medi dei moduli di elasticità tangente e secante	30
Figura 26 - Valori medi dell'energia di rottura	31
Figura 27 - Rottura campione NAT 150 C 4: (a) fase I, (b) fase II e (c) fase III	32
Figura 28 - Rottura campione CDW 150 B 1: (a) fase I, (b) fase II e (c) fase III.....	32
Figura 29 - Rottura campione CDW 100 C 3: (a) fase I, (b) fase II e (c) fase III.....	33
Figura 30 - Relazione tra valori medi di UCS e snellezza al variare del diametro - CDW.....	34

Figura 31 - Relazione tra i valori medi di UCS e snellezza al variare del diametro - NAT.....	35
Figura 32 - Relazioni UCS-snellezza - Rashidi & Ashtiani (2019).....	35
Figura 33 - Relazione tra valori medi di UCS e snellezza al variare dell'aggr. - dia. 100 mm.	36
Figura 34 - Relazione tra valori medi di UCS e snellezza al variare dell'aggr. - dia. 150 mm.	37
Figura 35 - Esempi variazione dei valori di UCS in funzione della densità secca.....	37
Figura 36 - Andamento dei valori medi di densità in funzione della snellezza - CDW.....	38
Figura 37 - Andamento dei valori medi di densità in funzione della snellezza - NAT.....	39
Figura 38 - Modello di resistenza per l' aggregato da CDW.	43
Figura 39 - Modello di resistenza per l' aggregato NAT.....	43
Figura 40 - Confronto dei modelli ottenuti in scala bi-logaritmica.....	43
Figura 41 - Confronto tra prova in controllo di forza e di spostamento - CDW	46
Figura 42 - Confronto tra prova in controllo di forza e di spostamento - NAT.....	46

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Geometrie e metodi di formazione dei provini secondo la UNI EN 13286-41	8
Tabella 2 - Dimensioni dei provini confezionati nel corso della sperimentale.....	10
Tabella 3 - Fuso granulometrico di riferimento e curva di progetto	15
Tabella 4 - Coefficienti dei modelli di regressione lineare multipla e risultati dei test.....	41
Tabella 5 - Misure di adattamento e risultati del test globale dei modelli (F-test).....	41
Tabella 6 - Rapporti di conversione - CDW.....	44
Tabella 7 - Rapporti di conversione - NAT	44
Tabella 8 - Esempio numerico dell'effetto della snellezza sull'accettabilità della miscela (NAT) in riferimento alla norma UNI EN 13286-41.....	45
Tabella 9 - Sintesi delle modalità di rottura dei provini di diametro 100 mm	62
Tabella 10 - Sintesi delle modalità di rottura dei provini di diametro 150 mm	63

1. INTRODUZIONE

Il misto cementato è impiegato nella costruzione delle sovrastrutture stradali di tipo semi-rigido, adottate su strade a volume di traffico elevato e con un ingente percentuale di mezzi pesanti. Nello specifico, si tratta di miscela composta da aggregati lapidei legati da una piccola quantità di cemento, la quale, grazie alle buone caratteristiche di portanza, contribuisce all'attenuazione delle sollecitazioni trasmesse al sottofondo su cui si appoggia la sovrastruttura stradale. In tal senso, l'uso dei misti cementati favorisce il prolungamento della vita utile dell'opera.

Generalmente, la miscela è composta da aggregati di origine naturale, tuttavia, al fine di ridurre il consumo di risorse naturali, si sta diffondendo l'uso di aggregati riciclati, in particolare quelli provenienti dal trattamento dei rifiuti da costruzione e demolizione.

Per l'impiego dei misti cementati in ambito stradale è richiesto il raggiungimento di specifiche caratteristiche meccaniche; è, quindi, necessaria la progettazione della miscela consistente nella definizione della migliore combinazione dei costituenti in termini di granulometria, di contenuto d'acqua e di cemento per massimizzare le proprietà di resistenza e rigidità. Queste ultime sono valutate su campioni ricostruiti in laboratorio e attraverso prove di compressione non confinata o di trazione indiretta. Le norme e i capitolati tecnici prevedono l'adozione di campioni cilindrici aventi diametri e altezze variabili, fissando requisiti di resistenza univoci per l'accettazione del materiale, indipendentemente dalla geometria del provino considerata.

In letteratura è presente un cospicuo numero di articoli sui fattori che condizionano la resistenza a compressione dei misti cementati, quali la tipologia di aggregato, il contenuto di cemento, i tempi di maturazione, le modalità e il grado di costipamento. L'influenza delle dimensioni del provino sulla resistenza a compressione è stata investigata in diversi articoli che prendono in esame differenti materiali, in particolare il calcestruzzo; solamente uno studio investiga tali effetti sul misto cementato, prendendo in esame un'unica tipologia di aggregato. In tali studi è stata valutata l'influenza del rapporto di snellezza (h/d) sulla resistenza a compressione, ottenendo valori di UCS (*Unconfined Compressive Strength* -

INTRODUZIONE

resistenza a compressione non confinata) che diminuiscono all'aumentare del rapporto di snellezza.

In questa tesi di laurea magistrale è stata condotta una sperimentazione il cui obiettivo è di investigare gli effetti sull'UCS dei misti cementati al variare del diametro e dell'altezza del campione, fattori che, combinati tra loro, determinano la cosiddetta snellezza, con l'intento di colmare il vuoto di conoscenza su tale fronte. Lo studio, come scopo ultimo, ambisce ad ottenere una legge matematica sulla base della quale determinare i fattori di conversione utili per il confronto dei risultati circa la resistenza di provini aventi differenti caratteristiche geometriche.

Per il raggiungimento degli obiettivi preposti, sono stati confezionati campioni cilindrici di misto cementato da testare a compressione non confinata previa maturazione di 7 giorni in ambiente controllato. Per cogliere l'influenza della geometria sulla resistenza, i campioni sono stati ricostruiti in 7 differenti configurazioni geometriche ottenute combinando due diametri, 100 e 150 mm, e altezze variabili tra 55 e 200 mm. Considerato l'impiego crescente di materiali da riciclo nell'ambito delle costruzioni stradali, l'indagine sperimentale è stata condotta su due miscele di misto cementato rispettivamente composte da aggregati naturali e aggregati riciclati; le due miscele di aggregato seguono la medesima curva granulometrica e contengono entrambe il 3% in peso di cemento d'altoforno tipo CEM-III/A rispetto alla massa di soli aggregati. La compattazione dei campioni è stata eseguita mediante l'uso della pressa a taglio giratoria conferendo la stessa energia di compattazione per unità di volume. Al fine di supportare statisticamente i risultati sperimentali, per ogni configurazione geometrica e tipologia di aggregato, sono stati prodotti 5 campioni.

2. STATO DELL'ARTE

2.1. PAVIMENTAZIONI SEMI-RIGIDE

Le sovrastrutture stradali hanno la funzione di trasferire i carichi del traffico al corpo stradale. In funzione delle caratteristiche stratigrafiche, si distinguono le pavimentazioni di tipo *flessibile*, costituite da strati costruiti con conglomerato bituminoso, e pavimentazioni di tipo *rigido*, costruite con lastre di calcestruzzo. È molto diffusa, soprattutto in ambito autostradale, una soluzione intermedia denominata *pavimentazione semi-rigida* che si differenzia dalla pavimentazione flessibile per uno strato di sotto-base in misto cementato posizionato tra la base in conglomerato bituminoso e la fondazione in misto granulare (Figura 1). La pavimentazione semi-rigida contribuisce a fornire un supporto più rigido agli strati in conglomerato bituminoso, con conseguente riduzione delle deflessioni prodotte dai carichi mobili e un significativo aumento della vita utile.

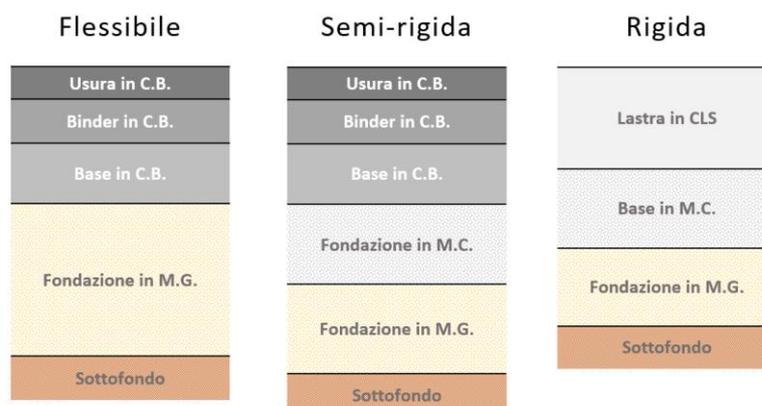


Figura 1 - Classificazione delle pavimentazioni

Nello specifico, il misto cementato è un materiale ottenuto miscelando aggregati con percentuali di cemento contenute nell'intervallo 2-4% in massa sugli aggregati. Negli ultimi anni sta anche prendendo piede l'utilizzo di aggregati riciclati provenienti dalla fresatura delle pavimentazioni esistenti (RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement*) o dai rifiuti di costruzione e demolizione di costruzioni civili (CDW - *Construction and Demolition Waste*). Questa decisione non sorprende dal momento che, negli ultimi decenni, il tema della sostenibilità ambientale ha assunto sempre più rilevanza, tanto da spingere il sistema economico-

produttivo verso l'adozione di un modello di economia circolare che incentiva il riutilizzo e il riciclo dei materiali.

2.2. RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE

Nel 2020 in Unione Europea, come riportato nel rapporto delle *"Statistiche sui rifiuti"* di Eurostat (2022), sono stati prodotti più di 2 milioni di tonnellate di rifiuti (circa 4800 kg di rifiuti pro capite) il 37,1% dei quali derivanti da costruzioni e demolizioni (CDW), seguiti, con il 23,4%, dai rifiuti provenienti da attività estrattive. Il CDW è un rifiuto prodotto in fase di costruzione, ristrutturazione e demolizione di costruzioni civili (edifici, strade, ponti, ecc.) nel quale si trovano calcestruzzo, malte, materiali ceramici, vetro, e anche legno, plastica, metalli, conglomerati bituminosi, terre e le rocce da scavo, gesso ed altri materiali impiegati nelle costruzioni.

In ambito nazionale, è interessante il *"Rapporto Rifiuti Speciali"* dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA, 2022) che fornisce informazioni relative alla produzione di rifiuti speciali, pericolosi e non, sul nostro territorio. Secondo tale rapporto, il totale di rifiuti speciali prodotti nel 2020 è pari a 147 milioni di tonnellate, di cui 137 milioni sono rifiuti speciali non pericolosi; di questi, ben 65 milioni di tonnellate sono CDW e rappresentano il 44,1% dei rifiuti speciali non pericolosi. Seppur nel 2020 si sia registrata una diminuzione nella produzione dei rifiuti a causa dell'emergenza sanitaria da COVID-19, con l'emanazione del *decreto Rilancio del 2020 e con l'approvazione del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)*, in Italia dal 2021 si è verificata una crescita considerevole dei rifiuti speciali, in particolare della quota riguardante il CDW.

Viste le ingenti quantità di CDW prodotte annualmente, è di fondamentale importanza il reimpiego e il riutilizzo di tali rifiuti perché possano diventare un'importante risorsa. Al tal proposito, in Italia, già dal 2003, con l'emanazione del *Decreto Ministeriale "Ambiente" n°203 dell'8 Maggio 2003* e la relativa *circolare attuativa 5205/05*, si obbligano le Pubbliche Amministrazioni e le Società a prevalente capitale pubblico a utilizzare beni riciclati in misura non inferiore al 30%. A livello europeo, la *direttiva n°2008/98/CE* poneva come obiettivo il recupero e il riciclaggio di almeno il 70% dei CDW entro il 2020. A sostegno di tali sforzi, la ricerca ha investito nello studio del reimpiego dei CDW in nuove applicazioni delle costruzioni civili di tipo strutturale e non strutturale.

2.3. USO DEL CDW IN AMBITO STRADALE

Uno degli impieghi prevalenti degli aggregati da CDW è nella produzione dei materiali per la costruzione delle infrastrutture viarie. Perché ciò sia possibile, dopo opportuni trattamenti che prevedono la separazione di costituenti indesiderati quali metalli, legno e plastiche, il rifiuto deve essere macinato e vagliato. Il suo uso, in sostituzione di un aggregato di tipo naturale, genera un doppio vantaggio: contribuisce alla riduzione della domanda di risorse naturali e riduce la quantità di materiale da conferire in discarica. Inoltre, nonostante un significativo scetticismo tra gli operatori del settore, in particolare committenti e progettisti, numerosi studi hanno dimostrato che l'aggregato riciclato da CDW consente di ottenere materiali con prestazioni meccaniche adeguate a molteplici applicazioni stradali dal momento che esso può essere utilizzato sia tal quale, sia stabilizzato mediante l'uso di leganti idraulici. In particolare, *Tefa et al. (2022)* hanno messo a confronto le proprietà strutturali e gli impatti ambientali di diversi strati di fondazione per pavimentazioni flessibili e semirigide composte da aggregati naturali oppure da aggregati da CDW, sia non legati sia stabilizzati a cemento. I risultati ottenuti dal punto di vista strutturale non mostrano particolari differenze legate all'uso del diverso tipo di aggregato; al contrario, dall'analisi *Life Cycle Assessment (LCA)* si evidenzia l'enorme vantaggio ambientale che le pavimentazioni stradali contenenti aggregati da CDW garantiscono rispetto ai materiali tradizionali.

2.4. EFFETTI SULLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEI MISTI CEMENTATI

Le prestazioni meccaniche dei misti cementati possono essere valutate in laboratorio attraverso la prova di modulo resiliente, della resistenza a trazione indiretta e della resistenza a compressione, ma quest'ultima è sicuramente la più comune, principalmente per la rapidità e la semplicità di esecuzione.

La resistenza a compressione dei misti granulari stabilizzati è influenzata da differenti parametri, alcuni dei quali legati alla composizione del materiale, come la distribuzione granulometrica della miscela di aggregati, il contenuto di materiale fine, il contenuto di cemento e l'umidità, altri legati al metodo di compattazione e maturazione del campione,

altri ancora dipendenti dal metodo di prova (Lim & Zollinger, 2003); (Ismail, et al., 2014); (Xuan, Houben, Molenaar, & Shui, 2012); (Abu El-Maaty Behiry, 2013); (Du, Liu, Tian, Zhang, & Zheng, 2018). Relativamente a quest'ultimo aspetto, il diametro, la forma e il metodo di applicazione del carico durante la prova influenzano la resistenza a compressione.

L'effetto della geometria del campione, in particolare l'altezza, il diametro e il loro rapporto, detto di snellezza, sono stati diffusamente studiati sul calcestruzzo ma anche su materiali quali rocce e terre stabilizzate (Tusday & Hasancebi, 2009); (Ciancio & Gibbings, 2012).

Con riferimento al calcestruzzo, il diametro e la snellezza dei provini cilindrici sono ritenuti i parametri che maggiormente influenzano la resistenza a compressione. Nello specifico, all'aumentare del diametro del campione (nel range di investigazione 50-150 mm), a parità di snellezza, si assiste a una riduzione della resistenza a compressione che è imputabile alla maggiore probabilità di avere elementi deboli all'interno del volume di *materiale* (Dehastani, Nikbin, & Asadollahi, 2014); (Gyurkó & Nemes, 2020). Tuttavia, in un altro studio (Tokay & Özdemir, 1997) nel quale è stata analizzata la resistenza a compressione di provini cilindrici di diametro variabile (tra 75 e 200 mm) e rapporto di snellezza costante ($h/d = 2$), emerge che la riduzione di resistenza all'aumentare del diametro vale solo per diametri superiori a 100 mm, mentre, al di sotto di tale valore, si riscontrano resistenze a compressione crescenti. Secondo gli autori tale fenomeno si verifica poiché parte della malta (acqua, cemento e aggregato fine) necessaria a ridurre gli attriti interni durante la fase di riorganizzazione delle particelle, migra verso le zone più esterne per riempire i vuoti tra l'aggregato grosso e la fustella, rendendo più difficoltoso il costipamento del campione; tale effetto si attenua al diminuire del rapporto tra superficie laterale del campione e volume, quindi all'aumentare del diametro del campione.

In merito all'effetto della snellezza sulla resistenza a compressione, Tokay & Özdemir (1997), analizzando un set di campioni cilindrici di diametro 150mm con rapporto di snellezza variabile (tra 0,67 e 2), dimostrano che la resistenza a compressione diminuisce all'aumentare del rapporto di snellezza del campione con un andamento monotono decrescente. Lo stesso risultato è stato ottenuto dallo studio di Dehestani et al. (2014) per ognuno dei diametri investigati (50,75 e 100 mm) fino a valori di snellezza pari a 1,5, oltre il quale gli autori riscontrano valori di resistenza crescenti.

Rashidi e Ashtiani (2019) hanno investigato l'effetto della snellezza del campione sulla resistenza a compressione dei misti cementati contenenti solo aggregati naturali, utilizzando provini di diametro 100 e 150 mm. Coerentemente con quanto già osservato per i conglomerati cementizi, la resistenza a compressione varia in funzione del rapporto di snellezza con un andamento monotono decrescente. Il diametro, al contrario, sembrerebbe avere un effetto sulla resistenza opposto a quanto ottenuto per i calcestruzzi, in quanto, a parità di rapporto di snellezza, per il diametro 150 mm gli autori hanno ottenuto valori di UCS superiori a quelli per il diametro 100 mm.

Dall'analisi della letteratura emerge la totale assenza di studi che considerano tra i fattori condizionanti la resistenza a compressione dei misti cementati al variare del tipo di applicazione del carico (controllo di spostamento o controllo di carico) e del tipo di aggregato considerato nel loro confezionamento.

3. OBIETTIVI

3.1. MOTIVAZIONE

Per la valutazione della resistenza a compressione dei misti cementati molti capitolati italiani fanno riferimento o alla storica norma del CNR contenuta nel *Bollettino Ufficiale n.29/72* o alla *UNI EN 13286-41* nelle quali si prevedono geometrie differenti dei campioni: nel caso della *CNR 29/72* i campioni sono confezionati secondo una procedura che utilizza lo stampo adottato per la valutazione dell'indice CBR, mentre per la *UNI EN 13286-41* sono previste quattro differenti metodologie di confezionamento standardizzate, ognuna delle quali presenta differenti geometrie, con i rapporti di snellezza indicati in Tabella 1 (*UNI EN 13286-50/51/52/53*). In tali norme si ammettono provini con diametri variabili tra 50 e 160 mm e rapporti di snellezza compresi tra 0,8 e 2,0.

