



# **UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E  
DELL'ARCHITETTURA (DICEA)*

---

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

**Influenza della frazione fina sulle prestazioni dei conglomerati  
bituminosi riciclati a freddo**

**Fine fraction influence on the cold recycled mixtures performance**

*Relatore:*

**Prof. Ing. Maurizio Bocci**

*Correlatore:*

**Ing. Emiliano Prospero**

*Tesi di Laurea di:*

**Leonardo Fabbrizi**

---

*Anno Accademico 2020 – 2021*



# Sommario

Capitolo 1 – Introduzione .....	5
Capitolo 2 – Stato dell’arte .....	6
2.1 Le pavimentazioni stradali .....	6
2.2 Riciclaggio a freddo .....	8
2.2.1 Riciclaggio a freddo in impianto .....	12
2.2.2 Riciclaggio a freddo in situ .....	13
2.2.2.1 Emulsione bituminosa e cemento .....	15
2.3 Caratteristiche del riciclaggio a freddo .....	16
2.3.1 Caratteristiche volumetriche del riciclaggio a freddo .....	16
Capitolo 3 – Materiali.....	20
3.1 Fresato .....	20
3.2 Sabbia .....	25
3.3 Filler.....	27
3.3.1 Filler industriale.....	27
3.3.2 Filler di recupero.....	29
3.4 Acqua .....	30
3.5 Cemento .....	31
3.6 Emulsione bituminosa.....	32
Capitolo 4 – Programma sperimentale .....	34
4.1 Obiettivo sperimentale.....	34
4.2 Metodi di prova.....	34
4.2.1 Analisi granulometrica .....	34
4.2.2 Massa volumica e assorbimento.....	37
4.2.3 Determinazione dei vuoti .....	40
4.2.4 Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM) .....	41
4.2.5 Prova a trazione indiretta (ITS) .....	43
4.3 Preparazione dell’impasto.....	45
4.4 Nomenclatura dei provini .....	60
Capitolo 5 – Analisi dei risultati .....	61
5.1 Miscela 1.....	61
5.2 Miscela 2.....	63
5.3 Miscela 3.....	65

5.4 Miscela 4.....	67
5.5 Confronto delle miscele.....	71
Capitolo 6 – Conclusioni .....	73
Capitolo 7 – Bibliografia e sitografia .....	75
Ringraziamenti.....	76

# Capitolo 1 – Introduzione

Negli ultimi anni grazie ad un maggior riguardo alla sostenibilità ambientale e al riciclo dei materiali, nell'ambito delle pavimentazioni stradali, si è sviluppata sempre più la tecnica del riciclaggio a freddo delle pavimentazioni attraverso le quali viene salvaguardato l'inquinamento atmosferico e si punta al recupero dei materiali nelle pavimentazioni esistenti.

La sperimentazione di questa tesi si è concentrata sullo studio di una miscela ottimizzata per il miglioramento della resistenza meccanica dello strato di base di una pavimentazione stradale e sull'evoluzione della stessa all'aumentare della maturazione.

La presente tesi è strutturata in cinque parti:

1. Introduzione
2. Stato dell'arte delle miscele a freddo: vengono descritte le caratteristiche principali del riciclaggio a freddo, i metodi d'applicazione e i vantaggi principali
3. Materiali: accurata descrizione delle proprietà e delle analisi granulometriche dei materiali utilizzati durante la sperimentazione,
4. Programma sperimentale: in questo capitolo sono descritte le analisi e le prove effettuate durante la sperimentazione.
5. Analisi dei risultati: sono riportati i risultati ottenuti dalle prove eseguite
6. Conclusioni

## Capitolo 2 – Stato dell’arte

### **2.1 Le pavimentazioni stradali**

Le pavimentazioni stradali sono strutture costituite da una miscela di leganti e aggregati, che sono collocate in trincea, in rilevato o poste su un terreno in sito.

Le funzioni principali di una pavimentazione stradale sono quelle di garantire al traffico veicolare perfette condizioni di sicurezza e comfort di marcia. Al fine di rispettare queste due caratteristiche le strutture devono:

- Sopportare il carico veicolare giornaliero evitando la creazione di rotture o dissesti del piano viabile
- Adeguata aderenza stradale ai veicoli al fine di ottenere comfort e sicurezza della circolazione.
- evitare che gli agenti atmosferici possano infiltrarsi negli strati della pavimentazione e causare danni alla struttura.

In base all’utilizzo dei materiali e alla collocazione di essi all’interno della struttura stradale, si possono distinguere diverse tipologie di pavimentazioni.

Pavimentazioni rigide, sono costituite da strati di calcestruzzo che possono essere collocati su uno o più strati, base o fondazione, costituiti da materiale granulare non legato o stabilizzato con leganti; oppure direttamente sullo strato di sottofondo opportunamente trattato.

Le pavimentazioni flessibili sono composte da quattro strati:

- **Strato d’usura o tappeto d’usura** (3-6 cm): questo è lo strato superficiale della struttura che va a diretto contatto con gli pneumatici dei veicoli, i carichi applicati vengono trasferiti agli strati sottostanti. Le caratteristiche principali che deve avere sono la regolarità del piano viabile e un’adeguata aderenza fra la pavimentazione e lo pneumatico, sia in condizioni di pavimentazione asciutta sia bagnata, al fine di garantire condizioni di sicurezza ottimali. Questo strato è realizzato in

conglomerato bituminoso ovvero da aggregati lapidei, di alta qualità, più bitume e per assicurare il massimo dell'aderenza e ridurre al minimo il fenomeno dell'acquaplaning il manto d'usura è caratterizzato da un'elevata macro-rugosità superficiale attraverso aggregati poco ricchi di sabbia. Infine, si può realizzare questo strato sia con conglomerati bituminosi "chiusi" o "semichiusi" ovvero con bassa percentuale di vuoti e quindi di porosità, favorendo così la resistenza meccanica oppure conglomerati bituminosi "aperti" oppure detti drenanti che favoriscono appunto il drenaggio dell'acqua a discapito di una resistenza meccanica inferiore.

- **Strato di binder (strato di collegamento)** (6-8 cm): questo strato funge da collegamento fra lo strato d'usura e la base, trasferisce i carichi negli strati più profondi e garantisce una determinata planarità o pendenza per lo strato di base. È costituito da conglomerato bituminoso in genere chiuso o semichiuso ed è consentito l'utilizzo di materiale fresato in quantità non superiore al 25% del peso della miscela.
- **Strato di base** (8-30 cm): la funzione principale di questo strato è strutturale, trasferisce, in modo attenuato, i carichi verticali e orizzontali agli strati sottostanti tale per cui non si verificano deformazioni o rotture. Lo spessore è molto variabile perché dipende dalle caratteristiche del sottofondo, dalla quantità di traffico pesante e dal clima. Per ovviare ai problemi climatici, ovvero dal gelo, si usa uno strato di protezione composto da una miscela di ghiaia e sabbia con aggiunta di minerali frantumati, i quali essendo insensibili al gelo, una volta compattato viene eliminata l'acqua dalla sovrastruttura. Nel riciclaggio a freddo è previsto l'uso dell'emulsione bituminosa, viene miscelata con gli aggregati e con il cemento, con un dosaggio che va dal 3,5% al 4,0% in peso sulla miscela degli aggregati. Il cemento, contrariamente al misto cementato, non ha la funzione di legante ma è fondamentale per la formazione del mastice, il quale controlla la velocità di rottura dell'emulsione e lega gli aggregati lapidei.

- **Strato di fondazione** (15-35 cm): le funzioni principali sono quelle di distribuire e uniformare i carichi verticali, derivati dagli strati superiori, al sottofondo e regolarizzare la struttura sovrastante. La sua composizione è in misto granulare ma si possono usare anche materiali da recupero come, ad esempio, il fresato in conglomerato bituminoso, derivato da pavimentazioni che hanno terminato la loro vita utile.
- **Sottofondo** (50-100 cm): questo strato è il principale responsabile del corretto funzionamento della pavimentazione. Si trova nella parte più profonda della struttura e il suo compito è quello di assorbire i carichi ed evitare che si possano concentrare in un punto creando cedimenti e fessurazioni che manometterebbero la struttura.

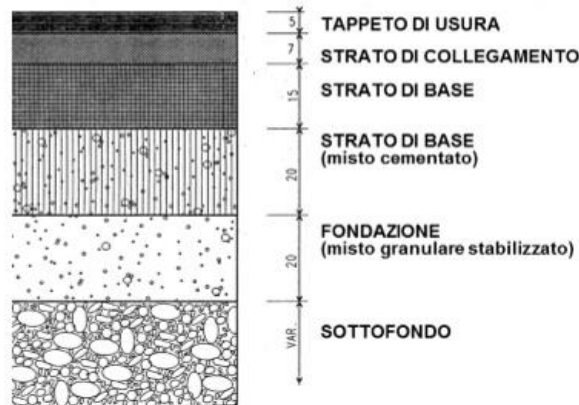


Figura 0.1 – Stratigrafia di una pavimentazione stradale

## 2.2 Riciclaggio a freddo

Il riciclaggio a freddo è una tecnica attraverso la quale viene recuperato il conglomerato bituminoso invecchiato. Si procede con la demolizione di una pavimentazione stradale arrivata a fine vita attraverso una fresa che svolge la così detta fresatura a freddo, permette di demolire il materiale, stoccarlo senza che ne influisca sulla lavorabilità e infine, questo materiale chiamato anche fresato, può essere recuperato fino al 100%.





Figura 0.2 – Esecuzione dell'riciclaggio a freddo

Le miscele nel riciclaggio a freddo sono composte da:

- Conglomerato bituminoso di recupero (fresato)
- Emulsione bituminosa o bitume schiumato, con una quantità compresa fra il 3% e 6%.
- Aggregati lapidei vergini per correggere la curva granulometrica
- Cemento, in quantità dall'1% al 3%
- Filler
- Acqua, utile per assicurare una maggiore lavorabilità

La determinazione delle caratteristiche del fresato è di fondamentale importanza perché mi permette di stabilire le quantità e le qualità degli altri materiali da utilizzare nella miscela per ottenere un composto ottimale. Lo studio della miscela viene fatto attraverso varie fasi:

- Determinazione della composizione granulometrica della miscela degli aggregati

Lo studio della curva granulometrica del materiale da recuperare varia in base a come si opera, se in situ oppure in impianto fisso o mobile. Nel

primo caso il conglomerato bituminoso da recuperare è prelevato in cantiere, dopo il passaggio del pulvimixer (macchina stabilizzatrice). Nell'impianto invece si preleva il fresato dai vari cumuli creati attraverso la vagliatura e poi si devono determinare le quantità d'utilizzo. Spesso si integrano degli aggregati vergini, soprattutto quando si lavora in situ, utili per correggere la curva granulometrica a causa di una scarsità della frazione fine e del filler che, anche se la pavimentazione originaria aveva una giusta quantità, nel fresato scarseggia per mezzo dell'inglobamento nel bitume. Se il fino non è presente in quantità sufficiente penalizza la resistenza meccanica al contrario, una carenza della parte grossa non incide fortemente.

- Scelta del tipo di legante

I leganti utilizzabili sono di quattro tipi:

- Cemento
- Bitume schiumato
- Emulsione di bitume normale sovra stabilizzata
- Emulsione di bitume modificato sovra stabilizzata

In base al tipo di miscela che si vuole ottenere, si determinano il tipo di legante e la quantità, influisce nella scelta anche la reperibilità del materiale e la destinazione d'uso: strato di fondazione, strato di base o misto cementato.

- Il contenuto d'acqua

L'acqua ha un'importanza fondamentale all'interno della miscela perché facilita il costipamento e quindi deve essere dosata correttamente.

La determinazione del dosaggio ottimale dell'acqua avviene attraverso la preparazione di miscele con diverse quantità d'acqua (dal 3% all'8%) e con un dosaggio di cemento del 2% sul peso degli aggregati. Da ogni miscela si

ricava almeno tre provini, i quali vengono compattati con pressa giratoria in una fustella. Il valore più alto che si ottiene di massa volumica della miscela secca e una quantità di acqua espulsa inferiore al 5% durante la compattazione stabilisce la quantità ottimale di acqua

- *Il dosaggio del legante*

Per stabilire il corretto dosaggio dei leganti, si procede con la composizione di vari provini usando lo stesso procedimento descritto in precedenza, e variando il contenuto di cemento ed emulsione bituminosa (o bitume schiumato), con un contenuto d'acqua ottimale.

Successivamente i provini vengono fatti maturare a 40°C per 72 ore, si definisce la resistenza a trazione indiretta e la perdita di resistenza dopo imbibizione (1 ora). I risultati devono essere superiori di 0,35 MPa e una perdita inferiore al 70% di resistenza.

Esistono varie tecniche per il riciclaggio a freddo che variano in base alle tipologie di intervento che si effettua e alle diverse profondità in cui si opera. Si dividono in:

- *Riciclaggio in profondità*

Si attua un intervento di demolizione e ricostruzione di uno strato, con una profondità che supera i 15 cm, questa tecnica è la più utilizzata. Il beneficio principale è l'aumento di prestazione strutturale rispetto allo strato precedente.

- *Riciclaggio superficiale*

È un intervento che si effettua in un range tra 8-15 cm di profondità, vengono ripristinate le deformazioni superficiali per migliorare la viabilità

- *Depolverizzazione, miglioramento di strade bianche*

Si effettua un ancoraggio della ghiaia presente sulle strade bianche attraverso l'uso di bitume, il quale infiltrandosi nella pavimentazione esistente crea la base su cui verranno posati i successivi strati. Si procede con la posa di ghiaia e bitume fino al raggiungimento di uno spessore prestabilito. In conclusione, viene effettuata la rullatura per far compattare gli aggregati.

### **2.2.1 Riciclaggio a freddo in impianto**

Nel riciclaggio a freddo in impianto possiamo avere due tipologie: impianto fisso o impianto semovente. I macchinari utilizzati sono uguali per entrambe le ipotesi, però nell'impianto semovente c'è un grande vantaggio derivato dalla possibilità di stazionare l'impianto in vicinanza del cantiere, abbattendo così i costi di trasporto e aumentando la velocità del processo.

Nell'impianto si può controllare efficacemente il processo di produzione. Grazie alla vagliatura il fresato è diviso in varie classi granulometriche ottenendo così cumuli di materiale con le stesse dimensioni, in conseguenza si realizzano delle miscele omogenee con una curva granulometrica precisa.



*Figura 0.3 – Impianto per il riciclaggio*

Il processo di produzione nell'impianto si può dividere in due tipologie: continuo o discontinuo. Nel primo caso la produzione di materiale è continua e quindi più veloce, ma ne risente la precisione del dosaggio. Nell'impianto discontinuo invece si pesa il materiale da usare, come aggregati e leganti, poi, ogni 40-50 secondi, vengono prodotti gli impasti di conglomerato bituminoso. I vantaggi principali sono quelli di ottenere un prodotto di alta qualità, versatilità di utilizzo e facilità di controllo.

Un impianto fisso è composto da:

- Predosatori per il fresato e gli aggregati, ognuno con classe granulometrica diversa. Negli impianti moderni se ne usano almeno 4
- Nastro trasportatore, per trasportare il materiale
- Cilindro essiccatore, il suo scopo è quello di sollevare e riscaldare il materiale vergine
- Filtro delle polveri
- Torre di miscelazione, è il cuore dell'impianto, è composta da:
  - un vaglio di rifelezione del materiale
  - camera di miscelazione, vengono pesati i materiali della miscela tramite delle celle elettroniche, successivamente si mescolano gli inerti, bitume, il filler ed eventuali additivi.
  - Stoccaggio del conglomerato pronto per caricato e trasportato nel cantiere
- Stoccaggio del bitume tramite dei silos
- Cabina di controllo

### **2.2.2 Riciclaggio a freddo in situ**

La tecnica del riciclaggio a freddo in situ prevede la demolizione e frantumazione di uno o più strati presenti in una pavimentazione che si trova a fine vita. Il materiale ottenuto si denomina fresato, si ottiene attraverso una macchina fresatrice (pulvimixer) che opera per larghezze fino a 2 metri e con una profondità che può arrivare a 40 centimetri. La granulometria del fresato varia da quella del conglomerato bituminoso perché il materiale più fino viene

inglobato nel bitume. Successivamente si utilizza una macchina mescolatrice che, seguendo il pulvimixer, miscela il fresato con acqua, additivi, emulsione bituminosa o schiuma di bitume. Infine, viene steso e compattato con un rullo.

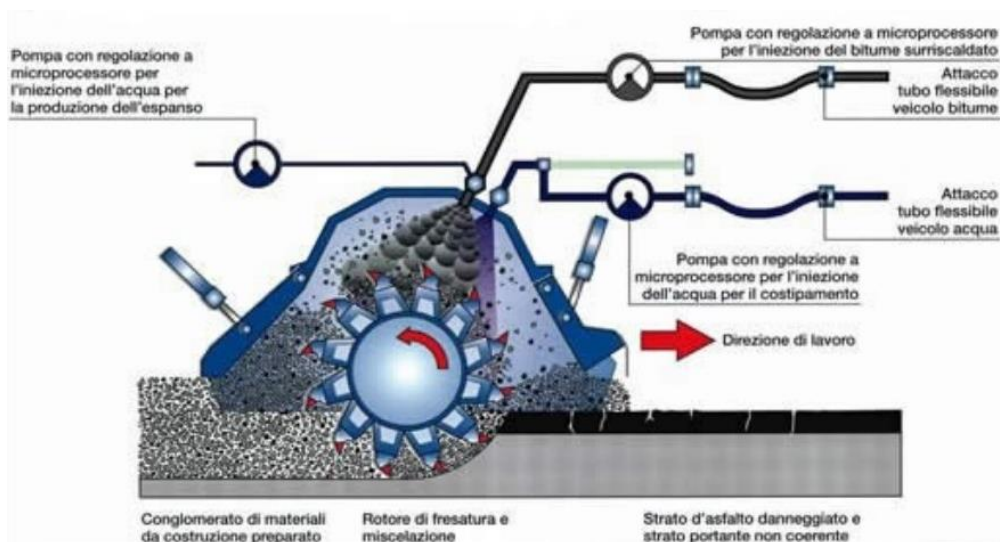


Figura 0.4 – Esempio riciclaggio a freddo in situ

## **Vantaggi e svantaggi**

Il riciclaggio in situ permette di evitare lo stoccaggio dei materiali e la movimentazione di essi, grazie al recupero della pavimentazione stradale esistente. Ne derivano svariati vantaggi:

- Costo minore di costruzione
- Minore durata dell'intervento di ricostruzione grazie all'eliminazione di alcune fasi lavorative comportando così un minore disagio per gli utenti
- Aumento della sicurezza degli operai grazie ad una minore esposizione, minor utilizzo di macchinari o mezzi e ad una minore movimentazione dei materiali all'interno del cantiere.
- Vantaggi ambientali: riducendo l'utilizzo degli aggregati vergini e riutilizzando fino al 100% del fresato, si evitano l'utilizzo di discariche, minore estrazione degli aggregati dalle cave
- Riduzione delle emissioni in atmosfera di fumi, polveri e gas prodotti dal combustibile bruciato nel riscaldamento e trasporto.

