



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**  
Corso di Laurea Triennale in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE  
*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)*

**Caratterizzazione prestazionale di miscele a freddo a  
base cementizia e di emulsione bituminosa per  
pavimentazioni stradali**

Performance characterization of cement and bitumen emulsion base cold  
mixtures for road pavements

*Relatore:*

**Prof. Ing. Maurizio Bocci**

*Correlatore:*

**Ing. Carlo Carpani**

*Tesi di Laurea di:*

**Gino Angelini**

*Anno Accademico 2021-2022*



# *Sommario*

Capitolo 1 - Introduzione.....	1
Capitolo 2 - Stato dell'arte.....	3
2.1 Pavimentazioni stradali.....	3
2.2 Conglomerato bituminoso.....	8
2.2.1 Aggregati.....	8
2.2.2 Bitume.....	10
2.2.3 Bitumi modificati.....	18
2.2.4 Emulsione bituminosa.....	20
2.3 Riciclaggio a freddo.....	21
Capitolo 3 - Programma sperimentale e metodi di prova.....	25
3.1 Preparazione dei provini.....	26
3.1.1 Miscelazione impasto.....	26
3.1.2 Compattazione.....	29
3.2 Determinazione contenuto dei vuoti delle miscele.....	31
3.3 Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM).....	34
3.4 Prova di trazione indiretta (ITS).....	41
3.5 Miscele di progetto.....	46
Capitolo 4 - Materiali.....	52
4.1 Aggregati.....	52
4.2 Filler attivo.....	59
4.3 Cemento.....	61
4.4 Emulsione bituminosa.....	62
Capitolo 5 - Analisi dei risultati.....	63

5.1	Analisi e confronti sulla compattabilità .....	65
5.2	Analisi della prova di trazione indiretta e moduli di rigidezza (ITS e ITSM) .....	75
5.3	Confronti risultati ITSM.....	77
5.4	Confronti risultati ITS .....	83
Capitolo 6 - Conclusioni.....		89
Capitolo 7 - Sitografia .....		91
Ringraziamenti.....		i

## ***Capitolo 1 - Introduzione***

Lo studio di una pavimentazione occupa un ruolo predominante nel progetto di un'opera infrastrutturale, visto che non riguarda solo la fase preliminare del processo di progettazione, ma interessa l'intero ciclo di vita dell'opera. Essa deve garantire caratteristiche prestazionali e tecnologiche, sin dal primo momento dalla sua messa in esercizio. Considerati i costi elevati sia nella costruzione sia nella manutenzione, l'obiettivo di un ingegnere stradale dovrebbe essere quello di dare garanzie dal punto di vista prestazionale durevoli nel tempo. Una strada infatti è progettata per avere una vita di circa venti anni (vita di progetto).

Al giorno d'oggi sono numerosi gli studi scientifici finalizzati alla ricerca di soluzioni capaci sia di diminuire l'impatto ambientale di una strada, ma anche di aumentarne la vita utile. Tra le varie soluzioni c'è quella dei conglomerati bituminosi realizzati a freddo con emulsione bituminosa ed elevati quantitativi di filler attivo (denominati materiali "ready to mix").

Essi utilizzano l'azione combinata di emulsione e filler attivo con lo scopo di consentire la contemporanea diminuzione dello spessore dello strato necessario. In particolare l'obiettivo della tesi è quello di valutare le prestazioni di tali materiali variando diversi parametri come la composizione granulometrica degli aggregati, la quantità e tipologia dell'emulsione, il quantitativo e la tipologia di filler attivo, e la presenza o meno di fresato.

La tesi è sviluppata nei seguenti capitoli:

- CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

- CAPITOLO 2 – STATO DELL'ARTE

Viene descritto il conglomerato bituminoso, partendo da quello standard e analizzando poi l'aggiunta di cemento o filler attivo. Viene descritto il riciclaggio delle pavimentazioni, con particolare attenzione al riciclaggio a freddo.

- CAPITOLO 3 – PROGRAMMA SPERIMENTALE E METODI DI PROVA

Viene presentato il programma sperimentale, vengono descritte le prove effettuate e vengono analizzate le caratteristiche e i dosaggi delle varie miscele.

- CAPITOLO 4 – MATERIALI

Vengono illustrati i materiali utilizzati per le miscele e le loro caratteristiche.

- CAPITOLO 5 – ANALISI DEI RISULTATI

Vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove effettuate, confrontando grazie all'uso di grafici e tabelle il comportamento meccanico delle diverse miscele usate.

- CAPITOLO 6 – CONCLUSIONI

## ***Capitolo 2 - Stato dell'arte***

### **2.1 Pavimentazioni stradali**

Si definisce strada un'infrastruttura di trasporto destinata alla circolazione dei veicoli su ruota e marginalmente a pedoni ed animali.

Per pavimentazione stradale (altrimenti detta sovrastruttura) si intende la parte superiore poggiante sul corpo stradale e direttamente interessata dal moto dei veicoli.

Essa è costituita da un insieme di strati sovrapposti, di materiali e spessori diversi, aventi funzione di sopportare le azioni indotte dal traffico, di trasmetterle e distribuirle, opportunamente attenuate, al terreno di appoggio (sottofondo), nonché di garantire agli utenti condizioni di sicurezza e confort di marcia (superficie di rotolamento regolare e poco deformabile).

La pavimentazione stradale è costituita da una miscela di aggregati e di leganti. Se il legante è il bitume, si parla di conglomerato bituminoso.

Questa deve resistere a grossi carichi concentrati (i veicoli che vi transitano quotidianamente), all'usura, al degrado da parte di agenti fisico-chimici, alle dilatazioni termiche e deve, nel contempo, consentire un'ottimale aderenza degli pneumatici. Pertanto la pavimentazione stradale è ricorrentemente sottoposta ad attività di manutenzione.

La realizzazione di questi interventi spesso prevede la demolizione di tutta o di una parte della pavimentazione ed il successivo rifacimento. Da questo procedimento deriva una grande quantità di conglomerato bituminoso demolito, comunemente definito "RAP" o "Fresato", che in assenza di apposite prescrizioni viene trasportato in discarica e trattato come rifiuto speciale. Negli ultimi anni vengono utilizzate molte pratiche finalizzate al riutilizzo delle materie prime e a preservare le risorse naturali per le generazioni future. Ad esempio si può ottenere un conglomerato, utilizzato per lo strato di base, ottenuto attraverso il riciclo con la tecnica del riciclaggio a freddo della pavimentazione esistente in situ.

La pavimentazione deve rispettare dei requisiti sia funzionali che strutturali. Le funzioni principali sono quelle di:

- trasmettere e distribuire, opportunamente attenuate, le azioni indotte dal traffico al sottofondo;
- resistere ai fenomeni di degrado strutturale causato dai carichi ciclici combinati alle sollecitazioni di natura termica;
- garantire regolarità e aderenza del piano viabile (condizioni di sicurezza e comfort di marcia);
- proteggere il sottofondo dalle azioni dell'acqua e del gelo;
- recepire le istanze di carattere ambientale orientate verso la realizzazione di opere eco-sostenibili.

Gli strati di vario spessore che costituiscono la pavimentazione sono costituiti da materiali differenti dal punto di vista fisico e meccanico. La scelta dei materiali che compone ogni strato deriva principalmente da considerazioni di tipo tecniche ed economiche: ogni strato è costituito dal materiale più idoneo a rispondere alle sollecitazioni indotte dal traffico, la cui entità decresce dall'alto verso il basso. Le tensioni decrescono dall'alto verso il basso, e questo dipenderà dalla rigidità e dallo spessore dei vari strati della pavimentazione.

Gli strati superficiali assolvono la funzione di assorbire la gran parte delle sollecitazioni provenienti direttamente dai veicoli e perciò è richiesto che i materiali utilizzati siano in grado di resistere alle sollecitazioni tangenziali e normali, mentre gli strati più profondi, generalmente formati da materiali non legati, non potendo resistere alle sollecitazioni di taglio, devono esclusivamente essere soggetti a sollecitazioni normali.

La pavimentazione stradale viene realizzata sopra lo strato di terreno più superficiale, chiamato sottofondo, che costituisce il piano di posa della fondazione. Il suo ruolo principale è quello di garantire un'adeguata portanza, che è determinante per la stabilità dell'intera pavimentazione; infatti, una mancanza di portanza comporterebbe una perdita di funzionalità e di vita utile. Ha la funzione di assorbimento e distribuzione dei carichi evitando



la loro concentrazione in un unico punto. La concentrazione di questi carichi in un unico punto è la causa principale di fessurazioni e cedimenti stradali.

La pavimentazione stradale viene realizzata per strati sopra il sottofondo. Ciascuno strato assolve un differente compito all'interno del sistema della sovrastruttura:

- **Manto (o tappeto) di usura:** è lo strato più superficiale della pavimentazione e deve fornire regolarità, aderenza e impermeabilizzazione, è lo strato con più alta resistenza a taglio. È il più esposto a deformazioni e usura ed è costituito da conglomerato bituminoso o da trattamenti superficiali.
- **Binder:** ha la funzione di collegamento tra la base e il tappeto di usura, garantisce regolarità. Formato anche esso da conglomerato bituminoso.
- **Base:** ha una funzione strutturale e di resistenza, ripartisce i carichi. Costituito da conglomerato bituminoso o misti cementati.
- **Fondazione:** il primo strato realizzato sopra il sottofondo, ha una funzione costruttiva e di ripartire i carichi sul sottofondo. Formato da misti granulari o miscele stabilizzate.

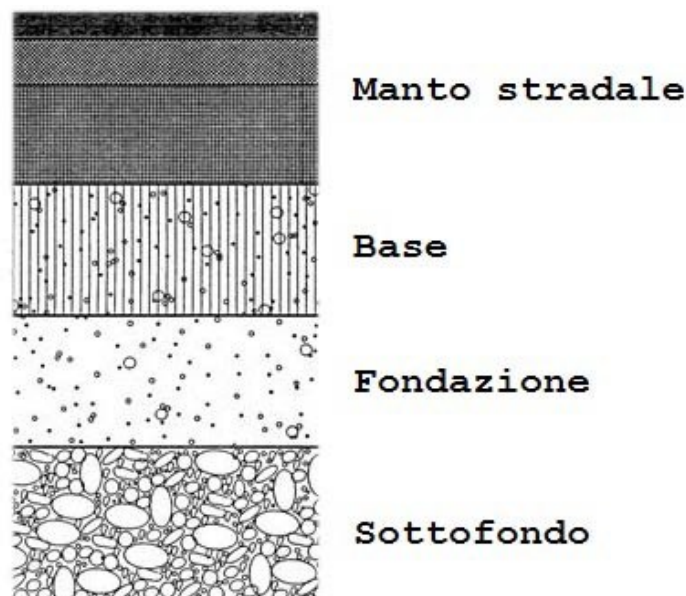


Figura 1 - stratigrafia di un pacchetto strutturale di una pavimentazione stradale flessibile

Oltre a questi strati, che troviamo in tutte le pavimentazioni, ci possono essere altri strati, detti strati accessori:

- Strato anticapillare: strato di spessore modesto e posto tra lo strato di fondazione e il sottofondo (strade in trincea), con la funzione di interrompere l'eventuale risalita capillare di acqua proveniente da falda acquifera.
- Strato antigelo: strato posto tra quello di fondazione e il sottofondo ovvero ottenuto aumentando lo spessore della fondazione, con la funzione di impedire che la profondità di penetrazione del gelo raggiunga il sottofondo se gelivo.
- Strato drenante: strato costituito da materiale granulare ad elevata permeabilità con la funzione di raccogliere e smaltire le acque di falda o di infiltrazione verso i fossi laterali o altro dispositivo drenante.

A seconda del tipo di materiali utilizzati le pavimentazioni stradali si distinguono in rigide, semirigide e flessibili.

Un'elevata rigidità della pavimentazione implica una maggiore distribuzione delle tensioni verticali sul sottosuolo e maggiori sollecitazioni cui è soggetta la sovrastruttura. La rigidità della pavimentazione dipende dallo spessore degli strati e dai materiali usati.

In base alla rigidità, quindi, le pavimentazioni stradali si dividono in:

- Flessibili: costituite da una serie di strati legati poggiati su uno strato di fondazione in materiale granulare.
- Semirigide: costituite da una successione di strati simile alle precedenti, con la sola differenza che in corrispondenza degli strati di base o di fondazione è presente un materiale legato generalmente con cemento (misto cementato) o da altri materiali come le emulsioni bituminose o i bitumi schiumati, formando una struttura più resistente.
- Rigide: più resistenti e più sottili delle precedenti, formate in superficie da lastre in calcestruzzo (in alcuni casi ricoperte da uno strato di usura in conglomerato bituminoso) posata su uno o più strati di fondazione in misto cementato e/o misto granulare o direttamente poggiate sul terreno di sottofondo se quest'ultima ha adeguata capacità portante.

Le pavimentazioni rigide si differenziano per l'uso di lastre di calcestruzzo poste sopra a una fondazione in misto granulare o misto cementato.

Una pavimentazione flessibile ha una composizione del tutto simile a quella semirigida, con l'unica differenza che lo strato di base è realizzato in conglomerato bituminoso e presenterà inferiormente uno strato di sottobase in misto cementato.

## TIPOLOGIE DI PAVIMENTAZIONE STRADALE

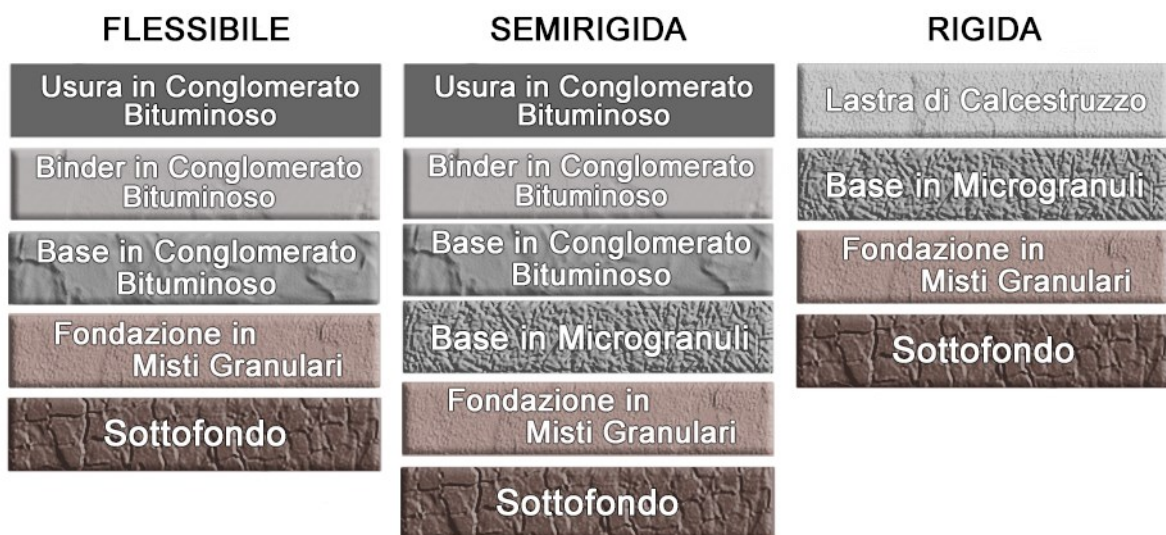


Figura 2- differenza tra pavimentazione flessibile, semirigida e rigida

## **2.2 Conglomerato bituminoso**

Il conglomerato bituminoso è un materiale per l'edilizia che deriva dall'unione di una miscela di aggregati (materiali rocciosi di diversa granulometria quali filler, sabbia, pietrisco), un legante (bitumi naturali, artificiali o liquidi; emulsioni bituminose; catrami) ed eventuali additivi.

In un conglomerato bituminoso, il bitume ha la funzione di conferire alla miscela la necessaria coesione per poter resistere alle sollecitazioni di taglio e flessione dovute ai carichi superficiali indotti dal passaggio degli pneumatici (carico di traffico). Gli aggregati invece sono i materiali componenti principali delle miscele stradali (semilavorati).

Il principale uso dei conglomerati bituminosi è per pavimentazioni di tipo flessibile o semirigide. A seconda dello strato della pavimentazione cui sono destinati, il conglomerato presenta caratteristiche differenti. Si possono variare caratteristiche volumetriche, proprietà meccaniche e composizione modificando l'assortimento granulometrico degli aggregati e il dosaggio del legante.

### **2.2.1 Aggregati**

Per gli utilizzi degli aggregati in ambito stradale è importante conoscere quelle caratteristiche specifiche (proprietà, requisiti) che possono essere collegate alle prestazioni in opera delle miscele. Si è soliti distinguere in proprietà:

- geometriche
- fisiche - meccaniche – di durabilità
- chimiche

I requisiti geometrici che gli aggregati devono rispettare sono dimensioni, granulometria, contenuto di fini, forma (e tessitura superficiale), percentuale di superfici frantumate e spigolosità dell'aggregato fine.

La miscela lapidea deve rispettare opportuni limiti dimensionali in modo da rientrare all'interno di un fuso granulometrico definito sulla base di una curva di distribuzione ottimale e di predefinite tolleranze. Nei materiali di tipo tradizionale, si fa riferimento alla

formulazione di Fuller dove si adotta un diametro massimo più elevato per gli strati di base e valori via via decrescenti per quelli superiori, caratterizzati da un assortimento più fine. Nel sistema SUPERPAVE, i limiti granulometrici sono indicati mediante dei punti di controllo, ricavati sperimentalmente rispetto alla retta di massima densità e stabiliti in funzione del diametro nominale massimo.

La distribuzione granulometrica dell'aggregato influenza le più importanti proprietà dei conglomerati bituminosi:

- stabilità e rigidità
- lavorabilità e compattabilità
- resistenza a fatica
- resistenza allo scorrimento viscoso
- durabilità
- aderenza

Il filler è un additivo minerale che pur costituendo una frazione specifica (passante al vaglio di apertura a 0.075 mm oppure 0,063 mm) della distribuzione granulometrica degli aggregati, viene considerato come un componente a sé stante. Questo viene infatti aggiunto a parte e non insieme agli altri aggregati. È una frazione particolarmente importante per i conglomerati bituminosi, è importante controllarne il dosaggio e la composizione. Il mastice filler + bitume controlla molte proprietà delle miscele, evita il trasudamento, previene lo spogliamento e aumenta la stabilità delle miscele. Data la grande importanza della frazione fine è importante controllarne il dosaggio e la composizione.

La distribuzione granulometrica degli aggregati influisce anche sulla quantità di bitume da utilizzare, che infatti viene espressa in percentuale rispetto al peso degli aggregati. La quantità ottimale di legante deve essere tale da ricoprire, con una pellicola legante di spessore adeguato, la superficie complessiva di tutti gli aggregati. Viene utilizzata la procedura di mix design per determinare il dosaggio effettivo di aggregati e bitume da usare.

### **2.2.2 Bitume**

Il legante bituminoso è un composto organico eterogeneo derivato dal processo di distillazione del greggio di petrolio. Le principali caratteristiche del bitume sono dovute al fatto che è un materiale termo-plastico, che cambia la sua consistenza e viscosità al variare della temperatura (comportamento termo-dipendente), e inoltre è un materiale con potere legante e impermeabilizzante.

Il bitume è una miscela naturale o artificiale di idrocarburi solidi o semisolidi, di colore nerastro, ottenuta da rocce asfaltiche o da petroli naturali, usata per pavimentazioni stradali o anche come isolante o impermeabilizzante.

La produzione di bitume avviene tramite la distillazione frazionata, che è un processo fisico attraverso il quale vengono separate le fasi di una miscela (greggio di petrolio) per effetto delle diverse temperature di ebollizione e di condensazione che competono a ciascuna di esse. Lo si inserisce nella colonna di frazionamento, dove le componenti con temperature di ebollizioni minori cominciano ad evaporare e a risalire nella colonna. Dunque, le frazioni più volatili si distribuiscono sui piani più in alto nella colonna, mentre il deposito delle frazioni in basso costituisce il "residuo atmosferico" che viene usato per riprodurre il bitume. A seconda del tipo di greggio di petrolio si avranno differenze sia nella quantità che nella qualità del bitume ricavato.

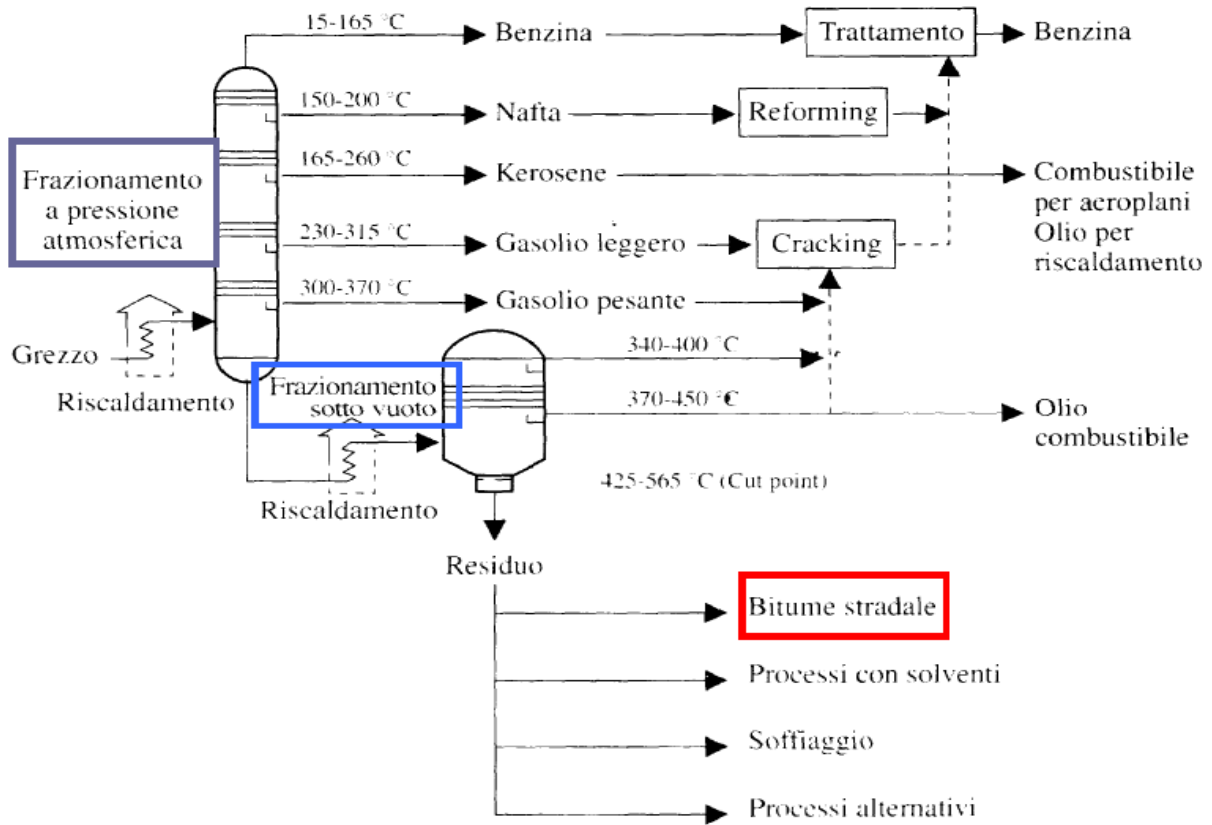


Figura 3- processo di frazionamento

Le proprietà del bitume variano a seconda della temperatura cui risulta sottoposto; ciò permette di ottenere un materiale semiliquido alle temperature di miscelazione e compattazione e semisolido alla temperatura di esercizio.

Le proprietà meccaniche e fisiche del bitume influenzano le prestazioni in opera e queste sono strettamente legate alla composizione chimica e strutturale del bitume. È una combinazione di composti organici con peso molecolare molto alto. Il bitume contiene modeste quantità di azoto e ossigeno, oltre a metalli come il ferro. Principalmente è composto per l'80% dal carbonio e il 10% dall'idrogeno, mentre altamente variabile è la percentuale di zolfo visto che a seconda della provenienza, si possono avere percentuali tra l'1% e il 10%. Il bitume può subire l'alterazione o il decadimento delle proprie proprietà, soprattutto se esposto all'azione di agenti atmosferici o a forti sbalzi di temperatura. Azoto, zolfo e ossigeno, pur presenti in quantità ridotte, influenzano notevolmente le caratteristiche del bitume.

Per quanto riguarda la composizione molecolare, invece, è costituito da Asfaltini (miscele complesse di idrocarburi) e Malteni, i quali comprendono resine e olii.

Gli asfaltini sono miscele complesse di idrocarburi, a temperatura ambiente sono allo stato solido e conferiscono al bitume il classico colore bruno-nero. Sono responsabili del comportamento viscoelastico del bitume e della sua suscettibilità termica, e conferiscono la capacità di resistere alle sollecitazioni meccaniche.

I malteni invece si suddividono in resine e in olii. Le resine sono molto viscosi a temperatura ambiente e di colore bruno-scuro, con proprietà adesive. Conferiscono capacità elastiche alla miscela. Gli olii costituiscono il mezzo disperdente per gli asfaltini.

È possibile rappresentare chimicamente il bitume come una dispersione di asfaltini negli olii, e le resine costituiscono il fattore di peptizzazione (consentono la dispersione degli asfaltini negli olii).

