



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA  
(DICEA)

*CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA CIVILE-  
AMBIENTALE*

***“Influenza della temperatura sulla resistenza di  
conglomerati bituminosi riciclati a freddo per strati di  
base”***

***“Influence of temperature on the strength of cold  
recycled asphalt bases”***

*Relatore:*  
**Prof. Ing. Andrea Graziani**

*Tesi di laurea di:*  
**Nicola Zorretti**

*A.A. 2020/2021*



## SOMMARIO

<b>Introduzione</b> .....	5
<b>Capitolo 1 – Riciclaggio a freddo delle miscele stradali</b> .....	7
1.1 Riciclaggio delle pavimentazioni stradali.....	7
1.2 Tipologie di miscele a freddo.....	10
1.3 Materiali.....	12
1.3.1 Aggregati.....	12
1.3.2 Leganti.....	14
1.4 Maturazione della miscela a freddo.....	22
<b>Capitolo 2 – Materiali e metodi</b> .....	24
2.1 Materiali.....	24
2.1.1 Conglomerato bituminoso di recupero.....	25
2.1.2 Aggregati naturali sabbia e filler.....	25
2.1.3 Emulsione bituminosa.....	25
2.1.4 Cemento.....	26
2.2 Metodi.....	26
2.2.1 Analisi granulometrica.....	26
2.2.2 Massa volumica e assorbimento degli aggregati.....	29
2.2.3 Composizione delle miscele.....	35
2.2.4 Confezionamento dei provini.....	35
2.2.5 Miscelazione.....	35
2.2.6 Compattazione.....	38
2.2.7 Maturazione.....	43

2.2.8	Misura perdita d'acqua per evaporazione.....	43
2.2.9	Misura della resistenza a trazione indiretta.....	44
<b>Capitolo 3 – Programma sperimentale.....</b>		<b>50</b>
3.1	Inquadramento del progetto.....	50
3.2	Obiettivo.....	51
3.3	Organizzazione del programma sperimentale.....	51
<b>Capitolo 4 – Analisi risultati.....</b>		<b>53</b>
4.1	Esempio risultati.....	53
4.2	Valutazione della procedura di compattazione.....	59
4.3	Evoluzione della perdita d'acqua.....	64
4.3.1	Effetto del dosaggio di cemento.....	66
4.3.2	Effetto della temperatura di maturazione.....	66
4.4	Resistenza a trazione indiretta.....	67
4.4.1	Effetto del dosaggio di cemento.....	69
4.4.2	Effetto della temperatura di maturazione.....	70
4.4.3	Effetto del tempo di maturazione.....	71
4.4.4	Effetto temperatura di prova.....	72
4.4.5	Effetto tempo – temperatura di prova.....	73
4.5	Relazione perdita d'acqua – resistenza a trazione indiretta.....	74
<b>Conclusioni.....</b>		<b>76</b>
<b>Bibliografia.....</b>		<b>78</b>

# Introduzione

Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali, negli ultimi anni, è una delle tematiche principali per quanto riguarda la sostenibilità ambientale. In particolare, il riciclaggio in ambito stradale segue due metodologie differenti, quello delle tecnologie a caldo e quello delle tecnologie a freddo. In entrambi i casi l'obiettivo principale è quello di riuscire a massimizzare il riutilizzo del conglomerato bituminoso di recupero, definito come RA (*reclaimed asphalt*).

La presente tesi e la sperimentazione ad essa connessa fanno parte del programma sperimentale CRABforOERE, il quale coinvolge e riunisce ricercatori europei con elevata esperienza nel settore riguardante il riciclaggio a freddo del RA. Oltre all'università tedesca Kassel che si è impegnata nel fornire il materiale per la sperimentazione, è stata coinvolta l'Università politecnica delle Marche come esperti per quanto riguarda le tecnologie di riciclaggio a freddo. Il programma CRABforOERE elaborerà delle linee guida e delle procedure necessarie per la futura applicazione dei materiali riciclati a freddo come materiale stradale con elevata ecosostenibilità. L'obbiettivo della sperimentazione si basa sul valutare l'influenza della percentuale di cemento, del tempo e della temperatura di maturazione sulle proprietà meccaniche delle miscele prese in esame.

La presente tesi è stata divisa in quattro capitoli principali di cui si riporta in breve il contenuto:

1. **RICICLAGGIO A FREDDO DELLE MISCELE STRADALI:** qui viene riportata una descrizione sulle principali tecniche di riciclaggio che si adoperano in ambito stradale. Vengono descritte e classificate le tipologie di miscele a freddo e infine viene descritta l'importanza della maturazione delle suddette miscele.

2. **MATERIALI E METODI:** vengono presentati i materiali adoperati nella seguente sperimentazione, con le relative caratteristiche fisiche, e si descrive la metodologia di prova adottata.
3. **PROGRAMMA SPERIMENTALE:** viene descritto il programma sperimentale adottato.
4. **ANALISI RISULTATI:** sono riportati i risultati ottenuti della caratterizzazione meccanica delle miscele a determinati tempi e a diverse condizioni di maturazione.

# Capitolo 1

## Riciclaggio a freddo delle miscele stradali

In questo capitolo verrà trattato il tema del riciclaggio a freddo come tecnologia per la produzione di miscele per la costruzione e manutenzione delle pavimentazioni stradali. Si parlerà inoltre dei materiali costituenti le miscele a freddo e delle diverse tecnologie di produzione.

### 1.1 Riciclaggio delle pavimentazioni stradali

L'adozione del riciclaggio a freddo nell'ambito della produzione di miscele stradali è una prassi sempre più diffusa sia per il risanamento che per la costruzione di nuove

pavimentazioni in quanto presenta diversi benefici sia dal punto di vista ambientale che economico. Infatti, le miscele riciclate a freddo vengono prodotte a temperatura ambiente, riducendo il consumo di energia e combustibili necessari al riscaldamento.

Inoltre, la produzione di queste miscele consente di utilizzare grosse quantità di conglomerato bituminoso di recupero, altrimenti detto “fresato” ovvero il materiale dismesso dai vecchi pacchetti stradali (*Reclaimed Asphalt*, RA). Ciò consente di ridurre l’utilizzo di aggregati di primo impiego e al contempo abbattere i costi di discarica necessari allo smaltimento del RA. Infine, la produzione a temperatura ambiente consente di abbattere l’emissione di gas serra rispetto a quelli legati alla produzione dei tradizionali conglomerati bituminosi a caldo. Questa tecnologia risulta essere, dunque, una soluzione ottimale nell’ottica dello sviluppo sostenibile e della gestione delle risorse e dei costi.

Quando la pavimentazione stradale risulta ammalorata è necessario ricostruirne uno o più strati, dapprima rimuovendo lo strato danneggiato. Questa operazione è necessaria per mantenere le quote e le pendenze della sezione stradale e viene effettuata con l’ausilio di una macchina chiamata fresatrice (Figura 1.1) che lavora con molta precisione e consente di ottenere già un prodotto riutilizzabile. Successivamente si sceglie la tecnica di ripristino del manto stradale più adeguata al caso in esame.

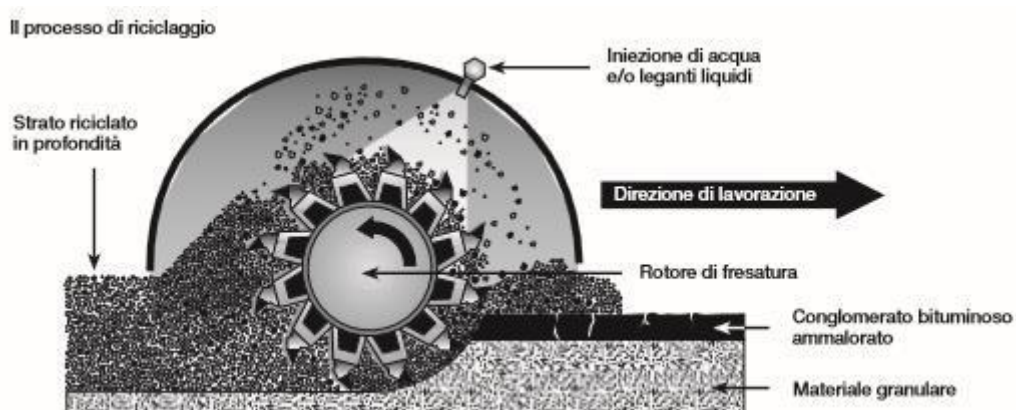


Figura 1.1 Operazione di fresatura della pavimentazione



Le modalità di riciclaggio possono essere distinte in due principali categorie, in funzione della temperatura utilizzata all'atto del confezionamento del nuovo conglomerato bituminoso:

- Riciclaggio a caldo;
- Riciclaggio a freddo.

Il riciclaggio può essere realizzato inoltre ricorrendo a due principali tecnologie di produzione del materiale:

- In impianto;
- In sito.

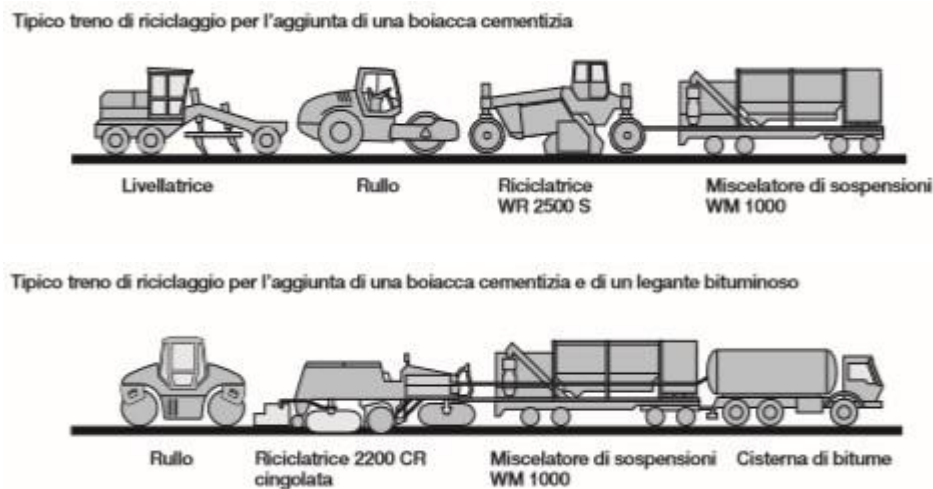
Grazie al riciclaggio dei conglomerati bituminosi è possibile reimpiegare il fresato fino al 50% negli impasti a caldo e fino al 100% nelle tecniche a freddo.

Il riciclaggio a caldo viene effettuato prevalentemente in impianto ed è un processo che consente di ottenere miscele ad alte prestazioni (generalmente paragonabili a quelle dei conglomerati prodotti con solo materiale vergine), rendendole idonee per qualsiasi tipo di impiego. Tuttavia, per l'utilizzo del fresato nei conglomerati a caldo va prevista una modifica al ciclo produttivo dell'impianto, in quanto è necessario il riscaldamento dello stesso prima dell'inserimento in camera di miscelazione.

L'inserimento del fresato non riscaldato comporterebbe, infatti, un abbassamento eccessivo della temperatura della miscela: per evitare che ciò accada bisognerebbe riscaldare di almeno 10 °C in più il materiale vergine e il legante, ma questo potrebbe causare un'ossidazione eccessiva del bitume nuovo o addirittura la sua combustione, pregiudicando la durabilità e la lavorabilità del conglomerato finale. Per questo motivo nel riciclaggio a caldo la quantità fresato riutilizzato è limitata ad un massimo del 50%, ma, nella pratica comune, generalmente non si supera il 20%. Con l'obiettivo di ottenere una buona lavorabilità, possono essere impiegati specifici additivi, per rigenerare le caratteristiche del bitume invecchiato contenuto nel fresato.

Un'alternativa alla miscelazione in impianto a caldo è costituita dal riciclaggio in sito a freddo: questo grazie a degli impianti mobili semoventi, anche detti "treni a unità multipla". Il riciclaggio in sito viene generalmente utilizzato per la produzione di miscele a freddo.

I treni di riciclaggio consentono di fresare la pavimentazione usurata, miscelare il materiale recuperato con acqua, legante bituminoso (emulsione bituminosa o bitume schiumato) e stendere, infine, il conglomerato con la vibrofinitrice e con i rulli gommati per far fuoriuscire l'acqua in eccesso (Figura 1.2).



*Figura 1.2 Treni a unità multipla*

In caso di riciclaggio in sito le spese di trasporto vengono azzerate, così come le tempistiche di lavoro. Non ci sono emissioni poiché si lavora sempre a freddo, ovvero la miscelazione si effettua a temperatura ambiente.

Si tenga presente che il riciclato a freddo è già stato impiegato con successo in diverse applicazioni, tra cui il tratto autostradale tra Ancona Sud-Ancona Nord dell'A14, nel quale sono stati condotti degli studi attraverso l'installazione di sofisticate strumentazioni per il monitoraggio in continuo di alcuni parametri.

## 1.2 Tipologie di miscele a freddo

Nelle miscele a freddo il fresato viene considerato “inerte” a tutti gli effetti. Ciò implica che se ne considera la distribuzione granulometrica comprensiva del bitume che lo riveste: i grumi di aggregati legati dal bitume si considerano “grani”.

La composizione di una miscela di conglomerato riciclato a freddo è costituita dai seguenti materiali:

- conglomerato bituminoso fresato (RA);
- aggregati lapidei di primo impiego, inseriti eventualmente in quantità variabili per correggere la granulometria del fresato;
- legante bituminoso (emulsione bituminosa o bitume schiumato), in percentuali che variano tra il 1% e il 6%;
- legante idraulico, generalmente cemento, in quantità variabili tra 1% e 3%;
- eventuale acqua di aggiunta, per garantire lavorabilità compattabilità alla miscela in fase di stesa e compattazione.

La presenza di un agente bituminoso rende la componente dei liquidi essenziale per ottenere la lavorabilità della miscela a temperatura ambiente. Infatti, i liquidi agiscono come lubrificanti durante la fase di compattazione sostituendo il calore.

La classificazione stessa delle miscele può avvenire in funzione delle percentuali di cemento e di bitume presenti. Il grafico, ottenuto come adattamento di quello proposto dalla Asphalt Academy (figura 1.3), permette di individuare cinque grandi categorie all'interno delle miscele riciclate a freddo contenenti leganti bituminosi e/o cementizi.

- Calcestruzzo-PCC (*Portland Cement Concrete*): miscele che hanno una percentuale di cemento maggiore di sei e percentuale di bitume nulla;
- Materiali stabilizzati con cemento-CTM (*Cement Treated Materials*): miscele che hanno contenuto di cemento compreso tra l'1 e il 6% e contenuto di bitume nullo;
- Materiali stabilizzati con bitume-BSM (*Bitumen Stabilized Materials*): miscele con un contenuto di cemento massimo dell'1% e contenuto di bitume compreso tra 1 e 2.5%;
- Materiali stabilizzati con bitume e cemento-CBTM (*Cement-Bitumen Treated Materials*): miscele che hanno i contenuti di cemento e bitume compresi tra l'1 e il 3 %;
- Conglomerati a freddo (*cold mix asphalt*): miscele con cemento compreso tra 0 e 2% e con bitume compreso tra 3 e 6 %;

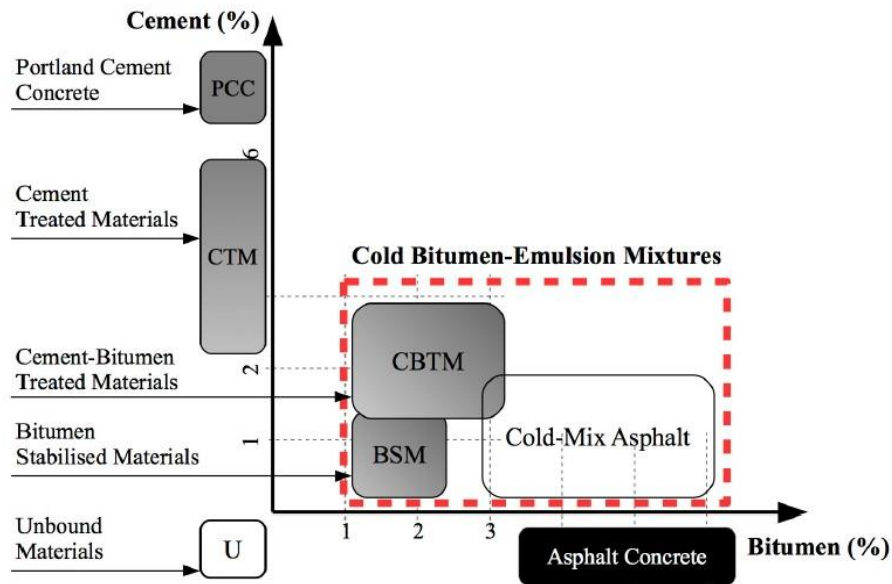


Figura 1.3 Classificazione delle miscele a freddo proposta dalla Asphalt Academy

## 1.3 Materiali

Nei seguenti paragrafi vengono descritti brevemente i materiali utilizzati per la produzione di miscele a freddo.

### 1.3.1 Aggregati

La norma UNI-EN 13043-2004 definisce aggregato il materiale granulare utilizzato nelle costruzioni e lo suddivide in:

- naturale, quello derivante da fonti minerarie che non è stato assoggettato a nient'altro che alla lavorazione meccanica
- industriale se è di origine mineraria derivante da un processo industriale, che implica una modificazione termica o di altro tipo
- riciclato è quello risultante dalla lavorazione di materiale inorganico, precedentemente utilizzato nelle costruzioni.

La dimensione dell'aggregato da cui ne deriva la designazione, è intesa in termini di dimensione dello staccio inferiore ( $d$ ) e superiore ( $D$ ), espressa come  $d/D$ . La norma suddivide l'aggregato in frazioni: grosso, fine e filler.

L'aggregato grosso è quello con D minore o uguale a 45 mm e con d maggiore o uguale a 2 mm. L'aggregato fine ha D minore o uguale a 2 mm e contiene particelle che sono per la maggior parte trattenute su uno staccio di 0,063 mm. L'aggregato filler è materiale passante allo staccio di 0,063 mm e può essere aggiunto ai materiali da costruzione per il conferimento di determinate proprietà.

Per la caratterizzazione degli aggregati per uso stradale è necessario determinare caratteristiche meccaniche e fisiche degli stessi, in particolare le resistenze alla compressione, all'abrasione, la levigabilità superficiale e la resistenza ai cicli di gelo e disgelo, aggiungendo: forma dei grani, massa volumetrica e composizione granulometrica. La composizione granulometrica influenza particolarmente: la stabilità, la rigidità, la lavorabilità, la compattabilità, la resistenza a fatica, la resistenza allo scorrimento viscoso, la durabilità e l'aderenza.

Il materiale fresato da utilizzare nel riciclaggio a freddo viene campionato e su di esso viene eseguita un'analisi granulometrica, in modo da ricostruirne la curva di distribuzione granulometrica. La curva ottenuta deve rientrare in opportuni fusi granulometrici prescritti dai capitolati, qualora ciò non avvenisse, si devono attuare delle correzioni con aggregati di primo impiego. Questo problema è meno frequente quando la scarifica arriva a interessare gli strati di base. Per la produzione di conglomerati chiusi è previsto un determinato tenore dei vuoti, che occorre rispettare al fine di consentire al bitume di rivestire gli aggregati, evitando trasudamenti che causerebbero ormaiamento.