Tabella 1 - Geometrie e metodi di formazione dei provini accettati dalla norma UNI EN 13286-41

Norma	Tipologia costipamento	Diametro (d) [mm]	Altezza (h) [mm]	h/d
UNI EN 13286-50	Proctor o Tavola vibrante	100	120	1,2
		150	120	0,8
UNI EN 13286-51	Martello vibrante	100	100	1,0
		150	150	1,0
UNI EN 13286-52	Vibro compressione	100	100	1,0
			200	2,0
		160	160	1,0
			320	2,0
UNI EN 13286-53	Compressione assiale	50	50	1,0
			100	2,0
		100	100	1,0
			200	2,0

Altri capitolati, talvolta per ragioni di tipo pratico, non fanno riferimento alle norme precedentemente citate, ma definiscono procedure proprie. Ad esempio, nel caso del capitolato adottato da ANAS S.p.a. (rev. 2022), la prova di resistenza a compressione è eseguita su campioni confezionati con pressa a taglio giratoria, con pressione di

costipamento di 600 kPa e 180 giri, diametro 150 mm e altezza compresa tra i 160 e i 200 mm, a cui corrispondono rapporti di snellezza compresi tra 1,06 e 1,33.

Nonostante le differenti geometrie dei provini previste nelle diverse norme tecniche, sorprendentemente la soglia di accettazione della resistenza a compressione prevista in fase di studio della miscela risulta essere praticamente la stessa. Nei capitolati CIRS, ANAS e nelle Linee guida ENAC (ambito aeroportuale), emerge che le miscele di misto cementato per essere impiegate devono possedere valori di resistenza a compressione (a 7 giorni di maturazione) ricadenti nel range 2,5 – 5,5 MPa per le pavimentazioni semi-rigide (con valori eccezionali di 7,5 MPa) e all'interno del range 4 – 7 MPa per le pavimentazioni rigide.

Alla luce degli studi sin qui condotti, i valori di riferimento minimi e massimi delle prove di resistenza a compressione dovrebbero essere differenziati in base alla geometria del provino ma, al momento, la possibilità di riferirsi a metodi di prova diversi rende impossibile il confronto dei risultati ottenuti con differenti geometrie del campione; inoltre, è anche complessa l'interpretazione e il confronto dei risultati di studi sperimentali. Per tale motivo, alcune norme adottate in altri paesi, se è previsto l'utilizzo di provini a diversa configurazione geometrica, forniscono un rapporto di conversione che rende comparabili i risultati ottenuti dalle differenti configurazioni. La *ASTM D1633-00* adottata negli Stati Uniti, per esempio, descrive la procedura di prova per la valutazione della resistenza a compressione dei terreni stabilizzati a cemento, nella quale si prevede la possibilità di utilizzare provini cilindrici aventi due diversi rapporti di snellezza, 1,15 e 2,00; per consentire il confronto dei risultati di resistenza tra i due rapporti di snellezza, tale norma suggerisce l'applicazione di un fattore correttivo pari a 1,10 (conversione da $h/d = 2,00$ a 1,15) .

L'esecuzione delle prove di resistenza a compressione, sia nella *CNR 29/72* sia nella *UNI EN 13286-41*, è prevista in modo tale che l'applicazione del carico avvenga in maniera continua e uniforme; in particolare, nel caso della *CNR 29/72* l'applicazione del carico avviene inducendo uno sforzo di 10 kg/cm² al secondo, mentre secondo la *UNI EN 13286-41 (rev. 2021)* il provino deve essere caricato in modo che la rottura avvenga tra i 30 e i 120 s. Tuttavia, nei capitolati in cui sono definite procedure proprie per lo studio delle miscele (es. ANAS S.p.a. rev. 2022 e Linee Guida ENAC), non è generalmente indicato se la prova debba essere eseguita controllando la velocità di caricamento oppure di deformazione, modalità che, a parità di miscela, possono generare valori di resistenza a compressione differenti.

3.2. INDAGINE SPERIMENTALE

La sperimentazione di questa tesi è finalizzata a valutare gli effetti prodotti dalla geometria del provino (diametro e altezza) e dalle modalità di applicazione del carico sulla resistenza a compressione di misti granulari stabilizzati a cemento. L'obiettivo è ottenere dei coefficienti che permettano di convertire un risultato o un valore soglia, riferito ad una determinata geometria o modalità di applicazione del carico, nel suo omologo riferito ad una geometria o modalità di applicazione del carico differente.

Nell'indagine sperimentale sono stati confezionati provini cilindrici di diametro 100 e 150 mm, aventi rispettivamente quattro e tre differenti altezze e rapporti di snellezza, secondo quanto indicato in Tabella 2.

Tabella 2 - Dimensioni dei provini confezionati nel corso della sperimentale

Diametro (d) [mm]	Altezza (h) [mm]	Snellezza ($= \frac{h}{d}$)
100	55	0,55
	100	1,00
	150	1,50
	200	2,00
150	100	0,67
	150	1,00
	200	1,33

Per ognuna delle geometrie sopradescritte sono state utilizzate due diverse tipologie di miscele, una composta da aggregato naturale e l'altra da aggregato riciclato. La stabilizzazione delle miscele è avvenuta utilizzando un contenuto di cemento identico. La valutazione della resistenza a compressione è di tipo non confinata (UCS) ed è stata eseguita secondo due differenti modalità di prova, in controllo di forza e di spostamento, condotte rispettivamente dal Politecnico di Torino, nel corso del presente lavoro di tesi, e dall'Università di Perugia.

Per dare un supporto statistico ai risultati, per ognuna delle 7 configurazioni precedentemente illustrate e per ogni tipologia di materiale, è stata prevista la costruzione di 5 campioni identici. Il numero totale di provini confezionati, tenuto conto delle differenti geometrie, ripetizioni, materiale e procedura di prova, è stato pari a 140, di cui 70 confezionati e testati al Politecnico di Torino e gli identici restanti 70 campioni presso l'Università di Perugia.

4. MATERIALI E METODI

4.1. MATERIALI

4.1.1. AGGREGATI

AGGREGATI RICICLATI (CDW)

L'aggregato da CDW è stato prelevato presso CAVIT S.p.a., azienda che opera nel settore della raccolta, smaltimento e riciclo di rifiuti provenienti da costruzioni e demolizioni. Tali rifiuti sono selezionati, frantumati e vagliati per essere reimpiegati come aggregati di riciclo da CDW. Per la sperimentazione, sono stati prelevati circa 500 kg di materiale da due cumuli in cui erano presenti pezzature di 0-40 mm e 0-8 mm. Tutto il materiale prelevato è stato preventivamente vagliato in modo manuale con un setaccio di apertura 20 mm direttamente in impianto, per escludere materiale di dimensione superiore ai 20 mm, non utile al confezionamento di provini da laboratorio.

AGGREGATI NATURALI (NAT)

L'aggregato naturale utilizzato è di tipo calcareo ed è stato reperito presso l'impianto di Spinelli & Mannocchi s.r.l. situato in località Lidarno (PG). Il materiale è stato prelevato da cumuli di classi granulometriche 0-5 mm, 5-10 mm, e 10-20 mm.

TRATTAMENTO DEGLI AGGREGATI

In laboratorio le due diverse fonti di aggregato sono state essiccate alla temperatura di 60 °C per 24 ore per l'eliminazione dell'umidità residua. Successivamente, i campioni di aggregato sono stati vagliati per separarli nelle frazioni granulometriche (Figura 2 e Figura 3) utili a ricostruire tutti i campioni con la stessa curva granulometrica di progetto.

Le operazioni di vagliatura sono condotte con setacci di apertura 20, 16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.125, 0.063 mm (Figura 4).

Le frazioni granulometriche ottenute sono state raccolte in buste impermeabili e sigillate al fine di evitare l'assorbimento dell'umidità ambientale (Figura 5). Terminata la fase di

vagliatura, è stata effettuata l'omogeneizzazione delle frazioni granulometriche miscelando insieme le differenti buste delle singole frazioni.

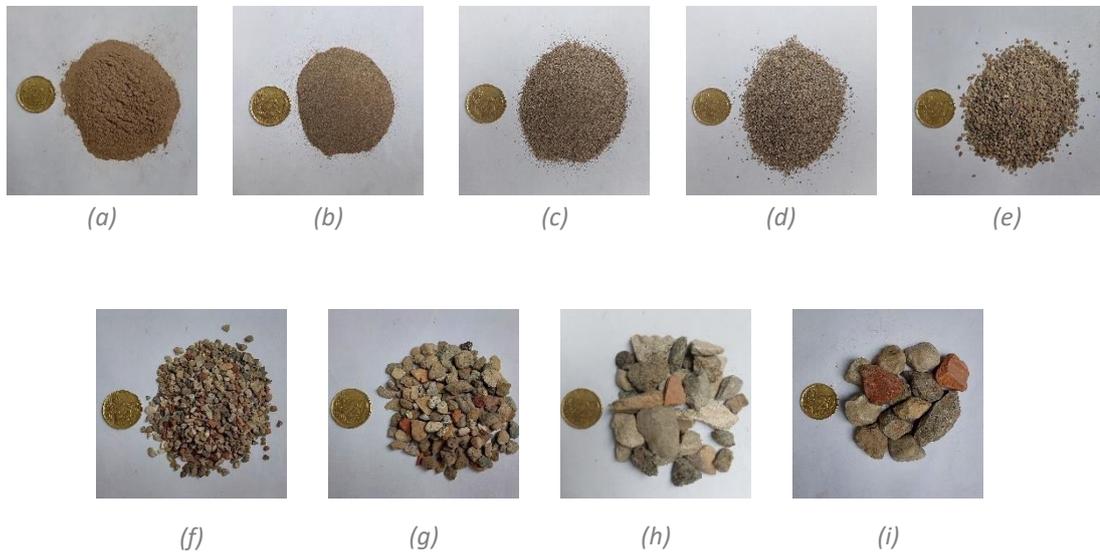


Figura 2 - Frazioni granulometriche dell'aggregato da CDW: (a) 0-0,063 mm, (b) 0,063-0,125 mm, (c) 0,125-0,5 mm, (d) 0,5-1 mm, (e) 1-2 mm, (f) 2-4 mm, (g) 4-8 mm, (h) 8-16 mm, (i) 16-20 mm



Figura 3 - Frazioni granulometriche dell'aggregato naturale: (a) 0-0,063 mm, (b) 0,063-0,125 mm, (c) 0,125-0,5 mm, (d) 0,5-1 mm, (e) 1-2 mm, (f) 2-4 mm, (g) 4-8 mm, (h) 8-16 mm, (i) 16-20 mm



Figura 4 - Vagliatura CDW e suddivisioni in frazioni granulometriche



Figura 5 - Stoccaggio delle frazioni granulometriche in sacchetti impermeabili

4.1.2. CEMENTO

Per la composizione delle due miscele di misto stabilizzato è stato utilizzato un cemento d'altoforno ad alta resistenza (42,5 N di tipo III secondo la classificazione EN 197-1) di Italcementi S.p.a., composto da una percentuale di clinker compresa tra 35 e 64% e da loppa d'altoforno per la restante parte. È stata scelta di questa tipologia poiché i cementi d'altoforno tipo III di resistenza iniziale ordinaria (N) presentano una bassa velocità di idratazione, il che limita lo sviluppo di fenomeni fessurativi nel misto cementato nelle fasi di presa e indurimento.

4.1.3. MISTI STABILIZZATI: CONFEZIONAMENTO E MATURAZIONE DEI PROVINI

La miscela secca di aggregati, sia essa costituita da aggregati naturali o riciclati, è formata dalla composizione delle diverse frazioni granulometriche, seguendo uno dei fusi granulometrici previsti dalle *Linee guida e norme tecniche per la costruzione e manutenzione*

delle pavimentazioni stradali (Società Italiana Infrastrutture Viarie, Ottobre 2022). In particolare, per la preparazione delle miscele è stata selezionata la curva granulometrica corrispondente al centro fuso B previsto nell'art.5 del documento, idonea per l'impiego in strati di fondazione stradale legati (Figura 6).

Il fuso granulometrico è definito utilizzando i setacci della Serie Base, ad eccezione del setaccio da 20 mm che appartiene alla Serie 2. Si riporta di seguito la tabella riassuntiva dei valori numerici del fuso granulometrico e delle percentuali in massa delle varie frazioni granulometriche (Tabella 3).

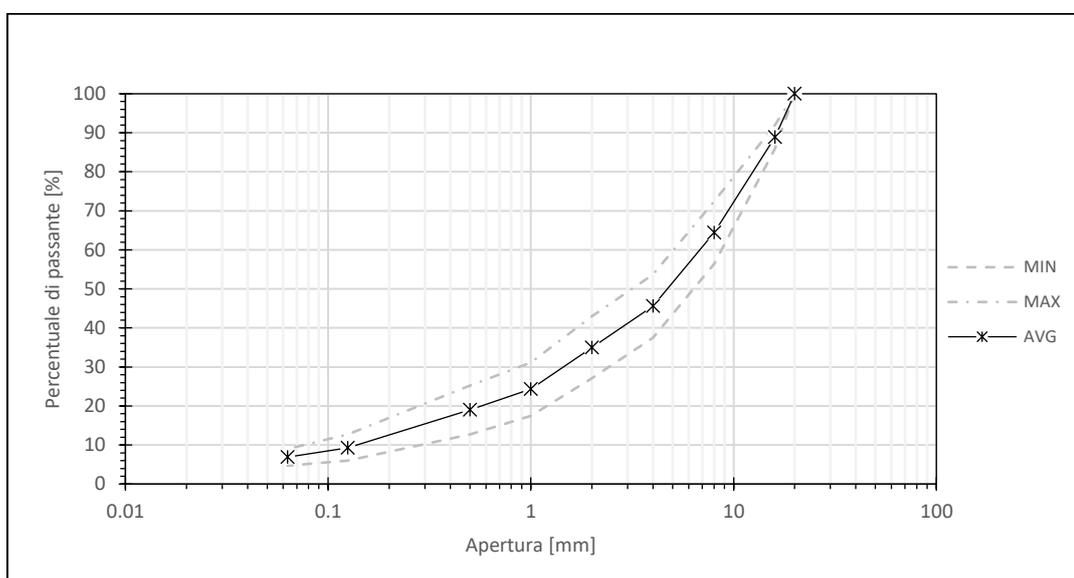


Figura 6 - Fuso granulometrico B (Linee guida SIIIV) con setacci serie base (aggregato 0/20 mm)

Tabella 3 - Fuso granulometrico di riferimento e curva di progetto

Serie	Apertura [mm]	Passante Fuso B con serie Base (0/20 mm)			Frazione [mm]	Percentuale in massa [%]
		Min [%]	Max [%]	Avg [%]		
2	20	100,0	100,0	100,0	16 - 20	11,1
Base	16	85,9	92,0	88,9	8 - 16	24,5
Base	8	56,4	72,4	64,4	4 - 8	18,9
Base	4	37,5	53,7	45,6	2 - 4	10,5
Base	2	27,1	43,0	35,0	1 - 2	10,7
Base	1	17,5	31,1	24,3	0,5 - 1	5,4
Base	0,5	12,7	25,2	19,0	0,125 - 0,5	9,6
Base	0,125	6,0	12,7	9,3	0,063 - 0,125	2,5
Base	0,063	4,7	9,0	6,9	< 0,063	6,9

Le miscele sono state preparate utilizzando una quantità di cemento del 3% in peso rispetto alla massa degli aggregati. La quantità d'acqua è stata determinata mediante lo studio del costipamento secondo la metodologia Proctor (paragrafo 4.2.1), ed è risultata pari al 9,6% per la miscela di aggregati riciclati e al 5,0% per quella di aggregati naturali.

PREPARAZIONE DELLE MISCELE SCIOLTE DI MISTO CEMENTATO

I provini sono stati confezionati e compattati per strati di 50 mm.

La massa di soli aggregati per ogni singolo stato è stata calcolata utilizzando la seguente formula:

$$m_A = \rho_d \cdot \frac{1}{\left(\frac{\emptyset_f^2 \cdot \pi}{4}\right) \cdot h_{strato}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\%c}{100}\right)}$$

dove:

- m_A = massa aggregati in *kg*
- ρ_d = densità secca Proctor in *kg/m³*
- h_{strato} = altezza di caduta del pestello in *m*
- \emptyset_f = diametro fustella in *m*
- $\%c$ = contenuto di cemento rispetto alla massa di soli aggregati

A partire dal quantitativo di aggregati e conoscendo le percentuali di ogni frazione granulometrica, sono stati determinati i quantitativi in massa delle singole frazioni granulometriche da aggiungere alla miscela. La massa d'acqua è stata calcolata mediante l'equazione:

$$m_w = m_A \cdot \left(1 + \frac{\%c}{100}\right) \cdot \%w$$

dove:

- m_A = massa aggregati in *kg*
- m_w = massa d'acqua in *kg*
- $\%w$ = contenuto d'acqua rispetto alla massa di aggregati e cemento
- \emptyset_f = diametro fustella in *m*
- $\%c$ = contenuto di cemento rispetto alla massa di soli aggregati

Le miscele, inizialmente composte da soli aggregati e acqua, sono state preparate tra le 16 e le 24 h antecedenti la compattazione in pressa a taglio giratoria, in modo da permettere all'acqua aggiunta di distribuirsi in maniera omogenea all'interno della miscela. Nel periodo compreso tra le 16 e le 24 h, le miscele sono state collocate e sigillate all'interno di sacchetti in plastica per evitare l'evaporazione del quantitativo di acqua miscelato (Figura 7).