Grazie alla loro composizione, i bitumi sono in grado di garantire l'adesione con gli inerti che costituiscono il conglomerato e anche la capacità di deformarsi senza rompersi avendo una buona duttilità. (1)

Il comportamento globale (comportamento reologico) del bitume è determinato dalla compatibilità e dalle interazioni tra i diversi componenti presenti nella miscela, piuttosto che dalle loro quantità relative. La reologia studia il comportamento tenso-deformativo di un materiale in funzione della temperatura, il bitume presenta un comportamento viscoelastico associato ad una marcata dipendenza dalla temperatura. La viscosità rappresenta la tensione che occorre applicare ad uno strato infinitesimo di fluido  $ds$  per modificarne la velocità rispetto ad un altro strato posto a distanza infinitesimale  $dh$ . Può essere dunque considerata una misura dell'attrito interno fra strati adiacenti (molecole e particelle) di un fluido che si oppongono al mutuo scorrimento.

Quindi il comportamento reologico del bitume si modifica al variare della temperatura.



Per ogni bitume esiste una temperatura ( $T^*$ ) tale che per  $T > T^*$  il comportamento reologico possa essere associato a quello di un materiale incapace di resistere staticamente a forze di taglio rappresentato da un fluido. Il bitume viene quindi associato ad un fluido perfetto.

Esiste una temperatura ( $T_g$ ) detta temperatura di transizione vetrosa tale che per  $T < T_g$  il comportamento reologico possa essere associato a quello di un solido. In questo caso viene quindi considerato come un solido perfetto.

Esistono delle prove convenzionali sul bitume che consentono di definire delle proprietà indici dei bitumi stradali, ma non permettono di descrivere il comportamento reologico (tenso-deformativo) del materiale. Non consentono di calcolare le proprietà fondamentali del bitume in quanto vengono effettuate in condizioni tali da non poter risalire né al gradiente di deformazione imposto, né allo stato di tensione applicato. Ma rappresentano il riferimento sulla base del quale si fondano le attuali norme tecniche per la classificazione (UNI EN) e accettazione (norme di Capitolato) dei bitumi stradali.

Le principali prove empiriche di caratterizzazione dei bitumi stradali sono:

#### 1) PROVA DI PENETRAZIONE

la prova permette di determinare la consistenza del bitume mediante la misura della penetrazione di un ago normalizzato in un campione di bitume condizionato. È utilizzata per determinare la consistenza di bitumi e leganti bituminosi a temperature di utilizzo intermedie in condizioni di prova definite. Il test viene eseguito in un bagno ad acqua, generalmente a 25°C; anche se altre temperature possono essere usate. La penetrazione con ago è il metodo di prova più vecchio applicato al bitume ed è solitamente anche utilizzato per classificare il legante. La prova consiste nella penetrazione con ago ad una distanza in decimi di millimetro, l'ago standard penetra verticalmente all'interno di un campione di materiale in determinate condizioni di temperatura, carico e durata del carico. Il comportamento del bitume è fortemente dipendente dalla temperatura, pertanto è di fondamentale importanza il controllo della temperatura del bagno ad acqua. Gli aghi per la penetrazione devono essere puliti e privi di danni, la superficie del campione deve essere uniforme e il campione deve essere preparato per l'analisi. Quanto più il bitume è molle tanta più la

penetrazione sarà elevata; attraverso questa prova si può operare una classificazione tecnico commerciale dei bitumi in base al loro grado di durezza come intervallo di valori. Per esempio, un bitume classificato 50/70 ha una penetrazione compresa tra 50 e 70 decimillimetri; (2)



*Figura 4- prova di penetrazione*

## 2) PALLA ANELLO

Metodo di prova usato per la determinazione del punto di rammollimento di un bitume in un intervallo di temperatura tra 30 e 150°C. Fornisce una stima del punto di passaggio da uno stato visco-elastico a uno puramente viscoso. Il bitume da provare, riscaldato e reso fluido, viene colato dentro un anello di ottone, e quindi fatto raffreddare. Si pone una sferetta d'acciaio sul bitume contenuto dentro l'anello, che viene riscaldato a bagnomaria, in condizioni controllate, fino alla temperatura alla quale il peso della sferetta provoca il cedimento del bitume. La temperatura iniziale viene posta a 5°C e poi riscaldata di 5°C al minuto. La temperatura finale che causa il cedimento si assume come valore del punto di rammollimento.

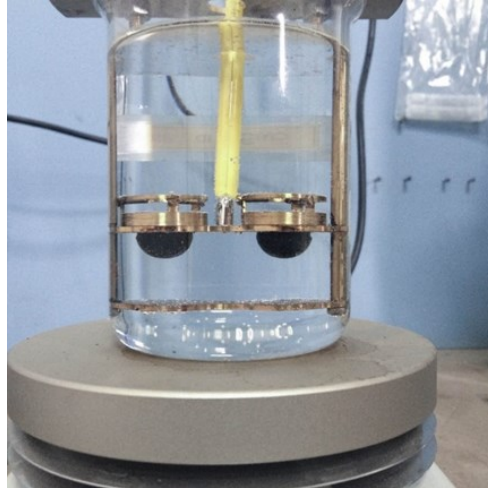


Figura 5- prova palla anello

### 3) FRAASS

Usata per misurare la fragilità di un bitume a bassa temperatura tramite la determinazione del punto di rottura del bitume per flessione ciclica con metodo standardizzato. La prova consente di determinare il punto di rottura Fraass (°C), Fraass breaking point, che misura la fragilità del bitume e dei leganti bituminosi alle basse temperature. Si misura la temperatura (°C) alla quale un film di bitume dello spessore di circa 0.5 mm preparato su una piastrina rettangolare metallica presenta sulla sua superficie le prime screpolature per effetto di flessioni cicliche applicate con frequenza ed ampiezza costanti. La temperatura di rottura viene raggiunta imponendo sul provino un gradiente di 1°C/min e sollecitazioni flessionali con frequenza di 1 giro/sec, partendo da una temperatura iniziale superiore di 15°C rispetto al valore Fraass che ci si aspetta.



Figura 6- prova fraass

#### 4) PROVA DI DUTTILITA'

Misura le caratteristiche a trazione di un bitume attraverso l'elongazione di campioni standard in bagno termostatico. La prova consente al bitume di deformarsi senza rompersi, opponendosi alla fragilità. Prevede che si coli il bitume in alcuni stampi, i quali vengono inseriti in una vasca con dell'acqua; successivamente vengono misurate le caratteristiche a trazione del bitume ad una temperatura di 5 o 25°C in base alla durezza del campione.



*Figura 7- prova di duttilità*

#### 5) PROVA DI VISCOSITA' DINAMICA

Determinazione della viscosità dinamica di bitumi in un intervallo di temperature. Le temperature utilizzate per la prova sono di 60, 100, 150°C con un condizionamento di 30 minuti a temperatura costante. Un torcente è applicato ad una girante, che è annegata all'interno di un campione di bitume, a sua volta contenuto in un contenitore di forma e dimensioni standardizzate. La resistenza della girante alla rotazione fornisce una misura della viscosità dinamica del bitume ad una specifica temperatura di prova.



Figura 8- prova di viscosità

#### 6) ROLLING THIN FILM OVEN TEST

La prova riproduce l'invecchiamento del bitume a breve termine (miscelazione, stesa e compattazione) andando a vedere come si comporta nel tempo. Consente di trattare termicamente il bitume ed è possibile effettuare qualsiasi tipologia di test sul bitume prima e dopo il trattamento, al fine di verificarne il cambiamento della reologia.



Figura 9- Rolling thin film oven test

Un problema del bitume è che nel tempo tende ad invecchiare, l'invecchiamento è quel complesso insieme di fenomeni, legati all'azione combinata della temperatura e della presenza di ossigeno, che causano un'alterazione irreversibile delle caratteristiche chimico-fisiche del legante bituminoso rispetto a quelle originarie di raffineria. Dal punto di vista reologico tali fenomeni conducono ad un indurimento del materiale, determinando un aumento della sua rigidità e del grado di fragilità. I principali meccanismi alla base dell'invecchiamento (a breve e lungo termine) sono:

- **Volatilizzazione:** consiste nella perdita delle componenti più leggere del materiale contraddistinte da bassi punti di ebollizione. Essa si esaurisce quasi completamente già nella fase di miscelazione del bitume con gli aggregati.
- **Ossidazione:** consiste nella reazione dell'ossigeno con le macromolecole idrocarburiche, favorita dalle alte temperature, e che induce una rottura dei legami covalenti di base con un conseguente incremento del grado di polarità delle molecole stesse.
- **Polimerizzazione:** processo basato sulla formazione di legami intermolecolari, anche qui favoriti dalla temperatura, che portano ad una riorganizzazione della struttura interna verso elementi di maggiore dimensione.

### ***2.2.3 Bitumi modificati***

I bitumi tradizionali possono presentare possibili limiti prestazionali nei conglomerati bituminosi quali resistenza all'ormaiamento, resistenza alla fessurazione termica, resistenza alla fatica e resistenza meccanica. Migliorare le caratteristiche reologiche dei bitumi ha portato all'introduzione sul mercato di prodotti modificati con sostanze di natura diversa (agenti di modifica). Un bitume è "modificato" quando il suo comportamento reologico e le caratteristiche che lo contraddistinguono sono tendenzialmente assimilabili a quelle del polimero modificante utilizzato, avendo contemporaneamente salvato tutte le proprietà leganti originali della base bituminosa.

I bitumi modificati sono ottenuti attraverso l'aggiunta di additivi o composti chimici (agenti modificanti) al bitume tradizionale. L'aggiunta di tali agenti altera/modifica la struttura chimica e fisica in modo irreversibile con conseguente variazione delle proprietà reologiche

del bitume di origine. Gli agenti di modifica più comunemente impiegati nelle miscele bituminose sono filler (di frantumazione, calce, cemento, cenere volante, carbone), fibre sintetiche (di vetro, minerali, cellulosa, poliestere, polipropilene), polverino di gomma proveniente dal riciclo degli pneumatici, extender (zolfo, lignina), cere paraffiniche, polimeri. L'aggiunta di agenti chimici o polimeri modificano le proprietà fisiche e chimiche del bitume di origine.

Gli agenti maggiormente usati sono i polimeri che sono macromolecole in cui qualche gruppo di atomi (molecola o gruppi di molecole dette monomeri) è ripetuto per un grande numero di volte. La sequenza e la struttura chimica del monomero determina le proprietà fisiche del polimero, e vista la grande varietà di polimeri a disposizione sul mercato è possibile il miglioramento mirato di specifiche prestazioni del bitume.

I polimeri si raggruppano in due sottogruppi, i termoindurenti che non sono utilizzati in campo stradale e i termoplastici. I termoplastici sono costituiti da catene macromolecolari lineari o radiali anche ramificate, fluidificano e diventano reversibilmente malleabili se riscaldati, possono essere inglobati nel bitume ad alte temperature. A loro volta si dividono in elastomeri e plastomeri.

I polimeri termoplastici elastomerici (gomma naturale e elastomeri sintetici) migliorano prevalentemente il comportamento duttile ed elastico della miscela finale con conseguente incremento della deformazione a rottura e della resistenza ai carichi ciclici.

I polimeri termoplastici plastomerici sono caratterizzati da una struttura reticolare rigida e resistente e, dunque, non modificano in maniera significativa la risposta elastica del bitume ma ne determinano un sostanziale incremento della resistenza a rottura.

Per quanto riguarda la produzione industriale del bitume modificato, il polimero viene miscelato con il bitume ad alta temperatura per mezzo di mescolatori ad alto gradiente di taglio che ne consentono l'omogenea dispersione all'interno della massa.

L'uso del bitume modificato ha un impiego sempre crescente per adeguare le prestazioni del conglomerato bituminoso al livello di traffico. Viene utilizzato principalmente per

conglomerati bituminosi a caldo, Stone Mastic Asphalt (SMA), conglomerati bituminosi drenanti, trattamenti superficiali di irruvidimento e microtappeti a caldo.

#### **2.2.4 Emulsione bituminosa**

L'emulsione bituminosa è una dispersione di un legante bituminoso in acqua e assume la consistenza di un liquido (bassa viscosità) a temperatura ambiente. Essendo costituita da due fasi immiscibili, l'emulsione è resa stabile (goccioline di bitume non flocculano e restano disperse) e assume le caratteristiche specifiche al suo impiego, mediante l'aggiunta di un agente emulsionante (o tensioattivo).

L'impiego di emulsione bituminosa permette di ottenere il bitume a temperatura ambiente, comportando i vantaggi di riduzione delle emissioni in ambiente, salvaguardia della salute degli operai, minore impatto ambientale e riduzione dei costi.

Il bitume si presenta sotto forma di goccioline disperse nell'acqua; quando l'acqua evapora rilascia il bitume. Generalmente la percentuale di bitume impiegata in un'emulsione bituminosa è compresa tra il 50 – 70%.

La sua composizione è quindi: acqua + bitume + agente emulsionante.

L'acqua rappresenta la fase disperdente (fase continua). Il bitume la fase dispersa sotto forma di goccioline che possono essere considerate particelle "solide" e hanno un diametro compreso tra 0,1 e 20 micron (fase discontinua). Mentre gli agenti emulsionanti (tensioattivi) favoriscono la dispersione del bitume in acqua garantendo la stabilità dell'emulsione (le gocce tenderebbero altrimenti a sedimentare e/o flocculare) e conferiscono polarità all'emulsione.

Le emulsioni di bitume si classificano in base a:

- carica superficiale → anioniche (basiche) o cationiche (acide);
- contenuto di bitume → 45%, 55%, 60%, 65% e 69%;
- tipologia di bitume residuo → tradizionale o modificato.



- velocità di rottura (tempo richiesto affinché il bitume si separi dall'acqua) → rapida – media – lenta.

I principali impieghi delle emulsioni bituminose sono con interventi di spruzzatura o impasto:

- MANI D'ATTACCO: applicazione di emulsione bituminosa eseguita prima o durante la stesa del conglomerato a caldo, con lo scopo di aumentare l'adesione e l'ancoraggio tra due strati successivi della pavimentazione.
- TRATTAMENTI SUPERFICIALI: realizzazione di uno strato di usura di piccolo spessore (costituito da uno o più strati sovrapposti di emulsione e graniglia) per migliorare l'aderenza dello strato superficiale e/o per impermeabilizzare la sovrastruttura.
- RICICLAGGIO A FREDDO: insieme di attività e azioni che permettono il recupero e il riutilizzo del fresato, senza prevedere il preventivo riscaldamento dei materiali ma semplicemente l'aggiunta di leganti (emulsione di bitume, cemento), acqua e di eventuali aggregati naturali di integrazione

### **2.3 Riciclaggio a freddo**

In ambito stradale la comunità scientifica produce ormai moltissime ricerche riguardo il riutilizzo di vecchie pavimentazioni demolite e di ogni genere di materiale di scarto ottenuto dalla produzione industriale.

Il RAP, Reclaimed Asphalt Pavement, comunemente definito fresato, è il conglomerato bituminoso recuperato mediante interventi di fresatura degli strati di pavimentazioni flessibili ammalorate. È senza dubbio il materiale più facilmente riciclabile e può essere riutilizzato più volte. In questo materiale è possibile recuperare l'aggregato ma anche il bitume presente

Quindi il materiale che si ottiene dalla demolizione di una vecchia pavimentazione, detto comunemente fresato, può essere riutilizzato per la costruzione di nuovi strati delle pavimentazioni. Le motivazioni che spingono verso questa direzione sono molteplici:

- riduzione dell'impiego di materie prime vergini;
- riduzione dei territori da destinare a discarica;
- limitazione dell'inquinamento del suolo e dell'atmosfera, derivante dal trasporto e dall'incenerimento dei rifiuti;
- conservazione dell'energia;
- vantaggi economici e vantaggi tecnici.

Si usano due tecniche principali per il riciclaggio del fresato: la tecnica del riciclaggio a caldo e del riciclaggio a freddo. Nella tecnica a caldo gli aggregati sono riscaldati a una temperatura  $T > 110^{\circ}\text{C}$ , la percentuale di riciclaggio del fresato è del 10-40% ed è necessario l'utilizzo di specifici additivi (rigeneranti). Nella tecnica a freddo invece vengono utilizzati aggregati freddi e umidi, può essere fatto con o senza cemento e si avrà una percentuale di riciclaggio del fresato dell' 80-100%. In questo caso verrà usata un'emulsione bituminosa o del bitume schiumato.

E' molto vantaggioso utilizzare una tecnica di riciclaggio a freddo; tra i principali vantaggi troviamo un minore impatto ambientale, una riduzione delle emissioni in ambiente, la salvaguardia della salute dei lavoratori e una riduzione dei costi di costruzione/manutenzione. Il conglomerato viene demolito mediante una fresa che opera la cosiddetta fresatura "a freddo", molto più innovativa rispetto alla fresatura "a caldo" praticata negli anni '70 poiché permette di demolire e stoccare il materiale prodotto senza che questo subisca penalizzazioni in termini di lavorabilità. Questo porta a vantaggi dal punto di vista economico, energetico e ambientale.

Il riciclaggio a freddo può essere effettuato mediante:

- **TECNICHE IN SITO**, tutto il processo avviene sulla strada
- **TECNICHE IN IMPIANTO**, il fresato viene trasportato in impianto e mescolato con il legante per poi essere riportato in strada dove viene messo in opera

Le componenti che compongono la miscela di un riciclaggio a freddo sono fresato di conglomerato bituminoso (e aggregati bianchi di riciclo) derivati dalla fresatura della

pavimentazione, aggregato naturale di integrazione, leganti bituminosi (emulsione bituminosa o bitume schiumato), cemento e acqua di aggiunta, per migliorare la lavorabilità della miscela. Il cemento viene aggiunto con la finalità di migliorare le proprietà meccaniche della miscela e di regolare la rottura dell'emulsione, ovvero di garantire una maggiore dispersione del bitume schiumato. Gli aggregati bianchi di riciclo o naturali non sono sempre necessari, possono servire a correggere la curva granulometrica o a integrare il fresato eventualmente non disponibile. Se la miscela sarà utilizzata per strati di base il legante che verrà utilizzato sarà emulsione di bitume modificato, mentre se la miscela sarà usata per strati di fondazione il legante usato sarà bitume schiumato o emulsione di bitume tal quale. In ogni caso le emulsioni bituminose dovranno essere sovrastabilizzate.

La qualità e le prestazioni dello strato riciclato sono legate alla qualità degli aggregati riciclati.

Per quanto riguarda il riciclaggio in impianto le macchine utilizzate per il riciclaggio a freddo possono essere installate in modo fisso ma esistono anche soluzioni "semoventi" che possono essere posizionate all'interno del cantiere, riducendo costi e consumi di trasporto del fresato. Inoltre si possono avere due tipologie di impianto: discontinuo e continuo. Nel primo caso inerti e legante vengono pesati e solo dopo aver raggiunto un determinato quantitativo vengono inviati al ciclo produttivo. Nel secondo caso invece l'immissione dei materiali è continua, ciò rende il processo produttivo più veloce ma meno preciso in termini di dosaggio.

Se invece viene scelta la modalità di riciclaggio in situ, questo genere di riciclaggio presenta numerosi vantaggi, in particolare si hanno:

- Vantaggi ambientali: in quanto è possibile recuperare il 100% della pavimentazione preesistente. Ciò permette di evitare la destinazione di aree a uso discarica, la riduzione di consumo di aggregati vergini e conseguentemente la riduzione delle aperture di nuove cave. Inoltre, si avrà anche la riduzione dell'inquinamento dovuto alle emissioni per il trasporto del RAP e del riscaldamento del bitume.

- Vantaggi prestazionali: le modalità di realizzazione e controllo delle fasi di miscelazione rendono lo strato in riciclato a freddo più prestante rispetto al misto cementato, materiale con cui viene generalmente costruito uno strato di base.
- Tempi brevi di costruzione: in sito il riciclaggio a freddo viene effettuato tramite dei treni di riciclaggio, che hanno una produttività elevata, grazie alla possibilità di miscelare in continuo, e quindi il disagio arrecato alla circolazione è ridotto.
- Sicurezza della circolazione: il treno si posiziona lungo una sola corsia, per cui le fasi esecutive risultano più agevoli e sicure.

## ***Capitolo 3 - Programma sperimentale e metodi di prova***

In questo capitolo si descrivono le fasi operative condotte presso il Laboratorio del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile ed Architettura” dell’Università Politecnica delle Marche, illustrando il piano sperimentale, i suoi obiettivi e le procedure delle prove effettuate.

L’obiettivo della sperimentazione è quello di confrontare le caratteristiche meccaniche e prestazionali di diverse miscele di conglomerato bituminoso impastate a freddo in laboratorio. Per ogni miscela sono stati variati la composizione granulometrica degli aggregati, il dosaggio e la tipologia del legante cementizio, il dosaggio e la tipologia di emulsione bituminosa e l’utilizzo parziale o totale, nonché l’assenza di materiale riciclato (RAP).

I parametri di confronto che sono stati utilizzati per ogni miscela sono il modulo di rigidità a trazione indiretta (ITSM) a 7 e 14 giorni e la resistenza a trazione indiretta (ITS) a 14 giorni.

La sperimentazione si è svolta in quattro fasi principali:

- FASE 1: preparazione della “ricetta”, rispettando i diversi quantitativi delle differenti pezzature degli aggregati;
- FASE 2: miscelazione attraverso l’uso di un’impastatrice a freddo e compattazione dei provini tramite pressa a taglio giratoria;
- FASE 3: determinazione delle caratteristiche geometriche dei provini;
- FASE 4: esecuzione delle due prove al fine di valutare le caratteristiche meccaniche a sette e quattordici giorni.

Ultimato l’iter sperimentale, si è proceduto con la fase di elaborazione dei dati ottenuti e al confronto dei risultati, per poter valutare quale tra le possibili combinazioni delle componenti della miscela ottimizzasse i parametri precedentemente menzionati.

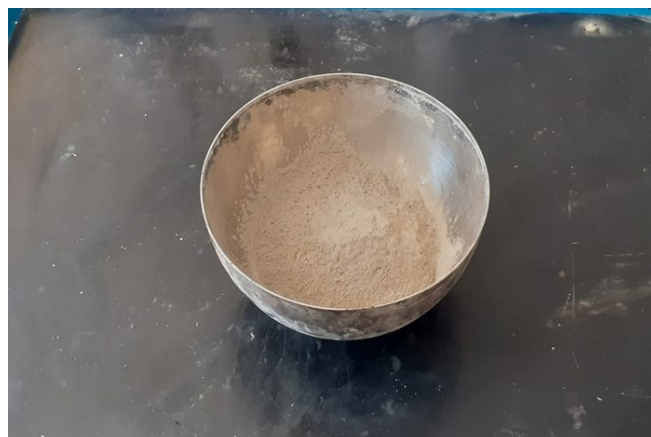
### **3.1 Preparazione dei provini**

#### **3.1.1 Miscelazione impasto**

Per la preparazione dei provini si inizia pesando con un'apposita bilancia, a seconda della ricetta che si deve utilizzare, gli aggregati vergini o il fresato, il filler o il cemento. Si utilizza la stessa bilancia per ogni miscela così da eliminare eventuali errori dovuti all'utilizzo di apparecchiature diverse. Vengono poi preparate le giuste quantità di emulsione bituminosa e acqua, anche queste attentamente pesate sempre con la stessa bilancia per evitare errori.



*Figura 10- pesatura degli aggregati*



*Figura 11- pesatura filler attivo CVR/cemento 32.5 R*

In secondo luogo viene usata un'impastatrice meccanica dotata di un cestello rimovibile che serve per impasti a freddo. Infatti non è necessario scaldare i vari ingredienti poiché essi vengono semplicemente miscelati. Come prima cosa vengono miscelati gli aggregati insieme al cemento o filler attivo per circa un minuto, in seguito a questa prima miscelazione l'impasto avrà un colore più omogeneo.



Figura 12- miscelazione degli aggregati più cemento/filler

Quindi verrà versata dell'acqua omogeneamente nel cestello e si farà miscelare l'impasto per un altro minuto.



Figure 13/14- aggiunta di acqua all'impasto / impasto miscelato con acqua

Vengono poi concluse le procedure di miscelazione a seguito dell'aggiunta del giusto quantitativo di emulsione bituminosa indicato nella ricetta e miscelando l'impasto per un ultimo minuto.



*Figure 15/16- aggiunta di emulsione all'impasto / impasto miscelato con emulsione*



*Figura 17- impasto terminato e pronto alla compattazione*



A seguito di ogni aggiunta d'acqua, essendo questa una procedura innovativa, e non avendo le certezze sul corretto dosaggio delle componenti, ogni volta è stato valutato se il contenuto di acqua aggiunto fosse adatto per il corretto miscelamento dell'impasto. Con un quantitativo di acqua troppo basso la miscela sarebbe operativamente non lavorabile, mentre un quantitativo troppo alto renderebbe impossibile la compattazione. Per questo è consigliabile aggiungere un quantitativo di acqua minore di quello indicato nella miscela e valutare se aggiungerne ancora in seguito.