Quindi non viene utilizzata come riferimento la curva di massimo addensamento, ma la curva di Fuller-Thompson, sfruttando l'equazione che garantisce un livello minimo di vuoti in miscela:

$$P = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,45}$$

dove:

P = passante cumulativo al setaccio di dimensione d (%);

d = apertura del setaccio considerato (mm);

D = massima dimensione dell'aggregato (mm)

Il rispetto della percentuale dei vuoti minima è particolarmente importante per le miscele con bitume schiumato, mentre in quelle con emulsione lo è meno, perché l'acqua contenuta nell'emulsione evita l'eccessivo avvicinamento dei grani.

La temperatura degli aggregati per le miscele con emulsione non deve scendere al di sotto dei 10 °C, per evitare la non omogenea distribuzione del bitume. Per le miscele con bitume schiumato è molto più influente la temperatura, perché all'aumentare di essa le particelle di aggregato aumentano la loro dimensione e si legano al meglio al bitume, fornendo delle caratteristiche prestazionali più elevate.

### **1.3.1 I leganti**

I leganti utilizzati nelle miscele a freddo sono di tipo bituminoso e di tipo idraulico, tra i primi distinguiamo l'emulsione bituminosa e il bitume schiumato, mentre come legante idraulico viene utilizzato, generalmente, il cemento.

Il bitume è un legante idrocarburico, che può essere di origine naturale o artificiale. Quelli artificiali sono i più utilizzati e derivano dalla raffinazione del petrolio greggio, infatti da esso dipendono anche le sue caratteristiche chimiche. La caratteristica principale del bitume è la termo-dipendenza. Esso, infatti, può essere solido o semi-solido (liquido molto viscoso non lavorabile) a temperatura ambiente, ma può essere liquefatto per semplice riscaldamento. In generale, esistono dei metodi per abbattere la viscosità del bitume e renderlo lavorabile:

- uso di energia termica (aumento della temperatura);
- miscelazione con solventi di petrolio;
- produzione di bitume schiumato;
- emulsione in acqua per ottenere un'emulsione bituminosa.

#### ***Emulsione bituminosa***

L'emulsione bituminosa è composta da una fase disperdente che è l'acqua e una fase dispersa, cioè il bitume. L'emulsione bituminosa nasce, dunque, per ridurre la viscosità del bitume in modo da poterlo utilizzare con aggregati a temperatura ambiente. Inoltre, consente di mettere in opera trattamenti superficiali e può essere usata per mani d'attacco. L'acqua scelta non deve contenere impurità, né organiche,

né minerali: per la produzione delle emulsioni si utilizza, in generale, acqua di pozzo o di acquedotto, anche se qualche volta è necessario “permutare” l’acqua mediante un apparecchio appropriato, per renderla di durezza adeguata. La permutazione consiste nel sostituire alcuni ioni contenuti nell’acqua con altri.

Le emulsioni vengono classificate in funzione della percentuale di bitume residuo sul volume totale: in ambito stradale la quantità di bitume nell’emulsione si aggira intorno al 60% del volume totale, mentre il rimanente 40% si può considerare costituito da acqua. Attualmente nel mercato sono disponibili emulsioni con bitume residuo al 50%, 55%, 60%, 65% e 69%.

Durante la miscelazione, la carica elettrica delle gocce di bitume crea attrazione verso le particelle degli aggregati, formando una pellicola che ingloba le parti più fini, rivestendo la superficie degli aggregati. L’adesione del bitume all’aggregato dipende dalla carica elettrostatica conferita dagli emulsionanti ai globuli di bitume ed è funzione della temperatura e dell’eventuale presenza di agenti perturbatori, ad esempio polvere. Il tipo di emulsionante utilizzato nella produzione permette di ottenere emulsioni anioniche o emulsioni cationiche. Le emulsioni anioniche hanno una carica superficiale negativa, mentre le cationiche positiva. Le emulsioni bituminose cationiche sono più difficili da produrre ma decisamente più affidabili rispetto alle emulsioni anioniche. In generale le emulsioni che rispondono meglio ai requisiti richiesti per le lavorazioni connesse al riciclaggio a freddo delle pavimentazioni, sono quelle cationiche modificate al 60-65% di bitume residuo, sovra-stabilizzate. Esse offrono maggiori garanzie sia in termini di capacità legante, sia come velocità di rottura, mentre l’impiego di emulsioni anioniche è limitato ad alcune aree del centro e sud Italia, caratterizzate da particolari situazioni ambientali e dalla disponibilità di aggregati affini chimicamente (aggregati calcarei). Generalmente, rispetto alle emulsioni cationiche, sono più semplici da produrre e meno costose, ma risultano essere meno “performanti”.

Le emulsioni bituminose sono caratterizzate dal fenomeno della rottura. Per rottura si intende il momento in cui il bitume si separa dall’acqua con conseguente aumento della viscosità, rendendo difficoltosa la lavorazione. È importante scegliere emulsioni la cui rottura avviene solo dopo la compattazione. La velocità di rottura è

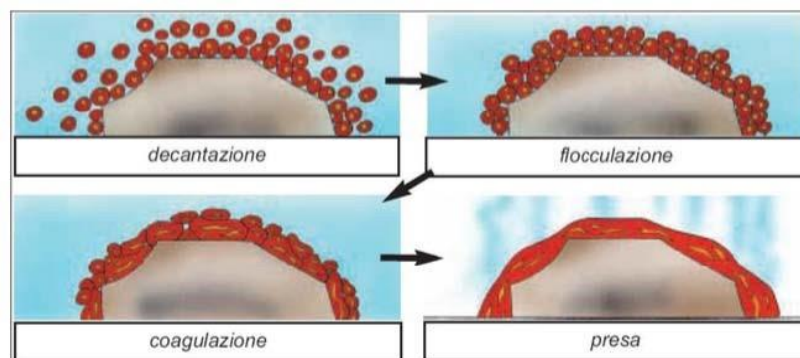
influenzata da diversi fattori: l'andamento climatico, la temperatura dell'emulsione, la natura chimica degli inerti, la granulometria delle particelle disperse di bitume, le modalità di esecuzione del lavoro, ecc. Possiamo distinguere:

- emulsioni super rapide (RR);
- emulsioni rapide (R);
- emulsioni medie (M);
- emulsioni lente (L),
- emulsioni sovra-stabilizzate (LL).

Per le miscele riciclate a freddo si utilizzano emulsioni di tipo LL, in modo tale da evitare che la rottura possa avvenire durante la fase di miscelazione e compattazione.

Il processo di rottura si sviluppa attraverso le seguenti fasi (Figura 1.4):

- decantazione: sedimentazione dei globuli di bitume;
- flocculazione: avvicinamento dei globuli sedimentati;
- coagulazione: fusione dei globuli di bitume flocculati e formazione del coagulo



*Figura 1.4 Processo di rottura e presa dell'emulsione*

La fase successiva è rappresentata dalla presa che si verifica una volta che il legante è a contatto con l'aggregato. Il coagulo di bitume inizia a perdere l'acqua rimasta al suo interno e si stringe sempre più intorno all'aggregato. Quando il bitume, ormai anidro, disperde anche le frazioni più leggere contenute in esso, l'ammorsamento può



ritenersi completo e il legante che rimane risulta costituito da soli idrocarburi non volatili. L'intero processo è caratterizzato anche da un progressivo cambiamento di colore dell'emulsione che passa dal marrone al nero.

L'emulsione a differenza dei bitumi non è un prodotto infiammabile, quindi per il trasporto non rientra tra i materiali pericolosi, l'unico accorgimento sta nell'evitare la formazione di schiuma dovuta a un mescolamento troppo energico.

Possiamo riassumere le proprietà delle emulsioni in proprietà intrinseche (indipendenti dai materiali utilizzati, proprie delle emulsioni) tra le quali la viscosità e la stabilità allo stoccaggio, e proprietà estrinseche (dipendenti dai campi di impiego) a cui appartengono la velocità di rottura e l'adesione.

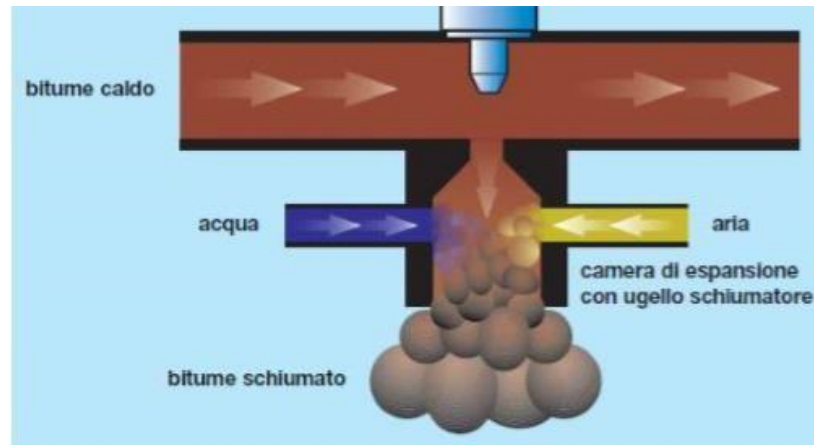
La viscosità dipende dalla concentrazione del bitume disperso, dal greggio di origine e dall'emulsionante utilizzato: è importante perché ne condiziona l'applicazione.

La stabilità allo stoccaggio impedisce la separazione dell'emulsione nei suoi elementi costituenti. Fattore determinante per la stabilità è la granulometria dell'emulsione che dipende, a sua volta, da diversi parametri: tipo e quantità di emulsionanti, pH della fase acquosa, origine e gradazione del bitume.

### ***Bitume schiumato***

Il bitume schiumato può essere definito, essenzialmente, come uno stato temporaneo di bassa viscosità del bitume stesso. Esso è ottenuto tramite una tecnologia che prevede di gettare dell'acqua a temperatura ambiente sul bitume molto caldo (circa a 180°C): in questo modo si genera, quindi, un trasferimento di calore dal bitume all'acqua (Figura 1.5). L'acqua passa, dunque sotto forma di vapore con una reazione espansiva: si formano delle bolle, la cui crescita è ostacolata dalla tensione superficiale esercitata dal bitume. La schiuma si dissolve in meno di un minuto e il legante riacquista le sue proprietà originali. Pertanto, se si decide di impiegare questa tecnica è necessario essere tempestivi per sfruttare al meglio le sue proprietà: mediante appositi ugelli, il bitume espanso viene iniettato all'interno della camera di espansione per essere miscelato all'istante con il RA; quando le bolle esplodono ci

sono dei micro-frammenti di bitume e acqua che tendono a aderire alle parti più fini; questa massa di sabbia e bitume va a costituire una malta.



*Figura 1.5 Produzione di bitume schiumato*

Non tutti i bitumi sortiscono lo stesso “effetto di schiumatura”, che varia in base al:

- rapporto d’espansione, che è il rapporto tra il volume massimo raggiunto dallo stato schiumoso e il volume finale del legante. Con questo parametro si misura l’espansione del legante (più alta è l’espansione, migliore è la performance);
- tempo di semi-trasformazione, ovvero il tempo intercorso tra il volume massimo e la metà del volume massimo. Questo parametro è usato per misurare la stabilità.

La schiuma migliore si ottiene quando si riesce ad ottimizzare entrambi i parametri: per far ciò l’attenzione deve essere riposta sul contenuto d’acqua, in quanto più ne viene impiegato più aumenta il rapporto di espansione, ma al contempo si riduce il tempo di semi-trasformazione, quindi la schiuma gode di una durata inferiore e quindi di un minor tempo di lavorazione. Non meno importante è la temperatura di miscelazione, infatti, più è alta più viene favorito il processo.

### ***Filler***

Il filler naturale, o non attivo, ha come unico scopo quello di favorire la dispersione del bitume all'interno della miscela.

In particolare, la quantità e la qualità del filler presente nella miscela di aggregato è fondamentale nel caso si utilizzi come stabilizzante il bitume schiumato: le particelle di bitume e filler, infatti, formano un mastice che funge da legante per gli aggregati più grossi.

Nel caso di utilizzo di emulsione bituminosa, la quantità di filler è meno importante, in quanto il bitume da sé riveste già parzialmente gli aggregati grossi e ha il solo scopo di correggere la curva granulometrica, qualora fosse mancante della frazione fine.

### ***Cemento***

È il legante idraulico, utilizzato nella forma di polvere finissima, in grado di creare legami e reagire con l'acqua.

Principalmente è formato da cemento Portland, che combinato con altri componenti, dà origine ai diversi tipi di cemento. Nel clinker ci sono calce (65%), silice (25%), allumina (4-10%), ossidi di ferro e di magnesio (1-3%) e altri componenti minori. Il clinker può essere di tipo naturale o artificiale: il naturale si ottiene dalle marne, che contiene di suo gli altri componenti.

Il clinker artificiale è, invece, una miscela di calcare, marne e argille. La fabbricazione del clinker avviene in due fasi: la prima è l'estrazione delle materie prime e la preparazione della miscela cruda, che consiste nella frammentazione dei componenti fino ad ottenere la pasta o farina, un composto omogeneo reso tale da un processo di macinazione in appositi mulini a sfere; la seconda è la cottura ad alte temperature (1400-1500 °C) in un forno orizzontale, formato da un cilindro leggermente inclinato rivestito in mattoni refrattari, che gira sul proprio asse.

Oltre al clinker la miscela può contenere:

- loppa d'altoforno: ottenuta mediante raffreddamento rapido di una scoria di composizione appropriata proveniente dalla fusione in altoforno di minerali di ferro;

- materiali pozzolanici: sostanze naturali o industriali silicee o silico-alluminose, o una combinazione di queste;
- cenere volante: ottenuta per precipitazione elettrostatica o meccanica delle polveri provenienti dai gas di carico dei forni alimentati a polverino di carbone;
- scisto calcinato: prodotto in un forno speciale a una temperatura di circa 800 °C;
- calcare, con almeno il 75% di tenore, in massa, di carbonato di calcio;
- fumi di silice: provenienti dalla riduzione di quarzo di elevata purezza con carbone in forni ad arco elettrico nella produzione di silicio e di leghe ferro-silicio;
- costituenti secondari: materiali inorganici appositamente selezionati impiegati in proporzione non maggiore del 5%;
- additivi.

Quando il cemento viene a contatto con l'acqua reagisce con essa, dando luogo a una serie di trasformazioni chimico-fisiche che vanno a costituire il processo di idratazione del cemento stesso e che si manifestano nei fenomeni di:

- presa: progressivo irrigidimento della pasta di cemento (cemento + acqua);
- indurimento: fenomeno che segue la presa, che si prolunga nel tempo e che consiste nell'indurimento della pasta, molto rapido nei primi giorni e che si attenua gradualmente nel tempo.

Il processo di idratazione è una reazione esotermica, quindi durante la maturazione libera calore. I principali composti solidi che si formano in quantità maggiore durante l'idratazione del cemento sono l'idrossido di calcio, l'ettringite e il silicato di calcio idrato (C-S-H – Calcium Silicate Hydrated). L'idratazione del cemento, e quindi la resistenza meccanica della pasta indurita, dipende dalla quantità d'acqua presente in rapporto alla quantità di cemento: tenori troppo bassi di acqua non permettono l'idratazione completa del cemento; allo stesso tempo eccessi di acqua sono responsabili di cadute di resistenza a causa dell'eccessiva distanza tra i granuli di cemento. Anche la temperatura ha notevole importanza sull'idratazione del cemento: quasi tutti i cementi sono progettati per sviluppare le loro caratteristiche ottimali a temperatura ambiente, in un intervallo compreso tra 10 e 30 °C. Quando la

temperatura si trova al di fuori di questo intervallo, le fasi di presa e indurimento risultano sensibilmente modificate. In generale, un aumento di temperatura provoca una presa più rapida, che si ripercuote in una rapida perdita di lavorabilità delle miscele: ciò comporta maggiori difficoltà nelle fasi di trasporto e posa in opera degli impasti cementizi. Al contrario un abbassamento della temperatura rallenta la presa del cemento, con riduzione delle resistenze meccaniche alle basse stagionature.

Il cemento indurisce poiché a contatto con l'acqua forma dei legami, crea dei prodotti fibrosi chiamati gel torbernoritico. Ogni granulo dà origine a questo gel nel suo intorno così da formare dei veri e propri legami tra un granulo e l'altro, lasciando però dei vuoti in superficie. Questi vuoti vengono detti *vuoti capillari*, che non sono nient'altro che gli spazi tra una fibra e l'altra.

Nel gel torbernoritico c'è acqua di cristallizzazione, che non si riesce più a togliere poiché facente parte del legame. L'acqua si differenzia inoltre in acqua adsorbita che sta attaccata al gel, ed in acqua libera che aggiungiamo durante la miscelazione per conferire lavorabilità all'impasto.

Se il cemento viene mantenuto in condizioni umide migliora nel tempo la sua resistenza perché gli si sta fornendo tempo per sviluppare i suoi legami.

Anche se il processo di idratazione continua, per il controllo delle resistenze meccaniche, si fa riferimento ai primi 28 giorni, perché è stato visto che l'incremento prestazionale dopo il primo mese non è particolarmente rilevante.

Come in tutti i materiali, la porosità influenza la resistenza meccanica, il modulo elastico, la permeabilità e la durabilità.

A mano a mano che l'idratazione aumenta, il materiale indurisce e fa presa, ma permangono delle porosità rimanenti:

1. la più piccola è la porosità del gel torbernoritico (1-10  $\mu\text{m}$ ), data dalla distanza delle lamelle nei prodotti di idratazione. Tuttavia, si tratta di una porosità fisiologica, intrinseca del materiale, non modificabile ma talmente piccola da non causare problemi di prestazioni e durabilità;
2. segue la porosità capillare (0,1-10  $\mu\text{m}$ ), che può essere facilmente modificata. Si calcola secondo la formula di Powers come:

$$V_{\text{pori capill.}} = 100 * \left( \frac{a}{c} - 36,15\alpha \right)$$

dove:

$a/c$ = rapporto acqua-cemento, che dipende dal mix-design della miscela;

$\alpha$ = grado di idratazione del cemento, varia col tempo di stagionatura.

Per modificare la porosità capillare si può agire variando il mix-design, introducendo degli additivi acceleranti per aumentare il grado di idratazione del cemento, o incrementando la temperatura e l'umidità dell'ambiente, così da favorire le condizioni ottimali di stagionatura.

Tutto ciò produrrebbe un aumento delle prestazioni meccaniche e della durabilità del materiale.

3. Inoltre, ci possono essere i macropori (dell'ordine dei mm): bolle d'aria intrappolate o prodotte da una scarsa compattazione, che possono con più facilità presentarsi in superficie, lasciando quindi il materiale più vulnerabile agli agenti atmosferici.

## 1.4 Maturazione delle miscele a freddo

Una caratteristica distintiva delle miscele riciclate a freddo con emulsione bituminosa è il possedere un comportamento evolutivo. Quest'ultimo è dovuto al fatto che i suoi leganti sono caratterizzati da fenomeni che si sviluppano progressivamente nel tempo. Infatti, sia la rottura dell'emulsione bituminosa che l'idratazione del cemento richiedono un certo periodo prima di poter essere considerate completate. Inoltre l'acqua proveniente dall'emulsione e quella aggiunta per conferire alla miscela lavorabilità e compattabilità evaporano.