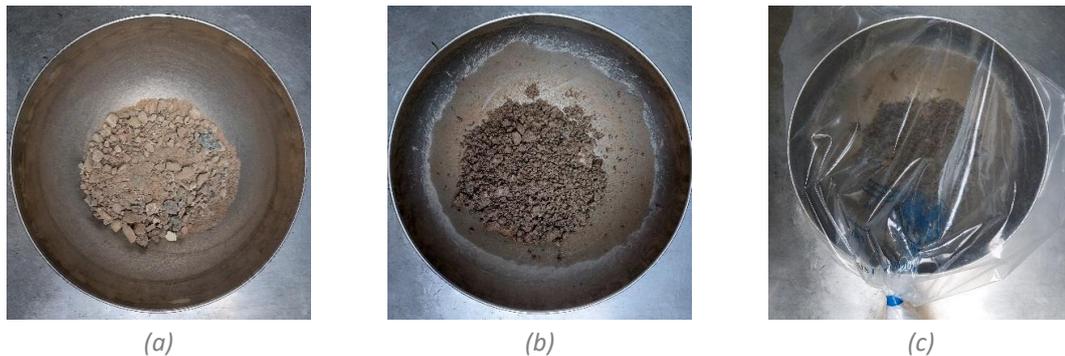


Figura 7 - Sequenza di preparazione delle miscele: (a) miscela secca, (b) miscela umidificata e (c) fase di omogeneizzazione dell'umidità all'interno della miscela.

Prima della compattazione di ogni singolo strato, è stato aggiunto il cemento alla miscela preparata il giorno precedente e il composto è stato miscelato per circa 5 min, fino al raggiungimento di una distribuzione omogenea del cemento all'interno della miscela di aggregati e acqua.

La massa di cemento da aggiungere alla miscela è stata così valutata:

$$m_C = m_A \cdot \left(1 + \frac{\% c}{100}\right)$$

dove:

- m_A = massa aggregati in *kg*
- m_C = massa di cemento in *kg*
- $\% c$ = contenuto di cemento rispetto alla massa di soli aggregati

CONFEZIONAMENTO PROVINI MEDIANTE PRESSA A TAGLIO GIRATORIA

Tutti i provini cilindrici della sperimentazione sono stati compattati mediante pressa a taglio giratoria, con l'obiettivo di raggiungere una densità uguale o prossima a quella Proctor (paragrafo 4.2.1). Diversamente dal costipamento Proctor, l'azione costipante della pressa a taglio giratoria non avviene mediante applicazione di carichi impulsivi, bensì attraverso

l'applicazione di una pressione costante con contemporanea rotazione della fustella al cui interno è posta la miscela, rotazione che avviene attorno al proprio asse con inclinazione rispetto alla verticale di $1,25^\circ$. La combinazione tra pressione e inclinazione della fustella genera un'azione di taglio sul materiale che consente la riorganizzazione interna degli aggregati costituenti la miscela, simulando l'azione in situ dei rulli compattatori (Figura 8).

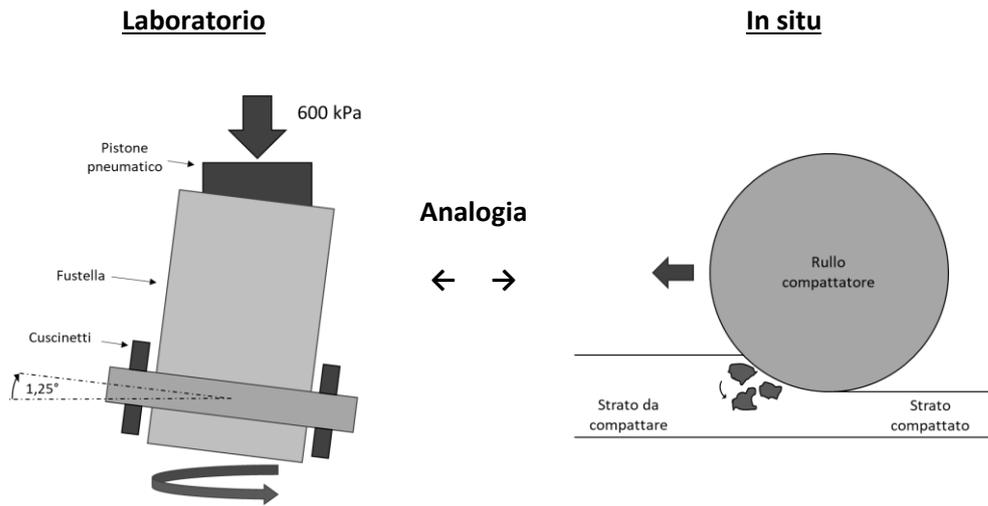


Figura 8 - Schema di funzionamento della "Pressa a taglio giratoria"

Nel presente studio è stata utilizzata la pressa "SuperPave Gyratory compactor", modello AFGC125X prodotta da PINE, la quale permette di confezionare campioni in due modalità, in base al numero di giri preselezionato oppure in base all'altezza specificata, entrambe utilizzate nel corso della sperimentazione (Figura 9).

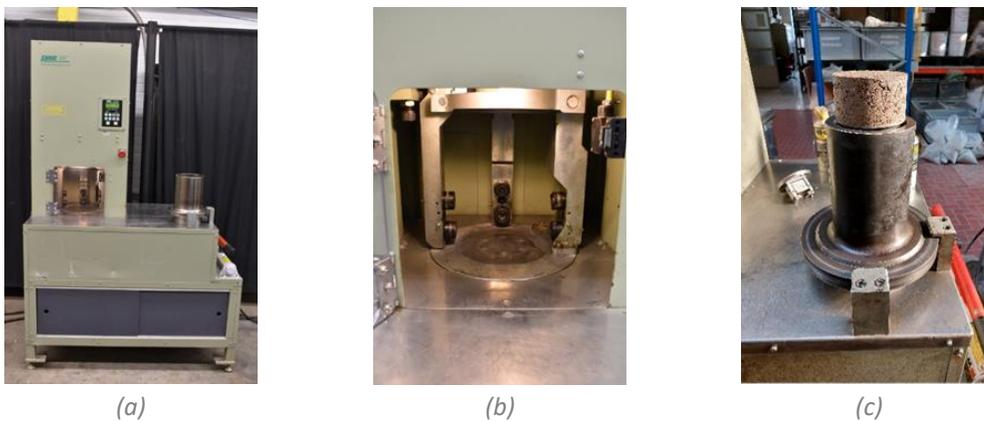


Figura 9 - Pressa a taglio giratoria: (a) macchinario complessivo, (b) sede inserimento fustella di compattazione ed (c) estrusore idraulico del campione.

Nel presente lavoro di tesi, sono stati impostati i seguenti parametri di compattazione:

- Pressione: 600 kPa (costante)
- Velocità angolare fustella: 30 giri/min
- Inclinazione rispetto alla verticale: 1,25 °

In primo luogo, sono stati confezionati dei campioni di prova, da 100 mm e 150 mm, al fine di determinare il numero di giri medio da utilizzare per il confezionamento dei provini da sottoporre alla caratterizzazione meccanica. In tale occasione è stata utilizzata la macchina nella modalità “ad altezza”, ricavando il numero di giri necessari per il raggiungimento dell’altezza di 50 mm. Quest’ultimo è stato determinato per tentativi, valutando quale valore consentisse di raggiungere la densità Proctor di riferimento. In definitiva, per ciascuno strato è stato stabilito un valore pari a 40 giri per la miscela con aggregato naturale e 50 per la miscela con aggregato riciclato.

La miscela, preparata come descritto al paragrafo precedente, è stata introdotta all’interno della fustella e sottoposta al costipamento meccanico, avendo cura di interporre un elemento di carta filtro tra i fondelli e il materiale al fine di evitare danneggiamenti del provino durante la rimozione dei fondelli. I dettagli relativi alle altezze dei provini compattati sono stati riportati negli allegati (Allegato 1, Allegato 2, Allegato 3 e Allegato 4).

STOCCAGGIO E MATURAZIONE DEI PROVINI

Con i metodi discussi precedentemente, per ogni configurazione geometrica e tipologia di miscela sono stati confezionati 5 campioni identici che, dopo il costipamento, sono stati inseriti in fustelle cilindriche di plastica per prevenire eventuali danneggiamenti durante gli spostamenti (Figura 10).



Figura 10 - Fustelle cilindriche utilizzate per la fase di stoccaggio

I provini sono stati sigillati in buste impermeabili e riposti all'interno di una camera umida per preservare l'umidità e consentire al materiale di maturare correttamente per 7 giorni prima di essere sottoposto a prova (Figura 11).



Figura 11 - Provini di diametro 100 mm sigillati dopo il confezionamento

4.2. METODI

4.2.1. COSTIPAMENTO PROCTOR

L'acqua presente all'interno dei materiali granulari forma una pellicola sulla superficie dei grani che, sotto l'azione meccanica di costipamento, riduce l'attrito tra di essi e ne favorisce il movimento. Se da un lato l'acqua funziona da lubrificante per i grani, dall'altro, nel caso in cui il contenuto d'acqua sia eccessivo, può assumere un comportamento a tutti gli effetti opposto, divenendo un ostacolo per il costipamento stesso. Tale fenomeno è ben descritto dalla curva Proctor, ottenuta diagrammando la densità secca ρ_d in funzione del contenuto d'acqua della miscela (w) per ottenere, fissata l'energia di compattazione, il valore di w che massimizza la densità secca (Figura 12).

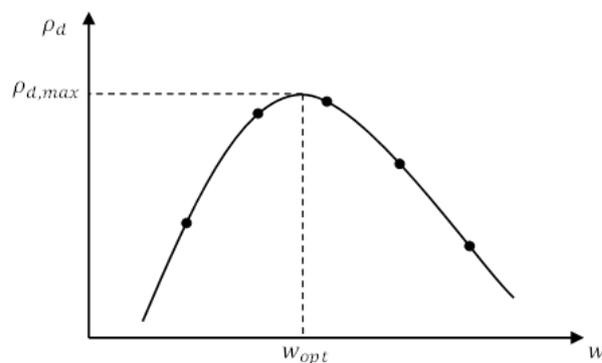


Figura 12 - Curva Proctor

La prova Proctor è stata eseguita seguendo le indicazioni della *UNI EN 13286-2* nella variante “modificata”. In particolare, il giorno precedente al test sono state preparate le miscele secche di aggregati, 5.5 kg per ognuna di esse, secondo la curva granulometrica scelta in fase di progetto della sperimentazione. Successivamente è stata aggiunta a ogni miscela l’acqua al fine di ottenere dei contenuti compresi tra il 5,5% e l’11,5% per la miscela con aggregato riciclato e tra il 3,5% e il 9,5% per la miscela di aggregati naturali, con intervalli dell’1,5%. Una volta umidificato il materiale, questo è stato riposto in sacchetti di plastica e sigillato per evitare l’evaporazione dell’acqua aggiunta (Figura 13). Il giorno seguente, prima di eseguire il test, a ogni miscela è stato aggiunto il 3% di cemento rispetto alla massa di soli aggregati seguita da una miscelazione manuale di circa 5 minuti.

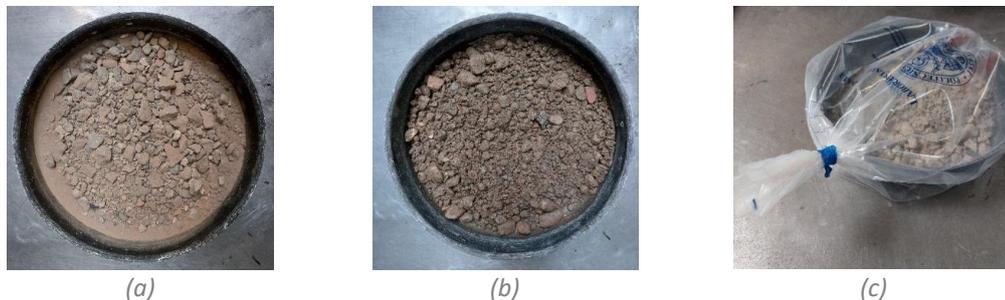


Figura 13 - Umidificazione delle miscele per lo studio Proctor: (a) miscela secca di aggregati, (b) miscela umidificata e (c) fase di omogeneizzazione dell’umidità all’interno della miscela

Per la prova di costipamento in oggetto è stata utilizzata la fustella di tipo B prevista dalla normativa di riferimento, avente diametro pari a 150 mm e altezza pari a 120 mm e applicando 56 colpi per ogni strato (Figura 14 e Figura 15).



Figura 14 - Fase di esecuzione dello studio Proctor

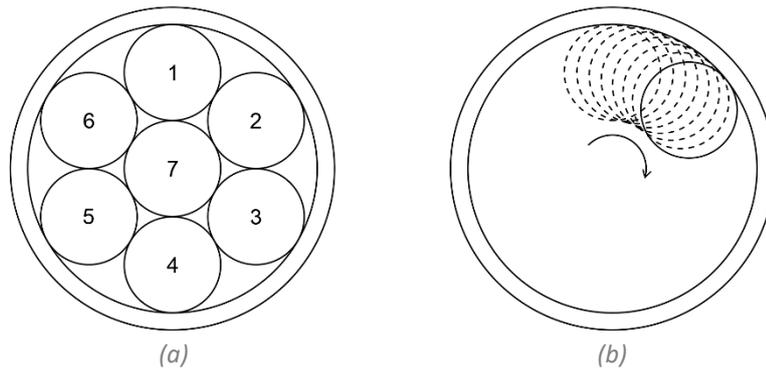


Figura 15 - Distribuzione dei colpi: (a) distribuzione dei colpi per singola configurazione, (b) sovrapposizione della posizione del colpo 1 risultante dalle 8 diverse configurazioni (rotazioni)

Compattati i 5 strati, è stato rimosso il collare e il materiale in eccesso al fine di ottenere una superficie perfettamente (o quasi) livellata in corrispondenza della circonferenza superiore della fustella (Figura 16).



Figura 16 - Campione (a) al termine del costipamento e (b) dopo la rimozione del materiale in eccesso

La densità secca è ottenuta mediante la seguente relazione:

$$\rho_d = \frac{(m_2 - m_1) \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right)}{V_f}$$

dove:

- m_1 = massa della fustella in kg
- m_2 = massa della fustella contenente il materiale compattato in kg
- w = contenuto d'acqua rispetto alla massa di aggregati e cemento in %
- V_f = volume della fustella (escluso il collare) in m^3

4.2.2. TEST DI RESISTENZA A COMPRESSIONE

Dopo 7 giorni di maturazione, i provini sono stati sottoposti alla prova di compressione semplice non confinata per valutare la resistenza a compressione, indicata nella letteratura inglese *Unconfined Compressive Strength (UCS)*. La macchina di prova è costituita da un dispositivo di carico, una cella di carico e da trasduttori della deformazione (LVDT). Il campione è sollecitato mediante applicazione di una pressione uniforme trasmessa da due piastre rigide, una mobile (collegata al pistone) e una fissa di contrasto. Il dispositivo di carico permette lo spostamento del pistone in modo da controllare la forza trasmessa al provino (prova in controllo di forza) o, come nel caso della presente sperimentazione, la velocità di avanzamento (prova in controllo di spostamento); cella di carico e LVDT sono, invece, dei dispositivi necessari a misurare rispettivamente la forza applicata e lo spostamento della testa del campione (Figura 17).

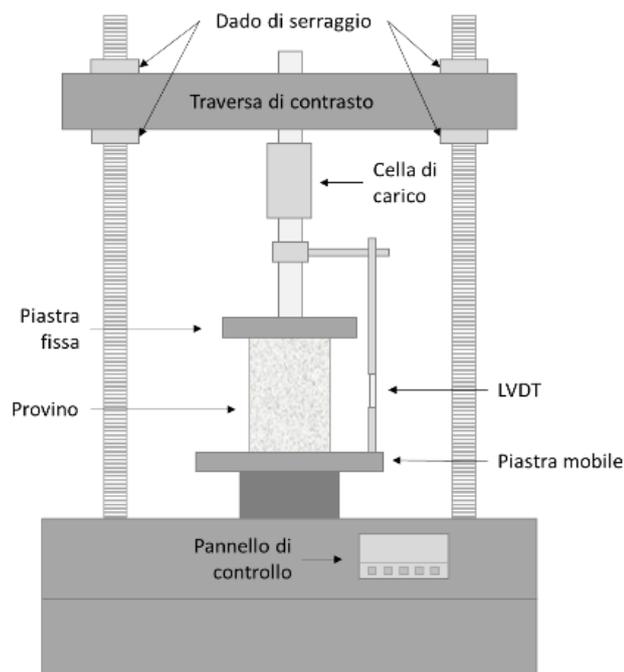


Figura 17 - Pressa in configurazione compressione non confinata

Nel caso ideale, considerando un materiale elastico-lineare, omogeneo, isotropo e in assenza di attriti tra piastra di carico e provino, applicando una forza alla piastra di carico si

indurrebbe uno stato di tensione mono-assiale, per cui, su ogni sezione circolare avremmo una tensione pari a:

$$\sigma = \frac{F}{A_{sezione}}$$

dove:

- σ = tensione normale
- F = forza applicata dalla pressa registrata dalla cella di carico
- $A_{sezione}$ = area della sezione del provino

Eseguendo un test di resistenza a compressione si ottiene la forza massima registrata dalla cella di carico (F_{max}), determinando, mediante l'equazione precedente, la corrispondente tensione massima di compressione, ovvero la resistenza a compressione ($\sigma_{c,max}$) (Figura 18).

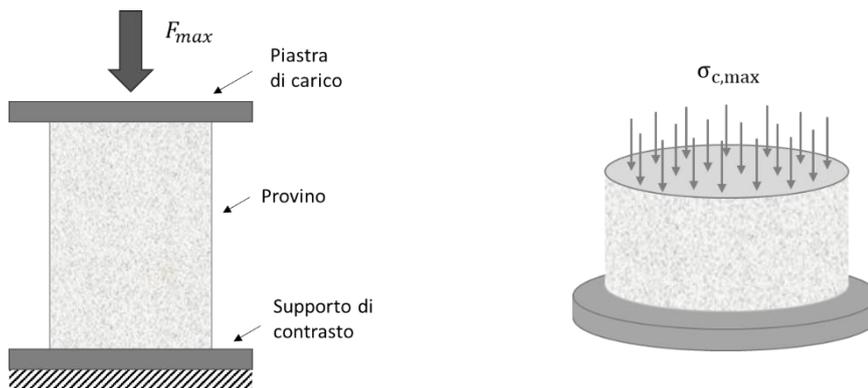


Figura 18 - Schema di carico del provino

Inducendo uno stato di tensione mono-assiale, oltre alla deformazione di compressione nella direzione di carico, si generano delle deformazioni di trazione nel piano della sezione che portano alla formazione di fessure parallele all'asse del provino per raggiungimento della massima deformazione ammissibile dal materiale.