- Ottime prestazioni del materiale riciclato grazie ad un controllo delle varie fasi: miscelazione, stesa e posa in opera.
- Risparmio del trasporto del materiale da e per il cantiere; si evita il riscaldamento degli aggregati ottenendo così un risparmio energetico

### **2.2.2.1 Emulsione bituminosa e cemento**

Analizzando una miscela possiamo avere vari elementi che la compongono, in questo caso si ha: fresato, aggiunta di cemento e successivamente una miscela di bitume, emulsionanti ed acqua. L'emulsione è composta dal 60% di bitume e dal 40% di acqua, la quantità usata in genere è del 5% sul peso degli aggregati. I componenti della miscela sono utili per favorirle flessibilità, coesione e stabilità.

Si possono riscontrare dei vantaggi e svantaggi.

Vantaggi:

- L'emulsione ricopre in modo continuo i granuli dell'aggregato
- Migliorare le prestazioni del legante tramite una modifica dell'emulsione con additivi
- Facilità d'impiego delle emulsioni
- Rischi ridotti grazie all'uso dell'emulsione a temperatura ambiente
- Resistenza all'umidità
- Fessurazioni ridotte

Svantaggi:

- Costi più elevati rispetto ad altri trattamenti
- Richiede una bassa umidità per essere utilizzata
- Temperatura di stesa maggiore di 10°C
- Adeguato tempo di rottura dell'emulsione per essere utilizzabile con i vari materiali

## 2.3 Caratteristiche del riciclaggio a freddo

### 2.3.1 Caratteristiche volumetriche del riciclaggio a freddo

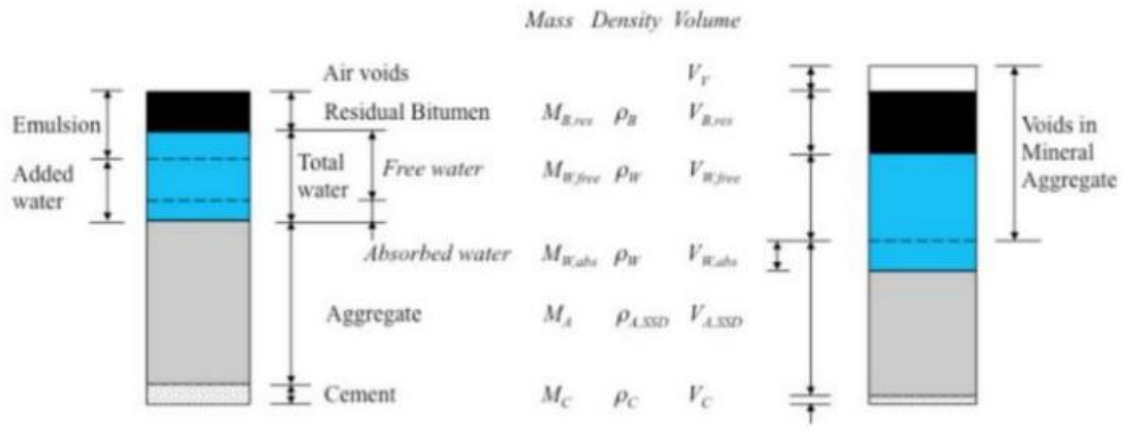


Figura 0.5 – Analisi dei componenti di una miscela bituminosa

Le prestazioni meccaniche e la durabilità delle miscele bituminose sono fortemente influenzate dalle caratteristiche volumetriche. Per ottenere un ottimo risultato bisogna attuare un controllo sia in fase progettuale che in fase di esercizio.

Un fattore da tenere sotto controllo è la maturazione delle miscele, perché attraverso essa, le caratteristiche volumetriche variano; quindi, la volumetria è diversa se ci troviamo in uno stato "fresco" o indurito.

Il grado di compattazione è un indice molto importante che ci permette di valutare le proprietà meccaniche prima, durante e dopo la compattazione attraverso degli indici volumetrici. Per ottenere un addensamento fedele a quello in sito si utilizza la pressa a taglio giratoria, la quale tiene in considerazione la compattazione derivata dal traffico veicolare e quella dai rulli compattatori.

Analizzando una miscela riciclata a freddo possiamo vedere i vari elementi che la compongono: bitume, cemento, aria, acqua e aggregati.



L'acqua totale è data dalla somma dell'acqua derivata dall'emulsione e da quella contenuta all'interno della miscela. Quest'ultima è la somma dell'acqua libera e quella assorbita dagli aggregati, il compito più importante è quello di ridurre l'attrito fra i vari materiali favorendo così la compattazione.

Per valutare il grado di compenetrazione fra i vari elementi della miscela si utilizza l'indice dei vuoti tra gli elementi solidi ed è il rapporto fra la percentuale di volume della parte solida e i vuoti occupati da bitume, aria ed acqua. Si calcola con questa formula:

$$VA = \frac{Vv + Vb, res + Vw, free}{Vtot} \times 100$$

Si può calcolare l'indice dei vuoti in miscela che deriva dalla percentuale di volume occupata dai vuoti d'aria e dall'acqua libera:

$$Vm = \frac{Vv + Vw, free}{Vtot} \times 100$$

Per valutare l'efficacia della compattazione della miscela ci si avvale dell'indice dei vuoti contenenti liquido. Se questo valore è minore del 100% la miscela non è satura e quindi ci sono dei vuoti liberi, se è maggiore o uguale al 100% la miscela è satura e quindi l'acqua libera viene espulsa. Per calcolare questo parametro si utilizza questa formula:

$$VFL = \frac{Vb, res + Vw, free}{Vv + Vb, res + Vw, free} \times 100$$

Vv= volume dei vuoti d'aria

Vb,res= volume del bitume residuo

Vw,free=volume dell'acqua libera

Vtot= volume totale del composto

### **2.3.2 Maturazione delle miscele a freddo**

L'analisi del processo di maturazione è utile per monitorare l'evoluzione nel tempo della miscela e quindi delle proprietà meccaniche come resistenza e rigidità. L'evoluzione è dovuta al cambiamento delle caratteristiche dei componenti, ad esempio: i leganti come l'emulsione bituminosa e il cemento necessitano di un determinato tempo prima di svilupparsi completamente, l'evaporazione dell'acqua e l'aumento di volume del cemento idrato. Quindi la velocità di maturazione dipende da vari fattori collegati alla composizione della miscela come: tipo e quantità di cemento, quantità d'acqua, tipo di emulsione, quantità di vuoti; ma dipende anche dalle caratteristiche che si hanno nell'ambiente di lavoro ad esempio la temperatura, la stratigrafia della pavimentazione e l'umidità.

Analizzando il comportamento dell'acqua si evince che non tutta si trasforma in vuoti ma in parte rimane non evaporabile a causa dell'idratazione del cemento, che consiste nell'interazione chimica fra cemento ed acqua. Il cemento a contatto con l'acqua forma dei legami ovvero prodotti fibrosi che sono anche chiamati gel torbernoritico. Questo gel lega un granulo con l'altro formando però dei vuoti capillari dove viene trattenuta l'acqua di cristallizzazione che non può essere eliminata.

Una caratteristica fondamentale per il cemento è quella di doverlo "conservare" in una condizione umida così da favorire la formazione dei legami e in conseguenza ottenere la resistenza necessaria. Si effettuano le misurazioni in vari giorni, 3,7,14,28 ecc.. per monitorare l'andamento dell'umidità e della resistenza meccanica.

Con il passare dei giorni il materiale indurisce e fa presa ma i vuoti, o meglio detti pori, rimangono e portano determinati svantaggi alla resistenza meccanica, alla durabilità e permeabilità e al modulo elastico.

I pori si distinguono in varie tipologie:

- Porosità capillare (0.1-10mm): determinabile attraverso la formula di Powers e può essere facilmente modificabile:

$$V_{por\ capillare} = 100 \times \left( \frac{a}{c} - 36.15a \right)$$

a/c= rapporto acqua cemento

a= grado d'idratazione del cemento

- Porosità del gel torbernoritico (1-10mm): porosità intrinseca del materiale, non è modificabile e non causa problemi alla resistenza meccanica e alla durabilità.
- Macropori (nell'ordine dei millimetri): sono costituiti da una scarsa compattazione o da bolle d'aria rimaste intrappolate. Si localizzano principalmente in superficie causando un'esposizione maggiore degli agenti atmosferici.

## Capitolo 3 – Materiali

Nelle pagine successive verranno descritti i materiali che sono stati utilizzati per eseguire il confezionamento delle miscele.

### **3.1 Fresato**

Il fresato, chiamato anche RAP (reclaimed asphalt pavements), deriva dal recupero mediante fresatura degli strati del rivestimento stradale e successivamente viene utilizzato come materiale per le miscele.

Come già detto nel capitolo precedente il fresato presenta ottimi vantaggi come il risparmio economico, la salvaguardia dell'ambiente, minor utilizzo delle discariche ed infine la qualità del prodotto riciclato è uguale a quella originale.

Le caratteristiche che il fresato deve mantenere nel tempo sono varie ed utili a salvaguardare la sicurezza dei veicoli, questi sono:

- Resistenza meccanica della struttura
- Resistenza agli agenti atmosferici
- Mantenimento delle proprie caratteristiche durante la stesura e la compattazione

Nel mio studio sono stati utilizzati varie tipologie d'impasti e di RAP, in particolare: il primo è un fresato più fino, il secondo ha dimensioni maggiori mentre il terzo si tratta di un 16-20.

- **Fresato 1:**



*Figura 3.1 – Fresato “fino”*

Campione:	Fresato
d [mm]	% passante
31,5	100,0
20	100,0
16	92,4
10	77,0
8	63,1
4	34,8
2	19,2
1	9,7
0,5	4,9
0,25	2,9
0,125	1,8
0,063	1,4
FONDO	0,0

*Tabella 3.1 – Analisi granulometrica fresato “fino”*

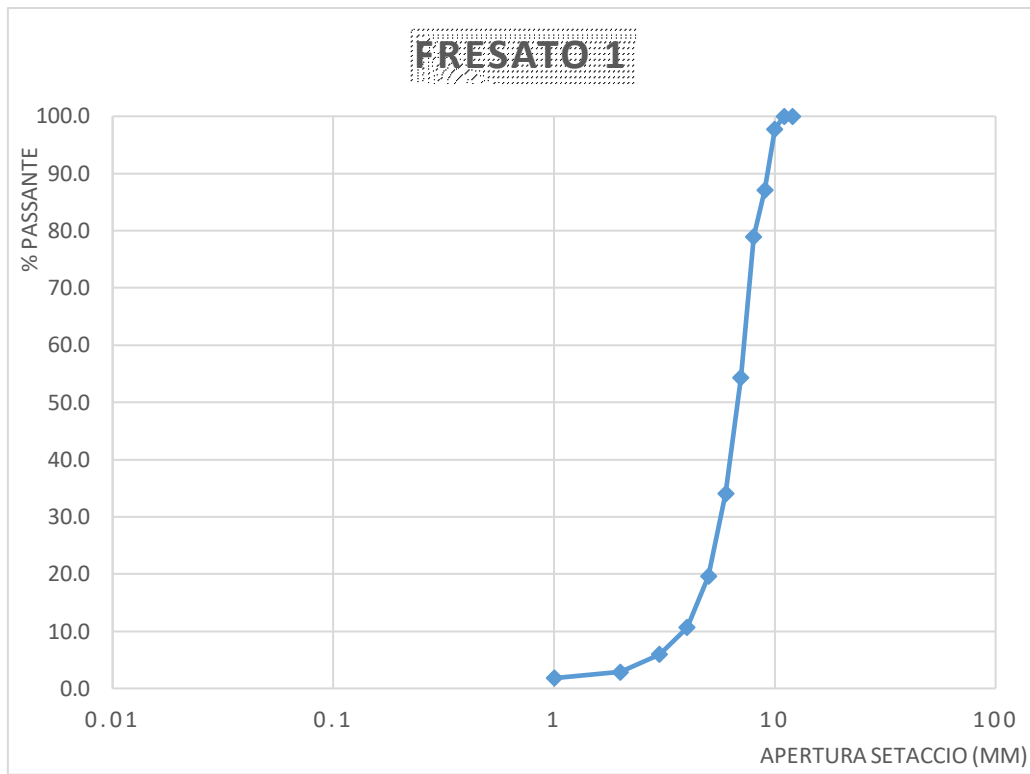


Figura 3.2 – Curva granulometrica del fresato “fino”

- **Fresato 2:**



Figura 3.3 – Fresato “grosso”

Campione:	Fresato
d [mm]	% passante
31,5	100,0
20	100,0
16	92,4
10	77,0
8	63,1
4	34,8
2	19,2
1	9,7
0,5	4,9
0,25	2,9
0,125	1,8
0,063	1,4
FONDO	0,0

Tabella 3.2 – Analisi granulometrica fresato “grosso”

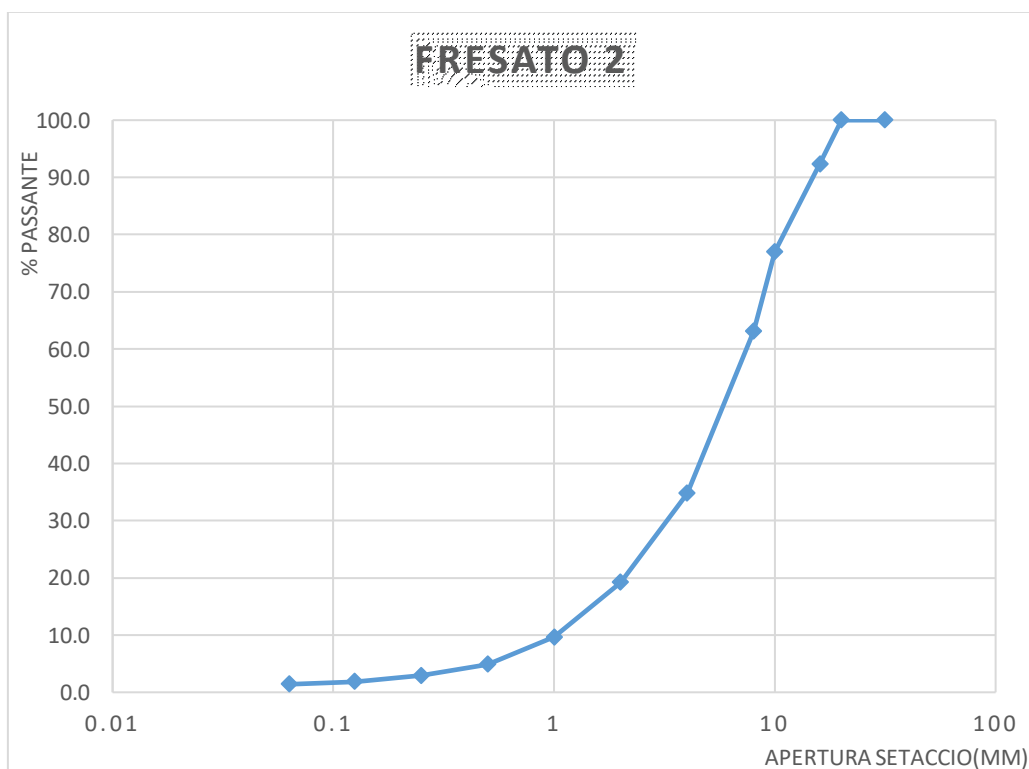


Figura 3.3 – Curva granulometrica del fresato “grosso”

- **Fresato 3:**



*Figura 3.4 – Fresato 16/20*

Campione:	Fresato
d [mm]	% passante
31,5	100,0
20	100,0
16	0,0
10	0,0
8	0,0
4	0,0
2	0,0
1	0,0
0,5	0,0
0,25	0,0
0,125	0,0
0,063	0,0
FONDO	0,0

*Tabella 3.3 – Analisi granulometrica fresato 16/20*



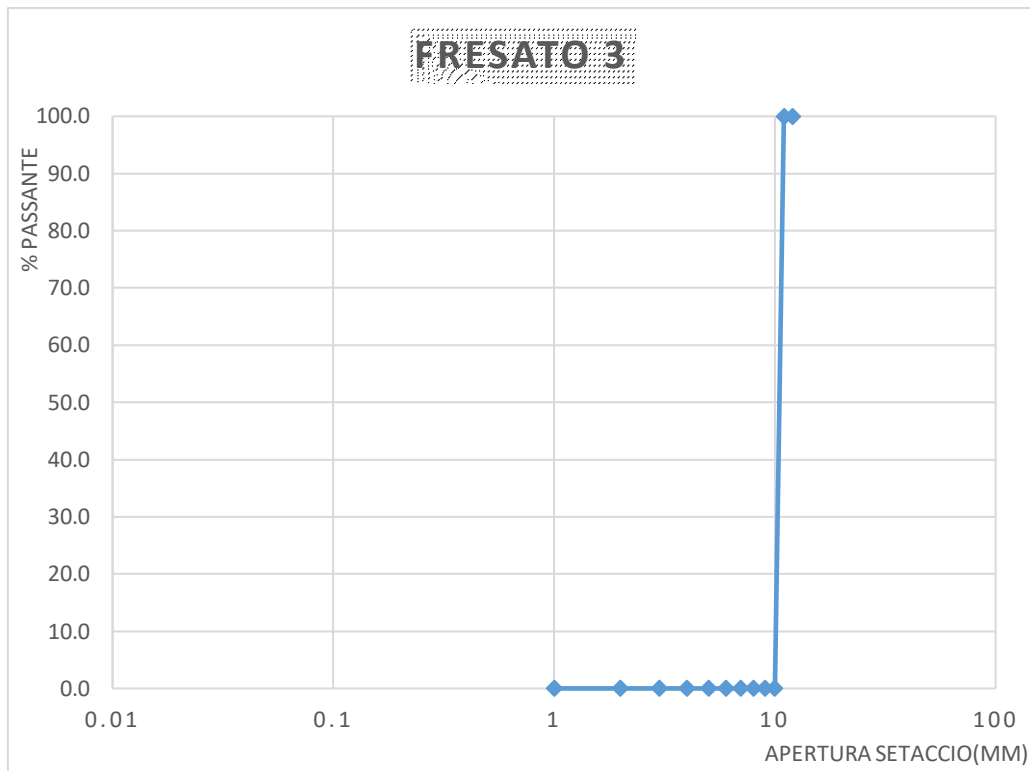


Figura 3.5 – Curva granulometrica del fresato 16/20

### 3.2 Sabbia

Nel secondo impasto effettuato durante la sperimentazione è stato previsto un dosaggio di sabbia con l'obiettivo di aumentare la parte fine della miscela. La sabbia utilizzata è di natura calcarea, ha un comportamento basico e un'elevata adesione bitume-aggregato.