Durante la maturazione si assiste alla variazione della struttura, della miscela e delle sue proprietà fisiche (ad esempio l'acqua evapora, il cemento idrato aumenta di volume rispetto all'anidro e la massa volumica varia). Inoltre, si ha, contemporaneamente un incremento delle proprietà meccaniche (tra cui ad esempio la rigidità e la resistenza).

Lo studio di tali proprietà deve essere, dunque, legato all'analisi del processo di maturazione, o *curing*. Pertanto, nello studio delle miscele si deve tener presente non solo il valore di "lungo termine" delle loro proprietà (cioè raggiunto al termine del processo di maturazione) ma anche della velocità con cui tale valore evolve nel tempo. L'analisi dell'evoluzione nel tempo è essenziale soprattutto nelle fasi iniziali del processo di maturazione. Infatti, uno dei principali svantaggi legati alla messa in opera delle miscele a freddo sta proprio nel tempo necessario a raggiungere adeguate caratteristiche meccaniche, tali da consentire la riapertura al traffico. L'attento studio della velocità con cui queste sono raggiunte diventa, quindi, essenziale per non incorrere in prematuri ammaloramenti dovuti ad una riapertura anticipata e allo stesso tempo per non ritardare troppo quest'ultima in caso non fosse necessario. In ogni caso, sia il valore ultimo di una proprietà, sia la velocità con cui tale valore viene raggiunto, dipendono da una serie di fattori legati in parte alla composizione della miscela (ad esempio il tipo di emulsione, il contenuto d'acqua, il tipo e il contenuto di cemento, i vuoti della miscela compattata) e in parte all'ambiente nel quale si svolge la maturazione (ad esempio temperatura, umidità, stratigrafia della pavimentazione).

Per quanto concerne la pratica di laboratorio, un provino, una volta compattato e maturato per giorni, sarà composto da:

- aggregati miscelati come da ricetta;
- cemento idrato;
- bitume;
- vuoti d'aria; questi ultimi sono costituiti dai vuoti d'aria ottenuti al termine della compattazione più i vuoti lasciati dall'acqua, cioè quelli che si creano per evaporazione dell'acqua.

È importante sottolineare che non tutta l'acqua si trasforma in vuoti, un'aliquota viene impiegata nel processo di idratazione del cemento e diventa acqua legata non evaporabile.

# Capitolo 2

## Materiali e metodi

Nel seguente capitolo si illustreranno dapprima i materiali impiegati per la produzione delle miscele bituminose riciclate a freddo e le loro caratteristiche fisiche, nonché la composizione delle miscele oggetto di indagine. Verranno quindi descritte le procedure di prova e le strumentazioni utilizzate per la realizzazione e la compattazione dei provini, ma anche per l'esecuzione dei test di caratterizzazione meccanica delle miscele.

### 2.1 Materiali

Per il confezionamento delle miscele è stato usato conglomerato bituminoso fresato (*Reclaimed Asphalt Pavement*, RAP), sabbia calcarea di frantumazione di origine basaltica e filler calcarei.



Come leganti sono stati utilizzati sia l'emulsione bituminosa che il cemento. Inoltre, è stata utilizzata acqua per sopperire alla mancanza di riscaldamento e dunque conferire lavorabilità e compattabilità alle miscele.

### **2.1.1 Conglomerato bituminoso di recupero**

Il conglomerato bituminoso di recupero adoperato per la sperimentazione proviene dalla Germania ed è stato fornito dall'Università di Kassel, partner del progetto CRABforOERE.

### **2.1.2 Aggregati naturali sabbia e filler**

Gli aggregati di origine naturale sono stati aggiunti per correggere la distribuzione granulometrica derivante dal solo utilizzo del RA. del fresato, povero della frazione fine.

La sabbia detta anche *Virgin Aggregate*, VA è di origine basaltica, mentre il filler utilizzato è di origine calcarea. Gli aggregati sono forniti, anch'essi dall'Università di Kassel. Secondo la normativa. La densità apparente della sabbia è  $3138 \text{ kg/m}^3$  mentre quella del filler è  $2800 \text{ kg/m}^3$ . L'assorbimento è 1.8% e 0.07% per sabbia e filler, rispettivamente (UNI-EN 1097-6).

La sabbia rientra nella frazione 0/2, mentre il filler è classificabile come il passante al setaccio di diametro 0,063 mm.

### **2.1.3 Emulsione bituminosa**

L'emulsione bituminosa impiegata nella sperimentazione è stata fornita dalla Ditta Valli Zabban S.p.A. (impianto di Bologna). Si tratta di un'emulsione cationica di bitume normale (60% bitume residuo – 40% acqua, cationica), sovra-stabilizzata, classificata C60B10 conformemente alla norma UNI EN 13808.

La tabella 2.1 riporta le principali caratteristiche dell'emulsione e del bitume residuo.

<b>Proprietà emulsione</b>	<b>Norma</b>	<b>Valore nominale</b>
Viscosità a 40 °C – tempo di efflusso	EN 12846-1	40 sec
Adesività	EN 13614	95%
Breaking behaviour: mineral filler method	EN 13075-1	190%
Mixing stability with cement	EN 12848	< 2%
<b>Bitume residuo</b>		
Penetrazione a 25°C	EN 1426	70 mm/10
Punto di rammollimento	EN 1427	50 °C

*Tabella 2.1 Caratteristiche emulsione bituminosa*

#### **2.1.4 Cemento**

Il cemento usato nella sperimentazione è prodotto dall'azienda *Heidelberg cement* ed è tipo Portland, classificato CEM I 42.5R secondo la norma EN 197-1.

## **2.2 Metodi**

In questa sezione si riportano le procedure seguite per la caratterizzazione degli aggregati. Si illustrano poi le procedure e i metodi adottati durante la miscelazione, il confezionamento dei provini, la loro maturazione e la caratterizzazione delle proprietà meccaniche.

### **2.2.1 Analisi Granulometrica**

Per l'analisi granulometrica è stato fatto riferimento alla norma UNI-EN 933-1. La prova consiste nel dividere, per mezzo di una serie di setacci, un materiale in numerose classi granulometriche di dimensioni decrescenti. Le dimensioni delle maglie e il numero dei setacci sono scelti in base alla natura del campione ed alla precisione richiesta. La procedura seguita è quella per via umida.

L'analisi granulometrica deve essere eseguita sugli aggregati asciutti. Pertanto, i campioni di aggregati prelevati sono stati essiccati in forno ad una determinata temperatura, differente in base al tipo di materiale (RAP o sabbia):

- $(40\pm 5)$  °C per il RAP
- $(110\pm 5)$  °C per la sabbia

L'essiccazione è considerata terminata quando il materiale raggiunge la massa costante (M1) determinata quando in due pesate successive, effettuate ad 1 ora di intervallo l'una dall'altra, la massa del campione non differisce di più dello 0,1%.

Successivamente si procede al lavaggio. In accordo con la norma esso consiste nel porre la porzione di prova in un recipiente e aggiungere acqua fino a coprirlo. Successivamente si deve agitare vigorosamente la porzione di prova per ottenere una completa separazione e sospensione delle frazioni fini, dopo di che si deve inumidire un setaccio di 63  $\mu\text{m}$ , riservato all'uso per questa prova e adattare un setaccio di protezione (per esempio 1 mm o 2 mm) al disopra del primo.

I setacci devono essere sistemati in modo tale che la sospensione, passando attraverso il setaccio di prova, possa essere eliminata o, se necessario, raccolta in un recipiente adeguato.

Infine, si procede col versare il contenuto del recipiente nel setaccio superiore e si prosegue con il lavaggio del materiale fino a che le acque passanti attraverso il setaccio di 63  $\mu\text{m}$ , escano limpide. Infine, il materiale deve esser fatto essiccare, di nuovo, fino a massa costante, per determinare la massa M2 (massa del campione asciutto post-lavaggio).

Si procede poi con la setacciatura del campione. Essa consiste nel versare il materiale, precedentemente lavato ed essiccato, nella colonna dei setacci. I setacci vengono sovrapposti disposti dal maggiore verso il minore, in ordine di dimensione decrescente di maglia.

Ad essi si aggiungono un coperchio e un recipiente di fondo. Successivamente si procede ad agitare la colonna (Figura 2.1) meccanicamente con l'aiuto di un vibrovaglio, quindi a rimuovere i setacci uno per uno cominciando da quello che presenta l'apertura più grande, agitando ciascun setaccio manualmente assicurandosi

che non ci siano perdite di materiale, (utilizzando a tale scopo, un recipiente ed un coperchio).



*Figura 2.1 Vibrovaglio con fila di setacci pronti per l'agitazione.*

Si determina e registra quindi la massa di trattenuto corrispondente ad ogni setaccio  $T_i$ , compresa la massa del materiale passante al setaccio  $63 \mu\text{m}$  e contenuta del recipiente di fondo, P.

A partire dal valore del trattenuto  $i$ -esimo  $T_i$  in grammi viene calcolato il trattenuto percentuale  $T$  [%] con la formula:

$$T \text{ [%]} = \frac{T_i \text{ [g]}}{\text{massa totale}} \times 100$$

e il corrispondente passante cumulativo percentuale  $P_i$  secondo la formula:

$$P_i = 100 - \sum_1^i T_i [\%]$$

Infine, si determina la percentuale di particelle fini passanti al setaccio 0,063 mm,  $f$  (comprese quelle rimosse in fase di lavaggio) con la seguente relazione:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$$

Dove  $M_1$  ed  $M_2$  sono state definite in precedenza.

### **2.2.2 Massa volumica e assorbimento degli aggregati**

La massa volumica e l'assorbimento d'acqua dell'aggregato sono stati determinati secondo quanto riportato nella norma UNI-EN 1097-6.

In particolare, data la distribuzione granulometrica degli aggregati, è stato utilizzato il "Metodo picnometrico per aggregati con granuli compresi tra 4 mm e 31.5 mm" per la frazione grossa del RAP 0/20 ed il "Metodo picnometrico per aggregati con granuli compresi tra 0.063 mm e 4 mm" per la frazione fine del RAP 0/20 e la sabbia 0/2.

L'apparecchiatura consiste in un picnometro, ossia un flacone di vetro dotato di un imbuto, anch'esso di vetro. (Figura 2.2).

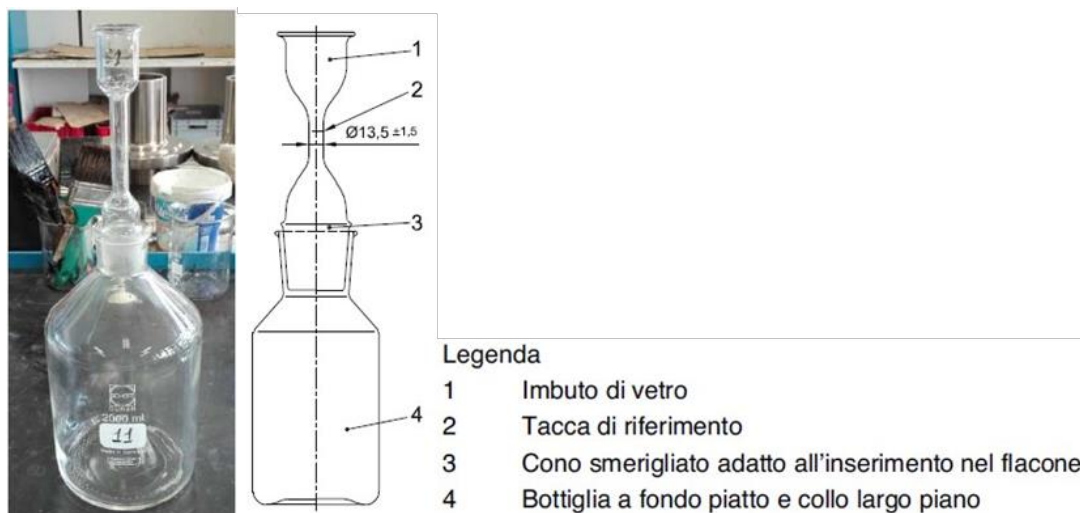


Figura 2.2 Picnometro utilizzato per la determinazione della massa volumica e l'assorbimento di aggregati.

Dopo il lavaggio del materiale al fine di eliminarne la porzione più fine passante al setaccio con apertura  $63 \mu\text{m}$ , la porzione di prova è stata introdotta nel picnometro e immersa parzialmente nell'acqua.

L'aria intrappolata viene eliminata tramite una pompa da vuoto ed aiutando il processo facendo ruotare e scuotendo leggermente il picnometro tenuto in posizione inclinata.

L'immersione è prevista a una temperatura di  $(20^\circ\text{C})$  per  $(24 \pm 0,5)$  al termine delle quali con una leggera rotazione e scuotimento, sono state rimosse delicatamente le ultime bolle d'aria rimaste intrappolate.

La procedura prevede di riempire fino al traboccamento il picnometro con acqua (Figura 2.3) e sistemare il tappo evitando di intrappolare aria nel recipiente (Figura 2.4). Si deve riempire poi il picnometro fino al livello limite individuato da una tacca sul tappo e asciugare il picnometro all'esterno e pesarlo al fine di determinare la massa del picnometro riempito con il campione di prova e l'acqua (M2). Durante questa operazione si deve registrare la temperatura dell'acqua (Figura 2.5), che deve essere compresa tra i  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ . Successivamente si è tolto l'aggregato dall'acqua e lasciato scolare per alcuni minuti. Il picnometro, svuotato dal materiale è stato riempito con acqua fino al livello massimo; quindi asciugato il picnometro

all'esterno è stato pesato per determinare la massa del picnometro riempito con acqua (M3). Anche in questa fase si è dovuta registrare la temperatura dell'acqua.

La differenza tra le temperature dell'acqua nel picnometro durante la determinazione delle masse M2 ed M3 non deve superare 2 °C.

Per determinare la massa del materiale grosso (4/16) in condizioni di superficie satura asciutta (*saturated surface dry, SSD*) si è trasferita su un panno asciutto la porzione di prova che si è lasciata scolare (Figura 2.6).

Successivamente si è proceduto ad asciugare leggermente la superficie dell'aggregato posto su un panno di cotone.

Per favorire l'asciugatura uniforme l'aggregato è stato sparso sul panno in uno strato di spessore pari ad un solo granulo ed è stato lasciato esposto all'aria lontano dai raggi solari diretti o da altre fonti di calore fino a che ogni visibile film d'acqua fosse scomparso, ma l'aggregato conservasse ancora un aspetto umido.

A questo punto si è trasferita nella bacinella la porzione di prova satura con superficie asciutta ed è stato pesato l'aggregato (M1). Quest'ultimo è stato poi essiccato fino al raggiungimento della massa costante (M4).



Figura 2.3 Immersione della porzione grossa e della parte fine in acqua.



*Figura 2.4 Riempimento completo del picnometro e sistemazione del tappo.*



*Figura 2.5 Misurazione della temperatura.*



*Figura 2.6 Raggiungimento condizione SSD aggregato grosso.*



Per quanto riguarda la frazione fine, il procedimento è analogo ad eccezione per la verifica del raggiungimento della condizione SSD. A tale scopo viene utilizzato un tronco di cono metallico riempito con materiale, poi costipato da 25 colpi di pestello (Figura 2.7). La normativa prevede che la condizione SSD è raggiunta quando, alla rimozione dello stampo metallico, si ha un collasso del tronco di cono pressoché completo ma con ancora un picco centrale e con superficie conica pressoché rettilinea (Figura 2.8).



*Figura 2.7 Riempimento e costipazione con pestello del tronco di cono metallico.*



Figura 2.8 Raggiungimento della condizione SSD.

Per il calcolo delle masse volumiche sono state utilizzate le seguenti formule nelle quali  $\rho_w$  è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova in megagrammi per metro cubo e le masse  $M_i$  (con  $i=1, 2, 3, 4$ ) definite in precedenza sono riportate in grammi:

- massa volumica apparente dei granuli,  $\rho_a$ :

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

- massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa,  $\rho_{rd}$ :

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

- massa volumica dei granuli in condizioni di saturazione a superficie asciutta,  $\rho_{ssd}$ :

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

È stato calcolato, infine, l'assorbimento d'acqua (come percentuale della massa essiccata) dopo immersione per 24 ore (WA24) in accordo con l'equazione seguente:

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

### 2.2.3 Composizione delle miscele

Nella presente sperimentazione sono state considerate due miscele riciclate a freddo la cui composizione è stata determinata in accordo con i partner del progetto CRAB for OERE. La miscela di aggregati è stata ottenuta considerando 80% di RAP, 14% di sabbia e 6% di filler.

Il contenuto di emulsione è unico per entrambe le miscele e pari al 3.3% rispetto alla massa di aggregati asciutti, corrispondente al 2% di bitume residuo.

I dosaggi di cemento considerate sono 1,5% per la Miscela A e 3% per la Miscela B, sempre rispetto alla massa di aggregati asciutti. Entrambe le miscele sono state prodotte considerando lo stesso contenuto di acqua totale, pari al 4.5% della massa degli aggregati asciutti.

L'acqua totale comprende l'acqua di assorbimento degli aggregati, l'acqua contenuta nell'emulsione e l'acqua aggiuntiva, utilizzata per facilitare le operazioni di miscelazione e compattazione.

### 2.2.4 Confezionamento dei provini

Il confezionamento dei provini si suddivide in due fasi:

- miscelazione;
- compattazione.

### 2.2.5 Miscelazione

Prima della miscelazione, gli aggregati vengono essiccati fino al raggiungimento della massa costante. Tale operazione consente di avere uno stretto controllo sul contenuto d'acqua della miscela finale. La preparazione in laboratorio delle miscele si articola in due fasi.

Nella prima fase, che avviene con almeno 12 ore di anticipo rispetto la seconda, sono premiscelati in un secchio, nelle quantità stabilite dal mix-design, i soli aggregati asciutti (RAP, sabbia e filler) con la corrispondente quantità di acqua di assorbimento.

Dopo ciascuna aggiunta si procede alla miscelazione manuale, finché la miscela non diventa omogenea (Figura 2.9).



*Figura 2.9 Miscelazione manuale.*

Dopodiché la miscela di aggregati e acqua è mantenuta in sacchetti di plastica sigillati per un tempo minimo di 12 ore, in modo tale da consentire ai granuli di raggiungere la condizione SSD (Figura 2.10).



*Figura 2.10 Contenitore ad evaporazione impedita.*

Trascorso tale periodo di tempo, nella seconda fase si tira fuori la miscela dai sacchetti e si procede all'aggiunta dei leganti e dell'acqua, nelle quantità stabilite dal mix design.