Nell'indagine sperimentale sono state impiegate due presse meccaniche per l'esecuzione dei test. Nel "Laboratorio di Materiali Stradali" del "Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture" (DIATI), è stato possibile eseguire i test sui provini composti con aggregati da CDW e naturali aventi diametro da 100 mm e altezze pari a 150 mm e 200 mm con una pressa di portata massima 50 kN (Figura 19).



Figura 19 - Esecuzione del test di compressione su provino di diametro 100 mm

I provini di diametro 100 mm restanti e quelli aventi diametro 150 mm sono stati testati presso il “Laboratorio MastrLAB” del “Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica” (DISEG), utilizzando una pressa statica con cella di carico da 500 kN (Figura 20).



Figura 20 - Esecuzione del test di compressione su provini di diametro 150 mm

Le prove di carico sui campioni sono state eseguite in controllo di spostamento, ovvero con avanzamento della piastra di carico a velocità costante pari a 0,50 mm/min.

La pressa da 50 kN della Eurotronic Tecnotest acquisisce la forza applicata al provino, misurata dalla cella di carico, con una frequenza di 5Hz (una lettura ogni 0,2 s) e, con la stessa frequenza, i valori di spostamento/deformazione misurati dal LVDT montato esternamente al campione. Tali misure iniziano ad essere registrate nel momento in cui si supera la soglia minima di carico pari a 40 N, corrispondente allo 0,08 % del carico massimo nominale della pressa.

Nell'esperimento è stata utilizzata anche una pressa da 500 kN presente presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG), che registra i valori di forza e spostamento con una frequenza media di 80 Hz (una lettura ogni circa 0,0125 s),

mentre l'inizio di registrazione dei dati avviene quando si supera la soglia minima di carico pari a 500 N, corrispondente allo 0,1% del carico massimo nominale.

4.2.3. ANALISI DEI DATI

L'attrezzatura utilizzata per i test di compressione acquisisce nel tempo misure di forza e spostamento, trasformate a posteriori rispettivamente in tensioni (come anticipato al paragrafo 4.2.2) e deformazioni, quest'ultime valutate mediante il rapporto tra spostamento della testa del campione (d_{testa}) e l'altezza del campione misurata prima dell'esecuzione della prova di compressione (h_{7gg}).

Riportando i risultati in termini di sforzi e deformazioni in un diagramma, si ottiene una curva teorica di forma simile a quella riportata in Figura 21. Tale curva è generalmente composta da una parte iniziale che rappresenta la fase di assestamento, superata la quale il campione assume un comportamento prossimo a quello elastico lineare; successivamente si assiste ad una riduzione della pendenza fino al raggiungimento del massimo sforzo. Una volta raggiunto quest'ultimo, la tensione inizia a ridursi fino a rottura. In questa sperimentazione, la prova è terminata col raggiungimento di un decremento di forza compreso tra il 20 e il 40% rispetto al carico massimo raggiunto.

Le curve reali sono state post-elaborate per rimuovere la zona di assestamento, individuando così una nuova origine rispetto alla quale valutare le deformazioni. Tale operazione è stata eseguita linearizzando il tratto elastico mediante l'ausilio di un foglio di calcolo.

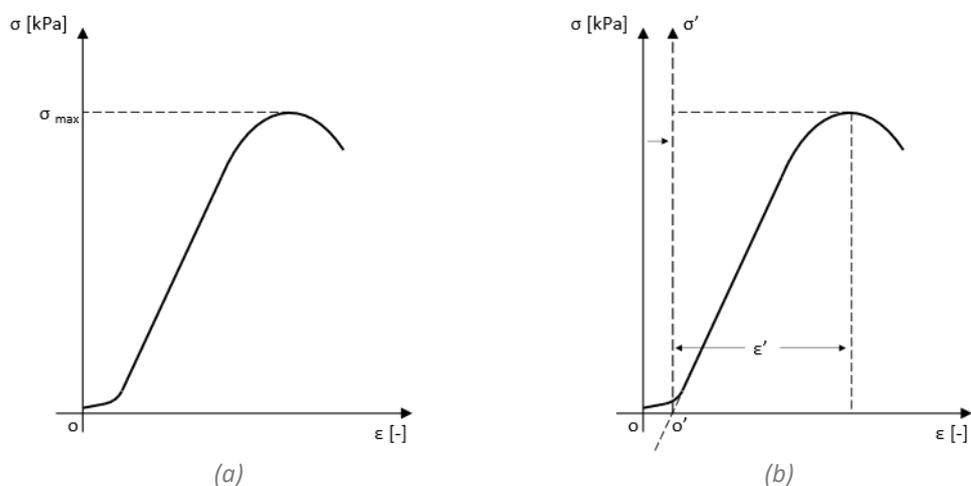


Figura 21 – (a) curva sforzo deformazione e (b) schema di traslazione dell'asse delle ordinate

Per il raggiungimento degli obiettivi della sperimentazione, la resistenza a compressione dei campioni è sicuramente il risultato di maggiore rilevanza; tuttavia, utilizzando le curve sforzo-deformazione ottenute precedentemente, è possibile ricavare ulteriori interessanti informazioni circa il modulo elastico, l'energia di rottura e la deformazione in corrispondenza della resistenza massima. Data la natura della curva, si individuano due differenti moduli di elasticità, tangente e secante: il primo restituisce informazioni riguardo la rigidità del materiale quando sottoposto ad uno stato tensionale ricadente nel campo elastico lineare, mentre il secondo rispecchia la rigidità nel caso di applicazione di uno stato tensionale prossimo a quello di massima resistenza. L'energia di rottura, calcolata come l'area sottesa al diagramma sforzo-deformazione compresa tra l'origine corretta e la deformazione alla tensione massima, è un indicatore che esprime la capacità di un materiale di assorbire energia fino al raggiungimento della resistenza massima; ciò significa che, a parità di resistenza massima raggiunta, una minore energia di rottura indica una rottura più fragile. Infine, la deformazione in corrispondenza della resistenza massima è un parametro che indica se la rottura avviene per piccole o grandi deformazioni.

4.2.4. VALUTAZIONE DEL TIPO DI ROTTURA

Come già anticipato, la prova di compressione non confinata, nel caso ideale, genera uno stato di tensione monoassiale provocando una contrazione assiale del campione (direzione di carico) e un'espansione lungo le direzioni ortogonali. La presenza delle forze di attrito, che si instaurano tra le piastre di carico e il campione, contrasta tale espansione in prossimità delle estremità, per cui il campione cilindrico, portato a rottura, assume idealmente una forma "a clessidra".

Coerentemente con quanto sopradetto, la norma *UNI EN 13286-41* ritiene soddisfacente la rottura dei campioni che, successivamente al test, presentano una forma simile a quelle riportate in Figura 22. Una rottura non soddisfacente potrebbe derivare da problemi legati al confezionamento dei provini, quali, ad esempio, l'eccessiva eterogeneità del materiale e il mancato parallelismo delle estremità, oppure da un problema di centraggio del provino rispetto all'asse di carico del macchinario di prova. Secondo la medesima normativa, le rotture non soddisfacenti possono essere identificate dagli esempi riportati di Figura 23.

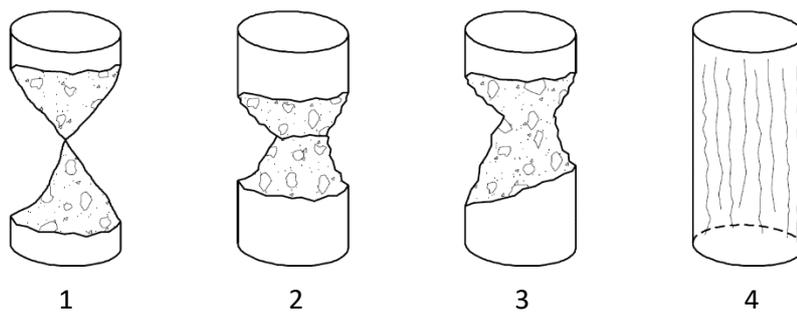


Figura 22 - Esempi di rotture per compressione soddisfacenti di provini cilindrici
(UNI EN 13286-41 fig. 3)

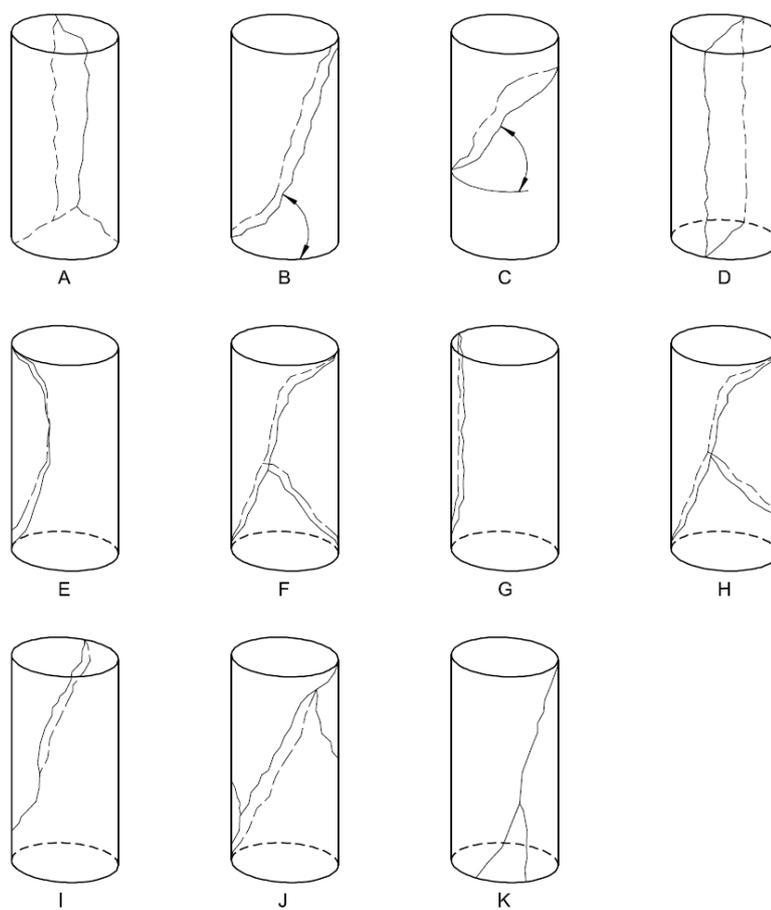


Figura 23 - Esempi di rotture per compressione non soddisfacenti di provini cilindrici
(UNI EN 13286-41 fig. 4)

5. RISULTATI

5.1. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Come anticipato al capitolo 3, per ogni tipo di aggregato (CDW o NAT) e di geometria del campione (diametro 100 mm con altezze da 55 a 200 mm o diametro 150 mm con altezze da 100 a 200 mm), sono stati sottoposti a prova 5 campioni identici. In questo paragrafo sono riportati gli istogrammi con i risultati dei valori medi di resistenza a compressione, deformazione in corrispondenza della resistenza massima, modulo secante, modulo tangente ed energia di rottura che sono stati di seguito commentati.

Analizzando i valori di resistenza a compressione medi di cui alla Figura 24-a, si riscontra in modo evidente, per entrambe le miscele, quale sia stata l'influenza della geometria del provino. I valori ottenuti sono compresi tra 2,30 MPa ($d = 100$ mm; $h = 200$ mm) e 7,09 MPa ($d = 100$ mm; $h = 55$ mm) per la miscela composta da aggregati riciclati e tra 2,95 MPa ($d = 100$ mm; $h = 200$ mm) e 11,90 MPa ($d = 100$ mm; $h = 55$ mm) per quella composta da aggregati naturali. Nello specifico, la resistenza a compressione decresce all'aumentare dell'altezza del campione, mentre si riscontra una crescita dei valori all'aumentare del diametro. Considerata la snellezza h/d , i risultati sono coerenti con l'ipotesi di partenza che supponeva la dipendenza tra UCS e snellezza, e, in particolare, che l'UCS diminuisse al crescere della snellezza stessa. Mettendo a confronto le due miscele, i risultati evidenziano che in quelle con l'aggregato naturale, all'aumentare dell'altezza del campione, il valore di resistenza a compressione decresce più velocemente rispetto a quelle di aggregato riciclato (75 % contro 68%).

La deformazione in corrispondenza dei valori di UCS (Figura 24-b) è influenzata dalla geometria in modo del tutto simile a quanto riscontrato per i valori di UCS, mentre la tipologia di aggregato sembrerebbe influire solo marginalmente sui valori ottenuti. Mediamente i valori più alti sono associati ai campioni con aggregato riciclato e campioni tozzi (3,41%), mentre i più bassi a quelli con aggregato naturale e campioni più snelli (0,87%).

RISULTATI

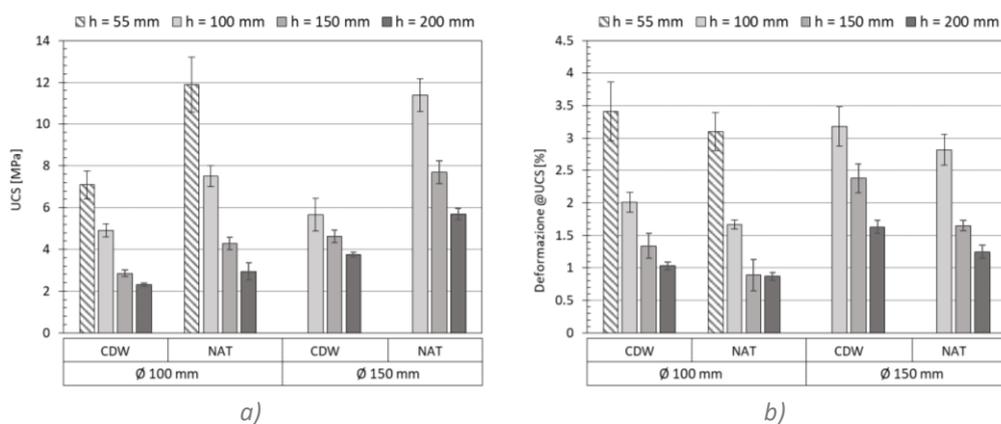


Figura 24 - Valori medi di a) UCS e b) deformazione a resistenza massima con annessi valori di deviazione standard espressi tramite barre di errore

Per quanto riguarda i moduli di elasticità (Figura 25), in generale, il diametro non sembra avere effetti significativi sui loro valori, mentre sono presenti delle oscillazioni al variare dell'altezza che sono però apparentemente casuali. Le miscele con aggregato naturale presentano valori di modulo che sono circa il doppio rispetto a quelle con aggregato riciclato, sia nel caso dei moduli tangenti che secanti; i moduli tangenti oscillano mediamente tra 250 e 300 MPa (CDW) e tra 550 e 600 MPa (NAT), mentre i moduli secanti tra 200 e 225 MPa (CDW) e tra 425 e 450 MPa (NAT).

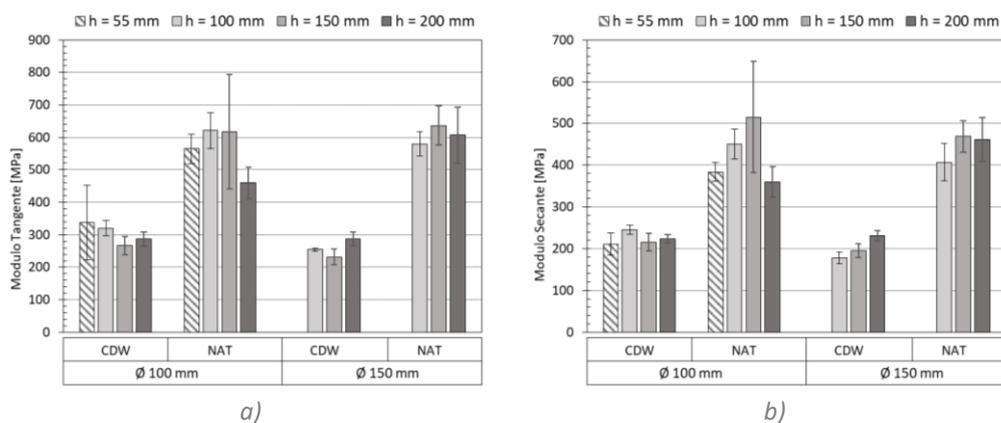


Figura 25 - Valori medi dei moduli di elasticità: a) tangente e b) secante con annessi valori di deviazione standard espressi tramite barre di errore

La Figura 26 contiene l'istogramma dei valori di energia di rottura al variare dell'altezza, del diametro e del materiale. In generale, l'energia di rottura risulta estremamente influenzata dall'altezza del campione: ciò si verifica poiché l'energia dipende dalla resistenza e dalla

deformazione in corrispondenza di quest'ultima. Tali grandezze dipendono a loro volta, in maniera consistente, dall'altezza, motivo per cui la loro combinazione dà un effetto assai maggiore; ad esempio, considerando i provini di diametro 100 mm con aggregato naturale, si passa da valori di 16 a 238 kPa·mm/mm.

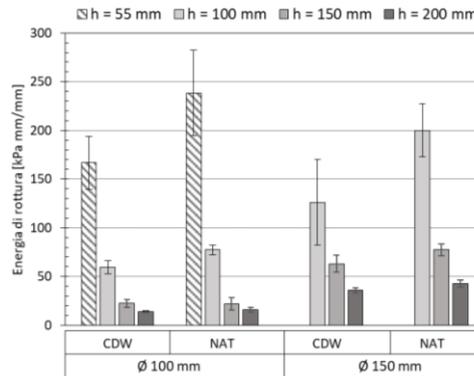


Figura 26 - Valori medi dell'energia di rottura con annessi valori di deviazione standard espressi tramite barre di errore

Negli Allegato 5, Allegato 6, Allegato 7 e Allegato 8 si riportano le tabelle riassuntive utilizzate per la generazione degli istogrammi mostrati, all'interno delle quali sono presenti i valori medi dei parametri analizzati corredati della deviazione standard e del coefficiente di variazione. Inoltre, negli Allegato 9, Allegato 10, Allegato 11 e Allegato 12 sono riportate le curve sforzo-deformazione dei provini, raggruppate per combinazione geometrica e materiale in singoli grafici, in modo da apprezzare visivamente le variazioni dei risultati dei campioni dello stesso gruppo.

