

# POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria  
Corso di Laurea in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

## MIX-DESIGN E CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI MISCELE CEMENTIZIE FLUIDE PER IL RIEMPIMENTO DI SOTTOSERVIZI STRADALI



**Relatore:**

*Prof. Orazio Baglieri*  
*Prof. Pier Paolo Riviera*  
*Prof. Davide Dalmazzo*  
*Ing. Reza Salehfard*

**Laureando:**  
*Marco Martinelli*

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

---

# INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ABSTRACT .....</b>                                  | <b>4</b>  |
| <b>RINGRAZIAMENTI .....</b>                            | <b>6</b>  |
| <b>1. INTRODUZIONE .....</b>                           | <b>7</b>  |
| <b>2. REVISIONE DELLA LETTERATURA .....</b>            | <b>10</b> |
| 2.1    CONTESTO TEORICO .....                          | 10        |
| 2.1.1    Proprietà clsm.....                           | 10        |
| 2.1.2    Applicazioni clsm .....                       | 11        |
| 2.2    CONTESTO STORICO.....                           | 12        |
| <b>3. MATERIALI E METODI .....</b>                     | <b>15</b> |
| 3.1    CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COSTITUENTI ..... | 15        |
| 3.1.1    Granulometria .....                           | 20        |
| 3.1.2    Massa volumica .....                          | 22        |
| 3.2    MIX DESIGN.....                                 | 26        |
| 3.2.1    Test di spandimento .....                     | 29        |
| 3.2.2    Confezionamento dei campioni cilindrici ..... | 31        |
| 3.3    CARATTERISTICHE MECCANICHE .....                | 34        |
| 3.3.1    Modulo resiliente .....                       | 35        |
| 3.3.2    Resistenza alla compressione .....            | 43        |
| 3.3.3    Modulo di escavabilità.....                   | 45        |
| 3.3.4    Modelli .....                                 | 46        |
| <b>4. ANALISI DEI RISULTATI .....</b>                  | <b>51</b> |
| 4.1    CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COSTITUENTI ..... | 51        |
| 4.1.1    Curva granulometrica .....                    | 51        |
| 4.1.2    Analisi di densità.....                       | 52        |

---

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.2       | MISCELE .....                              | 53         |
| 4.3       | PROVE MECCANICHE .....                     | 56         |
| 4.3.1     | Modulo resiliente .....                    | 56         |
| 4.3.2     | Resistenza alla compressione .....         | 59         |
| 4.3.3     | Modulo di escavabilità.....                | 60         |
| 4.3.4     | Modelli meccanici.....                     | 61         |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSIONI.....</b>                    | <b>64</b>  |
| <b>6.</b> | <b>APPENDICI .....</b>                     | <b>67</b>  |
| 6.1       | CARATTERISTICHE DEI COMPONENTI .....       | 67         |
| 6.1.1     | PROVE DI SPANDIMENTO SU PIASTRA .....      | 67         |
| 6.1.2     | FOGLIO DI CALCOLO DELLA MISCELA RA50.....  | 82         |
| 6.1.3     | FOGLIO DI CALCOLO DELLA MISCELA RA100..... | 84         |
| 6.1.4     | ANALISI GRANUMETRICA DEI COMPONENTI .....  | 86         |
| 6.2       | CARATTERISTICHE MECCANICHE .....           | 89         |
| 6.2.1     | MODULO RESILIENTE.....                     | 89         |
| 6.2.2     | RESISTENZA A COMPRESSIONE .....            | 107        |
| 6.3       | ACRONIMI E ABBREVIAZIONI .....             | 108        |
| 6.4       | ELENCO TABELLE .....                       | 109        |
| 6.5       | ELENCO FIGURE .....                        | 109        |
| 6.6       | ELENCO GRAFICI .....                       | 110        |
| <b>7.</b> | <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                  | <b>111</b> |

## ABSTRACT

Negli ultimi anni, la durabilità e le prestazioni in opera delle pavimentazioni stradali sono rapidamente migliorate per effetto dell'adozione di nuove tecnologie di costruzione e di nuovi materiali sempre più ottimizzati. Tuttavia, i benefici che derivano da queste innovazioni rischiano di essere compromessi dagli interventi di scavo, mirati all'installazione di differenti sottoservizi, a cui le pavimentazioni possono essere sottoposte durante la loro vita di esercizio.

In particolare, qualora il materiale utilizzato per gli interventi di riempimento e ripristino di questi scavi non sia stato adeguatamente progettato, le aree di intervento possono rappresentare zone di debolezza da cui si possono originare ammaloramenti della pavimentazione quali accumulo di deformazioni permanenti e fessurazione.

L'indagine sperimentale oggetto della presente tesi si colloca all'interno di questo contesto, focalizzandosi sulla ricerca e sullo sviluppo di miscele innovative del tipo Controlled Low Strength Material (CLSM), destinate al riempimento di scavi realizzati per il rinterro degli scavi per la posa di tubazioni e contenenti elevate quantità di fresato bituminoso, in linea con le attuali indicazioni della Circular Economy.

Tali miscele cementizie, costituite essenzialmente da aggregati lapidei, acqua, cemento e opportuni additivi chimici o minerali, consentono di ottenere elevate caratteristiche di lavorabilità e resistenze meccaniche opportunamente controllate. Grazie alla loro consistenza fluida e alle proprietà autolivellanti, possono essere versati direttamente in scavi (anche di ridotta sezione, come quelli in ambito stradale) senza bisogno di ulteriori azioni di compattazione, garantendo così il completo riempimento. Inoltre, la loro formulazione origina un materiale che nel tempo non diventa eccessivamente rigido, permettendo scavi futuri senza l'insorgere di particolari problematiche.

L'obiettivo principale della ricerca è stato quello di individuare una miscela che potesse ottimizzare le proprietà meccaniche e di lavorabilità, garantendo al contempo elevate prestazioni in termini di durabilità.

Il programma sperimentale si è articolato nelle seguenti fasi:

- ricerca bibliografica;
- mix design di laboratorio di miscele a matrice debolmente cementizia con contenuti variabili di cemento e inclusione di elevate percentuali di fresato bituminoso;
- valutazione delle caratteristiche di fluidità mediante studio dello spandimento libero (come da ASTM D6103);
- caratterizzazione meccanica attraverso prove atte a valutare la resistenza a rottura per compressione (come da EN 12390-3) e il modulo resiliente in cella triassiale (come da AASHTO T 307-99). Le prove sono state eseguite a differenti tempi di maturazione.

I risultati ottenuti sono coerenti con le aspettative iniziali, soddisfacendo i requisiti richiesti di fluidità e prestazioni meccaniche tipiche per i materiali tradizionali utilizzati per il riempimento di scavi per sottoservizi in ambito stradale.

## RINGRAZIAMENTI

Desidero esprimere la mia profonda gratitudine ai miei relatori Professor Orazio Baglieri, Professor Pier Paolo Riviera e Professor Davide Dalmazzo per la loro guida preziosa e il costante supporto durante l'intero percorso di stesura della tesi. La loro competenza, dedizione e pazienza hanno giocato un ruolo fondamentale nel plasmare il mio lavoro e nella mia crescita accademica.

Un sentito ringraziamento va anche all' Ing. Reza Salehfard, per la sua collaborazione attiva e per aver condiviso con me la sua esperienza e conoscenza nel campo di studio. La sua disponibilità e consigli sono stati un valore aggiunto al mio percorso di ricerca.

Desidero altresì ringraziare il Politecnico di Torino per avermi fornito l'opportunità di svolgere la mia tesi presso il laboratorio di Infrastrutture Stradali e Materiali. L'accesso a tali risorse è stato fondamentale per condurre le analisi e gli esperimenti necessari per il mio studio. La disponibilità delle infrastrutture e la professionalità del personale del laboratorio hanno contribuito in modo significativo alla riuscita del mio lavoro.

Infine, vorrei ringraziare la mia famiglia, amici e tutti coloro che mi hanno sostenuto e incoraggiato lungo questo percorso. Il loro affetto e supporto morale sono stati un motore essenziale nel portare a termine questa importante fase della mia formazione accademica.

## 1. INTRODUZIONE

Nel contesto dell'ingegneria stradale si delinea un'esigenza cruciale: affrontare le problematiche, lavorative e strutturali, che possono emergere durante le operazioni di collaudo, manutenzione o sostituzione dei sottoservizi stradali. Queste interruzioni, inevitabili nel ciclo di vita di qualsiasi infrastruttura stradale, rappresentano una sfida significativa per gli ingegneri e gli operatori del settore. Per questo motivo, riteniamo essenziale individuare un materiale che possieda le caratteristiche adatte per contrastare efficacemente le aree di debolezza da cui si possono originare ammaloramenti della pavimentazione, quali accumulo di deformazioni permanenti e fessurazione.

Nel contesto di questa ricerca, ci siamo focalizzati sulla progettazione di una miscela che vada a rispondere a queste esigenze.

Un aspetto fondamentale sul quale questo lavoro di tesi si è voluto incentrare è stata la possibilità di impiegare il materiale fresato recuperato durante le operazioni di frantumazione in situ delle pavimentazioni stradali. Questo approccio consentirebbe di massimizzare l'utilizzo delle risorse disponibili, riducendo i costi e i tempi di realizzazione, e contribuendo simultaneamente alla sostenibilità ambientale del processo.

Nell'attuale contesto socioeconomico è di fondamentale importanza investire nella ricerca e nello sviluppo di nuove miscele di materiali per la realizzazione di sottoservizi stradali. La ricerca e lo sviluppo di materiali innovativi per la viabilità sotterranea diventa un catalizzatore essenziale per l'efficienza, la durabilità e la sostenibilità delle reti stradali.

In questa prospettiva, nel processo di mix design, si è optato per una sostituzione del tradizionale impiego di materiali granulari con l'utilizzo di materiali innovativi nel contesto delle applicazioni geotecniche.

Pertanto, abbiamo individuato il CLSM (*Controlled Low Strength Material*) come soluzione ottimale, grazie alle sue proprietà ingegneristiche vantaggiose.

Tra queste si evidenziano l'auto-compattazione e l'auto-livellazione che consentono di massimizzare l'efficienza nei processi di costruzione e manutenzione delle infrastrutture stradali, riducendo tempi e costi.

I materiali di riempimento alternativi e leggeri sono sostanze riciclate o modificate attraverso processi ingegneristici per acquisire specifiche proprietà fisiche e meccaniche, come ad esempio il peso specifico e la resistenza al taglio. Questi materiali stanno diventando sempre più diffusi come soluzione per affrontare diverse problematiche, tra cui i cedimenti del terreno o la riduzione delle pressioni laterali. Tuttavia, le caratteristiche ingegneristiche di tali riempimenti alternativi e leggeri non sono ancora pienamente consolidate, e, in alcuni casi, non sono del tutto comprese.

La *Federal Highway Administration* (FHWA) ha adottato una politica a lungo termine che pone l'accento sull'utilizzo prioritario di materiali riciclati e sostenibili nella selezione dei materiali per le infrastrutture stradali. Ad ogni modo, tale politica sottolinea anche l'importanza fondamentale che i materiali impiegati, che siano vergini o riciclati, non compromettano le prestazioni, la sicurezza o l'ambiente del sistema stradale.

La scelta di utilizzare materiali cementizi con proprietà sia durevoli che resilienti nei servizi sotterranei si configura come una decisione di grande efficacia, che comporta una serie di significativi vantaggi in termini di sicurezza, manutenzione e flessibilità operativa.

Come è noto la durabilità dei materiali cementizi garantisce una protezione robusta e affidabile delle infrastrutture viarie, fondamentale per evitare danni accidentali o deformazioni dei sottoservizi. Ciò assicura maggiore sicurezza durante le normali operazioni stradali e riduce i rischi potenziali legati a danni strutturali.

Allo stesso tempo, l'elasticità del materiale cementizio è un fattore chiave che aiuta a semplificare le operazioni di rimozione in caso di sostituzione o ispezione

delle tubazioni. La versatilità del materiale consente di effettuare più facilmente gli interventi di manutenzione, riducendo così il rischio di danneggiamento del sottoservizio trattato. Questa caratteristica assume particolare rilevanza nell'ambito dei servizi stradali sotterranei, dove la necessità di accedere in modo rapido ed efficiente alle infrastrutture sottostanti è fondamentale per ridurre i tempi di inattività della strada e minimizzare i disagi per il traffico veicolare.

## 2. REVISIONE DELLA LETTERATURA

I materiali CLSM (*Controlled Low-Strength Material*), ovvero "materiale a bassa resistenza controllata", così definiti dal Comitato n.229 dell'*American Concrete Institute* (ACI) nel 1984, rappresentano una categoria di materiali cementizi autolivellanti e auto-consolidanti progettati per applicazioni che richiedono una bassa resistenza meccanica, come alternativa ai tradizionali materiali granulari.

Questi materiali, noti anche con diversi nomi, tra cui "*flowable fill*" (materiali fluidi di riempimento) o "*controller density fill*" (materiali a densità controllata), sono spesso utilizzati nel settore delle costruzioni, e sono caratterizzati da diverse proprietà che li rendono adatti a una varietà di applicazioni.

### 2.1 CONTESTO TEORICO

#### 2.1.1 Proprietà CLSM

Le proprietà fondamentali dei CLSM includono la fluidità, che indica la capacità del materiale di auto-livellarsi e riempire i vuoti senza richiedere mezzi di compattazione tradizionali, e la resistenza compressiva non confinata (UCS). La fluidità è valutata mediante test di spandimento su piastra, mentre la UCS rappresenta una misura cruciale per garantire prestazioni meccaniche affidabili nel tempo. Inoltre, i CLSM devono mantenere resistenze controllate per consentire la loro rimozione senza la necessità di demolizioni.

Esistono linee guida e documenti tecnici, come l'ACI e l'ASTM, che riportano requisiti e proprietà da materiali CLSM:

- fluidità compresa tra 200 e 300mm secondo ACI 229R e ASTM D6103;
- UCS di 350-700 kPa nei progetti per i quali sarà richiesta una futura escavazione;
- densità allo stato umido comprese tra 1840 e 2320 kg/m<sup>3</sup>;

- ritiro finale nell'intervallo dello 0,02% al 0,05%.
- i rapporti acqua-cemento sono riportati come parametri di controllo per ottenere una corretta progettazione della miscela.

Le guide di progettazione ASTM per CLSM includono quanto segue:

- ASTM D4832 per la preparazione e il test di cilindri;
- ASTM D5971/D5971M per il campionamento di CLSM appena miscelato;
- ASTM D6023 per rendimento, contenuto di cemento e contenuto d'aria;
- ASTM D6103/D6103M-17E1 per la consistenza del flusso;
- ASTM C143 per consistenza;
- ASTM D6024/D6024M per capacità portante.

### 2.1.2 Applicazioni CLSM

Le principali applicazioni del CLSM, come indicate dalla NRMCA (*National Ready Mixed Concrete Association*), includono:

- riempimento di trincee fognarie;
- realizzazione di spalle per ponti;
- costruzione di muri di contenimento;
- preparazione di sottofondi stradali;
- realizzazione di serbatoi sotterranei;
- costruzione di pozzi;
- controllo dell'erosione;
- posizionamento delle condotte;
- materiale isolante termico con malta cementizia ad alto contenuto d'aria.

## 2.2 CONTESTO STORICO

Storicamente il processo di progettazione dei CLSM ha seguito un approccio di prova ed errore, dove la fluidità e la resistenza alla compressione sono state regolate attraverso modifiche nella composizione delle miscele, per raggiungere specifiche proprietà di prestazione.

Una serie di metodologie di progettazione è stata proposta per affrontare le diverse esigenze e sfide nell'ottimizzazione delle caratteristiche dei CLSM.

- *Janardhanam et al.* hanno introdotto un metodo di progettazione del mix che considera fattori cruciali come la lavorabilità, il tempo di presa, le proprietà meccaniche e la durata del materiale. Si concentra sull'ottimizzazione di questi aspetti attraverso la selezione accurata dei materiali, la proporzione tra essi e l'eventuale aggiunta di additivi.
- Allo stesso modo, *Bhat e Lovell* hanno proposto una procedura che integra la valutazione della resistenza alla compressione non confinata per garantire prestazioni ottimali. Questa è una misura della capacità del materiale di sopportare carichi compressivi senza restrizioni laterali: in altre parole, che il materiale abbia la resistenza necessaria per sopportare i carichi previsti senza cedimenti eccessivi o danni strutturali. Questa proposta di Bhat e Lovell enfatizza l'importanza di considerare non solo la lavorabilità e altre proprietà del CLSM, ma anche la sua resistenza meccanica.

- Studi condotti da *Bouzalakos et al.* hanno ulteriormente evidenziato l'importanza della sensibilità del comportamento della miscela alle variazioni dei diversi componenti attraverso l'utilizzo di metodi di superficie di risposta. Questo significa che piccole modifiche nella composizione dei materiali possono avere un impatto significativo sulle prestazioni complessive del CLSM. Questi metodi sono strumenti statistici e matematici utilizzati per esaminare come la risposta di un sistema (le caratteristiche dei CLSM) varia in relazione ai cambiamenti dei fattori che lo influenzano (ad esempio, le proporzioni dei componenti della miscela). Questo approccio consente di progettare in modo più efficiente le miscele di CLSM, riducendo la necessità di esperimenti empirici costosi e accelerando il processo di sviluppo del materiale.

Come detto, diverse metodologie di progettazione del mix sono state proposte nel corso degli anni da vari ricercatori, passando da approcci empirici a modelli più sofisticati che tengono conto della disposizione degli aggregati e delle proprietà reologiche del materiale. Altri ricercatori hanno introdotto approcci innovativi basati su questi modelli e proprietà.

- Uno dei primi contributi significativi è stato quello di *T.C. Powers e Zhang*, i quali hanno introdotto l'idea di controllare la reologia del CLSM mediante l'ottimizzazione della distribuzione granulometrica degli aggregati e del rapporto acqua/cemento. Questo metodo ha permesso di massimizzare la fluidità del materiale, garantendo allo stesso tempo la stabilità e la resistenza necessarie per le applicazioni specifiche.

- Successivamente, *R. F. Barrett* ha proposto un approccio che considerava l'utilizzo di materiali di scarto come filler nell'ottimizzazione della miscela di CLSM. Questo metodo ha permesso non solo di ridurre i costi di produzione, ma anche di migliorare le proprietà del CLSM, come la lavorabilità e la resistenza.
- Un'altra importante metodologia è stata sviluppata da *A. Ghafoori e J. Y. Lee*, i quali hanno introdotto il concetto di "fattore di compattazione ottimale" nel progetto del mix di CLSM. Questo fattore tiene conto della densità degli aggregati e della quantità di cemento per ottenere una disposizione degli aggregati ottimale dei materiali costituenti, garantendo così prestazioni meccaniche e reologiche ideali.
- Un contributo rilevante è stato dato anche da *Wang et al.*, che hanno enfatizzato l'importanza della fluidità e della lavorabilità nella progettazione del mix per i CLSM. Questo gruppo di ricercatori ha sviluppato un metodo che tiene conto della distribuzione granulometrica degli aggregati, del rapporto acqua/cemento e dell'impiego di additivi per ottenere una miscela che possa essere facilmente versata e livellata senza segregazione.

### 3. MATERIALI E METODI

Il processo di ricerca è stato strutturato in diverse fasi, partendo dalla selezione di aggregati caratterizzati da varie dimensioni e proprietà al fine di sviluppare formule di miscelazione diversificate. I test sono stati eseguiti in laboratorio, con particolare attenzione rivolta alla valutazione della scorrevolezza al fine di determinare la miscela più idonea. Dopo un'attenta selezione, sono state identificate due miscele che hanno evidenziato miglioramenti significativi in termini di scorrevolezza. Questi campioni sono stati successivamente soggetti a test approfonditi per valutarne la resistenza alla compressione e il modulo resiliente. L'obiettivo è individuare una miscela che, oltre a garantire una lavorabilità ottimale, presenti anche le proprietà meccaniche necessarie per resistere alle sollecitazioni tipiche della pavimentazione.

#### 3.1 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COSTITUENTI

Nel processo di progettazione della miscela, sono state utilizzate diverse componenti, tra cui:

- aggregati,
- cemento,
- RAP,
- acqua
- e additivi

➤ **Aggregati**

Gli aggregati devono essere conformi alle specifiche della norma ASTM C33. Nell'uso del CLSM, è preferibile impiegare aggregati fini piuttosto che grossolani. Il loro contenuto è determinato dalla necessità di riempire i vuoti nella miscela, tenendo conto del contenuto di cemento, acqua, ceneri volanti e aria.

Gli aggregati utilizzati nella presenta ricerca sono l'aggregato fine ("Powder") e il pietrisco con dimensioni comprese tra i 3 e gli 8 mm.

➤ **RAP**

Il RAP è il principale materiale di scarto prodotto a seguito delle attività di manutenzione e risanamento effettuate su pavimentazioni stradali dissestate. È prodotto da infrastrutture esistenti nell'ambito di periodiche operazioni di riasfaltatura, riabilitazione o ricostruzione al fine di soddisfare determinati requisiti di manutenzione (vedi Figura 3.1 e Figura 3.2).



*Figura 3.1: Fresatura di RAP dalla pavimentazione*



*Figura 3.2: RAP utilizzato*

I materiali riciclati da asfalto (RAP: *Reclaimed Asphalt Pavement*) rappresentano una risorsa preziosa nell'industria delle pavimentazioni stradali, essendo composti da aggregati minerali rivestiti da sottili pellicole bituminose invecchiate. Questi materiali sono comunemente impiegati per sostituire parte degli aggregati vergini nelle miscele bituminose fredde e calde, contribuendo così a ridurre i costi di costruzione e a diminuire l'esaurimento delle risorse naturali.

Numerosi studi hanno confermato la possibilità di riutilizzare il RAP nella realizzazione di basi o sottobasi granulari per pavimentazioni. Inoltre, è stato dimostrato che combinazioni di RAP e aggregati vergini, stabilizzati con cemento, possono essere efficacemente impiegati nella costruzione di basi stradali.

#### ➤ **Cemento**

La norma ASTM C150 raccomanda l'utilizzo di cemento Portland di tipo I o II. Il dosaggio di cemento varia da 30 a 120 kg/m<sup>3</sup> a seconda degli obiettivi desiderati, come tempi di indurimento rapidi o resistenze elevate. Il cemento conferisce coesione e resistenza alla miscela, essendo un legante idraulico che, mescolato con acqua, forma una pasta che indurisce tramite reazioni di idratazione, mantenendo la sua stabilità anche sott'acqua.

➤ **Acqua**

Nei CLSM viene utilizzata una quantità maggiore di acqua rispetto ai calcestruzzi tradizionali, generalmente compresa tra 193 e 344 kg/m<sup>3</sup>. L'acqua deve essere limpida, priva di sali aggressivi come solfati e cloruri. Ha un ruolo fondamentale nell'idratazione del cemento e conferisce plasticità e lavorabilità al calcestruzzo.

➤ **Additivi**

Gli additivi per calcestruzzo, in conformità alla norma UNI EN 934-2, vengono incorporati in quantità non superiori al 5% in massa rispetto al contenuto di cemento, al fine di potenziare le prestazioni sia del calcestruzzo fresco che di quello indurito. Gli additivi sono composti da sostanze chimiche, polimeriche o no, disciolte in acqua e svolgono varie funzioni, quali:

- fluidificanti: riduttori di acqua;
- ritardanti di presa;
- aeranti: aumentano le proprietà di isolamento termico;
- acceleranti di indurimento;
- additivi resistenti all'acqua;
- e modificatori di viscosità.

Gli additivi impiegati per questa ricerca sono: Dynamon SX, Viscofluid SCC/10 e MAPEAIR AE 20. Tutti gli additivi sono stati reperiti dall'azienda edile MAPEI S.p.A.

Il *Dynamon SX* è un superfluidificante a base acrilica modificata per calcestruzzi. Caratterizzato da una consistenza liquida di colore ambrato, il suo principio attivo primario consiste nell'incrementare la lavorabilità del materiale e nel ridurre la quantità di acqua necessaria per l'impasto. Il dosaggio consigliato, incluso nel range indicato nella relativa scheda tecnica fornita da MAPEI, si attesta a 0,9 litri per ogni 100 kg di materiale fine (0,9 l/100 kg di fine). Al fine di massimizzarne l'efficacia, è consigliato integrarlo alla miscela composta da cemento, aggregati, polveri e all'80% dell'acqua richiesta per l'impasto, precedentemente all'aggiunta dell'additivo *Viscofluid SCC/10*, ove previsto.

Il *Viscofluid SCC/10* è un additivo liquido di color ambrato impiegato per la produzione dei calcestruzzi auto-compattanti al fine di aumentarne la viscosità, migliorarne l'omogeneità dell'impasto e ridurre il rischio di imbattersi nei fenomeni di segregazione e bleeding (in modo da lasciare all'impasto invariata la capacità di scorrere allo stato fresco). Il dosaggio scelto è quello di 0,14 kg su 100 kg di materiale fine (0,14 kg/ 100 kg di fine).

Il *MAPEIR AE 20* è un additivo tensioattivo aerante per calcestruzzi resistenti ai cicli di gelo e disgelo. L'utilizzo di questo additivo permette l'inglobamento di microbolle d'aria nel composto, le quali comportano una diminuzione di circa il 20% della resistenza meccanica. Inoltre, i conglomerati cementizi con agenti aeranti offrono miglior pompabilità per calcestruzzi magri e riducono la segregazione nei calcestruzzi con aggregati leggeri. Il dosaggio adottato è di 0,5 litri su 100 kg di cemento (0,5 l/100 kg di cemento). Per favorire prestazioni migliori del *Mapeair AE 20*, è consigliato mescolare preventivamente per qualche minuto l'additivo con il 20% previsto dell'acqua dell'impasto.

### 3.1.1 Granulometria

L'analisi granulometrica è stata condotta mediante il processo di vagliatura secca al fine di minimizzare la dispersione dei granuli di dimensioni più fini e di ridurre la probabilità che queste aderiscano alle particelle più grosse, compromettendo così l'integrità del test. La procedura è stata guidata dalla normativa UNI EN 933 Parte 1, che fornisce linee guida riguardanti il numero e le dimensioni delle maglie dei setacci da utilizzare.