Per valutare se il contenuto di acqua nella miscela è accettabile si può svolgere una semplice prova che consiste nello stringere un gruzzolo di materiale con la mano, se il quantitativo di acqua è quello giusto esso risulterà sufficientemente agglomerabile e lascerà la mano umida ma non bagnata.

### **3.1.2 Compattazione**

In seguito a questa prima fase di miscelazione dell'impasto, si passa alla preparazione dei provini e quindi alla compattazione. Un quantitativo di materiale pari a 2400 g viene inserito nella fustella per poi essere compattato con la pressa giratoria a taglio. Questa pressa giratoria è un'apparecchiatura introdotta alla fine degli anni '50, costituita da un telaio di carico con un supporto inclinabile all'interno, dove viene posta la fustella contenente il materiale da compattare. È 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 quelle ottenute in sito mediante la compattazione dei rulli di cantiere. La compattazione giratoria determina un mutuo incastro tra i grani dell'aggregato, formando così strutture aventi una distribuzione dei vuoti la cui forma ed entità è simile a quella che si registra in sito. Riproduce molto fedelmente l'addensamento del materiale subito durante la fase di stesa in cantiere, dal momento che il campione è sottoposto sia ad uno sforzo di compressione verticale, che di taglio orizzontale dovuto alla rotazione della fustella attorno ad un asse inclinato. Il macchinario è dotato di un sistema di acquisizione e controllo dei dati, e grazie alla presenza di un display è possibile monitorare in continuo l'altezza raggiunta dal provino ad ogni giro. (4)



Figura 18- pressa a taglio giratoria

Il macchinario ha due diverse modalità di svolgimento: è infatti possibile impostare se svolgere la prova a un numero di giri imposto o ad altezza imposta.

Va impostata la pressione verticale costante (600 kPa), il diametro della fustella utilizzata (100 mm) mentre, per la compattazione dei provini, si procede andando ad impostare il numero di giri (60 giri) e grazie al pannello di controllo, si viene informati dell'altezza ottenuta.

Una volta che la fustella è pronta, viene rapidamente trasportata all'interno del telaio di carico, si posiziona sul piano, si gira fino a farla aderire ad una barra metallica e si avvia la prova tramite il pannello di controllo, premendo il tasto "start". Il pistone inizia a scendere fino ad imprimere la pressione impostata (600 kPa), i sostegni laterali si alzano facendo inclinare la fustella, per poi iniziare a ruotare. Nel corso della prova si registrano le altezze dei provini a 1,2,3,4,5,6,8,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55 e 60 giri. Raggiunto il numero di giri preimpostato, il macchinario va in modalità "self-parking": il pistone risale dando la possibilità, una volta acceso il segnale "Machine Ready", di estrarre la fustella con all'interno il provino compattato.

Si conclude con l'estrazione del provino, che deve avvenire dopo circa tre ore dalla compattazione, mediante martinetto idraulico che lo solleva dal basso verso l'alto, facendolo

uscire dalla fustella. Questa operazione è stata fatta per permettere al provino di essere maggiormente coperto durante le prime ore di presa del cemento. Infatti, un'estrazione troppo accelerata del provino comporterebbe un peggioramento delle prestazioni del materiale. I provini vengono poi immediatamente pesati e messi a maturare in una camera climatica a 20°C posando sopra di essi un panno umido.



Figure 19/20- compattazione in opera / estrazione del provino mediante pressa idraulica

### **3.2 Determinazione contenuto dei vuoti delle miscele**

La composizione volumetrica delle miscele è una delle proprietà che maggiormente caratterizza il comportamento del conglomerato bituminoso in fase di esercizio. Le miscele sono costituite principalmente da tre componenti, come illustrato in figura 21, inerti e legante (che costituiscono la fase solida) e vuoti (che costituiscono la fase gassosa, cioè aria). I rapporti volumetrici tra queste fasi influenzano direttamente molte proprietà prestazionali del conglomerato bituminoso. L'analisi volumetrica del conglomerato bituminoso permette di definire la percentuale in volume di ciascun componente per unità di volume di

conglomerato. In particolare è importante determinare il volume dei vuoti, che incide in maniera importante sulle proprietà meccaniche della miscela.

Le proprietà volumetriche delle miscele studiate nella presente indagine sono state determinate, in termini di contenuto di vuoti residui dei provini compattati, in accordo a quanto prescritto dalla normativa UNI EN 12697-8. Il volume dei vuoti si ricava utilizzando la massa volumica massima e la massa volumica apparente mediante la seguente formula:

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

In questa formula  $\rho_m$  sta ad indicare la massa volumica massima, cioè la massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela bituminosa ad una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica massima  $\rho_m$  del conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando un procedimento matematico conformemente alla normativa UNI EN 12697-5, secondo cui:

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

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>

Mentre  $\rho_b$  nella formula usata per ricavare il volume dei vuoti sta ad indicare la massa volumica apparente, cioè la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria, di provino ad una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica apparente  $\rho_b$  del

conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando la procedura geometrica in accordo con la normativa UNI EN 12697-6.

La procedura prevede di misurare le dimensioni del provino in millimetri e di determinare la massa del campione secco ( $m_1$ ). La massa volumica geometrica ( $\rho_{bgeom}$ ) per provini cilindrici si calcola come segue:

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

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.

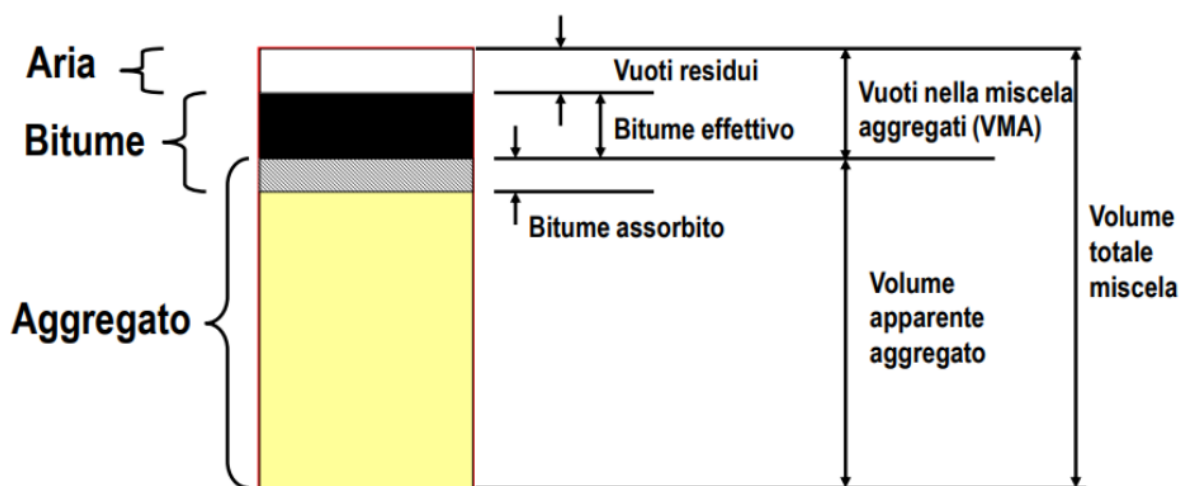


Figura 21- schema che evidenzia i rapporti quantitativi dei principali costituenti del conglomerato

Una volta concluso il periodo di 7 giorni nella camera climatica a 20° necessario per la maturazione, i provini vengono poi accuratamente tagliati dal tecnico di laboratorio. Importante per lo svolgimento delle prove è la misurazione accurata dell'altezza dei provini tramite un calibro. Viene suddivisa la carota in 4 quadranti e vengono poi misurati gli spessori, si fa la misurazione delle altezze ogni 90°. Lo spessore di ogni carota viene determinato facendo la media dei quattro spessori misurati.

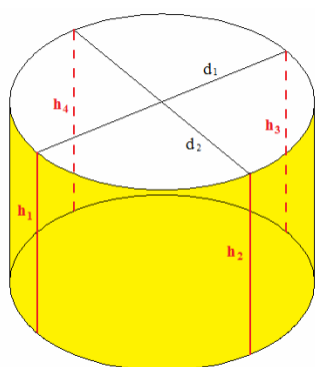


Figure 22/23- misurazione dell'altezza dei provini tramite calibro

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

Per svolgere questa prova, che fornisce il modulo di rigidità a trazione indiretta, è stata utilizzata l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester), secondo la normativa UNI-EN 12697-26. Con il NAT è possibile determinare il modulo elastico tramite la prova di trazione indiretta a carico ripetuto, la resistenza a fatica, l'accumulo delle deformazioni permanenti e il creep statico.

Il modulo di rigidità rappresenta la capacità del conglomerato di ridistribuire le tensioni negli strati sottostanti: uno degli scopi della pavimentazione è infatti quello di fare da filtro nei confronti dei carichi. La sovrastruttura assorbe i carichi e trasmette in profondità le tensioni facendo in modo che al sottofondo giungano tensioni che siano compatibili con quelle ammissibili dal terreno e distribuendole in un'area sempre più grande. Il modulo di

rigidezza è la proprietà ingegneristica razionale che lega tensioni e deformazioni. Maggiore è il modulo, maggiore è la capacità di ridistribuire le tensioni.

Questa apparecchiatura consente di applicare una serie di carichi di compressione sul provino cilindrico consentendo di ottenere la deformazione nella direzione ortogonale a quella di applicazione del carico tramite l'utilizzo di trasduttori. La prova viene svolta secondo la normativa UNI-EN 12697-26 che impone una deformazione preimpostata. Per ogni provino la prova viene svolta su due diametri diversi perpendicolari, una volta svolta la prova per il primo diametro il provino viene ruotato di 90° e si ripete la prova. Il NAT consente di simulare lo stato tensionale e deformativo cui è sottoposta la pavimentazione stradale al passaggio degli pneumatici. Il modulo di rigidezza di un conglomerato bituminoso caratterizza la capacità di una miscela di deformarsi in conseguenza a delle tensioni dovute all'applicazione di un carico. Il risultato di questa prova è l'ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus). Questo parametro definisce al meglio il comportamento meccanico e reologico dei conglomerati bituminosi.

Attraverso un software a cui è collegato il macchinario devono essere settati alcuni parametri prima della fase di condizionamento, quindi prima dell'inizio della prova. I parametri da impostare sono: il tempo di picco (rise time=124 ms), la deformazione di target fissata (in questo caso 3  $\mu\text{m}$ ), il coefficiente di Poisson (0,30) e la temperatura della prova (20° gradi per le prove a sette giorni e variato tra 5-20-40° per le prove a quattordici giorni).

Prima dell'inizio della prova vera e propria, la macchina ha un sistema di gestione che, attraverso una serie di colpi preliminari, effettua una taratura e permette di assestare il carico sulla superficie del campione. Così si fa in modo che il carico applicato rispetti quanto indicato nella normativa.

In corrispondenza del diametro orizzontale, le sollecitazioni medie e massime nelle direzioni x (trazione) e y (compressione) sono calcolate dalle seguenti espressioni:

$$\sigma_{x,\max} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \quad \sigma_{x,\text{media}} = \frac{0,273 \cdot P}{d \cdot t}$$

$$\sigma_{y,\max} = \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \quad \sigma_{y,\text{media}} = \frac{-P}{d \cdot t}$$

dove:

- P = carico applicato;
- D = diametro del campione;
- T = spessore del campione.

La determinazione del modulo di rigidezza elastica, in funzione delle sollecitazioni teoriche, può essere rappresentata in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato tensionale biassiale. La deformazione orizzontale  $\epsilon_x$  dell'elemento è:

$$\epsilon_{x,\text{media}} = \frac{\sigma_{x,\text{media}}}{E} - \nu \frac{\sigma_{y,\text{media}}}{E}$$

dove:

- $\nu$  = il coefficiente di Poisson;
- E = il modulo elastico del materiale.

Quello indicato nella foto sottostante sarà lo stato di sollecitazione al quale è sottoposto il provino nel NAT:

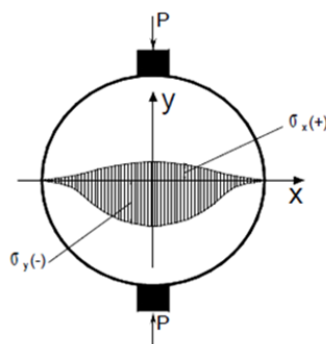


Figura 24- stato di sollecitazione al quale è sottoposto il provino nel NAT



Grazie alle espressioni ricavate, sostituite nella precedente formula e tenendo conto che la deformazione orizzontale dei campioni  $\Delta$  si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ha:

$$\Delta = \frac{0,273 \cdot P}{E \cdot t} + \nu \frac{P}{E \cdot t}$$

Da cui è possibile ricavare il modulo elastico del materiale E, definito come ITSM, come indicato nella seguente equazione:

$$ITSM = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0,273 + \nu)$$

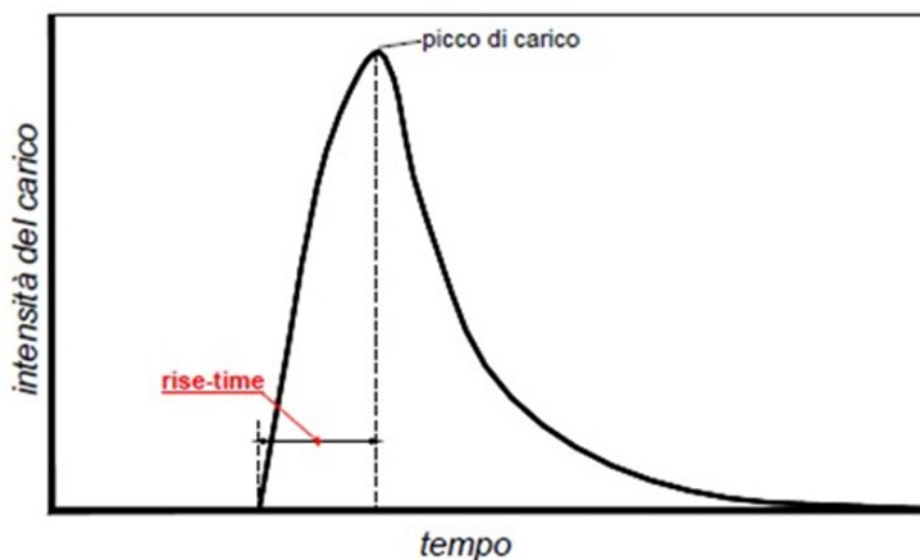


Figura 25- rappresentazione del rise-time di un carico di impulso

Affinché la prova sia considerata valida, le curve di carico e di deformazione devono essere più regolari possibili. Le condizioni che influenzano maggiormente la regolarità di queste curve sono la temperatura di prova, il tempo di picco, la deformazione laterale imposta e il numero di colpi di condizionamento iniziale. A causa della natura visco-elastica del legante, la risposta meccanica dei conglomerati bituminosi viene molto influenzata dal tempo di applicazione del carico, che nel nostro caso è stato impostato a 124 ms. Il livello di deformazione laterale imposta durante la prova influisce sulle proprietà meccaniche del

conglomerato a causa del comportamento non lineare. Anche il numero di colpi di condizionamento iniziale influisce, se si usa un numero basso di colpi i tempi di prova saranno più brevi, ma allo stesso tempo diminuirà anche l'affidabilità delle misurazioni.

Prima dell'inizio della prova i provini da testare devono essere condizionati termicamente e portati alla temperatura di prova prefissata. Per mantenere la temperatura costante a 20°C il NAT è posizionato all'interno di una camera climatica. L'apparecchiatura è costituita da una cella di carico, un pistone e un castelletto, che è un dispositivo usato per posizionare il provino. Il macchinario è collegato a un software che consente di controllare le modalità di svolgimento della prova e di registrare tutti i dati che si ottengono.

La cella di carico è l'elemento principale del NAT perché è quello che permette di imprimere il carico al provino. Supporta un carico massimo pari a 20KN ed è collegata al pistone che imprime la pressione sulla testa di carico, che si trova a contatto con il provino. Anche la cella di carico è collegata al computer attraverso il quale si registrano i dati e soprattutto si controllano le modalità di svolgimento della prova, regolando il funzionamento della cella stessa. Tramite il computer è possibile misurare con elevata precisione le deformazioni del campione testato, a seguito della sollecitazione applicata sullo stesso. La corretta altezza del pistone dipende dalle dimensioni del provino testato, che nel nostro caso sarà di 100mm. Nel caso si testassero provini di dimensioni maggiori il sistema permette lo scorrimento del pistone verso l'alto permettendo l'ingresso di provini più grandi.

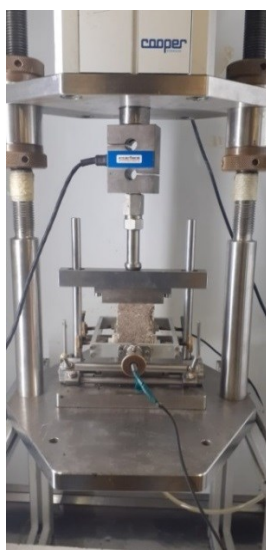


Figura 26- cella di carico NAT

All'interno della cella di carico viene poi inserito il castelletto, dove dovrà prima essere posizionato il provino. Questo è costituito da un telaio sul quale si andrà a centrare il provino. Questo provino dovrà poi essere fissato con le viti e successivamente si andranno ad inserire i trasduttori nei due fori guida, che poi verranno spinti verso il provino fino ad arrivare a fondo corsa per poi fissarli mediante l'utilizzo delle due rotelle. Si applica poi la testa di carico e l'elemento è pronto per essere messo nella camera climatica. Prima di iniziare la prova si dovranno alzare le barrette, inizialmente abbassate e necessarie a sostenere il provino nella fase preliminare di posizionamento, in modo tale da evitare la rottura dello stesso.

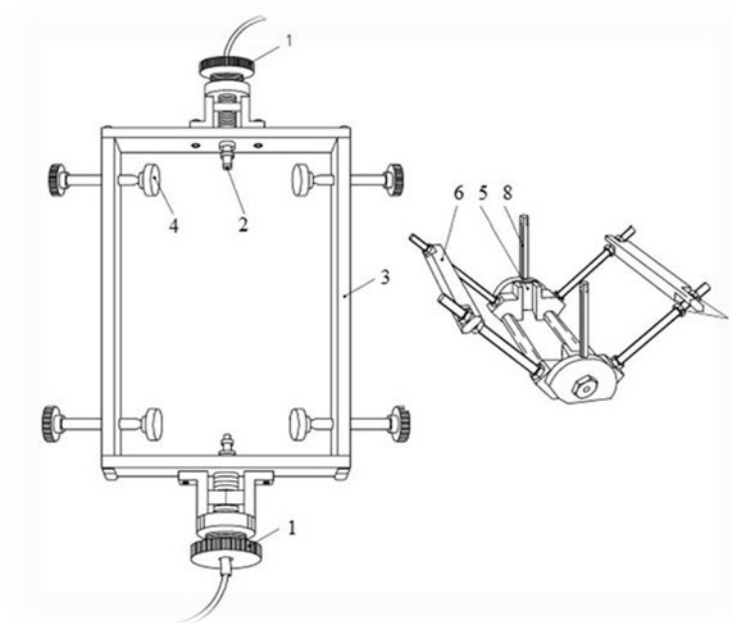


Figura 27- castelletto dove viene posizionato il provino

Saranno proprio i trasduttori che abbiamo posizionato sul provino ad essere collegati al computer, e saranno loro a fornire i valori degli spostamenti durante la prova che serviranno per ottenere la deformazione ortogonale a quella di applicazione del carico.

Oltre all'inserimento dei dati già elencati sopra nel software, vanno inseriti anche i dati del singolo provino, quale il diametro specifico (in questa sperimentazione abbiamo usato provini con un diametro di 100mm), e l'altezza media (che abbiamo misurato precedentemente, ed è variabile per ogni provino).

Vanno anche inseriti altri parametri fissi per tutti i provini di tutte le miscele, che sono:

- Coefficiente di Poisson: pari a 0,30;
- Tempo di carico di picco: tempo che il macchinario impiega a applicare il carico di picco, pari a 124 ms;
- Deformazione di target orizzontale: deformazione che si raggiunge tramite il macchinario, pari a 2  $\mu\text{m}$ ;
- Numero di colpi: numero di impulsi necessari a raggiungere una deformazione di 2  $\mu\text{m}$ .

Procedendo il software farà scendere il pistone fino a quando non entrerà in contatto con la testa di carico, e il macchinario sarà pronto per l'applicazione del carico.

Raggiunto il contatto tra i due elementi il computer aprirà una schermata utile al controllo dei trasduttori. Questi dovranno essere regolati ruotando le due rotelle finché le freccette che compaiono sullo schermo non diventano rosse, indicando che i trasduttori sono posizionati correttamente per misurare la deformazione. In caso contrario essi andrebbero a misurare una deformazione non reale del provino ed il test non potrebbe considerarsi valido.

Solo dopo la regolazione dei trasduttori si potranno abbassare le leve per evitare la rottura del provino e per non influenzare la prova. Si procede poi avviando i 10 colpi di precarico, che anticipano i 5 impulsi finali che costituiscono la prova vera e propria. Per ogni impulso, il software registra tutti i parametri in precedenza descritti con i rispettivi valori medi, ottenendo così il modulo elastico a trazione indiretta dei provini di ogni miscela. Si arriva così alla schermata finale, dove vengono riportati i parametri precedentemente descritti per ciascuno dei 5 impulsi di prova applicati con il relativo valore medio.

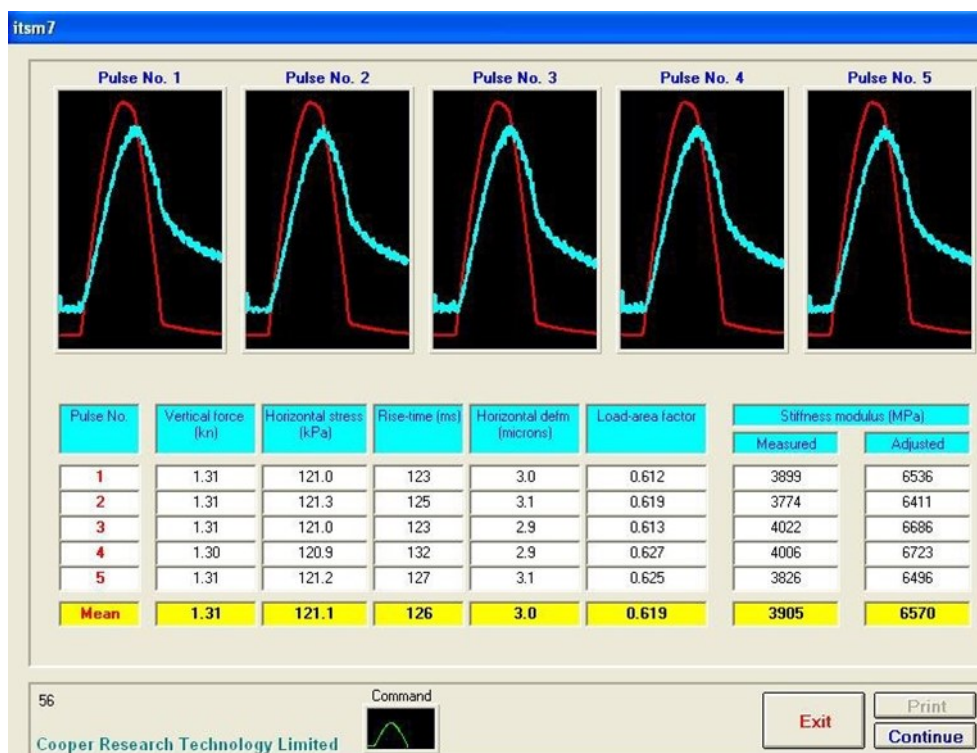


Figura 28- schermata finale con i valori ITSM

Conclusa questa procedura per un diametro si dovrà ruotare il provino di 90° e ripetere nuovamente la procedura con tutti i passaggi, calcolando un nuovo valore ITSM. I due valori misurati sullo stesso provino non dovranno differire più del 20% tra loro e l'ITSM preso in considerazione non sarà altro che la loro media.

### 3.4 Prova di trazione indiretta (ITS)

La prova di trazione indiretta (brasiliiana) è incentrata alla valutazione della resistenza di provini cilindrici di conglomerato bituminoso. La resistenza alla trazione indiretta, assieme ad altre caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche, è un requisito fisico fondamentale che il conglomerato deve presentare per essere conforme alle normative vigenti. Tale parametro è importante per valutare la qualità e l'accettabilità delle miscele secondo quanto definito dalla normativa UNI-EN 12697-23. Questa normativa prevede lo svolgimento della prova in controllo di deformazione. I valori di resistenza devono essere studiati e valutati con criterio al fine di ottenere, utilizzare e verificare che i materiali rispettino i controlli e le

norme. Tale metodo di prova serve a valutare indirettamente la resistenza a trazione di un materiale, sottoponendo un provino con dimensioni standard ad una forza di compressione applicata ad una zona ristretta, per tutta la lunghezza del cilindro. La risultante forza di trazione ortogonale provoca la rottura del provino per trazione.