5.2. TIPOLOGIA DI ROTTURA

A valle dei test di compressione, per ognuno dei provini testati, sono state acquisite le immagini del campione a rottura, utili per considerare eventuali anomalie dei risultati ottenuti con la tipologia di rottura riscontrata. È stata eseguita un'analisi delle immagini acquisite (Tabella 9 e Tabella 10) volta a riassumere sinteticamente lo stato dei campioni nelle seguenti fasi: (I) subito dopo la prova di compressione (campioni posti ancora all'interno

RISULTATI

del macchinario di prova), (II) dopo la rimozione dal macchinario, (III) dopo lo scorticamento della superficie laterale, sulla base delle indicazioni riportate al paragrafo 4.2.4.

I provini di diametro 100 mm rientrano tutti nei casi di rottura soddisfacente, presentando, sia in fase I sia in fase II, un aspetto riconducibile alla tipologia 4; in fase III, invece, i provini presentavano un aspetto simile alla situazione 2, ad eccezione della configurazione A ($h = 55$ mm) che risultava simile alla situazione 3. I provini da 150 mm hanno, invece, presentato alcuni casi di rottura non soddisfacente di tipo G nella configurazione A ($h = 100$ mm), per i quali sono stati registrati valori di UCS al di sotto del 90% del valore medio dei rimanenti campioni dello stesso gruppo. Anche la densità secca di tali campioni risulterebbe, seppur lievemente, minore rispetto al valore medio del gruppo, ipotizzando una possibile correlazione tra questi due eventi. I rimanenti campioni di diametro da 150 mm sembrerebbero, invece, presentare tutti una rottura di tipo soddisfacente.

A scopo di esempio, si riportano nella Figura 27, Figura 28 e Figura 29 le immagini di alcuni dei campioni testati.

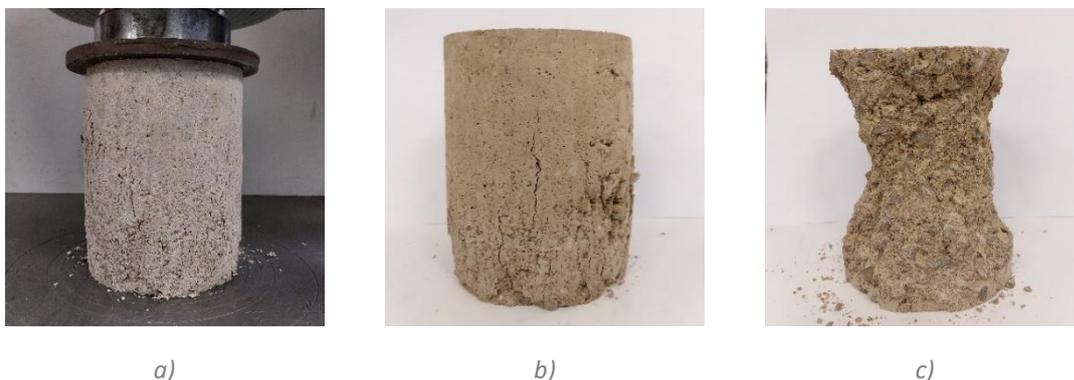


Figura 27 - Rottura campione NAT 150 C 4: (a) fase I, (b) fase II e (c) fase III

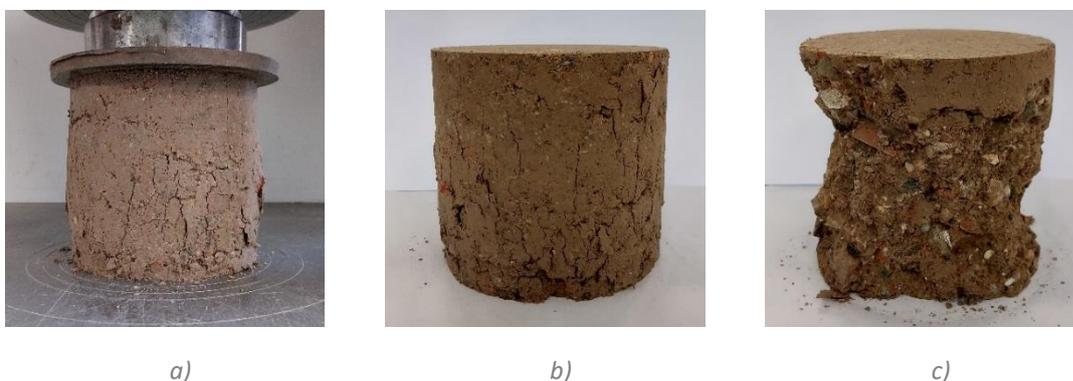


Figura 28 - Rottura campione CDW 150 B 1: (a) fase I, (b) fase II e (c) fase III



a)



b)



c)

Figura 29 - Rottura campione CDW 100 C 3: (a) fase I, (b) fase II e (c) fase III

6. ANALISI DEI RISULTATI

6.1. EFFETTO DELLA SNELLEZZA

Per la valutazione dell'effetto della snellezza sono stati presi in considerazione i valori medi di resistenza non confinata di ogni set di campioni prodotti. I risultati mostrano che esiste una significativa dipendenza della resistenza dalla snellezza dei campioni, riscontrando che, all'aumentare del rapporto di snellezza, la resistenza a compressione decresce. I grafici riportati in Figura 30 e Figura 31 mostrano che l'effetto del diametro ha un ruolo marginale sulla variazione dei valori di resistenza, comportamento riscontrato in entrambe le tipologie di aggregato utilizzato, soprattutto nelle miscele con aggregato naturale.

Quando il rapporto di snellezza è fissato, l'aumento o la diminuzione di una delle due grandezze (altezza o diametro) comporta direttamente una variazione di volume, mantenendo invariata la forma del provino; detto ciò, considerato che gli andamenti di UCS, in funzione del rapporto di snellezza dei due diametri, tendono a sovrapporsi, dai risultati è possibile dedurre che i campioni presentano una scarsa sensibilità all'effetto scala.

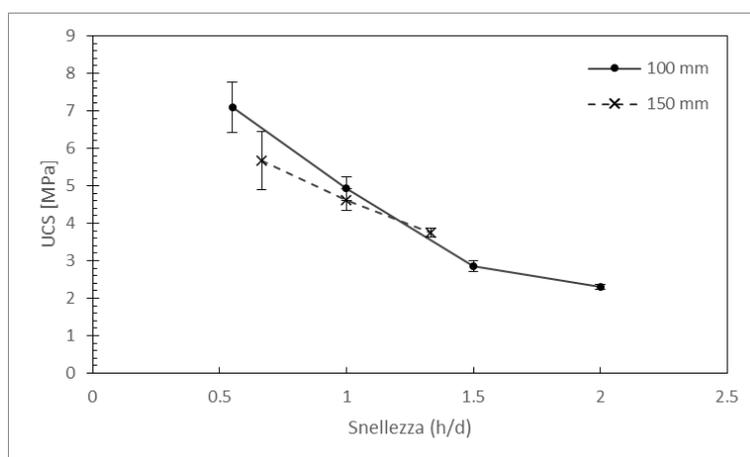


Figura 30 - Relazione tra valori medi di UCS e snellezza al variare del diametro con annessi valori di deviazione standard espressi mediante barre di errore – aggregato da CDW

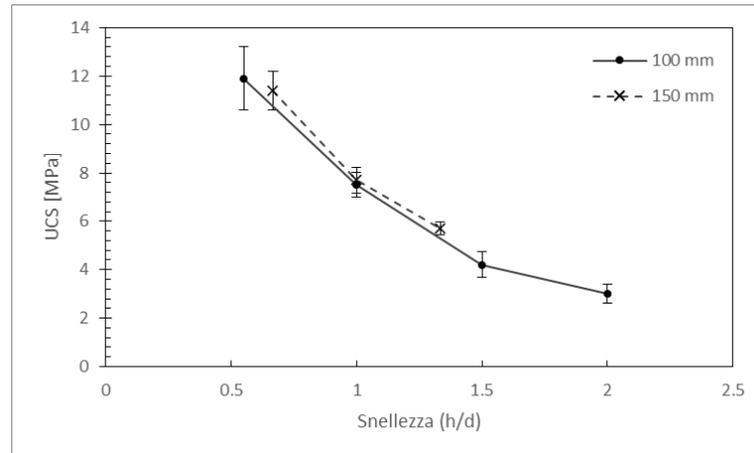


Figura 31 - Relazione tra i valori medi di UCS e snellezza al variare del diametro con annessi valori di deviazione standard espressi mediante barre di errore - aggregato NAT

L'andamento riscontrato è in linea con i risultati di *Rashidi & Ashtiani (2019)*, i quali hanno rilevato una riduzione di resistenza di circa 60% passando da un rapporto di snellezza 1 a 2 su provini cilindrici di misto cementato con aggregato naturale di origine calcarea di diametro 100 mm (Figura 32). Con i provini di diametro 150 mm, *Rashidi & Ashtiani (2019)* hanno riscontrato una riduzione del 15% passando da un rapporto di snellezza 1 a 1,3 (Figura 32), contro il 25% ottenuto nel presente studio.

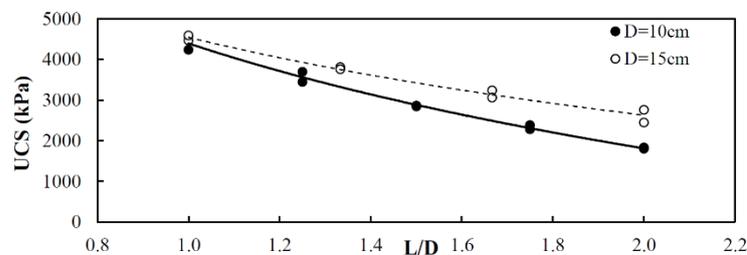


Figura 32 - Relazioni UCS - snellezza ottenute da *Rashidi & Ashtiani (2019)* per l'aggregato naturale

I valori medi in questa sperimentazione sono il 70 % superiori rispetto a quelli ottenuti da *Rashidi & Ashtiani (2019)*. La differenza tra i risultati di resistenza è attribuibile alle diverse caratteristiche delle miscele, procedure di formazione dei provini e metodologie di prova. Nel loro studio le miscele sono state stabilizzate con il 3% di cemento di classe non specificata e con contenuto d'acqua pari al 6,8% a cui corrisponde una densità secca massima di 2,22 g/cm³ contro i 2,30 g/cm³ al 5% di contenuto d'acqua della presente sperimentazione; tale differenza di densità e contenuto d'acqua sono da imputare al tipo di aggregato impiegato.

Inoltre, il confezionamento è avvenuto secondo un metodo impulsivo simile alla compattazione Proctor, mentre il test di compressione è stato effettuato in controllo di deformazione, applicando una deformazione del 2%/min (contro $0,25 \div 1$ % /min). Tutti questi fattori influenzano direttamente la resistenza a compressione e potrebbero giustificare le differenze in termini di UCS riscontrate tra i due studi.

6.2. EFFETTO DELLA TIPOLOGIA DI AGGREGATO

Il tipo di aggregato utilizzato è chiaramente una delle variabili che più influisce sulla resistenza a compressione non confinata. Lo scheletro litico della miscela con aggregato da CDW, a causa della sua composizione, possiede caratteristiche meccaniche meno performanti rispetto a quelle della miscela composta da solo aggregato naturale, come chiaramente delineato nella Figura 33 e nella Figura 34. Infatti, nell'aggregato da CDW si ritrovano componenti come il laterizio che possiedono una bassa resistenza alla frammentazione, costituendo di fatto l'elemento debole della matrice.

Considerando i provini di diametro 100 mm, le miscele con aggregato riciclato, rispetto a quelle con aggregato naturale, presentano, nel caso di provini tozzi ($h/d = 0,55$), una riduzione del 40 % di resistenza, mentre nel caso di provini snelli ($h/d=2$) la riduzione scende al 23%.

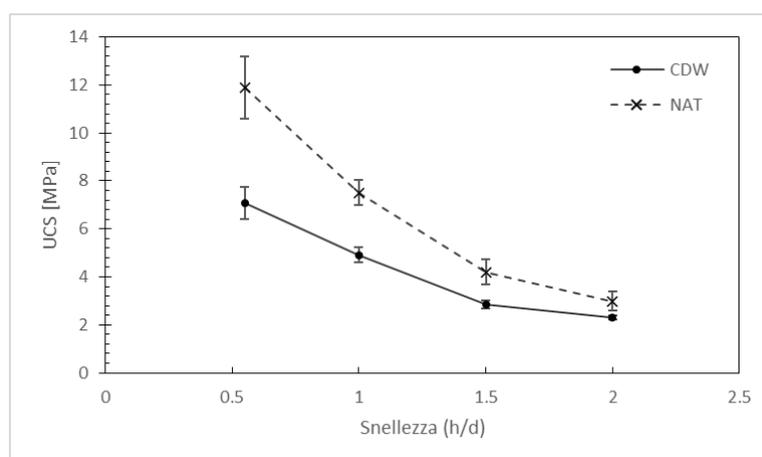


Figura 33 - Relazione tra valori medi di UCS e snellezza al variare dell'aggregato con annessi valori di deviazione standard espressi mediante barre di errore - dia. 100 mm

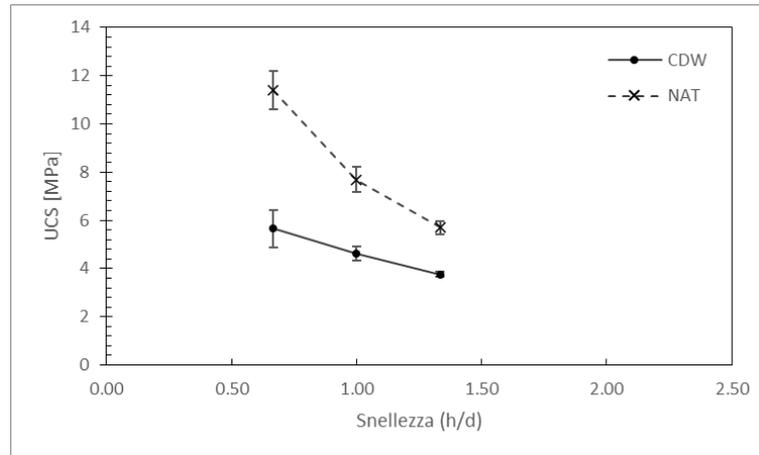


Figura 34 - Relazione tra valori medi di UCS e snellezza al variare dell'aggregato con annessi valori di deviazione standard espressi mediante barre di errore - dia. 150 mm

6.3. EFFETTO DELLA DENSITÀ

Dall'analisi dei dati sperimentali, sembrerebbe esserci una correlazione tra la resistenza a compressione e la densità secca del campione, che risulta dipendere dal materiale e dalla snellezza. In Figura 35, sono riportati i casi in cui si riscontra la migliore e la peggiore correlazione. Le linee di tendenza dei dati sperimentali, nonostante il livello di dispersione, evidenziano che, all'aumentare della densità secca, si ha un incremento della resistenza a compressione, comportamento riscontrato per entrambe le miscele e per ogni configurazione geometrica considerata.

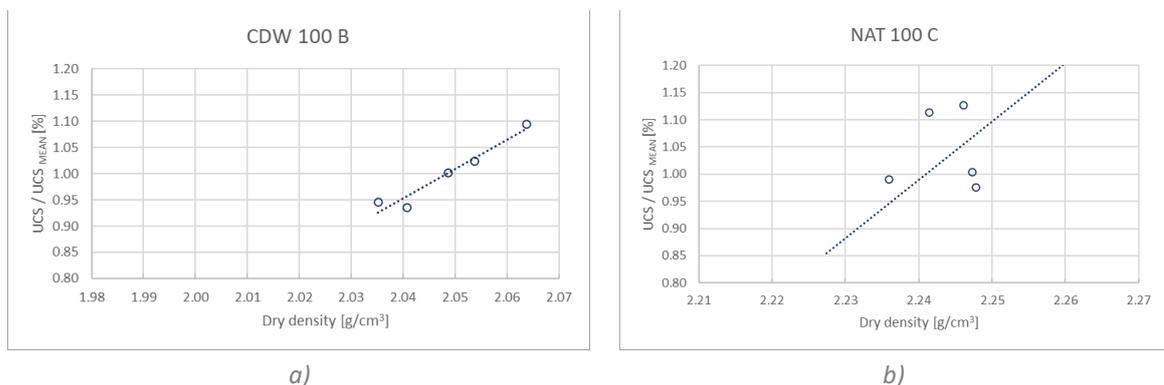


Figura 35 - Esempi variazione dei valori di UCS (normalizzata rispetto alla media) in funzione della densità secca: (a) CDW 100 B e (b) NAT 100 C

Inoltre, aggregando i risultati sperimentali, sembrerebbe che piccole variazioni di densità dipendano dalla geometria dei campioni. In particolare, i grafici in Figura 36 e Figura 37 dimostrano che i provini di diametro 150 mm presentano una densità secca superiore rispetto a quelli di diametro 100 mm. Tale comportamento sarebbe riconducibile all'effetto parete, ossia alla resistenza offerta dalle pareti della fustella che contrastano la riorganizzazione delle particelle durante la fase di costipamento del materiale. L'effetto parete decresce al diminuire del rapporto tra la superficie laterale della fustella (S_L) e il volume del campione (V), di conseguenza, all'aumentare del diametro del provino, l'effetto parete diminuisce. Inoltre, è possibile constatare valori di densità secca inferiori per rapporti di snellezza molto bassi; ciò potrebbe essere attribuibile allo spessore del primo strato dei provini, fissato a 55 mm a causa dei limiti operativi della pressa a taglio giratoria. Tale strato, per il raggiungimento della densità secca, richiederebbe un numero di giri maggiore rispetto a quello medio determinato; congruentemente con quanto appena detto, dai grafici si osserva che tale effetto risulta essere più evidente nel caso di provini composti da un unico strato da 55 mm.