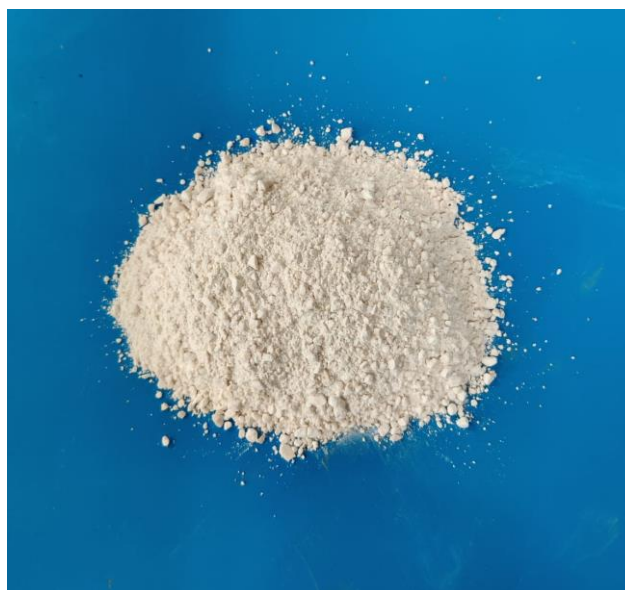


Figura 3.6 – Sabbia

Campione:	Fresato
d [mm]	% passante
31,5	100
20	100
16	100
10	100
8	100
4	92,5
2	60,4
1	41,5
0,5	22,5
0,25	16,0
0,125	11,8
0,063	9,2
FONDO	0,0

Tabella 3.4 – Analisi granulometrica della sabbia

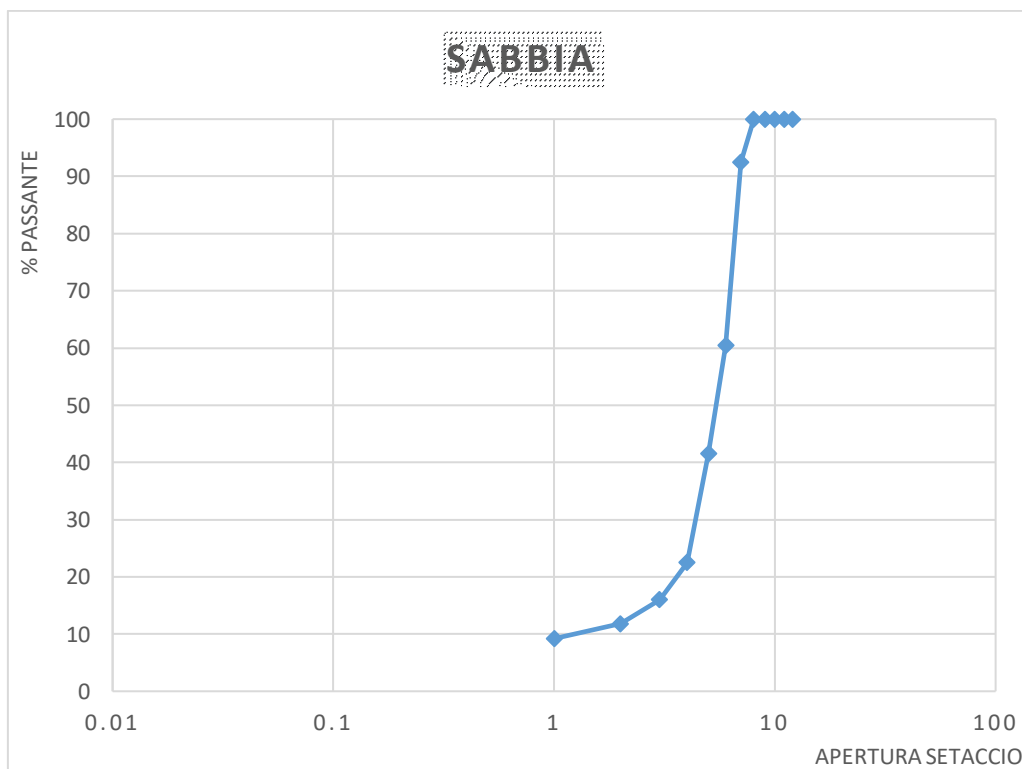


Figura 3.7 – Curva granulometrica della sabbia

### 3.3 Filler

Il filler è un componente di grande importanza all'interno delle pavimentazioni stradali perché garantisce un elevato livello di prestazione. I vantaggi che ne conseguono sono molteplici:

- Evita l'ormaiamento, favorisce l'elasticità della pavimentazione permettendole di riottenere la forma originaria senza subire le modifiche provocate dalle temperature elevate, dalle infiltrazioni di umidità e dai carichi frequenti. (Nicem 2022[1])
- Il materiale non è fragile, non ci sono conseguenze per la sicurezza e consente di ritardare l'invecchiamento della pavimentazione
- Riduce l'effetto dannoso dell'umidità
- Resistenza della pavimentazione aumentata soprattutto a temperature elevate
- Aumento della vita utile della pavimentazione

#### 3.3.1 Filler industriale

Filler naturale, frantumato, costituito da sabbia di composizione quasi esclusivamente carbonatica (frammenti di calcari a diversa tessitura, calcarenite, calcite spatica, dolomia) con tracce di arenarie e siliti. (Monte Bianco 2016[2])



*Figura 3.8 – Filler industriale*

Campione:	Fresato
d [mm]	% passante
31,5	100
20	100
16	100
10	100
8	100
4	100
2	100
1	100
0,5	100
0,25	98,6
0,125	90,2
0,063	77,6
FONDO	0,0

Tabella 3.5 – Analisi granulometrica del filler industriale

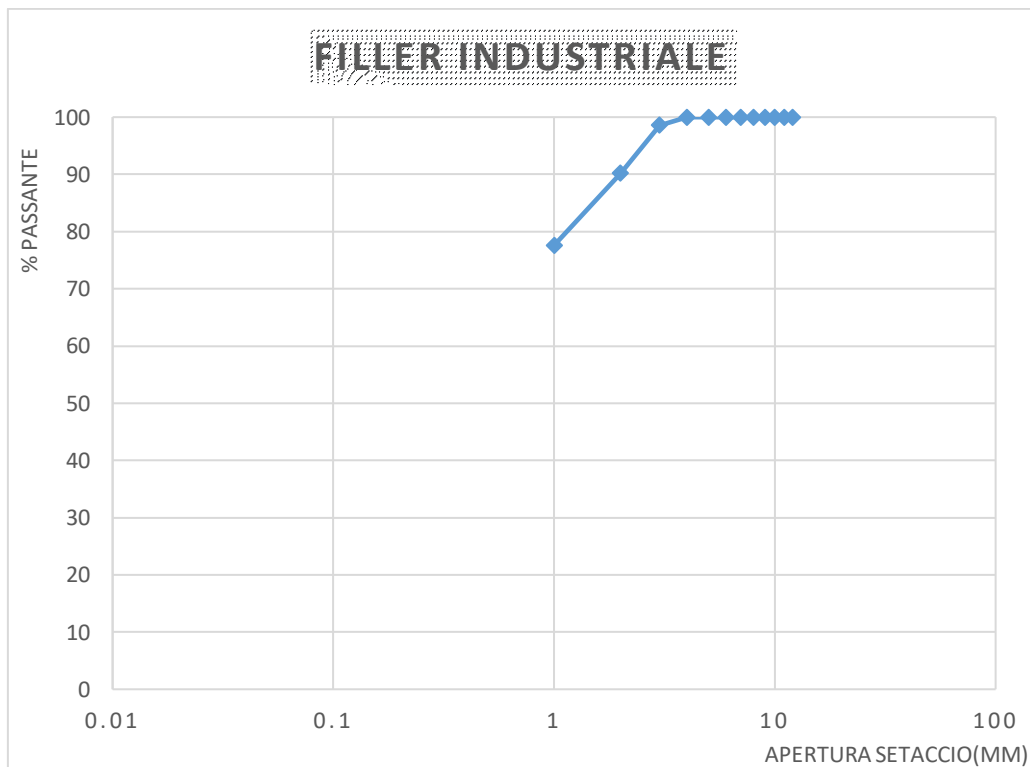


Figura 3.9 – Curva granulometrica del filler industriale

### 3.3.2 Filler di recupero

Il filler di recupero deriva dai filtri dei fumi e dallo sgrassatore localizzati negli impianti per la produzione del conglomerato bituminoso. Queste polveri sono trattenute dal filtro a maniche in tessuto e recuperate tramite coclee.



*Figura 3.10 – Filler di recupero*

Campione: d [mm]	Fresato % passante
31,5	100
20	100
16	100
10	100
8	100
4	100
2	99
1	96
0,5	91,4
0,25	86,1
0,125	77,5
0,063	69,5
FONDO	0,0

*Tabella 3.6 – Analisi granulometrica del filler di recupero*

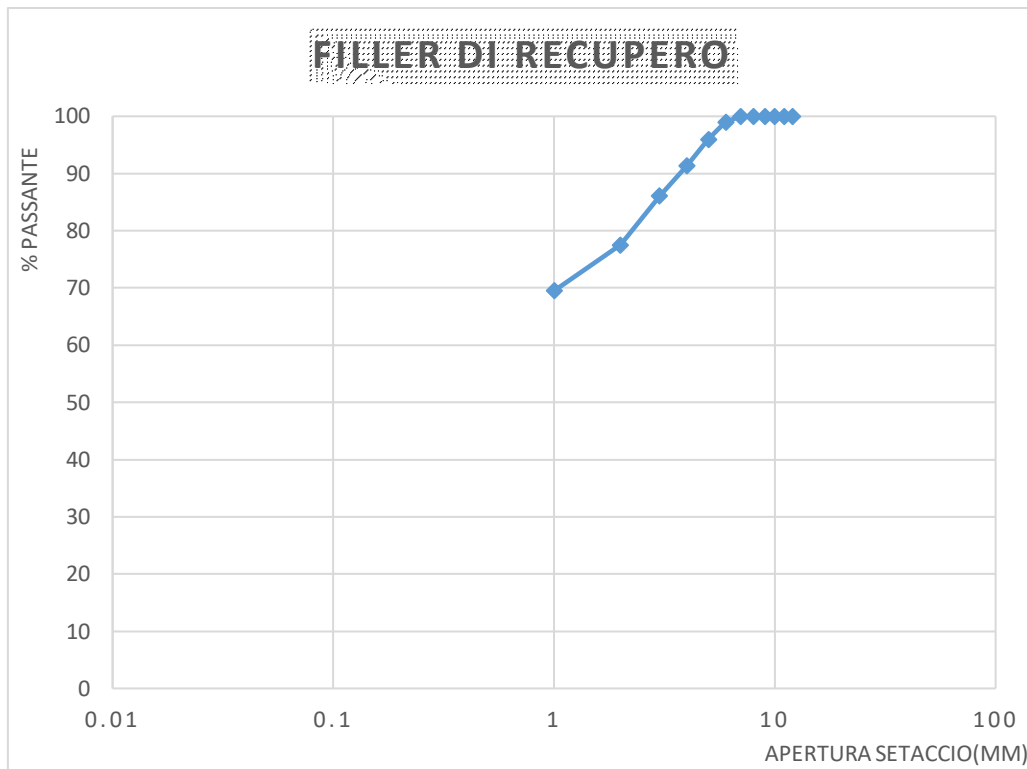


Figura 3.11 – Curva granulometrica del filler di recupero

### 3.4 Acqua

L'acqua ha un ruolo fondamentale nella composizione della miscela, bisogna introdurre il giusto quantitativo e controllarlo tramite la prova di costipamento per verificare che non sia eccedente. In genere si utilizza una quantità compresa fra il 5-7% rispetto alla massa del fresato.

Bisogna però prestare attenzione alla qualità dell'acqua perché potrebbe influenzare sulle funzioni degli altri materiali; impurità, acidi, oli e qualsiasi sostanza inquinante può arrecare dei problemi alla miscela soprattutto ai processi di maturazione.

Il quantitativo totale dell'acqua all'interno della miscela è dovuto da varie componenti come, ad esempio, l'acqua di raffreddamento delle frese nella fresatrice, la frazione acquosa dell'emulsione bituminosa e dall'umidità del fresato che varia in base alle condizioni atmosferiche.

L'acqua favorisce e controlla vari processi in una miscela come ad esempio:

- Meccanismi di rottura dell'emulsione
- Presa e indurimento del cemento
- Lavorabilità e addensabilità della miscela
- Tempi di riapertura al traffico

Un altro fattore importante determinato dalla quantità d'acqua è la lavorabilità. Per ottenere un grado di lavorabilità molto alto si può aggiungere più acqua così da ottenere una miscela più fluida. Il problema sorge però nella compattazione in opera a causa dell'incomprimibilità del fluido; quindi, un sovradosaggio comporta l'abbassamento dell'addensabilità e in conseguenza diminuzione della durata e delle proprietà meccaniche.

### 3.5 Cemento

Il cemento utilizzato si tratta del cemento portland con classe di resistenza 325. Si ottiene attraverso la miscelazione del clinker, composto principalmente da argilla, sabbia, calcare ed altri materiali, più gesso biidrato oppure anidride naturale. Infine, si può aggiungere al clinker una quantità di gesso di circa il 2% per ottimizzare la qualità del cemento.

Il cemento è caratterizzato da tre fasi:

- *Idratazione*. Questa fase è caratterizzata da una serie di reazioni chimiche che avvengono fra il cemento, il gesso e l'acqua. Inizia subito dopo la miscelazione ed ha una durata di circa 10 minuti. In questo arco di tempo il materiale è mescolabile, malleabile e trasportabile.
- *Presa*. Fase in cui a seguito delle interazioni chimiche, si perde la plasticità e la lavorabilità. Questo processo avviene nel giro di qualche ora e alla sua conclusione il materiale si presenta rigido e non più modellabile
- *Indurimento*. Inizia subito dopo la presa e la sua funzione è quella di ottenere una maggiore resistenza meccanica nel tempo aumentando di giorno in giorno. In genere si considera conclusa questa fase dopo 28

giorni perché il cemento ha raggiunto il 90% della resistenza meccanica totale.

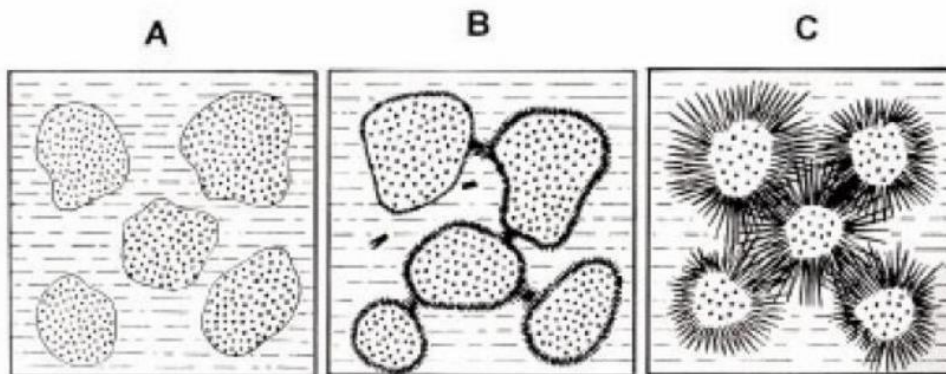


Figura 3.12 – Processo d'idratazione del cemento

### 3.6 Emulsione bituminosa

L'emulsione bituminosa fornisce alla miscela un'adeguata lavorabilità anche a temperatura ambiente, a differenza del bitume "puro" che è molto viscoso e per essere utilizzato bisogna riscaldarlo e quindi comporta uno svantaggio economico.

L'emulsione in genere è composta da acqua per il 40%, da bitume per il 60% e da additivi che evitano la separazione delle due componenti.

Durante la fase di rottura l'acqua presente all'interno dell'emulsione si elimina attraverso l'evaporazione o l'assorbimento degli aggregati, in conseguenza il bitume rivestirà gli aggregati e li unirà. L'emulsione, quindi, aumenta la sua viscosità in questa fase provocando difficoltà di costipamento e di lavorabilità, per ovviare questa problematica, la rottura deve avvenire dopo o durante la compattazione.