I setacci sono stati sovrapposti per creare una colonna, con le dimensioni delle maglie che aumentano dall'alto verso il basso, partendo dal setaccio posizionato sopra la vasca di raccolta. Utilizzando una massa approssimativa di materiale pari a 1 kg, la prima fase comporta il setacciamento umido del materiale attraverso setacci con maglie di 2 mm e 63  $\mu\text{m}$ .



*Figura 3.3: set di setacci*

I numeri e le aperture dei setacci sono stabilizzati dalla norma EN 933-2 e sono conformi ai requisiti delle norme ISO 3310-1 e ISO 3310-2.

Ciò ha prodotto una prima raccolta di materiale dato dal setaccio da 2 mm e una seconda raccolta composta dalla presenza di filler. Il contributo di quest'ultimo viene determinato sommando due componenti: la perdita di peso del materiale dopo il lavaggio con acqua e la differenza di peso tra il setaccio a maglie più piccole con e senza materiale. Al termine del processo, il materiale trattenuto da ciascun setaccio è raccolto in una teglia, essiccato in forno a 105°C per 12 ore, e quindi pesato.

Successivamente, i setacci sono disposti in colonna come prescritto dalla normativa e il materiale è vagliato attraverso uno scuotimento meccanico. Ogni setaccio è pesato prima e dopo essere stato riempito con il materiale.

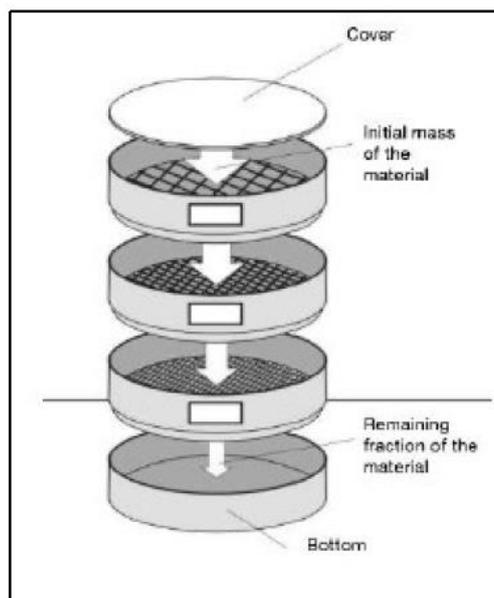


*Figura 3.4: colonna di setacci*



*Figura 3.5: compattatore meccanico*

Utilizzando una piattaforma vibrante, la colonna di setacci è agitata al fine di separare il campione in diverse classi granulometriche. La massa del materiale trattenuto da ciascun setaccio è determinata ed espressa come percentuale rispetto alla massa totale del materiale essiccato. Successivamente, è calcolata la percentuale cumulativa, sempre in rapporto alla massa iniziale del campione, che ha attraversato ciascun setaccio fino a quello con apertura di  $63\ \mu\text{m}$ .



*Figura 3.6: schema setacciatura*

### 3.1.2 Massa volumica

La determinazione della massa volumica dei granuli pre-essiccati di aggregato, conforme alla norma di riferimento EN 1097-6 (Appendice H), è un procedimento metodico e preciso che fornisce dati cruciali per valutare le caratteristiche dei materiali da costruzione. Questo metodo, applicabile a granuli di aggregato passanti al setaccio da 31,5 mm, si avvale dell'impiego del picnometro, uno strumento essenziale per la misurazione accurata del volume dei campioni.

Un picnometro è un dispositivo di vetro utilizzato per misurare la densità o la massa volumica di un liquido. Ha una forma simile a un flacone con un collo sottile e accompagnato da un corrispondente imbuto di vetro. È importante che il provino occupi circa metà del volume del picnometro per garantire risultati accurati durante la procedura di misurazione della densità.

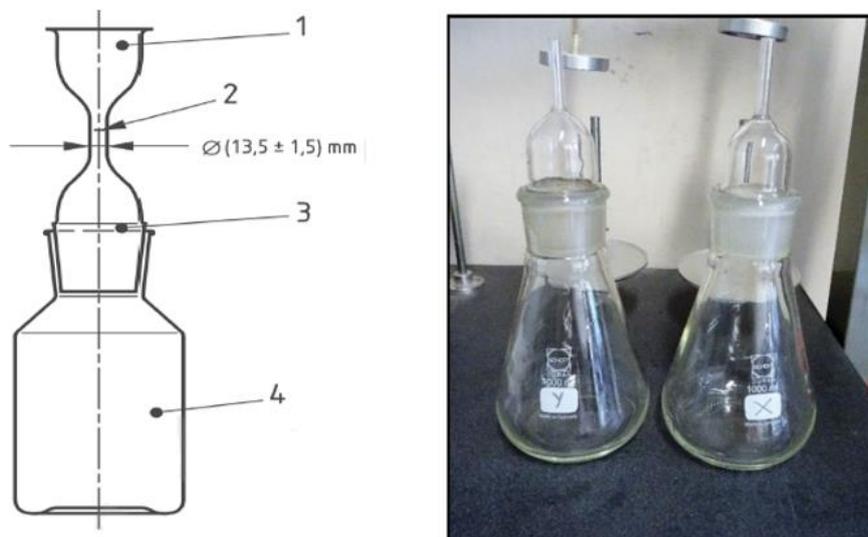


Figura 3.7: Picnometro standard & picnometri usati in laboratorio

Dove:

- 1. Imbuto di vetro
- 2. Tacca di riferimento
- 3. Cono smerigliato adatto all'inserimento nel flacone
- 4. Bottiglia a fondo piatto e collo largo piano

La determinazione della densità degli aggregati è un aspetto cruciale nella valutazione della qualità e delle caratteristiche fisiche dei materiali da costruzione. Attraverso un'accurata esecuzione del test di densità degli aggregati, è possibile ottenere dati cruciali per garantire la conformità alle normative vigenti e per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle strutture e delle infrastrutture costruite. In questa prospettiva, la standardizzazione del procedimento di determinazione della densità degli aggregati gioca un ruolo chiave nel garantire la coerenza e l'uniformità dei risultati ottenuti.

In conformità con le specifiche dell'EN 1097-6 (Allegato H), la massa volumica dei granuli pre-essiccati fornisce un'indicazione fondamentale della compattazione e della densità degli aggregati. Questo parametro assume un'importanza significativa in varie fasi della progettazione e dell'implementazione delle strutture, contribuendo alla determinazione delle proprietà meccaniche, della resistenza e della durabilità dei materiali utilizzati.

La massa volumica dei granuli pre-essiccati (espressa in kg/m<sup>3</sup>) è così valutata:

$$\rho_p = \frac{m_1}{V - \frac{(m_2 - m_1 - m_0)}{\rho_{L1}}}$$

Con:

$$V = \frac{m_3}{\rho_{L3}}$$

$$\rho_{L1} = \frac{1}{\{1 + [(2,31 \cdot T_1 - 2)^2 - 182] \cdot 10^{-6}\}}$$

$$\rho_{L3} = \frac{1}{\{1 + [(2,31 \cdot T_3 - 2)^2 - 182] \cdot 10^{-6}\}}$$

Dove:

- $\rho_p$ : massa volumica dei granuli pre-essiccati [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $m_0$ : massa picnometro vuoto [g]
- $m_1$ : massa del solo aggregato, valutata come differenza della massa complessiva (aggregato più picnometro) e massa del picnometro vuoto [g]
- $m_2$ : massa del picnometro completamente pieno (picnometro più aggregato più acqua) [g]
- $m_3$ : massa dell'acqua, calibrato in funzione del picnometro (la differenza tra la massa picnometro pieno d'acqua e il picnometro vuoto) [g]
- V: volume del picnometro [ml]
- $T_1$ : temperatura dell'acqua registrata all'interno del picnometro
- $T_3$ : temperatura calibrata dell'acqua

Per determinare i valori di  $m_0$  e  $T_3$ , necessari per la determinazione della densità degli aggregati, è stata impiegata una tabella di calibrazione specifica relativa ai picnometri, e i relativi tappi, utilizzati nell'esperimento (P-R, 6-F).

Il processo di prova inizia con la preparazione dei provini, ottenuti attraverso la riduzione e il lavaggio del campione di laboratorio per rimuovere impurità e granuli non desiderati. Successivamente, i provini vengono essiccati in stufa a una temperatura di  $110 \pm 5$  °C fino a raggiungere una massa costante. Lasciati raffreddare fino alla temperatura ambiente. Per determinare il volume del picnometro, si riempie con acqua a una temperatura di  $22 \pm 3$  °C e si lascia riposare per 4 ore in un bagno d'acqua alla stessa temperatura. Il volume del picnometro viene calcolato come media di tre misurazioni, con un intervallo massimo di 0,1% rispetto al valore medio.

Durante il procedimento di prova, i provini vengono pesati e posti all'interno del picnometro insieme all'imbuto. Successivamente, il picnometro viene riempito con acqua fino a circa 30 mm al di sotto del collo smerigliato, agitando delicatamente il campione per rimuovere l'aria intrappolata. Dopo la rimozione dell'aria, tramite l'utilizzo di un dearatore, il picnometro viene riempito nuovamente con acqua fino alla tacca di riferimento, e quindi pesato.

I risultati della prova vengono quindi calcolati ed espressi con precisione. La massa volumica dei granuli pre-essiccati è calcolata come media dei risultati ottenuti dai due provini. La massa volumica dei granuli pre-essiccati è la media dei risultati sui due provini, arrotondata al più prossimo 0,01 Mg/m<sup>3</sup>.

Il test di densità degli aggregati rappresenta un passaggio fondamentale nell'ambito della caratterizzazione dei materiali da costruzione. La sua corretta esecuzione fornisce dati preziosi per valutare la qualità degli aggregati impiegati, garantendo la sicurezza e l'efficacia delle strutture e delle infrastrutture realizzate. La standardizzazione del procedimento attraverso le normative vigenti assicura la ripetibilità e l'affidabilità dei risultati ottenuti.

### 3.2 MIX DESIGN

Il processo di mix design è un'importante fase nella progettazione delle miscele di materiali utilizzate in vari settori ingegneristici, incluso quello delle costruzioni stradali. Questo processo coinvolge diversi passaggi cruciali per ottenere una miscela ottimale che soddisfi le specifiche richieste per l'applicazione desiderata.

Il procedimento di mix design è schematizzato nella Figura 3.8:

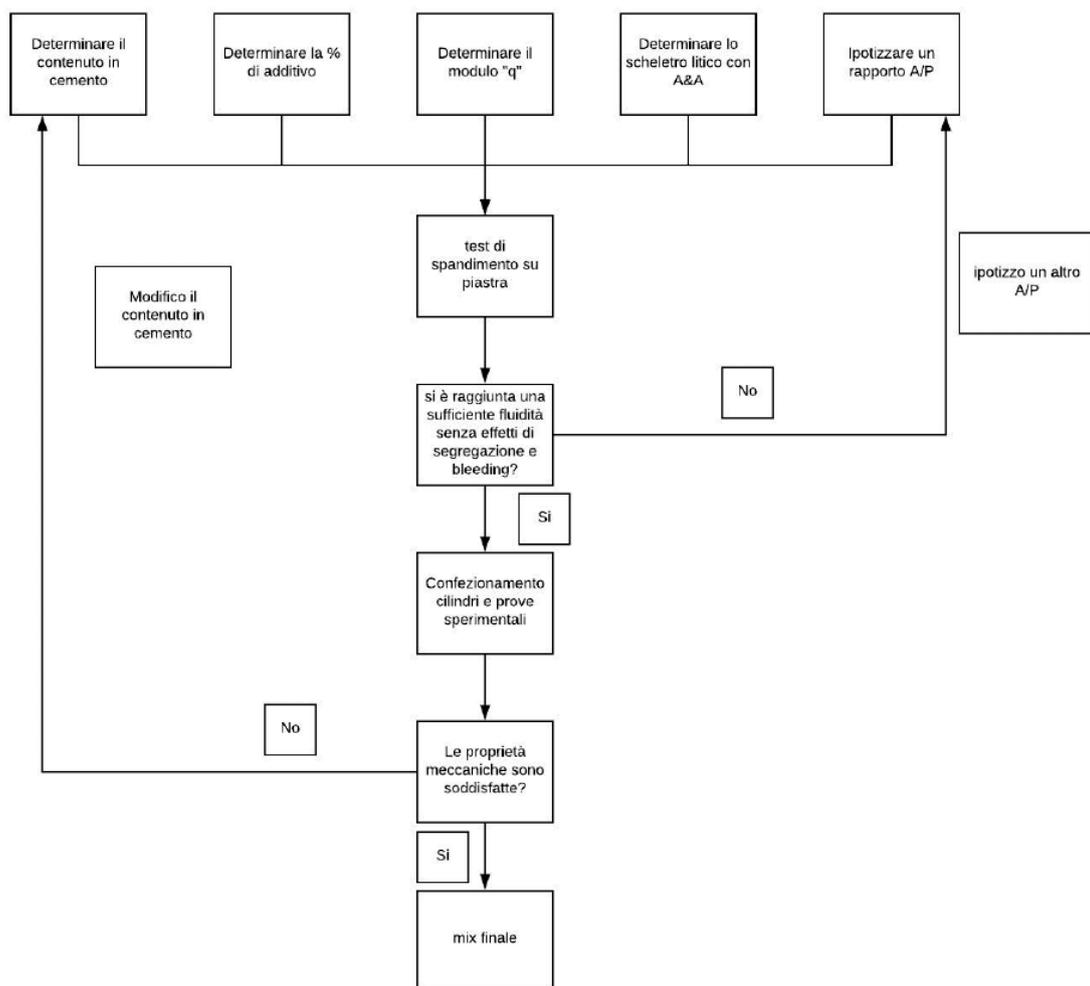


Figura 3.8: flow-chart per la determinazione del mix design

Tale procedura comporta la definizione di una distribuzione dimensionale target delle particelle che costituiscono lo scheletro aggregato (frazioni aggregate e RAP), e la selezione di dosaggi appropriati di cemento Portland, acqua e additivi funzionali specifici (ad esempio superplastificanti e acceleratori di indurimento).

La distribuzione dimensionale ideale per garantire una corretta compattazione e resistenza della miscela è descritta dalla cosiddetta "*equazione di Andersen e Andreasen modificata*" proposta da Funk e Dinger per i compositi fluidi e ampiamente adottata per la progettazione di miscele di ricerca CLSM. Tale equazione è fornita di seguito:

$$P(D) = 100 \cdot \frac{(D_{max}^q - D^q)}{(D_{max}^q - D_{min}^q)}$$

Dove:

- $P(D)$  [%]: percentuale cumulativa che passa il setaccio con apertura uguale a  $D$
- $D$  [mm]: diametro delle particelle aggregate
- $D_{max}$  [mm]: diametro massimo delle particelle aggregate nella miscela, corrispondente a  $P(D) = 100\%$  e uguale a 20 per tutte le miscele
- $D_{min}$  [mm]: diametro minimo delle particelle aggregate nella miscela, assunto pari 5  $\mu\text{m}$  per tutte le miscele
- $q$  [-]: modulo di distribuzione fissato pari a 0,21, che rappresenta la proporzione tra gli aggregati grossolani e fini presenti nella miscela, influenzando la sua densità e resistenza

Dopo aver ipotizzato un rapporto acqua/polvere iniziale, si eseguono test di spandimento su piastra per valutare la fluidità della miscela. Se si raggiunge una fluidità adeguata senza manifestare effetti di segregazione o bleeding, si procede riempiendo i cilindri e avviando le prove sperimentali. Se, al contrario, la fluidità non è soddisfacente, si ipotizza un altro rapporto acqua/polvere e si ripete il processo di test e valutazione fino a raggiungere i requisiti desiderati.

Una volta ottenuta una miscela che soddisfi i criteri di fluidità, si passa a valutare se le proprietà meccaniche sono soddisfatte. Se non lo sono, si modifica il contenuto in cemento e si ripete il processo di test e valutazione finché non si ottiene il mix finale ottimale per l'applicazione prevista.

### 3.2.1 Test di spandimento

Attraverso una serie di variazioni nei dosaggi del rapporto acqua/polvere e del cemento, sono state testate numerose combinazioni al fine di comprendere come queste modifiche influenzassero la lavorabilità e la resistenza finale delle miscele. Queste prove, caratterizzate da una valutazione visiva, mirano a determinare la capacità di ciascuna miscela di distribuirsi in maniera uniforme sulla superficie della piastra, senza manifestare fenomeni di segregazione o di bleeding.

La ricerca del conglomerato cementizio si è basata sulla miscelazione, prima mediante utilizzo di miscelatore industriale, poi attraverso la miscelazione manuale, di cemento, additivi selezionati e aggregati di recupero.

L'uso del miscelatore industriale è stato abbandonato per via di due ragioni fondamentali: la pala automatica non riusciva, viste le ragionevoli quantità di materiale presenti all'interno del contenitore, ad amalgamare efficientemente tra loro tutti gli elementi; e a causa di un rilascio, dovuto da un guasto del macchinario stesso, di olio motore all'interno del composto.

Il processo di miscelazione manuale è composto da tre fasi. Inizialmente, analogamente al metodo meccanico, tutte le componenti previste vengono accuratamente pesate e aggiunte al recipiente. Successivamente, con le quantità misurate, vengono versati nell'ordine seguente: l'80% dell'acqua, gli additivi prescritti e il restante 20% di acqua specificato. Ogni singola aggiunta è separata da circa un minuto di intervallo e seguita da una miscelazione manuale mediante l'uso di una paletta. Questo processo mira a garantire una presa e un'unione dei vari componenti presenti più efficienti e uniformi. Una volta effettuate tutte le procedure sopra elencate, si ottiene un composto più o meno omogeneo.

Completata la miscelazione, il composto ottenuto è sottoposto a test di scorrevolezza.



*Figura 3.9: cilindro e piatto usati per il test di spandimento*

Come indicato nella norma ASTM D6103, la procedura standardizzata prevede che la miscela allo stato fresco vada a colmare un cilindro aperto con diametro di 75 mm e altezza 150 mm, appoggiato su una superficie orizzontale, liscia e non assorbente. Una volta riempito il cilindro, questo viene sollevato rapidamente in modo che il composto vada a diffondersi, per mezzo del solo peso proprio, sulla superficie orizzontale sottostante di dimensioni di 40x40 cm. Effettuata questa operazione, è possibile andare a valutare il diametro del composto espanso circolarmente in due direzioni perpendicolari tra loro. Il diametro di diffusione ( $D_s$ , espresso in mm) sarà la media di queste due letture.

Quando si analizzano i CLSM utilizzati per riempire trincee di solito è necessario che il diametro massimo degli aggregati ( $D_s$ ) si collochi tra i 170 mm e i 250 mm, al fine di garantire una buona fluidità e prevenire contemporaneamente la separazione o la segregazione.

Come elemento fondamentale per la valutazione dell'esito positivo del test, la miscela viene esaminata visivamente per accertare un flusso uniforme e individuare eventuali segni di fenomeni indesiderati come segregazione o bleeding.

### 3.2.2 Confezionamento dei campioni cilindrici

Una volta completate le prove di spandimento e selezionate le miscele su cui procedere con l'analisi, si passa alla preparazione dei campioni cilindrici della miscela. Questi campioni saranno utilizzati per condurre le analisi meccaniche necessarie per valutare le proprietà e le prestazioni della miscela in studio.

Al fine di eliminare l'umidità trattenuta da ciascun elemento è fondamentale che gli aggregati siano prima essiccati. I materiali sono stati disposti in vaschette, pesati, e disposti in forno a temperature di 40°C per il RAP, e 110°C per tutti gli altri elementi. Per il RAP, è stata scelta una temperatura di essiccazione più bassa al fine di evitare l'ammorbidimento del bitume residuo, il che ha richiesto tempi di condizionamento più lunghi.

Dopo 24 ore, si pesa il materiale e successivamente, dopo ulteriori 2 ore, si effettua una seconda pesatura. Se la differenza percentuale tra queste due risulta inferiore a 1, allora si può considerare che l'umidità all'interno del materiale sia stata eliminata.

Una volta terminata la pesatura secondo i dosaggi calcolati, gli ingredienti sono stati versati all'interno di una betoniera con l'obiettivo di ottenere una miscela omogenea. Questa sarà successivamente colata nei diversi provini, che saranno sottoposti ad indurimento a temperatura ed umidità controllata.



*Figura 3.10: betoniera*

L'ordine di versamento dei componenti segue una sequenza precisa: si inizia con la metà della quantità d'acqua calcolata, poi si aggiunge un terzo degli altri componenti, seguito dal cemento. Nel frattempo, si inclina la betoniera per favorire una miscelazione il più omogenea possibile. Si prosegue versando l'additivo precedentemente mescolato con un po' d'acqua e un terzo degli altri componenti. Una volta raggiunto questo punto, si interrompe il funzionamento della macchina e si procede a mescolare manualmente l'impasto, cercando di raccogliere tutto il materiale depositato sulle pareti della betoniera. Si riprende quindi aggiungendo l'ultima parte dei componenti e versando l'acqua rimanente, continuando sempre la miscelazione meccanica e inclinando di tanto in tanto la betoniera.

Sono stati selezionati stampi cilindrici con un'altezza di 200 mm e un diametro di 100 mm. Ogni composto ottenuto dalla miscelazione meccanica viene versato nei singoli stampi e lasciato maturare in condizioni ambientali controllate prima di procedere all'apertura dello stampo.

Il dato cruciale per valutare le prestazioni meccaniche della miscela è il tempo di maturazione fissato a 28 giorni. Tuttavia, per comprendere l'evoluzione delle prestazioni nel tempo, vengono condotti anche studi su tempi di maturazione più brevi, come 1, 3 e 7 giorni. Questi tempi intermedi permettono di valutare l'andamento dei dati dei provini nel corso della maturazione, fornendo preziose informazioni sulle prestazioni immediate e sull'evoluzione nel tempo della resistenza e delle proprietà della miscela.

Sono stati dunque realizzati, per i 4 diversi tempi di prova, 3 campioni ciascuno.

Ogni campione, per ciascuna di queste condizioni temporali, è stato portato a rottura tramite prova di trazione indiretta per il calcolo della capacità di compressione. Per due di questi campioni è stato prima valutato anche il modulo resiliente.

|                   | <b>Giorno 1</b> | <b>Giorno 3</b> | <b>Giorno 7</b> | <b>Giorno 28</b> |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| <b>Campione 1</b> | S1-1            | S1-3            | S1-7            | S1-28            |
| <b>Campione 2</b> | S2-1            | S2-3            | S2-7            | S2-28            |
| <b>Campione 3</b> | S3-1            | S3-3            | S3-7            | S2-28            |

*Tabella 3.1: campioni realizzati*



*Figura 3.11: confezionamento campioni*

### 3.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE

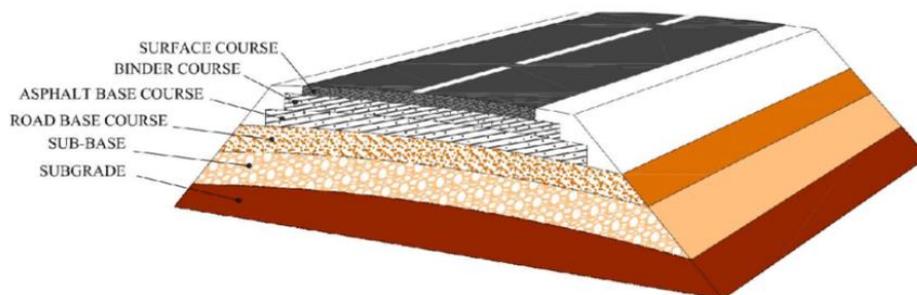
L'analisi delle proprietà meccaniche delle miscele cementizie, successivamente al mix design, riveste un ruolo fondamentale nell'assicurare la qualità e la durabilità delle infrastrutture stradali. In particolare, la valutazione del modulo resiliente, della resistenza a compressione non confinata e del modulo di escavabilità rappresenta un passaggio critico in questo processo.

Il modulo resiliente fornisce un'indicazione della capacità del materiale di ritornare alla sua forma originale dopo essere stato sottoposto a carichi ciclici, mentre la resistenza a compressione non confinata offre informazioni sulla sua resistenza ai carichi statici senza subire deformazioni permanenti. Il modulo di escavabilità, invece, indica la facilità con cui il materiale può essere rimosso durante le operazioni di manutenzione. Un'attenta valutazione di questi parametri contribuisce a garantire la robustezza, la sicurezza e la sostenibilità delle infrastrutture stradali nel lungo termine.

Per questa ricerca, è inoltre fondamentale sottolineare che sono state selezionate due modalità di carico per valutare le prestazioni del materiale: sia come strato di *subgrade* che come strato di *sub-base*.

Il *subgrade* costituisce il fondamento più profondo della struttura stradale, rappresentando il terreno naturale o il materiale terroso su cui viene costruita la strada. Le sue caratteristiche geotecniche, quali la capacità portante, la compressibilità, la coesione e la permeabilità, rivestono un'importanza determinante per la stabilità e la durabilità complessiva della pavimentazione. Durante la progettazione è importante condurre un'analisi dettagliata del *subgrade*, poiché un comportamento inadeguato può provocare deformazioni permanenti, avvallamenti e un precoce deterioramento della pavimentazione.

La *sub-base*, posizionata sopra il subgrade e al di sotto dello strato di base della pavimentazione, è composta da materiali granulari quali ghiaia, sabbia o aggregati frantumati. Il suo ruolo principale consiste nell'offrire un supporto uniforme e stabile per lo strato di base, distribuendo in modo omogeneo il carico veicolare. Oltre a migliorare la capacità portante, la subbase contribuisce significativamente al drenaggio, prevenendo l'accumulo di acqua nel subgrade e riducendo il rischio di danneggiamento della pavimentazione. La selezione e il posizionamento accurati dei materiali granulari per la subbase sono determinanti per garantire prestazioni ottimali nel lungo termine.



*Figura 3.12: schema rappresentativo degli strati di fondazione stradale*

### 3.3.1 Modulo resiliente

Lo studio si concentra sull'impiego di materiale granulare per il riempimento dei sottofondi stradali. È essenziale capire come questi materiali reagiscano sotto la pressione delle sollecitazioni ripetute del traffico veicolare, e quindi comprendere il proprio comportamento elastico. Questa dinamica influisce direttamente sul rendimento delle strade: dunque un parametro fondamentale per comprendere questa reazione è il modulo resiliente, indicato come  $M_r$ , che viene misurato tramite un test triassiale che simula il carico ripetuto.