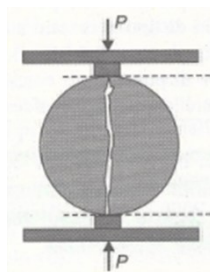


Figura 29- applicazione del carico al provino e rottura

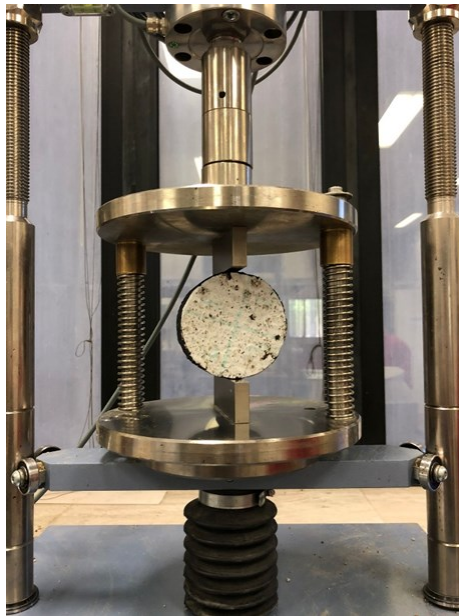
Il carico di compressione è applicato tramite una testa di carico che avanza a velocità costante, causando la rottura del campione. Nel provino la rottura appare con una fessura lungo la stessa direzione di applicazione del carico: si chiama di trazione indiretta in quanto la sollecitazione che porta a rottura il provino, per effetto Poisson, è la trazione che si genera in direzione perpendicolare alla direzione di carico. Alla fine della prova si dovrà poi andare a verificare che la superficie di rottura sia centrata, in modo da evitare che ci siano dubbi sull'incertezza dei valori ottenuti e di conseguenza ripetere la prova.

Una volta conclusa la prova ISTM per la determinazione dei moduli di resistenza a trazione indiretta, i provini vengono posti in una camera a 25° per circa tre ore, per evitare che la temperatura incida sul comportamento del materiale. Una volta trascorso il tempo necessario il provino viene preso e posto sui piatti dello strumento centrando l'asse. Lo strumento infatti è costituito da due piatti infinitamente rigidi e paralleli. Sui piatti si trovano sia superiormente che inferiormente dei listelli che servono per trasmettere il carico al provino. Le dimensioni dei listelli che abbiamo usato in questa sperimentazione, visto che abbiamo usato dei provini di larghezza 100mm sono:

- larghezza:  $15 \pm 2$  mm;
- spessore:  $4 \pm 1$  mm;
- lunghezza  $\geq$  della lunghezza della linea di contatto del provino.

Per provini di larghezze differenti si dovrebbero usare listelli di dimensioni diverse da quelle usate.

Una volta posizionato il provino si attiva la macchina, e il carico viene imposto dalla testa di carico inferiore che viene fatta alzare scorrendo su apposite guide fino ad incontrare il contrasto del piatto superiore, comprimendo il provino lungo il diametro. Il macchinario, durante l'applicazione della sollecitazione, consente di registrare la deformazione di trazione, ed il carico di rottura a compressione.



*Figura 30- posizionamento centrale del provino rispetto ai due listelli*

Una volta posizionato il provino si deve avviare sul computer collegato alla macchina il programma UTM II, e inserire i seguenti parametri sulla schermata iniziale:

- Diametro del provino: 100 mm;
- Altezza media: in precedenza misurata;
- Identificazione provino: inserire il nome del provino.

Bisogna impostare anche la velocità di avanzamento, che in questa sperimentazione è di circa 50mm/min, ed il carico di fine prova, la macchina infatti si arresta automaticamente quando registra una riduzione del carico massimo del 20%.

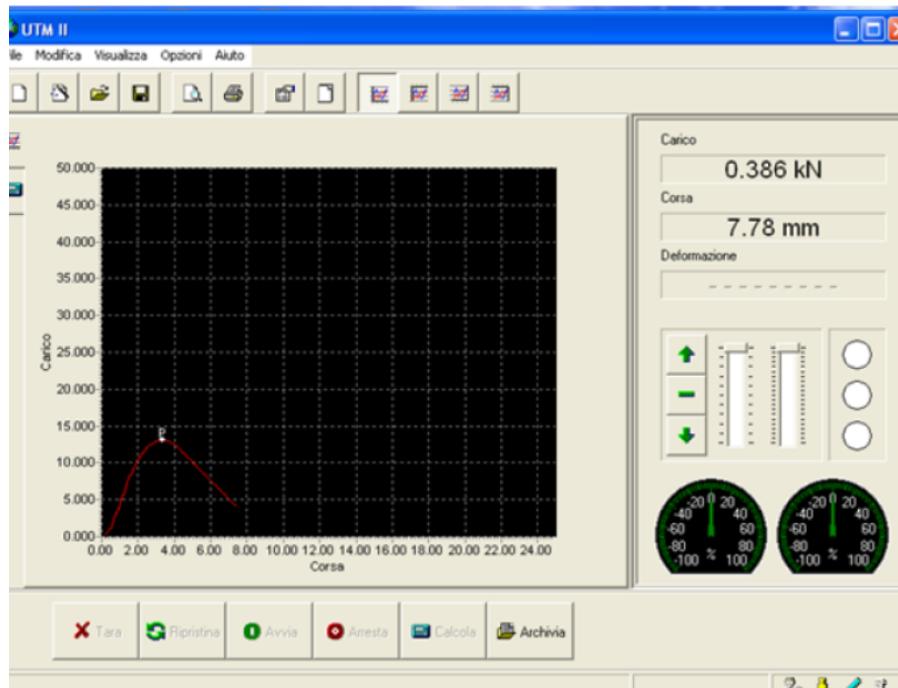


Figura 31- grafico visibile durante la prova sul programma UTM II

Durante la prova sulla schermata del computer sarà visibile un grafico (come quello riportato in figura 31) che rappresenterà la curva carico-deformazione verticale, che traccia in tempo reale lo sforzo in funzione della deformazione. Se all'avvio della prova ci dovesse essere uno stallo della curva, dovuto alla posizione delle piastre, questo comporterebbe una variazione del valore della deformazione. Se così dovesse accadere, si apre il file excel relativo alla prova e si corregge andando ad eliminare quei valori inopportuni. Oltre questo grafico, alla fine della prova il sistema ci fornirà i seguenti risultati:

- Carico di picco o di rottura (P);
- Deformazione a compressione causata dalla rottura (spostamento/diametro);
- Resistenza a trazione indiretta (ITS).





Figura 32- rottura del provino

Il software andrà quindi a elaborare il valore di resistenza a trazione ITS, cioè la massima tensione di trazione applicata al provino.

L'ITS può essere calcolato una volta noto il carico di rottura P tramite questa formula matematica:

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

dove:

- $P = P_{\max}$  = carico di picco [N]
- $t$  = altezza media del provino [mm]
- $d$  = diametro del provino [mm].

Un altro parametro che verrà riportato tra i risultati è il CTI (coefficiente di trazione indiretta) definito come:

$$CTI = \frac{\pi \cdot ITS}{2 \cdot \varepsilon}$$

dove:

- ITS = Indirect Tensile Strength [MPa]
- $\varepsilon$  = deformazione massima del provino [%]

### **3.5 Miscele di progetto**

Per la realizzazione dei diversi provini, i quantitativi delle differenti pezzature di aggregato, filler attivo/cemento, emulsione bituminosa e di acqua necessarie sono stati ricavati nella fase di mix design.

Mix-design è letteralmente il progetto della miscela; più estesamente è il calcolo della composizione della miscela a partire dalle prestazioni richieste e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili.

Per ogni “ricetta” utilizzata in questa sperimentazione, per distinguere i vari provini, si è utilizzata una nomenclatura alfanumerica per facilitare lo svolgimento durante le fasi successive.

La nomenclatura generica era la seguente:

$$a\_b\_ \alpha \_ \beta \_ c$$

In particolare ogni sigla di questa nomenclatura ha uno specifico significato:

- a, che può essere nella nomenclatura CVR o REF, ed indica la tipologia di legante a seconda se si tratti di filler attivo oppure cemento 32,5 R;
- b, che può essere V, R o 50/50, e sta ad indicare se la miscela contiene rispettivamente aggregati vergini, 100% di fresato oppure metà dell’uno e metà dell’altro;
- $\alpha$ , indica il dosaggio di filler o di cemento all’interno della miscela in percentuale;
- $\beta$ , indica il dosaggio di emulsione bituminosa all’interno della miscela in percentuale;
- c, indicato con A o B, a seconda del tipo di emulsione utilizzata.

Di seguito si riporterà un breve elenco comprensivo delle miscele realizzate e testate con i rispettivi dosaggi dei componenti:

Tipo legante	% cemento	Tipo emulsione	% emulsione	% fresato	% acqua
CVR	18,0%	B	7,0%	0%	6,5%
CEMENTO	22,0%	B	7,0%	0%	7%
CVR	18,0%	A	7,0%	0%	7%
CEMENTO	22,0%	A	7,0%	0%	7%
CVR	13,0%	A	7,0%	0%	6%
CVR	13,0%	A	5,0%	0%	6%
CVR	13,0%	A	7,0%	100%	6,5%
CVR	13,0%	A	5,0%	100%	6%
CVR	18,0%	A	7,0%	100%	6,5%
CVR	18,0%	B	7,0%	100%	7%
CVR	25,0%	A	5,0%	0%	7,5%
CVR	25,0%	A	8,0%	0%	7,5%
CVR	18,0%	A	7,0%	50%	8%
CEMENTO	22,0%	A	7,0%	100%	6,5%
CVR	30,0%	A	5,0%	0%	8%
CVR	30,0%	A	8,0%	0%	9%

Figura 33-miscele realizzate

Di seguito verranno elencate le ricette realizzate in questa sperimentazione. In particolare per “Acqua totale” si intenderà la parte di acqua derivante dall’emulsione bituminosa e la parte derivante dall’aggiunta di acqua stessa.

CVR_V_18_7_A			CVR_V_18_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	17,8%	1370,6	Sabbia 0/6	40,0%	2202,2
Emulsione A	6,9%	531,3	Graniglia 4/8	19,5%	1073,6
Inerti	68,8%	5297,6	Pietrisco 8/12	8,0%	440,4
Acqua Totale	6,5%	500,5	Pietrisco 12/25	32,5%	1789,3
	100,0%	7700		100,0%	5505,5

CVR_V_18_7_B			CVR_V_18_7_B		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	17,8%	1370,6	Sabbia 0/6	40,0%	2202,2
Emulsione B	6,9%	531,3	Graniglia 4/8	19,5%	1073,6
Inerti	68,8%	5297,6	Pietrisco 8/12	8,0%	440,4
Acqua Totale	6,5%	500,5	Pietrisco 12/25	32,5%	1789,3
	100,0%	7700		100,0%	5505,5

REF_V_22_7_A			REF_V_22_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	22,1%	1701,7	Sabbia 0/6	40,0%	2051,3
Emulsione A	6,9%	531,3	Graniglia 4/8	19,5%	1000,0
Inerti	64,0%	5128,2	Pietrisco 8/12	8,0%	410,3
Acqua Totale	7,0%	338,8	Pietrisco 12/25	32,5%	1666,7
	100,0%	7700		100,0%	5128,2

REF_V_22_7_B			REF_V_22_7_B		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	22,1%	1701,7	Sabbia 0/6	40,0%	2051,3
Emulsione B	6,9%	531,3	Graniglia 4/8	19,5%	1000,0
Inerti	64,0%	5128,2	Pietrisco 8/12	8,0%	410,3
Acqua Totale	7,0%	338,8	Pietrisco 12/25	32,5%	1666,7
	100,0%	7700		100,0%	5128,2

CVR_V_13_7_A			CVR_V_13_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	13,42%	1027,95	Sabbia 0/6	40,0%	2331,6
Emulsione A	7,19%	550,55	Graniglia 4/8	19,5%	1136,6
Inerti	73,40%	5828,9	Pietrisco 8/12	8,0%	466,3
Acqua Totale	6,00%	250	Pietrisco 12/25	32,5%	1894,4
	100,0%	7657,4		100,0%	5828,9
CVR_V_13_5_A			CVR_V_13_5_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	13,4%	1027,95	Sabbia 0/6	40,0%	2391,6
Emulsione A	5,2%	400,4	Graniglia 4/8	19,5%	1165,9
Inerti	75,9%	5979,1	Pietrisco 8/12	8,0%	478,3
Acqua Totale	5,5%	260,0	Pietrisco 12/25	32,5%	1943,2
	100,0%	7667		100,0%	5979,1
CVR_R_13_7_A			CVR_R_13_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	13,4%	1027,95	Filler Recupero	5,0%	291,4
Emulsione A	7,2%	550,55	Grosso Lucidi	55,0%	3205,9
Inerti	73,0%	5828,9	RAP Perugia	40,0%	2331,6
Acqua Totale	6,5%	285,0		100,0%	5828,9
	100,0%	7692,4			
CVR_R_13_5_A			CVR_R_13_5_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	13,4%	1027,95	Filler Recupero	5,0%	299,0
Emulsione A	5,2%	400,4	Grosso Lucidi	55,0%	3288,5
Inerti	75,4%	5979,1	RAP Perugia	40,0%	2391,6
Acqua Totale	6,0%	300,0		100,0%	5979,1
	100,0%	7707			

CVR_R_18_7_A			CVR_R_18_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)	m [g]	
Filler reattivo	17,7%	1370,6	Filler Recupero	5,0%	275,3
Emulsione A	6,9%	531,3	Grosso Lucidi	55,0%	3028,0
Inerti	68,9%	5505,5	RAP Perugia	40,0%	2202,2
Acqua Totale	6,5%	320,0		100,0%	5505,5
	100,0%	7727			
CVR_R_18_7_B			CVR_R_18_7_B		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)	m [g]	
Filler reattivo	17,8%	1370,6	Filler Recupero	5,0%	275,3
Emulsione B	6,9%	531,3	Grosso Lucidi	55,0%	3028,0
Inerti	68,3%	5505,5	RAP Perugia	40,0%	2202,2
Acqua Totale	7,0%	300,0		100,0%	5505,5
	100,0%	7707,4			
CVR_50/50_18_7_A			CVR_50/50_18_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)	m [g]	
Filler reattivo	17,8%	1370,6	Filler Recupero	2,5%	137,6
Emulsione A	6,9%	531,3	Grosso Lucidi	27,5%	1514,0
Inerti	67,3%	5505,5	RAP Perugia	20,0%	1101,1
Acqua Totale	8,0%	275,0	Sabbia 0/6	20,0%	1101,1
	100,0%	7682,4	Graniglia 4/8	9,8%	536,8
			Pietrisco 8/12	4,0%	220,2
			Pietrisco 12/25	16,3%	894,6
				100,0%	5505,5
REF_R_22_7_A			REF_R_22_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)	m [g]	
Filler reattivo	22,2%	1701,7	Filler Recupero	5,0%	256,4
Emulsione A	6,9%	531,3	Grosso Lucidi	55,0%	2820,5
Inerti	64,4%	5128,2	RAP Perugia	40,0%	2051,3
Acqua Totale	6,5%	300,0		100,0%	5128,2
	100,0%	7661			

CVR_V_25_5_A			CVR_V_25_5_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	24,9%	1925	Sabbia 0/6	40,0%	2002,0
Emulsione A	5,0%	385	Graniglia 4/8	19,5%	976,0
Inerti	62,6%	5005,0	Pietrisco 8/12	8,0%	400,4
Acqua Totale	7,5%	420,0	Pietrisco 12/25	32,5%	1626,6
	100,0%	7735		100,0%	5005,0
CVR_V_25_8_A			CVR_V_25_8_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	25,0%	1925	Sabbia 0/6	40,0%	1940,4
Emulsione A	8,0%	616	Graniglia 4/8	19,5%	945,9
Inerti	59,5%	4851,0	Pietrisco 8/12	8,0%	388,1
Acqua Totale	7,5%	300,0	Pietrisco 12/25	32,5%	1576,6
	100,0%	7692		100,0%	4851,0
CVR_V_30_5_A			CVR_V_30_5_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	30,0%	2310	Sabbia 0/6	40,0%	1786,4
Emulsione A	5,0%	385	Graniglia 4/8	19,5%	870,9
Inerti	57,0%	4466,0	Pietrisco 8/12	8,0%	357,3
Acqua Totale	8,0%	475,0	Pietrisco 12/25	32,5%	1451,5
	100,0%	7636		100,0%	4466,0
CVR_V_30_8_A			CVR_V_30_8_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	30,00%	2310	Sabbia 0/6	40,0%	1724,8
Emulsione A	8,00%	616	Graniglia 4/8	19,5%	840,8
Inerti	53,00%	4081,0	Pietrisco 8/12	8,0%	345,0
Acqua Totale	9,00%	693,0	Pietrisco 12/25	32,5%	1401,4
	100,0%	7700		100,0%	4312,0

Figura 34-ricette

## ***Capitolo 4 - Materiali***

In questo capitolo verrà fornita una descrizione dei vari materiali. I materiali usati per le diverse miscele di conglomerato bituminoso sono aggregati, filler attivo, cemento ed emulsione bituminosa. Per la formulazione delle diverse miscele, per ogni impasto abbiamo variato la composizione granulometrica degli aggregati, il dosaggio e la tipologia del legante cementizio, il dosaggio e la tipologia di emulsione bituminosa e l'utilizzo parziale o totale nonché l'assenza di materiale riciclato (RAP).

### **4.1 Aggregati**

Gli aggregati sono i materiali componenti principali delle miscele stradali, devono il loro nome alla natura granulare, il granulo è una parte (elemento) solido separabile senza esercitare un'azione di frantumazione.

Gli aggregati rappresentano la fase solida dei conglomerati e sono costituiti da particelle granulari, le quali costituiscono l'80-85% del volume delle miscele e circa il 95% del peso.

La natura degli aggregati li differenzia in tre diversi tipi: naturali, artificiali (industriali) o riciclati.

Gli aggregati naturali derivano dalla frantumazione di roccia compatta o da rocce sciolte (naturali o frantumate). Quelli artificiali invece possono essere progettati e prodotti su misura o sono derivati da loppa d'altoforno, ceneri volanti, argilla espansa o polistirolo. Mentre gli aggregati riciclati derivano dalla scomposizione di pavimentazioni esistenti (misti granulari, conglomerati bituminosi fresati). Questi aggregati alternativi trovano sempre più spazio nell'impiego nel campo stradale.

Si chiamano aggregati lapidei i prodotti di disgregazione delle rocce, siano essi allo stato incoerente o cementati a formare un conglomerato. Le caratteristiche di questi aggregati dipendono dalla natura della roccia da cui provengono. A seconda della loro natura le rocce si dividono in tre categorie: rocce ignee, sedimentarie e metamorfiche.



Le rocce ignee si formano a seguito della consolidazione dei magmi (magmatiti, rocce eruttive). La formazione delle rocce sedimentarie è dovuta invece all'alterazione ed erosione delle rocce preesistenti sulla superficie terrestre con formazione di detriti solidi. Questi detriti vengono poi trasportati ed in seguito avviene una sedimentazione (deposizione) del materiale in ambiti diversi (continentale, marino, ecc.). C'è poi una litificazione dei sedimenti (formazione della roccia per stratificazione) dovuta alla pressione esercitata da altri sedimenti che si accumulano via via sopra di essi. Una roccia metamorfica invece è il risultato della trasformazione di una roccia pre-esistente. La roccia originale è soggetta a calore e pressione molto intensi che causano cambiamenti fisici e/o chimici.

Per gli utilizzi in ambito stradale è importante conoscere quelle caratteristiche specifiche (proprietà, requisiti) che possono essere collegate alle prestazioni in opera delle miscele. Si è soliti distinguere in proprietà:

- GEOMETRICHE
- FISICHE - MECCANICHE - DI DURABILITA'
- CHIMICHE

I requisiti geometrici che è necessario conoscere sono dimensioni, granulometria, contenuto di fini, forma (e tessitura superficiale), percentuale di superfici frantumate e spigolosità dell'aggregato fine. La forma degli aggregati in particolare influisce molto, in fase di costruzione influenza la lavorabilità e la compattabilità, mentre in fase di esercizio influenza la resistenza all'accumulo di deformazione.

I requisiti fisici sono invece la pulizia e la qualità dei fini, massa volumica e assorbimento di acqua. Quelli meccanici sono la resistenza a frantumazione, all'usura e alla levigazione. I requisiti di durabilità riguardano la degradabilità delle soluzioni solfatiche e la resistenza a gelo-disgelo.

Per quanto riguarda i requisiti chimici, le proprietà chimiche di un aggregato influenzano in modo determinante l'adesione aggregato-bitume. Queste proprietà chimiche di un aggregato dipendono dalla sua composizione (minerali componenti la roccia madre), è però necessario individuare l'eventuale presenza di materiali nocivi come presenza di sostanze

solubili in acqua o sostanze che alterano i meccanismi di presa dei leganti idraulici. Si possono effettuare alcune analisi come l'analisi petrografica o l'analisi chimica.

La distribuzione granulometrica dell'aggregato influenza le più importanti proprietà dei conglomerati bituminosi:

- stabilità e rigidità
- lavorabilità e compattabilità
- resistenza a fatica
- resistenza allo scorrimento viscoso
- durabilità
- aderenza

Le esigenze da soddisfare variano per i diversi strati della sovrastruttura.

Nella progettazione della miscela è importante mantenere un certo tenore di vuoti per permettere al bitume di rivestire uniformemente i granuli di aggregato (per migliorare la durabilità) e per evitare trasudamenti (bleeding) e ridurre la tendenza all'ormaiamento (scorrimento viscoso). Per progettare la curva granulometrica della miscela si impiegando singole frazioni granulometriche (aggregati fini, grossi, in frazione unica e filler) e si impiegano solo le frazioni potenzialmente idonee (dotate di marcatura CE) disponibili sul mercato. Si usa una combinazione lineare delle frazioni a disposizione.

Il genere di aggregato usato in questa sperimentazione, presente nelle miscele, è l'aggregato calcareo. Il calcare è una roccia sedimentaria costituita essenzialmente da calcite, un minerale formato da carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). La forma e la giacitura di queste rocce, cioè il modo in cui sono disposte rispetto alla superficie terrestre, risentono delle caratteristiche del loro processo di formazione e di eventuali successivi fenomeni di deformazione. I processi di formazione delle rocce calcaree differiscono sostanzialmente per l'origine dei sedimenti costituenti: questi, infatti, possono derivare (calcarei organogeni) da gusci o da esoscheletri, cioè dagli scheletri esterni di organismi che vivono nelle acque dei mari e degli oceani. L'estrazione di questo materiale avviene prevalentemente in cave lungo corsi d'acqua e sono presenti più o meno in tutte le regioni italiane.