La rottura a sua volta ha tre fasi:

- Decantazione: le goccioline di bitume si sedimentano
- Flocculazione: le particelle di bitume si avvicinano
- Coagulazione: le particelle di bitume si legano tra loro

La velocità di rottura dipende da:



- Temperatura ambientale
- Temperatura dell'emulsione
- Dimensione delle particelle di bitume disperse
- Dimensione e natura degli inerti
- Modalità di miscelazione e compattazione

Si possono distinguere cinque categorie diverse di emulsioni in base alla velocità di rottura:

- Rottura super rapida (RR)
- Rottura rapida (ER)
- Rottura media (EM)
- Rottura lenta (EL)
- Rottura sovrastabilizzata (LL)

L'emulsione bituminosa utilizzata nel caso studio è stata:

Emulsione Modificata con Polimeri SBS. L'utilizzo principale di questa emulsione è destinato alla realizzazione delle miscele riciclate a freddo in impianto fisso. È composta da bitume modificato mediante dei polimeri SBS (stirene-butadiene-stirene) i quali migliorano la resistenza, la deformazione e la sollecitazione ai carichi ciclici grazie ad un incremento di prestazioni dell'elasticità e della duttilità.

Per effettuare la modifica del bitume è necessario inserire il polimero all'interno di esso e successivamente si passa alla fase in cui si utilizzano dei mescolatori che omogenizzano il composto. In seguito, viene introdotta l'acqua per formare l'emulsione bituminosa

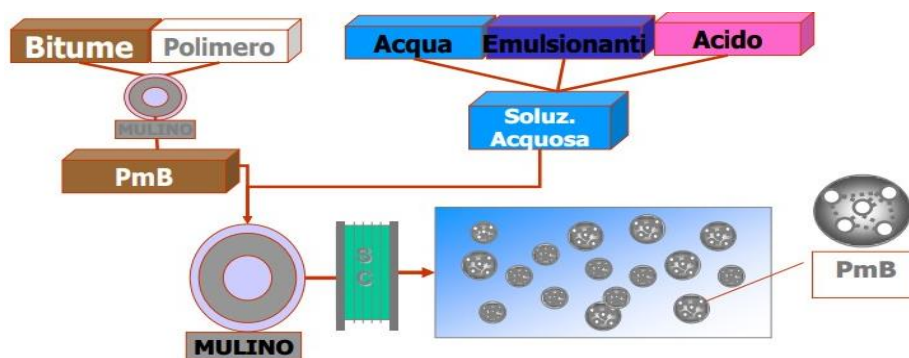


Figura 3.13 – Composizione dell'emulsione bituminosa modificata

Questa emulsione necessita delle accortezze sia in fase di utilizzo che in fase di stoccaggio in quanto, la temperatura dell'emulsione deve essere compresa fra 40° e 60° nella stesura e fra i 10° e i 70° per lo stoccaggio, inoltre per evitare la sedimentazione è necessaria una movimentazione periodica.

## **Capitolo 4 – Programma sperimentale**

In questo capitolo verranno descritti gli obiettivi e i metodi di prova del programma sperimentale.

### **4.1 Obiettivo sperimentale**

L'analisi effettuata è stata condotta in due fasi: la prima ha avuto lo scopo di ricercare la miscela ottimale tramite la variazione dei materiali contenuti all'interno di essa, come filler, sabbia, fresato, e cambiando la curva granulometrica al fine di ottenere un valore di ITS maggiore di 0,4.

La seconda fase si è basata nell'utilizzo della miscela ottimale per valutare l'andamento delle caratteristiche di essa nel tempo.

### **4.2 Metodi di prova**

In questo capitolo verranno descritti tutti i metodi di prova utilizzati durante la sperimentazione in laboratorio.

#### **4.2.1 Analisi granulometrica**

L'analisi granulometrica è una procedura che utilizza dei setacci, che possono essere quadrati o rotondi e di dimensioni d'apertura diverse, attraverso i quali si riesce a separare il materiale per classi di grandezza.

I setacci vengono disposti in base alla grandezza delle loro aperture, si parte con il più grande in cima per poi proseguire in ordine decrescente. Questa pila di setacci viene inserita sopra un piatto vibrante e viene fissata. Grazie

all'azione vibrante il materiale, inserito in cima alla pila, riesce a passare nelle maglie dei setacci per poi fermarsi nell'apertura con dimensione uguale o inferiore del materiale. Per ottenere una vagliatura corretta è necessaria una vibrazione continua di almeno 10 minuti.



Figura 4.1 – Pila di setacci sopra il vaglio vibrante

La pila è composta dai successivi setacci:

d [mm]
31,5
20
16
10
8
4
2
1
0,5
0,25
0,125
0,063
FONDO

Tabella 4.1 – Apertura dei setacci

Alla fine della vagliatura si procede con la pesatura del materiale contenuto in ogni setaccio così da ottenere il trattenuto parziale. Successivamente grazie al peso noto della massa iniziale del campione, vengono calcolate le percentuali di trattenuto di ogni setaccio e le percentuali cumulative.

Esempio:

Campione	CBR_1			
	Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	14,9	0,8	0,8	99,2
16	49,2	2,5	3,3	96,7
10	229,7	11,8	15,1	84,9
8	161,4	8,3	23,4	76,6
4	424,5	21,9	45,3	54,7
2	370,6	19,1	64,4	35,6
1	280,7	14,5	78,9	21,1
0,5	180	9,3	88,2	11,8
0,25	102,1	5,3	93,5	6,5
0,125	67,2	3,5	97,0	3,0
0,063	21,4	1,1	98,1	1,9
FONDO	36,7	1,9	100,0	0

Tabella 4.2 – Esempio di un'analisi granulometrica

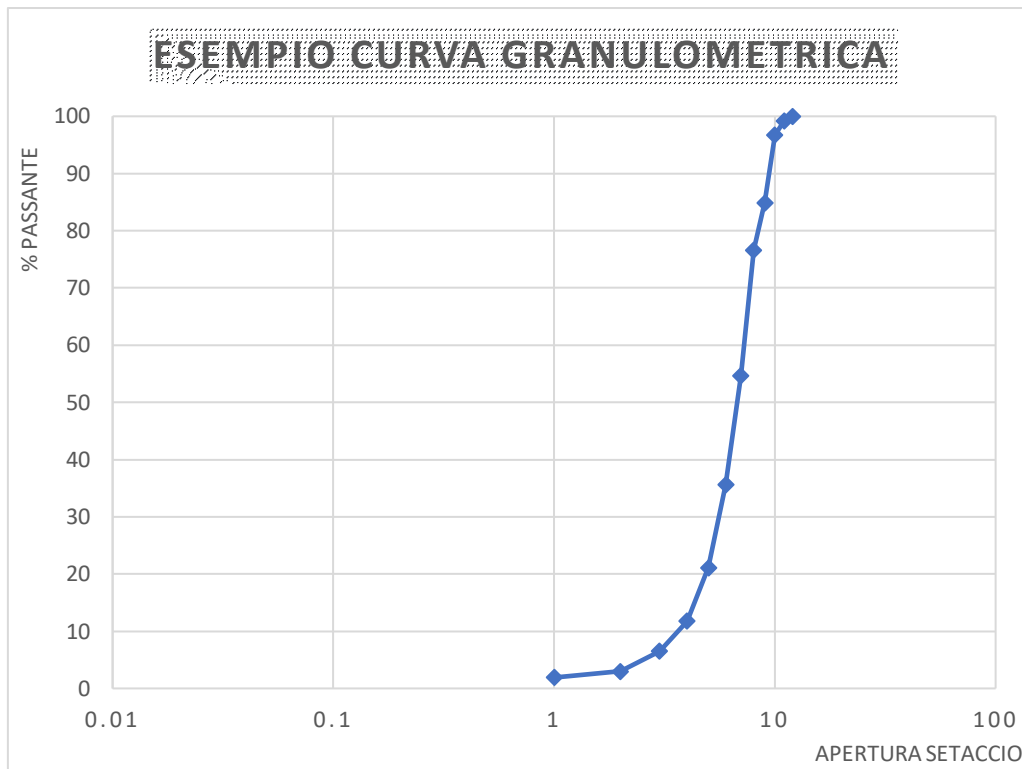


Figura 4.2 – Esempio di una curva granulometrica

#### 4.2.2 Massa volumica e assorbimento

Il picnometro è lo strumento attraverso il quale si riesce a calcolare la massa volumica di un materiale e l'assorbimento d'acqua da parte di corpi solidi.

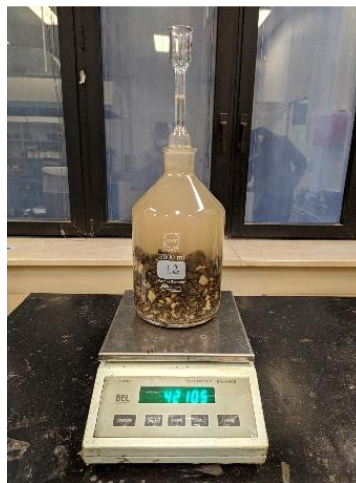
Nella sperimentazione sono state effettuate 3 misurazioni per il materiale più fino e 2 per il materiale più grande. La diversificazione fra i due tipi di aggregato sta nelle dimensioni, il fino va da 0,063 mm - 4 mm, il grosso invece 4 mm - 31,5 mm.

La procedura si effettua nel modo seguente, viene messo l'aggregato all'interno del picnometro e si inserisce l'acqua fino alla completa sommersione di essi. Successivamente si inserisce il picnometro in una camera climatica per una notte a 20°, poi attraverso l'utilizzo di una pompa sottovuoto, per circa 20 minuti, si eliminano le bolle d'acqua rimaste intrappolate all'interno degli aggregati.



*Figura 4.3 – Picnometro*

Dopo questa fase si procede con l'aggiunta del tappo, il quale è segnato in un livello prestabilito ed è utile per stabilire la quantità d'acqua di aggiunta al fine di raggiungere quel livello. Si posiziona il tutto sopra una bilancia e si misura la massa  $M_2$ .



*Figura 4.4 – Picnometro riempito con aggregati ed acqua*

Si prende un termometro ad ago e si effettua la misurazione della temperatura dell'acqua.

La fase successiva consiste nello svuotare tutto il contenuto del picnometro sopra un setaccio con apertura 0,063 mm così da far defluire tutta l'acqua, il materiale trattenuto viene steso su una teglia contenete un panno assorbente e viene asciugato tramite esso fino al raggiungimento della condizione di

superficie satura asciutta (SSA), situazione in cui non è presente il velo d'acqua sulla superficie.

Si prende una teglia vuota, viene pesata la tara 1 della teglia e la tara ( $M_1$ ) del materiale in condizione di SSA. La teglia viene messa per una notte in un forno a  $40^\circ$  e il giorno successivo si pesa la massa della teglia più aggregato, levando la massa della teglia calcolata precedentemente si ottiene la massa del materiale asciutto  $M_4$ .

L'ultima fase è quella in cui si prende il picnometro vuoto, si inserisce il tappo e si riempie il picnometro con solo l'acqua, si calcola la massa  $M_3$  e si misura la temperatura, la quale non deve scostare di più di  $2^\circ$  rispetto a quella misurata inizialmente.

Per calcolare le masse volumiche e gli assorbimenti dell'acqua si usano le seguenti formule:

- Massa volumica apparente dei granuli

$$\rho_a = \rho_w * \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

- Massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa

$$\rho_{rd} = \rho_w * \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Massa volumica dei granuli in condizioni di SSA

$$\rho_{ssd} = \rho_w * \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Assorbimento dell'acqua

$$WA_{24} = 100 * \frac{(M_1 - M_4)}{M_4}$$

La massa volumica dell'acqua  $\rho_w$  è influenzata dalla temperatura e si ricava dalla tabella seguente:

Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m <sup>3</sup>	Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m <sup>3</sup>
10	1,002 7	999,8	20	1,001 2	998,3
11	1,002 6	999,7	21	1,001 0	998,1
12	1,002 5	999,6	22	1,000 7	997,8
13	1,002 3	999,4	23	1,000 5	997,6
14	1,002 2	999,3	24	1,000 3	997,4
15	1,002 1	999,2	25	1,000 0	997,1
16	1,001 9	999,0	26	0,999 7	996,8
17	1,001 7	998,8	27	0,999 5	996,6
18	1,001 6	998,7	28	0,999 2	996,3
19	1,001 4	998,5	29	0,998 9	996,0
20	1,001 2	998,3	30	0,998 6	995,7

Tabella 4.3 – Tabella per calcolo massa volumica

#### 4.2.3 Determinazione dei vuoti

Per calcolare il volume dei vuoti dobbiamo prima ricavarci delle formule della massa volumica massima e apparente.

La *massa volumica massima* è la massa per unità di volume di una miscela bituminosa esente da vuoti d'aria ed a una temperatura nota. Essa si calcola attraverso questa formula:

$$\rho_m = \frac{100}{(p_a/\rho_a) + (p_b/\rho_b)}$$

dove:

- $\rho_m$ : massa volumica massima della miscela in kg/m<sup>3</sup>
- $p_a$ : percentuale di aggregati nella miscela in m/m
- $\rho_a$ : massa volumica apparente degli aggregati in kg/m<sup>3</sup>
- $p_b$ : percentuale di legante nella miscela in m/m
- $\rho_b$ : massa volumica del legante a 25 °C in kg/m<sup>3</sup>

La *massa volumica apparente* è la massa per unità di volume di una miscela bituminosa inclusi i vuoti d'aria ed a una temperatura nota.



La procedura di calcolo prevede la misurazione dei provini in millimetri e la massa del provino secco  $m_1$ . La formula per calcolare la massa volumica apparente è la seguente:

$$\rho_{bgeom} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \cdot 10^6$$

dove:

- $\rho_b$ : massa volumica apparente del provino in kg/m<sup>3</sup>;
- $m_1$ : massa del provino asciutto in g;
- h: altezza del provino in mm;
- d: diametro del provino in mm.

Attraverso queste due formule si può calcolare il *volume dei vuoti*:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100$$

#### **4.2.4 Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM)**

Per determinare il modulo a trazione indiretta ci si avvale dell'utilizzo del NAT (Nottingham Asphalt Tester) attraverso il quale si procede con una prova a trazione indiretta ripetuta. Le prove avvengono con una deformazione controllata e su almeno due diametri del provino con un angolo tra i due di 90°. Questa prova consiste nell'applicazione di un carico in una direzione e tramite dei trasduttori si misurano le deformazioni in modo perpendicolare rispetto ad essa.

La fase preliminare ha lo scopo di tarare il peso che viene applicato attraverso degli impulsi sul provino e ad assestare il carico sul provino.

Ci si avvale dell'utilizzo di un castelletto in cui si inserisce il provino per effettuare la prova, viene inserito all'interno di esso e centrato, successivamente si blocca il provino attraverso delle viti presenti sui lati. Il

tutto viene inserito all'interno del NAT e si inseriscono i trasduttori alle estremità, vengono calibrati attraverso l'utilizzo di un software. Una volta posizionato viene inserita la testa di carico sul castelletto. Si inseriscono vari dati all'interno del software e la prova può cominciare.



*Figura 4.5 – Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM)*

Con il programma dell'apparecchiatura si possono controllare vari fattori come ad esempio:

- il carico, il NAT ha una cella di carico di 20KN che può essere applicata al provino tramite un pistone.
- la deformazione, questo è uno dei parametri che influenza maggiormente la prova perché dalla deformazione impostata dipendono le caratteristiche meccaniche.
- il tempo di picco, anche in questo caso la resistenza meccanica è influenzata perché all'aumentare del tempo di picco aumenta la rigidità del conglomerato.
- la temperatura deve essere inferiore a 25° così da favorire l'uguaglianza del modulo elastico a trazione e a compressione.

Il risultato finale viene calcolato come media dei moduli misurati nei due diametri.



Figura 4.6 – Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM)

#### **4.2.5 Prova a trazione indiretta (ITS)**

La prova a trazione indiretta permette di valutare indirettamente la resistenza a trazione di un provino tramite lo schiacciamento lungo il piano verticale di esso e portarlo a rottura.

Il provino prima dell'esecuzione della prova è stato conservato in una camera climatica a 25° per qualche ora, in genere 3 ore sono sufficienti, perché il range di temperatura di prova è compreso fra i 5° e 25°.

L'apparecchiatura è composta da due piatti paralleli, i quali sono muniti di listelli di grandezza 15x4 mm circa, il loro compito è quello di trasferire il carico al provino. Il piatto superiore è fissato su una base, mentre quello inferiore è collegato a quello superiore tramite due linee guida che sono utili per l'esecuzione della prova.

Il provino viene posto e centrato fra i due listelli in modo da avere il suo asse orizzontale e quello dei due listelli contenuti nello stesso piano verticale.

La prova consiste nel far avanzare ad una velocità costante di  $50 \pm 2$  mm/min la base inferiore in modo da far schiacciare il provino con la parte superiore e portarlo fino a rottura. Le deformazioni verticali ed orizzontali sono misurate

tramite due comparatori e grazie ad essi si può stimare anche il carico applicato.

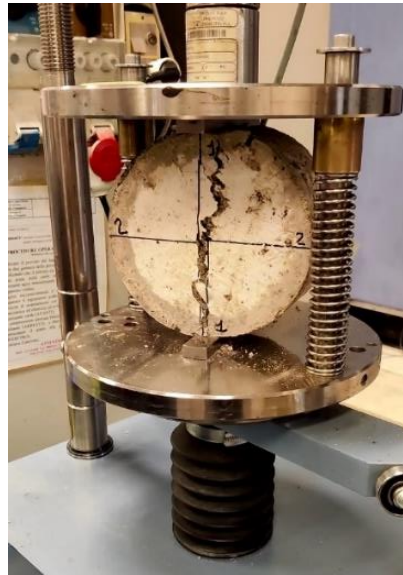


Figura 4.7 – Prova a trazione indiretta (ITS)

Attraverso un computer si può controllare la prova e ricavare infine i seguenti dati:

- carico di rottura a compressione
- deformazione a compressione
- curva carico deformazione verticale
- coefficiente di trazione indiretta ITC
- resistenza a trazione indiretta ITS

l'ITS ovvero la massima tensione di trazione applicata al provino si calcola mediante la seguente espressione:

$$ITS = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot t \cdot D}$$

In cui:

- $P_{\max}$  è il carico massimo espresso in Newton (N)
- $t$  è l'altezza del provino espressa in mm;
- $D$  è il diametro del provino in mm.