Il conglomerato cementizio, proprio come le terre, non manifestano di per sé un comportamento elastico, ma lo assumono quando vengono sottoposti a cicli di stress. Il modulo resiliente è un elemento chiave per determinare lo spessore dell'asfalto in fase di progettazione.

Prima di approfondire la prova e il concetto di modulo resiliente, è importante comprendere lo stato di tensione nelle strade. I carichi esercitati generano tensioni verticali ( $\sigma_v$ ) e orizzontali ( $\sigma_h$ ) che variano sinusoidalmente. Ciò comporta una rotazione delle tensioni principali, evidenziata anche dalla variazione delle tensioni tangenziali, anch'esse soggette a variazioni sinusoidali.

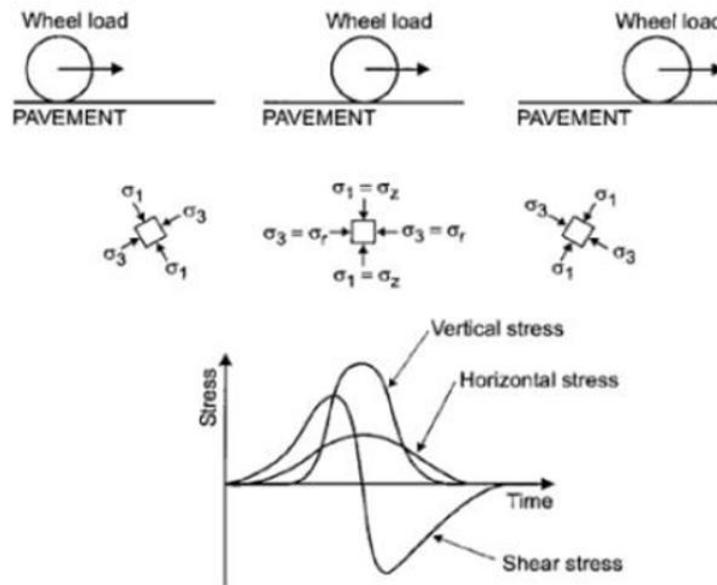


Figura 3.13: stato tensionale dovuto al transito di un veicolo

Esaminando il comportamento delle tensioni nel tempo su una porzione di terreno soggetta a un carico, si nota che le tensioni crescono progressivamente fino a raggiungere il loro massimo quando il carico è direttamente sopra di essa. Inoltre, durante lo spostamento del carico, avviene una rotazione dei piani principali.

Guardando l'evoluzione temporale delle tensioni in un piccolo elemento di terreno sotto un carico, si nota che all'inizio ( $t=0$ ) la distanza orizzontale tra il carico e l'elemento è significativa: quindi le tensioni sono trascurabili. Con il passare del tempo, il carico si muove lateralmente verso l'elemento di terreno, riducendo la distanza fino a quando il carico inizia a influenzare l'elemento stesso, generando tensioni verticali, orizzontali e di taglio.

Le tensioni verticali e orizzontali aumentano progressivamente fino a raggiungere il picco quando il carico è direttamente sopra il punto considerato, per poi diminuire. Al momento del picco delle tensioni verticali e orizzontali, quella di taglio si annulla. Inoltre, il movimento del carico provoca la rotazione dei piani principali.

La Figura 3.14.a illustra come i materiali non consolidati rispondono durante un ciclo di carico generico. Durante la fase di carico, si nota una non linearità poiché il modulo di rigidità varia a seconda dello stato di tensione: alla fine della fase di scarico, non tutte le deformazioni vengono recuperate. Di conseguenza, la risposta deformabile dei materiali non consolidati sotto carichi ciclici è composta da una componente recuperabile (resiliente) e una componente residua (permanente).

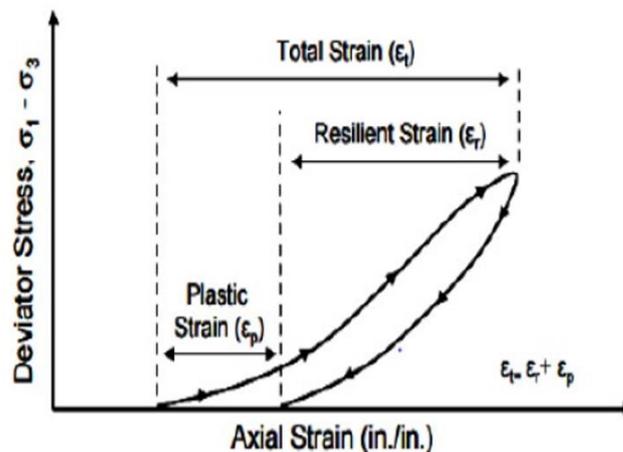


Figura 3.14.a: grafico tensione- deformazione

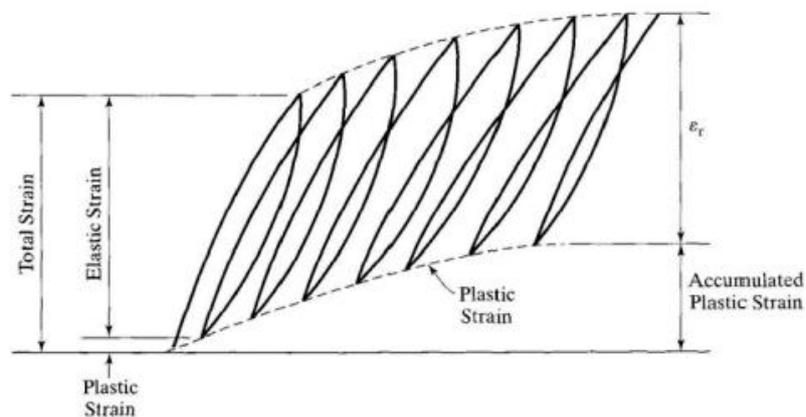


Figura 3.14.b: deformazioni sottoposte a test del modulo resiliente

Quando un terreno viene sottoposto a più cicli di carico, la curva di deformazione sotto carico si sovrappone gradualmente a quella di scarico. Questo perché la deformazione permanente associata a ogni ciclo si riduce progressivamente, mentre quella elastica si stabilizza su un valore costante.

### *3.3.1.1 Prova triassiale a carico ripetuto*

La prova triassiale a carico ripetuto simula le condizioni di stress e deformazione che si verificano in situ durante il transito dei veicoli. Questa prova è essenziale per determinare il modulo resiliente del conglomerato cementizio trattato come terreno, seguendo quelli che sono gli standard della normativa AASHTO T307 e coinvolge provini cilindrici con un'altezza doppia rispetto al diametro.

Per eseguire la prova, viene utilizzata una macchina (vedi Figura 3.15) con una cella interna dove viene posizionato il campione cementizio, rivestito da una guaina impermeabile e confinato superiormente e inferiormente da dischi di pietra porosa.



*Figura 3.15: impianto di prova triassiale utilizzato per il test del modulo resiliente*

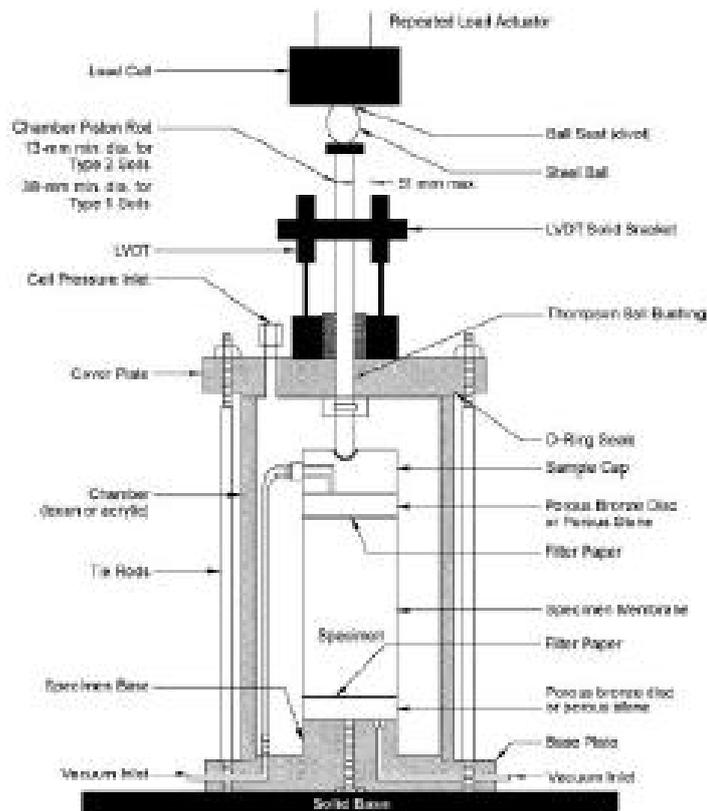


Figura 3.16: schema cella triassiale

La cella applica una pressione isotropa al campione, mentre lo sforzo assiale deviatorio è generato da un pistone che agisce attraverso impulsi ciclici di aria compressa. La cella di carico trasmette una pressione uniforme al campione, rappresentata da  $\sigma_3$ , mentre lo sforzo deviatorico, calcolato come la differenza tra la pressione laterale e quella verticale ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ), è generato da un pistone che utilizza impulsi ciclici di aria compressa.

A un dato istante, il campione all'interno della cella è soggetto a una pressione laterale di  $\sigma_3$  e a una pressione verticale di  $\sigma_1 = q + \sigma_3$  sulle sue basi. Di solito, la pressione di confinamento (che rappresenta la tensione minima) rimane costante, mentre lo sforzo deviatore, rappresentato da  $\sigma_d$ , agisce come carico pulsante. Una cella di carico elettronica è installata tra l'attuatore e il pistone per misurare questa forza.

Ai lati del pistone sono posizionati due trasduttori LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) che convertono il movimento verticale in segnali elettrici, permettendo così di misurare la deformazione assiale del campione.

Secondo le specifiche normative, i cicli di carico consistono in una fase di carico impulsiva con una durata di 0,1 secondi, seguita da una fase di riposo della durata di 0,9 secondi. Pertanto, il ciclo *i*-esimo ha una durata totale di 1 secondo.

Per determinare il modulo resiliente, è necessario stabilire una storia di carico. Inizialmente, il campione viene sottoposto a una fase di condizionamento per rimuovere le imperfezioni di contatto e gli effetti derivanti dalla compattazione precedente. Successivamente, il conglomerato viene esposto a 15 serie di carichi, ciascuna composta da 100 impulsi. Durante queste serie, vengono registrate le deformazioni medie recuperate da ciascun trasduttore LVDT per gli ultimi cinque cicli.

La fase iniziale di condizionamento coinvolge 1000 impulsi (sequenza 0), il cui scopo è eliminare le imperfezioni di contatto tra il campione e i piatti di prova e mitigare gli effetti della compattazione iniziale. Durante questa fase, la deformazione permanente tende a diminuire mentre quella resiliente aumenta fino a stabilizzarsi a un certo valore, da cui è possibile calcolare il modulo resiliente.

Dopo il condizionamento, il conglomerato viene sottoposto a 15 sequenze di carichi, ognuna composta da 100 impulsi, a un livello di sollecitazione specifico. Successivamente le deformazioni medie recuperate da ciascun LVDT vengono registrate separatamente per gli ultimi cinque cicli. Le sequenze di carico per il materiale oggetto di studio, classificato subgrade e base/subbase, sono riportate nella Tabella 3.2.

| Test Sequence | SUBGRADE                 |                               |                   | SUBBASE/BASE             |                               |                   |
|---------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------|
|               | Confining Pressure (psi) | Deviator (Axial) Stress (psi) | Bulk Stress (psi) | Confining Pressure (psi) | Deviator (Axial) Stress (psi) | Bulk Stress (psi) |
| 0             | 6                        | 4                             | 22.0              | 15                       | 15                            | 60.0              |
| 1             | 6                        | 2                             | 20.0              | 3                        | 3                             | 12.0              |
| 2             | 6                        | 4                             | 22.0              | 3                        | 6                             | 15.0              |
| 3             | 6                        | 6                             | 24.0              | 3                        | 9                             | 18.0              |
| 4             | 6                        | 8                             | 26.0              | 5                        | 5                             | 20.0              |
| 5             | 6                        | 10                            | 28.0              | 5                        | 10                            | 25.0              |
| 6             | 4                        | 2                             | 14.0              | 5                        | 15                            | 30.0              |
| 7             | 4                        | 4                             | 16.0              | 10                       | 10                            | 40.0              |
| 8             | 4                        | 6                             | 18.0              | 10                       | 20                            | 50.0              |
| 9             | 4                        | 8                             | 20.0              | 10                       | 30                            | 60.0              |
| 10            | 4                        | 10                            | 22.0              | 15                       | 10                            | 55.0              |
| 11            | 2                        | 2                             | 8.0               | 15                       | 15                            | 60.0              |
| 12            | 2                        | 4                             | 10.0              | 15                       | 30                            | 75.0              |
| 13            | 2                        | 6                             | 12.0              | 20                       | 15                            | 75.0              |
| 14            | 2                        | 8                             | 14.0              | 20                       | 20                            | 80.0              |
| 15            | 2                        | 10                            | 16.0              | 20                       | 40                            | 100.0             |

Tabella 3.2: sequenze di carico per subgrade e subbase

Le deformazioni resilienti sono calcolate utilizzando la seguente formula:

$$\varepsilon_{1,r} = \frac{\Delta h_r}{h_i}$$

Dove:

- $\Delta h_r$  rappresenta la variazione di altezza del provino una volta esaurita componente di deformazione plastica;
- $h_i$  è l'altezza iniziale del provino, dopo i 1000 colpi di condizionamento.

È possibile dunque determinare la risposta elastica del materiale in relazione al livello di stress. Il modulo resiliente è definito come il rapporto tra la tensione deviatorica e la deformazione elastica verticale.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{1,r}}$$

Per ciascun ciclo di carico, la macchina registra i seguenti dati:

- $\varepsilon_p$ : la deformazione permanente;
- $\sigma_3$ : la tensione di confinamento;
- $\sigma_{v,max}$ : la tensione assiale massima;
- $P_{v,max}$ : il carico massimo assiale;
- $P_{v,ciclo}$ : il carico di ciclo;
- $P_{v,contatto}$ : il carico di contatto;
- $\Delta h$ : lo spostamento resiliente medio;
- $\varepsilon_r$ : la deformazione resiliente;
- $M_r$ : il modulo resiliente.

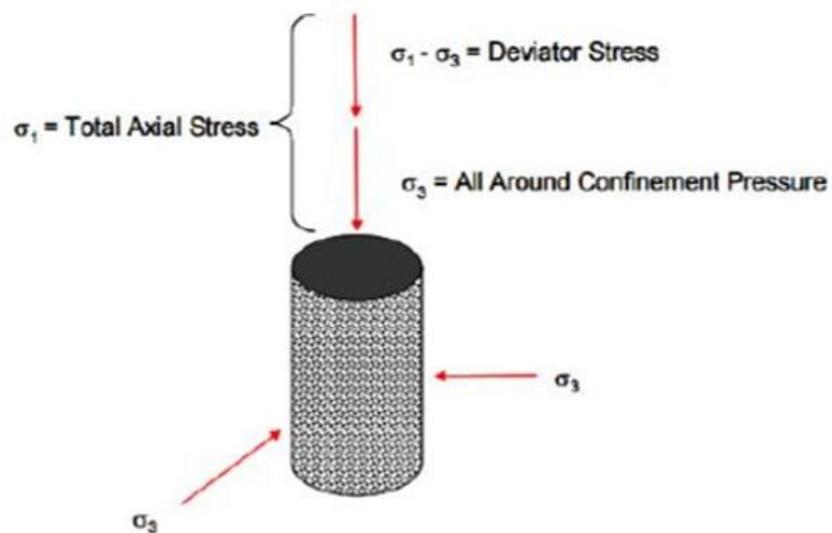


Figura 3.17: stato tensionale sul provino

### 3.3.2 Resistenza alla compressione

La prova UCS (*Unconfined Compression Strength*), è un test utilizzato per determinare la resistenza a compressione non confinata di un materiale, seguendo quanto riportato dalla normativa EN 12390-3. Questo test è particolarmente importante in quanto fornisce informazioni fondamentali sulla capacità di un materiale di sopportare carichi compressivi senza essere confinato lateralmente. In questa prova il campione cilindrico del materiale viene sottoposto a un carico applicato lungo il suo asse principale, senza confinamento laterale. Durante il test, viene misurata la resistenza del materiale alla compressione attraverso la registrazione della massima forza applicata prima della rottura del campione.

Il campione viene posizionato all'interno della macchina di prova, e su di esso viene applicato un carico uniassiale crescente in modo incrementale, attraverso una velocità di spostamento controllata, fissata a 1mm/min.



*Figura 3.18: macchina per test UCS*

Durante l'applicazione del carico, vengono registrati i valori di carico e deformazione del campione. La resistenza a compressione non confinata viene determinata misurando la massima forza registrata prima della rottura del campione.

Infine, i dati raccolti durante il test vengono analizzati per calcolare la resistenza a compressione non confinata del materiale, dividendo il carico massimo applicato (convertito in Newton) per l'area trasversale del campione di materiale. L'area trasversale è calcolata utilizzando il diametro del campione. Questo fornisce una misura della capacità del materiale di resistere alla compressione prima che avvenga una rottura.

### 3.3.3 Modulo di escavabilità

I CLSM sono soggetti a specifiche relative alla resistenza massima alla compressione non confinata (UCS) per garantire la loro escavabilità a lungo termine, soprattutto quando utilizzati come riempimento di trincee. Inoltre, si sottolinea che sia il contenuto di cemento che lo scheletro degli aggregati contribuiscono allo sviluppo della resistenza dei CLSM.

Si specifica che, nel caso in cui la UCS dopo un anno di indurimento sia inferiore a 1,00 MPa, tali miscele di CLSM sono considerate scavabili mediante attrezzi manuali ed attrezzature convenzionali in cantiere.

In Ohio viene proposto un approccio alternativo per valutare l'escavabilità dei CLSM noto come Modulo di Rimovibilità (RE), il quale viene calcolato come rapporto tra il peso specifico valutato in situ ( $W$ ), assunto come valore medio dei materiali CLSM, e la resistenza alla compressione non confinata ( $C$ ) per i diversi giorni di maturazione.

Valori di RE inferiori a 1,0 indicano che la miscela CLSM è considerata rimovibile.

$$RE = W^{1,5} \cdot 0,619 \cdot C^{0,5} \cdot 10^{-6}$$

Per soddisfare i requisiti relativi all'escavabilità, il contenuto di cemento impiegato deve essere inferiore o uguale a 150 kg/m<sup>3</sup> per le miscele esaminate. Nelle miscele di CLSM studiate nella presente tesi, RA50 e RA100, il contenuto di cemento è rispettivamente di 50 kg/m<sup>3</sup> e 100 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.4 Modelli

Nei casi in cui l'esecuzione di prove in laboratorio non è fattibile o mancano dati sperimentali, i modelli analitici costituiscono un valido strumento per descrivere fenomeni specifici in forma analitica. Questi modelli consentono di stimare parametri cruciali, come nel nostro caso il modulo resiliente.

Nel contesto di questa tesi, sono stati esaminati tre diversi modelli analitici, ognuno dei quali si propone di calcolare il valore del modulo resiliente. Successivamente, i valori stimati sono confrontati con quelli ottenuti tramite la prova triassiale. Tale confronto fornisce indicazioni su quale dei tre modelli sia più adatto per descrivere il comportamento del conglomerato in esame.

Il comportamento resiliente dei materiali granulari è strettamente legato allo stato tensionale a cui sono sottoposti. Di conseguenza, è fondamentale selezionare un modello analitico in grado di correlare il modulo resiliente allo stato tensionale, tenendo conto della non linearità della risposta di tali materiali. Tipicamente, la relazione tra il deviatore delle tensioni ( $q$ ) e la deformazione resiliente è rappresentata da una curva.

Tra i vari modelli presenti in letteratura, sono stati presi in considerazione i seguenti:

- Il modello MEPDG;
- Il modello Puppala;
- Il modello Mohammed.

Il modello *Hicks-Monismith*, noto anche come modello "K- $\theta$ ", è il più diffuso e semplice tra quelli analizzati. In questo modello, il modulo resiliente dipende dalla somma delle tre tensioni principali o tensione volumetrica, e questa dipendenza è regolata da due costanti che variano in base alle proprietà fisiche del materiale.

$$M_r = K_1 \cdot \theta^{K_2}$$

Dove:

- $K_1$  e  $K_2$  sono le costanti di regressione;
- $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$  tensione volumetrica.

Le costanti di regressione assumono valori diversi in base alle caratteristiche dei materiali, come granulometria dell'aggregato, forma, densità e contenuto in acqua. Sebbene questo modello sia di facile implementazione, presenta delle criticità che ne limitano la precisione, spingendo diversi studiosi a proporre modifiche nel corso degli anni.

Uzan, ad esempio, ha aggiunto un termine contenente la tensione deviatorica al modello K- $\theta$ , considerando che il modulo resiliente dei materiali granulari dipende non solo dalle tensioni volumetriche, ma anche dall'intensità della deformazione di scorrimento indotta principalmente dalla tensione deviatorica.

$$M_r = K_1 \cdot \theta^{K_2} \cdot q^{K_3}$$

Dove:

- $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  sono le costanti di regressione;
- $q = \sigma_3 - \sigma_1$  tensione deviatorica.

### 3.3.4.1 Modello MEPDG

Il modello MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) è un approccio complesso utilizzato per la progettazione delle pavimentazioni stradali. Esso si basa su modelli analitici che tengono conto di vari fattori, tra cui le proprietà dei materiali utilizzati.

Come detto, uno dei modelli analitici più diffusi è il modello "K-θ". Questo modello considera il modulo resiliente dipendente dalla somma delle tre tensioni principali o tensione volumetrica. Tale dipendenza è regolata da due costanti di regressione,  $K_1$  e  $K_2$ , che variano in base alle proprietà fisiche del materiale. Le costanti di regressione vengono determinate considerando le caratteristiche dell'aggregato, come la granulometria, la forma, la densità e il contenuto in acqua. Sebbene questo modello sia relativamente semplice da implementare, la sua precisione può essere limitata a causa di alcune criticità intrinseche.

Per migliorare la precisione del modello "K-θ", diversi studiosi hanno proposto modifiche nel corso degli anni. Ad esempio, *Uzan* ha aggiunto un termine contenente la tensione deviatorica al modello originale, considerando che il modulo resiliente dipende non solo dalle tensioni volumetriche, ma anche dall'intensità della deformazione di scorrimento indotta principalmente dalla tensione deviatorica. Questa modifica ha portato a una nuova formulazione del modello, in cui il modulo resiliente è determinato non solo dalle tensioni volumetriche, ma anche dalla tensione deviatorica. Tuttavia, nel contesto del MEPDG, la tensione deviatorica è sostituita dalla tensione ottaedrica, ampliando così il modello al caso tridimensionale e fornendo una rappresentazione più accurata del comportamento dei materiali granulari sotto carico.

$$M_r = K_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{K_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{K_3}$$

Dove:

- $K_1, K_2, K_3$ : costanti di regressione
- $p_a$ : pressione atmosferica
- $\theta$ : primo invariante (tensione volumetrica)
- $\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$  : tensione di taglio ottaedrale
- $\sigma_2 = \sigma_3$  : tensione laterale di confinamento
- $\sigma_1$ : tensione principale massima

#### 3.3.4.2 Modello Puppala

Il modello *Puppala* supera le criticità del modello K- $\theta$  introducendo sia la tensione deviatorica che quella di confinamento nella sua formulazione. Questo lo rende più completo e accurato nel descrivere il comportamento resiliente dei materiali granulari sotto carico.

La tensione deviatorica, come menzionato in precedenza, è importante perché rappresenta la componente delle tensioni principali che induce principalmente la deformazione di scorrimento nei materiali granulari. Tuttavia, il modello *Puppala* va oltre, considerando anche la tensione di confinamento. Quest'ultima è essenziale poiché rappresenta la pressione esterna che agisce sui materiali granulari da tutte le direzioni, influenzando significativamente il loro comportamento sotto carico.

$$M_r = K_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{K_2} \cdot \left(\frac{q}{p_a}\right)^{K_3} \cdot p_a$$

Dove:

- $K_1, K_2, K_3$ : costanti di regressione;
- $q = \sigma_3 - \sigma_1$ : tensione deviatorica.

### 3.3.4.3 Modello Mohammed

Il modello *Mohammed* è stato sviluppato per fornire una rappresentazione più precisa delle relazioni tra gli sforzi applicati e le deformazioni risultanti, rispetto ai modelli tradizionali come il modello *Hicks-Monismith*.

A differenza del modello "K- $\theta$ ", il modello *Mohammed* considera una formulazione più complessa, prendendo in considerazione una serie di parametri aggiuntivi che influenzano il comportamento resiliente dei materiali granulari. Questi parametri possono includere la forma e la dimensione degli aggregati, la distribuzione granulometrica, la densità, la coesione, l'attrito interno e altri fattori che possono influire sulla resistenza e sulla deformabilità del materiale.

Tuttavia, come con qualsiasi modello analitico, è importante considerare le limitazioni e le ipotesi alla base del modello *Mohammed* e confrontare i risultati previsti con dati sperimentali per confermare la sua validità e precisione.

$$M_r = K_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_{oct}}{p_a}\right)^{K_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a}\right)^{K_3}$$

Dove:

- $K_1, K_2, K_3$ : costanti di regressione
- $p_a$ : pressione atmosferica
- $\theta$ : primo invariante (tensione volumetrica)
- $\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$  : tensione di taglio ottaedrale
- $\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$  : tensione normale ottaedrale

## 4. ANALISI DEI RISULTATI

Per la progettazione della miscela di *Controlled Low-Strength Material (CLSM)*, sono stati impiegati tre diverse frazioni aggregate: aggregato fine, denominato "*Powder*", pietrisco di dimensioni comprese tra 3 e 8 mm, e il *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*. Poiché i CLSM devono soddisfare i requisiti di escavabilità a lungo termine, la potenziale riduzione della resistenza associata alla presenza di RAP è stata considerata un vantaggio.