Precisamente il protocollo di miscelazione seguito nella seconda fase è stato il seguente:

- aggiunta agli aggregati in condizioni SSD e aggiunta della quantità prestabilita di cemento;
- miscelazione meccanica con idoneo miscelatore per un minuto;
- breve miscelazione manuale;
- aggiunta di acqua;
- miscelazione meccanica col miscelatore per un minuto;
- breve miscelazione manuale;
- aggiunta metà dose dell'emulsione;
- miscelazione meccanica col miscelatore per un minuto;

- breve miscelazione manuale;
- aggiunta dell'altra metà di emulsione;
- miscelazione meccanica col miscelatore per un minuto;
- breve miscelazione manuale;

Successivamente in figura 2.11 vengono riportate le fasi essenziali della miscelazione:

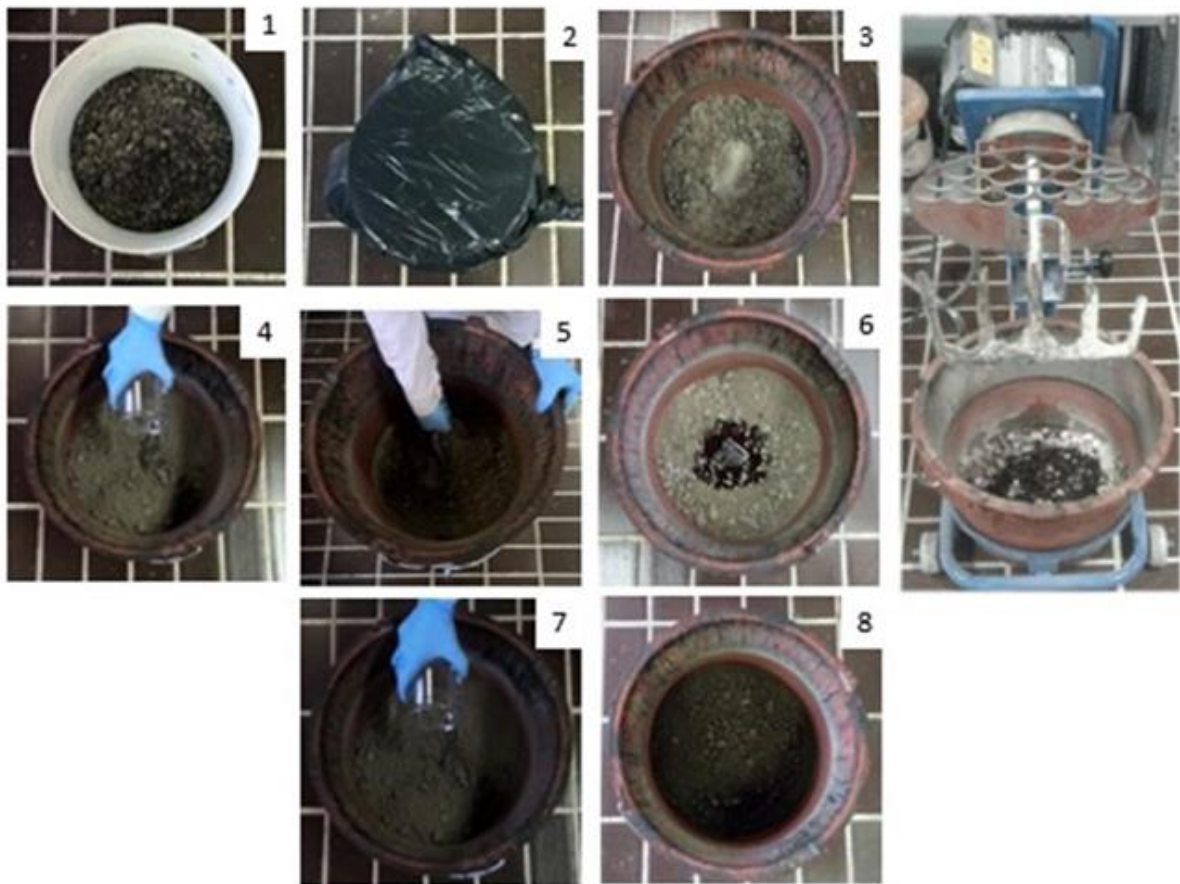


Figura 3.11 Prima e seconda fase di miscelazione

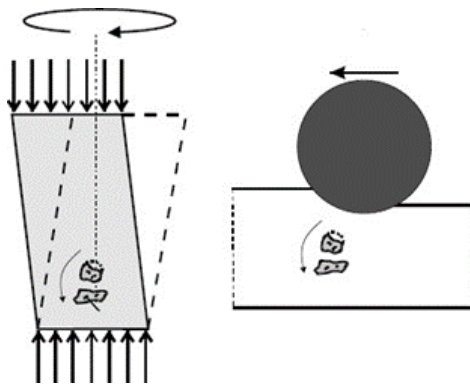
### 2.2.6 Compattazione

La compattazione dei provini si inizia immediatamente al termine della miscelazione eseguendo le direttive della normativa UNI EN 12697-31.

La compattazione dei provini si esegue tramite pressa giratoria a taglio (*Shear Gyrotory Compactor*, SGC).

La pressa giratoria a taglio esegue la compattazione mediante l'applicazione contemporanea di una pressione assiale costante e di una rotazione, secondo un angolo di inclinazione predefinito.

Tale pressa è in grado di applicare una pressione verticale costante di 600 kPa assieme ad una rotazione secondo un angolo di  $1,25^\circ$  con una velocità di rotazione di 30 giri/minuto, che riproduce l'azione dei rulli compattatori eseguita in situ (Figura 2.12).



*Figura 2.12 Confronto tra compattazione con pressa giratoria a taglio e compattazione in situ mediante rulli.*

L'apparecchiatura è costituita da un telaio di contrasto al cui interno sono inseriti una barra di inclinazione, il pistone pneumatico che permette l'applicazione del carico verticale ed un basamento rotante.

La compattazione avviene all'interno di fustelle cilindriche, realizzate in acciaio inox, costituite da una piastra di base rimovibile e dalle pareti laterali; esse possono avere diametro interno pari a 100mm oppure 150 mm.

Per il confezionamento dei provini studiati nella sperimentazione si utilizzò una fustella con diametro di 150 mm (sia per la miscela A che per la miscela B).

La miscela viene inserita nella fustella per la compattazione tra due dischi di carta nella parte superiore e inferiore usati per facilitare le operazioni di estrazione del provino (Figura 2.13).

La miscela viene inserita nella quantità necessaria al confezionamento di un provino (2506g per la miscela A e 2544g per la miscela B) di caratteristiche volumetriche note.



*Figura 2.13 Inserimento del materiale nella fustella.*



*Figura 2.14 Pressa a taglio giratoria con fustella.*





*Figura 2.15 Pressa a taglio giratoria con fustella in funzione.*

L'apparecchiatura prevede due possibili modalità di compattazione:

- A energia imposta, fissando il numero di giri.
- Ad altezza imposta, fissando l'altezza finale del provino addensato, quindi il suo volume.

Nella presente sperimentazione si è adoperata la seconda modalità per il confezionamento dei provini, imponendo l'altezza finale pari a 60mm, al fine di ottenere la percentuale di vuoti prestabilita.

La pressa giratoria è dotata di un software di controllo, che permette di monitorare e registrare i valori dell'altezza corrispondenti ad ogni rotazione della fustella a partire dall'altezza iniziale fino a quella finale. Nella prima schermata del software di controllo della pressa giratoria vanno impostati tutti i parametri e la modalità di compattazione (Figura 2.16).

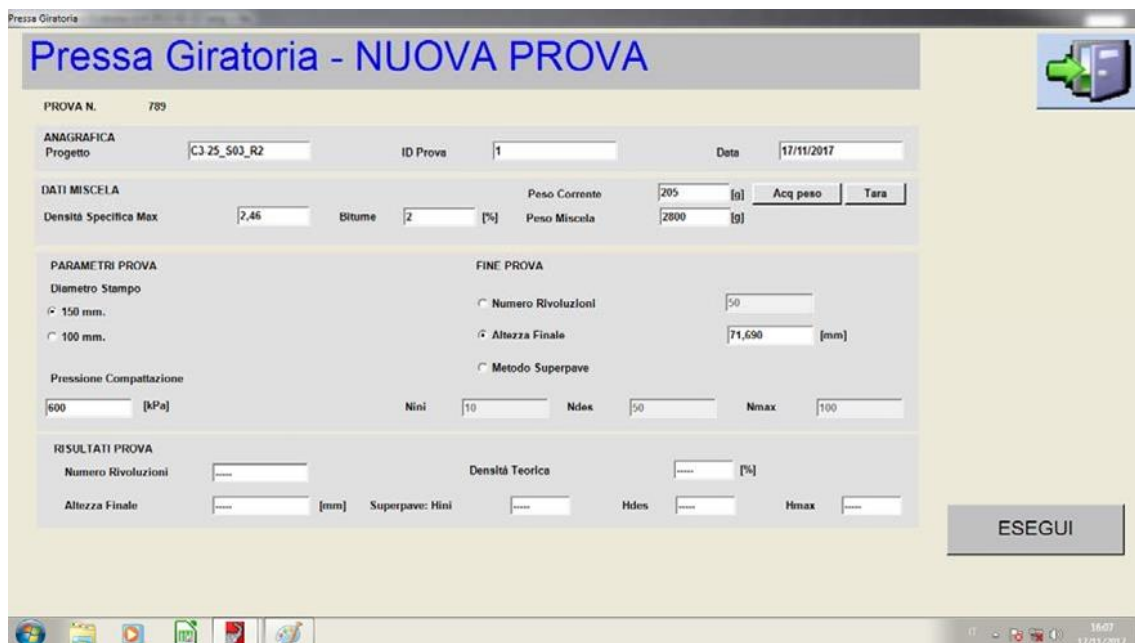


Figura 2.16 Impostazione parametri per la compattazione.

L'output del software è una curva che mostra il procedere della compattazione; sull'asse delle ascisse è riportato il numero dei giri, mentre sulle ordinate l'altezza del provino (Figura 2.17).



Figura 2.17 Curva di compattazione.

Terminata la compattazione, prima di procedere all'estrazione del provino, si pesa nuovamente la fustella contenente il provino compattato.

Tale operazione consente di valutare la bontà della compattazione quantificando l'eventuale quantità di acqua e altri materiali fini espulsi durante la compattazione stessa.

Infatti, se tale quantità supera lo 0-5% del provino stesso si ritiene che durante il processo di compattazione sia stata modificata in maniera significativa la composizione del provino stesso, andando così a falsare l'analisi dei risultati.

Successivamente il provino viene estratto con l'apposito pistone che spinge verso l'alto il fondo della fustella e il provino da essa contenuto. Il provino viene poi pesato immediatamente al termine della compattazione.

### **2.2.3 Maturazione**

I provini realizzati vengono fatti maturare in maniera non coperta, cioè non sigillati, per permettere la normale evaporazione attraverso le superfici esposte all'aria.

Al termine della compattazione i campioni sono sistemati in un ambiente a temperatura controllata di 20°C e un'altra serie di campioni in un ambiente di 40°C. Sono considerati due tempi di maturazione di 3 giorni e 28 giorni, dopo i quali è stata eseguita la prova di caratterizzazione meccanica.

### **2.2.4 Misura della perdita d'acqua per evaporazione**

Dopo la compattazione, durante la maturazione e prima dell'esecuzione delle prove meccaniche (dunque all'inizio e al termine della maturazione) ciascun provino viene pesato al fine di valutarne la perdita in peso.

Poiché la variazione di peso durante la maturazione è dovuta solo all'evaporazione dell'acqua, tale operazione permette di determinare la perdita di umidità rispetto al peso degli aggregati (*moisture loss*, DW), che i provini manifestano durante il processo di maturazione, calcolata secondo l'espressione seguente:

$$DW = \frac{M_0 - M_f}{M_w} = \frac{\Delta W_{maturazione}}{M_w} 100[\%]$$

dove:

$M_0$  = peso del provino all'inizio della maturazione;

$M_f$  = peso del provino al tempo  $t$

$\Delta W$  maturazione = acqua persa per evaporazione calcolata come differenza tra  $M_0$  e  $M_f$ .

L'evoluzione di DW durante il processo di maturazione è valutata considerando diversi tempi: 30, 60, 120, 240 minuti, 1, 2, 3, 7, 14 e 28 giorni.

### 2.2.5 Misura della resistenza a trazione indiretta

La resistenza dei campioni è determinata nella configurazione a trazione indiretta (*indirect tensile strength*, ITS), conformemente alla norma UNI EN 12697-23.

La resistenza a trazione indiretta è un parametro indicativo per garantire la buona trasmissione dei carichi veicolari attraverso gli strati di binder e di base alla fondazione e, quindi, al sottofondo. Sotto la continua azione da parte dei carichi esterni, vengono, infatti, indotte flessioni all'interno degli strati bituminosi fino al raggiungimento del momento critico di prima fessurazione. La microfessurazione così innescata può evolvere fino a raggiungere la superficie della pavimentazione stradale, diventando via preferenziale per l'infiltrazione delle precipitazioni atmosferiche e favorendo un ulteriore esponenziale degrado (Figura 2.20).

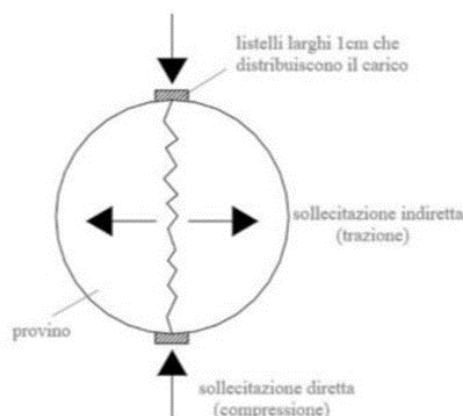


Figura 2.20 Schema della prova di trazione indiretta.

La resistenza a trazione indiretta è la massima tensione di trazione, calcolata a partire dal carico di picco applicato a rottura e dalle dimensioni del provino. Nello specifico, il valore di ITS si ottiene applicando un carico lungo una generatrice di un provino cilindrico (diametro verticale) fino al raggiungimento della rottura diametrale. La rottura del campione avviene, per trazione, nella direzione ortogonale a quella di applicazione del carico, a causa dell'effetto Poisson. Tale prova, infatti, è detta di trazione "indiretta" perché, nonostante il provino venga compresso, esso viene anche sollecitato a trazione, lungo il piano diametrale orizzontale.

L'apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione di tale prova è una pressa di tipo statico ed è costituita da un telaio di carico, formato da due piatti paralleli orizzontali. La testa di carico inferiore è fissata ad una base munita di due guide verticali lungo le quali scorre la testa di carico superiore, senza apprezzabile attrito, mediante due manicotti. I piatti sono azionati da una pressa meccanica ad azione continua, di portata pari a 50 kN e dotata di un dispositivo che consente al piatto inferiore di spostarsi verso l'alto con una velocità di avanzamento costante, indipendentemente dall'intensità del carico applicato (la prova, dunque è in controllo di velocità di deformazione). La pressa è dotata di una cella di carico che misura lo sforzo opposto dal provino al suo schiacciamento, in particolare allo spostamento imposto, con un'accuratezza di  $\pm 0.2$  kN. Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli di acciaio temprato, aventi larghezza e spessore variabili in funzione delle dimensioni del provino e lunghezza pari almeno a quella della linea di contatto del provino stesso.

Queste bande di carico, in acciaio temprato, sono caratterizzate da una superficie concava con un raggio di curvatura corrispondente al raggio nominale del provino. Inoltre, vengono montati due trasduttori di tipo LVDT, aventi una corsa di 25 mm, in grado di registrare un segnale elettrico la cui intensità è proporzionale allo spostamento orizzontale. L'apparecchiatura per la prova è collegata a un sistema computerizzato di acquisizione e controllo dati, tramite il software UTM II (Figura 2.21).

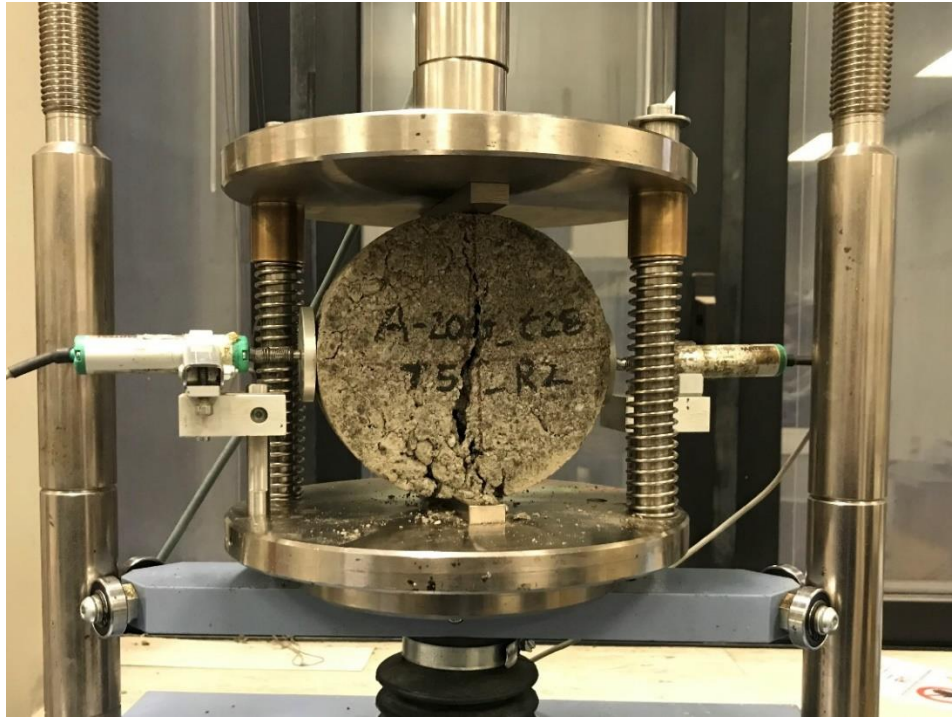


*Figura 2.21 Apparecchiatura per la misura dell'ITS.*

Le prove sono svolte a due temperature di prova differenti pari a 25° C e 5° C, dunque, prima della loro esecuzione i provini vengono condizionati alla temperatura di esecuzione del test per almeno 4 ore. Preliminarmente sono stati tracciati su una faccia del provino due diametri tra loro ortogonali e si è misurato lo spessore del provino alle quattro estremità dei diametri e calcolato lo spessore medio. Il provino viene, quindi, collocato, ben centrato, tra i piatti della pressa che hanno il compito di comprimere il provino stesso, in maniera tale che il suo asse sia orizzontale, che l'asse del listello di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del listello inferiore e che entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino.

Sono, inoltre, montati due trasduttori atti a misurare lo spostamento orizzontale, facendo in modo che essi siano ben centrati sia rispetto allo spessore che rispetto all'altezza del provino e facendo in modo che abbiano una leggera precompressione (la somma della precompressione di entrambi deve essere almeno 0,5 mm). Sono impostati nel software il tipo di prova ed i parametri relativi ad essa, ovvero diametro e altezza del provino. A questo punto si può avviare la compressione del provino con un carico diametrale e continuo, senza sbalzi, a una velocità costante di deformazione (avanzamento del piatto inferiore) di  $50,8 \pm 2$  mm/min in accordo

con la normativa, fino a raggiungere il carico di picco e continuando la prova fino a quando il provino raggiunge la rottura, cioè collassa (Figura 2.22).



*Figura 2.22 Collasso del provino.*

In output si ottengono, oltre alle curve carico-deformazione verticale e carico-deformazione orizzontale (Figura 2.23), visualizzabili già durante l'esecuzione del test, tutti i punti che formano tali curve, il carico di rottura a compressione  $P$  e la resistenza a compressione indiretta ITS, calcolata tramite la seguente relazione:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t}$$

dove:

- $P$  = massimo carico assiale di compressione;
- $d$  = diametro del provino;
- $t$  = spessore medio del provino.