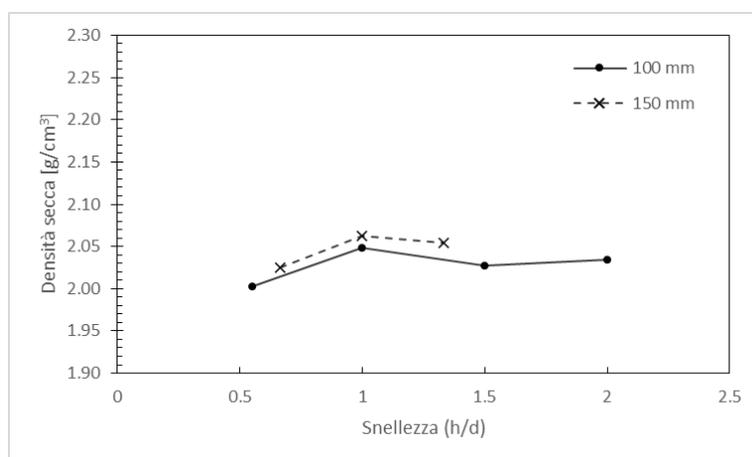


Figura 36 - Andamento dei valori medi di densità in funzione della snellezza - aggregato da CDW

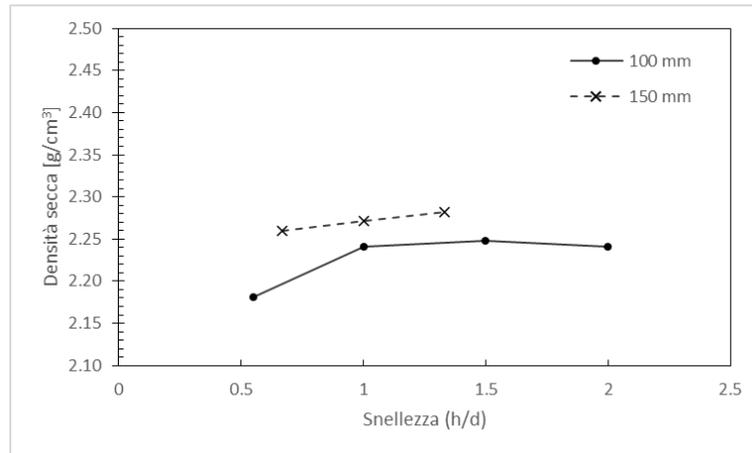


Figura 37 - Andamento dei valori medi di densità in funzione della snellezza - aggregato NAT

6.4. RELAZIONI RESISTENZA - GEOMETRIA

Come detto in precedenza, l'obiettivo del presente studio è di ottenere delle relazioni matematiche tra la resistenza a compressione e le variabili geometriche con le quali ricavare i coefficienti di conversione. Tali fattori consentirebbero di trasformare la resistenza a compressione in valori equivalenti riferiti a una differente configurazione geometrica; da un punto di vista pratico, sarebbe possibile convertire i valori limite di accettazione in fase di studio delle miscele di misto cementato.

6.4.1. ANALISI DI REGRESSIONE LINEARE E RELAZIONI MATEMATICHE

In prima battuta, mediante l'utilizzo della matrice di correlazione, sono state condotte delle analisi per comprendere quali variabili siano tra loro correlate. Sono stati valutati i coefficienti di correlazione (r) e i p -value dei test statistici ad essi associati rilevando, come atteso, una forte correlazione tra i valori di UCS e il rapporto di snellezza (h/d), sia nel caso di miscele con aggregato riciclato ($r = -0,946$; $p < 0,001$) sia nel caso di miscele con aggregato naturale ($r = -0,948$; $p < 0,001$); anche l'altezza presenta una correlazione significativa con l'UCS, ma ridotta se confrontata alla sua combinazione con il diametro.

Le relazioni matematiche sono state determinate tramite l'analisi di regressione lineare utilizzando "Jamovi", un software open-source e gratuito che mette a disposizione un foglio di calcolo statistico basato sul linguaggio R.

I valori di resistenza, se riportati in funzione della snellezza su un piano bi-logaritmico, assumono tendenzialmente un andamento di tipo lineare, comportamento valido sia per il NAT sia per il CDW; inoltre, considerato anche l'effetto della densità secca del campione sulla resistenza a compressione riscontrato al paragrafo 6.3, in termini matematici, il legame assunto si presenta nella seguente forma:

$$\ln(UCS) = a + b \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + c \cdot \rho_d$$

dove:

- a = intercetta
- b = coefficiente della variabile $\ln(H/D)$
- c = coefficiente della variabile densità secca (ρ_d)

L'analisi di regressione lineare è stata eseguita differenziando i dati per tipologia di aggregato; infatti, come si evince dai grafici nella Figura 33 e Figura 34, è presente un salto di prestazioni meccaniche dovuto alla diversa tipologia di aggregato utilizzato, motivo per il quale l'uso di un modello congiunto comporterebbe eccessive imprecisioni. Non è stata effettuata, invece, nessuna suddivisione tra i dati dei provini di diametro 100 e 150 mm, scelta che deriva dalle osservazioni sperimentali mostrate al paragrafo 6.1. I grafici nella Figura 30 e Figura 31, infatti, mostrano che, a parità di aggregato, gli andamenti resistenza-snellezza ottenuti per i due diametri tendono a sovrapporsi; di conseguenza, distinguere i dati in funzione del diametro, determinando così due modelli matematici distinti, non restituirebbe informazioni aggiuntive e significative ai fini dell'analisi condotta.

In Tabella 4 sono stati riportati i risultati dei parametri a, b e c ottenuti dall'analisi di regressione multipla condotta; per entrambi i modelli, CDW e NAT, sono stati ottenuti alti coefficienti di determinazione R^2 (Tabella 5) rispettivamente pari a 0,965 e 0,959, i quali indicano che oltre il 95% della variabilità dei valori di UCS può essere spiegata dal modello determinato, dunque, dalle variabili indipendenti adottate.

I test statistici eseguiti sulle singole variabili esplicative (t-test) mostrano, per entrambi i modelli, valori di p-value inferiori allo 0,001, indicando dunque la significatività delle singole variabili adottate per la determinazione delle relazioni matematiche. Globalmente, la bontà del modello è stata valutata effettuando invece un F-test, a cui risultano associati valori di p-value inferiori allo 0,001, sia per il modello NAT sia per il modello CDW; ciò consente di concludere che i modelli risultano essere statisticamente significativi per la descrizione del fenomeno indagato.

Tabella 4 – Coefficienti dei modelli di regressione lineare multipla e risultati dei test statistici sulle variabili indipendenti (t-test)

Coefficienti del modello					
	Predittore	Stima	SE	t	p-value
CDW	Intercetta	-6,082	1,0572	-5,75	< 0,001
	Densità secca	3,711	0,5194	7,14	< 0,001
	LN (h/D)	-0,897	0,0297	-30,21	< 0,001
NAT	Intercetta	-5,35	1,5382	-3,48	< 0,001
	Densità secca	3,25	0,6867	4,74	< 0,001
	LN (h/D)	-1,24	0,0474	-26,24	< 0,001

Tabella 5 - Misure di adattamento e risultati del test globale dei modelli (F-test)

Misure di adattamento del modello							
	R	R2	R ² corretto	Test globale del modello			
				F	gdl1	gdl2	p - value
CDW	0,984	0,967	0,965	461	2	31	< 0,001
NAT	0,979	0,959	0,957	398	2	34	< 0,001

In definitiva, i migliori modelli predittivi di resistenza a compressione semplice delle miscele di misto cementato considerate in questo studio sono le seguenti:

$$UCS_{CDW} = e^{-6,082 - 0,897 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + 3,711 \cdot \rho_d}$$

$$UCS_{NAT} = e^{-5,350 - 1,240 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + 3,250 \cdot \rho_d}$$

Nella valutazione dei fattori di conversione sono state utilizzate le relazioni matematiche a una sola variabile ricavate a partire dai modelli precedentemente descritti e utilizzando i valori medi di densità secca per le due tipologie di aggregato ($\rho_{d_{CDW}} = 2,036 \text{ g/cm}^3$; $\rho_{d_{NAT}} = 2,246 \text{ g/cm}^3$)

$$UCS_{CDW} = e^{1,474 - 0,897 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)}$$

$$UCS_{NAT} = e^{1,950 - 1,240 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)}$$

Le Figura 38 e Figura 39 mostrano come le relazioni matematiche soprariportate si adattano ai valori medi sperimentali delle differenti configurazioni geometriche. Inoltre, per l'aggregato naturale (Figura 39) è stata citata, a scopo di confronto, la relazione ottenuta da *Rashidi & Ashtiani (2019)* per il diametro 100 mm. In Figura 40 sono stati riportati, su un grafico con assi bi-logaritmici, i modelli ottenuti nel presente studio, dal quale è possibile apprezzare le differenze in termini di pendenza degli andamenti, ovvero della velocità di variazione dei risultati di resistenza a compressione all'aumentare del rapporto di snellezza.

$$\text{Rashidi \& Ashtiani (2019)} \quad UCS = 4,395 - 3,729 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right)$$

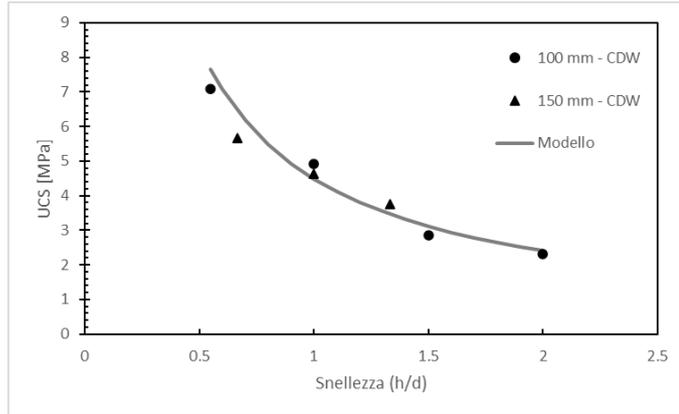


Figura 38 - Modello di resistenza per l' aggregato da CDW.

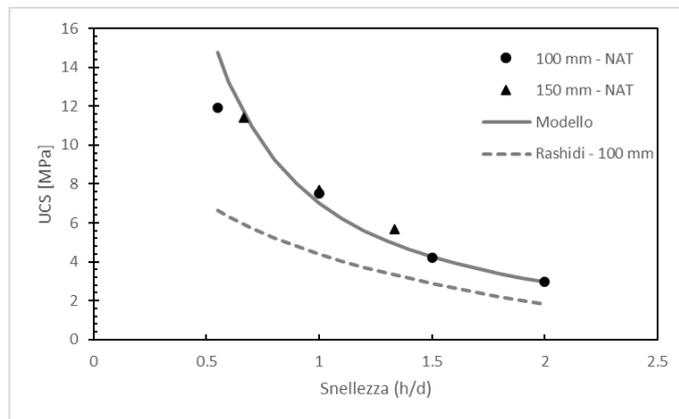


Figura 39 - Modello di resistenza per l' aggregato NAT e confronto con il modello proposto da Rashidi e Ashtiani (2019) per il diametro 100mm.

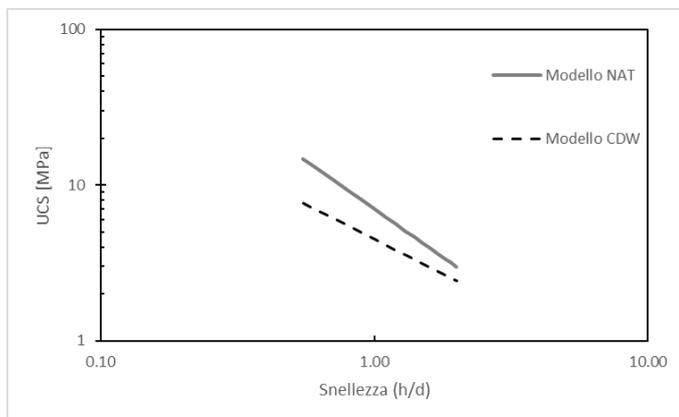


Figura 40 - Confronto dei modelli ottenuti in scala bi-logaritmica

6.4.2. FATTORI DI CONVERSIONE

Sulla base dei modelli ottenuti al paragrafo precedente (6.4.1), in Tabella 6 e Tabella 7 sono riportati i fattori di conversione che consentono di riportare le resistenze a compressione ottenibili da provini con diversa snellezza a valori utili per un confronto. Per una maggiore praticità di utilizzo, le tabelle considerano il solo rapporto di snellezza (h/d). Nello specifico, sono utilizzati i rapporti di snellezza previsti dalle norme e dai capitolati citati nel paragrafo 3.1.

Tabella 6 - Rapporti di conversione - CDW

A DA		RAPPORTO DI SNELLEZZA H/D						
		0,80	1,00	1,06	1,17	1,20	1,33	2,00
RAPPORTO DI SNELLEZZA H/D	0,80	1,00	0,82	0,78	0,71	0,70	0,63	0,44
	1,00	1,22	1,00	0,95	0,87	0,85	0,77	0,54
	1,06	1,29	1,05	1,00	0,92	0,89	0,82	0,57
	1,17	1,41	1,15	1,09	1,00	0,98	0,89	0,62
	1,20	1,44	1,18	1,12	1,02	1,00	0,91	0,63
	1,33	1,58	1,29	1,23	1,12	1,10	1,00	0,69
	2,00	2,27	1,86	1,77	1,62	1,58	1,44	1,00

Tabella 7 - Rapporti di conversione - NAT

A DA		RAPPORTO DI SNELLEZZA H/D						
		0,80	1,00	1,06	1,17	1,20	1,33	2,00
RAPPORTO DI SNELLEZZA H/D	0,80	1,00	0,76	0,71	0,63	0,61	0,54	0,33
	1,00	1,31	1,00	0,93	0,83	0,80	0,71	0,43
	1,06	1,41	1,07	1,00	0,89	0,86	0,76	0,46
	1,17	1,59	1,21	1,13	1,00	0,97	0,86	0,52
	1,20	1,64	1,25	1,16	1,03	1,00	0,88	0,54
	1,33	1,86	1,42	1,32	1,17	1,13	1,00	0,61
	2,00	3,06	2,33	2,17	1,92	1,86	1,64	1,00

Per meglio comprendere l'importanza dell'effetto della snellezza sui risultati di resistenza a compressione, di seguito si riportano degli esempi dimostrativi. La norma *UNI EN 13286-41*

consente l'utilizzo di provini cilindrici aventi rapporti di snellezza compresi tra 0,8 e 2,0; sulla base dei fattori di conversione calcolati, per rendere comparabili i risultati ottenuti nella configurazione $h/d = 2,0$ con quelli ottenuti per $h/d = 0,8$, nel caso di aggregato naturale, è necessario applicare un fattore moltiplicativo pari a 3,06; come si evince dall'esempio numerico riportato in Tabella 8, nonostante sia stata utilizzata la stessa norma e tenuto presente che il range di accettazione non varia in funzione della configurazione geometrica, a parità di miscela studiata, l'utilizzo di differenti rapporti di snellezza può compromettere l'idoneità per l'impiego della miscela stessa.

Tabella 8 - Esempio numerico dell'effetto della snellezza sull'accettabilità della miscela (NAT) in riferimento alla norma UNI EN 13286-41

	h/d	UCS [MPa]
Valore sperimentale	2,00	3,50
Valore equivalente	0,80	10,71
Range di accettazione		2,5 – 5,5

I fattori di conversione previsti in base ai modelli del presente studio spaziano, attorno al valore 1 (conversione nulla), in un range più ampio rispetto a quelli stabiliti dalle normative relative ai calcestruzzi. Per esempio, secondo la norma *ASTM C42*, che descrive la procedura per testare a compressione le carote di calcestruzzo, è necessario applicare un fattore correttivo ai provini con rapporto h/d inferiore a 2,0 affinché la loro resistenza sia confrontabile in modo attendibile con quella dei provini con $h/d = 2,0$ presi come riferimento. In particolare, per $h/d = 1,0$ è prescritto un fattore di correzione pari a 0,87 che risulta decisamente più vicino ad 1,0 rispetto agli 0,43 (NAT) e 0,54 (CDW) ottenuti nel presente studio.

6.5. EFFETTO DELLA MODALITÀ DI PROVA

Il test di resistenza a compressione può essere eseguito secondo due modalità, facendo avanzare la piastra di carico con una velocità costante (controllo di spostamento), oppure applicando una forza che cresce linearmente nel tempo (controllo di forza). Come già accennato in fase di definizione degli obiettivi, l'Università di Perugia ha condotto uno studio parallelo a quello trattato nel presente lavoro di tesi, utilizzando gli stessi materiali e metodi ad eccezione della modalità di prova, eseguita per l'appunto in controllo di forza. Allo scopo

di valutare come incide la modalità di prova sui risultati, sono stati messi a confronto le relazioni matematiche che legano la resistenza a compressione al solo rapporto di snellezza, valutate per le due modalità di prova e per le due differenti miscele. Effettuando il confronto in funzione della tipologia di materiale (Figura 41 e Figura 42), si riscontra che, indifferentemente dalla miscela considerata, le prove in controllo di spostamento restituiscono valori di resistenza mediamente più elevati rispetto a quelli ottenuti in controllo di forza.

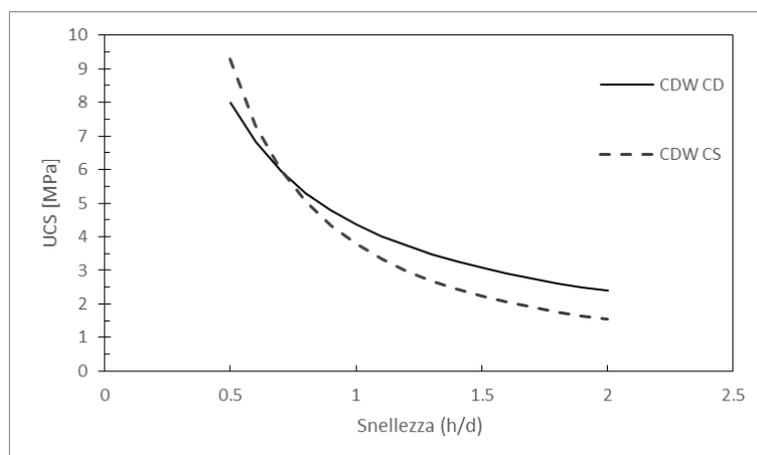


Figura 41 - Confronto tra prova in controllo di forza (CS) e di spostamento (CD) - CDW

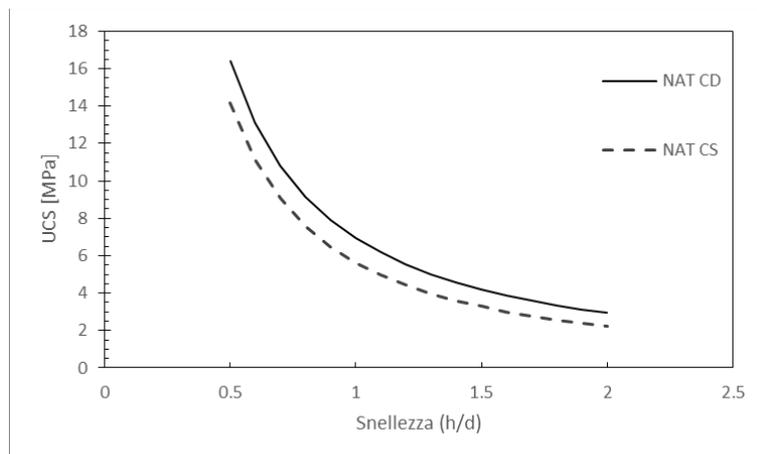


Figura 42 - Confronto tra prova in controllo di forza (CS) e di spostamento (CD) - NAT

In termini percentuali, utilizzare la modalità in controllo di forza porta a valori di resistenza ridotti di circa il 40 % per le miscele con aggregato riciclato e fino al 32% per quelle con aggregato naturale, osservati in corrispondenza di $h/d = 2,0$ per entrambe le miscele. Tali

variazioni potrebbero essere attribuibili al tempo necessario a raggiungere la rottura, infatti, mentre per le prove in controllo di forza i provini hanno raggiunto la resistenza massima entro 120 s, nel caso delle prove in controllo di spostamento alcuni provini hanno raggiunto la resistenza massima dopo oltre 500 s.