### 4.1 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI COSTITUENTI

#### 4.1.1 Curva granulometrica

| D      | Passante [%]  |       |        |
|--------|---------------|-------|--------|
|        | Aggregate 3-8 | RAP   | Powder |
| [mm]   |               |       |        |
| 20     | 100,0         | 100,0 | 100,0  |
| 16     | 100,0         | 100,0 | 100,0  |
| 12,5   | 100,0         | 100,0 | 100,0  |
| 10     | 100,0         | 99,8  | 100,0  |
| 8      | 99,6          | 99,0  | 100,0  |
| 4      | 47,1          | 81,3  | 99,9   |
| 2      | 18,9          | 58,1  | 99,7   |
| 0,5    | 3,7           | 27,9  | 70,9   |
| 0,25   | 2,5           | 19,5  | 54,1   |
| 0,063  | 1,6           | 11,0  | 30,4   |
| Filler | -             | -     | -      |

Tabella 4.1: percentuale di passante degli aggregati

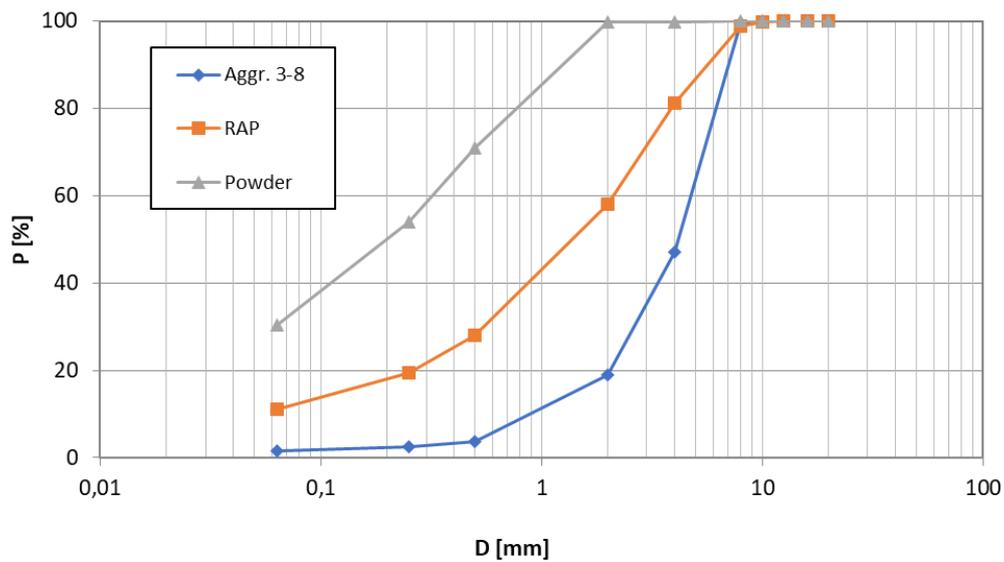


Figura 4.1: curva granulometrica degli aggregati

#### 4.1.2 Analisi di densità

| Aggregate 3-8 |        |        |        |        |      |      |             |             |                                  |                 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|------|------|-------------|-------------|----------------------------------|-----------------|
| Picnometro    | m0     | m1     | m2     | m3     | T1   | T3   | $\rho_{L1}$ | $\rho_{L3}$ | $\rho_p$                         |                 |
|               | [g]    | [g]    | [g]    | [g]    | [°C] | [°C] | [kg/m3]     | [kg/m3]     | [Mg/m3]                          |                 |
| P+R           | 889,3  | 585,6  | 2576,5 | 1305,8 | 24,2 | 21,4 | 0,9972      | 0,9979      | 2,8719                           |                 |
| 6+F           | 1041,3 | 562,5  | 2688,4 | 1279   | 24   | 26,8 | 0,9973      | 0,9966      | 2,8719                           |                 |
|               |        |        |        |        |      |      |             |             | <b>Media <math>\rho_p</math></b> | <b>2,8719</b>   |
|               |        |        |        |        |      |      |             |             | <b>Dev.St.</b>                   | 4,36E-06        |
|               |        |        |        |        |      |      |             |             | <b>C.V.</b>                      | 0,000152        |
| RAP           |        |        |        |        |      |      |             |             |                                  |                 |
| Picnometro    | m0     | m1     | m2     | m3     | T1   | T3   | $\rho_{L1}$ | $\rho_{L3}$ | $\rho_p$                         |                 |
|               | [g]    | [g]    | [g]    | [g]    | [°C] | [°C] | [kg/m3]     | [kg/m3]     | [Mg/m3]                          |                 |
| P+R           | 889,3  | 537,9  | 2519,2 | 1305,8 | 22,2 | 21,4 | 0,9977      | 0,9979      | 2,5130                           |                 |
| 6+F           | 1041,3 | 565,5  | 2663,1 | 1279   | 22,3 | 26,8 | 0,9977      | 0,9966      | 2,5171                           |                 |
|               |        |        |        |        |      |      |             |             | <b>Media <math>\rho_p</math></b> | <b>2,515067</b> |
|               |        |        |        |        |      |      |             |             | <b>Dev.St.</b>                   | 0,002924        |
|               |        |        |        |        |      |      |             |             | <b>C.V.</b>                      | 0,11625         |
| Powder        |        |        |        |        |      |      |             |             |                                  |                 |
| Picnometro    | m0     | m1     | m2     | m3     | T1   | T3   | $\rho_{L1}$ | $\rho_{L3}$ | $\rho_p$                         |                 |
|               | [g]    | [g]    | [g]    | [g]    | [°C] | [°C] | [kg/m3]     | [kg/m3]     | [Mg/m3]                          |                 |
| P+R           | 917,2  | 1118,2 | 2993,8 | 1343,4 | 24,1 | 26,3 | 0,9973      | 0,9967      | 2,8908                           |                 |
| 6+F           | 937,2  | 726,2  | 2741,6 | 1329,7 | 25,9 | 25,3 | 0,9968      | 0,9970      | 2,8807                           |                 |
|               |        |        |        |        |      |      |             |             | <b>Media <math>\rho_p</math></b> | <b>2,8858</b>   |
|               |        |        |        |        |      |      |             |             | <b>Dev.St.</b>                   | 0,007123        |
|               |        |        |        |        |      |      |             |             | <b>C.V.</b>                      | 0,246826        |

Tabella 4.2: massa volumica degli aggregati

## 4.2 MISCELE

Durante l'analisi dei risultati dei test di spandimento, è emerso un dato interessante: le miscele contenenti esclusivamente l'additivo MAPEIR AE 20 hanno dimostrato i risultati più promettenti. MAPEIR AE 20, prodotto dall'azienda MAPEI S.p.A., si distingue per le sue proprietà uniche nel migliorare la lavorabilità e le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo. Questo additivo tensioattivo aerante, progettato specificamente per calcestruzzi resistenti ai cicli di gelo e disgelo, incorpora microbolle d'aria nel composto, migliorandone la resistenza e la durabilità. Inoltre, MAPEIR AE 20 favorisce una migliore dispersione degli ingredienti e una maggiore coesione del materiale, contribuendo a ridurre la segregazione e il rischio di bleeding.

|                      | <b>Componenti</b>   | <b>Cemento</b> | <b>a/p</b> | <b>Additivo</b>     |
|----------------------|---------------------|----------------|------------|---------------------|
| <b>Denominazione</b> | <b>[-]</b>          | <b>[kg/m3]</b> | <b>[-]</b> | <b>[-]</b>          |
| <b>2C_RA50_0,5</b>   | Fine, RAP           | 50             | 0,5        | Dynamon, Viscofluid |
| <b>2C_RA75_0,6</b>   | Fine, RAP           | 75             | 0,6        | Dynamon, Viscofluid |
| <b>3C_RA50_0,5</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 50             | 0,5        | Dynamon, Viscofluid |
| <b>3C_RA50_0,6</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 50             | 0,6        | Dynamon, Viscofluid |
| <b>3C_RA50_0,7</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 50             | 0,7        | Dynamon, Viscofluid |
| <b>3C_RA50_0,5</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 50             | 0,5        | Dynamon, AE20       |
| <b>3C_RA50_0,6</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 50             | 0,6        | Dynamon, AE20       |
| <b>3C_RA50_0,7</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 50             | 0,7        | Dynamon, AE20       |
| <b>3C_RA75_0,6</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 75             | 0,6        | Dynamon, AE20       |
| <b>3C_RA100_0,6</b>  | Fine, RAP, 3-8      | 100            | 0,6        | Dynamon, AE20       |
| <b>3C_RA75_0,5</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 75             | 0,5        | Dynamon, AE20       |
| <b>3C_RA50_0,6</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 50             | 0,6        | AE20                |
| <b>3C_RA50_0,7</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 50             | 0,7        | AE20                |
| <b>3C_RA75_0,6</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 75             | 0,6        | AE20                |
| <b>3C_RA75_0,7</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 75             | 0,7        | AE20                |
| <b>3C_RA50_0,6</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 50             | 0,6        | Dynamon, AE20       |
| <b>3C_RA75_0,6</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 75             | 0,6        | Dynamon, AE20       |
| <b>3C_RA100_0,6</b>  | Fine, RAP, 3-8      | 100            | 0,6        | Dynamon, AE20       |
| <b>3C_RA50_0,8</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 50             | 0,8        | AE20                |
| <b>3C_RA75_0,8</b>   | Fine, RAP, 3-8      | 75             | 0,8        | AE20                |
| <b>3C_RA100_0,6</b>  | Fine, RAP, 3-8      | 100            | 0,6        | AE20                |
| <b>3C_RA100_0,7</b>  | Fine, RAP, 3-8      | 100            | 0,7        | AE20                |
| <b>3C_RA100_0,8</b>  | Fine, RAP, 3-8      | 100            | 0,8        | AE20                |
| <b>4C_RA50_0,5</b>   | Fine, CDW, 0-5, 3-8 | 50             | 0,5        | AE20                |
| <b>4C_RA50_0,6</b>   | Fine, CDW, 0-5, 3-8 | 50             | 0,6        | AE20                |
| <b>4C_RA75_0,6</b>   | Fine, CDW, 0-5, 3-8 | 75             | 0,6        | AE20                |
| <b>4C_RA50_0,7</b>   | Fine, CDW, 0-5, 3-8 | 50             | 0,7        | AE20                |
| <b>4C_RA75_0,7</b>   | Fine, CDW, 0-5, 3-8 | 75             | 0,7        | AE20                |
| <b>4C_RA100_0,7</b>  | Fine, CDW, 0-5, 3-8 | 100            | 0,7        | AE20                |
| <b>4C_RA50_0,8</b>   | Fine, CDW, 0-5, 3-8 | 50             | 0,8        | AE20                |
| <b>4C_RA75_0,8</b>   | Fine, CDW, 0-5, 3-8 | 75             | 0,8        | AE20                |
| <b>4C_RA100_0,8</b>  | Fine, CDW, 0-5, 3-8 | 100            | 0,8        | AE20                |

Tabella 4.3: miscele test di spandimento

Sulla base di queste valutazioni, abbiamo identificato due miscele che riteniamo adatte per proseguire nella ricerca. Questa selezione è stata adottata in base al rispetto dei limiti riguardanti il diametro di spandimento e l'assenza di fenomeni di bleeding e segregazione, confermati tramite un controllo visivo accurato.

| <b>3 CLASSI (Fine, RA, 3-8)</b> |   |
|---------------------------------|---|
| <b>RA50</b>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- a/p = <b>0,8</b> [-]</li> <li>- Cemento = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- Additivo: <b>AE20</b></li> <li>- Ds = 30,5 cm</li> </ul>   |
| <b>RA100</b>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- a/p = <b>0,7</b> [-]</li> <li>- Cemento = <b>100</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li> <li>- Additivo: <b>AE20</b></li> <li>- Ds = 24,25 cm</li> </ul> |

*Tabella 4.4: miscele scelte*



*Figura 4.2: spandimento di RA 50*



*Figura 4.3: spandimento di RA100*

Dove:

- a: dosaggio di acqua
- p: dosaggio di powder (materiale fine)
- Additivo AE20: additivo tensioattivo aerante
- Ds: diametro di spandimento, ovvero media dei due diametri valutati perpendicolarmente tra loro

### 4.3 PROVE MECCANICHE

#### 4.3.1 Modulo resiliente

I risultati delle prove triassiali a carico ripetuto sono stati elaborati tramite un programma e forniti in file di testo, successivamente trasferiti su Excel per condurre l'analisi. Nel Grafico 4.1 e 4.2, vengono presentati i confronti tra gli andamenti dei moduli resilienti ottenuti dopo 1, 3, 7 e 28 giorni di maturazione dei due campioni, e valori di  $\theta$  associati, insieme ai valori limiti relativi ai materiali granulari comunemente impiegati per i sottofondi stradali. Questo ci permette di comprendere meglio come le proprietà meccaniche del materiale cambiano in risposta al crescere dello sforzo applicato durante il processo di maturazione.

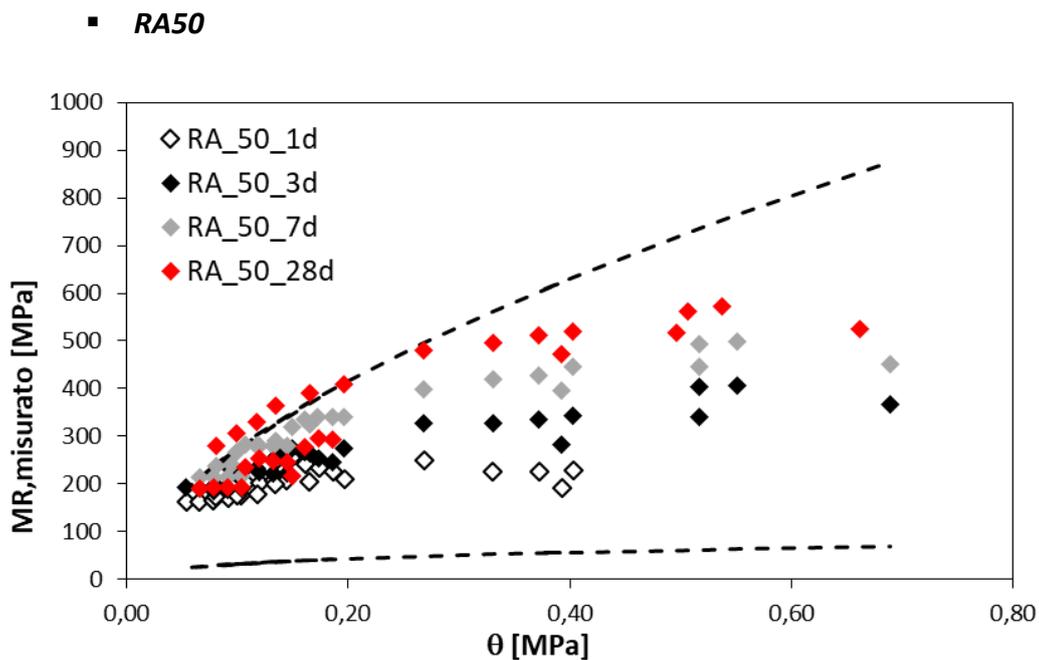
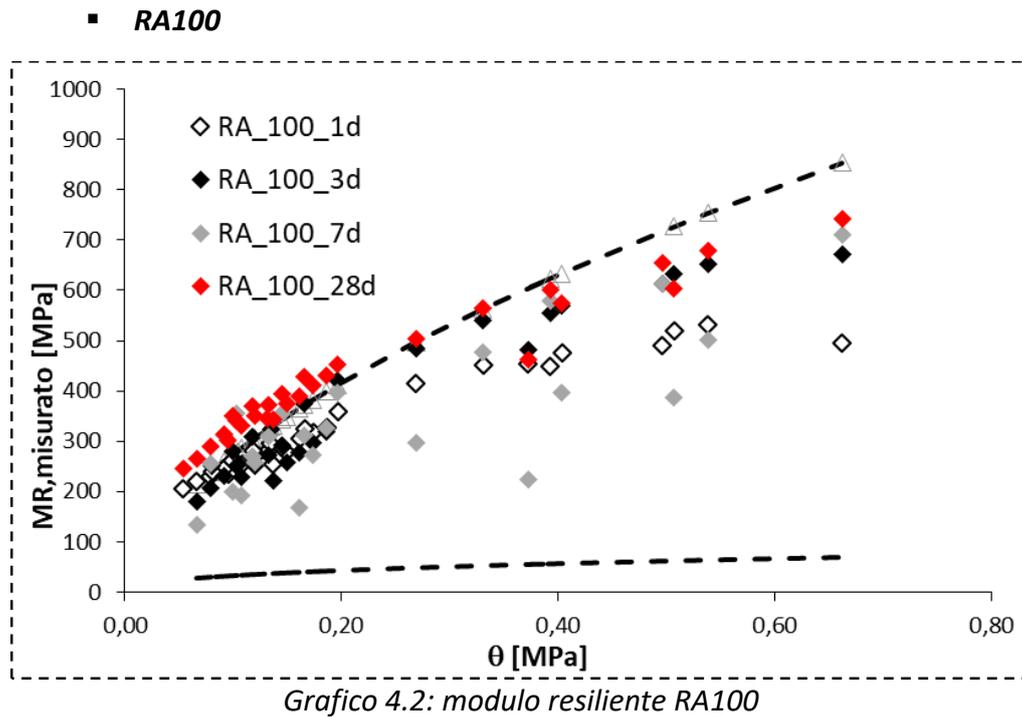


Grafico 4.1: modulo resiliente RA50



Per quanto riguarda la miscela RA50, si osserva un comportamento che mostra una tendenza a stabilizzarsi su valori costanti all'aumentare degli sforzi applicati sul campione, rappresentati dal primo invariante. Tale comportamento riflette una coerenza tra il modulo resiliente e i tempi di maturazione: all'aumentare dei tempi di maturazione, si registra una corrispondente crescita del modulo resiliente. Questo tipo di andamento, noto come "*stress-stiffening*", è caratteristico dei terreni granulari. Inoltre, è importante notare che i valori ottenuti rientrano perfettamente nei limiti definiti dalla letteratura per i materiali granulari. Da ciò si deduce che le malte oggetto di studio manifestano un comportamento simile a quello dei materiali granulari non leganti. Tuttavia, si osserva una leggera deviazione dal limite superiore per i valori relativi al 28° giorno di maturazione. Questa fuoriuscita potrebbe indicare una particolare sensibilità del materiale a lungo termine, meritevole di ulteriori approfondimenti e analisi.

Per la miscela RA100, emerge un andamento dei dati meno uniforme, caratterizzato da una mancanza di coerenza nell'aumento del primo invariante. In altre parole, non si osserva una diretta corrispondenza tra l'incremento della rigidità del materiale, derivante dall'indurimento progressivo del campione, e un aumento proporzionale del modulo resiliente. Questa discrepanza si evidenzia ulteriormente attraverso una maggiore deviazione rispetto ai limiti definiti dalla letteratura per i materiali granulari. Tale variazione suggerisce una maggiore instabilità nelle proprietà del materiale, sollevando interrogativi sulla sua affidabilità e consistenza rispetto alle aspettative.

#### 4.3.2 Resistenza alla compressione

Per ciascuno dei giorni di maturazione considerati (1, 3, 7, 28 giorni), abbiamo valutato la resistenza alla compressione non confinata (UCS), ottenuta attraverso la prova di resistenza a trazione indiretta (ITS), per ognuno dei tre campione esaminati. Questi valori di UCS sono stati analizzati in relazione al massimo carico registrato dalla pressa durante il test fino alla rottura del provino, e al diametro dello stesso. Successivamente, abbiamo calcolato il valore medio di UCS per fornire una rappresentazione accurata della resistenza alla compressione non confinata del materiale nei diversi stadi di maturazione.

- RA50

|    | UCS [MPa] |      |      |              |
|----|-----------|------|------|--------------|
|    | 1         | 2    | 3    | Valore medio |
| 1  | 0,11      | 0,15 | 0,11 | <b>0,12</b>  |
| 3  | 0,20      | 0,24 | 0,22 | <b>0,22</b>  |
| 7  | 0,35      | 0,36 | 0,35 | <b>0,35</b>  |
| 28 |           |      |      | <b>0,36</b>  |

*Tabella 4.5: valore medio UCS per RA50*

Per quanto riguarda i valori relativi al giorno di maturazione 28, è importante notare che non è stato possibile registrare alcun valore di UCS a causa di un'accidentale rottura del materiale prima dell'inizio del test. Di conseguenza, abbiamo adottato un valore di UCS leggermente superiore rispetto a quello rilevato al settimo giorno di maturazione per compensare questa mancanza.

- RA100

|    | UCS [MPa] |      |      |              |
|----|-----------|------|------|--------------|
|    | 1         | 2    | 3    | Valore medio |
| 1  | 0,43      | 0,40 | 0,35 | <b>0,39</b>  |
| 3  | 0,77      | 0,72 | 0,74 | <b>0,74</b>  |
| 7  | 0,91      | 0,94 | 0,90 | <b>0,91</b>  |
| 28 | 1         | 1,27 | 1,22 | <b>1,26</b>  |

*Tabella 4.6: valore medio UCS per RA100*

## 4.3.3 Modulo di escavabilità

▪ **RA50**

|                  | W [kg/m <sup>3</sup> ] | C [kPa] | RE [-]      |
|------------------|------------------------|---------|-------------|
| <b>Giorno 1</b>  | 1800                   | 123,7   | <b>0,53</b> |
| <b>Giorno 3</b>  | 1800                   | 217,5   | <b>0,70</b> |
| <b>Giorno 7</b>  | 1800                   | 352,7   | <b>0,89</b> |
| <b>Giorno 28</b> | 1800                   | 360,0   | <b>0,90</b> |

Tabella 4.7: modulo di escavabilità per RA50

▪ **RA100**

|                  | W [kg/m <sup>3</sup> ] | C [kPa] | RE [-]      |
|------------------|------------------------|---------|-------------|
| <b>Giorno 1</b>  | 1800                   | 393,7   | <b>0,94</b> |
| <b>Giorno 3</b>  | 1800                   | 744,5   | <b>1,29</b> |
| <b>Giorno 7</b>  | 1800                   | 914,6   | <b>1,43</b> |
| <b>Giorno 28</b> | 1800                   | 1263,4  | <b>1,68</b> |

Tabella 4.8: modulo di escavabilità per RA100

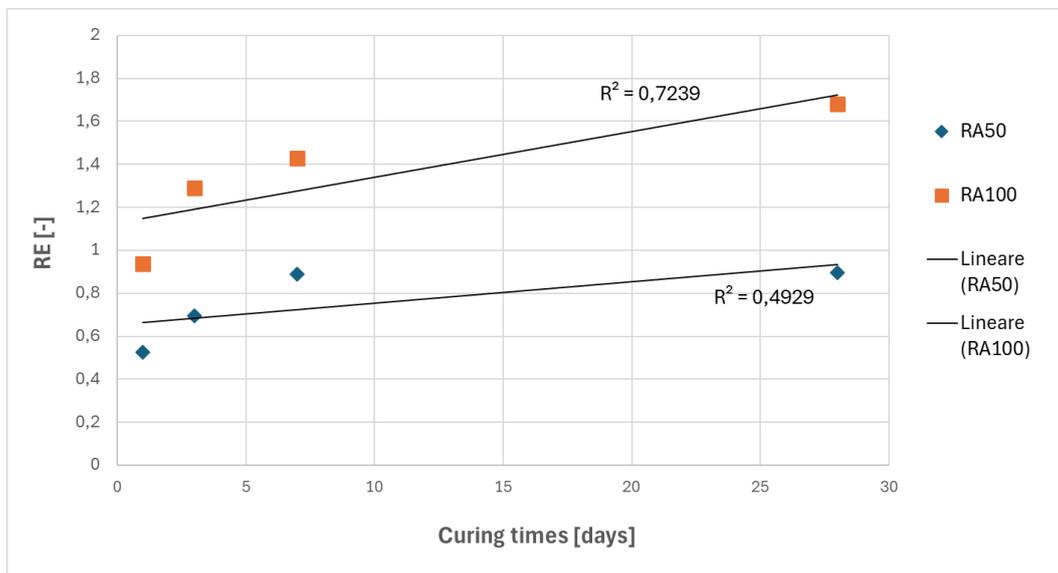


Grafico 4.3: modulo di escavabilità RA50 e RA100

#### 4.3.4 Modelli meccanici

Sulla base dei dati ricavati dalle prove per il calcolo del modulo resiliente, abbiamo optato per l'approccio proposto dal modello *Puppala*. Questa decisione è stata motivata dalla coerenza dei dati ottenuti con le aspettative, specialmente considerando l'evolversi dei tempi di maturazione. I risultati derivanti dai modelli *MEPDG* e *Mohammed* sono inclusi negli allegati della tesi.

##### ▪ RA50

| <i>PUPPALA</i> | $K_1$           | $K_2$ | $K_3$ | $R^2$  |
|----------------|-----------------|-------|-------|--------|
|                | <b>SUBGRADE</b> |       |       |        |
| <b>1</b>       | 2434            | 0,21  | -0,07 | 0,9448 |
| <b>3</b>       | 3449            | 0,32  | -0,01 | 0,9637 |
| <b>7</b>       | 4334            | 0,32  | 0,03  | 0,9774 |
| <b>28</b>      | 4874            | 0,37  | 0,09  | 0,8533 |
| <b>SUBBASE</b> |                 |       |       |        |
| <b>1</b>       | 2298            | 0,17  | -0,02 | 0,6634 |
| <b>3</b>       | 3464            | 0,30  | -0,01 | 0,9294 |
| <b>7</b>       | 4338            | 0,29  | 0,03  | 0,9534 |
| <b>28</b>      | 5073            | 0,27  | 0,02  | 0,9458 |

Tabella 4.9: parametri del modello *Puppala* per RA50

##### ▪ RA100

| <i>PUPPALA</i> | $K_1$           | $K_2$ | $K_3$ | $R^2$  |
|----------------|-----------------|-------|-------|--------|
|                | <b>SUBGRADE</b> |       |       |        |
| <b>1</b>       | 4485            | 0,29  | 0,12  | 0,9883 |
| <b>3</b>       | 5263            | 0,35  | 0,22  | 0,9767 |
| <b>7</b>       | 3725            | -0,07 | 0,66  | 0,8793 |
| <b>28</b>      | 5850,8          | 0,26  | 0,16  | 0,979  |
| <b>SUBBASE</b> |                 |       |       |        |
| <b>1</b>       | 4621            | 0,30  | 0,07  | 0,9619 |
| <b>3</b>       | 5540            | 0,31  | 0,16  | 0,9774 |
| <b>7</b>       | 5693,1          | 0,19  | 0,22  | 0,9716 |
| <b>28</b>      | 5693            | 0,19  | 0,22  | 0,9712 |

Tabella 4.10: parametri del modello *Puppala* per RA100

Nelle Tabelle 4.9 e 4.10 sono presenti i risultati derivanti dall'analisi di regressione condotta sui dati ottenuti dalle prove triassiali eseguite dopo 1, 3, 7 e 28 giorni di maturazione. Tale analisi fornisce i valori della costante di determinazione  $R^2$ , insieme alle costanti di regressione  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ .

Innanzitutto, focalizzando l'attenzione sulla costante  $K_1$ , la quale può essere interpretata come un indicatore della magnitudo del modulo resiliente, emerge un chiaro andamento di aumento nel tempo per tutti i modelli considerati. Questo aumento progressivo, verificatosi dall'inizio alla fine del periodo di prova, suggerisce un incremento della capacità di resistenza del materiale al passare del tempo, dovuto all'aumentare del tempo di maturazione e quindi di una maggiore rigidità da parte del materiale.

Per quanto riguarda la costante  $K_2$ , questa è strettamente legata alla pressione di confinamento e tende ad aumentare all'aumentare di quest'ultima. Analizzando i dati raccolti, emerge un interessante andamento: nonostante la resistenza del materiale aumenti con il passare del tempo di maturazione, i valori di  $K_2$  mostrano una relativa costanza e talvolta addirittura una lieve diminuzione. Questo suggerisce un consolidamento dei legami intergranulari all'interno del materiale con il progredire del processo di maturazione. Di conseguenza, la pressione di confinamento applicata risulta meno efficace nel comprimere il provino, poiché il materiale diventa più resistente agli sforzi esterni.

Il parametro  $K_3$  è correlato alla tensione deviatorica. Quando assume un valore positivo, si manifesta un fenomeno noto come incrudimento da stress. Questo è previsto poiché i materiali aggregati granulari tendono ad avere fenomeni di stress hardening, ossia un aumento dei moduli resilienti con l'incremento dello stress deviatorico a pressione di confinamento costante. Tuttavia, a causa della mancanza di dati sufficienti per stabilire correlazioni significative, attualmente non disponiamo di informazioni esaustive riguardo a questo parametro.

La costante  $R^2$  assume particolare rilevanza nella selezione del modello più idoneo, in quanto indica quanto il modello sia in grado di predire il modulo resiliente in accordo con i dati sperimentali. I valori di  $R^2$  variano da 0 a 1: valori più prossimi a 1 indicano un maggiore grado di affidabilità del modello nella previsione del comportamento del materiale.

## 5. CONCLUSIONI

Questo percorso di tesi si concentra sulla sfida delle operazioni sui sottoservizi stradali, dove la richiesta di interventi di collaudo, manutenzione o sostituzione richiede soluzioni efficaci per affrontare le problematiche emergenti. In questo contesto si è reso fondamentale individuare un materiale che non solo offra resistenza ai carichi veicolari, ma che presenti anche caratteristiche fisiche idonee per una rimozione agevole. In particolare, si è cercato un materiale che consentisse il riutilizzo del materiale fresato ottenuto dalla rimozione stessa, agevolando così la rimessa in opera. La soluzione ideale è emersa nel CLSM: un materiale auto-livellante che si compatta unicamente attraverso il proprio peso, riducendo la necessità di macchinari e manodopera per la sua posa.

Abbiamo quindi condotto un mix design mirato alla formulazione di un conglomerato cementizio che possedesse tali caratteristiche desiderate, utilizzando cemento e aggregati di dimensioni moderate per garantire un certo grado di elasticità. Durante il processo abbiamo esaminato tre tipi di combinazioni di componenti: miscele a 2, 3 e 4 classi. La nostra analisi si è concentrata sulle miscele a 3 classi, poiché quelle a 2 classi hanno mostrato fin dall'inizio evidenti fenomeni di segregazione. Le miscele a 4 classi saranno oggetto di studio in un lavoro futuro.

La ricerca della miscela ottimale ha coinvolto variazioni nel rapporto acqua e aggregato fine (a/p) e nel contenuto di cemento, esplorando diverse combinazioni di additivi. Abbiamo osservato che rapporti a/p troppo bassi causavano segregazione, mentre valori troppo alti causavano bleeding. Questi fenomeni si manifestavano anche quando combinavamo un additivo fluidificante come il Dynamon con uno che aumentava la viscosità come il Viscofluid. L'utilizzo esclusivo dell'additivo aerante AE20 ha portato a miglioramenti significativi nelle prestazioni. Le due miscele selezionate, di conseguenza, hanno incorporato solo l'additivo AE20, differenziandosi principalmente per il contenuto di cemento (50

---

kg/m<sup>3</sup> e 100 kg/m<sup>3</sup>). In futuro, un'area di ricerca potrebbe concentrarsi sull'ottimizzazione della miscela, esplorando una via di mezzo tra le due composizioni selezionate. Questo coinvolgerebbe la formulazione di una miscela con un contenuto di cemento intermedio, come 75 kg/m<sup>3</sup>, e un rapporto acqua e aggregato fine (a/p) di 0,8, mantenendo costante l'uso dell'additivo AE20. Durante il test di spandimento, infatti, questa nuova miscela ha dimostrato un'eccellente capacità di distribuzione uniforme del proprio composto.

Successivamente, durante il processo di confezionamento dei campioni cilindrici, ci siamo trovati di fronte a una sfida significativa: con un aumento considerevole delle quantità di materiale, ben 12 volte maggiore rispetto a quello utilizzato nelle prove di spandimento, è emersa la difficoltà nella gestione di tali volumi. È stato essenziale, nella creazione della miscela, combinare l'azione di mescolazione meccanica fornita dalla betoniera con un intervento manuale periodico. Questo approccio ci ha permesso di garantire una maggiore omogeneità tra tutte le componenti del composto, fondamentale per ottenere risultati affidabili nelle prove successive.

Le prove meccaniche successive, incentrate sul calcolo del modulo resiliente, hanno incontrato alcuni ostacoli a causa di un funzionamento non sempre impeccabile del macchinario utilizzato. Questo ha comportato, in alcune sequenze di carico, il mancato impatto dell'attuatore sul pistone posizionato a contatto con il campione, con conseguente mancata registrazione dei dati. Nel caso delle prove di compressione, è stato cruciale mantenere un controllo visivo costante e accurato per determinare con precisione il momento in cui il campione raggiungeva la rottura effettiva, garantendo così una valutazione accurata delle prestazioni del materiale.

La ricerca condotta ha evidenziato l'importanza essenziale di trovare soluzioni innovative per affrontare le sfide legate alla viabilità stradale, in particolare per quanto riguarda l'esecuzione di lavori su strada. L'obiettivo di ricercare un materiale che combinasse caratteristiche fisiche ottimali con la capacità di riutilizzo del fresato ha portato all'identificazione dei materiali CLSM come una soluzione promettente.

Attraverso un meticoloso processo di mix design e sperimentazione, sono emerse due miscele di CLSM che hanno dimostrato proprietà soddisfacenti in termini di lavorabilità e prestazioni meccaniche. Queste miscele sono destinate a rappresentare una valida alternativa per la realizzazione di sottoservizi stradali, offrendo vantaggi significativi in termini di facilità di posa e riduzione dell'impatto ambientale.

Tuttavia, nonostante i progressi compiuti, rimangono sfide importanti da affrontare nell'implementazione su larga scala dei materiali CLSM. Il costo iniziale elevato, la necessità di attrezzature specializzate, la manodopera esperta, rappresentano ostacoli significativi per la propria gestione e realizzazione. Inoltre, la mancanza di protocolli standardizzati per i test post-costruzione e la limitata evidenza da casi di studio documentati, complicano la verifica delle prestazioni e la valutazione dell'efficacia dei materiali CLSM in varie condizioni geotecniche.

Nonostante queste sfide, i materiali di riempimento alternativi e leggeri come i CLSM offrono un potenziale significativo per migliorare l'efficienza e la sostenibilità delle operazioni stradali. È fondamentale continuare la ricerca e lo sviluppo di procedure standardizzate per massimizzare i vantaggi di questi materiali innovativi, e affrontare le sfide legate alla loro adozione su vasta scala.

## 6. APPENDICI

### 6.1 CARATTERISTICHE DEI COMPONENTI

#### 6.1.1 PROVE DI SPANDIMENTO SU PIASTRA

|  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>2</b> classes (Fine, RA)</li><li>- <math>w/p = 0,5</math> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + Viscofluid</b></li></ul> |    |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>2</b> classes (Fine, RA)</li><li>- <math>w/p = 0,6</math> [-]</li><li>- cement = <b>75</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + Viscofluid</b></li></ul> |  |

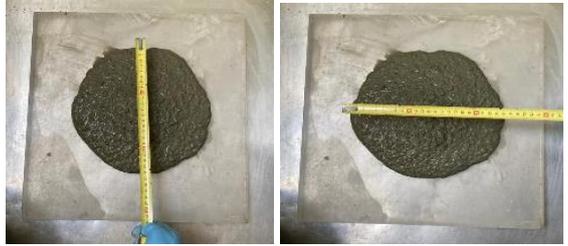
|   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,5</b> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + Viscofluid</b></li></ul> |    |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,6</b> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + Viscofluid</b></li></ul> |   |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,7</b> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + Viscofluid</b></li></ul> |  |

|   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,5</math> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + AE20</b></li></ul> |    |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,6</math> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + AE20</b></li></ul> | <br><br>$\phi = 21,5$ cm $\phi = 21$ cm |

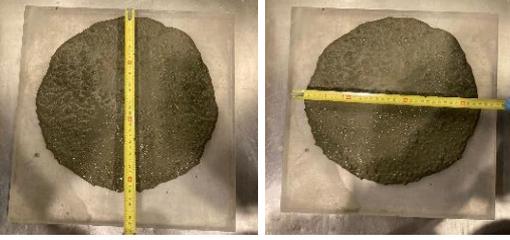
|   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,7</b> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + AE20</b></li></ul> |    |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,6</b> [-]</li><li>- cement = <b>75</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + AE20</b></li></ul> | <br><br><p>φ = 30 cm                      φ = 30 cm</p> |

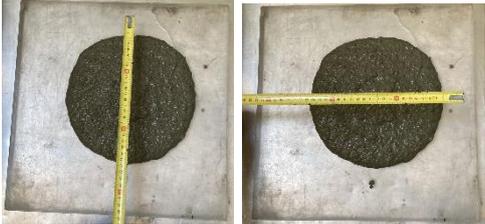
|  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,6</b> [-]</li><li>- cement = <b>100</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + AE20</b></li></ul> |  <p><math>\phi = 28 \text{ cm}</math>                      <math>\phi = 29,5 \text{ cm}</math></p> |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,5</b> [-]</li><li>- cement = <b>75</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + AE20</b></li></ul>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,6</b> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul>            |   |

|   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,7</math> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> | <br> <p><math>\phi = 21</math> cm      <math>\phi = 20</math> cm</p> |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,6</math> [-]</li><li>- cement = <b>75</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> |   |

|   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,7</math> [-]</li><li>- cement = <b>75</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul>           | <br> <p><math>\phi = 25</math> cm      <math>\phi = 25</math> cm</p>    |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,6</math> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + AE20</b></li></ul> | <br> <p><math>\phi = 24</math> cm      <math>\phi = 23</math> cm</p> |

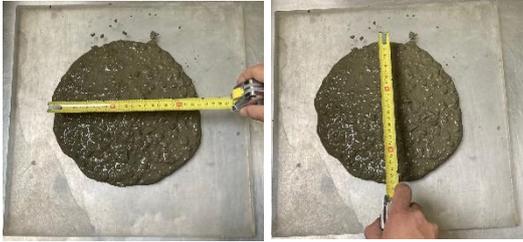
|  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,6</math> [-]</li><li>- cement = <b>75</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + AE20</b></li></ul>  | <br> <p><math>\phi = 26</math> cm                      <math>\phi = 27</math> cm</p>     |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,6</math> [-]</li><li>- cement = <b>100</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>Dynamon + AE20</b></li></ul> | <br> <p><math>\phi = 31</math> cm                      <math>\phi = 30</math> cm</p> |

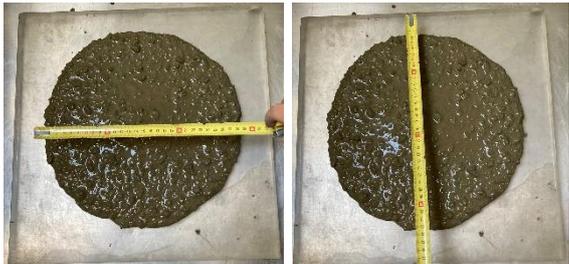
|   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,8</math> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> | <br> <p><math>\phi = 30</math> cm      <math>\phi = 31</math> cm</p>    |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,8</math> [-]</li><li>- cement = <b>75</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> | <br> <p><math>\phi = 32</math> cm      <math>\phi = 33</math> cm</p> |

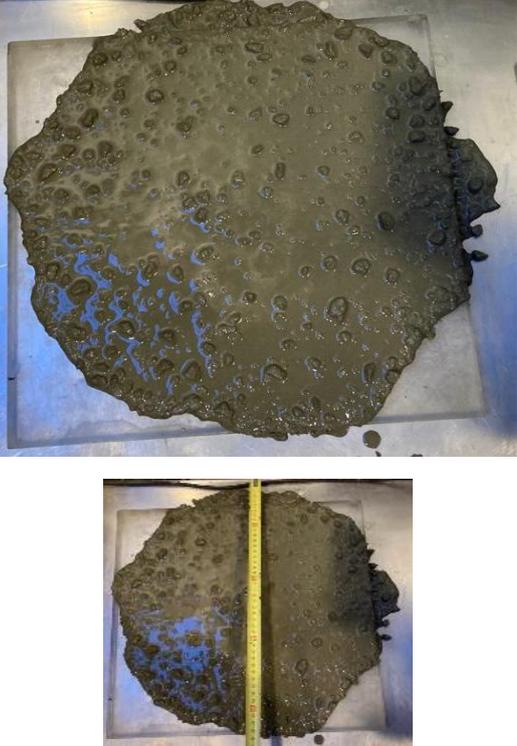
|  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,6</math> [-]</li><li>- cement = <b>100</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> |    |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,7</math> [-]</li><li>- cement = <b>100</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> | <br><br>$\phi = 24$ cm $\phi = 24,5$ cm |

|   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>3</b> classes (Fine, RA, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,8</math> [-]</li><li>- cement = <b>100</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul>      | <br><br>$\phi = 35$ cm $\phi = 35$ cm |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- <b>4</b> classes (Fine, CDW, 0-5, 3-8)</li><li>- <math>w/p = 0,5</math> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> |   |

|  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- 4 classes (Fine, CDW, 0-5, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,6</b> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> |   |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- 4 classes (Fine, CDW, 0-5, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,6</b> [-]</li><li>- cement = <b>75</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> |  |

|  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- 4 classes (Fine, CDW, 0-5, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,7</b> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> | <br> <p><math>\phi = 24 \text{ cm}</math>      <math>\phi = 26 \text{ cm}</math></p>      |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- 4 classes (Fine, CDW, 0-5, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,7</b> [-]</li><li>- cement = <b>75</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> | <br> <p><math>\phi = 26 \text{ cm}</math>      <math>\phi = 26,5 \text{ cm}</math></p> |

|   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- 4 classes (Fine, CDW, 0-5, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,7</b> [-]</li><li>- cement = <b>100</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> | <br> <p><math>\phi = 30,5 \text{ cm}</math>      <math>\phi = 31 \text{ cm}</math></p>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- 4 classes (Fine, CDW, 0-5, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,8</b> [-]</li><li>- cement = <b>50</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul>  | <br> <p><math>\phi = 30 \text{ cm}</math>      <math>\phi = 31 \text{ cm}</math></p> |

|   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>- 4 classes (Fine, CDW, 0-5, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,8</b> [-]</li><li>- cement = <b>75</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul>  |  <p><math>\phi = 37 \text{ cm}</math>      <math>\phi = 36 \text{ cm}</math></p> |
| <ul style="list-style-type: none"><li>- 4 classes (Fine, CDW, 0-5, 3-8)</li><li>- w/p = <b>0,8</b> [-]</li><li>- cement = <b>100</b> [kg/m<sup>3</sup>]</li><li>- Additive: <b>AE20</b></li></ul> |  <p><math>\phi = 37 \text{ cm}</math></p>                                       |

## 6.1.2 FOGLIO DI CALCOLO DELLA MISCELA RA50

|                        |     |                 |
|------------------------|-----|-----------------|
| Admixture MAPEAIR AE20 | 0,5 | l/100 kg cement |
| W/P                    | 0,8 | -               |

| <b>Dosages</b>         |        |                      |
|------------------------|--------|----------------------|
| Cement                 | 50     | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Admixture MAPEAIR AE20 | 0,2525 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Watercem               | 40     | [kg/m <sup>3</sup> ] |

| <b>Density</b>         |      |                      |
|------------------------|------|----------------------|
| Cement                 | 3150 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Admixture MAPEAIR AE20 | 1010 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Water                  | 997  | [kg/m <sup>3</sup> ] |

|        |      |
|--------|------|
| P0.1mm | 24,6 |
|--------|------|

| <b>Volumes</b>         |        |                                   |
|------------------------|--------|-----------------------------------|
| Cement                 | 0,0159 | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] |
| Admixture MAPEAIR AE20 | 0,0003 | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] |
| Watercem               | 0,0401 | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] |
| Water+Aggregates       | 0,9438 | [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] |

|                | % by weight | % by weightcorr | pmw [g/cm <sup>3</sup> ] | Volume [cm <sup>3</sup> ] | % by volume | Volume [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | Mass [kg] |
|----------------|-------------|-----------------|--------------------------|---------------------------|-------------|--|-----------|
| FINE AGGREGATE | 56          | 46,8            | 2,503                    | 18,7                      | 39,0        | 0,368                                    | 920,3     |
| RA             | 20          | 16,7            | 2,886                    | 5,8                       | 12,1        | 0,114                                    | 328,7     |
| 3-8            | 24          | 20,0            | 2,870                    | 7,0                       | 14,6        | 0,137                                    | 394,4     |
| Waterpowder    | 19,7        | 16,5            | 0,997                    | 16,5                      | 34,4        | 0,325                                    | 323,8     |
|                | 119,7       | 100,0           |                          |                           | 100,0       | 0,9438                                   |           |

| <b>Recipe for 1 m<sup>3</sup></b> |       |                      |
|-----------------------------------|-------|----------------------|
| Cement                            | 50    | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| FINE AGGREGATE                    | 920,3 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| RA                                | 328,7 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| 3-8                               | 394,4 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Admixture MAPEAIR AE20            | 0,3   | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Watertot                          | 363,8 | [kg/m <sup>3</sup> ] |

|     |      |     |
|-----|------|-----|
| W/P | 0,80 | [%] |
| C/P | 0,11 | [%] |
| W/C | 7,28 | [%] |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| Admixture MAPEAIR AE20 | 0,5 |
| <b>MAPEAIR AE20</b>    |     |

|                                 |       |                |
|---------------------------------|-------|----------------|
| <b>Recipe for 1 spread test</b> | 828,3 | (cm3)          |
| 41,4                            | (g)   | Cement         |
| 762,3                           | (g)   | FINE AGGREGATE |
| 272,3                           | (g)   | RA             |
| 326,7                           | (g)   | 3-8            |
| 0,21                            | (g)   | MAPEAIR AE20   |
| 301,3                           | (g)   | Watertot       |

|                          |        |                |
|--------------------------|--------|----------------|
| <b>Recipe for 1 mold</b> | 2083,1 | (cm3)          |
| 104,2                    | (g)    | Cement         |
| 1917,1                   | (g)    | FINE AGGREGATE |
| 684,7                    | (g)    | RA             |
| 821,6                    | (g)    | 3-8            |
| 0,5                      | (g)    | MAPEAIR AE20   |
| 757,8                    | (g)    | Watertot       |

|                           |         |                |
|---------------------------|---------|----------------|
| <b>Recipe for 12 mold</b> | 24996,9 | (cm3)          |
| 1249,8                    | (g)     | Cement         |
| 23005,0                   | (g)     | FINE AGGREGATE |
| 8216,1                    | (g)     | RA             |
| 9859,3                    | (g)     | 3-8            |
| 6,3                       | (g)     | MAPEAIR AE20   |
| 9093,3                    | (g)     | Watertot       |

## 6.1.3 FOGLIO DI CALCOLO DELLA MISCELA RA100

|                        |     |                 |
|------------------------|-----|-----------------|
| Admixture MAPEAIR AE20 | 0,5 | l/100 kg cement |
| W/P                    | 0,7 | -               |

| <b>Dosages</b>         |       |         |
|------------------------|-------|---------|
| Cement                 | 100   | [kg/m3] |
| Admixture MAPEAIR AE20 | 0,505 | [kg/m3] |
| Watercem               | 70    | [kg/m3] |

| <b>Density</b>         |      |         |
|------------------------|------|---------|
| Cement                 | 3150 | [kg/m3] |
| Admixture MAPEAIR AE20 | 1010 | [kg/m3] |
| Water                  | 997  | [kg/m3] |

|        |      |
|--------|------|
| P0.1mm | 24,6 |
|--------|------|

| <b>Volumes</b>         |        |         |
|------------------------|--------|---------|
| Cement                 | 0,0317 | [m3/m3] |
| Admixture MAPEAIR AE20 | 0,0005 | [m3/m3] |
| Watercem               | 0,0702 | [m3/m3] |
| Water+Aggregates       | 0,8975 | [m3/m3] |

|                | <b>% by weight</b> | <b>% by weightcorr</b> | <b>pmw [g/cm3]</b> | <b>Volume [cm3]</b> | <b>% by volume</b> | <b>Volume [m3/m3]</b> | <b>Mass [kg]</b> |
|----------------|--------------------|------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| FINE AGGREGATE | 56                 | 47,8                   | 2,503              | 19,1                | 40,7               | 0,365                 | 914,6            |
| RA             | 20                 | 17,1                   | 2,886              | 5,9                 | 12,6               | 0,113                 | 326,6            |
| 3-8            | 24                 | 20,5                   | 2,870              | 7,1                 | 15,2               | 0,137                 | 392,0            |
| Waterpowder    | 17,2               | 14,7                   | 0,997              | 14,7                | 31,5               | 0,282                 | 281,5            |
|                | 117,2              | 100,0                  |                    |                     | 100,0              | 0,8975                |                  |

|     |      |     |
|-----|------|-----|
| W/P | 0,70 | [%] |
| C/P | 0,20 | [%] |
| W/C | 3,52 | [%] |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| Admixture MAPEAIR AE20 | 0,5 |
| <b>MAPEAIR AE20</b>    |     |

| <b>Recipe for 1 m3</b> |       |         |
|------------------------|-------|---------|
| Cement                 | 100   | [kg/m3] |
| FINE AGGREGATE         | 914,6 | [kg/m3] |
| RA                     | 326,6 | [kg/m3] |
| 3-8                    | 392,0 | [kg/m3] |
| Admixture MAPEAIR AE20 | 0,5   | [kg/m3] |
| Watertot               | 351,5 | [kg/m3] |

| <b>Recipe for 1 spread test</b> | 828,3 | (cm3)          |
|---------------------------------|-------|----------------|
| 82,8                            | (g)   | Cement         |
| 757,6                           | (g)   | FINE AGGREGATE |
| 270,6                           | (g)   | RA             |
| 324,7                           | (g)   | 3-8            |
| 0,42                            | (g)   | MAPEAIR AE20   |
| 291,2                           | (g)   | Watertot       |

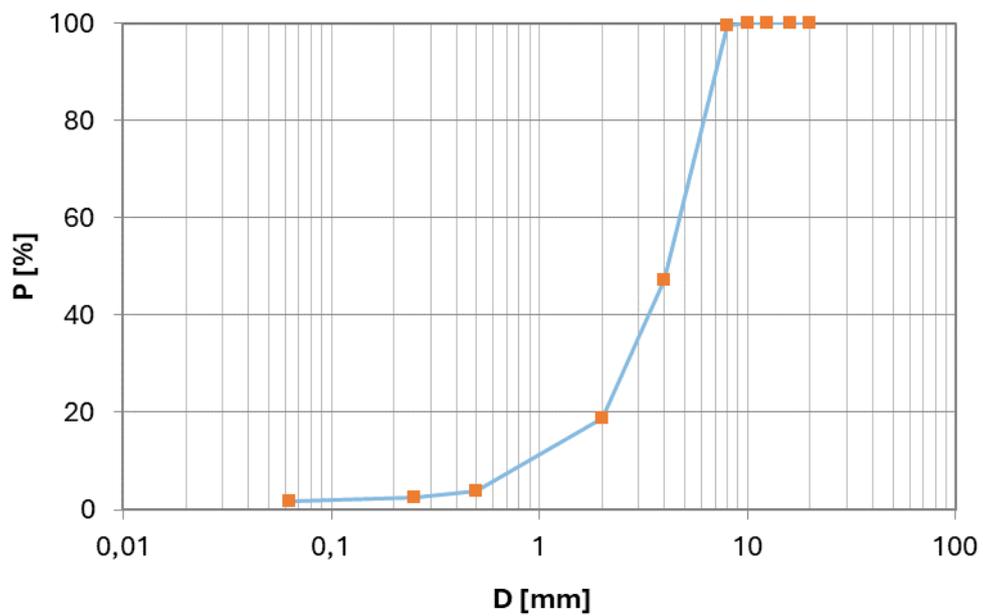
| <b>Recipe for 1 mold</b> | 2083,1 | (cm3)          |
|--------------------------|--------|----------------|
| 208,3                    | (g)    | Cement         |
| 1905,2                   | (g)    | FINE AGGREGATE |
| 680,4                    | (g)    | RA             |
| 816,5                    | (g)    | 3-8            |
| 1,1                      | (g)    | MAPEAIR AE20   |
| 732,3                    | (g)    | Watertot       |

| <b>Recipe for 12 mold</b> | 24996,9 | (cm3)          |
|---------------------------|---------|----------------|
| 2499,7                    | (g)     | Cement         |
| 22861,9                   | (g)     | FINE AGGREGATE |
| 8165,0                    | (g)     | RA             |
| 9798,0                    | (g)     | 3-8            |
| 12,6                      | (g)     | MAPEAIR AE20   |
| 8787,5                    | (g)     | Watertot       |