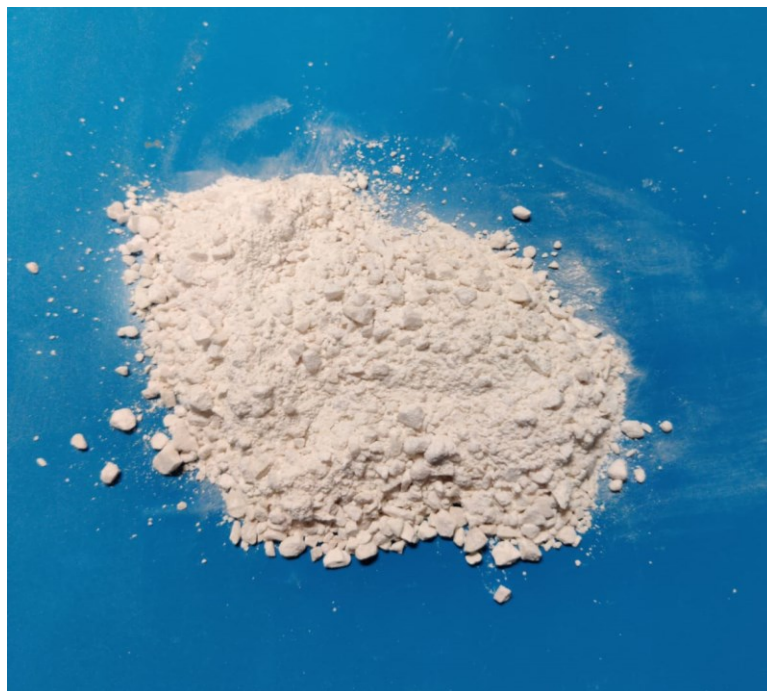


Figura 35- sabbia 0-6

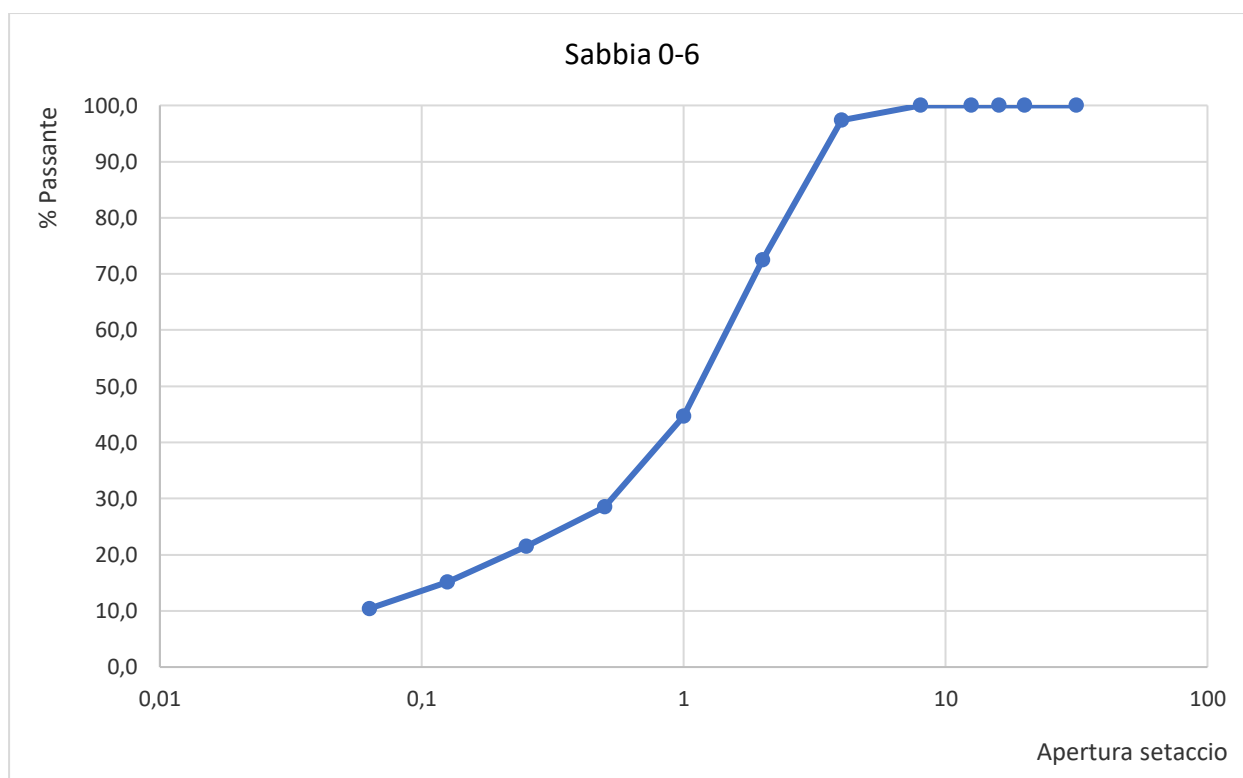


Figura 36- granulometria sabbia 0-6

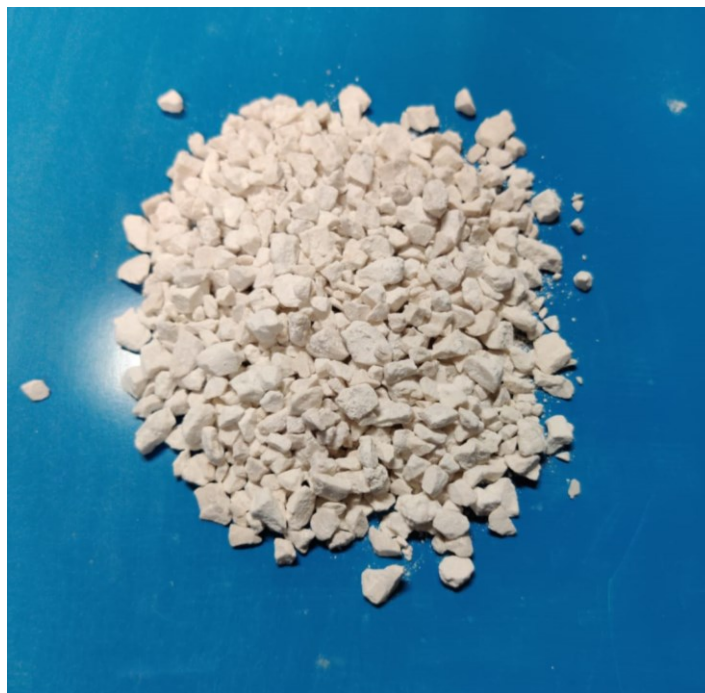


Figura 37- graniglia 4-8

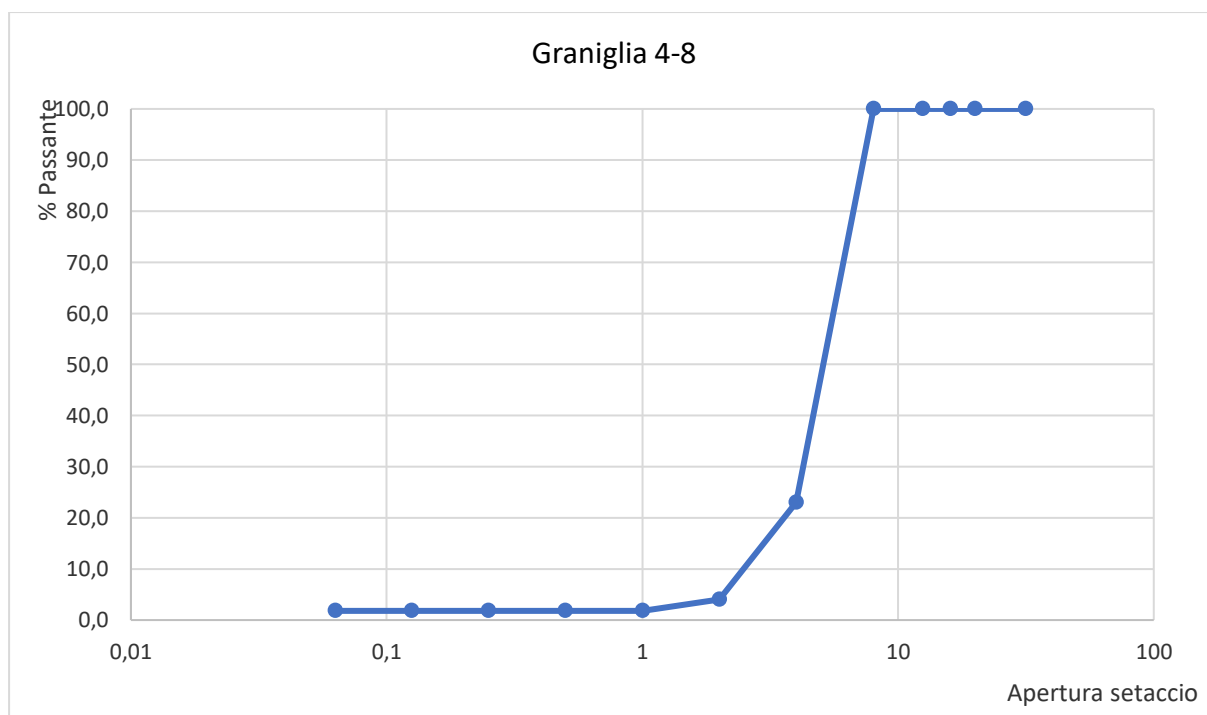


Figura 38- granulometria graniglia 4/8

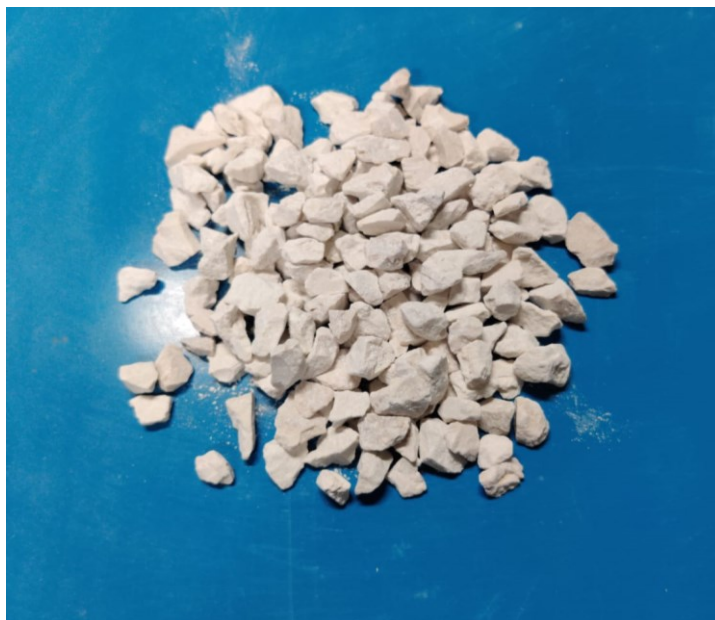


Figura 39- pietrisco 8-12

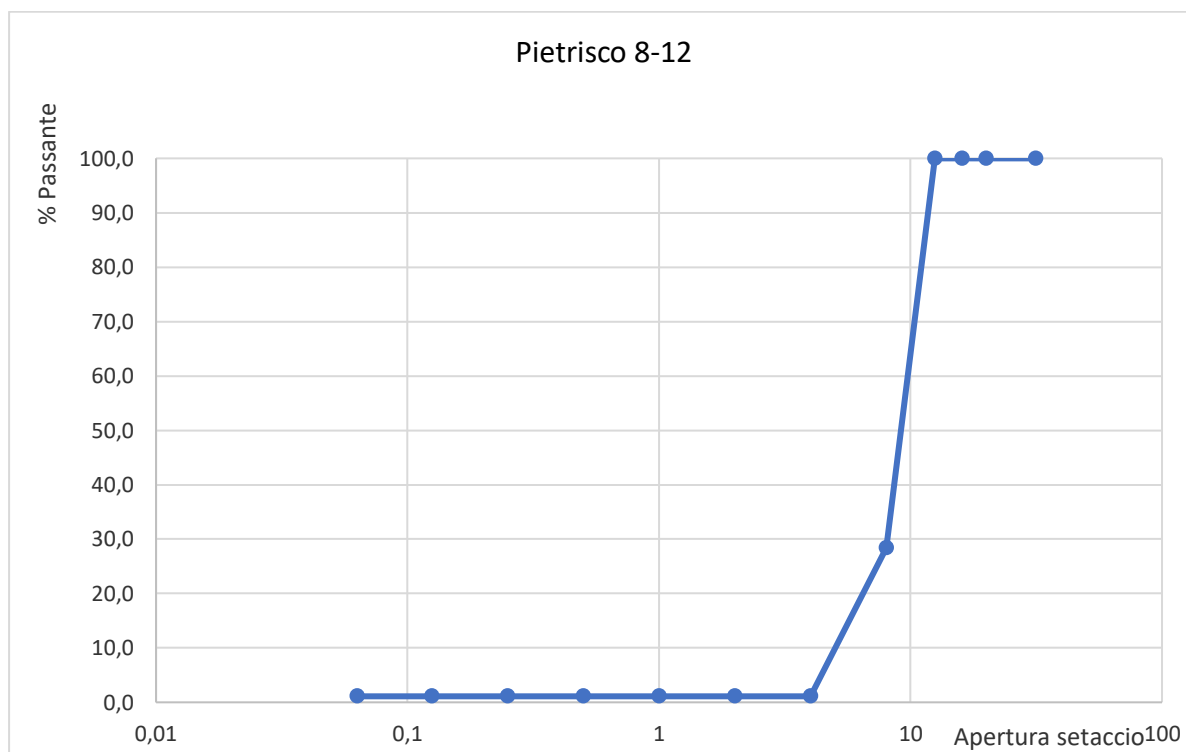


Figura 40- granulometria pietrisco 8-12

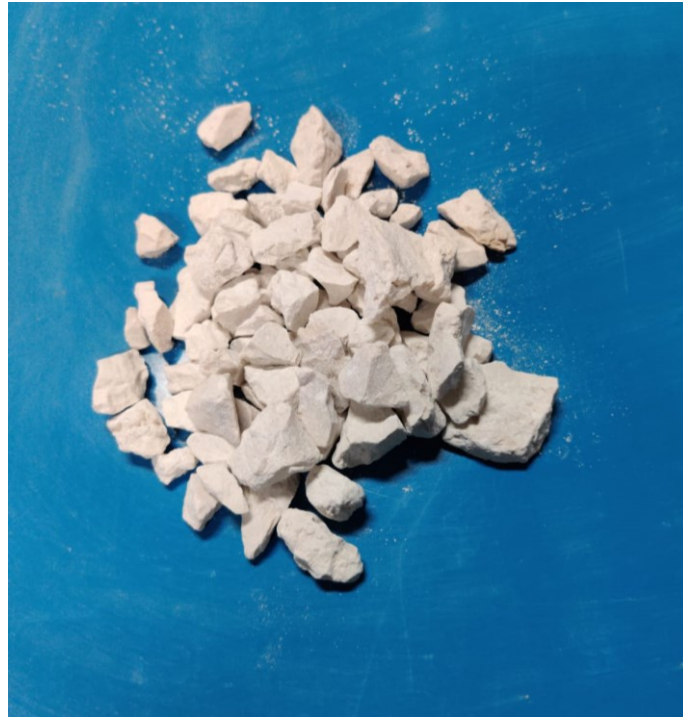


Figura 41- pietrisco 12-25

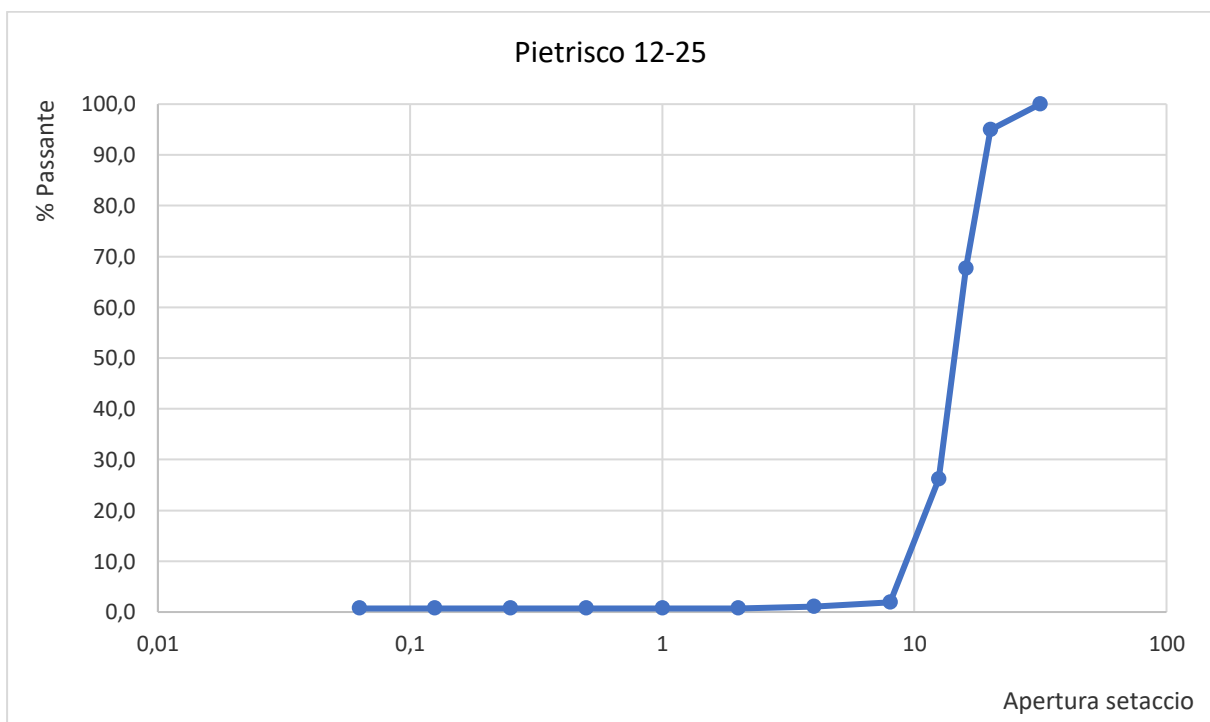


Figura 42- granulometria pietrisco 12/25

## 4.2 Filler attivo

Con il termine filler viene indicato l'aggregato di dimensioni ridottissime ( $< 0,063$  mm) che ha la funzione di riempitivo poiché le ridotte dimensioni permettono di ridurre la percentuale di vuoti di un conglomerato. E' costituito da granuli lapidei e viene utilizzato in diversi campi dell'ingegneria civile e in particolare è una frazione particolarmente importante per i conglomerati bituminosi. Può derivare da produzione industriale mirata, ma è ottenibile anche dalla frantumazione e abrasione della superficie di aggregati, i quali tendono ad urtarsi reciprocamente durante le fasi di lavorazione e movimentazione. Il nome deriva dall'inglese to fill (riempire). Data la grande importanza della frazione fine è molto importante controllarne il dosaggio e la composizione, perché il mastice filler + bitume controlla molte proprietà delle miscele

- evita il trasudamento;
- previene lo spogliamento;
- aumenta la stabilità delle miscele.

Quindi il contenuto di filler, passante allo 0.063 negli aggregati grossi e fini deve essere controllato e dichiarato.

La funzione del filler nel conglomerato bituminoso è quello di conferirgli una certa plasticità dopo essersi unito al bitume. In questo progetto è stato fornito dalla ditta committente un particolare filler reattivo avente un grosso quantitativo di cemento nella propria composizione. Questa composizione consente al filler di portare sia i vantaggi inerenti all'impiego di un materiale riempitivo, ma allo stesso tempo permettere uno sviluppo nel tempo delle prestazioni grazie alla presenza del legante cementizio.



Figura 43- filler attivo CVR

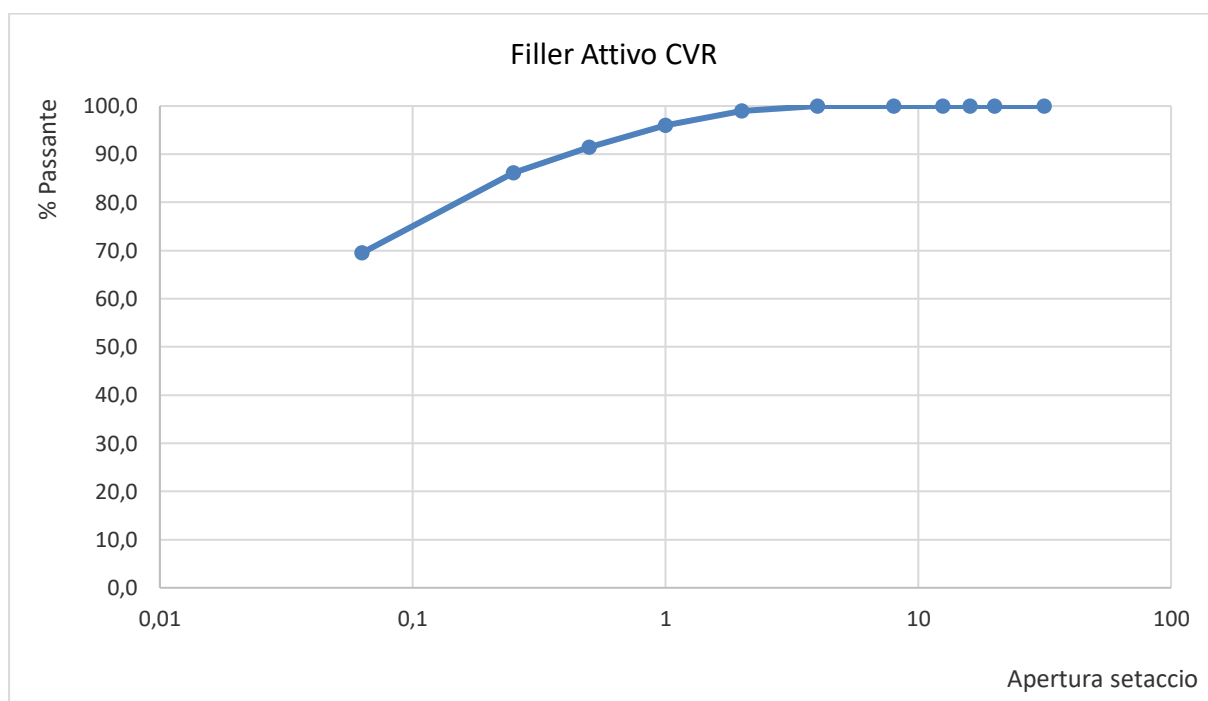


Figura 44- granulometria filler attivo CVR



### 4.3 Cemento

Un altro ingrediente fondamentale è il cemento, con cui si sono realizzate diverse ricette al fine di valutare eventuali differenze con il filler precedentemente descritto. Il cemento, in edilizia, indica una varietà di materiali da costruzione, in particolare leganti idraulici, che miscelati con acqua sviluppano proprietà adesive (proprietà idrauliche).

Esistono diversi tipi di cemento, differenti per la composizione, per le proprietà di resistenza e durezza e quindi per la destinazione d'uso. Nella fattispecie si è usato il cemento Portland al calcare 32,5 R. Il cemento Portland è alla base di quasi tutti i tipi di cemento attualmente utilizzabili in edilizia. Dal punto di vista chimico si tratta in generale di una miscela di silicati di calcio e alluminati di calcio, ottenuti dalla cottura ad alta temperatura di calcare e argilla, oppure di marna (in questo caso si parla di cementi naturali). Il materiale ottenuto, denominato clinker, viene finemente macinato e addizionato con gesso nella misura del 4-6% con la funzione di ritardante di presa. Tale miscela è commercializzata con il nome di cemento Portland; questo, una volta miscelato con acqua, si idrata e solidifica progressivamente. (3)



Figura 45- Cemento Portland al calcare 32,5 R

#### 4.4 Emulsione bituminosa

Un altro materiale molto importante usato per le miscele è l'emulsione bituminosa. È una dispersione di un legante bituminoso (bitume) in acqua ed assume la consistenza di un liquido (bassa viscosità) a temperatura ambiente. L'utilizzo di questa permette di impastare gli aggregati senza l'ausilio della temperatura, come avviene della produzione dei tradizionali conglomerati a caldo.

Allo scopo di determinare la migliore ricetta in termini di modulo ITSM e alla resistenza alla trazione indiretta ITS, si è voluto valutare due differenti emulsioni al 60% di bitume residuo prodotte da due diverse aziende, chiamate in questo caso emulsione A e B.



Figura 46- emulsione bituminosa al 60%



Figura 47- Emulsione RIGEVAL MC prodotta dalla ditta Valli Zabban

## Capitolo 5 - Analisi dei risultati

In questo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti per ogni miscela con dei confronti tra le diverse miscele e delle conclusioni a riguardo. Nei capitoli precedenti infatti erano state realizzate diverse miscele, e su ognuna di esse erano state svolte diverse prove, in questo capitolo si cercherà di capire quale è la miscela che offre livelli prestazionali più alti rispetto alle altre.

Innanzitutto si andranno a riportare le principali proprietà volumetriche delle miscele: la massa, misurata usando sempre la stessa bilancia per evitare errori dovuti al cambio strumento, è misurata pre e post compattazione ma anche a sette e quattordici giorni dalla preparazione del provino. Quella prima e dopo la compattazione è utile per valutare il quantitativo di acqua perso con l'uso della pressa a taglio giratoria. Quelle a sette e quattordici giorni invece sono importanti perché danno un'indicazione sul quantitativo di acqua presente che sarà consumato per la fase di indurimento del provino.

Un'altra proprietà che viene misurata nel corso della sperimentazione, come già accennato precedentemente, è l'altezza. Questa viene misurata con il calibro di precisione, e fornisce informazioni riguardanti la compattabilità delle miscele. È molto importante nel corso delle due prove svolte, la valutazione del modulo ITSM e della resistenza a trazione indiretta.

Nelle tabelle successive sono inseriti i parametri descritti sopra:

MISCELA	PROVINO N°	MASSA	MASSA	MASSA	MASSA	ALTEZZA (mm)
		PRE-COMPATTAZIONE (g)	POST-COMPATTAZIONE (g)	A 7 GG (g)	A 14 GG (g)	
	1	2400	2381,6	2374,3	2366,2	132,9
CVR_V_18.7_B	2	2400	2378,8	2370,5	2365,9	131,9
	3	2400	2374,9	2370	2364,7	132,6
	1	2400	2377,8	2372,9	2368	124,2
REF_V_22.7_B	2	2400	2379,1	2370,8	2362,7	123,9
	3	2400	2384,5	2379,4	2374,1	122,9
	1	2400	2387,1	2382,2	2374,1	124,5
CVR_V_18.7_A	2	2400	2387,9	2380,6	2375,3	124,3
	3	2400	2379,8	2374,7	2369,8	124,8

	1	2400	2378,7	2370,4	2362,3	132,5
REF_V_22.7_A	2	2400	2377,8	2372,9	2368	131,5
	3	2400	2375,4	2370,5	2365,9	132,1
	1	2400	2387,6	2379,3	2373	129,2
CVR_V_13.7_A	2	2400	2388,6	2381,3	2373,2	130,2
	3	2400	2389,1	2382,4	2377,5	130,5
	1	2400	2390,8	2385,9	2381,3	131,8
CVR_V_13.5_A	2	2400	2391,4	2384,7	2378,4	132,7
	3	2400	2387,6	2382,5	2377,2	130,5
	1	2400	2387,8	2380,5	2375,9	138,9
CVR_R_13.7_A	2	2400	2379,9	2373,2	2366,9	139,4
	3	2400	2385,5	2377,2	2372,6	139,2

	1	2400	2386,5	2379,8	2373,5	139,1
CVR_R_13.5_A	2	2400	2384,5	2377,2	2372,3	139,3
	3	2400	2388,1	2381,4	2376,1	138,8
	1	2400	2388,7	2383,8	2378	140,1
CVR_R_18.7_A	2	2400	2385,4	2377,1	2369	140,9
	3	2400	2384,1	2377,4	2371,1	139,5
	1	2400	2385,4	2380,3	2375,7	139,9
CVR_R_18.7_B	2	2400	2385,9	2379,2	2373,9	140,6
	3	2400	2386,7	2379,4	2373,6	140,9
	1	2400	2389,1	2382,4	2374,3	132,6
CVR_V_25.5_A	2	2400	2381,1	2372,8	2367	131,8
	3	2400	2387,4	2380,7	2376,1	134,1

	1	2400	2387,3	2382,4	2376,1	134,8
CVR_V_25.8_A	2	2400	2387,9	2382,8	2374,7	135,9
	3	2400	2385,8	2377,5	2372,2	134,3
	1	2400	2386,1	2379,4	2374,5	136,4
CVR_50/50_18.7.A	2	2400	2386,3	2379	2373,2	136,2
	3	2400	2384,1	2377,4	2369,3	136,8
	1	2400	2384,5	2379,6	2374,7	137,8
REF_R_22.7_A	2	2400	2387,4	2382,3	2376	137,1
	3	2400	2386,4	2379,1	2374,5	138,9
	1	2400	2388,1	2381,4	2375,6	139,4
CVR_V_30.5_A	2	2400	2384,3	2376	2367,9	138,8
	3	2400	2381,4	2374,1	2368,8	139,5
	1	2400	2384,5	2379,4	2373,1	139,7
CVR_V_30.8_A	2	2400	2379,8	2373,1	2368,2	139,6
	3	2400	2380,1	2371,8	2366,5	138,9

Figura 48- masse ed altezze dei provini

Da una prima analisi si può notare come in tutte le miscele la massa pre compattazione è molto simile a quella post compattazione. Questo vuol dire che le miscele hanno perso poca acqua all'interno della pressa giratoria, quindi il quantitativo di acqua aggiunto durante la fase di impasto dei provini è molto vicino a quello esatto.