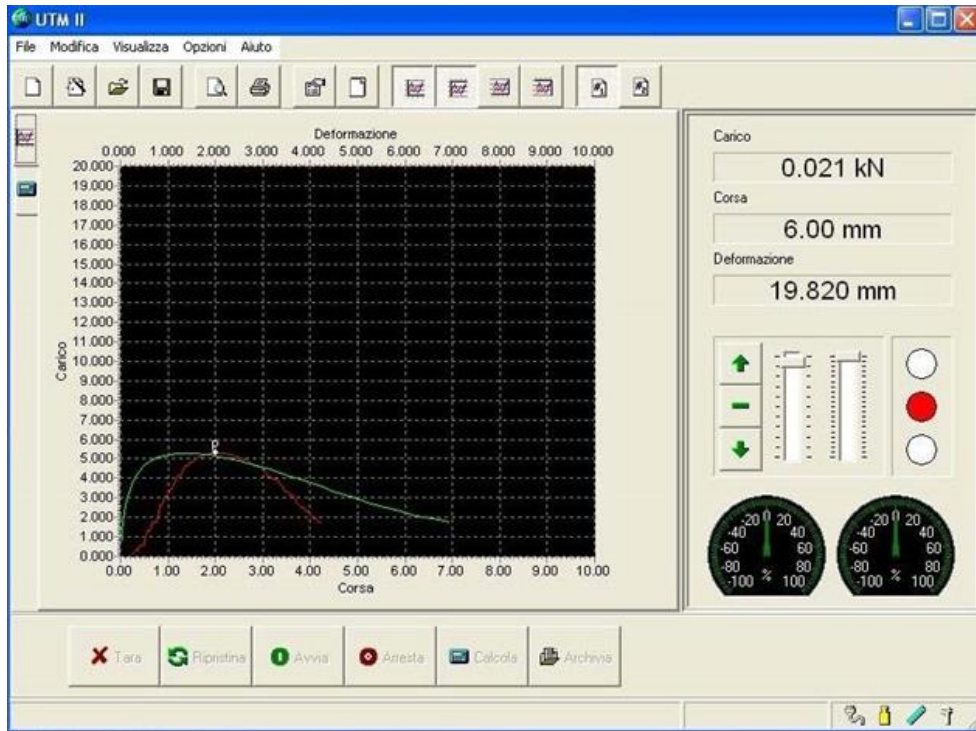
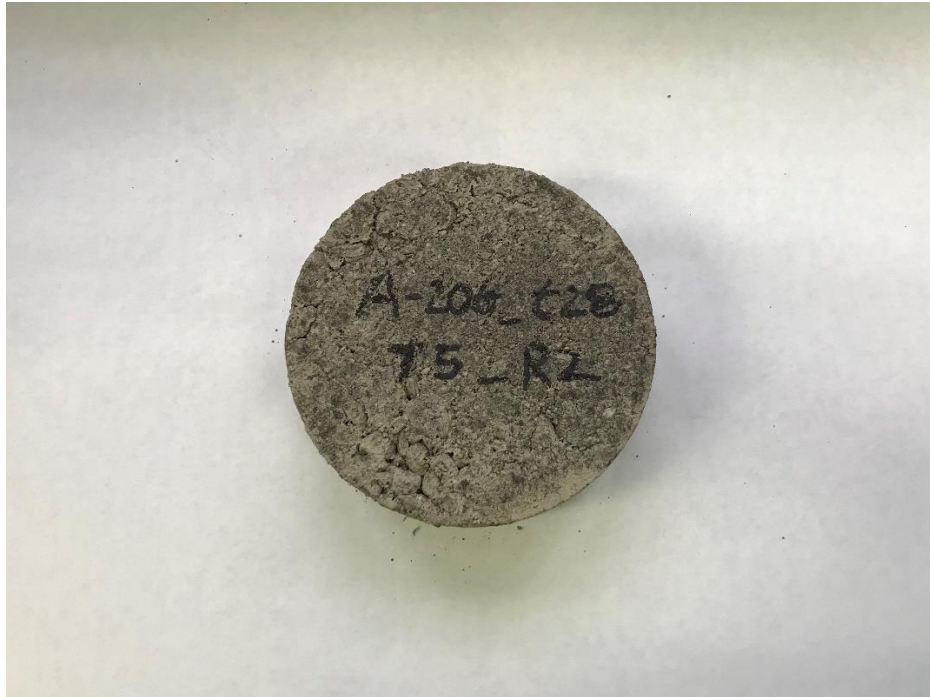


Figura 2.23 Curva carico-deformazione verticale (curva rossa) e carico-deformazione orizzontale (curva verde).

Al termine della prova è possibile reperire i dati di costruzione della curva carico-spostamento, che vengono archiviati direttamente e identificati tramite corrispondente numero.

Un'ultima schermata-video, permette di reperire velocemente i dati di prova ed i valori ottenuti, sia il carico di rottura a compressione P, sia la resistenza a trazione indiretta ITS.





*Figura 2.24 Provino prima di essere sottoposto alla prova di trazione indiretta.*



*Figura 2.25 Provino dopo aver effettuato la prova di trazione indiretta.*

# Capitolo 3

## Programma sperimentale

Nel seguente capitolo si inquadrerà il presente progetto sperimentale, si illustreranno gli obiettivi prefissati e si descriverà l'organizzazione del programma sperimentale.

### **3.1 Inquadramento del progetto**

Il lavoro oggetto della seguente sperimentazione si focalizza sullo studio dell'effetto della temperatura e del dosaggio di cemento sulla resistenza di conglomerati bituminosi riciclati a freddo. Nel dettaglio si sono studiate due miscele (A e B), la cui composizione riportata in tabella 3.1 è tipicamente utilizzata in Italia per la produzione di conglomerati bituminosi a freddo per strati di base.

Il programma sperimentale prevede la miscelazione e la compattazione dei provini, di cui le proprietà volumetriche sono fissate, con particolare attenzione i vuoti della miscela sono fissati al 13%.

Infine, sui provini ottenuti dalle due differenti miscele, fatti maturare metà a 40°C e i restanti a 20°C, è stata misurata la perdita d'acqua e la resistenza a trazione indiretta ITS, a due differenti temperature di prova, 5 e 25 °C.

Materiali	A	B
RAP [%]	80	80
Sabbia basaltica	14	14
Filler calcareo	6	6
Bitume residuo da emulsione (emulsione) [%] *	2 (3.33)	2 (3.33)
Cemento [%] *	1,5	3
Acqua totale [%] *	4,5	4,5

\*rispetto alla massa di aggregati

*Tabella 3.1 Composizione delle due miscele A e B*

## 3.2 Obiettivo

L'obiettivo del presente programma sperimentale è studiare il comportamento delle due miscele a freddo dopo aver fatto delle prove di trazione indiretta. Si valuta quindi, la conformità delle due miscele ai capitolati italiani europei considerando: due tempi di maturazione (3 e 28 giorni), due temperature di maturazione (20 e 40 °C) e due differenti temperature di prova (5 e 25°C).

## 3.3 Organizzazione del programma sperimentale

La sperimentazione è stata condotta nel Laboratorio di strade "F. A. Santagata" del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura dell'Università Politecnica delle Marche. Le attività di laboratorio sono mostrate nella Tabella 3.1.

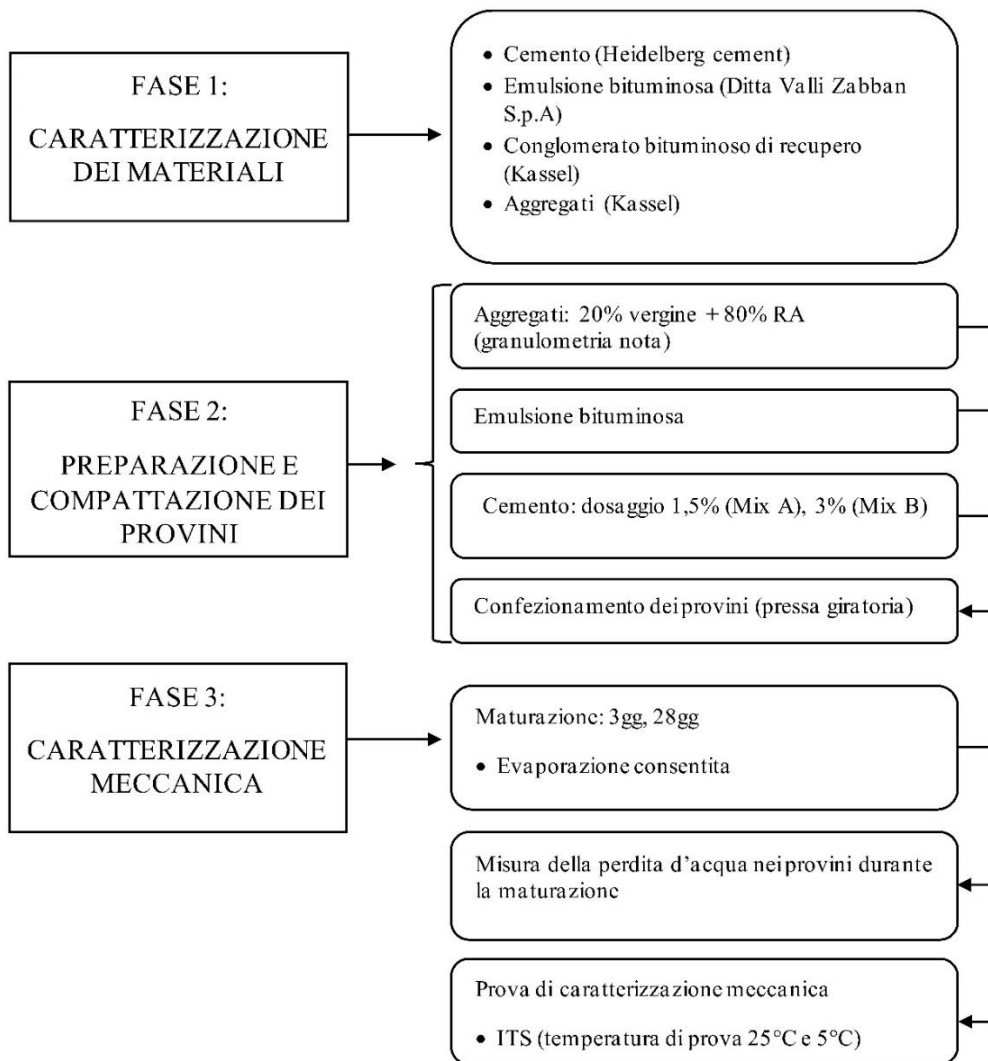


Tabella 3.1 Programma sperimentale

# Capitolo 4

## Analisi Risultati

In questo capitolo verranno illustrati ed analizzati i risultati della sperimentazione svolta. Si presenteranno dapprima i risultati della compattazione e successivamente saranno analizzati i risultati ottenuti in termini di caratteristiche meccaniche delle miscele. Verranno messi a confronto parametri diversi per lo studio della perdita d'acqua e per la resistenza a trazione indiretta. Un ultimo paragrafo sarà invece dedicato al confronto tra la perdita d'acqua e i valori di ITS delle due miscele.

### 4.1 Esempio risultati

Si illustra il procedimento impiegato per definire la composizione dei provini, in massa e in volume.

Nella Tabella 4.1 è riportato un esempio di composizione della miscela A con tempo di maturazione pari a 3 giorni con una temperatura di maturazione di 20°C ed una di prova pari a 5°C, prima in termini di massa, poi in volume. Le diverse colonne della tabella descrivono, nell'ordine, il tipo e il nome del materiale, il dosaggio degli aggregati asciutti e dei restanti componenti di ciascun provino (terza colonna), il peso del provino secco (senza acqua) e quello dei solidi (aggregati + cemento). Nella sesta colonna è riportata la massima densità asciutta, la massa volumica dei diversi componenti della miscela e il volume occupato da ciascuno di essi. Infine, le ultime due colonne riportano il volume dei secchi (esclusa, dunque, l'acqua) e quello dei solidi.

Column ID	1 Name	2 Dosage with oven-dried aggregates [g]	3 Dry Weight (no water) [g]	4 Solids Weight (no Bitumen) [g]	5 Maximum (dry) density [g/cm <sup>3</sup> ]	6 Density (apparent) [g/cm <sup>3</sup> ]	7 Volume [cm <sup>3</sup> ]	8 Dry Volume (no water) [cm <sup>3</sup> ]	9 Solids Volume (no Bitumen) [cm <sup>3</sup> ]
RA1	0/20	1856				2,737	678,2		
RA2	-	0				0,000			
VA1	-	0				0,000			
VA2	-	0				0,000			
VA3	-	0,0				0,000			
VA4	0/2	324,9				3,138	103,5		
Filler	0	139,2				2,800	49,7		
Cemento	0	34,8				3,010	11,6		
Bitumen		46,4				1,015	45,7		
Water		104,4				1,000	104,4		
Abs Water		33,8				1,000	33,8		
TOTAL		2506	2402	2355	2,702		993,2	888,8	843,0

Tabella 4.1 Calcolo delle masse e dei volumi dei componenti di una miscela.

Sottoposto il provino alla fase di compattazione mediante l'utilizzo della pressa girettoria si può arrivare a definire dai dati di output il volume del provino, i parametri di:

- densità totale del campione,  $\rho_b$ :

$$\rho_b = \frac{m_a + m_b}{V_a + V_b + V_{aria}}$$

dove:

$m_a$  = massa dell'aggregato;

$m_b$  = massa del bitume;

$V_m$  = volume degli aggregati;

$V_b$  = volume del bitume;

$V_{aria}$  = volume d'aria.

- densità a secco del campione,  $\rho_d$ :

$$\rho_d = \frac{m}{V}$$

$m$  = massa a secco del campione

$V$  = volume del campione

E quelli volumetrici di:

- vuoti nella miscela,  $V_m$ :

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 [\%]$$

dove:

$\rho_m$  = massa volumica massima;

$\rho_b$  = massa volumica apparente del provino in questione

- vuoti della miscela riempiti dai liquidi, VFL:

$$VFL = \frac{V_{b,res} + V_{w,free}}{V_v + V_{b,res} + V_{w,free}} \times 100 [\%]$$

dove:

$V_{b,res}$  = volume del bitume residuo;

$V_{w,free}$  = volume dell'acqua libera;

$V_v$  = volume dei vuoti d'aria;

Tutti questi parametri sono valutati in corrispondenza della variazione del numero di giri, nel nostro caso è stato imposta un'altezza pari a 60mm, e quindi del grado di compattazione raggiunto.

Impostando un foglio di calcolo Excel e inserendo le formule delle grandezze sopra citate, che si desiderano monitorare, si può eseguire l'elaborazione dei dati.

A livello esemplificativo, si mostra in Tabella 4.2 l'analisi delle altezze h registrate in continuo dalla pressa giratoria, grazie alle quali si possono definire le grandezze volumetriche.

Si riportano per intero i primi dieci giri di compattazione, per poi passare direttamente al giro finale dove si è raggiunta l'altezza prestabilita.

Gyration	Specimen Height	Specimen Volume	Specimen Total Density	Specimen Dry Density	Voids	Voids	Voids	Voids in	Voids in	Voids in	Voids filled	Voids filled
					(Air+Water free+abs)	(Air+Water free+abs)	(Air+Water free)	Aggregates (Air+Wfree+Wabs+Bit)	Aggregates (Air+Wfree+Wabs+Bit)	Aggregates (Air+Wfree+Bit)	with Liquids (Water+Bit)	with Liquids (Water+Bit)
N.	mm	[cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	V <sub>m</sub> [%]	V <sub>m</sub> [%]	V <sub>m</sub> <sup>*</sup> [%]	VA [%]	VA [%]	VA <sup>*</sup> [%]	VFL [%]	VFL [%]
0	77,242											
1	73,4	1298	1,931	1,850	31,53	31,53	28,92	35,05	35,05	32,45	27,63	27,63
2	71,5	1263	1,985	1,902	29,62	29,62	26,94	33,24	33,24	30,56	30,15	30,15
3	70,2	1241	2,020	1,936	28,36	28,36	25,64	32,05	32,05	29,33	31,98	31,98
4	69,215	1223	2,049	1,963	27,34	27,34	24,58	31,08	31,08	28,31	33,60	33,60
5	68,514	1211	2,070	1,984	26,59	26,59	23,80	30,37	30,37	27,58	34,84	34,84
6	67,981	1201	2,086	1,999	26,02	26,02	23,21	29,82	29,82	27,01	35,85	35,85
7	67,467	1192	2,102	2,014	25,46	25,46	22,62	29,29	29,29	26,46	36,89	36,89
8	67,028	1184	2,116	2,028	24,97	24,97	22,11	28,83	28,83	25,97	37,82	37,82
9	66,682	1178	2,127	2,038	24,58	24,58	21,71	28,46	28,46	25,59	38,58	38,58
10	66,346	1172	2,137	2,048	24,20	24,20	21,31	28,10	28,10	25,21	39,36	39,36
109	59,963	1060	2,365	2,266	16,13	16,13	12,94	20,44	20,44	17,25	63,64	63,64

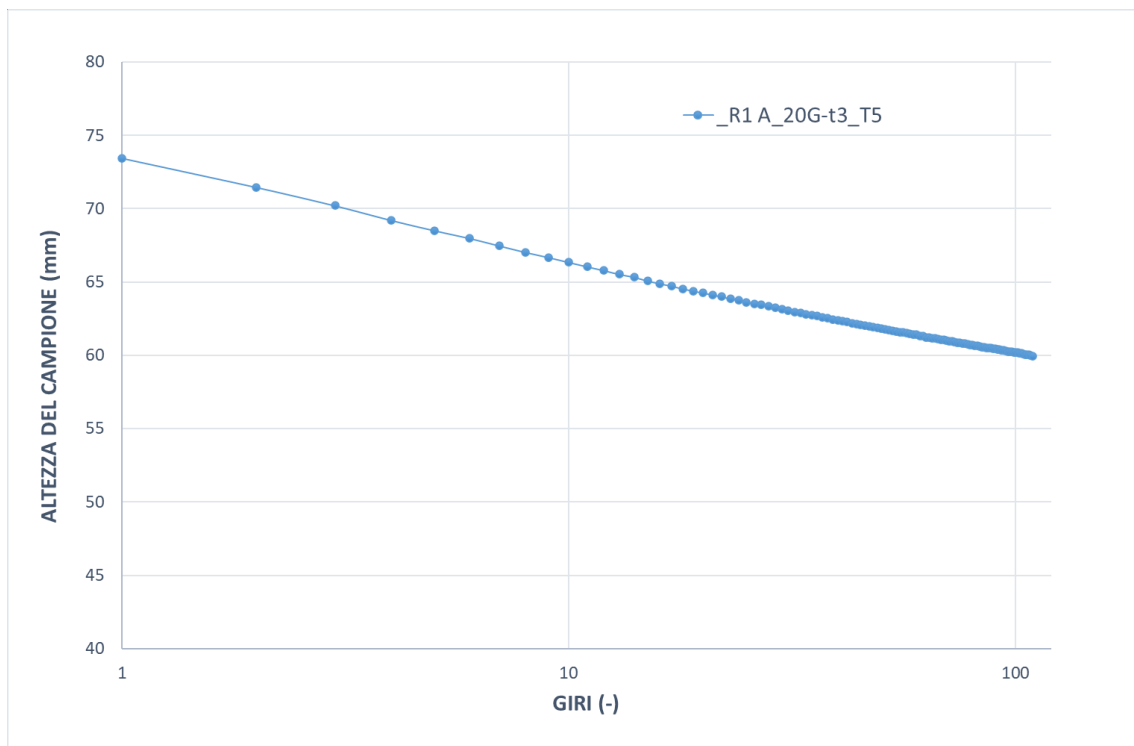
Tabella 4.2 Elaborazione dei dati: parametri di densità e volumetrici

Si considerano, ai fini dell'analisi delle caratteristiche volumetriche finali del provino, solo i valori relativi all'ultimo giro, cioè a fine compattazione, da cui si può vedere se il provino ha eventualmente espulso acqua, condizione a noi sfavorevole poiché significa che la miscela di progetto non si è mantenuta tale.