## 6.1.4 ANALISI GRANOMETRICA DEI COMPONENTI

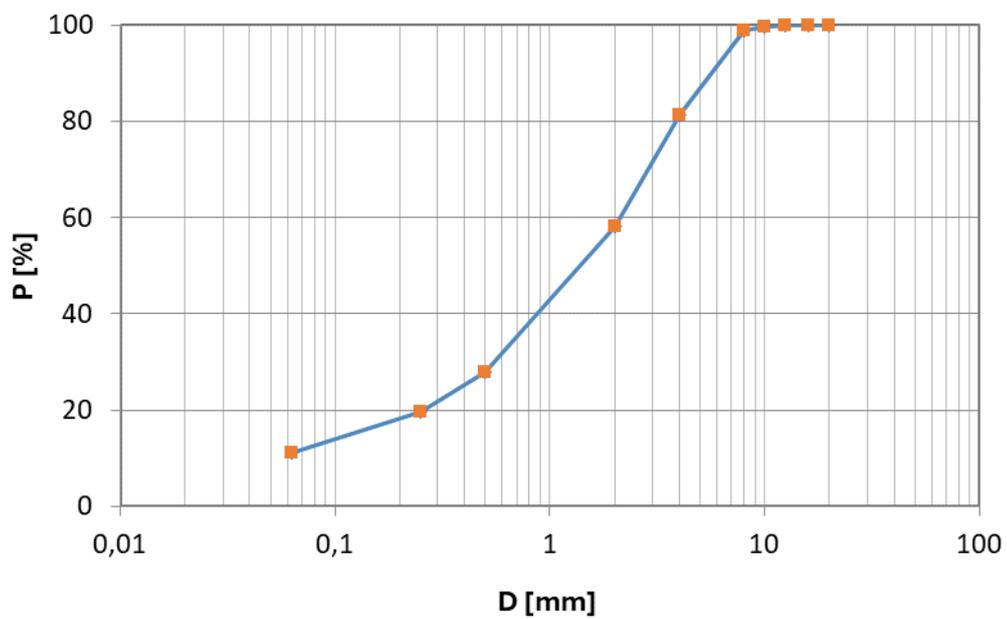
- **Aggregate 3-8**

| D      | Trattenuto | Trattenuto <sub>progressivo</sub> | Trattenuto <sub>progressivo</sub> | Passante |
|--------|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|
| 20     | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 16     | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 12,5   | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 10     | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 8      | 4,4        | 4,4                               | 0,4                               | 99,6     |
| 4      | 621,7      | 626,1                             | 52,9                              | 47,1     |
| 2      | 333,2      | 959,3                             | 81,1                              | 18,9     |
| 0,5    | 180,5      | 1139,8                            | 96,3                              | 3,7      |
| 0,25   | 14,4       | 1154,2                            | 97,5                              | 2,5      |
| 0,063  | 10,6       | 1164,8                            | 98,4                              | 1,6      |
| Filler | 18,7       | 1183,5                            | 100,0                             | -        |
| Totale | 1183,5     |                                   |                                   |          |



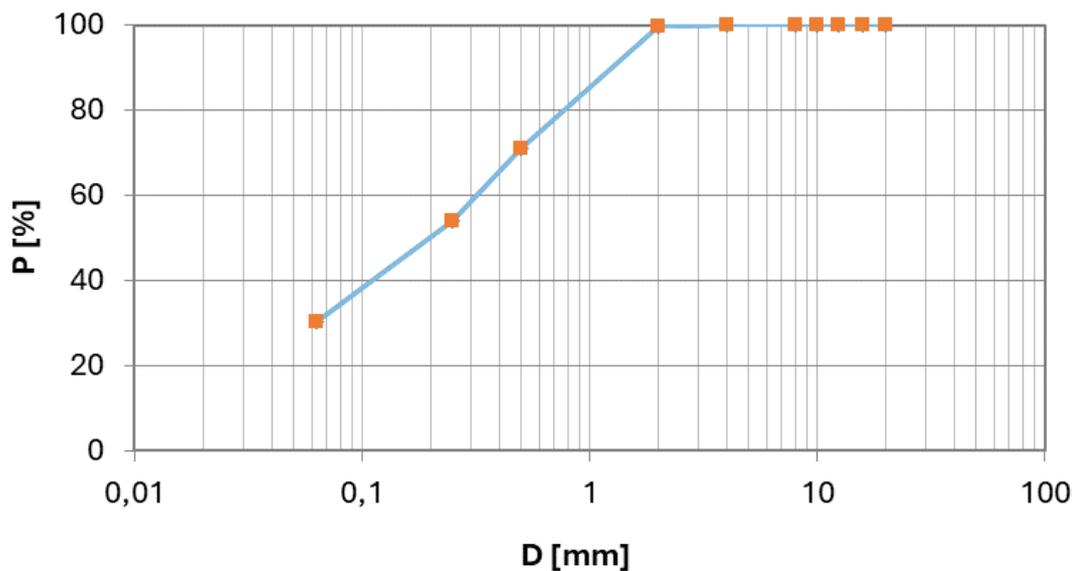
- RAP

| D      | Trattenuto | Trattenuto <sub>progressivo</sub> | Trattenuto <sub>progressivo</sub> | Passante |
|--------|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|
| (mm)   | (g)        | (g)                               | (%)                               | (%)      |
| 20     | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 16     | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 12,5   | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 10     | 2,3        | 2,3                               | 0,2                               | 99,8     |
| 8      | 10,4       | 12,7                              | 1,0                               | 99,0     |
| 4      | 214,6      | 227,3                             | 18,7                              | 81,3     |
| 2      | 281,4      | 508,7                             | 41,9                              | 58,1     |
| 0,5    | 366,4      | 875,1                             | 72,1                              | 27,9     |
| 0,25   | 102,4      | 977,5                             | 80,5                              | 19,5     |
| 0,063  | 102,9      | 1080,4                            | 89,0                              | 11,0     |
| Filler | 133,9      | 1214,3                            | 100,0                             | -        |
| Totale | 1214,3     |                                   |                                   |          |



- Powder:

| D      | Trattenuto | Trattenuto <sub>progressivo</sub> | Trattenuto <sub>progressivo</sub> | Passante |
|--------|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|
| (mm)   | (g)        | (g)                               | (%)                               | (%)      |
| 20     | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 16     | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 12,5   | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 10     | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 8      | 0,0        | 0,0                               | 0,0                               | 100,0    |
| 4      | 0,6        | 0,6                               | 0,1                               | 99,9     |
| 2      | 0,7        | 1,3                               | 0,3                               | 99,7     |
| 0,5    | 147,4      | 148,7                             | 29,1                              | 70,9     |
| 0,25   | 86,2       | 234,9                             | 45,9                              | 54,1     |
| 0,063  | 121,3      | 356,2                             | 69,6                              | 30,4     |
| Filler | 155,6      | 511,8                             | 100,0                             | -        |
| Totale | 511,8      |                                   |                                   |          |



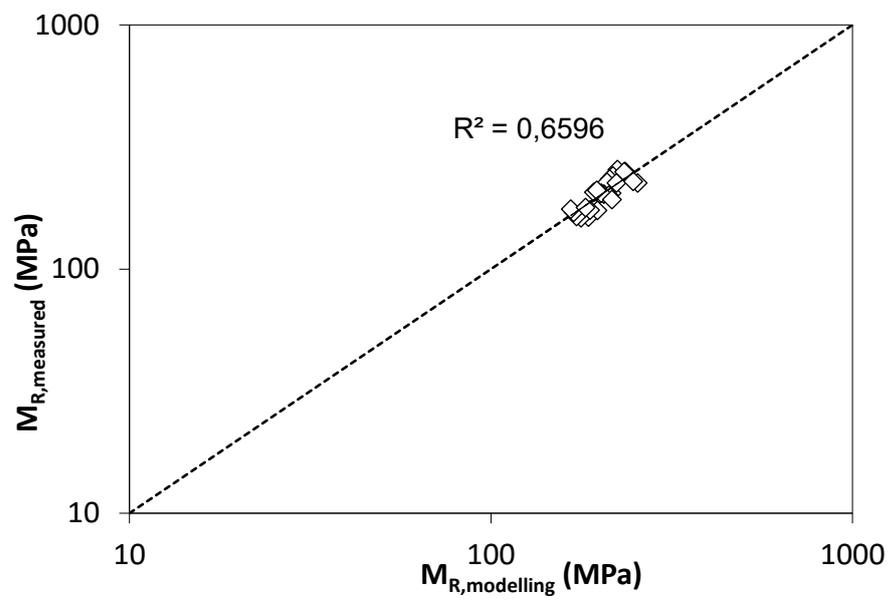
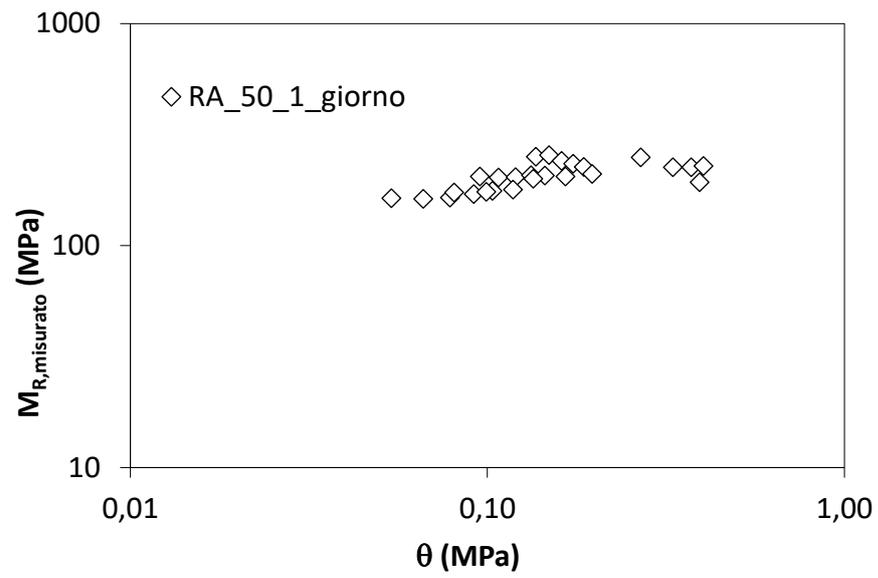
## 6.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE

## 6.2.1 MODULO RESILIENTE

## 6.2.1.1 Modello Puppala (RA50)

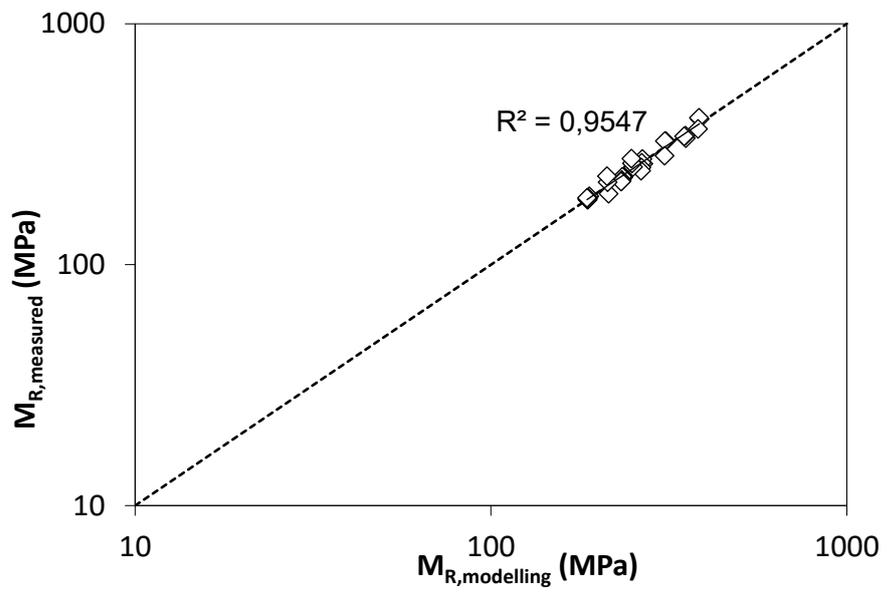
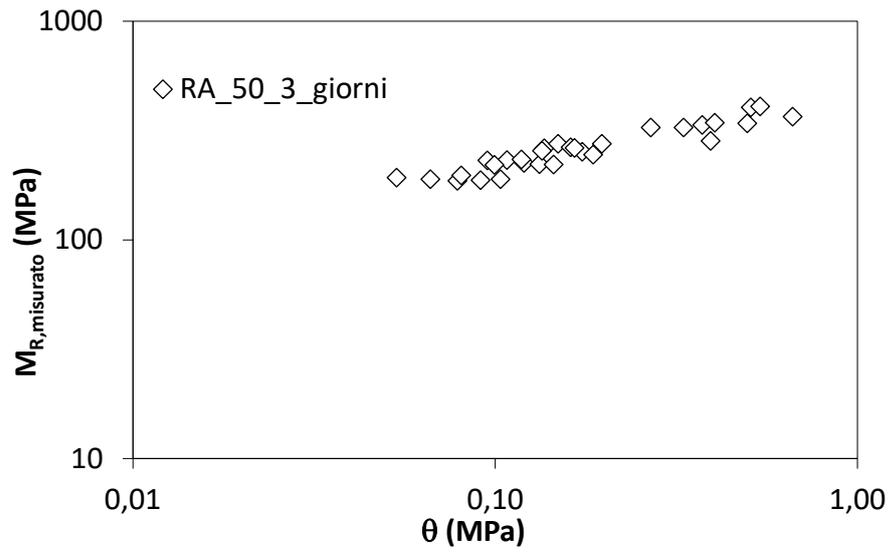
- Giorno 1

|           | SEQUENZA<br>DI CARICO | $\sigma_3$ | $\sigma_{v,max}$ | $\sigma_{v,ciclo}$ | $M_R$ , misurato | $\theta$ |
|-----------|-----------------------|------------|------------------|--------------------|------------------|----------|
|           | [-]                   | [MPa]      | [MPa]            | [MPa]              | [MPa]            | [MPa]    |
| <b>SG</b> | 1                     | 0,041      | 0,014            | 0,012              | 251,4            | 0,137    |
|           | 2                     | 0,041      | 0,028            | 0,025              | 255,8            | 0,149    |
|           | 3                     | 0,041      | 0,041            | 0,037              | 240,4            | 0,161    |
|           | 4                     | 0,041      | 0,055            | 0,050              | 233,4            | 0,174    |
|           | 5                     | 0,041      | 0,069            | 0,062              | 226,3            | 0,186    |
|           | 6                     | 0,028      | 0,014            | 0,012              | 204,3            | 0,095    |
|           | 7                     | 0,028      | 0,028            | 0,025              | 202,4            | 0,108    |
|           | 8                     | 0,028      | 0,041            | 0,037              | 203,3            | 0,120    |
|           | 9                     | 0,028      | 0,055            | 0,050              | 207,4            | 0,132    |
|           | 10                    | 0,028      | 0,069            | 0,062              | 206,4            | 0,145    |
|           | 11                    | 0,014      | 0,014            | 0,012              | 163,2            | 0,054    |
|           | 12                    | 0,014      | 0,028            | 0,025              | 162,4            | 0,066    |
|           | 13                    | 0,014      | 0,041            | 0,037              | 164,3            | 0,079    |
|           | 14                    | 0,014      | 0,055            | 0,050              | 170,6            | 0,092    |
|           | 15                    | 0,014      | 0,069            | 0,062              | 176,2            | 0,103    |
| <b>SB</b> | 1                     | 0,021      | 0,021            | 0,019              | 173,6            | 0,081    |
|           | 2                     | 0,021      | 0,041            | 0,037              | 174,4            | 0,099    |
|           | 3                     | 0,021      | 0,062            | 0,056              | 178,7            | 0,118    |
|           | 4                     | 0,035      | 0,034            | 0,031              | 200,1            | 0,134    |
|           | 5                     | 0,035      | 0,069            | 0,062              | 204,4            | 0,165    |
|           | 6                     | 0,035      | 0,103            | 0,093              | 210,1            | 0,197    |
|           | 7                     | 0,069      | 0,069            | 0,062              | 250,0            | 0,269    |
|           | 8                     | 0,069      | 0,138            | 0,124              | 225,2            | 0,331    |
|           | 9                     | 0,069      | 0,207            | 0,186              | 192,8            | 0,393    |
|           | 10                    | 0,103      | 0,069            | 0,062              | 225,2            | 0,372    |
|           | 11                    | 0,103      | 0,103            | 0,093              | 228,4            | 0,403    |



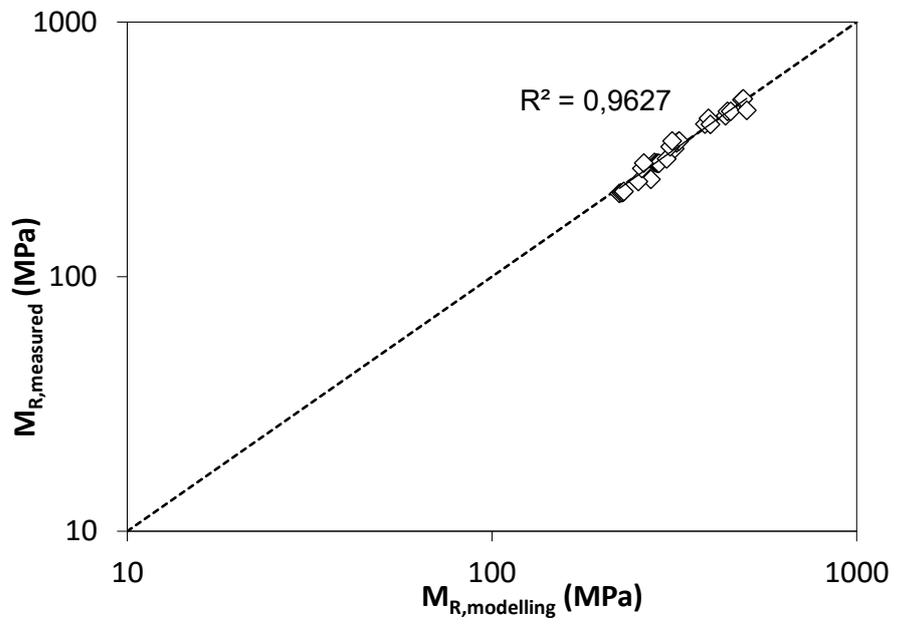
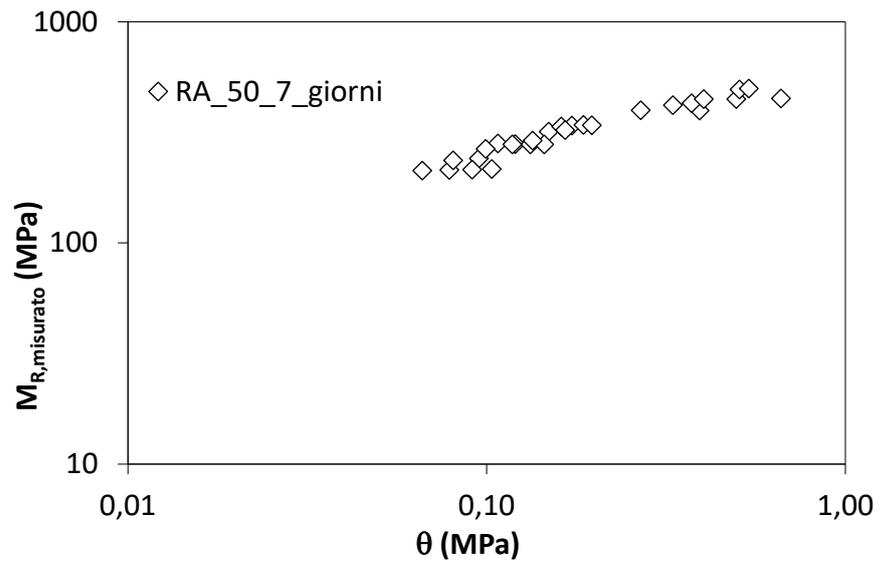
▪ Giorno 3

|           | SEQUENZA<br>DI CARICO | $\sigma_3$ | $\sigma_{v,max}$ | $\sigma_{v,ciclo}$ | $M_R$ , misurato | $\theta$ |
|-----------|-----------------------|------------|------------------|--------------------|------------------|----------|
|           | [-]                   | [MPa]      | [MPa]            | [MPa]              | [MPa]            | [MPa]    |
| <b>SG</b> | 1                     | 0,041      | 0,014            | 0,012              | 262,4            | 0,137    |
|           | 2                     | 0,041      | 0,028            | 0,025              | 275,2            | 0,149    |
|           | 3                     | 0,041      | 0,041            | 0,037              | 265,3            | 0,161    |
|           | 4                     | 0,041      | 0,055            | 0,050              | 253,0            | 0,174    |
|           | 5                     | 0,041      | 0,069            | 0,062              | 245,4            | 0,186    |
|           | 6                     | 0,028      | 0,014            | 0,012              | 230,7            | 0,095    |
|           | 7                     | 0,028      | 0,028            | 0,025              | 232,0            | 0,108    |
|           | 8                     | 0,028      | 0,041            | 0,037              | 224,7            | 0,120    |
|           | 9                     | 0,028      | 0,055            | 0,050              | 221,7            | 0,132    |
|           | 10                    | 0,028      | 0,069            | 0,062              | 221,0            | 0,145    |
|           | 11                    | 0,014      | 0,014            | 0,012              | 192,6            | 0,053    |
|           | 12                    | 0,014      | 0,028            | 0,025              | 189,4            | 0,066    |
|           | 13                    | 0,014      | 0,041            | 0,037              | 185,8            | 0,079    |
|           | 14                    | 0,014      | 0,055            | 0,050              | 187,4            | 0,091    |
|           | 15                    | 0,014      | 0,069            | 0,062              | 189,2            | 0,103    |
| <b>SB</b> | 1                     | 0,021      | 0,021            | 0,018              | 197,0            | 0,080    |
|           | 2                     | 0,021      | 0,041            | 0,037              | 220,2            | 0,099    |
|           | 3                     | 0,021      | 0,062            | 0,056              | 232,8            | 0,118    |
|           | 4                     | 0,035      | 0,034            | 0,031              | 254,9            | 0,134    |
|           | 5                     | 0,035      | 0,069            | 0,062              | 263,3            | 0,165    |
|           | 6                     | 0,035      | 0,103            | 0,093              | 275,4            | 0,197    |
|           | 7                     | 0,069      | 0,069            | 0,062              | 326,3            | 0,269    |
|           | 8                     | 0,069      | 0,138            | 0,124              | 326,0            | 0,331    |
|           | 9                     | 0,069      | 0,207            | 0,186              | 283,1            | 0,393    |
|           | 10                    | 0,103      | 0,069            | 0,062              | 335,5            | 0,372    |
|           | 11                    | 0,103      | 0,103            | 0,093              | 343,0            | 0,403    |
|           | 12                    | 0,103      | 0,207            | 0,186              | 341,1            | 0,496    |
|           | 13                    | 0,138      | 0,103            | 0,093              | 403,0            | 0,507    |
|           | 14                    | 0,138      | 0,138            | 0,124              | 407,5            | 0,538    |
|           | 15                    | 0,138      | 0,276            | 0,248              | 365,7            | 0,662    |