Le colonne che indicano l'acqua persa dopo sette e quattordici giorni dalla preparazione del provino, rappresentano il quantitativo di acqua utilizzato dalla miscela nella fase di indurimento. Infatti in media la prima e la seconda settimana dopo la preparazione generano una riduzione di massa tra i 5 e gli 8 grammi, e questa riduzione è dovuta alla perdita di acqua. Anche se questo valore è simile per tutte le miscele della sperimentazione, è bene non considerarlo come verità assoluta in quanto la procedura descritta nel programma sperimentale è una procedura del tutto aleatoria poiché la presenza d'acqua all'interno dei provini potrebbe essere fortemente influenzata dal ricoprimento degli stessi con il panno umido, il quale, può essere più o meno bagnato a seconda della sensibilità dell'operatore.

## **5.1 Analisi e confronti sulla compattabilità**

L'ultima colonna rappresenta invece l'altezza dei provini raggiunta dopo la compattazione, e fornisce quindi indicazioni sulla compattabilità del materiale.

L'analisi sulla compattabilità è fornita dalla pressa a taglio giratoria che permette di valutare la tendenza del materiale ad essere addensato attraverso l'analisi delle curve di compattazione ottenute dai dati registrati in continuo (altezza del campione e numero di rotazioni) durante il graduale addensamento del materiale, cioè all'aumentare del numero di giri che compie la pressa.

Queste curve di compattazione sono ottenute mettendo in ascissa il logaritmo del numero di giri effettuati dalla pressa giratoria ed in ordinata l'altezza del provino al rispettivo giro.

La curva di compattazione che si ottiene è assimilabile ad una retta avente un'equazione del tipo:

$$H = H_1 + k \cdot \log N$$

dove:

- $H$  è l'altezza del provino;
- $H_1$  è l'altezza del provino dopo il primo giro;
- $k$  è la lavorabilità della miscela;
- $N$  è il numero di giri compiuti dalla pressa.

L'addensabilità della miscela dipende molto dalla granulometria degli aggregati, infatti è maggiore quando la curva granulometrica è più vicina a quella del massimo addensamento. Inoltre varia anche con il valore d'attrito interno della miscela, che risulta molto sensibile alla forma degli aggregati. La lavorabilità invece, che è associata alla viscosità della miscela, dipende dal quantitativo e dalle caratteristiche del legante.

Il processo di sperimentazione consiste quindi nell'effettuare per ogni miscela 60 giri di pressa giratoria e per ogni giro registrare l'altezza del campione  $h_x$ . Inoltre per ogni provino registrare anche l'altezza minima al termine di tutti i giri  $h_{min}$ . Si confrontano poi le altezze finali di tutte le miscele e si valuta così quale fra queste è migliore in termini di compattabilità.

In seguito sono riportate le curve di compattazione di ogni miscela usata per la sperimentazione:

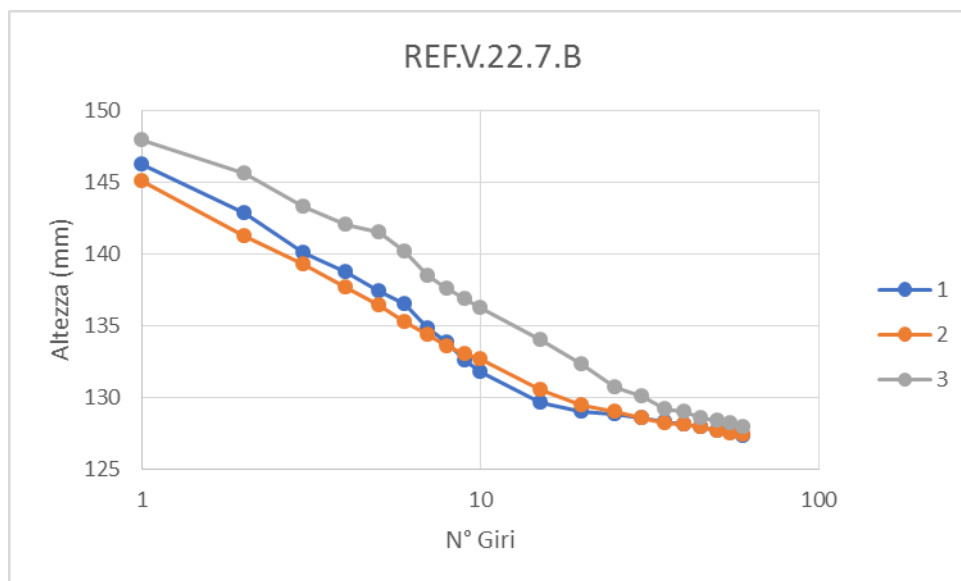


Figura 49- curva di compattazione miscela REF.V.22.7.B

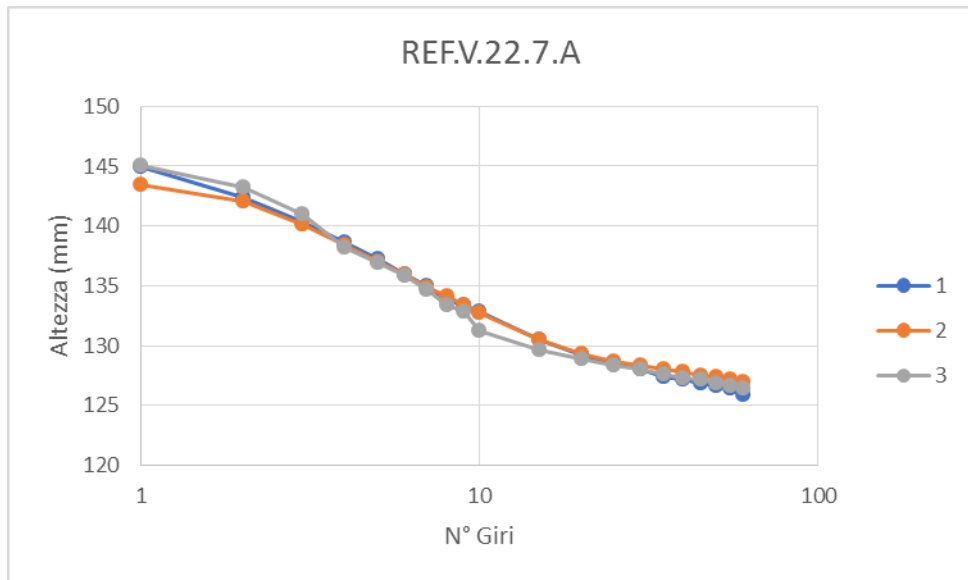


Figura 50- curva di compattazione miscela REF.V.22.7.A

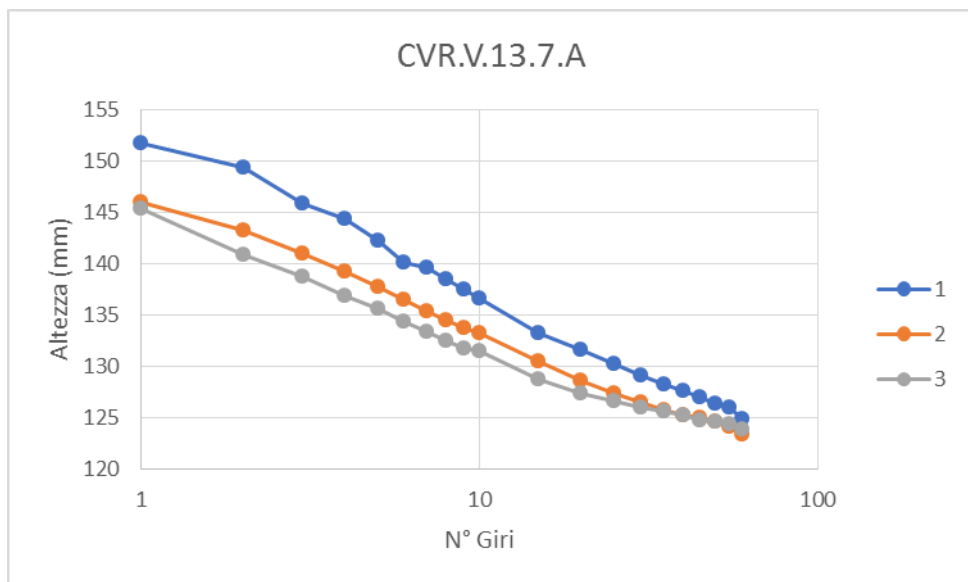


Figura 51- curva di compattazione miscela CVR.V.13.7.A

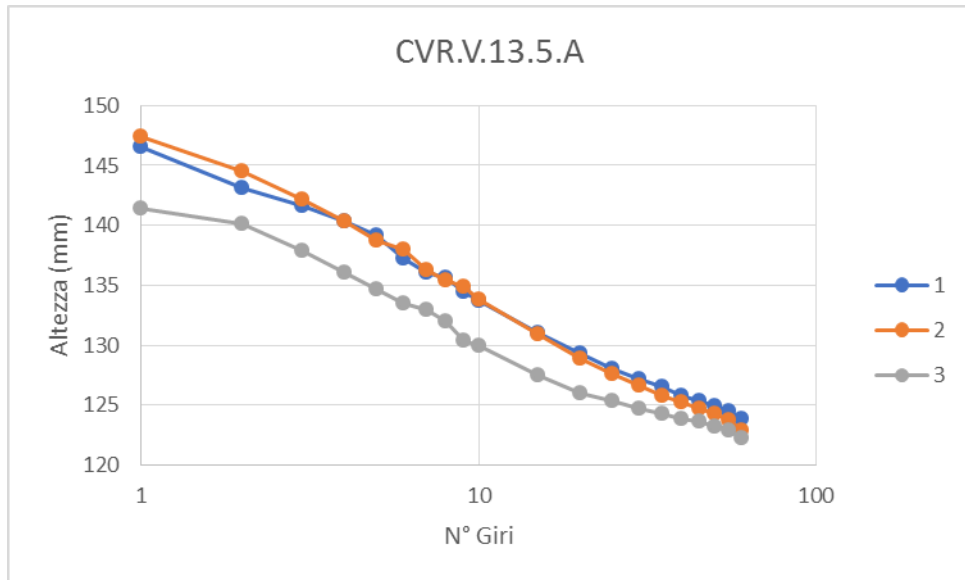


Figura 52- curva di compattazione miscela CVR.V.13.5.A

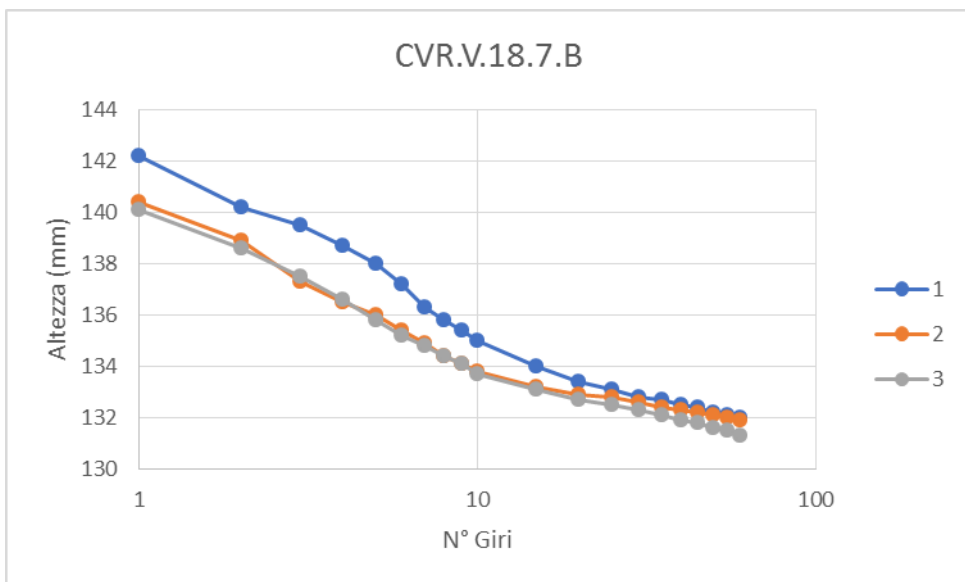


Figura 53- curva di compattazione miscela CVR.V.18.7.B



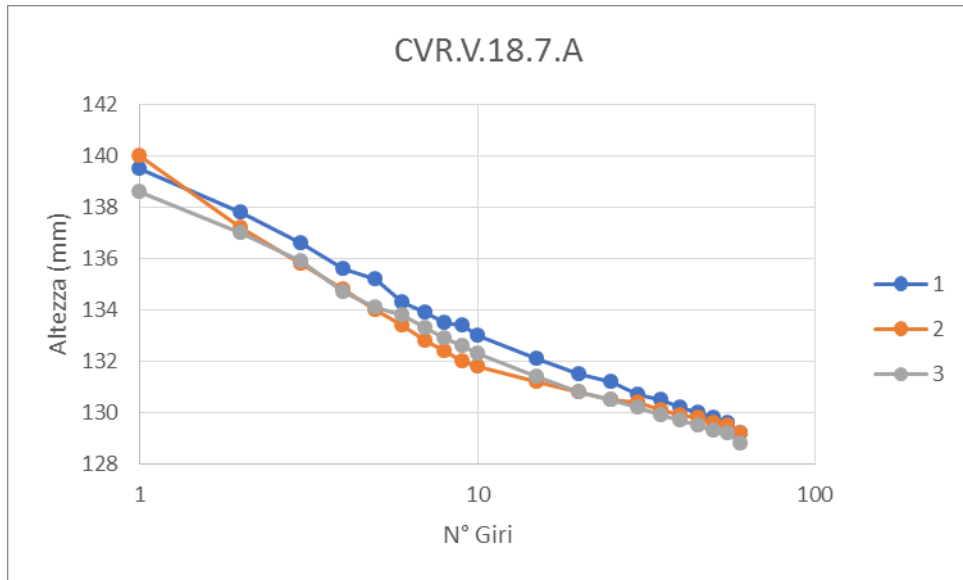


Figura 54- curva di compattazione miscela CVR.V.18.7.A

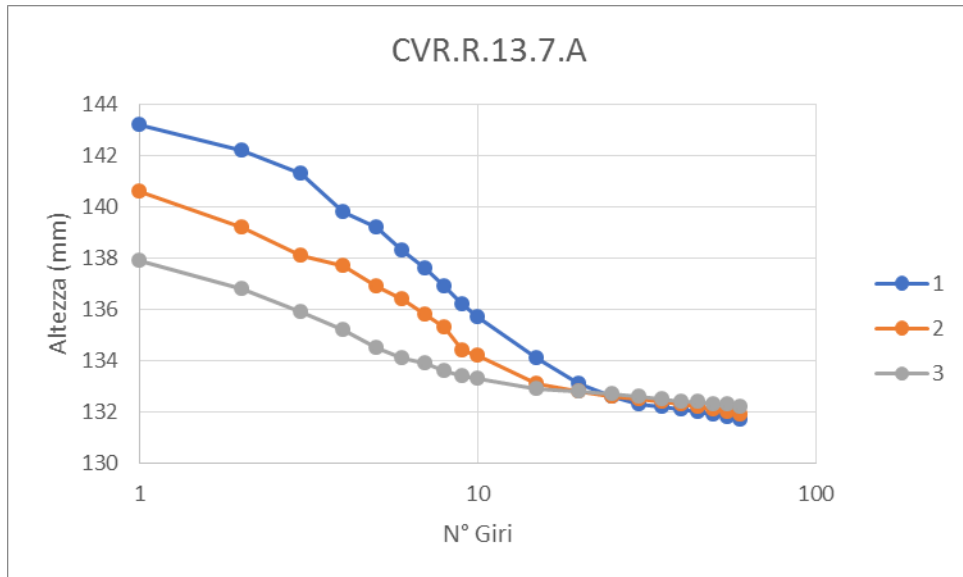


Figura 55- curva di compattazione miscela CVR.R.13.7.A

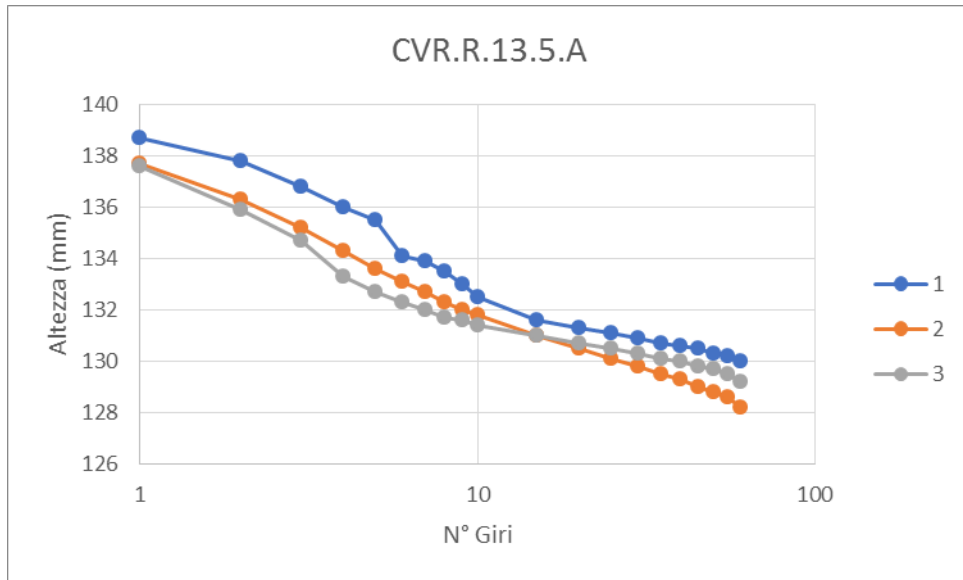


Figura 56- curva di compattazione miscela CVR.R.13.5.A

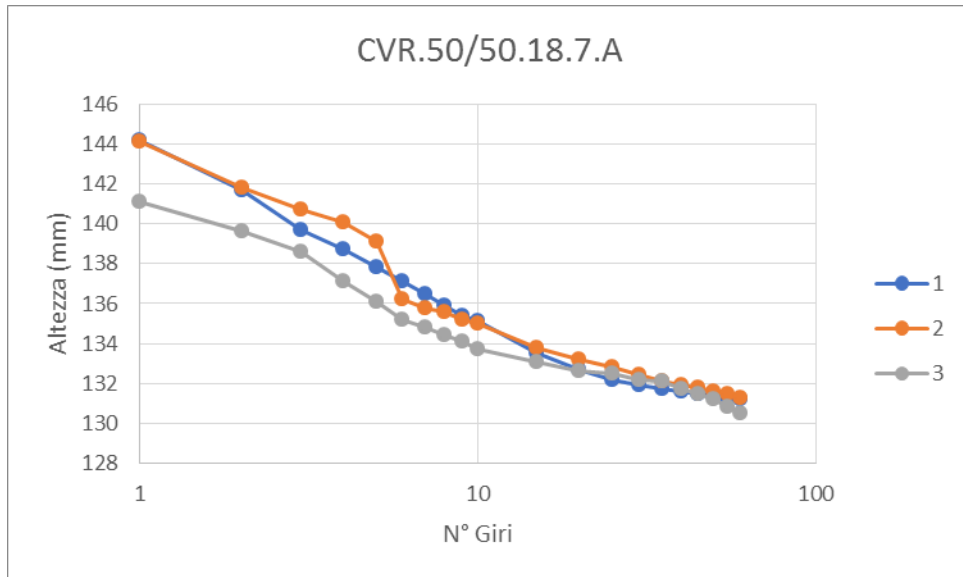


Figura 57- curva di compattazione miscela CVR.50/50.18.7.A

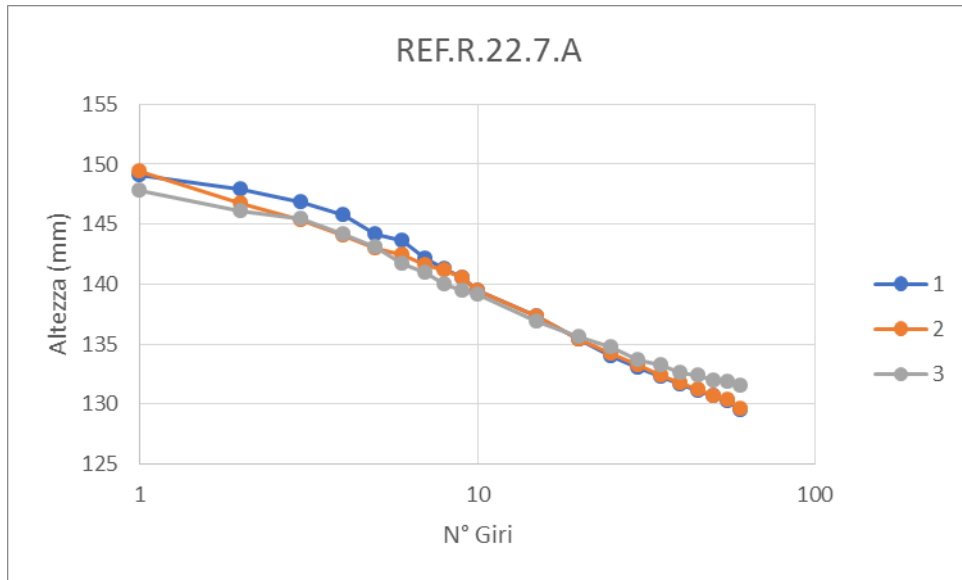


Figura 58- curva di compattazione miscela REF.R.22.7.A

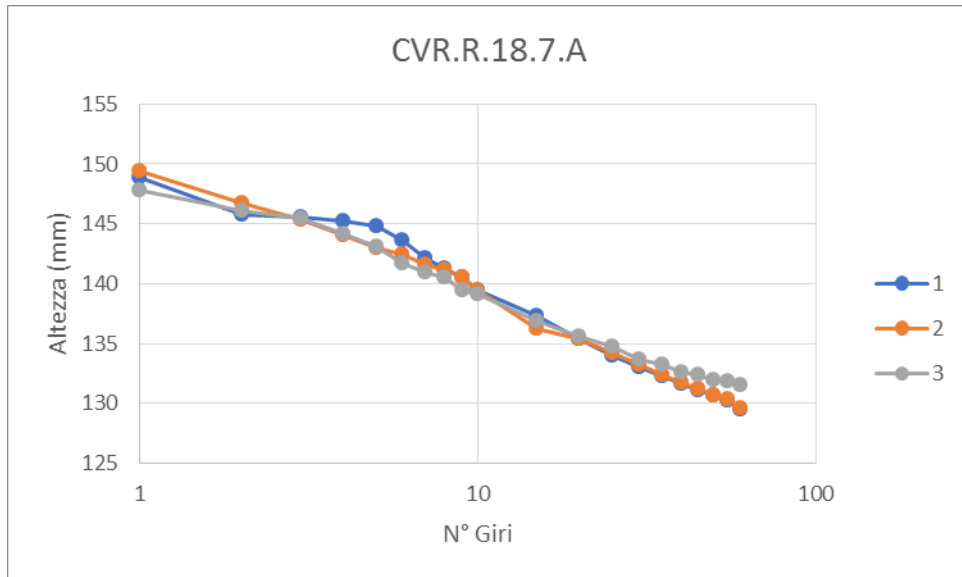


Figura 59- curva di compattazione miscela CVR.R.18.7.A

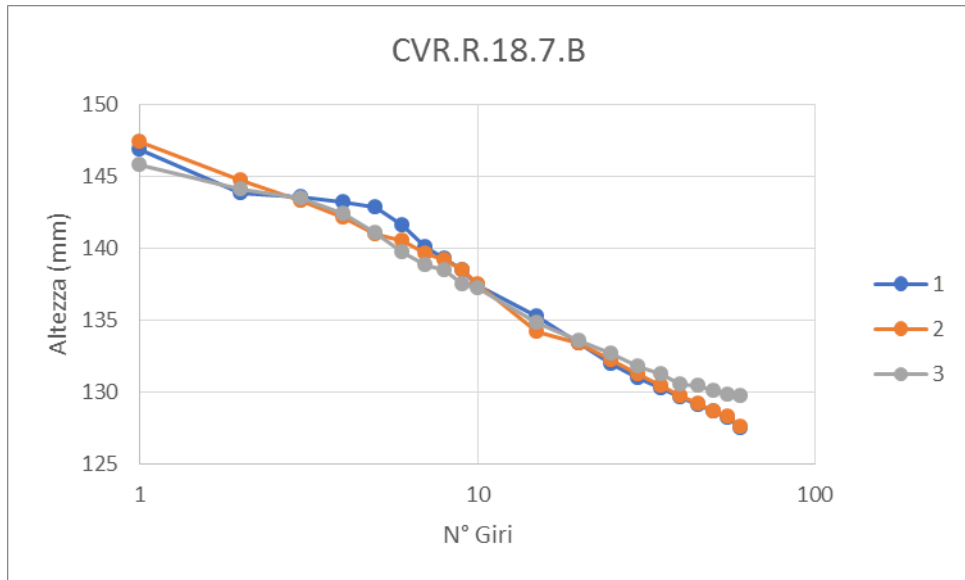


Figura 60- curva di compattazione miscela CVR.R.18.7.B

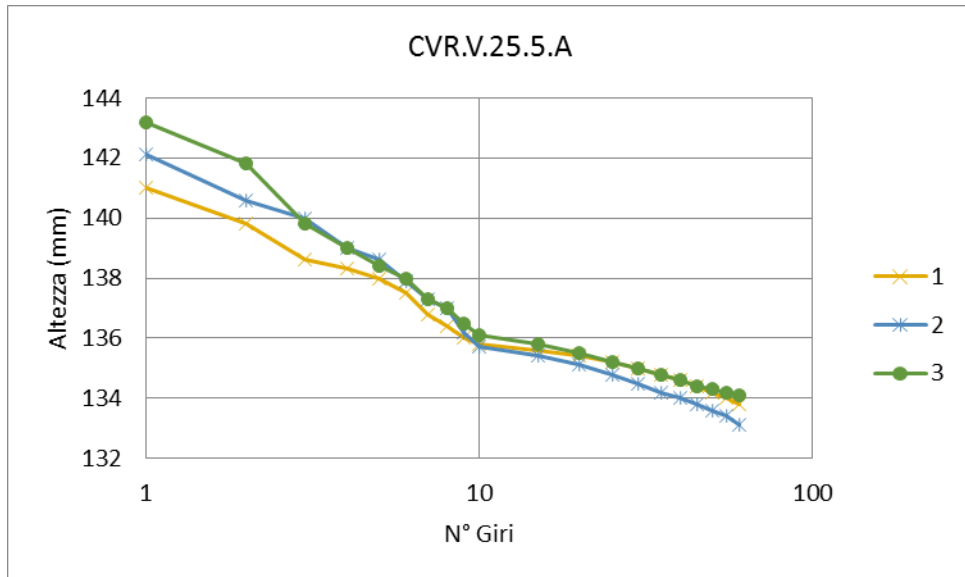


Figura 61- curva di compattazione miscela CVR.V.25.5.A

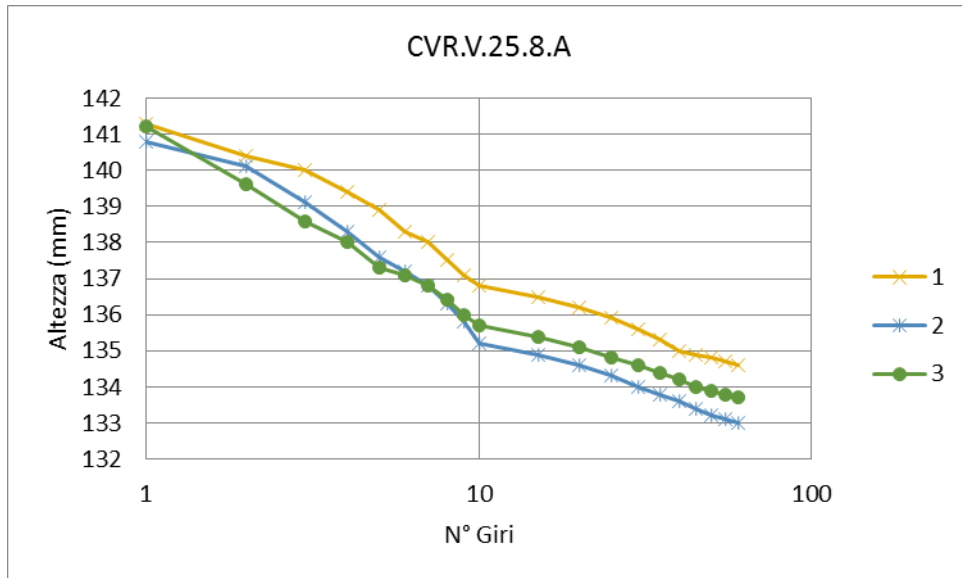


Figura 62- curva di compattazione miscela CVR.V.25.8.A

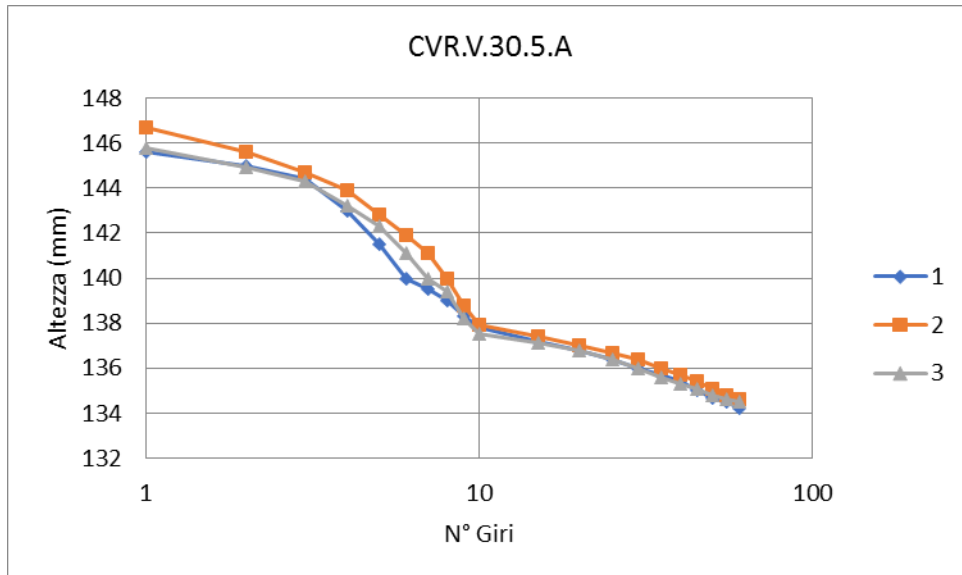


Figura 63- curva di compattazione miscela CVR.V.30.5.A

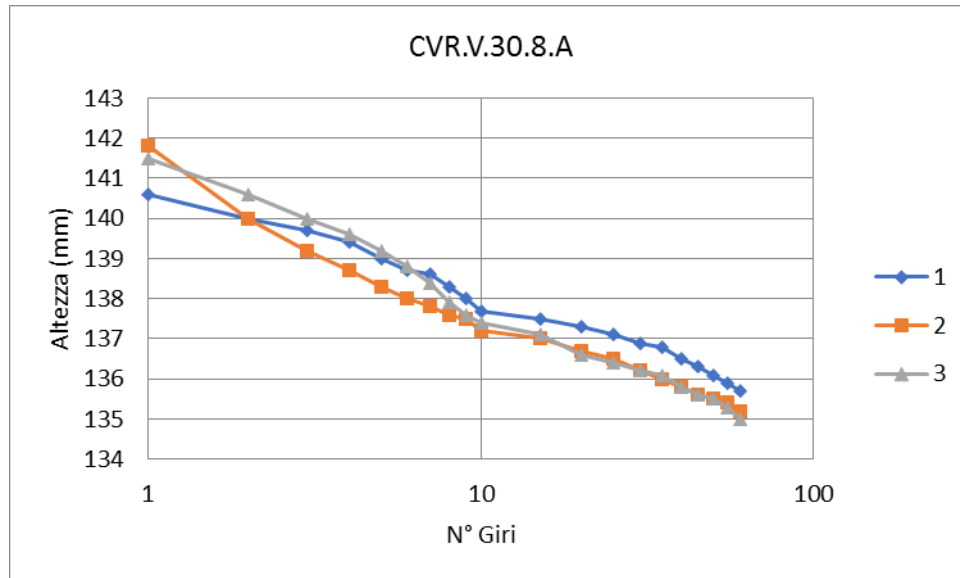


Figura 64- curva di compattazione miscela CVR.V.30.8.A

Il confronto sulla compattabilità delle diverse miscele è deducibile dalla pendenza della retta che interpola i punti. Si possono osservare due fenomeni che si ripetono in ogni miscela. La retta dopo aver completato il decimo giro della pressa si abbassa, ciò sta a indicare la riduzione della compattabilità superati i dieci giri. Superata questa fase infatti l'altezza finale dipende solamente dalla bontà della curva granulometrica della miscela che favorisce il massimo grado di addensamento. Nei primi dieci giri invece per la compattazione è fondamentale l'incastro degli aggregati di grandi dimensioni, ed il comportamento dipende dalla sensibilità dell'operatore nell'inserire il materiale all'interno della fustella.

Quindi si può notare come, una volta terminata la prima fase (primi dieci giri) in cui il comportamento varia a seconda del materiale, c'è una seconda fase (dai dieci fino ai sessanta giri) dove il comportamento è intrinseco del materiale stesso.

È evidente quindi come le miscele si comportano in modo analogo e che la variazione degli elementi principali che le costituiscono, non generano sostanziali differenze l'una dall'altra.

## 5.2 Analisi della prova di trazione indiretta e moduli di rigidità (ITS e ITSM)

In questo capitolo, vengono esposti i risultati delle prove a trazione indiretta con rispettivi moduli condotte in laboratorio. Per ogni miscela sono stati preparati tre provini, denominati provino 1, 2 e 3, ma per effettuare queste prove sono stati necessari solamente due. Il provino numero 2 è stato usato per la prova di modulo e per la prova a trazione indiretta dopo i sette giorni, mentre il provino numero 3 è stato usato per le prove effettuate dopo quattordici giorni. Per la valutazione dell'ITSM medio, per ogni provino sono state svolte due misurazioni, su due diagonali perpendicolari e poi preso il valore medio. Per la valutazione invece dell'ITS e del CTI si sono invece semplicemente elaborati i dati forniti dalla pressa per la trazione indiretta.

Di seguito si forniranno i risultati:

Miscela	Prove a 7 gg				Prove a 14 gg					
	ITSM 20°	ITS 25°	ε	CTI 25°	ITSM (MPa)			ITS 25°	ε	CTI 25°
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	5°	20°	40°	(MPa)	%	(MPa)
CVR_V_18.7_B	23085,75	1,232	1,345	143,8	23652	21377,75	23396,25	1,4425	1,389	163,0
REF_V_22.7_B	27854	1,767	1,289	215,2	23191,5	24005,5	24264,75	1,563	1,201	204,3
CVR_V_18.7_A	25469,5	1,3435	1,321	159,7	22489,75	22502,5	24070,25	1,525	1,343	178,3
REF_V_22.7_A	26188	1,3005	1,277	159,9	22863	24363,5	24609,5	1,455	1,251	182,6
CVR_V_13.7_A	19175,5	1,035	1,401	116,0	21147	21734	21352	1,316	1,387	149,0
CVR_V_13.5_A	20627,25	0,995	1,388	112,5	22440	22001	23103	1,075	1,351	124,9

CVR_R_13.7_A	8284,75	0,6975	1,612	67,9	9747	8482	7481	0,825	1,623	79,8
CVR_R_13.5_A	10617,25	0,9	1,485	95,2	15078	12348	10815	1,11	1,501	116,1
CVR_R_18.7_A	11569,75	0,815	1,589	80,5	15001	12399	10218	1,13	1,489	119,1
CVR_R_18.7_B	9610	0,94	1,51	97,7	12869	11118	9670	1,165	1,477	123,8
CVR_V_25.5_A	26660	1,675	1,345	195,5	27134,5	28428,5	27751,5	1,93	1,362	222,5
CVR_V_25.8_A	20008,75	1,575	1,389	178,0	21364	22013	21001	1,38	1,401	154,6
CVR_50/50_18.7.A	15721,5	1,215	1,402	136,1	19352	18211,5	17568	1,09	1,313	130,3
REF_R_22.7_A	11953	0,95	1,601	93,2	15121	13673	11028	1,1	1,597	108,1
CVR_V_30.5_A	28524	1,72	1,498	180,3	28625	27171,5	26998,8	2	1,417	221,6
CVR_V_30.8_A	20492	1,43	1,579	142,2	21987,6	22301,5	22811,7	1,4	1,503	146,2

Figura 65- risultati delle prove a 7 e 14 giorni

Dai dati nelle tabelle si può notare come le miscele non sono termo-dipendenti. Le caratteristiche meccaniche non vengono infatti influenzate dalla temperatura di prova del materiale. Infatti la variazione percentuale è circa del 5/10% per le ricette contenenti l'aggregato vergine mentre è più significativa per quelle contenente fino al 100% di fresato, dove può arrivare a sfiorare circa il 30% tra il valore dell'ITSM ottenuto a 5° rispetto a quello a 40°. Per questo motivo i confronti tra le varie prestazioni verranno valutati solamente per i moduli a 20°.



### 5.3 Confronti risultati ITSM

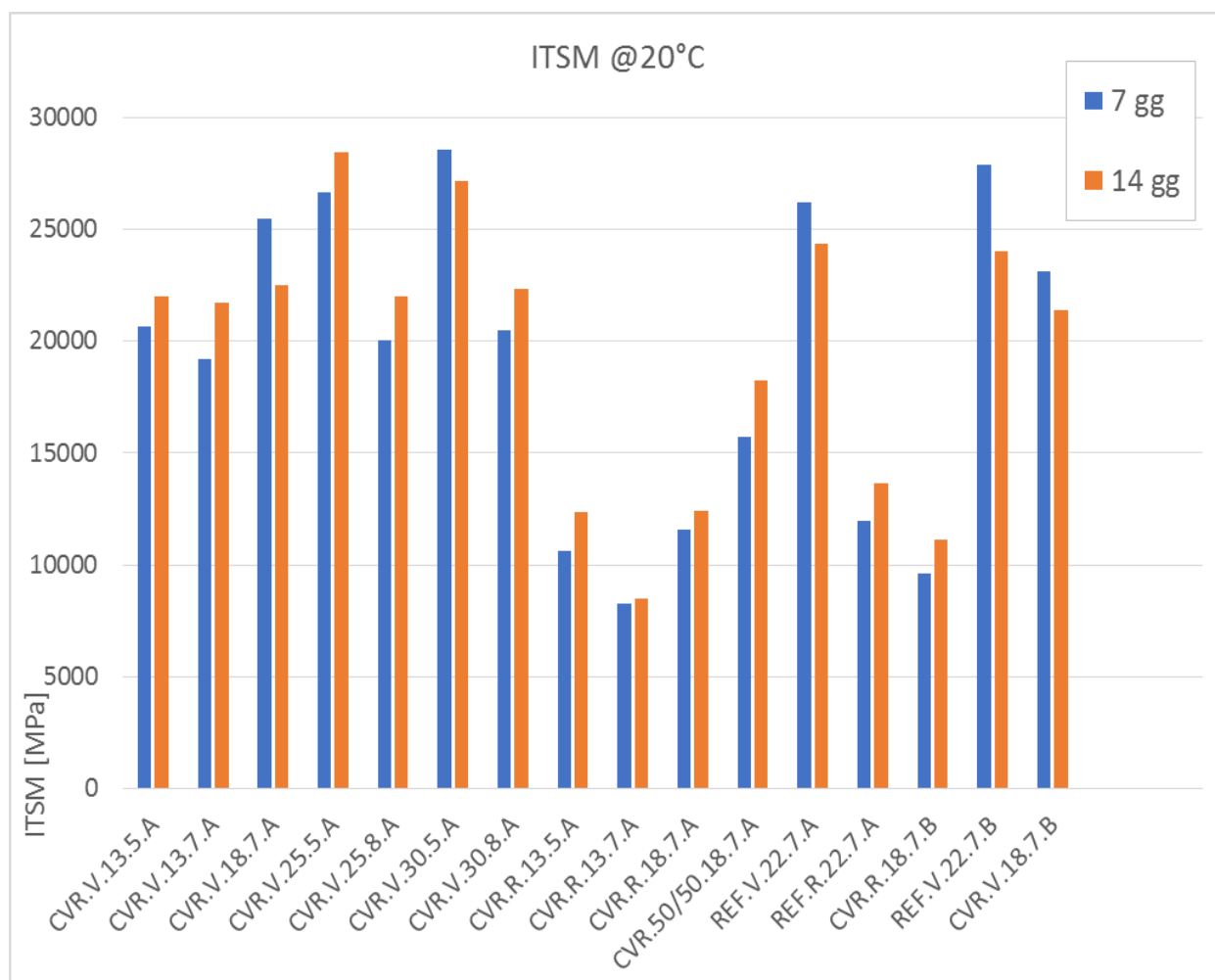


Figura 66- confronto ITSM provini a 20°C a 7 e 14 giorni

Come si può vedere dalla figura 66, è evidente come i valori più alti si hanno in miscele con contenuto di filler (25-30%) o cemento (22%) alto, mentre i valori minori corrispondono alle miscele con una percentuale di fresato (RAP) del 100%, quindi senza l'utilizzo degli aggregati vergini.

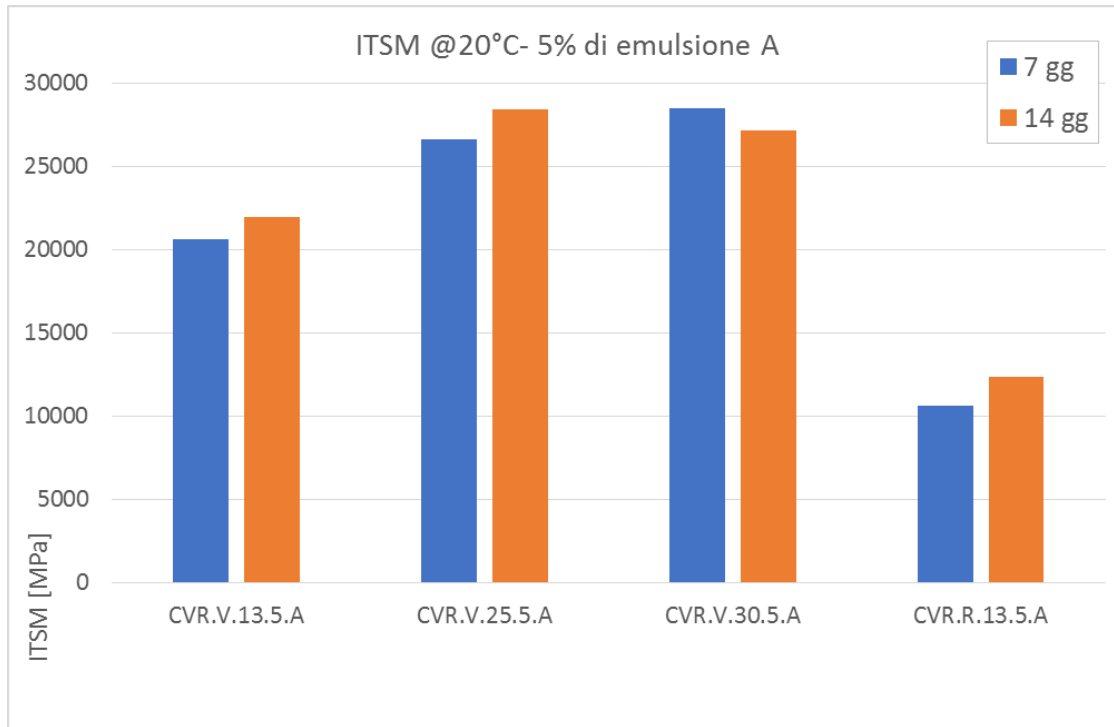


Figura 67- confronto ITSM miscele 5% emulsione

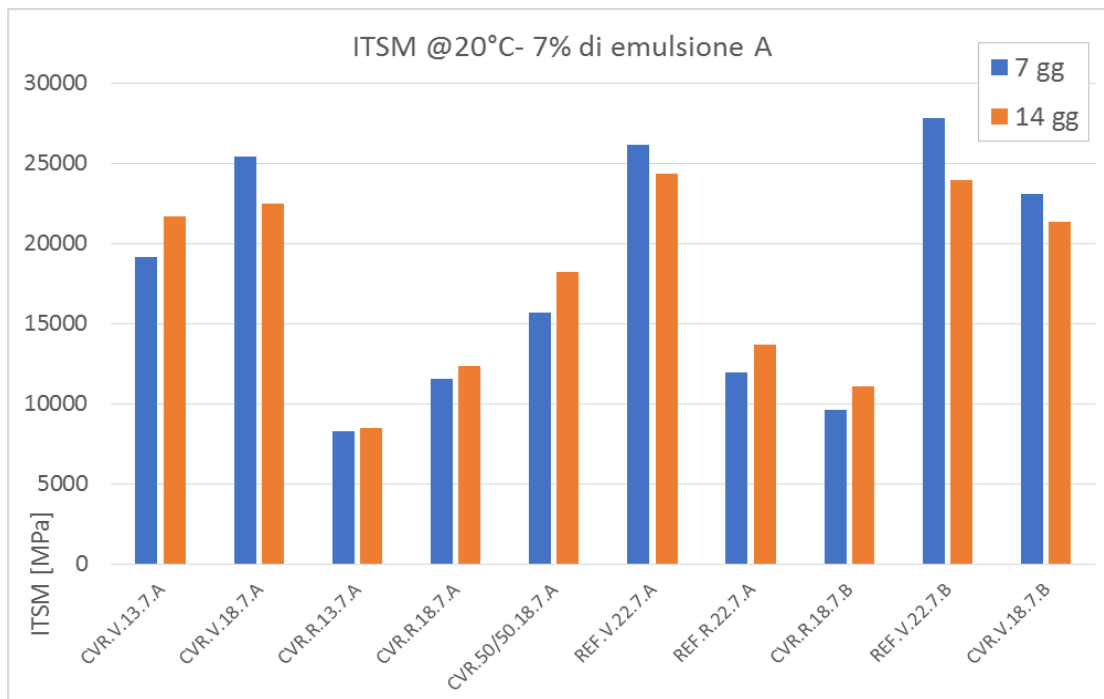


Figura 68- confronto ITSM miscele 7% emulsione

Dalle due figure 67 e 68 si evince come aumentando il quantitativo di emulsione, il modulo ITSM tende a diminuire a parità delle altre componenti.

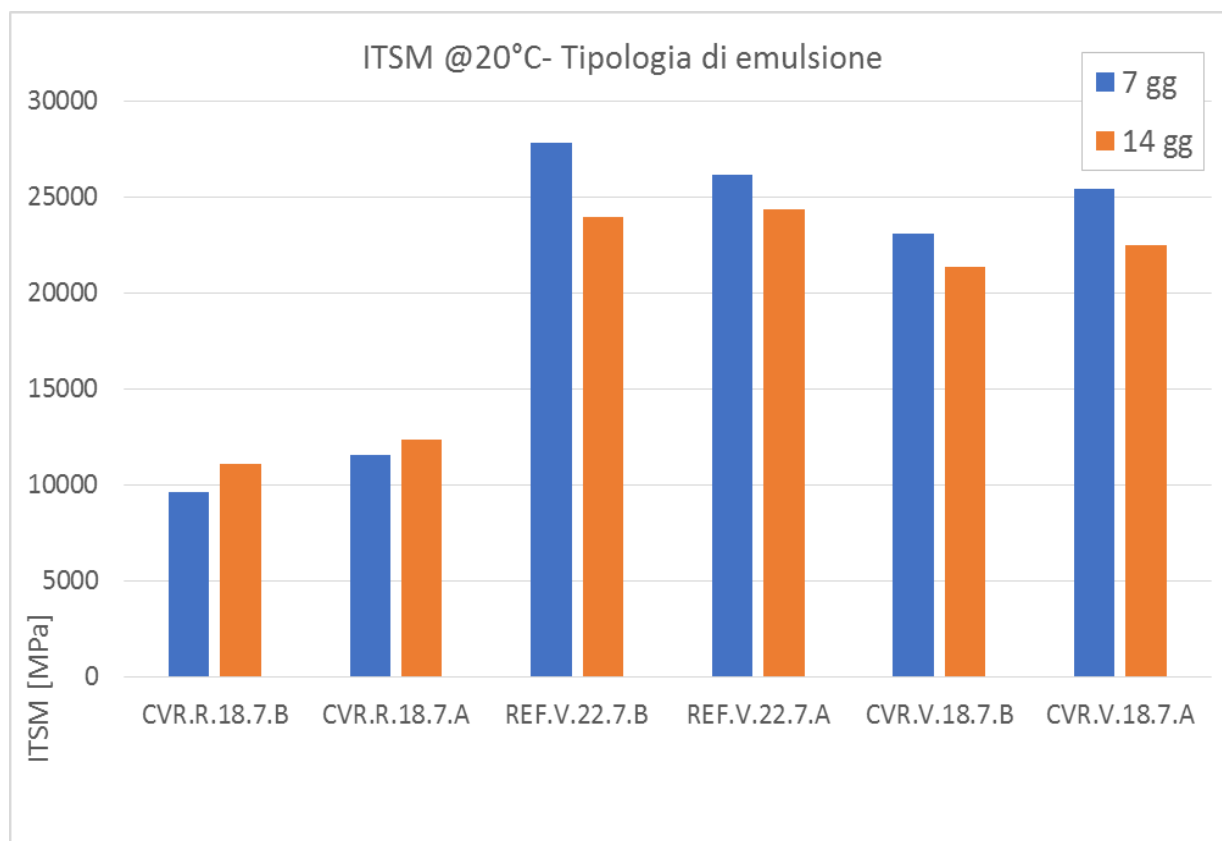


Figura 69- confronto ITSM miscele con due tipologie di emulsioni A e B

Nella figura 69 si può notare come le due tipologie di emulsioni (A e B) presentano valori molto simili. Si deduce quindi che la tipologia di emulsione non influenza le caratteristiche del materiale. Infatti entrambe le emulsioni sono caratterizzate dallo stesso rapporto bitume/acqua (59%-41%).