In precedenti sperimentazioni è stato dimostrato che una fuoriuscita importante di acqua e materiale fine è raggiunta per valori di VFL prossimi al 90%. Dunque, non è necessario raggiungere obbligatoriamente la saturazione del provino, corrispondente a valori di VFL = 100% per espellere acqua, probabilmente a causa della presenza di vuoti non interconnessi all'interno del provino stesso.

Si può anche seguire l'avanzamento della compattazione dal grafico prodotto direttamente dalla pressa, qui sotto riproposto in figura 4.1, dove al variare del numero di giri segue il diminuire progressivo dell'altezza del provino, tracciando così la curva di compattazione.





*Figura 4.1 Curva di compattazione*

Dall'elaborazione si ottengono poi le curve dell'andamento di  $V_m$  e  $V_{FL}$ , come da figura 4.2, che rappresentano la variazione dei parametri considerati in ordinata, mentre in ascissa si riporta il progredire del numero di giri. Si nota che con il progredire della compattazione il valore dei vuoti  $V_m$  si riduce poiché i vuoti vengono ridotti per l'energia meccanica imposta, mentre l'andamento contrario è intrapreso dal  $V_{FL}$ , parametro che indica il grado di saturazione del provino.

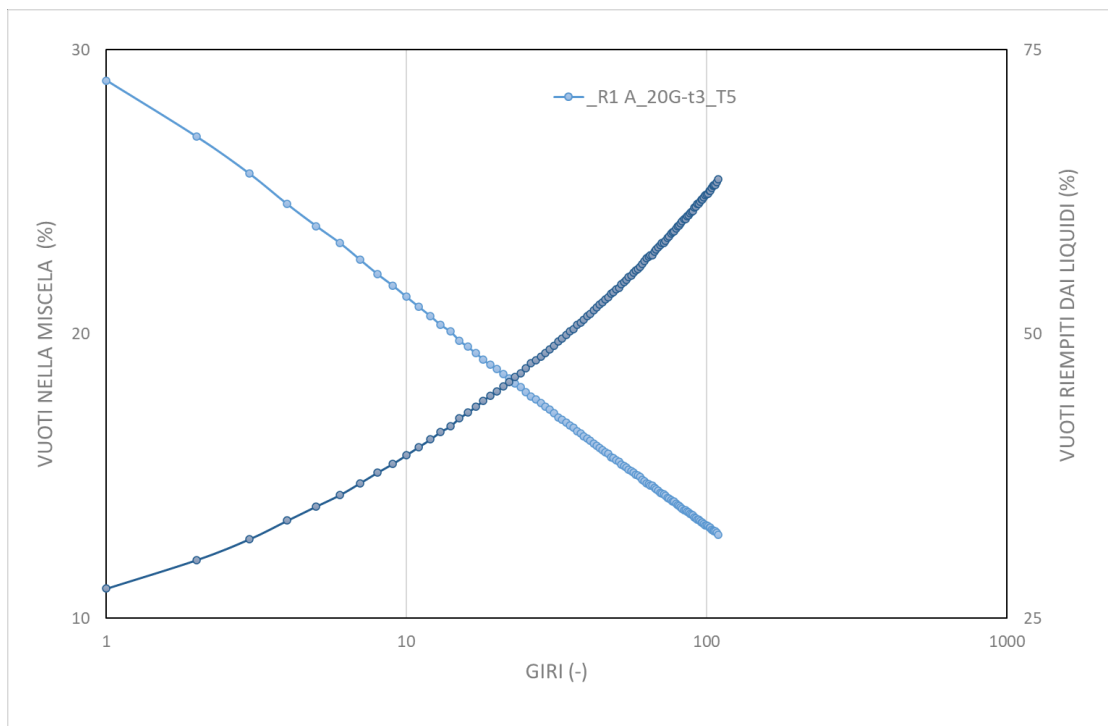


Figura 4.2 Curva di compattazione  $V_m$ ,  $V_{FL}$

Dalla prova di trazione indiretta eseguita sui vari provini delle due miscele abbiamo ottenuto un grafico riportato in figura 4.3 nel quale in relazione ai valori di carico applicato abbiamo ottenuto dei valori di spostamento orizzontale e verticale del provino prima di giungere a rottura.

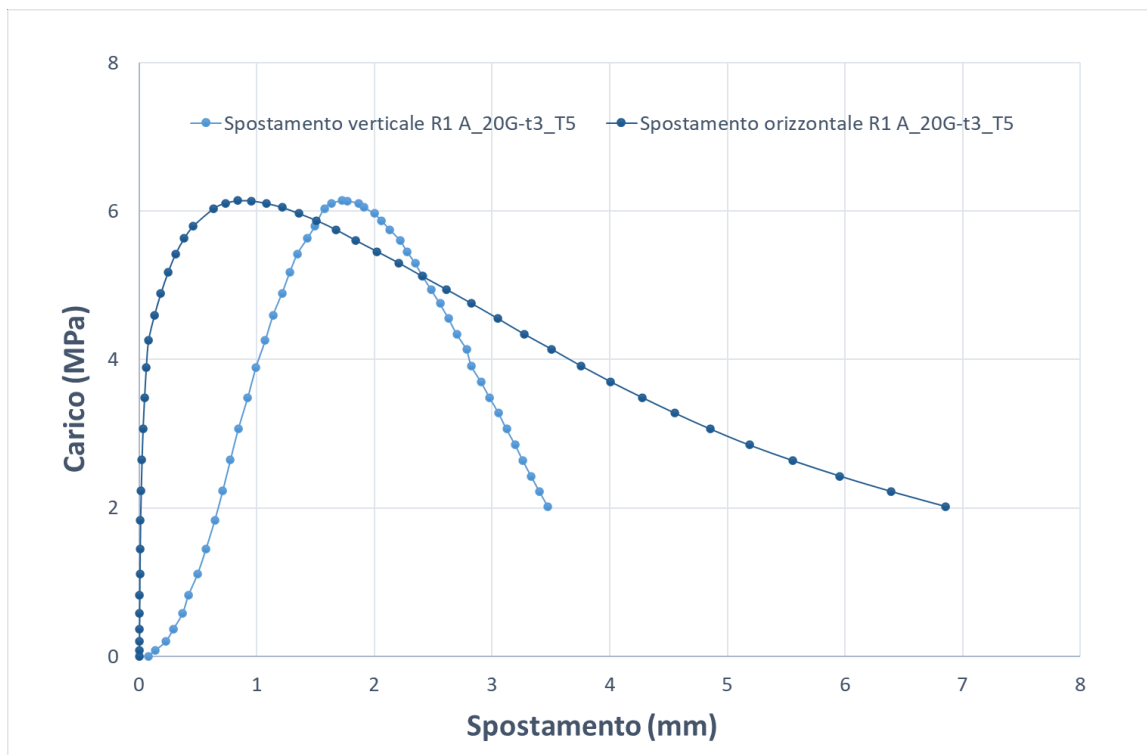


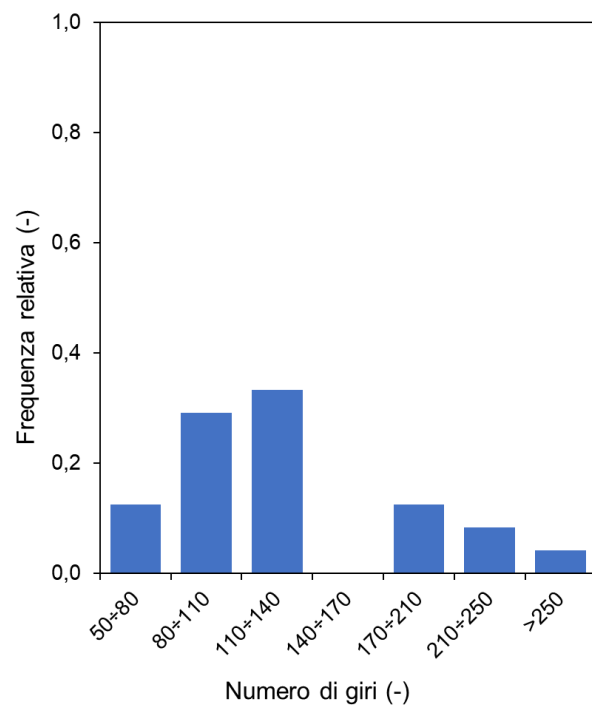
Figura 4.3 Curva Carico-spostamento

## 4.2 Valutazione della procedura di compattazione

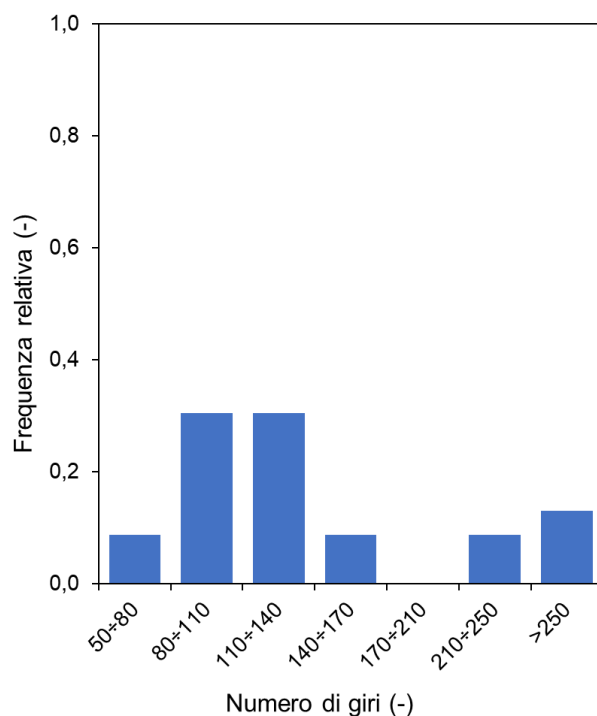
Nei 2 grafici riportati in figura 4.4 e figura 4.5 è riportato il numero di giri necessario alla pressa giratoria a taglio per ottenere i 24 provini della miscela A e i 24 provini della miscela B con altezza finale pari a 60mm.

Dagli istogrammi in figura possiamo notare come per la maggior parte dei provini sono stati ottenuti con un numero di giri in un range che va dagli 80 ai 140 giri.

E solo in alcuni casi è stato necessario un numero di giri maggiore ai 250 per produrre i provini. La procedura di compattazione è risultata piuttosto eterogenea, con un'alta variabilità dell'energia di compattazione necessaria per ottenere provini caratterizzati dalla stessa volumetria.



*Figura 4.4 Frequenza relativa del numero di giri necessari alla compattazione dei provini della miscela A*



*Figura 4.5 Frequenza relativa del numero di giri necessari alla compattazione dei provini della miscela B*

In figura 4.6 e in figura 4.7 si riporta la perdita di peso durante la loro compattazione che hanno avuto i 24 provini della miscela A e B rispettivamente. Possiamo notare che la maggior parte dei provini ha una perdita di peso dovuta alla compattazione compresa tra 0 e 0,05% per entrambe le miscele. La perdita di peso massima dovuta alla compattazione è pari allo 0,2%.

Da questi risultati possiamo dire che la compattazione è avvenuta con successo per i provini, in quanto abbiamo una perdita di peso limitata per tutti i provini, tale da non alterarne in maniera significativa la composizione.

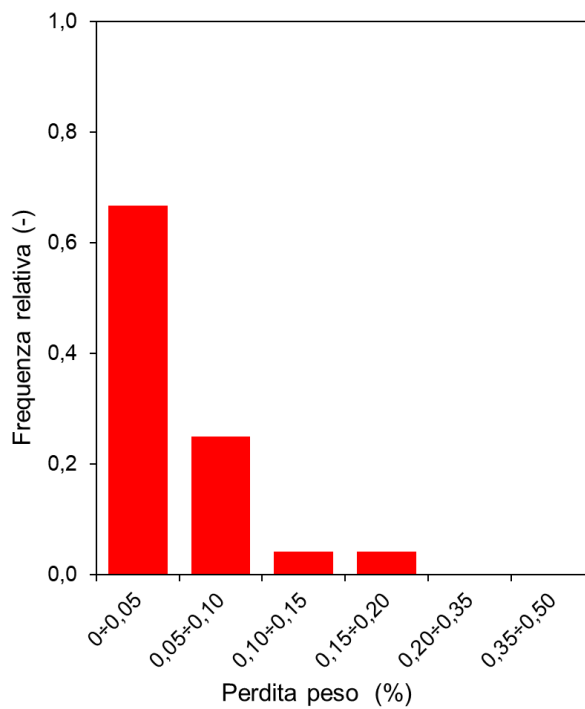


Figura 4.6 Frequenza relativa alla perdita di peso durante la compattazione dei provini della miscela A

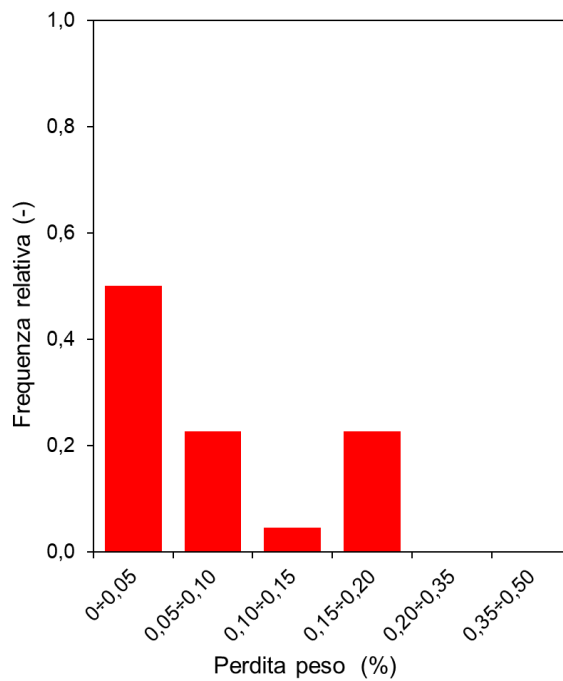


Figura 4.7 Frequenza relativa alla perdita di peso durante la compattazione dei provini della miscela B

Adesso passiamo all'analisi dei vuoti  $V_m$  delle miscele A e B attraverso i grafici riportati in figura 4.8 e in figura 4.9. Possiamo notare come dei 24 provini della miscela A la maggior parte ha un valore dei vuoti  $V_m$  che si assesta nel range che va 12.9% a 13.1%, e per un solo caso isolato abbiamo un valore di  $V_m$  che è maggiore di 13.2%.

A differenza della miscela A, nella miscela B abbiamo dei valori generali di  $V_m$  più bassi, che risiedono nell'intervallo che va da 11.7% a 11.8%.

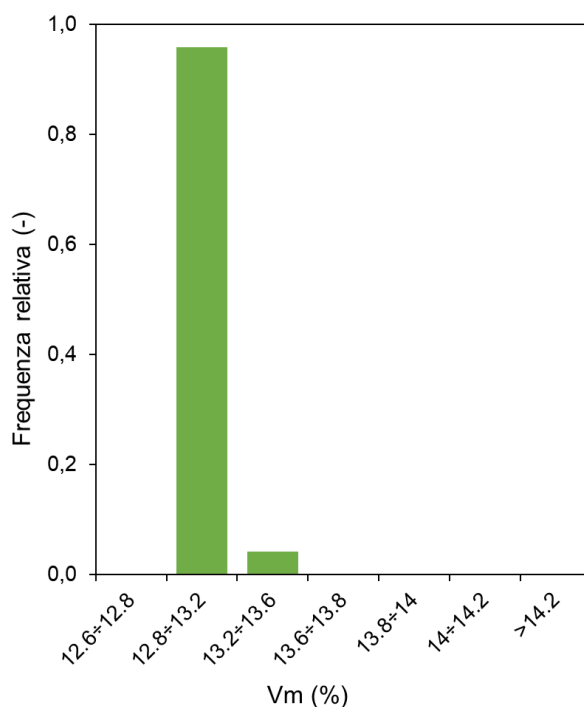


Figura 4.8 Frequenza relativa in funzione dei vuoti  $V_m$  per la miscela A

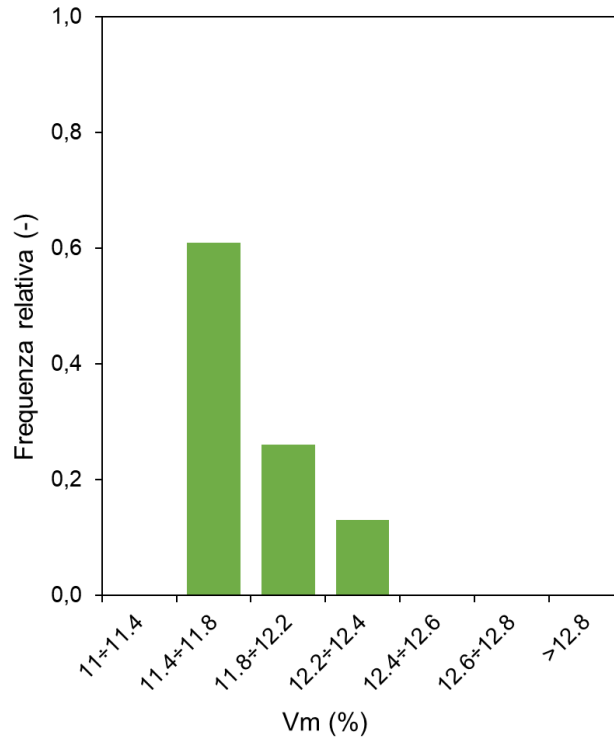


Figura 4.9 Frequenza relativa in funzione dei vuoti  $V_m$  per la miscela B

### 4.3 Evoluzione della perdita d'acqua

Per mostrare l'andamento della perdita d'acqua in funzione del tempo di maturazione, è stata scelta la rappresentazione dei risultati in un grafico, rappresentato in figura 4.10, dove nell'asse delle ascisse abbiamo il tempo, in questo caso espresso in giorni, e nell'asse delle ordinate abbiamo i valori relativi alla perdita d'acqua. Il grafico mostra i valori di perdita d'acqua relativi alla miscela A e alla miscela B ottenuti alle due diverse condizioni di maturazione (40 °C e 20°C). All'aumentare dei giorni di maturazione si nota come i valori di perdita d'acqua crescono indifferentemente dal tipo di miscela e dalle condizioni di maturazione. Facendo riferimento alle condizioni



di maturazione si può osservare come le due curve relative alle miscele che sono state fatte maturare ad una temperatura di 40°C descrivano una perdita d'acqua nettamente maggiore rispetto a quelle fatte maturare a 20°C. La temperatura maggiore infatti favorisce l'evaporazione dell'acqua, Per quanto riguarda il tipo di miscela, notiamo come la miscela A presenta una maggiore perdita d'acqua rispetto alla miscela B a parità di condizioni di maturazione. Ciò è da imputare al maggior dosaggio di cemento presente nella miscela B, che lega dunque un maggior quantitativo di acqua nel suo processo di idratazione, che diventa non evaporabile.