### **4.3 Preparazione dell'impasto**

La preparazione dei provini si è svolta attraverso varie fasi:

- *Preparazione degli aggregati.* La preparazione si effettua un giorno prima dell'impasto (almeno 12 ore prima), perché successivamente bisogna versare l'acqua all'interno degli aggregati ed aspettare che essa venga assorbita.

Grazie alla ricetta ed alla curva granulometrica da seguire, vengono calcolate le quantità d'impiego dei vari componenti della miscela come: fresato, sabbia, cemento, filler, emulsione bituminosa e acqua.

Questa fase si conclude come detto precedentemente attraverso il posizionamento degli aggregati all'interno di un sacchetto di plastica e si aggiunge l'acqua di assorbimento, Water (abs), stabilita nella ricetta. Il sacchetto viene sigillato tramite del nastro adesivo per evitare che l'acqua si disperda nell'ambiente tramite l'evaporazione.

- *Miscelazione.* Prima di effettuare la vera e propria miscelazione sono necessarie alcune operazioni: pesare l'emulsione bituminosa precedentemente mescolata, il cemento e l'acqua di aggiunta rimanente. Per eseguire la miscelazione viene utilizzato un macchinario chiamato miscelatore meccanico. Vengono inseriti gli aggregati nel miscelatore



*Figura 4.8 – Aggregati inseriti all'interno del miscelatore*

Successivamente viene inserito il filler:



*Figura 4.9 – Aggiunta del filler*

Viene azionato il miscelatore per 1 minuto, poi si aggiunge una parte del cemento previsto dalla ricetta, si riutilizza il miscelatore per un altro minuto e viene inserita la quantità rimanente del cemento azionando ulteriormente il miscelatore per 1 minuto.



*Figura 4.10 – Aggiunta del cemento*

Viene versata metà dell'acqua d'aggiunta e si miscela per 1 minuto, dopo il minuto si procede con una miscelazione manuale attraverso una paletta in ferro per omogeneizzare ulteriormente la miscela.



*Figura 4.11 – Aggiunta dell'acqua*

Si aggiunge l'emulsione bituminosa prevista dalla ricetta e si aziona il mescolatore per 1 minuto



*Figura 4.12 – Aggiunta dell'emulsione*



Si aggiunge l'ultima parte dell'acqua, viene effettuato un rimescolamento con la paletta e si procede con l'ultima miscelazione da 1 minuto. La miscela omogeneizzata si presenta così:



*Figura 4.12 – Miscela omogeneizzata*

Il composto viene versato in un contenitore rigido e spostato in vicinanza della pressa a taglio giratoria.



*Figura 4.13 – Miscela omogeneizzata*

- *Pressa a taglio giratoria*. La pressa a taglio giratoria è una macchina impiegata per la compattazione dei conglomerati bituminosi. Questa macchina permette di preparare campioni cilindrici con caratteristiche di addensamento e di organizzazione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelli ottenuti in sito mediante la compattazione dei rulli di cantiere. [geoconsulting, 2022 (5)]

Il macchinario è composto da: un telaio all'interno del quale è presente un supporto in cui verrà inserita la fustella, un pistone utile per caricare il provino ed infine un meccanismo rotante. Il tutto viene gestito tramite un software che può controllare vari parametri come, ad esempio, il numero di giri, il diametro della fustella e la pressione applicata. Per la composizione dei provini, come detto precedentemente, ci si avvale dell'utilizzo di una fustella.



*Figura 4.14 – Fustella*

Come prima operazione si inserisce un disco di carta all'interno di essa sopra una base indeformabile. Poi si inserisce il materiale estratto dal miscelatore meccanico in una determinata quantità stabilita dalla ricetta della miscela.



*Figura 4.15 – Inserimento del materiale nella fustella*

Successivamente viene inserito un altro disco di carta sopra il materiale versato. A questo punto il provino è pronto per essere compattato, si lubrifica il macchinario con del grasso, viene posizionata la fustella nell'apposito sostegno e il processo può iniziare.



*Figura 4.15 – Pressa a taglio girevole*

Infine, quando la compattazione è finita si procede con l'estrazione del provino, viene spostata la fustella nei tre supporti presenti anteriormente al macchinario e con un sollevatore idraulico viene estratto il provino dalla fustella.



Figura 4.15 – Espulsione del provino

I dati ottenuti dalla prova sono svariati: viene calcolata l'altezza del provino ad ogni giro della pressa da cui si ricavano le curve di compattazione.

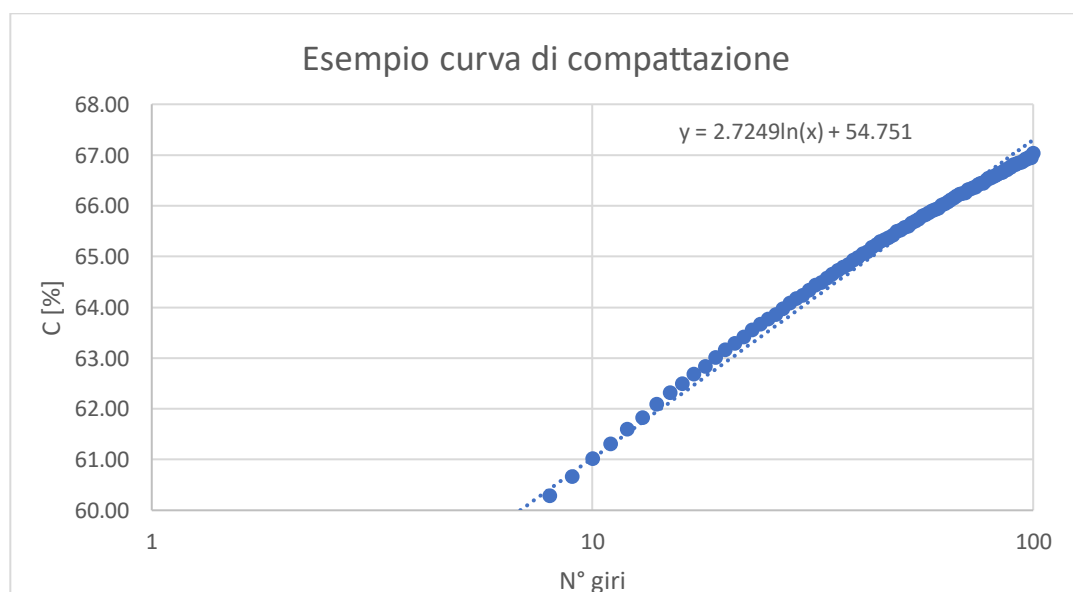


Figura 4.16 – Esempio curva di compattazione

I provini vengono pesati e successivamente vengono messi all'interno di un forno a 40° per effettuare la stagionatura.



Figura 4.17 – Posizionamento provini nel forno

In seguito, verranno descritte le varie miscele realizzate durante la sperimentazione.

### MISCELA 1:

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]
RA1	<b>Fresato 1</b>	5742
RA2	<b>Fresato 2</b>	6003
VA1	<b>Fresato 3</b>	4429
VA2	-	0
VA3	-	0
VA4	-	0
Filler	<b>industriale</b>	1225
Water (abs)		276,8
Cement	<b>C1-ref</b>	348
Emulsion		696
Water di aggiunta		358
TOTAL		19078
total for each specimen		2847,5

Figura 4.18 – Ricetta Miscela 1

Campione:	Fresato
d [mm]	% passante
31,5	100,0
20	100,0
16	71,1
10	62,3
8	54,8
4	36,9
2	24,8
1	16,7
0,5	12,1
0,25	9,8
0,125	7,8
0,063	6,4
FONDO	0,0

Tabella 4.4 – Analisi granulometrica Miscela 1

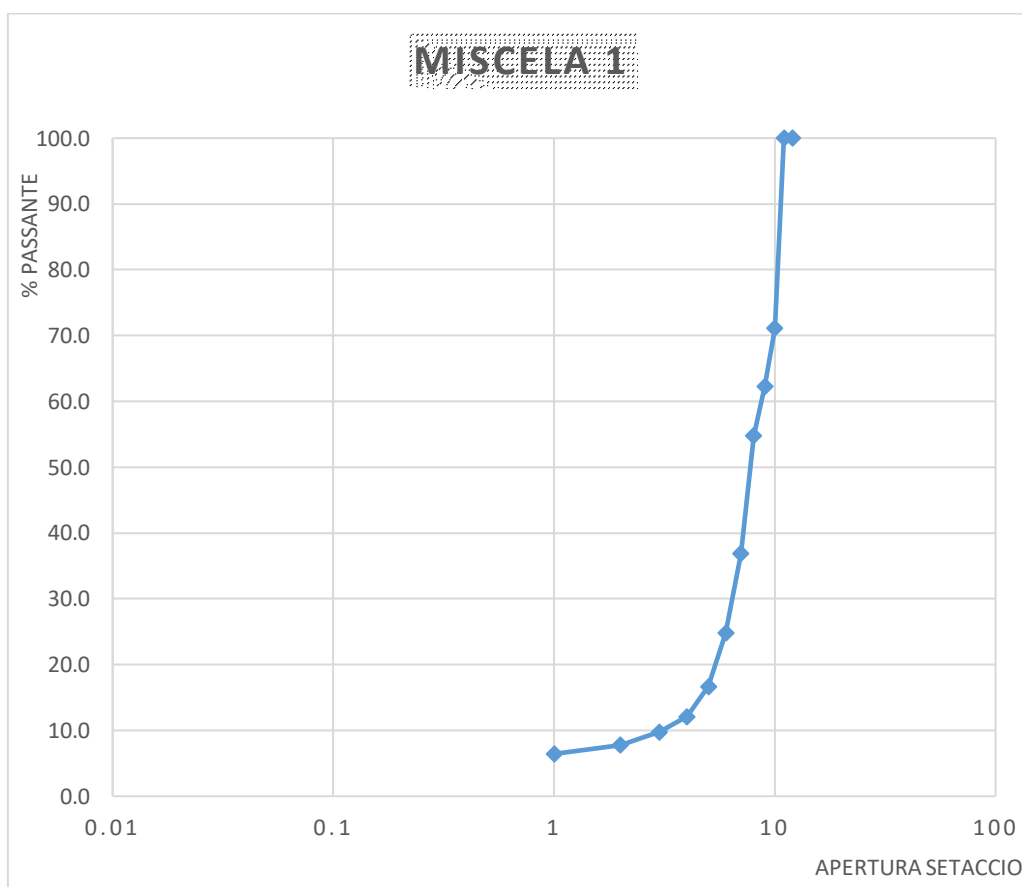


Figura 4.19 – Curva granulometrica della Miscela 1

## MISCELA 2:

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]
RA1	<b>Fresato 1</b>	5742
RA2	<b>Fresato 2</b>	6003
VA1	<b>Fresato 3</b>	4429
VA2	-	0
VA3	-	0
VA4	-	0
Filler	<b>industriale</b>	1225
Water (abs)		276,8
Cement	<b>C1-ref</b>	348
Emulsion		696
Water di aggiunta		358
TOTAL		19078
total for each specimen		2847,5

Figura 4.20 – Ricetta Miscela 2

Campione:	Fresato
d [mm]	% passante
31,5	100,0
20	100,0
16	71,1
10	62,3
8	54,8
4	36,9
2	24,8
1	16,7
0,5	12,1
0,25	9,8
0,125	7,8
0,063	6,4
FONDO	0,0

Tabella 4.5 – Analisi granulometrica Miscela 2

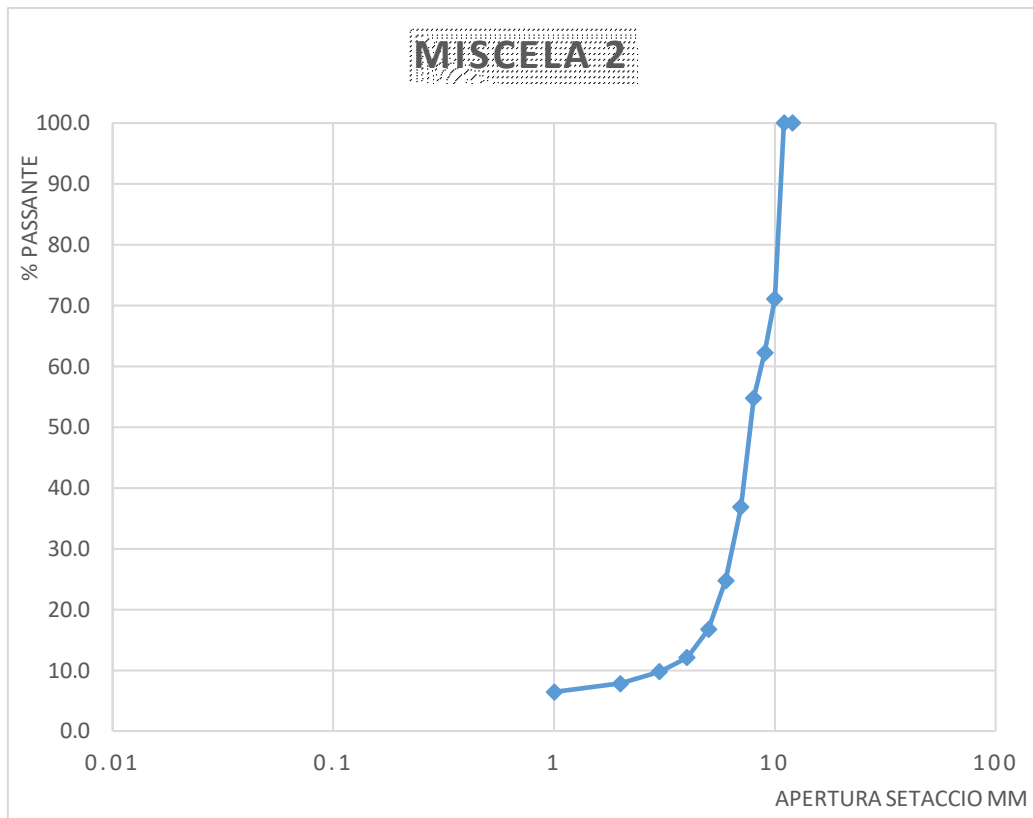


Figura 4.21 – Curva granulometrica della Miscela 2

### MISCELA 3:

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]
RA1	<b>Fresato 1</b>	11162
RA2	<b>Fresato 2</b>	6693
VA1	<b>Fresato 3</b>	2233
VA2	-	0
VA3	-	1563
VA4	-	0
Filler	<b>industriale</b>	684
Water (abs)		347,8
Cement	<b>C1-ref</b>	447
Emulsion		893
Water di aggiunta		412
TOTAL		24434
total for each specimen		2841,2

Figura 4.22 – Ricetta Miscela 3



Campione:	Fresato
d [mm]	% passante
31,5	100,0
20	100,0
16	86,2
10	75,5
8	66,6
4	44,3
2	28,7
1	18,0
0,5	11,6
0,25	8,3
0,125	5,9
0,063	4,9
FONDO	0,0

Tabella 4.6 – Analisi granulometrica Miscela 3

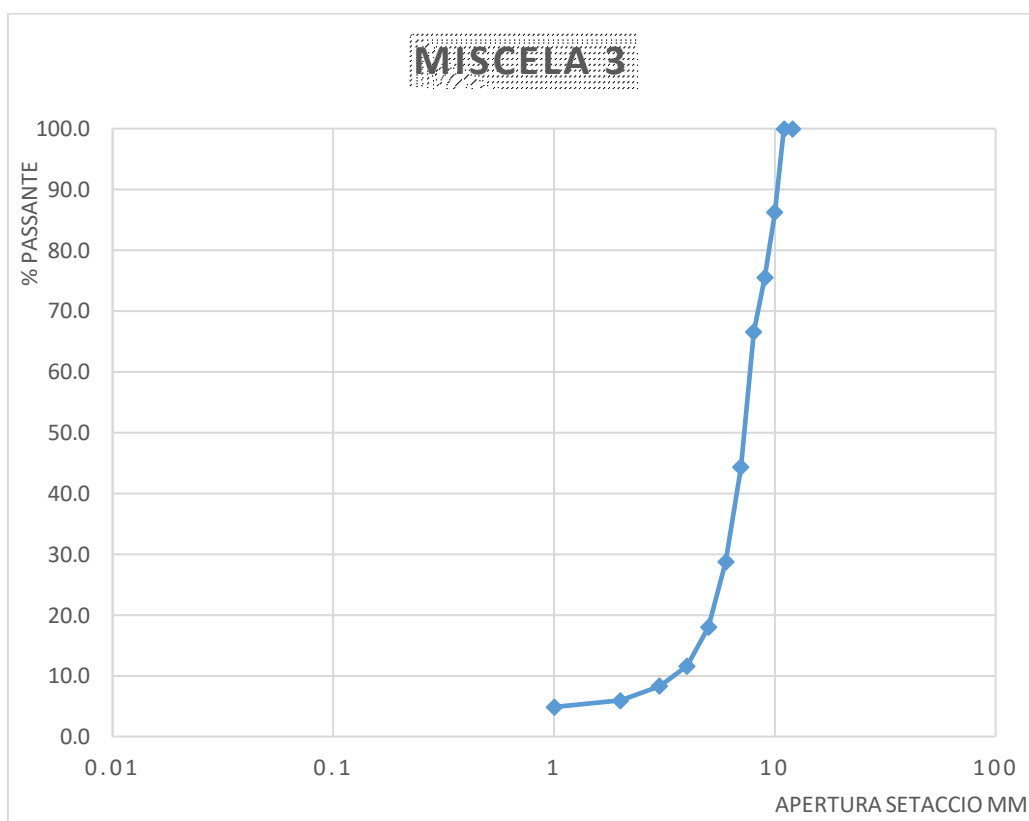


Figura 4.23 – Curva granulometrica della Miscela 3

## MISCELA 4:

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]
RA1	<b>Fresato 1</b>	11145
RA2	<b>Fresato 2</b>	7817
VA1	<b>Fresato 3</b>	2233
VA2	-	0
VA3	-	0
VA4	-	0
Filler	<b>industriale</b>	1140
Water (abs)		344,7
Cement	<b>C1-ref</b>	447
Emulsion		893
Water di aggiunta		415
TOTAL		24434
total for each specimen		2841,2