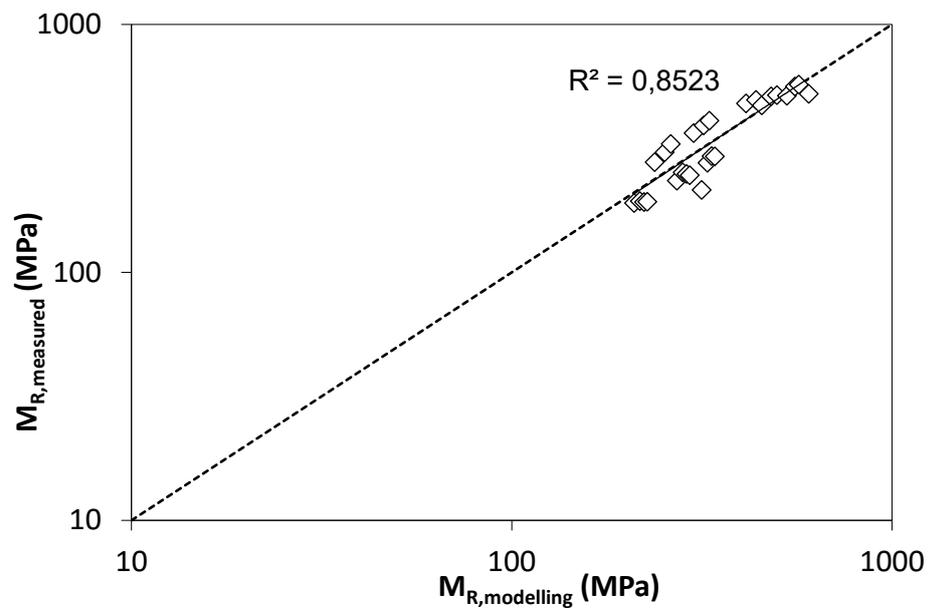
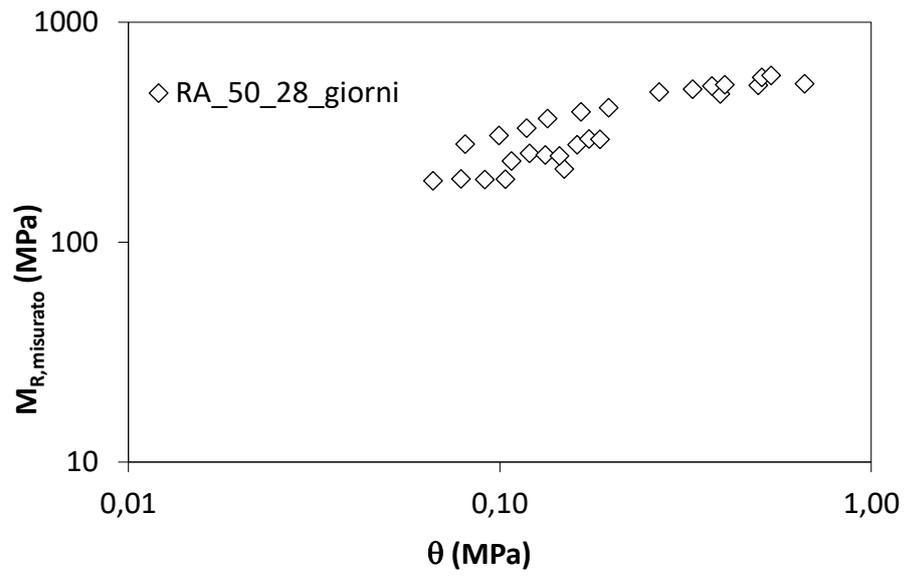
▪ Giorno 7

|           | SEQUENZA<br>DI CARICO | $\sigma_3$ | $\sigma_{v,max}$ | $\sigma_{v,ciclo}$ | $M_R$ , misurato | $\theta$ |
|-----------|-----------------------|------------|------------------|--------------------|------------------|----------|
|           | [-]                   | [MPa]      | [MPa]            | [MPa]              | [MPa]            | [MPa]    |
| <b>SG</b> | 2                     | 0,041      | 0,028            | 0,025              | 318,0            | 0,149    |
|           | 3                     | 0,041      | 0,041            | 0,037              | 335,4            | 0,162    |
|           | 4                     | 0,041      | 0,054            | 0,048              | 339,4            | 0,173    |
|           | 5                     | 0,041      | 0,069            | 0,062              | 341,0            | 0,186    |
|           | 6                     | 0,028      | 0,014            | 0,012              | 241,1            | 0,095    |
|           | 7                     | 0,028      | 0,028            | 0,025              | 281,4            | 0,108    |
|           | 8                     | 0,028      | 0,041            | 0,037              | 279,8            | 0,120    |
|           | 9                     | 0,028      | 0,055            | 0,050              | 278,6            | 0,132    |
|           | 10                    | 0,028      | 0,069            | 0,062              | 278,5            | 0,145    |
|           |                       |            |                  |                    |                  |          |
|           | 12                    | 0,014      | 0,028            | 0,025              | 212,6            | 0,066    |
|           | 13                    | 0,014      | 0,041            | 0,037              | 213,9            | 0,079    |
|           | 14                    | 0,014      | 0,055            | 0,050              | 214,3            | 0,091    |
|           | 15                    | 0,014      | 0,069            | 0,062              | 215,9            | 0,103    |
|           | <b>SB</b>             | 1          | 0,021            | 0,021              | 0,019            | 236,4    |
| 2         |                       | 0,021      | 0,041            | 0,037              | 266,4            | 0,099    |
| 3         |                       | 0,021      | 0,062            | 0,056              | 279,1            | 0,118    |
| 4         |                       | 0,035      | 0,034            | 0,031              | 290,2            | 0,134    |
| 5         |                       | 0,035      | 0,069            | 0,062              | 324,1            | 0,165    |
| 6         |                       | 0,035      | 0,103            | 0,093              | 340,7            | 0,197    |
| 7         |                       | 0,069      | 0,069            | 0,062              | 397,5            | 0,269    |
| 8         |                       | 0,069      | 0,138            | 0,124              | 418,9            | 0,331    |
| 9         |                       | 0,069      | 0,207            | 0,186              | 396,1            | 0,393    |
| 10        |                       | 0,103      | 0,069            | 0,062              | 428,5            | 0,372    |
| 11        |                       | 0,103      | 0,103            | 0,093              | 446,2            | 0,403    |
| 12        |                       | 0,103      | 0,207            | 0,186              | 446,6            | 0,496    |
| 13        |                       | 0,138      | 0,103            | 0,093              | 494,6            | 0,507    |
| 14        |                       | 0,138      | 0,138            | 0,124              | 499,3            | 0,538    |
| 15        |                       | 0,138      | 0,276            | 0,248              | 450,5            | 0,662    |



▪ Giorno 28

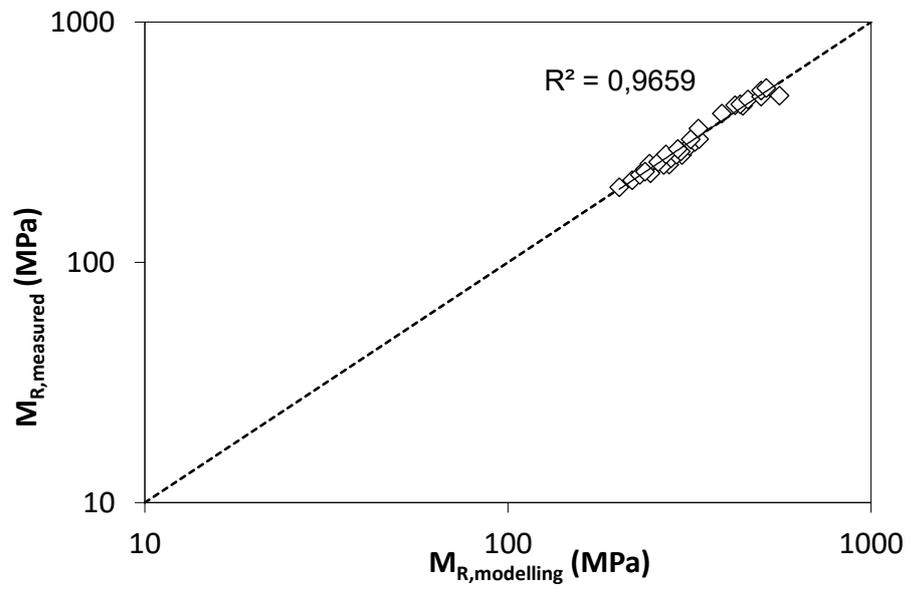
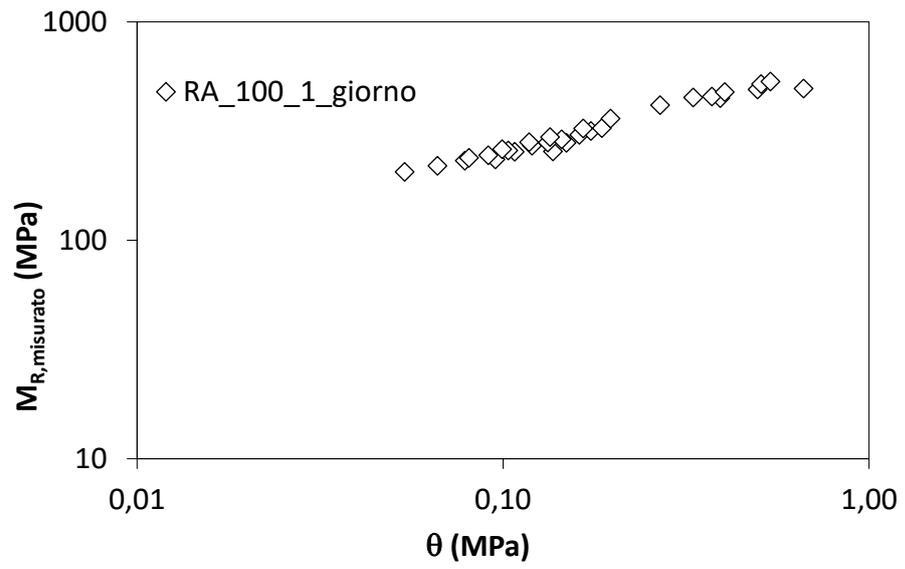
|           | SEQUENZA<br>DI CARICO | $\sigma_3$ | $\sigma_{v,max}$ | $\sigma_{v,ciclo}$ | $M_R$ , misurato | $\theta$ |
|-----------|-----------------------|------------|------------------|--------------------|------------------|----------|
|           | [-]                   | [MPa]      | [MPa]            | [MPa]              | [MPa]            | [MPa]    |
| <b>SG</b> | 1                     |            |                  |                    |                  |          |
|           | 2                     | 0,041      | 0,028            | 0,025              | 215,3            | 0,149    |
|           | 3                     | 0,041      | 0,041            | 0,037              | 276,6            | 0,161    |
|           | 4                     | 0,041      | 0,055            | 0,050              | 294,6            | 0,174    |
|           | 5                     | 0,041      | 0,069            | 0,062              | 293,7            | 0,186    |
|           | 6                     |            |                  |                    |                  |          |
|           | 7                     | 0,028      | 0,028            | 0,025              | 234,0            | 0,108    |
|           | 8                     | 0,028      | 0,041            | 0,037              | 253,2            | 0,120    |
|           | 9                     | 0,028      | 0,055            | 0,050              | 249,2            | 0,132    |
|           | 10                    | 0,028      | 0,069            | 0,062              | 246,2            | 0,145    |
|           | 11                    |            |                  |                    |                  |          |
|           | 12                    | 0,014      | 0,027            | 0,025              | 190,2            | 0,066    |
|           | 13                    | 0,014      | 0,041            | 0,037              | 193,7            | 0,079    |
|           | 14                    | 0,014      | 0,055            | 0,050              | 192,2            | 0,091    |
|           | 15                    | 0,014      | 0,069            | 0,062              | 192,9            | 0,103    |
| <b>SB</b> | 1                     | 0,021      | 0,021            | 0,019              | 278,5            | 0,081    |
|           | 2                     | 0,021      | 0,041            | 0,037              | 305,3            | 0,099    |
|           | 3                     | 0,021      | 0,062            | 0,056              | 329,5            | 0,118    |
|           | 4                     | 0,035      | 0,034            | 0,031              | 364,8            | 0,134    |
|           | 5                     | 0,035      | 0,069            | 0,062              | 391,6            | 0,165    |
|           | 6                     | 0,035      | 0,103            | 0,093              | 409,0            | 0,197    |
|           | 7                     | 0,069      | 0,069            | 0,062              | 480,4            | 0,269    |
|           | 8                     | 0,069      | 0,138            | 0,124              | 495,9            | 0,331    |
|           | 9                     | 0,069      | 0,207            | 0,186              | 472,2            | 0,393    |
|           | 10                    | 0,103      | 0,069            | 0,062              | 512,4            | 0,372    |
|           | 11                    | 0,103      | 0,103            | 0,093              | 519,3            | 0,403    |
|           | 12                    | 0,103      | 0,207            | 0,186              | 516,0            | 0,496    |
|           | 13                    | 0,138      | 0,103            | 0,093              | 561,9            | 0,507    |
|           | 14                    | 0,138      | 0,138            | 0,124              | 572,6            | 0,538    |
|           | 15                    | 0,138      | 0,276            | 0,248              | 525,1            | 0,662    |



## 6.2.1.2 Modello Puppala (RA100)

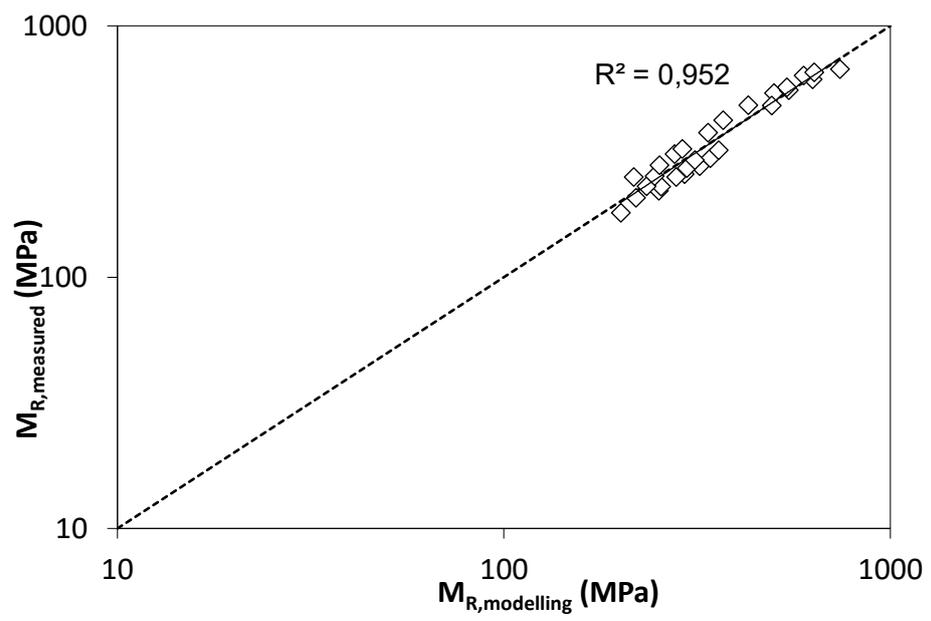
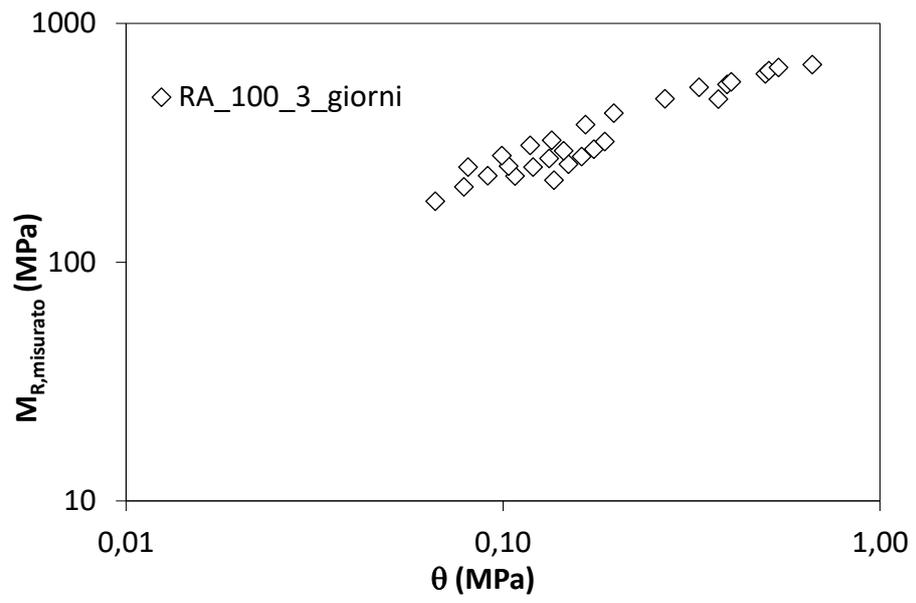
## ▪ Giorno 1

|    | SEQUENZA<br>DI CARICO | $\sigma_3$ | $\sigma_{v,max}$ | $\sigma_{v,ciclo}$ | $M_R$ , misurato | $\theta$ |
|----|-----------------------|------------|------------------|--------------------|------------------|----------|
|    | [-]                   | [MPa]      | [MPa]            | [MPa]              | [MPa]            | [MPa]    |
| SG | 1                     | 0,041      | 0,014            | 0,013              | 255,1            | 0,137    |
|    | 2                     | 0,041      | 0,028            | 0,025              | 279,3            | 0,149    |
|    | 3                     | 0,041      | 0,041            | 0,037              | 304,2            | 0,162    |
|    | 4                     | 0,041      | 0,055            | 0,050              | 316,5            | 0,174    |
|    | 5                     | 0,041      | 0,069            | 0,062              | 326,1            | 0,186    |
|    | 6                     | 0,028      | 0,014            | 0,012              | 234,5            | 0,095    |
|    | 7                     | 0,028      | 0,028            | 0,025              | 254,2            | 0,108    |
|    | 8                     | 0,028      | 0,041            | 0,037              | 271,2            | 0,120    |
|    | 9                     | 0,028      | 0,055            | 0,050              | 280,6            | 0,132    |
|    | 10                    | 0,028      | 0,069            | 0,062              | 289,5            | 0,145    |
|    | 11                    | 0,014      | 0,014            | 0,012              | 205,3            | 0,054    |
|    | 12                    | 0,014      | 0,028            | 0,025              | 219,4            | 0,066    |
|    | 13                    | 0,014      | 0,041            | 0,037              | 231,1            | 0,079    |
|    | 14                    | 0,014      | 0,055            | 0,050              | 244,7            | 0,091    |
|    | 15                    | 0,014      | 0,069            | 0,062              | 257,8            | 0,103    |
| SB | 1                     | 0,021      | 0,021            | 0,019              | 238,8            | 0,081    |
|    | 2                     | 0,021      | 0,041            | 0,037              | 261,2            | 0,099    |
|    | 3                     | 0,021      | 0,062            | 0,056              | 281,3            | 0,118    |
|    | 4                     | 0,035      | 0,034            | 0,031              | 296,3            | 0,135    |
|    | 5                     | 0,035      | 0,069            | 0,062              | 324,8            | 0,165    |
|    | 6                     | 0,035      | 0,103            | 0,093              | 360,1            | 0,197    |
|    | 7                     | 0,069      | 0,069            | 0,062              | 415,8            | 0,269    |
|    | 8                     | 0,069      | 0,138            | 0,124              | 450,8            | 0,331    |
|    | 9                     | 0,069      | 0,207            | 0,186              | 447,7            | 0,393    |
|    | 10                    | 0,103      | 0,069            | 0,062              | 454,4            | 0,372    |
|    | 11                    | 0,103      | 0,103            | 0,093              | 476,3            | 0,403    |
|    | 12                    | 0,103      | 0,207            | 0,186              | 489,2            | 0,496    |
|    | 13                    | 0,138      | 0,103            | 0,093              | 518,6            | 0,507    |
|    | 14                    | 0,138      | 0,138            | 0,124              | 532,4            | 0,538    |
|    | 15                    | 0,138      | 0,276            | 0,248              | 494,4            | 0,662    |



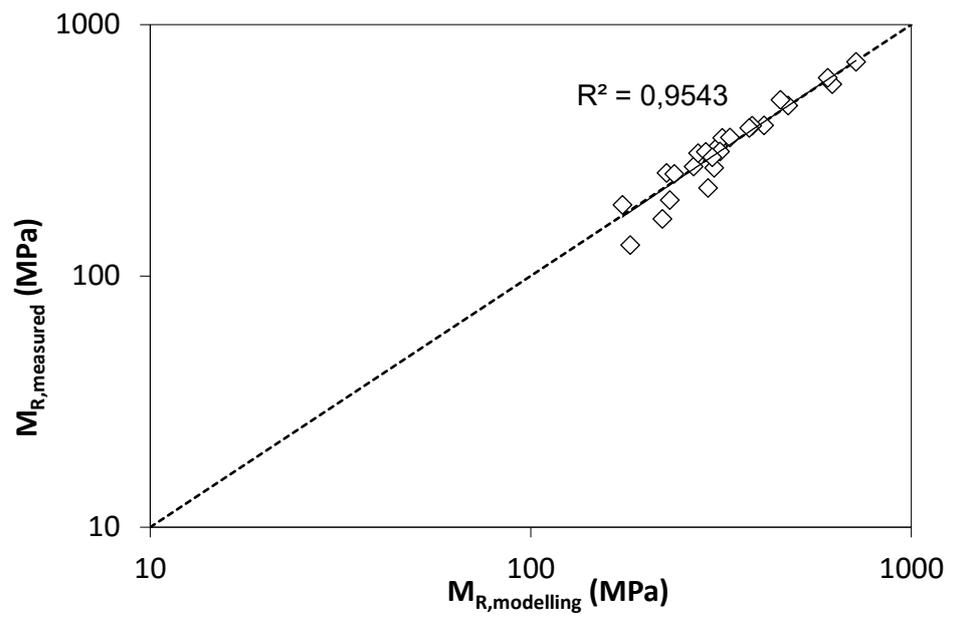
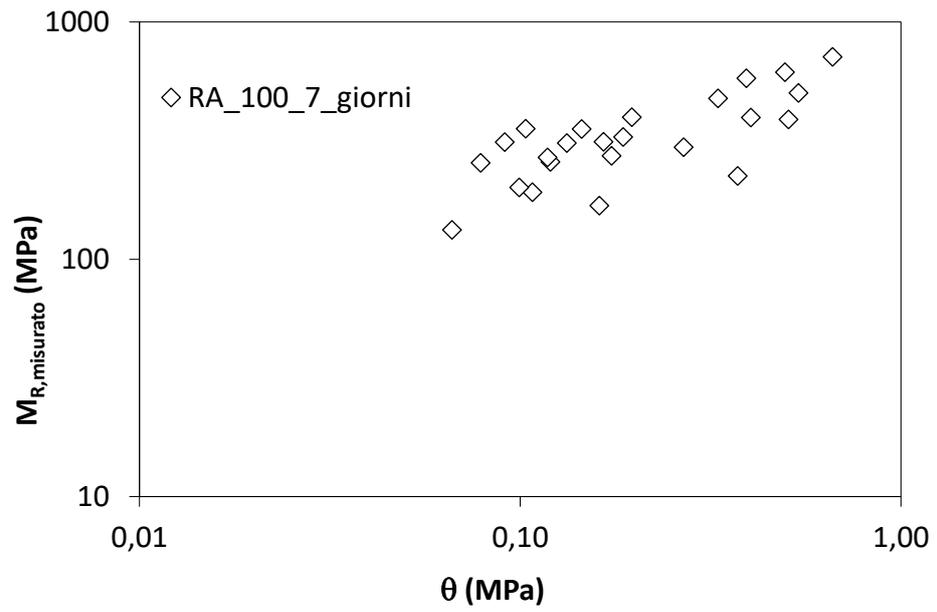
▪ Giorno 3

|    | SEQUENZA<br>DI CARICO | $\sigma_3$ | $\sigma_{v,max}$ | $\sigma_{v,ciclo}$ | $M_R$ , misurato | $\theta$ |
|----|-----------------------|------------|------------------|--------------------|------------------|----------|
|    | [-]                   | [MPa]      | [MPa]            | [MPa]              | [MPa]            | [MPa]    |
| SG | 1                     | 0,041      | 0,014            | 0,012              | 220,5            | 0,137    |
|    | 2                     | 0,041      | 0,028            | 0,025              | 257,2            | 0,149    |
|    | 3                     | 0,041      | 0,041            | 0,037              | 276,8            | 0,161    |
|    | 4                     | 0,041      | 0,055            | 0,050              | 297,2            | 0,174    |
|    | 5                     | 0,041      | 0,069            | 0,062              | 319,4            | 0,186    |
|    | 6                     |            |                  |                    |                  |          |
|    | 7                     | 0,028      | 0,028            | 0,025              | 229,2            | 0,107    |
|    | 8                     | 0,028      | 0,041            | 0,037              | 250,3            | 0,120    |
|    | 9                     | 0,028      | 0,055            | 0,050              | 271,4            | 0,133    |
|    | 10                    | 0,028      | 0,069            | 0,062              | 292,5            | 0,145    |
|    | 11                    |            |                  |                    |                  |          |
|    | 12                    | 0,014      | 0,028            | 0,025              | 180,0            | 0,066    |
|    | 13                    | 0,014      | 0,041            | 0,037              | 206,7            | 0,079    |
|    | 14                    | 0,014      | 0,055            | 0,050              | 230,1            | 0,091    |
|    | 15                    | 0,014      | 0,069            | 0,062              | 252,5            | 0,104    |
| SB | 1                     | 0,021      | 0,021            | 0,019              | 249,9            | 0,081    |
|    | 2                     | 0,021      | 0,041            | 0,037              | 278,8            | 0,099    |
|    | 3                     | 0,021      | 0,062            | 0,056              | 308,6            | 0,118    |
|    | 4                     | 0,035      | 0,034            | 0,031              | 323,2            | 0,134    |
|    | 5                     | 0,035      | 0,069            | 0,062              | 375,9            | 0,165    |
|    | 6                     | 0,035      | 0,103            | 0,093              | 421,1            | 0,197    |
|    | 7                     | 0,069      | 0,069            | 0,062              | 483,5            | 0,269    |
|    | 8                     | 0,069      | 0,138            | 0,124              | 539,7            | 0,331    |
|    | 9                     | 0,069      | 0,207            | 0,186              | 554,5            | 0,393    |
|    | 10                    | 0,103      | 0,069            | 0,062              | 482,2            | 0,372    |
|    | 11                    | 0,103      | 0,103            | 0,093              | 569,4            | 0,403    |
|    | 12                    | 0,103      | 0,207            | 0,186              | 613,2            | 0,496    |
|    | 13                    | 0,138      | 0,103            | 0,093              | 633,7            | 0,507    |
|    | 14                    | 0,138      | 0,138            | 0,124              | 652,8            | 0,538    |
|    | 15                    | 0,138      | 0,276            | 0,248              | 671,8            | 0,662    |