7. CONCLUSIONI

L'indagine sperimentale ha avuto l'obiettivo di studiare gli effetti della geometria di campioni cilindrici (altezza e diametro) sulla resistenza a compressione dei misti cementati, focalizzandosi, in particolare, su come quest'ultima sia influenzata dal rapporto di snellezza (altezza/diametro); ulteriori valutazioni sono state fatte per l'individuazione di variabili correlate alla resistenza a compressione. La sperimentazione è stata condotta su due differenti miscele di misto cementato composte una da aggregato naturale e l'altra da aggregato riciclato, stabilizzate con cemento d'altoforno di tipo III e adottando lo stesso contenuto in peso per entrambe le miscele. Per il raggiungimento dell'obiettivo, sono stati preparati i provini con 7 configurazioni geometriche facendo variare il diametro (100 e 150 mm) e l'altezza (tra 55 e 200 mm); inoltre, per ogni configurazione geometrica, sono stati riprodotti 5 campioni identici in modo da fornire un supporto statistico ai risultati. I campioni sono stati sottoposti a test di resistenza a compressione di tipo non confinata e in controllo di spostamento, previa maturazione di 7 giorni in ambiente controllato.

I risultati hanno confermato le ipotesi fatte in fase di progetto dell'indagine sperimentale. In accordo con le esperienze pubblicate, nel range investigato, il rapporto di snellezza influenza significativamente la resistenza a compressione non confinata dei campioni, riscontrando una riduzione dei valori di UCS al crescere del rapporto di snellezza. La relazione che lega le due quantità è di tipo esponenziale (negativo) per cui l'effetto risulta essere maggiore per bassi valori di snellezza, attenuandosi al crescere di tali valori.

Anche il tipo di aggregato utilizzato nella miscela condiziona la resistenza: i risultati indicano che le miscele contenenti aggregato lapideo naturale presentano valori di resistenza a compressione tra il 30 e il 100% superiori a quelli ottenuti utilizzando miscele composte da aggregato riciclato. Per la natura dell'aggregato riciclato, in cui sono presenti particelle di materiali a bassa tenacità come il laterizio, la resistenza a compressione è significativamente più bassa rispetto a quella relativa a misti cementati con aggregati naturali.

La densità dei campioni, che si è cercato di mantenere costante nel corso della sperimentazione, ha avuto effetti marginali sulla resistenza a compressione. Dall'analisi dei singoli set di campioni, i valori di UCS tendenzialmente crescono all'aumentare della densità secca; tuttavia, nella maggioranza dei casi, è presente una forte dispersione dei dati che si

traduce in una scarsa correlazione tra le due quantità. Dall'aggregazione dei risultati, è stato osservato che le piccole variazioni di densità su campioni di diverso diametro e snellezza confermano l'influenza della forma sulla densità finale, ossia dell'influenza dell'effetto "parete" sul processo di costipamento: a parità di materiale considerato, infatti, campioni di piccolo diametro e bassa altezza risultano essere meno densi di campioni di dimensioni superiori.

Lo scopo finale è stato quello di determinare le leggi matematiche che descrivono l'andamento dei valori di UCS in funzione del rapporto di snellezza, calibrate sulla base dei risultati sperimentali acquisiti. Tale strumento è stato poi utilizzato per il calcolo di fattori di conversione che consentono di mettere a confronto l'UCS di due provini aventi diverso rapporto di snellezza, superando in parte le difficoltà di interpretazione dei risultati di questa prova quando sono posti a confronto risultati di sperimentazioni condotte secondo protocolli tra loro differenti.

Uno studio parallelo a quello del presente elaborato è stato condotto dall'Università di Perugia, per il quale sono stati confezionati provini cilindrici utilizzando miscele di aggregati e cemento, metodologie di confezionamento e geometrie dei campioni uguali a quelle adottate nel presente studio, testati a compressione in controllo di forza piuttosto che di spostamento. Dal confronto dei dati si osserva che la modalità di prova influisce sui risultati di resistenza a compressione, osservando valori mediamente più bassi per il test eseguito in controllo di forza; tale effetto cresce man mano che si considerano rapporti di snellezza maggiori, con riduzioni dei valori fino al 40% rispetto a quelli ottenuti in controllo di spostamento.

In definitiva, il rapporto tra l'altezza e il diametro dei provini impiegati per la caratterizzazione meccanica dei misti cementati ha una valenza significativa per la valutazione della resistenza a compressione, poiché i valori di quest'ultima possono addirittura triplicare in seguito alla variazione della sola geometria del campione.

I risultati ottenuti in questa sperimentazione potrebbero essere presi in considerazione per lo sviluppo di futuri aggiornamenti delle norme attualmente utilizzate per le miscele di misto cementato al fine di omogeneizzare i risultati, oppure potrebbero essere utilizzati nei capitolati per calcolare i valori di resistenza equivalente da confrontare con i limiti imposti per l'accettazione delle miscele.

CONCLUSIONI

Per concludere, sarebbe interessante indirizzare gli studi futuri in materia verso analisi che consentano di avere un quadro più completo circa i parametri che influenzano il legame tra la resistenza a compressione e la snellezza, ad esempio, introducendo, come ulteriore variabile, la tecnica di compattazione dei campioni.

8. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Abu El-Maaty Behiry, A. E. (2013). Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal Vol. 4*, 661-673.
- Ciancio, D., & Gibbings, J. (2012). Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples. *Construction and Buildings Materials Vol. 28*, 294-304.
- Dehastani, M., Nikbin, I. M., & Asadollahi, S. (2014). Effects of specimen shape and size on the compressive strength of self-consolidating concrete (SCC). *Construction and Building Materials Vol. 66*, 685-691.
- Du, Y., Liu, P., Tian, J., Zhang, J., & Zheng, Y. (2018). Preliminary Investigation of the Feasibility of Using a Superpave Gyratory Compactor to Design Cement-Treated Aggregate Mixture. *Applied Sciences 8 no. 6*.
- Gyurkó, Z., & Nemes, R. (2020). Specimen Size and Shape Effect on the Compressive Strength of Normal Strength Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering Vol 5*, 276-286.
- Ismail, A., Baghini, M., Karim, M., Shokri, F., Al-Mansob, R., Firoozi, A. A., & Firoozi, A. A. (2014). Laboratory Investigation on the Strength Characteristics of Cement-Treated Base. *Applied Mechanics and Materials Vol. 507*, 353-360.
- Lim, S., & Zollinger, D. (2003). Estimation of the Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Cement-Treated Aggregate Base Materials. *Transportation Research Record*.
- Rashidi, M., & Ashtiani, R. S. (2019). Scale effects in the indirect tensile and unconfined compressive strength tests of cement-stabilized base materials. In C. L. Meehan, S. Kumar, M. A. Pando, & J. T. Coe, *Geo-Congress: Geotechnical Materials, Modeling and Testing vol. 310* (p. 628-639). American Society of Civil Engineers.
- Tefa, L., Bianco, I., Blengini, G. A., & Bassani, M. (2022). Integrated and comparative Structural-LCA analysis of unbound and cement-stabilized construction and demolition waste aggregate for subbase road pavement layers formation. *Journal of Cleaner Production Vol. 352*.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Tokyay, M., & Özdemir, M. (1997). Specimen shape and size effect on the compressive strength of higher strength concrete. *Cement and Concrete Research* Vol. 27, 1281-1289.

Tuscay, E., & Hasancebi, N. (2009). The effect of length to diameter ratio of test specimens on the uniaxial compressive strength of rock. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* Vol. 68, 491-497.

Xuan, D. X., Houben, L. J., Molenaar, A. A., & Shui, Z. H. (2012). Mechanical properties of cement-treated aggregate material – A review. *Materials & Design* Vol. 33, 496-502.

9. ALLEGATI

9.1. RIEPILOGO ALTEZZE COMPATTAZIONE CAMPIONI

Allegato 1 - Riepilogo altezze compattazione campioni con aggregato riciclato – diametro 100 mm

	Campione	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]	H4 [mm]
CDW 100 A	1	56,2	-	-	-
	2	56,2	-	-	-
	3	56,8	-	-	-
	4	56,9	-	-	-
	5	55,4	-	-	-
CDW 100 B	1	56,0	99,7	-	-
	2	56,4	100,7	-	-
	3	55,4	98,7	-	-
	4	55,2	99,7	-	-
	5	55,8	100,2	-	-
CDW 100 C	1	56,2	100,7	152,0	-
	2	56,8	100,9	152,1	-
	3	55,8	99,4	149,8	-
	4	56,6	100,7	152,1	-
	5	57,6	101,4	152,0	-
CDW 100 D	1	57,8	102,3	151,8	201,9
	2	56,3	100,7	151,5	202,8
	3	56,0	100,3	150,5	202,2
	4	56,5	100,6	151,0	202,7
	5	55,9	101,0	151,6	202,6

Allegato 2 - Riepilogo altezze compattazione campioni con aggregato naturale – diametro 100 mm

	Campione	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]	H4 [mm]
NAT 100 A	1	56,8	-	-	-
	2	56,7	-	-	-
	3	56,4	-	-	-
	4	56,3	-	-	-
	5	56,9	-	-	-
NAT 100 B	1	57,0	101,3	-	-
	2	56,9	100,9	-	-
	3	56,5	100,9	-	-
	4	57,1	101,5	-	-
	5	56,5	100,9	-	-
NAT 100 C	1	57,2	101,7	152,8	-
	2	56,2	101,1	152,4	-
	3	56,4	100,8	152,1	-
	4	57,4	101,0	152,8	-
	5	56,3	100,7	152,7	-
NAT 100 D	1	55,8	99,2	150,3	203,0
	2	55,8	100,0	151,0	203,2
	3	55,5	99,9	150,7	203,3
	4	56,9	100,5	150,7	202,3
	5	57,3	101,5	152,8	205,5

Allegato 3 - Riepilogo altezze compattazione campioni con aggregato riciclato – diametro 150 mm

	Campione	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]	H4 [mm]
CDW 150 A	1	56,7	103,3	-	-
	2	57,8	101,8	-	-
	3	56,7	100,4	-	-
	4	56,8	100,8	-	-
	5	57,6	101,9	-	-
CDW 150 B	1	57,2	100,7	149,2	-
	2	57,2	100,7	149,2	-
	3	56,7	100,3	149,5	-
	4	56,7	100,8	150,0	-
	5	56,4	101,0	149,0	-
CDW 150 C	1	57,2	101,0	150,1	200,8
	2	58,0	102,0	150,6	200,7
	3	57,2	101,0	150,4	200,1
	4	58,0	101,6	151,1	201,3
	5	57,2	101,1	150,6	200,9

Allegato 4 - Riepilogo altezze compattazione campioni con aggregato naturale – diametro 150 mm

	Campione	H1 [mm]	H2 [mm]	H3 [mm]	H4 [mm]
NAT 150 A	1	59,9	102,1	-	-
	2	58,8	101,6	-	-
	3	58,3	101,8	-	-
	4	57,8	101,0	-	-
	5	57,8	100,9	-	-
NAT 150 B	1	57,8	101,3	151,1	-
	2	57,4	102,0	151,5	-
	3	58,6	101,8	151,6	-
	4	57,7	102,3	152,2	-
	5	58,1	101,7	151,1	-
NAT 150 C	1	57,9	101,5	150,8	200,3
	2	58,1	101,6	150,8	200,9
	3	57,9	101,1	151,0	201,0
	4	57,0	100,5	150,7	199,9
	5	57,3	100,9	150,5	200,7

9.2. RISULTATI MEDI DEI TEST DI RESISTENZA A COMPRESSIONE

Allegato 5 - Risultati test di compressione - dia. 100 mm CDW

		CDW 100 A	CDW 100 B	CDW 100 C	CDW 100 D
$\sigma_{c,max}$ [MPa]	Media	7,09	4,92	2,86	2,30
	D. STD	0,59	0,28	0,14	0,07
	CV [%]	8,36	5,76	4,78	2,82
$\epsilon(\sigma_{c,max})$ [%]	Media	3,41	2,01	1,34	1,03
	D. STD	0,45	0,15	0,19	0,06
	CV [%]	13,12	7,71	14,14	5,49
$E_{T,c}$ [MPa]	Media	338,60	320,52	266,36	286,87
	D. STD	114,67	22,93	28,84	22,61
	CV [%]	33,87	7,15	10,83	7,88
$E_{S,c}$ [MPa]	Media	210,66	245,33	215,70	223,64
	D. STD	26,72	10,96	21,27	9,92
	CV [%]	12,68	4,47	9,86	4,44
T_c [kPa·mm/mm]	Media	166,67	59,65	22,58	13,84
	D. STD	27,03	6,63	4,05	1,07
	CV [%]	16,22	11,12	17,94	7,70

Allegato 6 - Risultati test di compressione - dia. 100 mm NAT

		NAT 100 A	NAT 100 B	NAT 100 C	NAT 100 D
$\sigma_{c,max}$ [MPa]	Media	11,90	7,51	4,28	2,95
	D. STD	1,17	0,45	0,27	0,36
	CV [%]	9,83	6,05	6,22	12,17
$\epsilon(\sigma_{c,max})$ [%]	Media	3,10	1,67	0,89	0,87
	D. STD	0,29	0,07	0,24	0,06
	CV [%]	9,50	4,32	27,13	6,29
$E_{T,c}$ [MPa]	Media	564,51	620,77	617,58	459,60
	D. STD	45,25	55,11	175,99	47,91
	CV [%]	8,02	8,88	28,50	10,42
$E_{S,c}$ [MPa]	Media	383,94	450,21	514,92	359,57
	D. STD	22,25	35,90	133,08	36,89
	CV [%]	5,80	7,97	25,84	10,26
T_c [kPa·mm/mm]	Media	238,38	77,60	21,96	15,95
	D. STD	43,93	5,02	6,31	2,06
	CV [%]	18,43	6,47	28,73	12,93

Allegato 7 - Risultati test di compressione - dia. 150 mm CDW

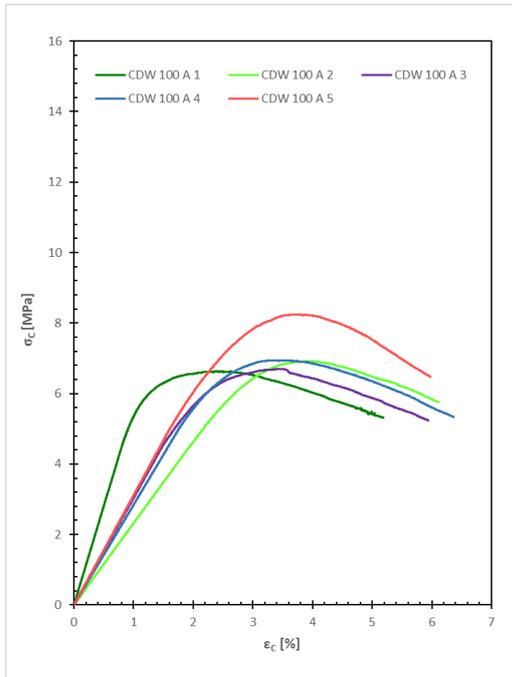
		CDW 150 A	CDW 150 B	CDW 150 C
$\sigma_{c,max}$ [MPa]	Media	5,67	4,63	3,75
	D. STD	0,69	0,26	0,10
	CV [%]	12,23	5,56	2,61
$\epsilon(\sigma_{c,max})$ [%]	Media	3,18	2,38	1,63
	D. STD	0,30	0,22	0,10
	CV [%]	9,44	9,38	6,08
$E_{T,c}$ [MPa]	Media	254,36	231,52	287,29
	D. STD	5,34	23,99	21,20
	CV [%]	2,10	10,36	7,38
$E_{s,c}$ [MPa]	Media	178,31	195,36	230,78
	D. STD	14,50	16,76	12,00
	CV [%]	8,13	8,58	5,20
T_c [kPa·mm/mm]	Media	126,23	63,27	35,91
	D. STD	44,10	8,59	2,49
	CV [%]	34,94	13,58	6,93