Figura 4.24 – Ricetta Miscela 4

Campione:	Fresato
d [mm]	% passante
31,5	100,0
20	100,0
16	86,6
10	76,7
8	68,4
4	47,1
2	30,0
1	18,6
0,5	11,4
0,25	7,9
0,125	5,5
0,063	4,3
FONDO	0,0

Tabella 4.7 – Analisi granulometrica Miscela 4

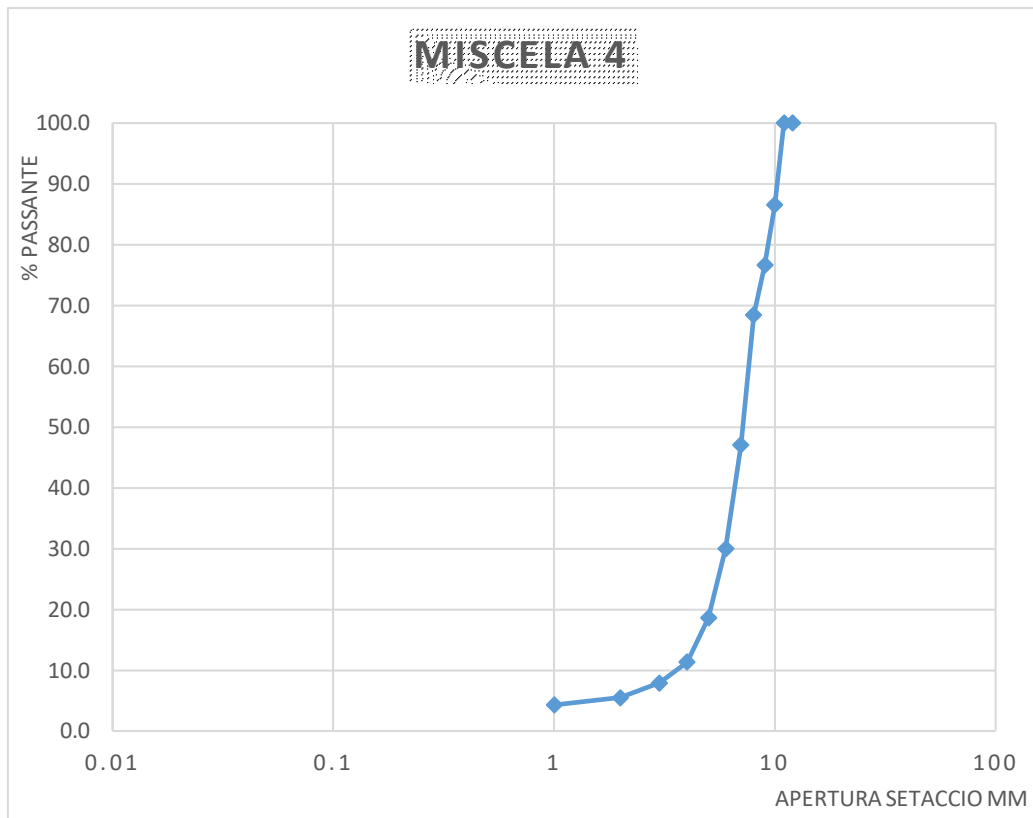


Figura 4.25 – Curva granulometrica della Miscela 4

#### 4.4 Nomenclatura dei provini

I provini sono stati classificati tramite delle lettere e dei numeri:

- Le lettere vanno da A a D e rappresentano gli impasti effettuati
- I numeri da 1 a 8 stanno a indicare il numero di provini realizzati durante ogni impasto

impasto	numero provini prodotti	impasto	numero provini prodotti
A	A_1	C	C_1
	A_2		C_2
	A_3		C_3
	A_4		C_4
	A_5		C_5
	A_6		C_6
	C_7		
	C_8		
B	B_1	D	D_1
	B_2		D_2
	B_3		D_3
	B_4		D_4
	B_5		D_5
	B_6		D_6
	B_7		D_7
	B_8		D_8

Tabella 4.8 – Nomenclatura provini

## Capitolo 5 – Analisi dei risultati

Nelle pagine successive verranno mostrati i risultati delle prove effettuate sulle quattro miscele durante il periodo di sperimentazione.

Come descritto nei capitoli precedenti si è fatto uno studio per determinare la miscela ottimale per poi valutare il suo comportamento meccanico al variare del tempo.

I risultati sono relativi alle seguenti prove/parametri:

- Curva di compattazione
- Perdita d'acqua
- Vuoti
- ITSM (solo per la miscela ottimale e al variare del grado di maturazione)
- ITS (solo a 3 gg, tranne che per la miscela ottimale, dove il valore è stato valutato al variare della maturazione)

### 5.1 Miscela 1

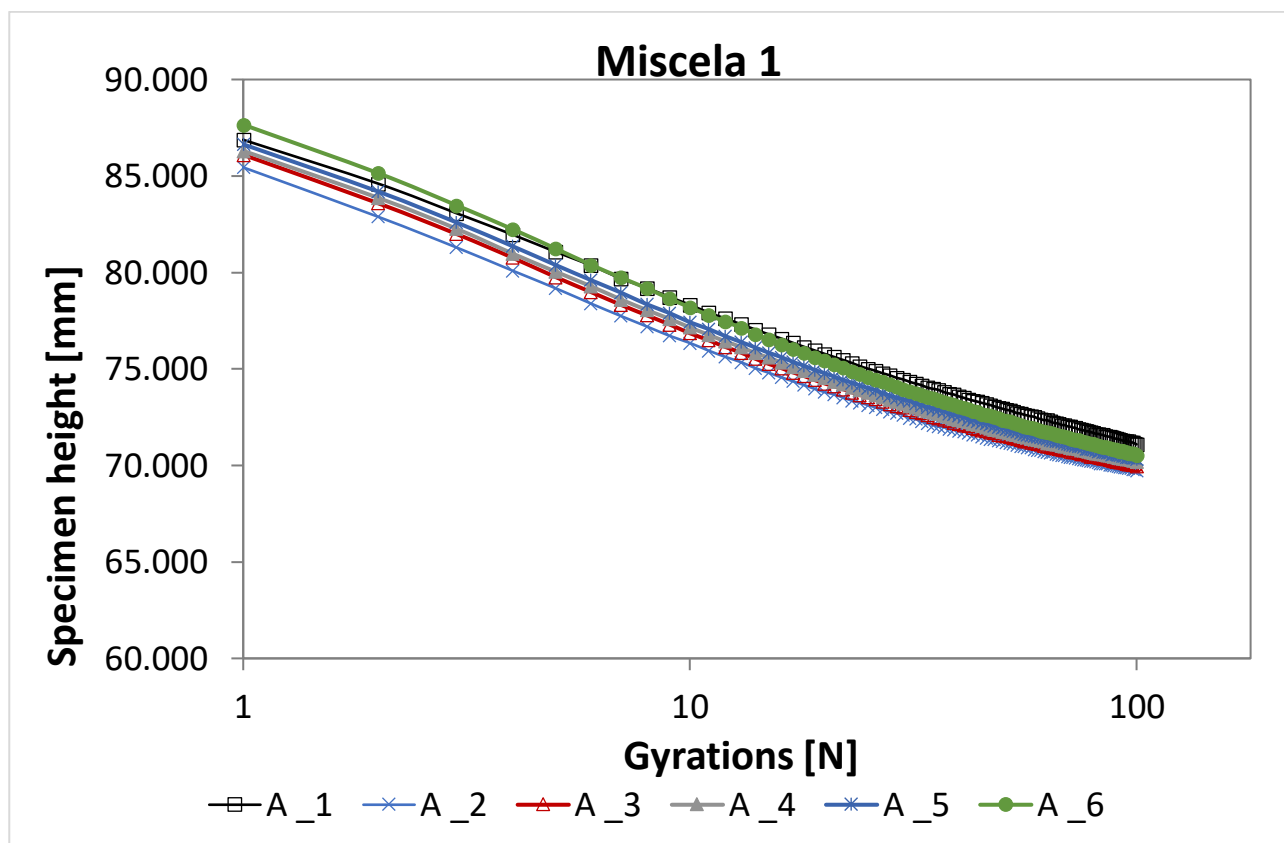


Figura 5.1 – Curva di compattazione Miscela 1

	C <sub>1</sub> [mm]	k [l]
1	53,801	2,6666
2	55,334	2,6519
3	54,751	2,7249
4	54,545	2,727
5	54,24	2,7643
6	53,381	2,8935
media	54,342	2,738

Tabella 5.1 – Coefficienti di lavorabilità e compattabilità Miscela 1

La curva di compattazione si ottiene attraverso dei valori derivati durante la compattazione del provino con la pressa a taglio giratoria, per ogni giro della pressa si calcola l'altezza del provino.

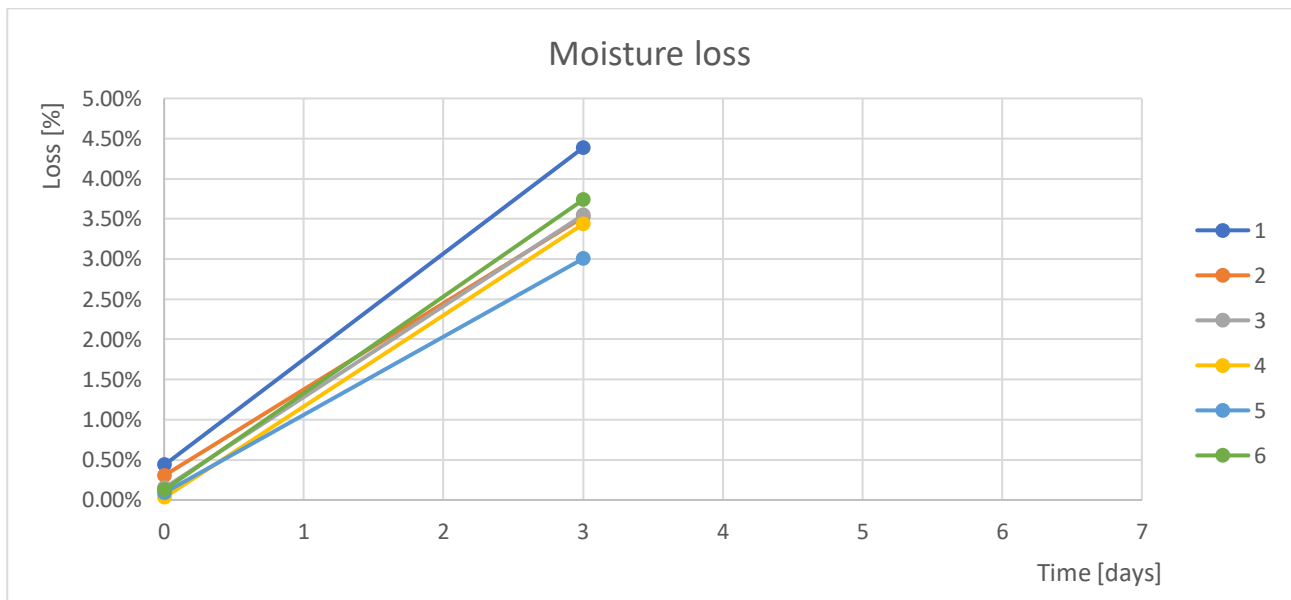


Figura 5.2 – Perdita d'acqua della Miscela 1

nomenclatura	Vuoti no water		
	m3gg (no water) [g]	pb,geom [g/cm3]	Vm,geom (3 gg) [%]
A_1	2697,9	2,1058	15,0
A_2	2704,7	2,1067	15,0
A_3	2714,0	2,1067	15,0
A_4	2719,9	2,1132	14,7
A_5	2712,7	2,1115	14,8
A_6	2704,9	2,1013	15,2
		media	14,9

Tabella 5.2 – Vuoti Miscela 1

Provini	ROTTURE		
	Rottura dopo 3 gg		
	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]
A_1	0,01922	5,91185	0,346
A_2		6,071	0,355
A_3	0,017339	4,82979	0,281
A_4		6,618	0,380
A_5	0,017509	4,90578	0,286
A_6		6,313	0,370
		media	0,336

Tabella 5.3 – Risultati ITS Miscela 1

## 5.2 Miscela 2

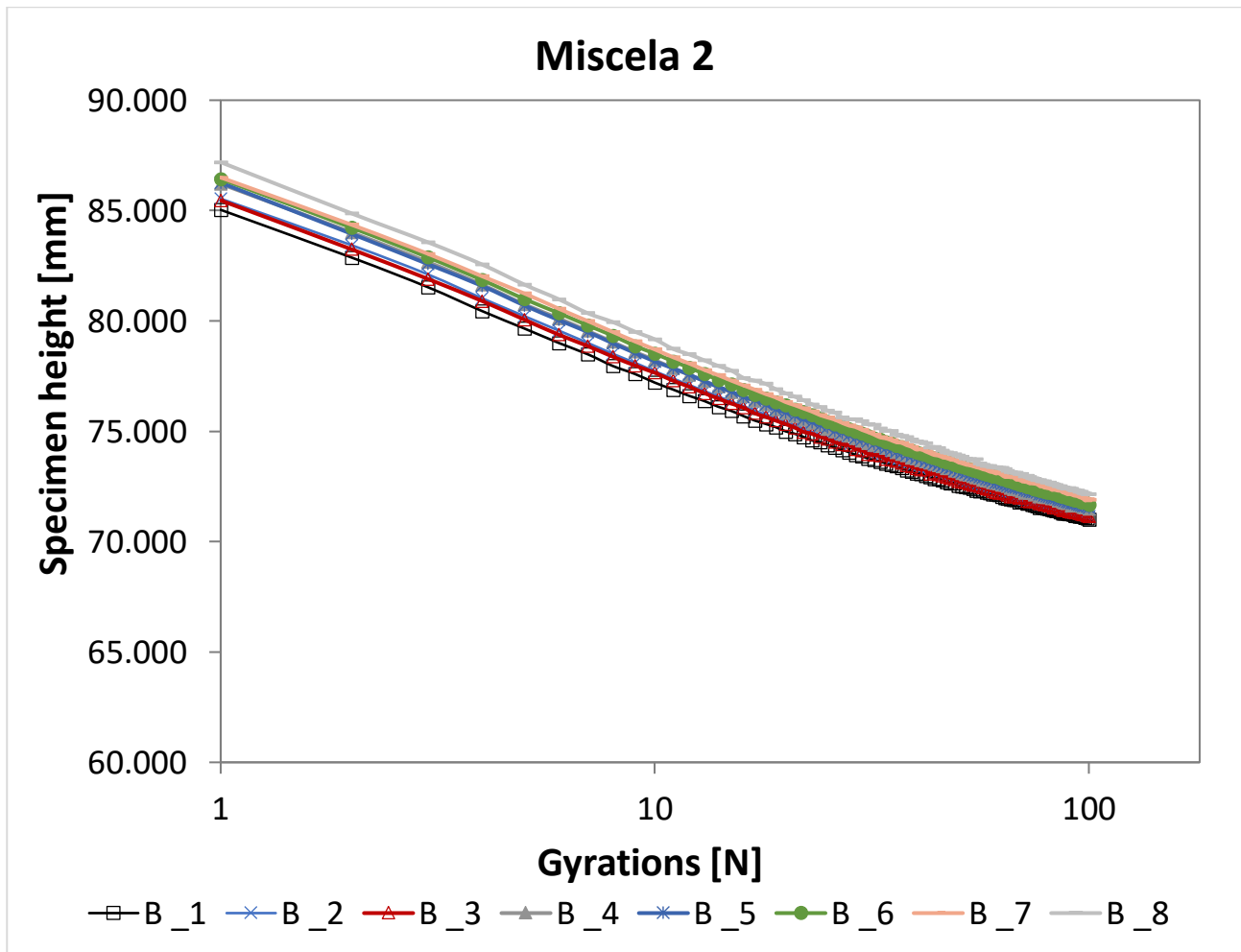


Figura 5.3 – Curva di compattazione Miscela 2

	C <sub>1</sub> [mm]	k [l]
1	61,79	2,65
2	61,168	2,7535
3	61,338	2,7172
4	60,675	2,7864
5	60,754	2,7541
6	60,438	2,7803
7	60,338	2,7607
8	59,872	2,8081
media	60,797	2,751