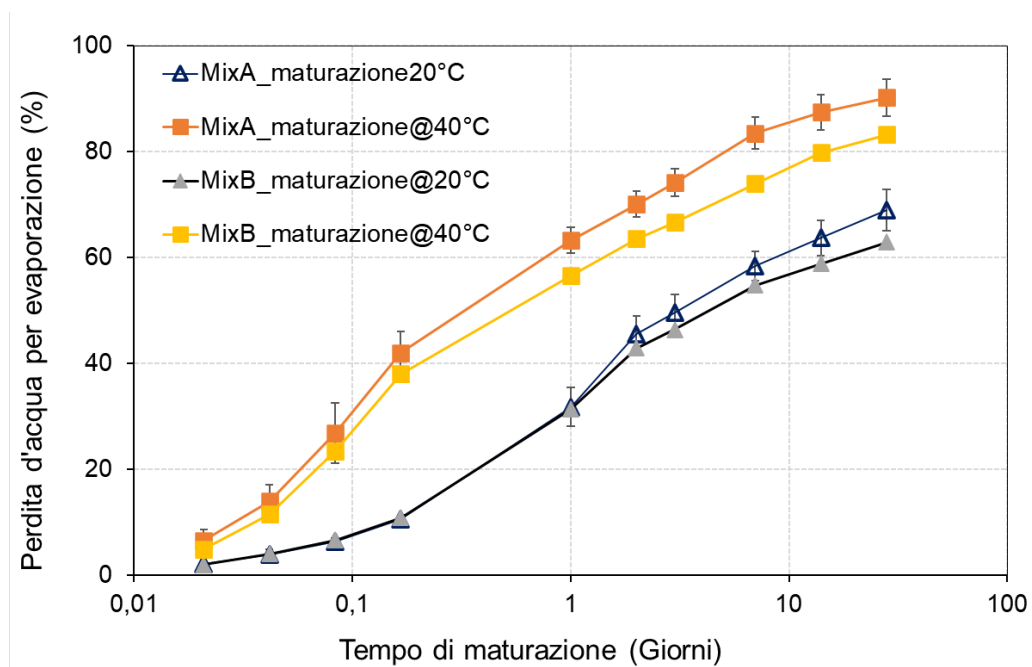


Figura 4.10 Confronto tra la perdita d'acqua per evaporazione delle miscele A e B rispetto al tempo di maturazione

Nei seguenti capitoli vengono analizzati i valori di DW per le diverse miscele, per le diverse condizioni di maturazione e condizioni di prova, al fine di determinare l'influenza che esse hanno avuto sui valori di DW. I dati sperimentali sono stati

correlati applicando una “regressione lineare totale”, in modo da riuscire a mettere in relazione due variabili indipendenti.

### 4.3.1 Effetto del dosaggio di cemento

In figura 4.11 si analizza l’effetto del dosaggio di cemento sulla perdita d’acqua, correlando i valori ottenuti per la miscela A e B a parità di condizioni di maturazione. Possiamo notare come la miscela A, rappresentata sull’asse delle ascisse del grafico, avendo una quantità minore di cemento ha una perdita d’acqua maggiore rispetto alla miscela B, rappresentata sull’asse delle ordinate in quanto il quantitativo di acqua non evaporabile è minore.

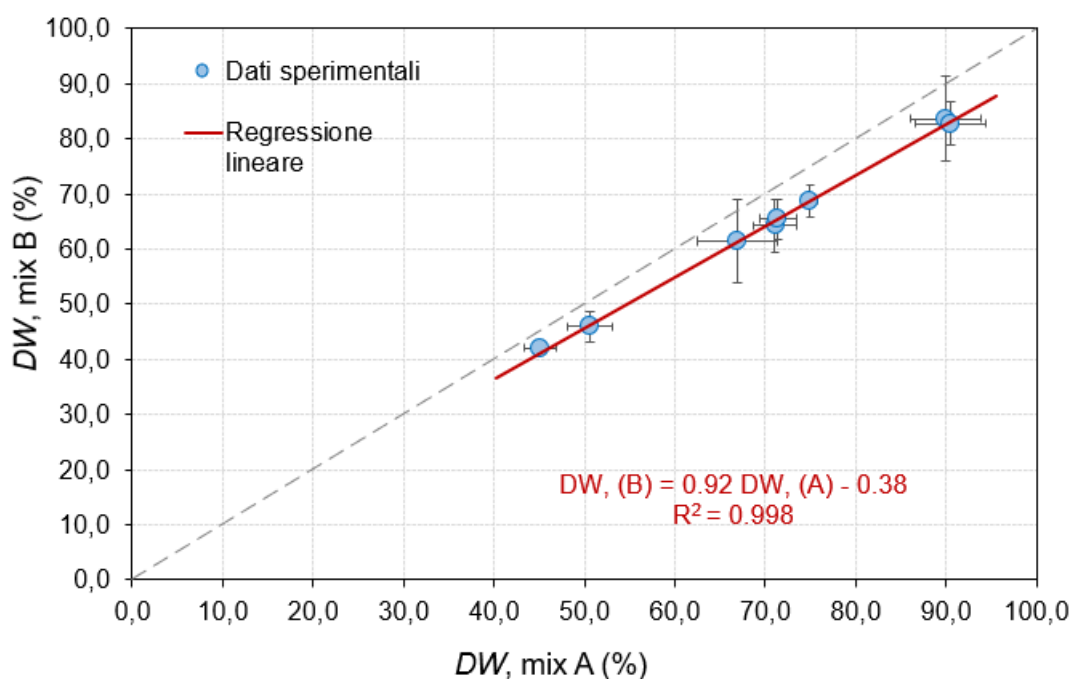


Figura 4.11 Effetto del dosaggio di cemento per l’evoluzione della perdita d’acqua

### 4.3.1 Effetto della temperatura di maturazione

Nella figura 4.12 si analizza l'effetto della temperatura di maturazione confrontando la perdita d'acqua dei provini maturati a 20°C, posta sull'asse delle ascisse, con la perdita d'acqua dei provini maturati a 40°C, sull'asse delle ordinate. Dal grafico possiamo notare come le miscele fatte maturare ad una temperatura di 40°C hanno avuto una perdita d'acqua, come già precedentemente osservato, nettamente maggiore rispetto alle miscele fatte maturare a 20°C.

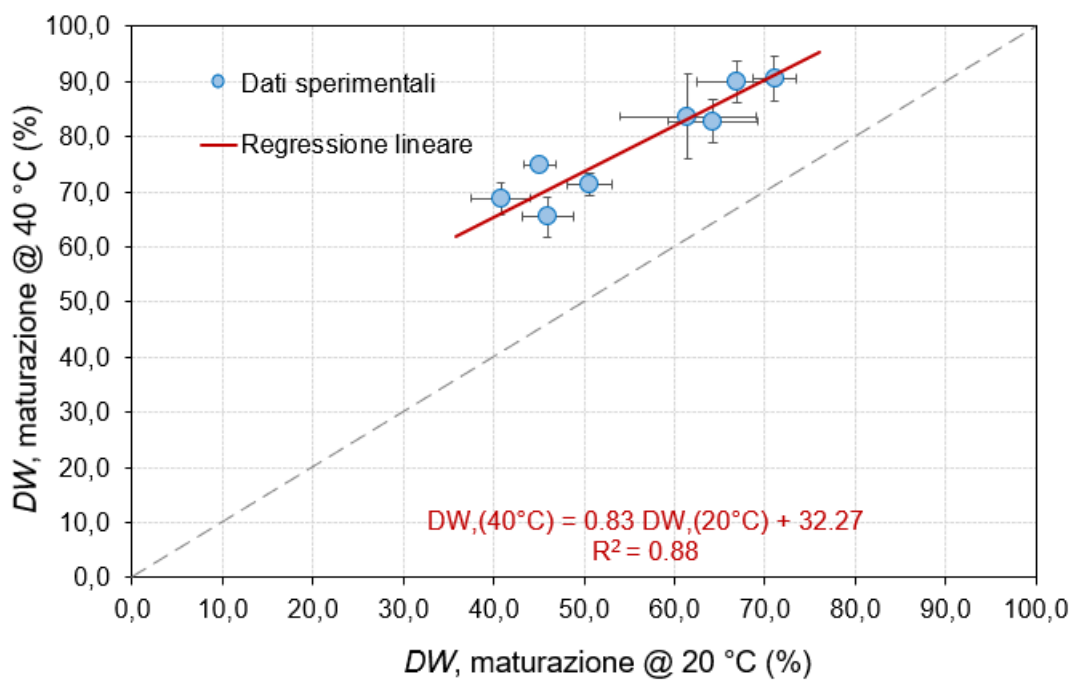


Figura 4.12 Effetto temperatura di maturazione delle miscele sulla perdita d'acqua

#### 4.4 Resistenza a trazione indiretta

In figura 4.13 sono riportati i valori medi di resistenza a trazione indiretta (ITS) ottenuti alle due diverse temperature di prova (pari a 5°C e 25°C) per la miscela A ai

tempi di maturazione di 3 e 28 giorni. Le barre di errore rappresentano la deviazione standard dei risultati ottenuti sui tre provini.

Possiamo dedurre dalle barre di errore che i valori di ITS dei vari provini alle differenti condizioni di stagionatura siano piuttosto omogenei tra di loro, tranne che per i valori di ITS relativi ai provini che sono maturati ad una temperatura di 20°C per 28 giorni e testati alla temperatura di 5°C, per i quali si è riscontrata una maggiore variabilità dei risultati.

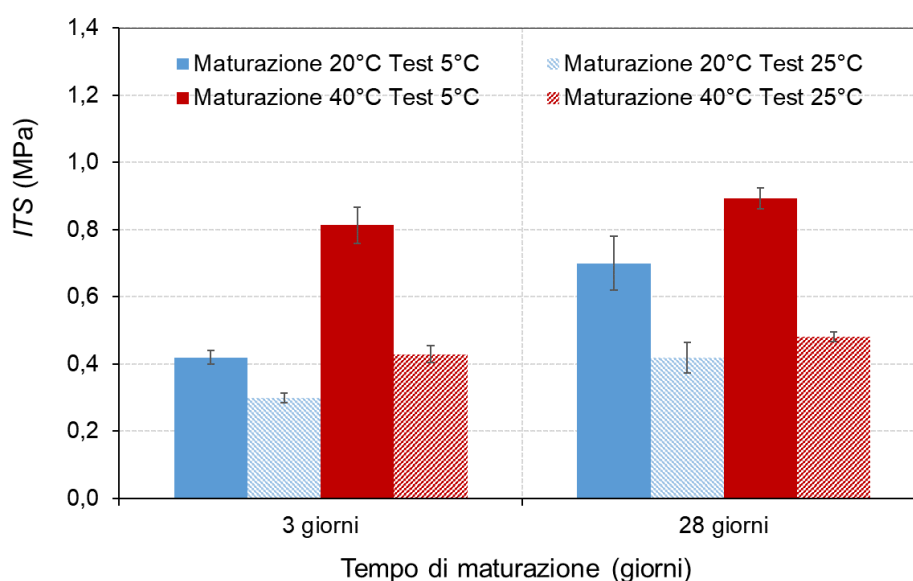


Figura 4.13 Relazione tra le condizioni di stagionatura e i valori di ITS per la miscela A

In figura 4.14 si riportano i valori medi di ITS ottenuti per la miscela B.

Anche in questo caso notiamo dalle barre di errore una maggiore variabilità dei risultati relativi alla prova di resistenza a trazione indiretta per i provini fatti maturare per 28 giorni ad una temperatura di 20°C e con una temperatura di prova pari a 5°C.

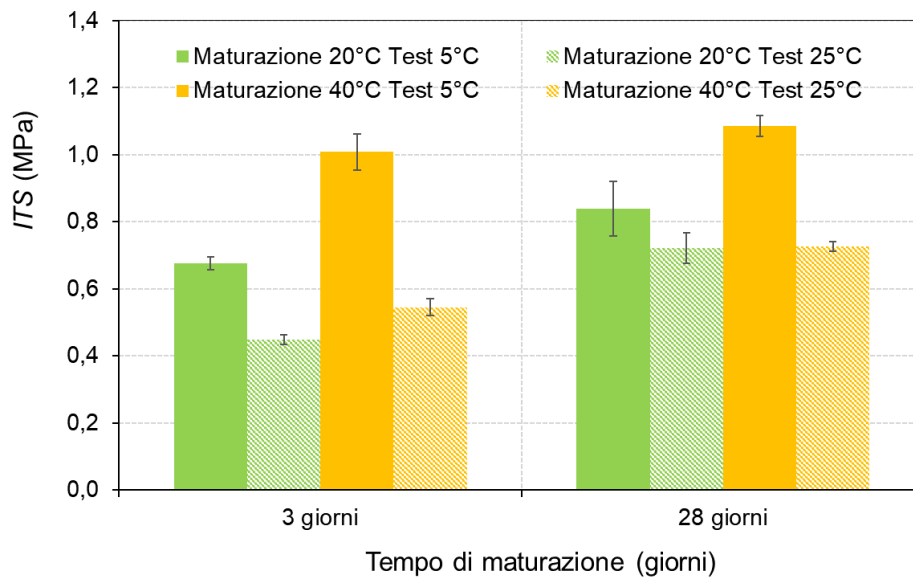


Figura 4.14 Relazione tra le condizioni di stagionatura e i valori di ITS per la miscela B

#### 4.4.1 Effetto del dosaggio di cemento

In figura 4.15 si analizza l'effetto del dosaggio di cemento sulla resistenza confrontando l'ITS ottenuti per la miscela A sull'asse delle ascisse, e B sull'asse delle ordinate. Si può notare come la miscela B, la quale contiene un maggior contenuto di cemento, ha dei valori di ITS visibilmente maggiori rispetto la miscela A.

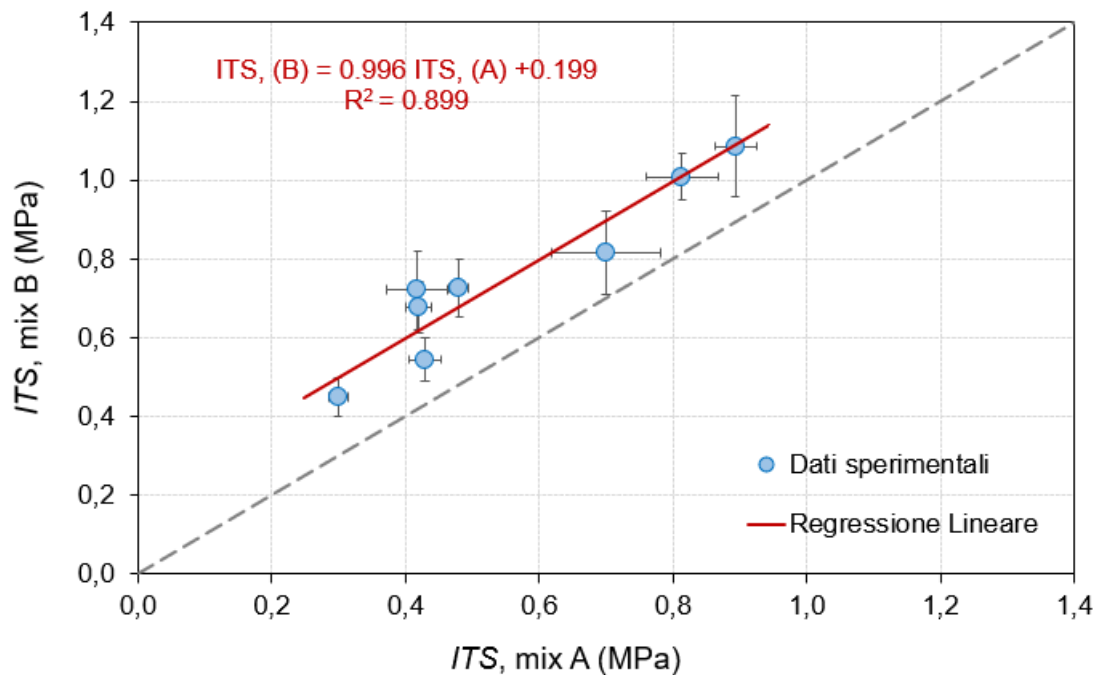


Figura 4.15 Effetto del dosaggio di cemento sulla resistenza a trazione indiretta

#### 4.4.2 Effetto temperatura di maturazione

In figura 4.16 si analizza l'effetto della temperatura di maturazione confrontando l'ITS dei provini maturati a 20°C con l'ITS dei provini maturati a 40°C. Dal grafico osserviamo che i provini fatti maturare a 40°C presentano dei valori di ITS molto più alti rispetto ai valori di ITS dei provini fatti maturare con temperatura di maturazione di 40°C. Ciò è dovuto alla maggiore velocità di maturazione dovuta all'alta temperatura, che favorisce l'evaporazione dell'acqua, la rottura dell'emulsione bituminosa e l'idratazione del cemento.

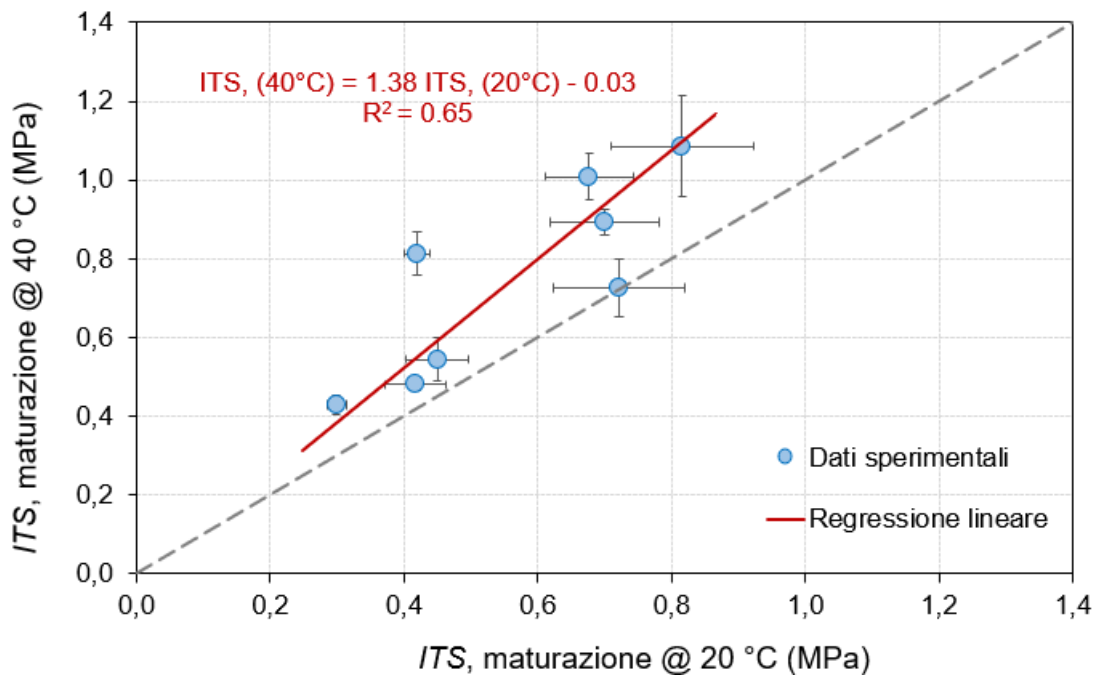


Figura 4.16 Effetto della temperatura di maturazione sulla resistenza a trazione indiretta

#### 4.4.3 Effetto del tempo di maturazione

Nella figura 4.17 si valuta l'effetto del tempo di maturazione confrontando l'ITS ottenuto dopo 3 e 28 giorni di maturazione. I provini che sono stati fatti maturare con un tempo di 28 giorni hanno un ITS decisamente maggiore rispetto i provini che hanno avuto un tempo di maturazione di 3 giorni.