Allegato 8 - Risultati test di compressione - dia. 150 mm NAT

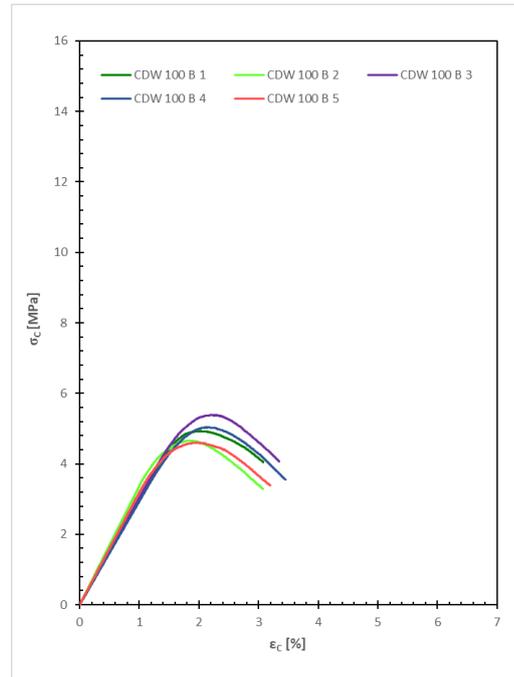
		NAT 150 A	NAT 150 B	NAT 150 C
$\sigma_{c,max}$ [MPa]	Media	11,39	7,70	5,70
	D. STD	0,71	0,48	0,24
	CV [%]	6,20	6,21	4,13
$\epsilon(\sigma_{c,max})$ [%]	Media	2,82	1,65	1,25
	D. STD	0,24	0,08	0,10
	CV [%]	8,34	4,61	8,14
$E_{T,c}$ [MPa]	Media	580,32	636,66	606,82
	D. STD	36,92	60,06	86,27
	CV [%]	6,36	9,43	14,22
$E_{s,c}$ [MPa]	Media	407,24	468,79	461,52
	D. STD	44,73	37,33	52,73
	CV [%]	10,98	7,96	11,43
T_c [kPa·mm/mm]	Media	199,96	77,65	42,97
	D. STD	27,15	6,05	3,57
	CV [%]	13,58	7,79	8,31

9.3. CURVE SFORZO-DEFORMAZIONE DELLE PROVE DI RESISTENZA A COMPRESIONE

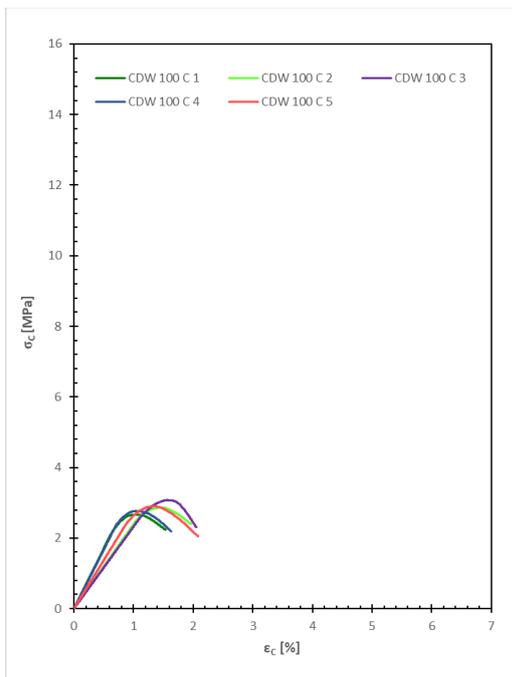
Allegato 9 - Curve sforzo-deformazione (CDW) diametro 100 mm e altezza a) 55 mm, b) 100 mm, c) 150 mm e d) 200 mm



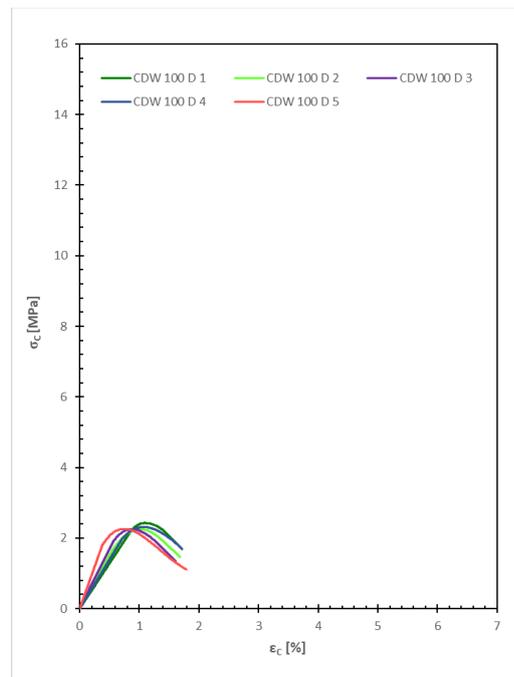
a)



b)

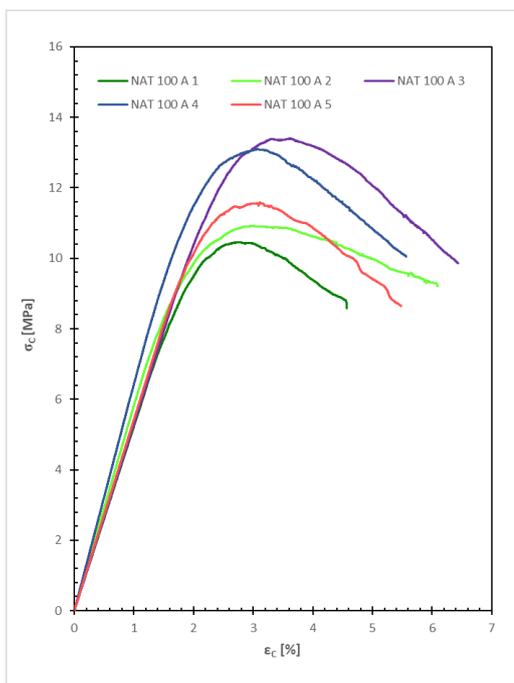


c)

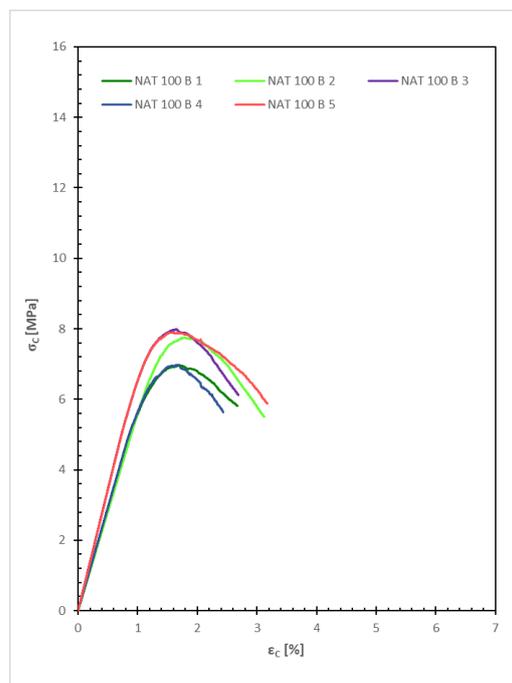


d)

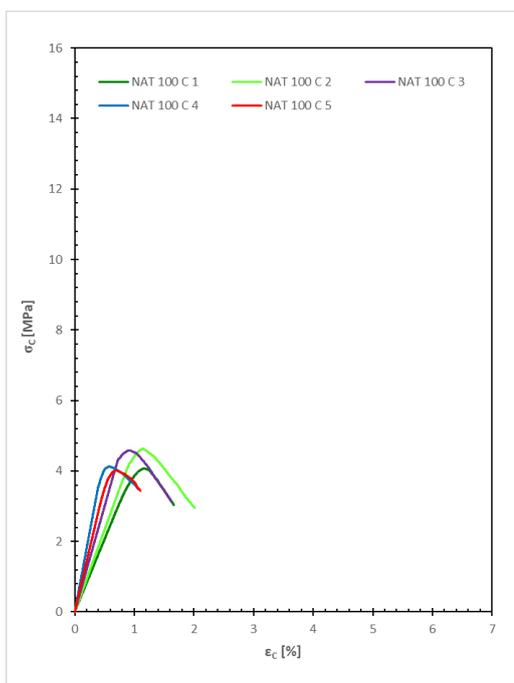
Allegato 10 - Curve sforzo - deformazione (NAT) diametro 100 mm e altezza a) 55 mm, b) 100 mm, c) 150 mm e d) 200 mm



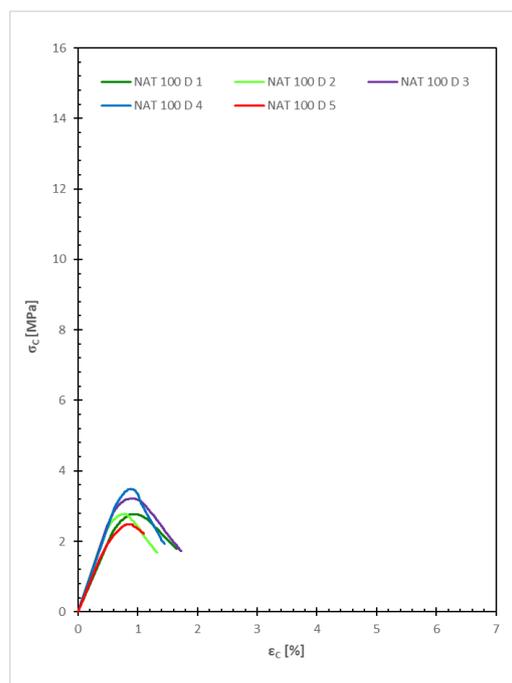
a)



b)



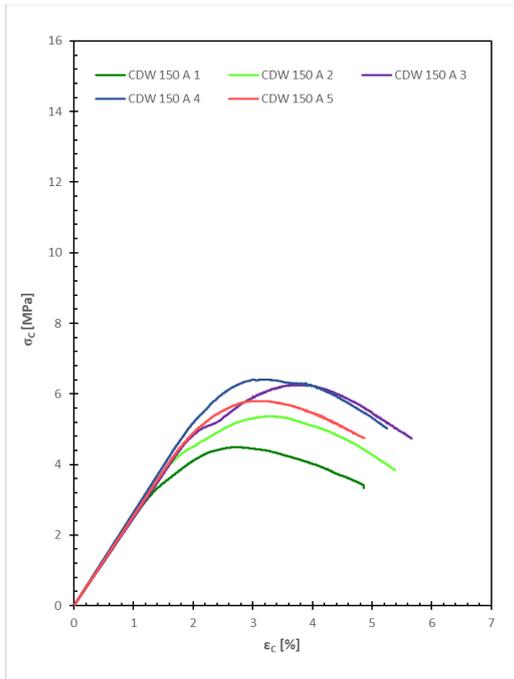
c)



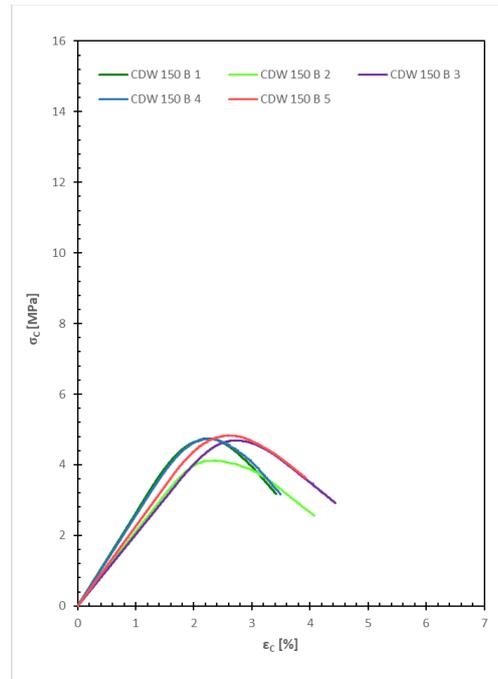
d)

ALLEGATI

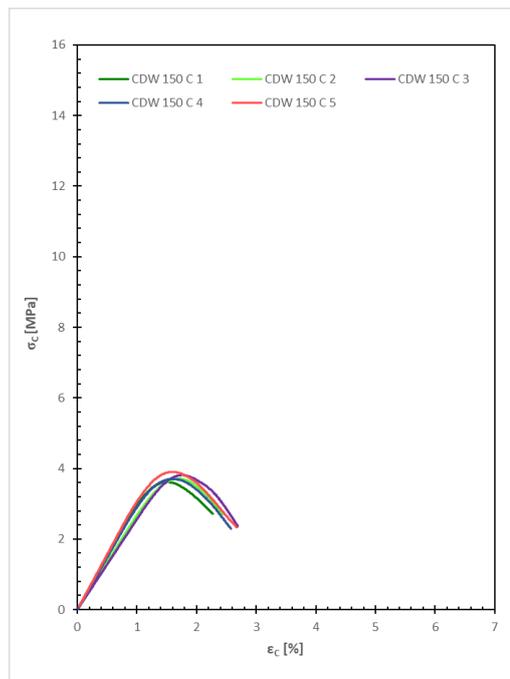
Allegato 11 - Curve sforzo - deformazione (CDW) diametro 150 mm e altezza a) 100 mm, b) 150 mm e c) 200 mm



a)

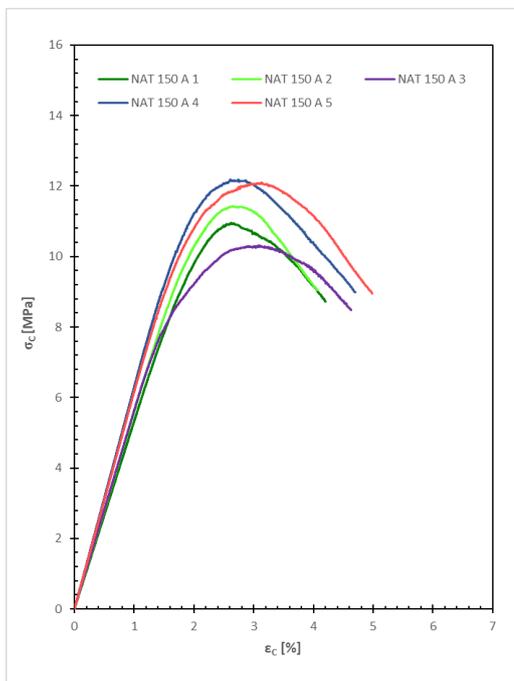


b)

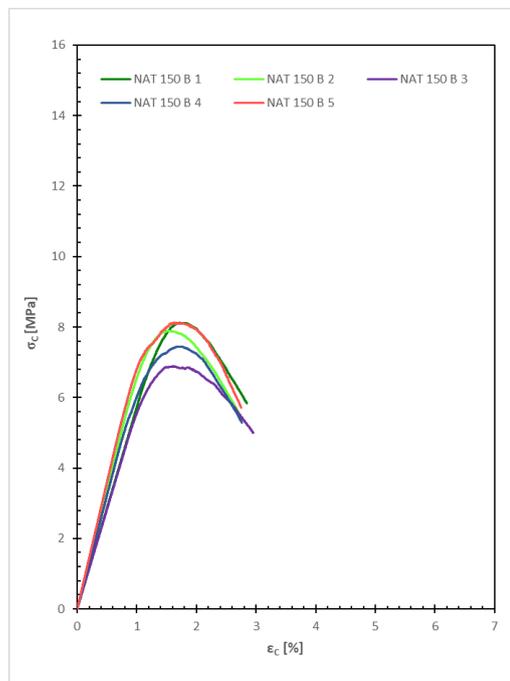


c)

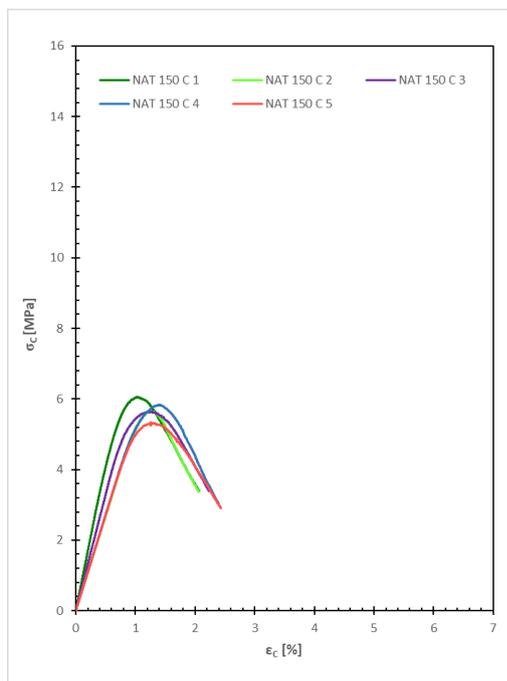
Allegato 12 - Curve sforzo - deformazione (NAT) diametro 150 mm e altezza a) 100 mm, b) 150 mm e c) 200 mm



a)



b)



c)

9.4. SINTESI DELL'ANALISI DELLA TIPOLOGIA DI ROTTURA

Tabella 9 - Sintesi delle modalità di rottura dei provini di diametro 100 mm

ID campione		Al termine della prova	Dopo rimozione del macchinario	Dopo scorticamento
CDW 100 A	1	4	4	3
	2	4	4	3
	3	4	4	3
	4	4	4	3
	5	4	4	3
NAT 100 A	1	4	4	3
	2	4	4	3
	3	4	4	3
	4	4	4	3
	5	4	4	3
CDW 100 B	1	4	4	2
	2	4	4	2
	3	4	4	2
	4	4	4	2
	5	4	4	2
NAT 100 B	1	4	4	2
	2	4	4	2
	3	4	4	2
	4	4	4	2
	5	4	4	2
CDW 100 C	1	4	4	2
	2	4	4	2
	3	4	4	2
	4	4	4	2
	5	4	4	2
NAT 100 C	1	4	4	2
	2	4	4	2
	3	4	4	2
	4	4	4	2
	5	4	4	2
CDW 100 D	1	4	4	2
	2	4	4	2
	3	4	4	2
	4	4	4	2
	5	4	4	2
NAT 100 D	1	4	4	2
	2	4	4	2
	3	4	4	2
	4	4	4	2
	5	4	4	2

Tabella 10 - Sintesi delle modalità di rottura dei provini di diametro 150 mm

ID campione		Al termine della prova	Dopo rimozione del macchinario	Dopo scorticamento
CDW 150 A	1	G	-	-
	2	G	-	-
	3	4	4	3
	4	4	4	3
	5	4	4	3
NAT 150 A	1	4	3	3
	2	4	3	3
	3	G	-	-
	4	4	3	3
	5	4	3	3
CDW 150 B	1	4	4	2
	2	4	4	2
	3	4	4	2
	4	4	4	2
	5	4	4	2
NAT150 B	1	4	4	-
	2	4	4	3
	3	4	4	3
	4	4	4	3
	5	4	4	3
CDW 150 C	1	4	4	-
	2	4	4	-
	3	4	3	-
	4	4	3	-
	5	4	3	-
NAT 150 C	1	4	4	-
	2	4	4	-
	3	4	4	2
	4	4	4	2
	5	4	4	2