Tabella 5.4 – Coefficienti di lavorabilità e compattabilità Miscela 2

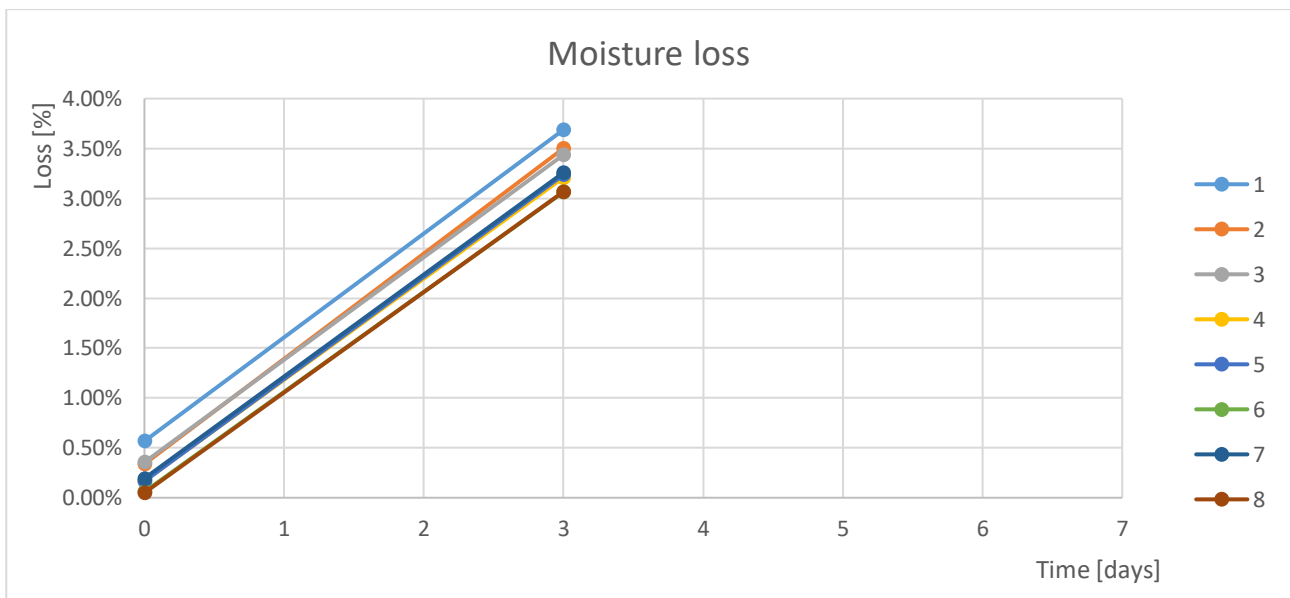


Figura 5.4 – Perdita d'acqua della Miscela 2

provini	Vuoti no water		
	m3gg (no water) [g]	pb,geom [g/cm3]	Vm,geom (3 gg) [%]
A_1	2704,6	2,1420	13,2
A_2	2708,9	2,1417	13,2
A_3	2710,5	2,1482	12,9
A_4	2710,0	2,1411	13,2
A_5	2713,1	2,1450	13,1
A_6	2723,9	2,1438	13,1
A_7	2719,0	2,1400	13,3
A_8	2723,3	2,1307	13,6
		media	13,1

Tabella 5.5 – Vuoti Miscela 2



ROTTURE			
provini	Rottura dopo 3 gg		
	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]
A_1	0,01485	7,3739	0,438
A_2	1,2540	7,283	0,432
A_3	0,02711	7,05471	0,419
A_4	1,093	7,11	0,421
A_5	0,01582	6,67173	0,395
A_6	1,107	7,414	0,438
A_7	0,01616	6,27052	0,37
A_8	1,1210	7,543	0,443
		media	0,4195

Tabella 5.6 – Risultati ITS Miscela 2

NOTA: i valori in rosso riguardano i risultati delle prove di resistenza a trazione indiretta (ITS) determinati in un altro laboratorio sito nel comune di Ancona.

### 5.3 Miscela 3

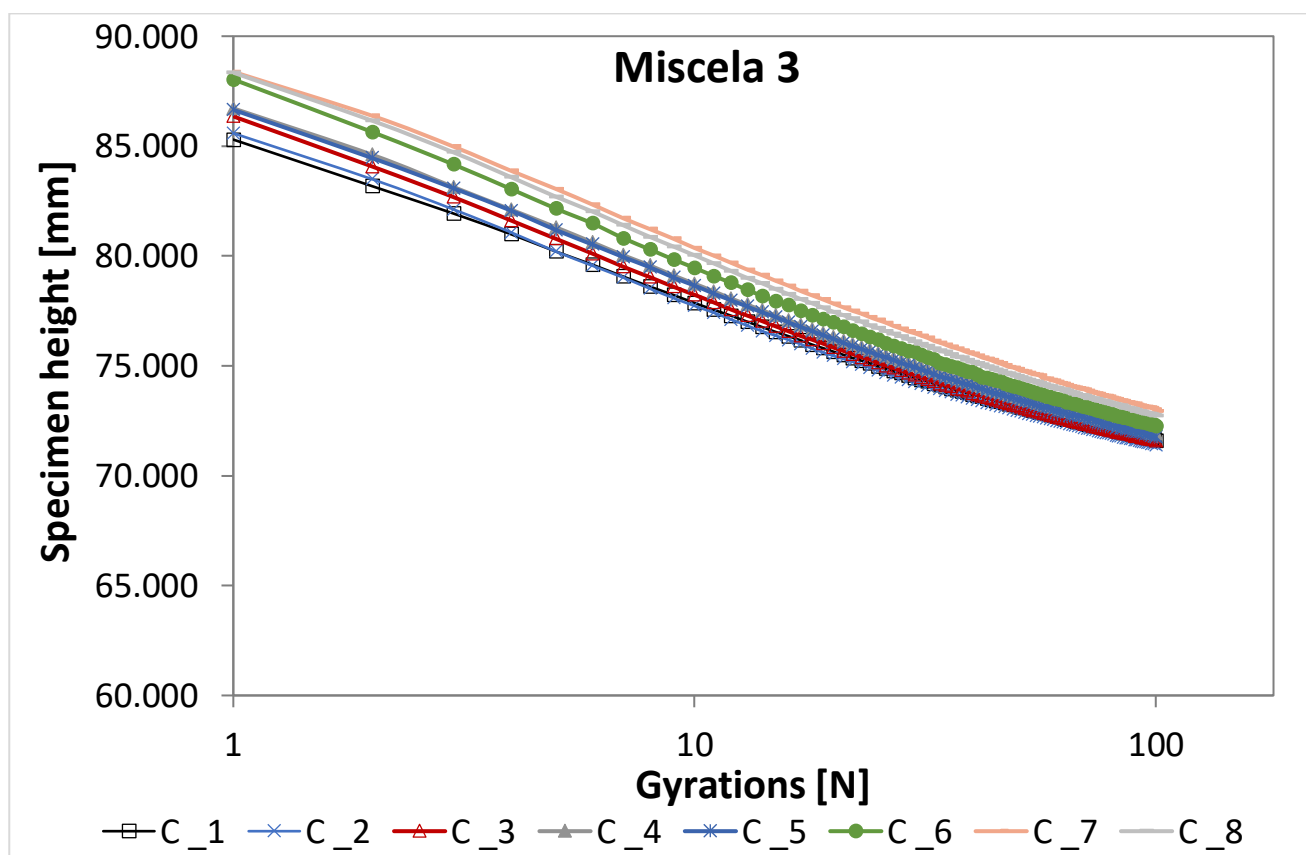


Figura 5.5 – Curva di compattazione Miscela 3

	C <sub>1</sub> [mm]	k [ $\bar{l}$ ]
1	66,258	2,8072
2	66,16	2,882
3	65,511	2,9854
4	65,036	2,9988
5	65,064	3,024
6	64,076	3,1267
7	63,381	3,0953
8	63,649	3,1061
media	64,892	3,003

Tabella 5.7 – Coefficienti di lavorabilità e compattabilità Miscela 3



Figura 5.6 – Perdita d'acqua della Miscela 3

nomenclatura	Vuoti no water		
	m3gg (no water) [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	V <sub>m,geom</sub> (3 gg) [%]
C_1	2718,0	2,1422	12,8
C_2	2711,6	2,1476	12,6
C_3	2713,1	2,1383	13,0
C_4	2713,6	2,1276	13,4
C_5	2713,2	2,1376	13,0
C_6	2713,5	2,1179	13,8
C_7	2711,3	2,1011	14,5
C_8	2718,2	2,1151	13,9
		media	13,4

Tabella 5.8 – Vuoti Miscela 3

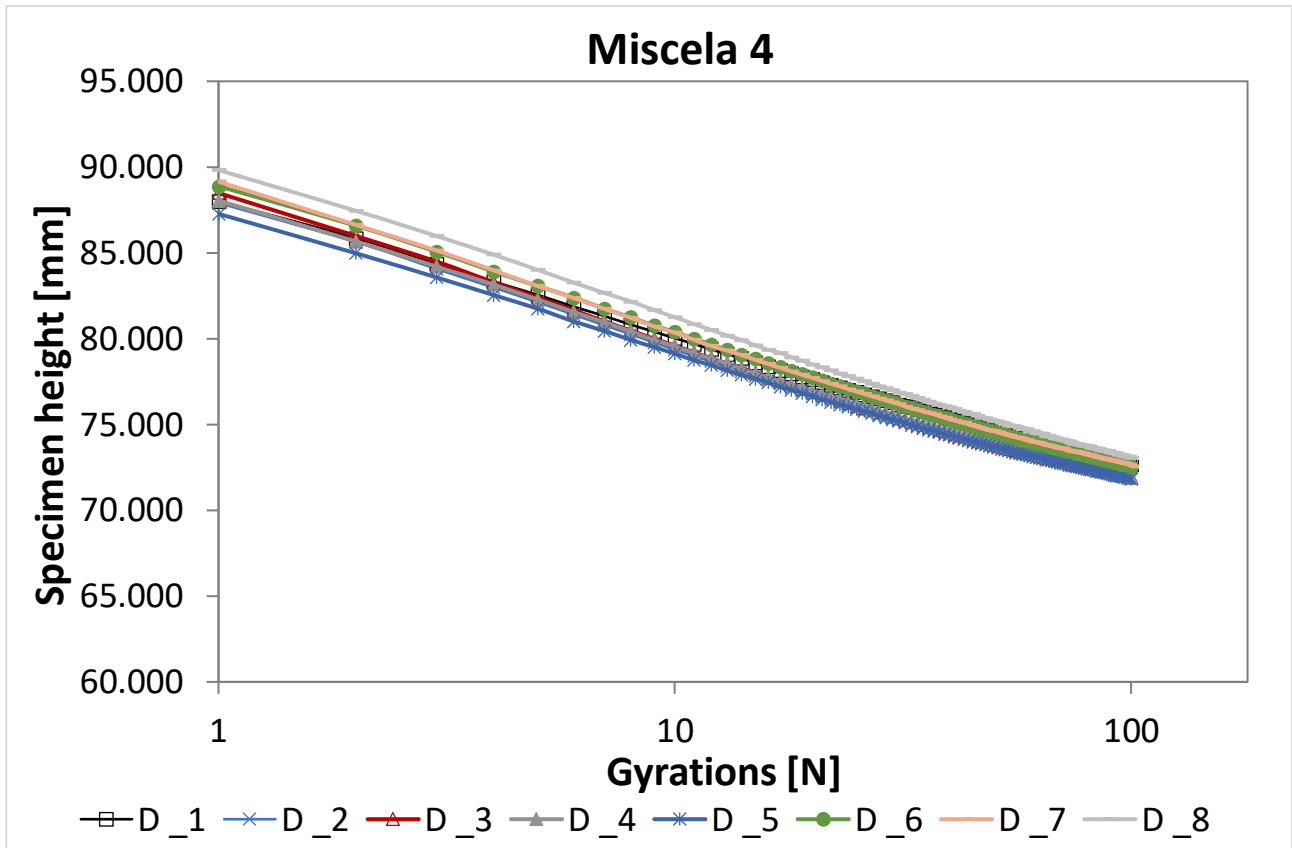
	ROTTURE		
provini	Rottura dopo 3 gg		
	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]
C_1	1,118000	8,4110	0,499
C_2	0,013675	7,7416	0,460
C_3	1,179000	8,7670	0,518
C_4	0,011991	7,9119	0,465
C_5	1,126000	8,7280	0,516
C_6	0,013960	6,9605	0,407
C_7	1,133000	8,9370	0,520
C_8	0,025533	7,2158	0,421
		media	0,476

Tabella 5.9 – Risultati ITS Miscela 3

NOTA: i valori in rosso riguardano i risultati delle prove di resistenza a trazione indiretta (ITS) determinati in un altro laboratorio sito nel comune di Ancona.

## 5.4 Miscela 4

Questa miscela è risultata la migliore nella prova a trazione indiretta rispetto alle altre effettuate precedentemente, per questo si è studiato il suo comportamento al variare del tempo e quindi della maturazione; sono state effettuate prove a trazione indiretta a 3, 7, 30 giorni e prove di modulo a 3, 7, 14, 30 giorni così da poter analizzare l'aumento di prestazione del provino.



*Figura 5.7 – Curva di compattazione Miscela 4*

	C <sub>1</sub> [mm]	k [/]
1	60,744	2,9206
2	60,928	3,092
3	60,624	3,1437
4	60,767	3,104
5	61,364	2,9964
6	60,074	3,1068
7	60,093	3,0978
8	59,252	3,1642
media	60,481	3,078

*Tabella 5.10 – Coefficienti di lavorabilità e compattabilità Miscela 4*

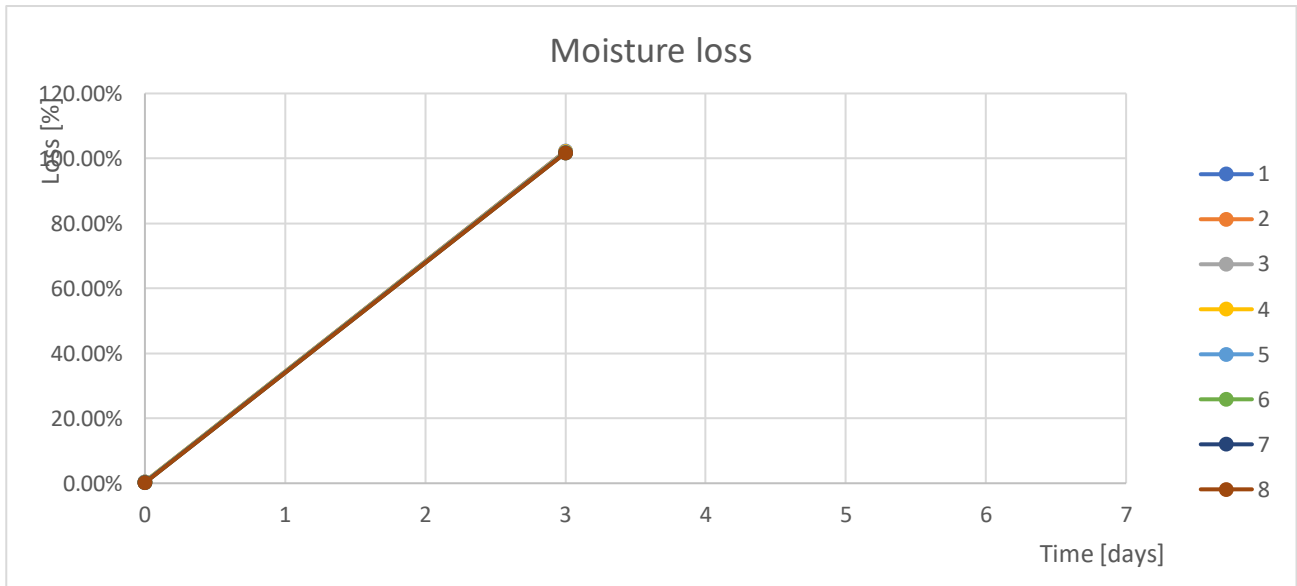


Figura 5.8 – Perdita d'acqua della Miscela 4

nomenclatura	Vuoti no water		
	m3gg (no water) [g]	pb,geom [g/cm3]	Vm,geom (3 gg) [%]
D_1	2701,4	2,0912	13,5
D_2	2712,8	2,1321	11,8
D_3	2709,1	2,1219	12,2
D_4	2722,0	2,1312	11,8
D_5	2708,1	2,1240	12,1
D_6	2729,2	2,1214	12,2
D_7	2713,7	2,1065	12,8
D_8	2723,7	2,1113	12,6
		media	12,4

Tabella 5.11 – Vuoti Miscela 4

pro vini	MODULI DI RIGIDEZZA											
	3 gg			7 gg			14 gg			30 gg		
	ITSM1 [MPa]	ITSM1 [MPa]	ITSM [MPa]	ITSM1 [MPa]	ITSM1 [MPa]	ITSM [MPa]	ITSM1 [MPa]	ITSM1 [MPa]	ITSM [MPa]	ITSM1 [MPa]	ITSM1 [MPa]	ITSM [MPa]
D_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D_2	3816	3647	3732	4082	3990	4036	-	-	-	-	-	-
D_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D_4	3737	3735	3736	4299	4272	4286	5150	5001	5076	5818	5907	5863
D_5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D_6	3788	3636	3712	4307	4186	4247	5326	5086	5206	5977	5984	5981
D_7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D_8	3900	3561	3731	4258	4183	4221	-	-	-	-	-	-
		media	3728		media	4197		media	5141		media	5922