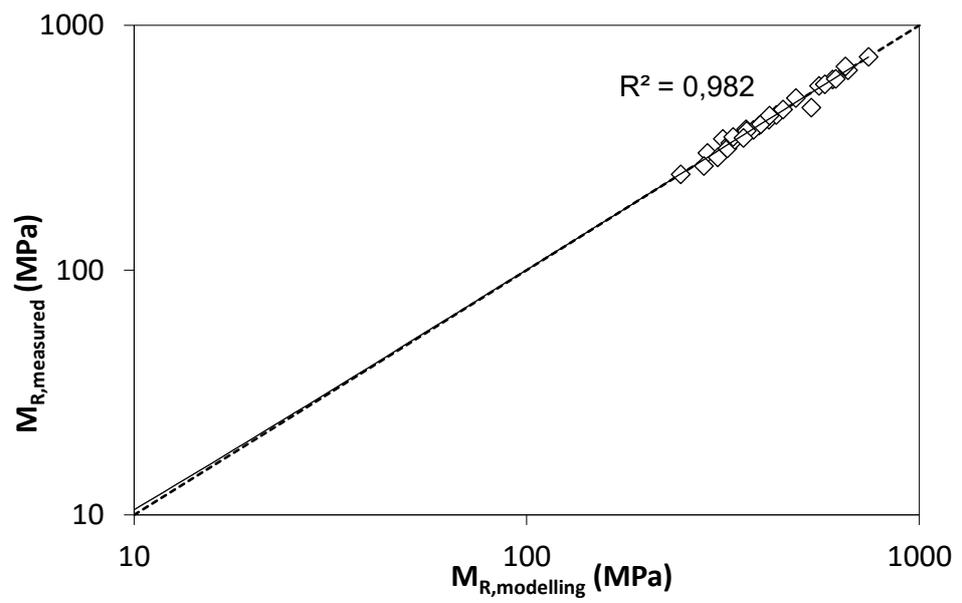
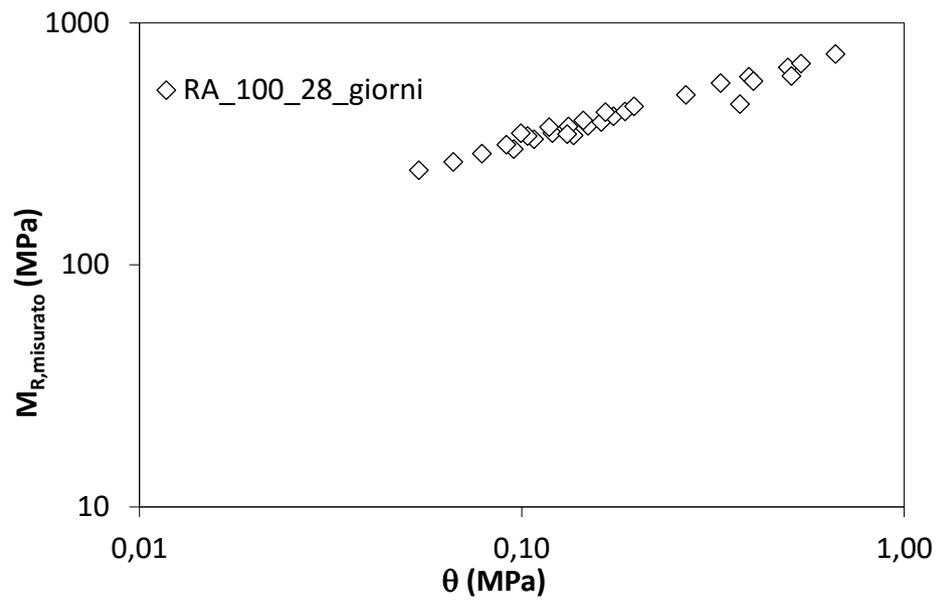
- Giorno 7

|           | SEQUENZA<br>DI CARICO | $\sigma_3$ | $\sigma_{v,max}$ | $\sigma_{v,ciclo}$ | $M_R$ , misurato | $\theta$ |
|-----------|-----------------------|------------|------------------|--------------------|------------------|----------|
|           | [-]                   | [MPa]      | [MPa]            | [MPa]              | [MPa]            | [MPa]    |
| <b>SG</b> |                       |            |                  |                    |                  |          |
|           | 3                     | 0,041      | 0,041            | 0,037              | 168,4            | 0,161    |
|           | 4                     | 0,041      | 0,055            | 0,050              | 272,3            | 0,174    |
|           | 5                     | 0,041      | 0,069            | 0,062              | 327,1            | 0,186    |
|           |                       |            |                  |                    |                  |          |
|           | 7                     | 0,028      | 0,028            | 0,025              | 191,8            | 0,108    |
|           | 8                     | 0,028      | 0,041            | 0,037              | 256,7            | 0,120    |
|           | 9                     | 0,028      | 0,055            | 0,050              | 308,2            | 0,132    |
|           | 10                    | 0,028      | 0,069            | 0,062              | 354,1            | 0,145    |
|           |                       |            |                  |                    |                  |          |
|           | 12                    | 0,014      | 0,028            | 0,025              | 132,7            | 0,066    |
|           | 13                    | 0,014      | 0,041            | 0,037              | 255,0            | 0,079    |
|           | 14                    | 0,014      | 0,055            | 0,050              | 311,2            | 0,091    |
|           | 15                    | 0,014      | 0,069            | 0,062              | 355,1            | 0,103    |
|           | <b>SB</b>             |            |                  |                    |                  |          |
| 2         |                       | 0,021      | 0,041            | 0,037              | 200,4            | 0,099    |
| 3         |                       | 0,021      | 0,062            | 0,056              | 268,9            | 0,118    |
|           |                       |            |                  |                    |                  |          |
| 5         |                       | 0,035      | 0,069            | 0,062              | 312,1            | 0,165    |
| 6         |                       | 0,034      | 0,103            | 0,093              | 397,1            | 0,196    |
| 7         |                       | 0,069      | 0,069            | 0,062              | 296,8            | 0,269    |
| 8         |                       | 0,069      | 0,138            | 0,124              | 476,6            | 0,331    |
| 9         |                       | 0,069      | 0,207            | 0,186              | 579,1            | 0,393    |
| 10        |                       | 0,103      | 0,069            | 0,062              | 224,0            | 0,372    |
| 11        |                       | 0,103      | 0,103            | 0,093              | 395,8            | 0,403    |
| 12        |                       | 0,103      | 0,207            | 0,186              | 614,2            | 0,496    |
| 13        |                       | 0,138      | 0,103            | 0,093              | 387,8            | 0,507    |
| 14        |                       | 0,138      | 0,138            | 0,124              | 502,2            | 0,538    |
| 15        |                       | 0,138      | 0,276            | 0,248              | 711,2            | 0,662    |



▪ Giorno 28

|           | SEQUENZA<br>DI CARICO | $\sigma_3$ | $\sigma_{v,max}$ | $\sigma_{v,ciclo}$ | $M_R$ , misurato | $\theta$ |
|-----------|-----------------------|------------|------------------|--------------------|------------------|----------|
|           | [-]                   | [MPa]      | [MPa]            | [MPa]              | [MPa]            | [MPa]    |
| <b>SG</b> | 1                     | 0,041      | 0,014            | 0,012              | 343,120          | 0,137    |
|           | 2                     | 0,041      | 0,028            | 0,025              | 375,3            | 0,149    |
|           | 3                     | 0,041      | 0,041            | 0,037              | 389,5            | 0,161    |
|           | 4                     | 0,041      | 0,055            | 0,050              | 411,8            | 0,174    |
|           | 5                     | 0,041      | 0,069            | 0,062              | 430,7            | 0,186    |
|           | 6                     | 0,028      | 0,014            | 0,012              | 300,9            | 0,095    |
|           | 7                     | 0,028      | 0,028            | 0,025              | 330,3            | 0,108    |
|           | 8                     | 0,028      | 0,041            | 0,037              | 350,4            | 0,120    |
|           | 9                     | 0,028      | 0,055            | 0,050              | 373,5            | 0,132    |
|           | 10                    | 0,028      | 0,069            | 0,062              | 394,7            | 0,145    |
|           | 11                    | 0,014      | 0,014            | 0,012              | 246,1            | 0,054    |
|           | 12                    | 0,014      | 0,028            | 0,025              | 266,1            | 0,066    |
|           | 13                    | 0,014      | 0,041            | 0,037              | 288,6            | 0,079    |
|           | 14                    | 0,014      | 0,055            | 0,050              | 313,8            | 0,091    |
|           | 15                    | 0,014      | 0,069            | 0,062              | 340,2            | 0,103    |
| <b>SB</b> |                       |            |                  |                    |                  |          |
|           | 2                     | 0,021      | 0,041            | 0,037              | 350,0            | 0,099    |
|           | 3                     | 0,021      | 0,062            | 0,056              | 370,6            | 0,118    |
|           | 4                     | 0,035      | 0,032            | 0,028              | 346,4            | 0,131    |
|           | 5                     | 0,035      | 0,069            | 0,062              | 428,0            | 0,165    |
|           | 6                     | 0,035      | 0,103            | 0,093              | 452,4            | 0,197    |
|           | 7                     | 0,069      | 0,069            | 0,062              | 504,4            | 0,269    |
|           | 8                     | 0,069      | 0,138            | 0,124              | 564,7            | 0,331    |
|           | 9                     | 0,069      | 0,207            | 0,186              | 599,9            | 0,393    |
|           | 10                    | 0,103      | 0,069            | 0,062              | 461,6            | 0,372    |
|           | 11                    | 0,103      | 0,103            | 0,093              | 574,8            | 0,403    |
|           | 12                    | 0,103      | 0,207            | 0,186              | 654,3            | 0,496    |
|           | 13                    | 0,138      | 0,103            | 0,093              | 603,6            | 0,507    |
|           | 14                    | 0,138      | 0,138            | 0,124              | 679,8            | 0,538    |
|           | 15                    | 0,138      | 0,276            | 0,248              | 742,7            | 0,662    |



## 6.2.1.3 Modelli MEPDG e Mohammed per il calcolo del modulo resiliente

## ▪ RA50

| SUBGRADE        | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                 | <b>MEPDG</b>   |                |                |                |
| <b>1</b>        | 2183           | 0,32           | -0,92          | 0,9803         |
| <b>3</b>        | 2306           | 0,45           | -0,53          | 0,9697         |
| <b>7</b>        | 2727           | 0,47           | -0,47          | 0,9557         |
| <b>28</b>       | 2620           | 0,57           | -0,39          | 0,7738         |
| <b>Mohammed</b> |                |                |                |                |
| <b>1</b>        | 1957           | 0,30           | -0,16          | 0,9693         |
| <b>3</b>        | 2708           | 0,45           | -0,13          | 0,9388         |
| <b>7</b>        | 3483           | 0,46           | -0,11          | 0,9376         |
| <b>28</b>       | 3919           | 0,55           | -0,08          | 0,774          |

| SUBBASE         | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                 | <b>MEPDG</b>   |                |                |                |
| <b>1</b>        | 1960           | 0,25           | -0,48          | 0,7267         |
| <b>3</b>        | 2346           | 0,42           | -0,48          | 0,9492         |
| <b>7</b>        | 2804           | 0,43           | -0,38          | 0,9778         |
| <b>28</b>       | 3382           | 0,40           | -0,37          | 0,9727         |
| <b>Mohammed</b> |                |                |                |                |
| <b>1</b>        | 1976           | 0,24           | -0,10          | 0,6445         |
| <b>3</b>        | 2719           | 0,43           | -0,15          | 0,9258         |
| <b>7</b>        | 3533           | 0,42           | -0,10          | 0,9553         |
| <b>28</b>       | 4182           | 0,40           | -0,10          | 0,9486         |

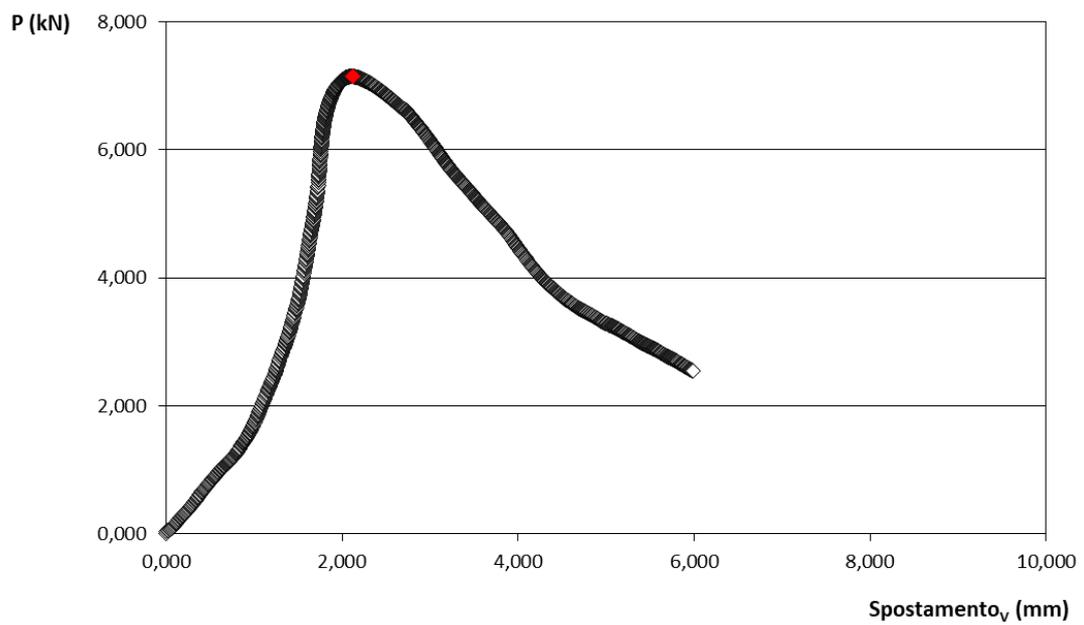
▪ **RA100**

| SUBGRADE        | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                 | <b>MEPDG</b>   |                |                |                |
| <b>1</b>        | 2598           | 0,46           | -0,19          | 0,9678         |
| <b>3</b>        | 2430           | 0,56           | 0,04           | 0,9868         |
| <b>7</b>        | 1886           | 0,04           | 1,72           | 0,8585         |
| <b>28</b>       | 2984,0         | 0,40           | 0,45           | 0,9947         |
| <b>Mohammed</b> |                |                |                |                |
| <b>1</b>        | 4004           | 0,41           | 0,00           | 0,9725         |
| <b>3</b>        | 4888           | 0,50           | 0,07           | 0,9942         |
| <b>7</b>        | 6929           | -0,10          | 0,69           | 0,883          |
| <b>28</b>       | 5542,4         | 0,40           | 0,06           | 0,994          |

| SUBBASE         | K <sub>1</sub> | K <sub>2</sub> | K <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                 | <b>MEPDG</b>   |                |                |                |
| <b>1</b>        | 2796           | 0,44           | -0,27          | 0,9774         |
| <b>3</b>        | 2906           | 0,47           | -0,01          | 0,9757         |
| <b>7</b>        | 3217,7         | 0,30           | 0,36           | 0,9325         |
| <b>28</b>       | 3218           | 0,30           | 0,36           | 0,9013         |
| <b>Mohammed</b> |                |                |                |                |
| <b>1</b>        | 3855           | 0,43           | -0,07          | 0,9652         |
| <b>3</b>        | 4927           | 0,44           | 0,02           | 0,9766         |
| <b>7</b>        | 5811,7         | 0,28           | 0,14           | 0,9716         |
| <b>28</b>       | 5812           | 0,28           | 0,14           | 0,976          |

## 6.2.2 RESISTENZA A COMPRESSIONE

### 6.2.2.1 Esempio di test ITS con provino giunto a rottura e conseguente grafico forza-spostamento



### 6.3 ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

|                     |  |
|---------------------|--|
| CLSM                | Controlled Low Strength Material                                 |
| RAP                 | Recycled Pavement Aggregate                                      |
| CDW                 | Construction and Demolition Waste                                |
| D <sub>s</sub>      | Diametro di spandimento  |
| D                   | Diametro degli aggregati   |
| w/p                 | Water-to-Powder Ratio  |
| ASTM                | American Society for Testing and Materials                       |
| EN                  | European Norm  |
| AASHTO              | American Association of State Highway & Transportation Officials |
| ACI                 | American Concrete Institute                                      |
| $\sigma_v$          | Tensione verticale   |
| $\sigma_h$          | Tensione orizzontale   |
| $\sigma_d$          | Sforzo deviatorico   |
| $\sigma_1$          | Pressione laterale   |
| $\sigma_3$          | Pressione verticale  |
| q                   | Tensione deviatorica   |
| LVDT                | Linear Variable Differential Transformer                         |
| C.V.                | Coefficiente di variazione                                       |
| $\varepsilon_{1,r}$ | Deformazioni resilienti  |
| $\Delta h_r$        | Variazione di altezza del provino                                |
| $h_i$               | Altezza provino  |
| M <sub>r</sub>      | Modulo resiliente  |
| K <sub>i</sub>      | Costanti di regressione  |
| $\theta$            | Primo invariante   |
| $\tau_{oct}$        | Tensione di taglio ottaedrale                                    |
| p <sub>a</sub>      | Pressione atmosferica  |
| R <sup>2</sup>      | Costante di regressione  |
| UCS                 | Unconfined Compression Strength                                  |

## 6.4 ELENCO TABELLE

|   |    |
|---|----|
| <i>Tabella 3.1: campioni realizzati</i> .....                       | 33 |
| <i>Tabella 3.2: sequenze di carico per subgrade e subbase</i> ..... | 41 |
| <i>Tabella 4.1: percentuale di passante degli aggregati</i> .....   | 51 |
| <i>Tabella 4.2: massa volumica degli aggregati</i> .....            | 52 |
| <i>Tabella 4.3: miscele test di spandimento</i> .....               | 54 |
| <i>Tabella 4.4: miscele scelte</i> .....                            | 55 |
| <i>Tabella 4.5: valore medio UCS per RA50</i> .....                 | 59 |
| <i>Tabella 4.6: valore medio UCS per RA100</i> .....                | 59 |
| <i>Tabella 4.7: modulo di escavabilità per RA50</i> .....           | 60 |
| <i>Tabella 4.8: modulo di escavabilità per RA100</i> .....          | 60 |
| <i>Tabella 4.9: parametri del modello Puppala per RA50</i> .....    | 61 |
| <i>Tabella 4.10: parametri del modello Puppala per RA100</i> .....  | 61 |

## 6.5 ELENCO FIGURE

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 3.1: Fresatura di RAP dalla pavimentazione</i> .....                       | 16 |
| <i>Figura 3.2: RAP utilizzato</i> .....  | 17 |
| <i>Figura 3.3: set di setacci</i> .....  | 20 |
| <i>Figura 3.4: colonna di setacci</i> .....  | 21 |
| <i>Figura 3.5: compattatore meccanico</i> .....                                      | 21 |
| <i>Figura 3.6: schema setacciatura</i> .....   | 21 |
| <i>Figura 3.7: picnometro standard &amp; picnometri usati in laboratorio</i> .....   | 22 |
| <i>Figura 3.8: fow-chart per la determinazione del mix design</i> .....              | 26 |
| <i>Figura 3.9: cilindro e piatto usati per il test di spandimento</i> .....          | 30 |
| <i>Figura 3.10: betoniera</i> .....  | 31 |
| <i>Figura 3.11: confezionamento campioni</i> .....                                   | 33 |
| <i>Figura 3.12: schema rappresentativo degli strati di fondazione stradale</i> ..... | 35 |
| <i>Figura 3.13: stato tensionale dovuto al transito di un veicolo</i> .....          | 36 |

---

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Figura 3.14.a: grafico tensione- deformazione .....</i>                              | <i>37</i> |
| <i>Figura 3.14.b: deformazioni sottoposte a test del modulo resiliente .....</i>        | <i>37</i> |
| <i>Figura 3.15: impianto di prova triassiale per il test del modulo resiliente.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 3.16: schema cella triassiale .....</i>                                       | <i>39</i> |
| <i>Figura 3.17: stato tensionale sul provino .....</i>                                  | <i>42</i> |
| <i>Figura 3.18: macchina per test UCS .....</i>   | <i>43</i> |
| <i>Figura 4.1: curva granulometrica degli aggregati .....</i>                           | <i>52</i> |
| <i>Figura 4.2: spandimento di RA50 .....</i>  | <i>55</i> |
| <i>Figura 4.3: spandimento di RA100 .....</i>   | <i>55</i> |

## 6.6 ELENCO GRAFICI

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Grafico 4.1: modulo resiliente RA50 .....</i>              | <i>56</i> |
| <i>Grafico 4.2: modulo resiliente RA100 .....</i>             | <i>57</i> |
| <i>Grafico 4.3: modulo di escavabilità RA50 e RA100 .....</i> | <i>60</i> |

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Issam I. A. Qamhia, Erol Tutumluer, Jennifer E. Nicks, Michael T. Adams, Mohammad S. Khan, *“Lightweight and Alternative Backfills for Highway Applications: State-of-the-Art Practice in the U.S.A.”*, 2023.
- T. Della Norma, *“UNI EN 933-1:1999 - Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per stacciatura.”* 1999.
- T. Della Norma, *“UNI EN 1097-6:2002 - Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Determinazione della massa volumica dei granuli e dell’assorbimento d’acqua,”* 2002.
- S. T. Method, *“Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material,”* pp. 3–5.
- ASTM D6103/D6103M-17, *“Standard test method for flow consistency of controlled low strength material (CLSM),”* ASTM International, West Conshohocken, PA.
- AASHTO T 307-99, *“Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials.”* American Association of State and Highway Official, Washington, DC, 2017.
- ACI, *“116R-90: Cement and Concrete Terminology,”* Tech. Doc., p. 58, 2000.
- RICARDO ANDRÉS ALBRIEU (2017). Tesi di master, *“Thermal conductivity of backfilling materials for road pavements in tunnels”*.
- ELDHO CHOORACKAL AVIRACHAN (2020). Tesi di dottorato *“Mix design and performance assessment of self-compacting cement-bound mixtures for pavement foundations of road tunnels”*
- MICHELA AIROLDI (2017). Tesi di laurea magistrale *“Riutilizzo dei fanghi di segazione nelle malte cementizie a resistenza controllata CLSM”*.
- EAPA, *“Asphalt in Figures 2016, European Asphalt Pavement Association,”* 2016.
- Pier Paolo Riviera, Grazia Bertagnoli, Eldho Choorackal, Ezio Santagata, *“Controlled low-strength materials for pavement foundations in road tunnels: feasibility study and recommendations”*, 2019
- Suraj Kumar Parhi, Saswat Dwibedy, Soumyaranjan Panda, Saubhagya Kumar Panigrahi, *“A comprehensive study on Controlled Low Strength Material”*, 2023.

- Senthil Kumar Kaliyavaradhana, Tung-Chai Linga, Ming-Zhi Guob, Kim Hung Moc, *“Waste resources recycling in controlled low-strength material (CLSM): A critical review on plastic properties”*, 2019.
- Chaohui Wang, Yanduo Li, Penghui Wen, Wei Zeng, Xinqi Wang, *“A comprehensive review on mechanical properties of green controlled low strength materials”*, 2023.
- Parish H. Dalal, Mahi Patil, Trudeep N. Dave, Kannan K.R. Iyer, *“An experimental study on controlled low strength material (CLSM) for utilization as sustainable backfill”*, 2022.
- K. J. FOLLIARD, Development of a Recommended Practice for Use of Controlled Low- strength Material in Highway Construction. National Academies Press, 2008.
- B. W. Ramme, *“ACI 229R-99 Controlled Low-Strength Materials,”* *Aci*, vol. 99, no. Reapproved, pp. 1–15, 2005.
- R. Hicks and C. Monismith, *“Factors influencing the resilient response of granular materials,”* *Highw. Res. Rec.*, vol. 345, pp. 15–31, 1971.
- M. W. RW May, *“effective granular modulus to model pavement responses,”* *Transp. Res. Rec.*, no. 810, p. pp 1-9, 1981.
- J. Uzan, *“Characterization of granular material,”* *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 1022, no. 1022, pp. 52–59, 1985.
- L. Khazanovich, C. Celauro, B. Chadbourn, J. Zollars, and S. Dai, *“Evaluation of Subgrade Resilient Modulus Predictive Model for Use in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide,”* *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 1947, no. January 2006, pp. 155–166, 2006.
- R. Janardhanatn, F. Burns and R. D. Peindl, *“Mix design for flowable fly ash backfill material,”* *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 252-263, 8 1992.
- S. Bhat and C. Lovell, *“Design of Flowable Fill: Waste Foundry Sand as a Fine Aggregate,”* *Transportation Research Record*, vol. 1546, no. 1, pp. 70-78, 1996.
- S. Bouzalakos, A. W. L. Dudeney and B. K. C. Chan, *“Formulating and optimising the compressive strength of controlled low-strength materials containing mine tailings by mixture design and response surface methods,”* *Minerals Engineering*, vol. 53, pp. 48-56, 2013.
- A. Katz and K. Klover, *“Utilization of industrial by-products for the production of controlled low strength materials (CLSM),”* *Waste Management*, vol. 24, no. 5, pp. 501-512, 2004.
- T. Raghavendra and B. C. Udayashankar, *“Flow and strength characteristics of CLSM using ground granulated blast furnace slag,”*

- Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 26, no. 9, p. 04014050, 2014.
- A. J. Puppala, B. Chittoori and A. Raavi, "*Flowability and density characteristics of controlled low-strength material using native high-plasticity clay,*" Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 27, no. 1, p. 06014026, 1 2015.
- S. Naganathan, H. A. Razak and S. N. A. Hamid, "*Properties of controlled low-strength material made using industrial waste incineration bottom ash and quarry dust,*" Materials & Design, vol. 33, pp. 56-63, 1 1 2012.
- H. Wu, B. Huang, X. Shu and J. Yin, "*Utilization of solid wastes/byproducts from paper mills in Controlled Low Strength Material (CLSM),*" Construction and Building Materials, vol. 118, pp. 155-163, 8 2016.
- H.-Y. Wang and K.-W. Chen, "*A study of the engineering properties of CLSM with a new type of slag,*" Construction and Building Materials, vol. 102, pp. 422-427, 1 2016.
- M. Etxeberria, J. Ainchil, M. E. Pérez and A. González, "*Use of recycled fine aggregates for Control Low Strength Materials (CLSMs) production,*" Construction and Building Materials, vol. 44, pp. 142-148, 2013.
- A. Copeland, "*Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice,*" Report No. FHWA-HRT-11-021, no. FHWA, pp. McLean, Virginia, 2011.
- A. C. Falchetto, K. H. Moon and M. P. Wistuba, "*Microstructural analysis and rheological modeling of asphalt mixtures containing recycled asphalt materials,*" Materials, vol. 7, no. 9, pp. 6254-6280, 2 9 2014.
- G. Valdés, F. Pérez-Jiménez, R. Miró, A. Martínez and R. Botella, "*Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP),*" Construction and Building Materials, vol. 25, no. 3, pp. 1289-1297, 2011.
- A. Farina, M. C. Zanetti, E. Santagata and G. A. Blengini, "*Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement,*" Resources, Conservation and Recycling, vol. 117, pp. 204-212, 2016.
- M. Zaumanis and R. B. Mallick, "*Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art,*" International Journal of Pavement Engineering, vol. 16, no. 1, pp. 39-55, 2 1 2015.

- 
- M. Arshad and M. F. Ahmed, "*Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements,*" *Construction and Building Materials*, vol. 151, pp. 83-97, 1 10 2017.
  - A. J. Puppala, S. Saride and R. Williammee, "*Sustainable Reuse of Limestone Quarry Fines and RAP in Pavement Base/Subbase Layers,*" *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, no. 4, pp. 418-429, 2012.
  - R. Taha, A. Al-Harthy, K. Al-Shamsi and M. Al-Zubeidi, "*Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases,*" *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 14, no. June, pp. 239-245, 2002.
  - S. Al-Oraimi, H. F. Hassan and A. Hago, "*Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete,*" *Journal of Engineering Research*, vol. 6, no. 1, pp. 37-45, 2009.
  - B. Huang, X. Shu and G. Li, "*Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements,*" *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 10, pp. 2008-2013, 2005.
  - A. Abdel-Mohti, H. Shen and Y. Khodair, "*Characteristics of self-consolidating concrete with RAP and SCM,*" *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 564-573, 1 2016.
  - A. J. Puppala, L. R. Hoyos and A. K. Potturi, "*Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates,*" *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 990-998, 7 2011.