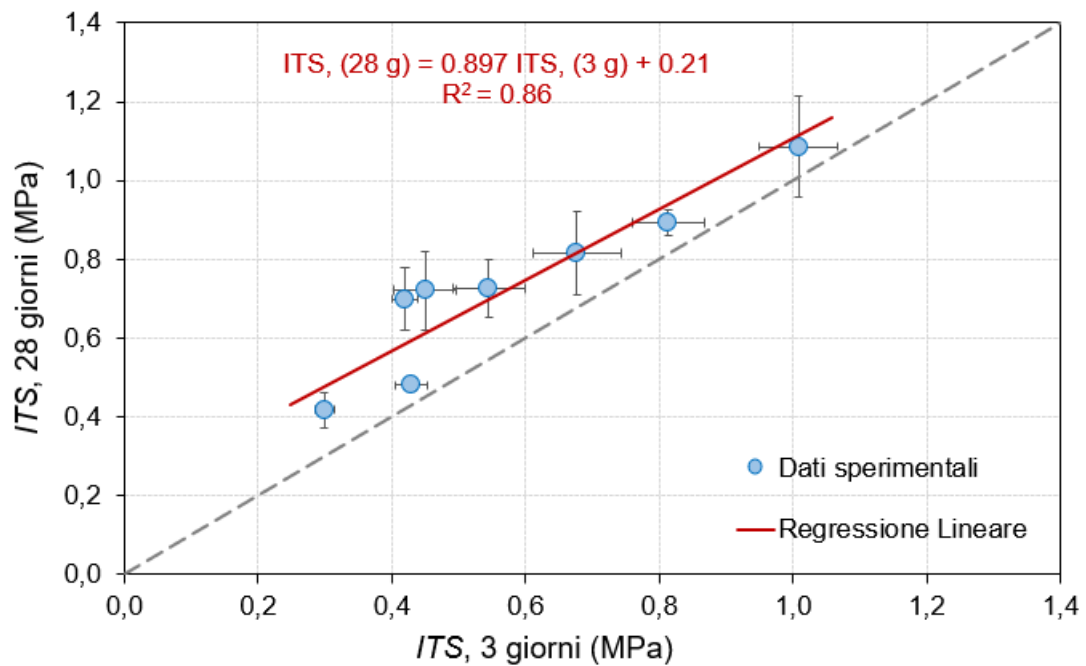


Figura 4.17 Effetto del tempo di maturazione delle miscele sulla resistenza a trazione indiretta

#### 4.4.4 Effetto temperatura di prova

In figura 4.18 si valuta l'effetto della temperatura di prova confrontando l'ITS dei provini testati a 5°C e 25°C. Dal grafico si evince che i provini sui quali è stata eseguita la prova di resistenza a trazione indiretta a 5°C presentano dei valori di ITS più elevati rispetto ai provini con una temperatura di prova pari a 25°C.



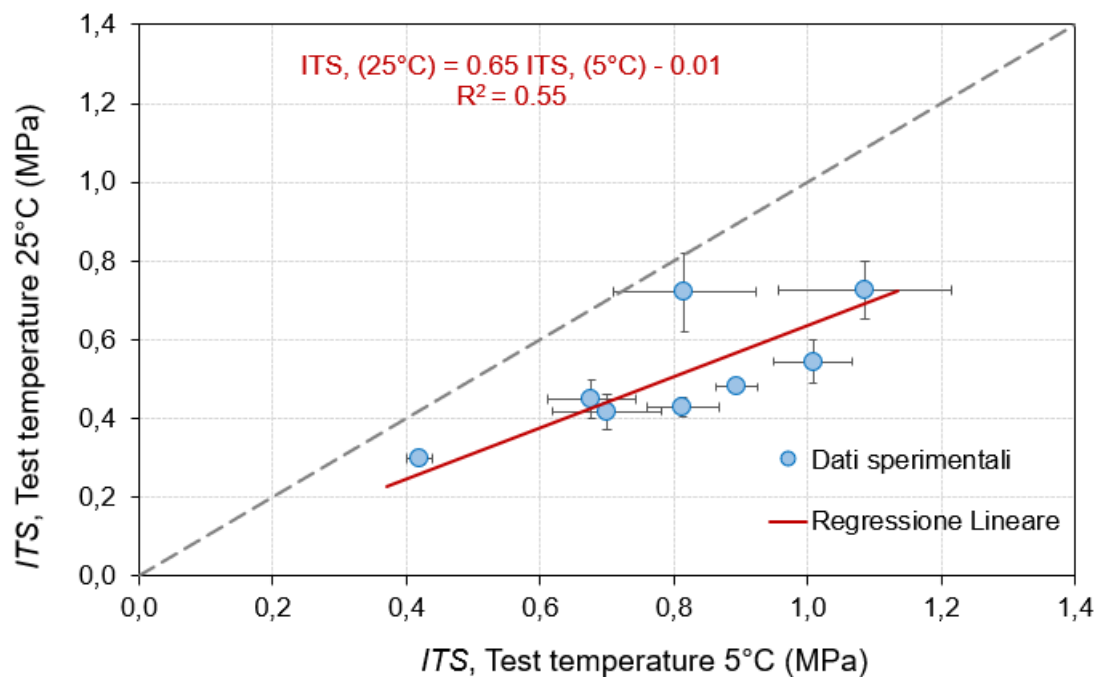


Figura 4.18 Effetto della temperatura di prova sulla resistenza a trazione indiretta

#### 4.4.5 Effetto tempo-temperatura di prova

In figura 4.19 i risultati di ITS ottenuti dai provini con tempo di maturazione pari a 3 giorni a temperatura di maturazione di 40°C (maturazione accelerata richiesta nei principali capitolati italiani) sono confrontati con i valori di ITS dei provini maturati a 20°C per 28 giorni (maturazione standard).

Possiamo notare come i valori di ITS per i provini con maturazione accelerata siano più alti dei provini con maturazione standard.

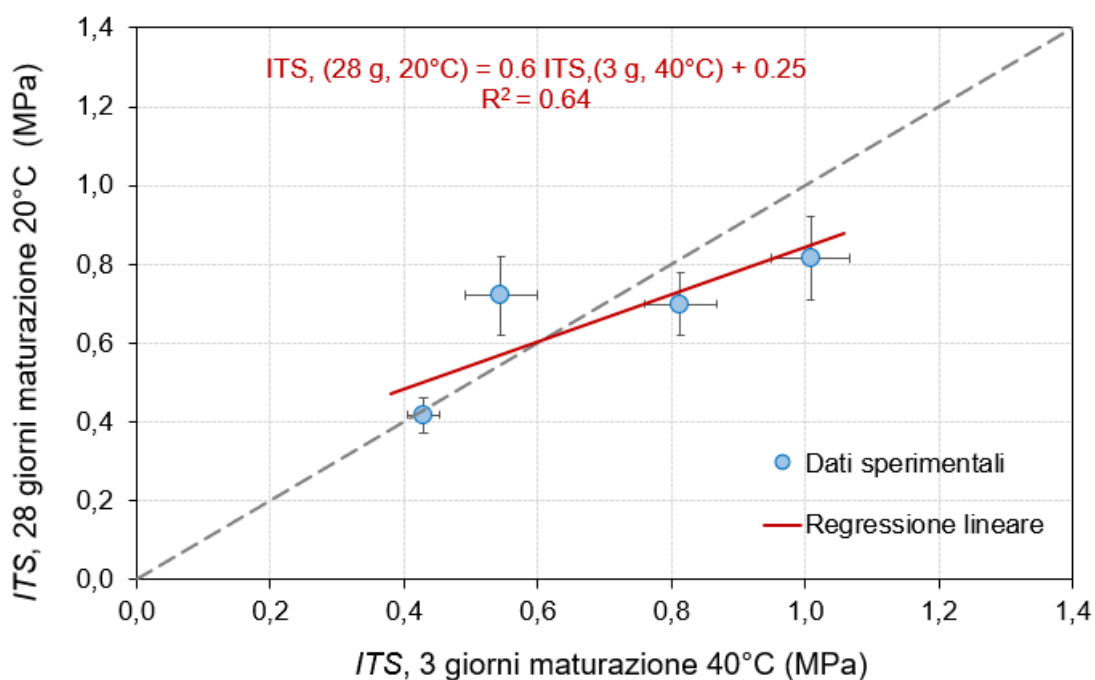


Figura 4.19 Effetto tempo-temperatura di prova (riferimento a 3 giorni a 40°C, confronto con 28 giorni a 20°C) sulla resistenza a trazione indiretta

#### 4.5 Relazione perdita d'acqua-Resistenza a trazione indiretta

In figura 4.20 sono stati messi in relazione l'ITS con riferimento ad una temperatura di prova pari a 5°C, sull'asse delle ordinate, con la perdita d'acqua per evaporazione sull'asse delle ascisse. Si può notare come i valori più alti di ITS sono quelli relativi alla miscela B maturata a 40°C. Mentre, come già osservato in figura 4.7, i valori più alti per quanto riguarda la perdita d'acqua sono stati ottenuti per le miscele che sono state fatte maturare a 40°C. Possiamo notare infine come i valori più bassi per quanto riguarda sia la resistenza a trazione indiretta che la perdita d'acqua si hanno per la miscela A, che ha un minor contenuto di cemento, fatta maturare a 20°C.

Mentre, in figura 4.21 sono messi in relazione i valori di ITS con riferimento ad una temperatura di prova di 25°C con la perdita d'acqua. Confrontando i due grafici si evince come i valori di ITS dei provini con temperatura di prova pari a 5°C sono più alti degli stessi provini, con stessa tipologia di miscela e con la stessa temperatura e tempo di maturazione, ma con temperatura di prova pari a 25°C.

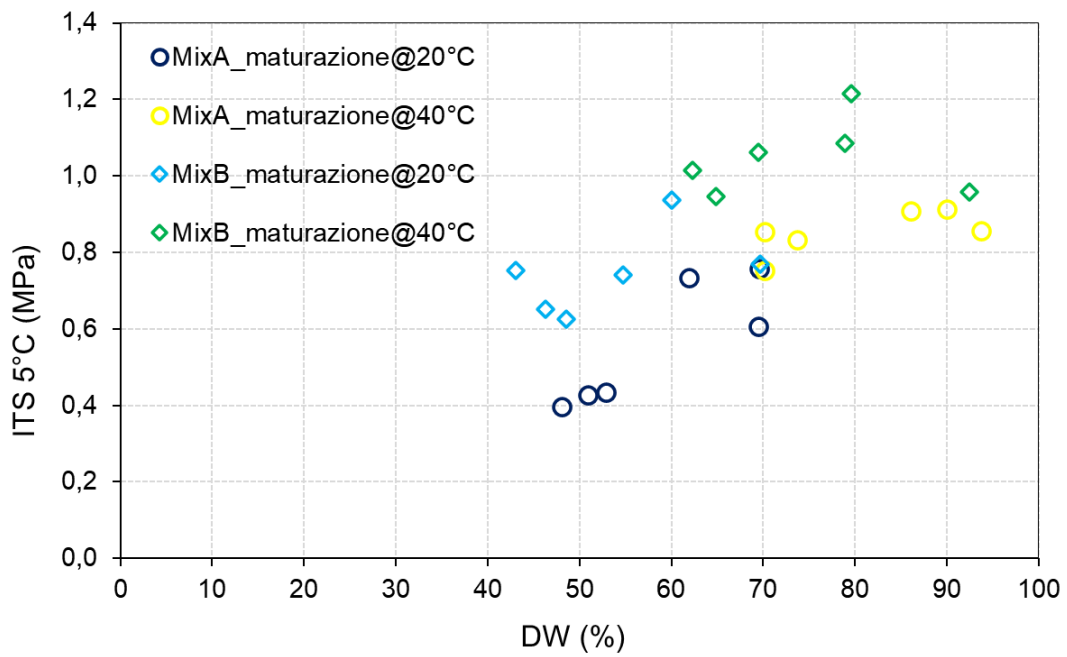


Figura 4.20 Andamento dell'ITS (temperatura di prova 5°C) in relazione alla perdita d'acqua per evaporazione al variare delle miscele

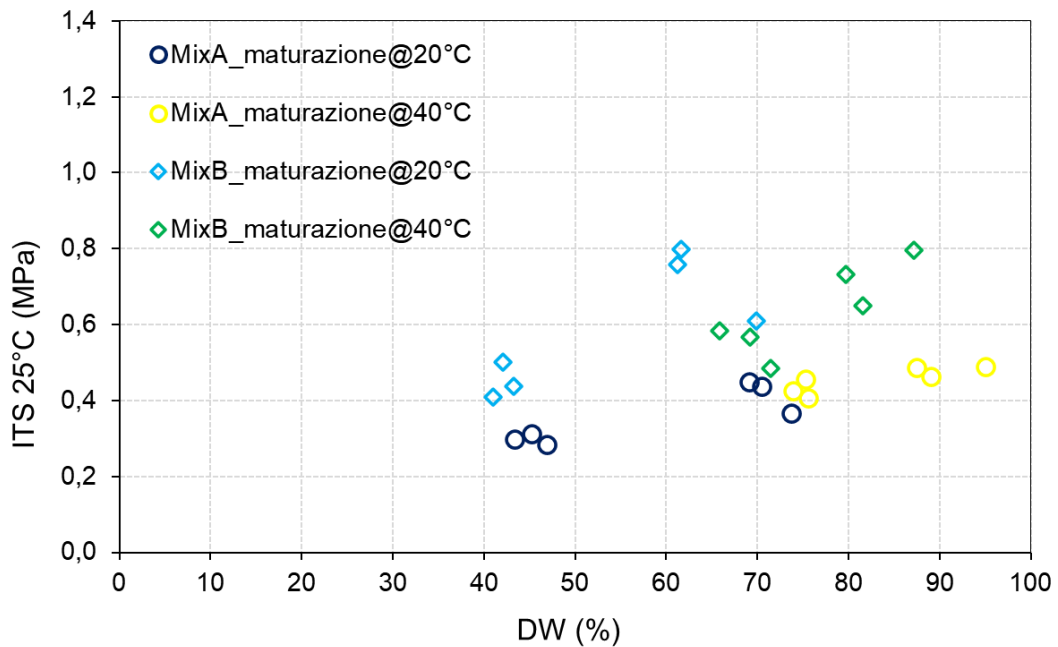


Figura 4.21 Andamento dell'ITS (temperatura di prova 25°C) in relazione alla perdita d'acqua per evaporazione al variare delle miscele

# Conclusioni

La presente tesi sperimentale si focalizza sullo studio delle miscele a freddo prodotte con conglomerato bituminoso di recupero, sabbia, filler cemento, emulsione bituminosa e acqua. In particolare, l'obiettivo è quello di valutare l'influenza della percentuale di cemento e del processo di maturazione sulle proprietà meccaniche delle miscele studiate.

Nella prima fase della tesi sono stati confezionati dei provini tramite pressa giratoria con due miscele differenti. Per la miscela A si è utilizzato un quantitativo di cemento pari al 1,5% e per la miscela B si è utilizzato un quantitativo pari al 3%. Per ogni miscela sono stati considerati due tempi di maturazione (3 e 28 giorni) e due differenti temperature di maturazione (20°C e 40°C).

In una seconda fase su questi provini è stato misurato il valore della resistenza a trazione indiretta ITS, che è stato studiato a due differenti temperature di prova (5 e 25°C) e contemporaneamente si è valutato il valore della perdita d'acqua DW durante il processo di maturazione.

Dall'analisi dei risultati si evince che:

- i provini che hanno subito una perdita d'acqua maggiore sono stati quelli fatti maturare ad una temperatura di maturazione pari a 40°C per un tempo di 28 giorni. Si è osservato come i provini della miscela A, i quali avevano un quantitativo di cemento minore, hanno avuto un ulteriore incremento della perdita d'acqua rispetto a quelli della miscela B;
- i provini che presentano i valori di ITS più alti sono, ovviamente, quelli della miscela B in quanto hanno un contenuto di cemento maggiore rispetto a quelli della miscela A. Anche le condizioni di maturazione hanno un ruolo fondamentale, in quanto si è visto come i provini fatti maturare a 40°C presentano dei valori di ITS molto più alti rispetto a quelli con una temperatura di maturazione di 20°C. Ciò è dovuto ad una maggiore velocità di maturazione

dovuta all'alta temperatura che favorisce l'evaporazione dell'acqua e la rottura dell'emulsione bituminosa. Per quanto riguarda il tempo di maturazione, i risultati più alti di ITS sono stati ottenuti per le miscele fatte maturare a 28 giorni.

- le temperature di prova, analogamente alle condizioni di maturazione, hanno influenzato notevolmente i valori di ITS. Nello specifico i provini con una temperatura di prova pari a 25°C hanno mostrato dei valori di resistenza a trazione indiretta notevolmente più bassi rispetto a quelli con una temperatura di 5°C.

# Bibliografia

- [1].Graziani A., Godenzoni C., Cardone F. & Bocci M. (2016). Effect of curing on the physical and mechanical properties of cold-recycled bituminous mixtures. *Materials & Design*, 95, 358-369;
- [2].Graziani A., Godenzoni C., Cardone F., Bocci E. & Bocci M. (2016). An application of the Michaelis–Menten model to analyze the curing process of cold recycled bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10, 62-74;
- [3].Grilli, A., Graziani, A., and Bocci, M., 2012. Compactability and thermal sensitivity of cement–bitumen treated materials. *Road Materials and Pavement Design*, 13 (4), 599–617:
- [4].UNI-EN 13043-2004 “Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette al traffico”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2004);
- [5].UNI EN 1097-6 Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati. Parte 6: Determinazione della massa volumica dei granuli e dell’assorbimento d’acqua;
- [6].UNI-EN 933-1 Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati. Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per setacciatura;
- [7].UNI EN 1097-6 Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati. Parte 6: Determinazione della massa volumica dei granuli e dell’assorbimento d’acqua;

[8].UNI EN 12697-23, “Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2006).