Tabella 5.12 – Moduli di rigidità

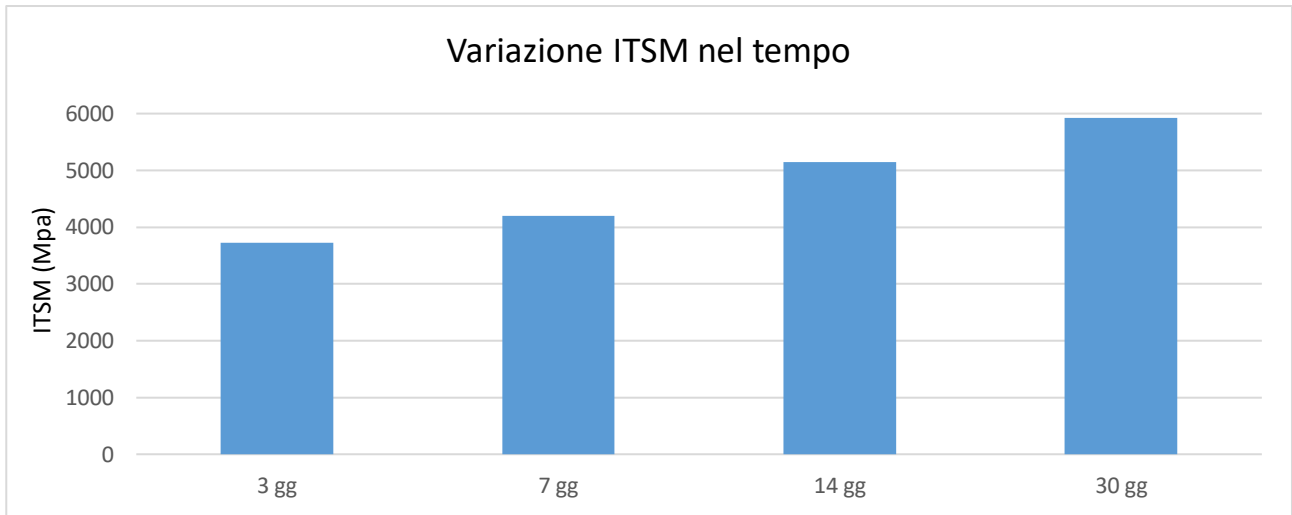


Figura 5.9 – Variazione ITSM nel tempo

provini	ROTTURE								
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 7 gg			Rottura dopo 30 gg		
	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]
D_1	0,042836	8,9514	0,520	-	-	-	-	-	-
D_2	-	-	-	0,03825	10,5289	0,621	-	-	-
D_3	0,038834	9,2006	0,540	-	-	-	-	-	-
D_4	-	-	-	-	-	-	0,03992	10,9224	0,641
D_5	0,03477	8,3131	0,489	-	-	-	-	-	-
D_6	-	-	-	-	-	-	0,03245	9,8207	0,573
D_7	0,040385	7,9331	0,462	-	-	-	-	-	-
D_8	-	-	-	0,01497	8,7751	0,510	-	-	-
		media	0,503		media	0,566		media	0,607

Tabella 5.13 – Rotture dopo 3,7,30 giorni

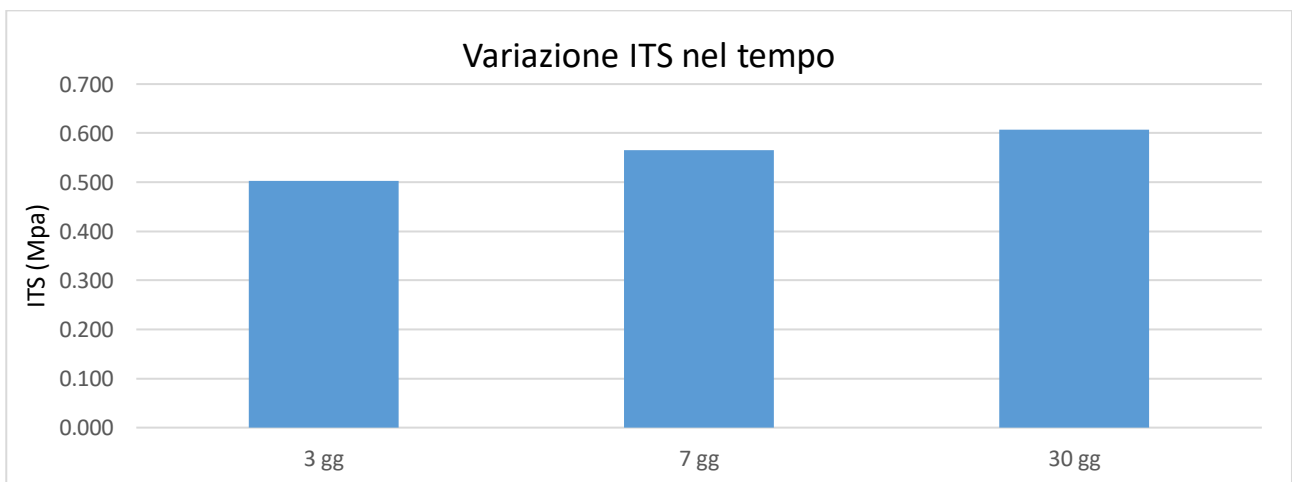


Figura 5.10 – Variazione ITS nel tempo

## 5.5 Confronto delle miscele

Nella pagina seguente verranno messe a confronto le varie miscele realizzate nell'arco della sperimentazione. Dai risultati delle curve di compattazione e dai parametri di compattabilità si evince come le miscele 3 e 4 siano quelle che hanno avuto la migliore compattazione (valori di "k" più alti). Per quanto riguarda i vuoti, le miscele 2,3 e 4 hanno valori confrontabili, mentre la resistenza a trazione indiretta è superiore nelle miscele 3 e 4, seguita dalla 2 ed infine dalla 1.

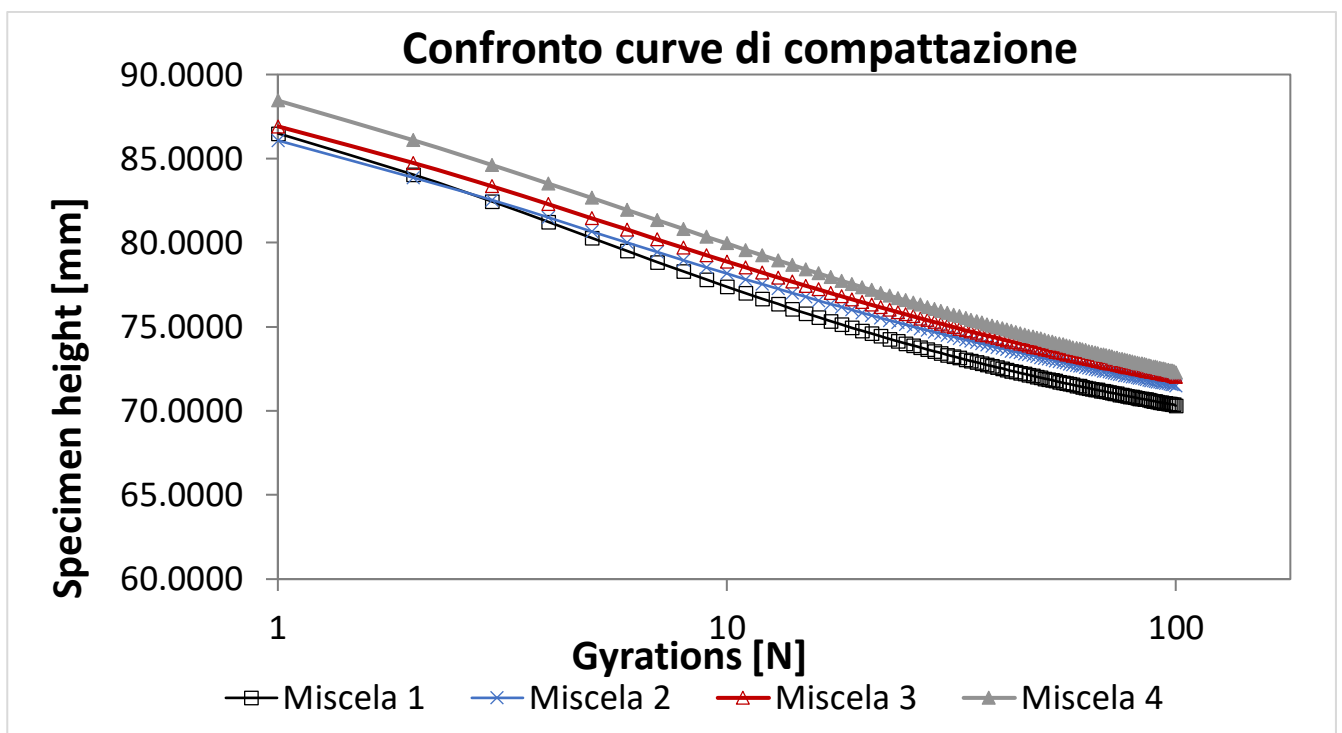


Figura 5.11 – Confronto fra le medie delle curve di compattazione

	C <sub>1</sub> [mm]	k [/]
Miscela 1	54,342	2,738
Miscela 2	60,797	2,751
Miscela 3	64,892	3,003
Miscela 4	60,481	3,078

Tabella 5.14 – Coefficienti di lavorabilità e compattabilità delle quattro miscele



Figura 5.12 – Confronto fra le medie delle miscele delle perdite d'acqua

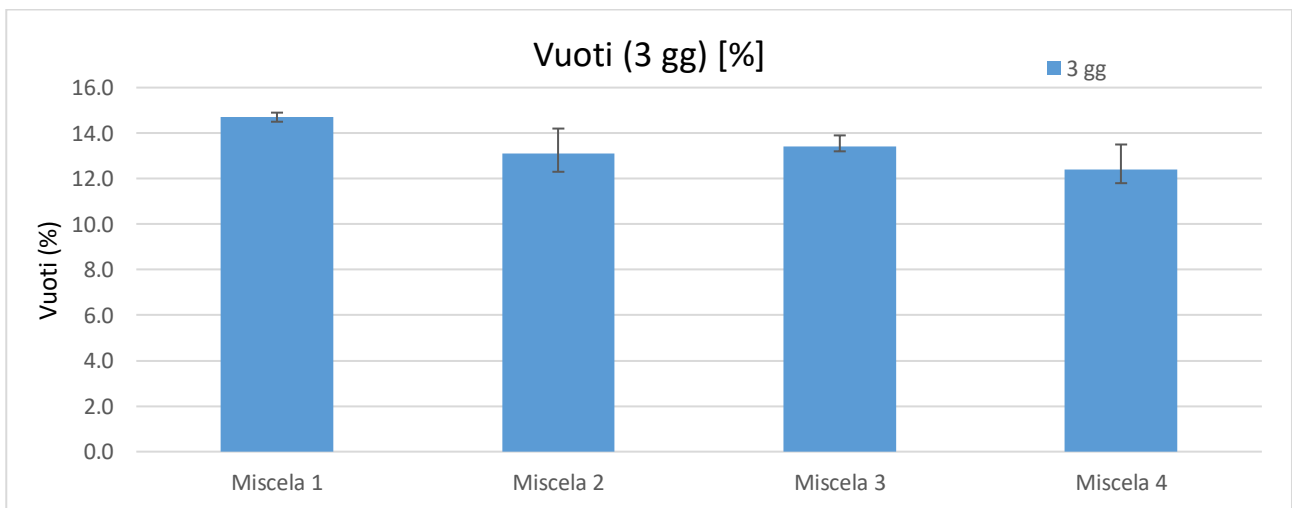


Figura 5.13 – Confronto fra i vuoti a 3 giorni delle quattro miscele



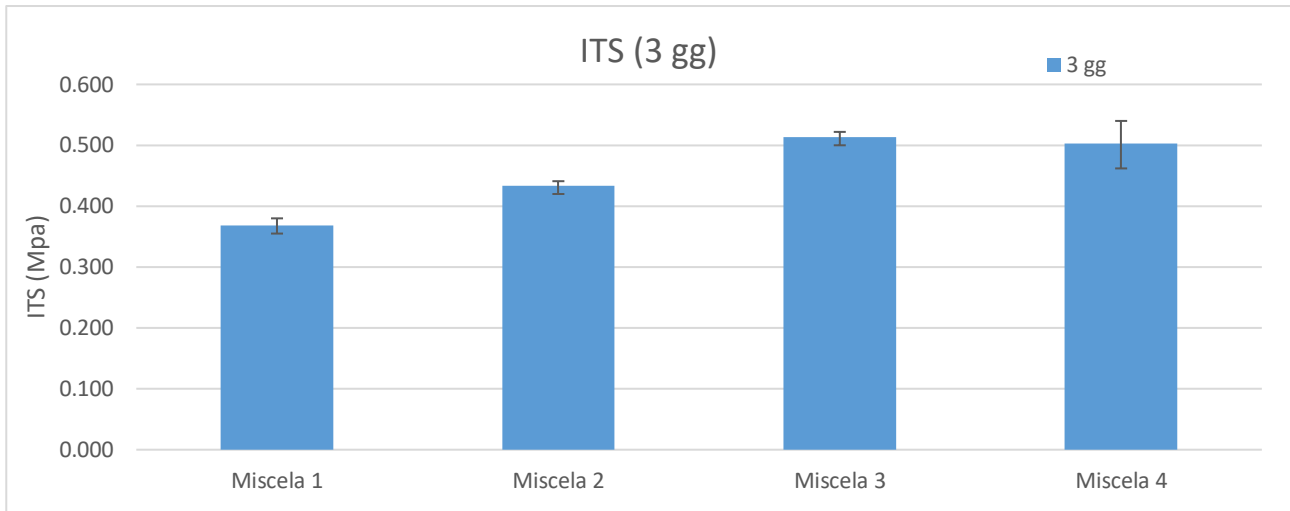


Figura 5.14 – Confronto fra gli ITS a 3 giorni delle quattro miscele

## Capitolo 6 – Conclusioni

La sperimentazione effettuata in questa tesi ha avuto il fine di determinare il giusto mix design al fine di ottenere una miscela di conglomerato riciclato a freddo (per strati di base) con un comportamento meccanico ottimale, rispondente ai requisiti di capitolato.

Sono stati effettuati quattro impasti con caratteristiche e materiali diversi, andando a variare la curva granulometrica, il tipo di filler e la presenza o no di sabbia.

Sulla miscela ottimale sono state poi realizzate le seguenti prove:

- Modulo di rigidezza a trazione indiretta ITSM dopo 3, 7, 14, 30 giorni
- Resistenza a rottura per trazione indiretta ITS dopo 3, 7, 14, 30 giorni

Dall'analisi dei risultati possiamo evincere che:

- Confrontando le 4 diverse miscele si evince come l'ottimizzazione della curva granulometrica comporta un miglioramento della compattazione del materiale, così come avvenuto nelle miscele 3 e 4;
- Dall'analisi della perdita d'acqua al variare del tempo di maturazione si vede che la maggior parte dell'acqua contenuta nell'impasto evapora/reagisce con il cemento nei primi 3 giorni, e nei successivi la perdita tende a diminuire fino ad un asintoto orizzontale;

- La miscela 1 è quella con il valore dei vuoti più basso, mentre le altre tre hanno valori confrontabili; questo potrebbe portare a dire che i valori di ITS dei tre impasti vengano simili, ma cioè non avviene. Questo potrebbe essere dovuto ad un diverso assortimento granulometrico delle diverse miscele, il quale, seppur con un tenore dei vuoti simili, comporta una maggiore resistenza ultima delle miscele 3 e 4;
- Tra le due miscele migliori (3 e 4), la miscela 3 è quella con i valori di ITS più alti. Questo è probabilmente dovuto alla presenza di filler di recupero, a differenza della miscela 4 dove sono presenti il filler industriale e la sabbia, il quale ha una distribuzione granulometrica più assortita al passante 0,063 mm e quindi riesce a dare maggiori prestazioni al mastice (filler+bitume+cemento) che si crea all'interno del materiale. Nonostante questa migliore prestazione, l'utilizzo del filler di recupero nella pratica usuale di cantiere è poco frequente, e per questo è stata presa la miscela 4 come ottimale e si è studiata essa al variare della maturazione.

In conclusione, al fine di determinare una miscela che soddisfi i requisiti di capitolato (specialmente dei valori di ITS a 3 giorni) è fondamentale scegliere la corretta curva granulometrica. Dai risultati di questa tesi, esso è probabilmente il parametro che più di ogni altro ha influenzato le proprietà delle miscele. Poi, a parità di curva granulometrica, le prestazioni possono essere migliorate andando ad aggiungere filler di recupero piuttosto che filler industriale.

## Capitolo 7 – Bibliografia e sitografia

[1] Nicem – Filler per asfalto, 2022.

[2] Monte Bianco s.r.l - Filler uso industriale e per SCC, 2016

[3] Felice Santagata- Strade teoria e tecnica delle costruzioni stradali, cap. 10 Costruzione della sovrastruttura stradale. 2019

[4] Felice Santagata- Strade teoria e tecnica delle costruzioni stradali, cap. 11 Materiali di riciclo nelle costruzioni stradali

### Sitografia

[S1] [https://it.wikipedia.org/wiki/Pavimentazione\\_stradale](https://it.wikipedia.org/wiki/Pavimentazione_stradale)

[S2] <https://futuraconglomerati.it/la-pavimentazione-stradale/>

[S4] <https://www.wirtgen-group.com/it-it/applicazioni/costruzione-stradale/costruzione-di-nuove-strade/costruzione-di-strati-di-base/>

[S5] <https://www.stradeeautostrade.it/pavimentazioni-e-manti/il-trattamento-di-depolverizzazione-per-strade-rurali/>

[S6] <https://www.tuttoambiente.it/commenti-premium/fresato-dasfalto-rifiuto-o-non-rifiuto/>

[S7] <https://eu.camsrecycling.com/riciclo-asfalto/fresato-dasfalto-i-benefici-del-riciclo-e-il-processo-di-recupero/>

[S8] <https://www.nicemsrl.it/filler-per-asfalto.php#:~:text=Il%20filler%20per%20asfalto%20e,pavimentazioni%20di%20strade%20ed%20aeroporti.>

[S9] <https://geoconsultingitalia.com/presa-a-taglio-giratoria/>

# Ringraziamenti

Vorrei ringraziare inizialmente il Prof. Ing. Maurizio Bocci per avermi dato l'opportunità di svolgere la sperimentazione presso il laboratorio di strade dell'Università politecnica delle Marche.

Successivamente vorrei ringraziare l'Ing Carlo Carpani e l'Ing. Emiliano Prospero che mi hanno aiutato e sostenuto, con grande disponibilità e dedizione, dalla fase di sperimentazione fino alla stesura di questa tesi.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori che mi hanno supportato durante questi tre anni aiutandomi soprattutto nei momenti di difficoltà a superare tutti gli ostacoli.

Non da meno è il ringraziamento che va a mia zia Paola e a mia nonna Luciana che con il loro grande affetto mi hanno dato sempre una grande motivazione che mi ha aiutato a raggiungere questo traguardo.

Infine, ringrazio tutti i miei compagni di corso ma soprattutto Thomas, Valerio e Maurizio con i quali ho condiviso la maggior parte del tempo e delle esperienze, abbiamo passato dei momenti belli e brutti insieme ma non è mai mancato l'aiuto e il sostegno reciproco, se ho raggiunto questo traguardo in gran parte è anche merito loro.