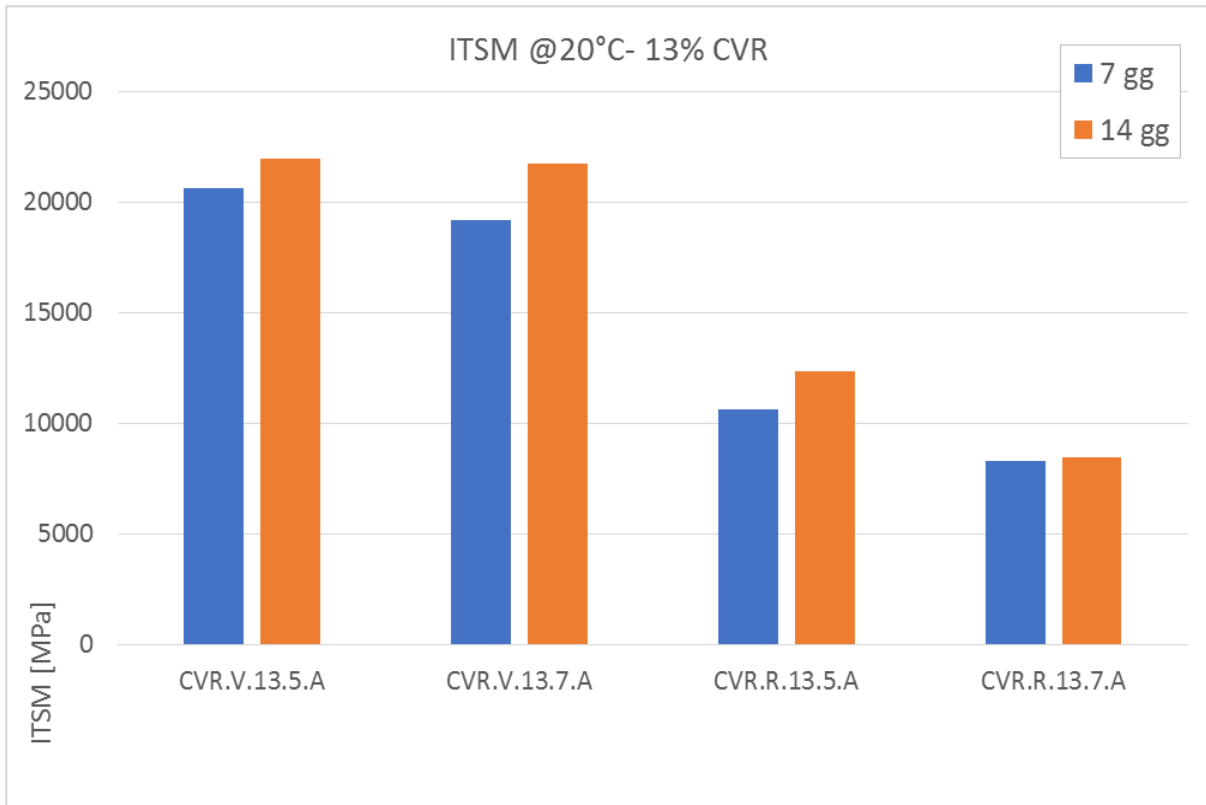


Figura 70- confronto ITSM miscele 13% CVR

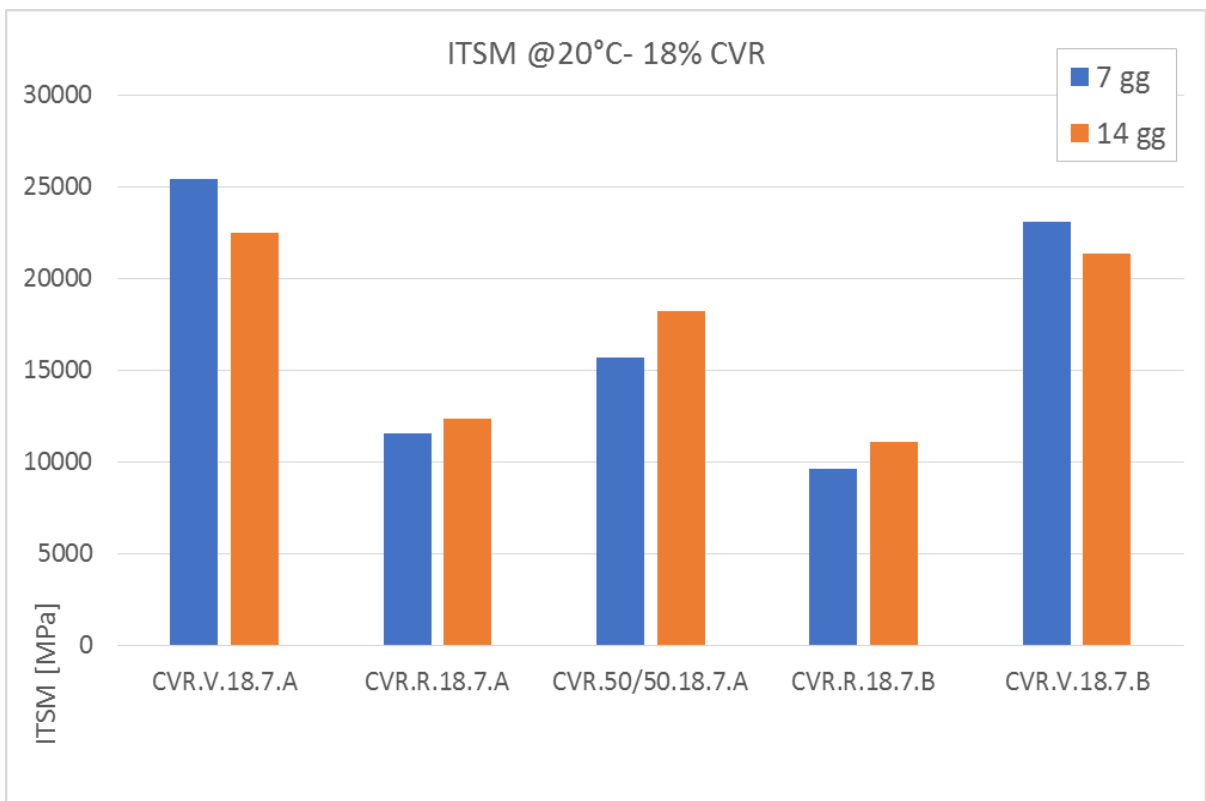


Figura 71- confronto ITSM miscele 18% CVR

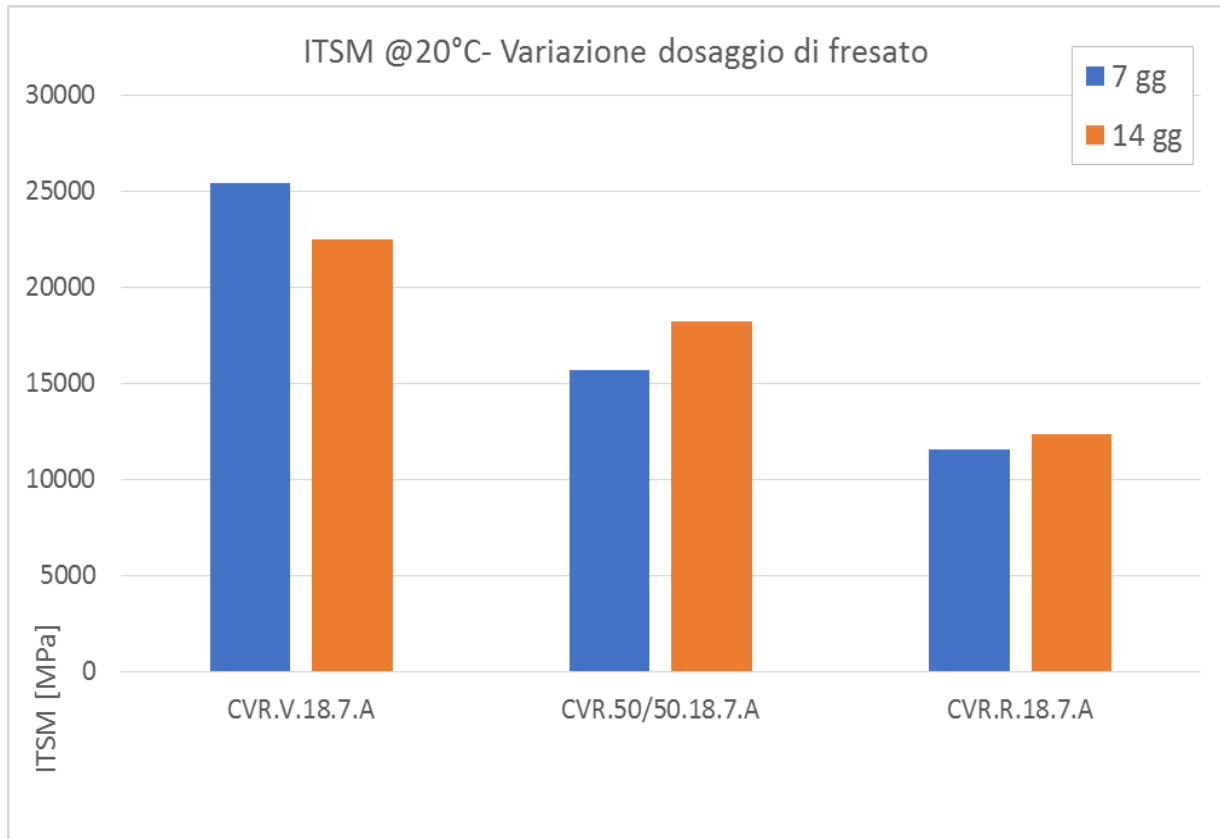


Figura 72- confronto ITSM miscele con diverso quantitativo di fresato

In questa sperimentazione si è rivelato importante avere informazioni sulla quantità di aggregati di riciclo usati. Si è notato infatti che aggiungendo aggregati di riciclo il modulo cala drasticamente. Tra le miscele con aggregati vergini e quelle con il 100% di fresato la riduzione del modulo ITSM è stata circa del 50%.

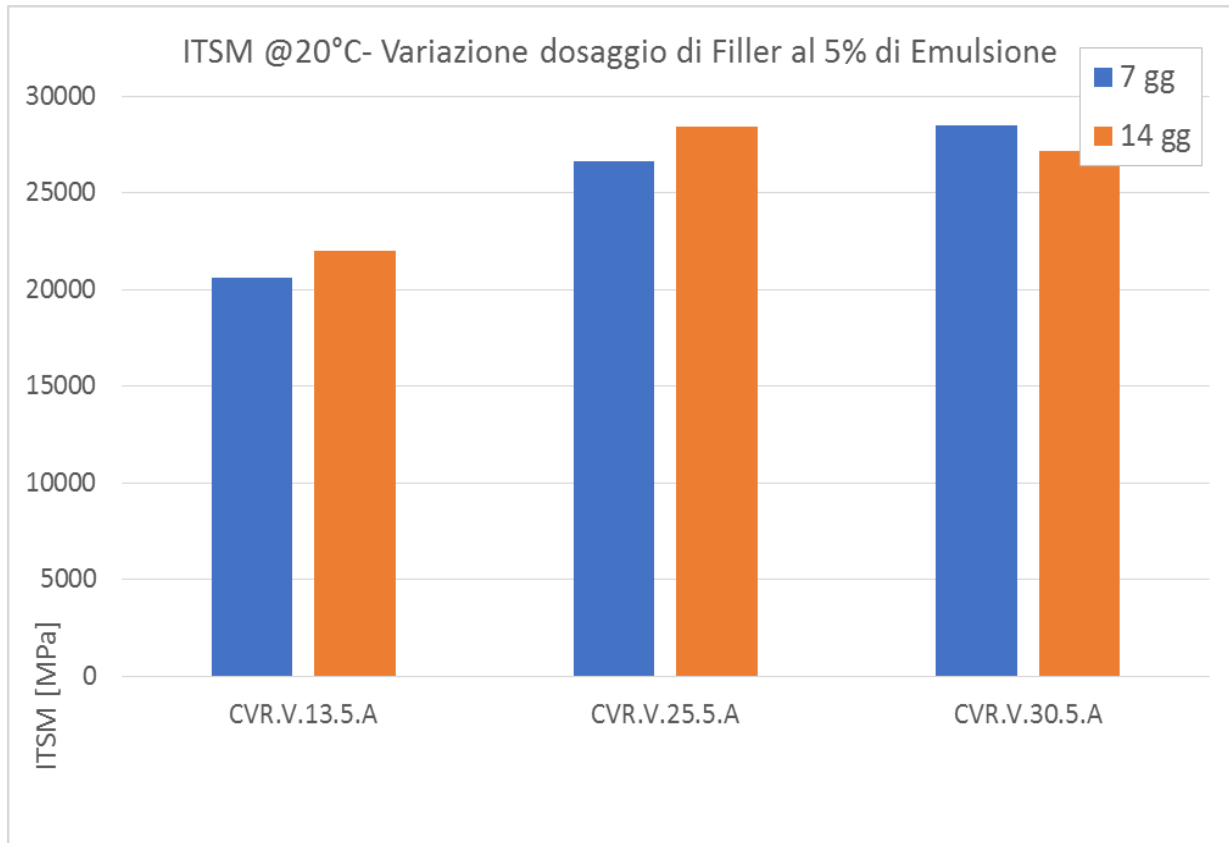


Figura 73- confronto ITSM miscele con variazione dosaggio di filler al 5% di emulsione

Come ultima osservazione per le prove di modulo si può vedere che fissando le altre componenti della ricetta e aumentando il dosaggio di filler si nota come il modulo aumenti ma non significativamente poiché vi è una variazione di circa il 20% raddoppiando il quantitativo di legante.

## 5.4 Confronti risultati ITS

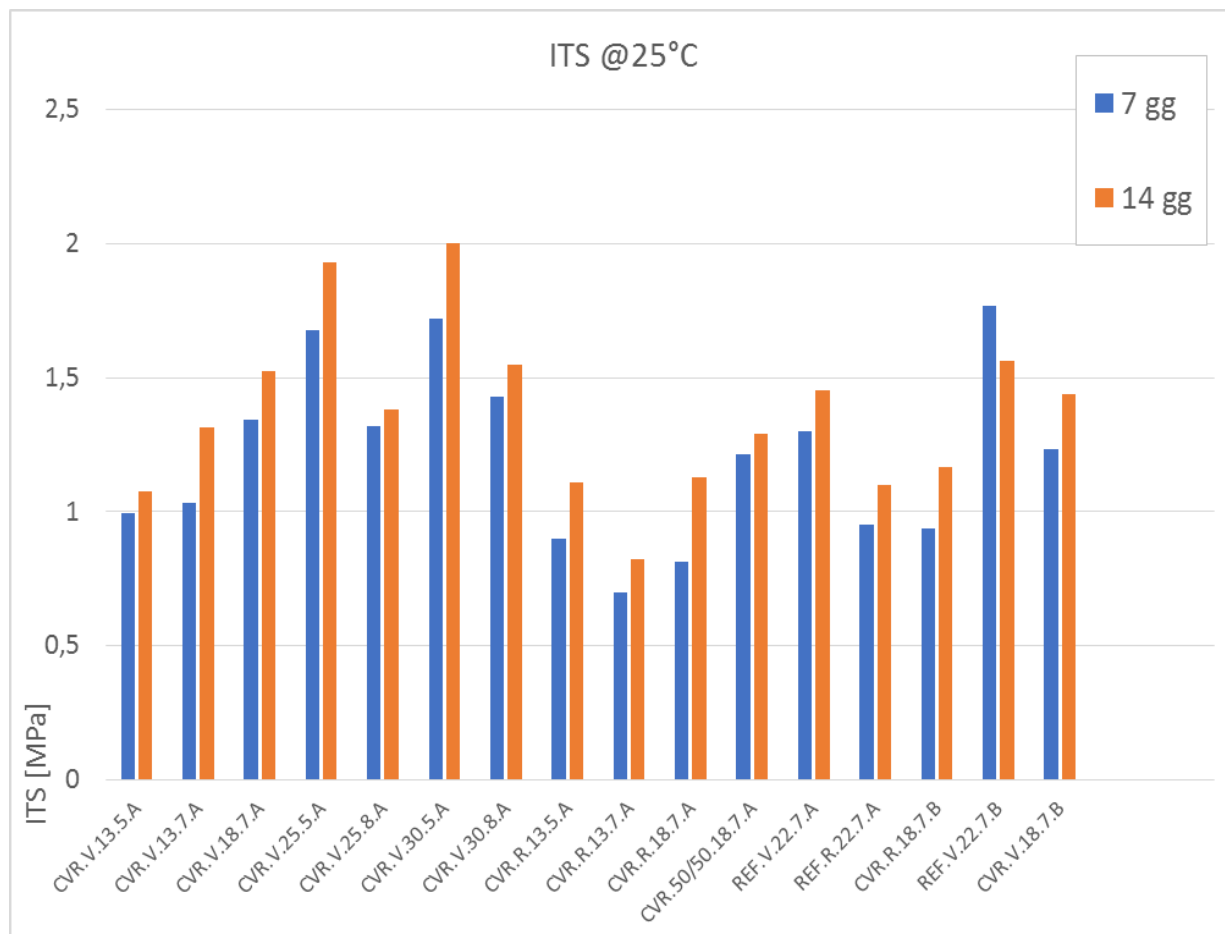


Figura 74- confronto ITS provini a 25°C

Dalla figura 74 si può notare che tra tutti i provini testati, i valori più alti di resistenza li troviamo nelle miscele con i più alti dosaggi di filler/cemento. Come per i moduli ITSM invece, i valori più bassi sono quelli delle miscele che contengono il 100% di fresato.

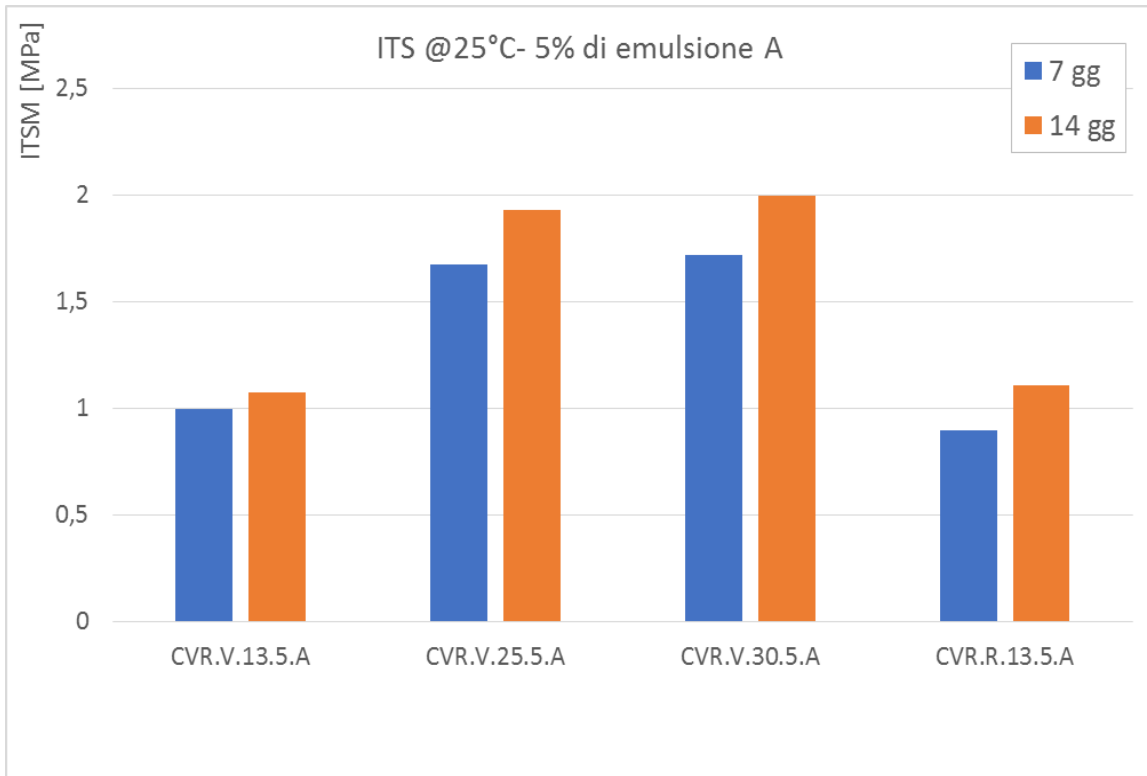


Figura 75- confronto ITS miscele 5% emulsione A

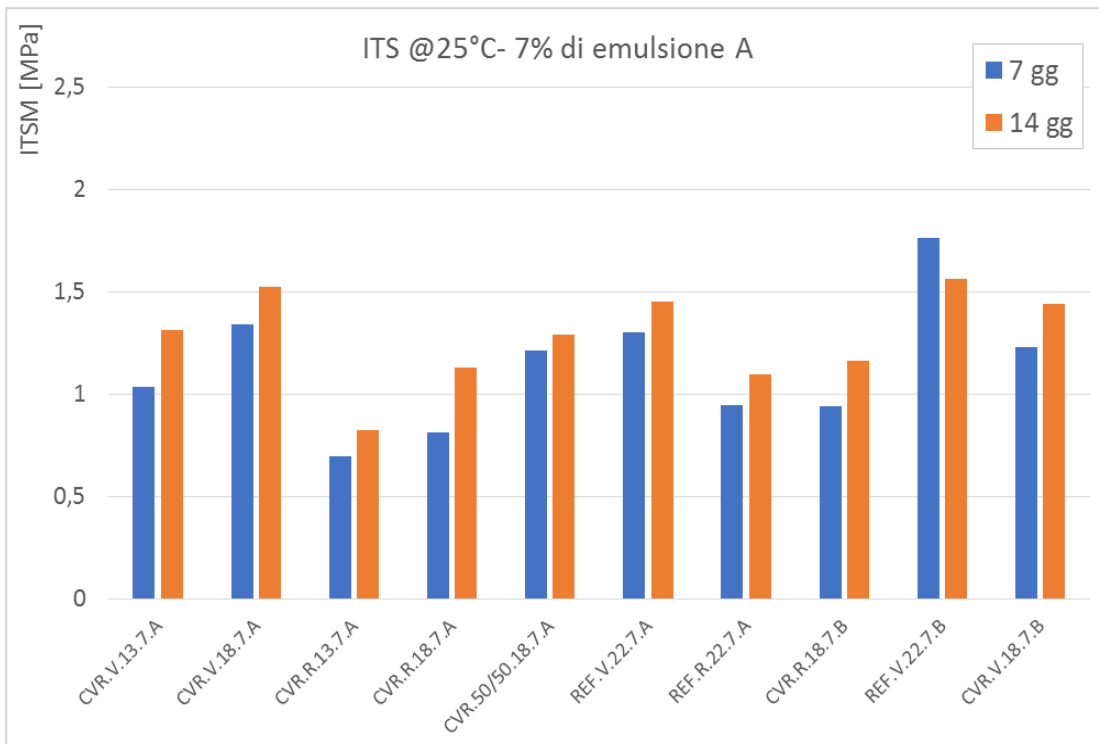


Figura 76- confronto ITS miscele 7% emulsione A



Dalle due figure 75 e 76 si nota invece come la resistenza a trazione indiretta aumenta quasi sempre con la maturazione del cemento/filler, quindi tutti i valori ottenuti dalle prove a 14 giorni sono maggiori rispetto a quelli a 7 giorni. A differenza delle prove ITSM dove questo non accadeva.

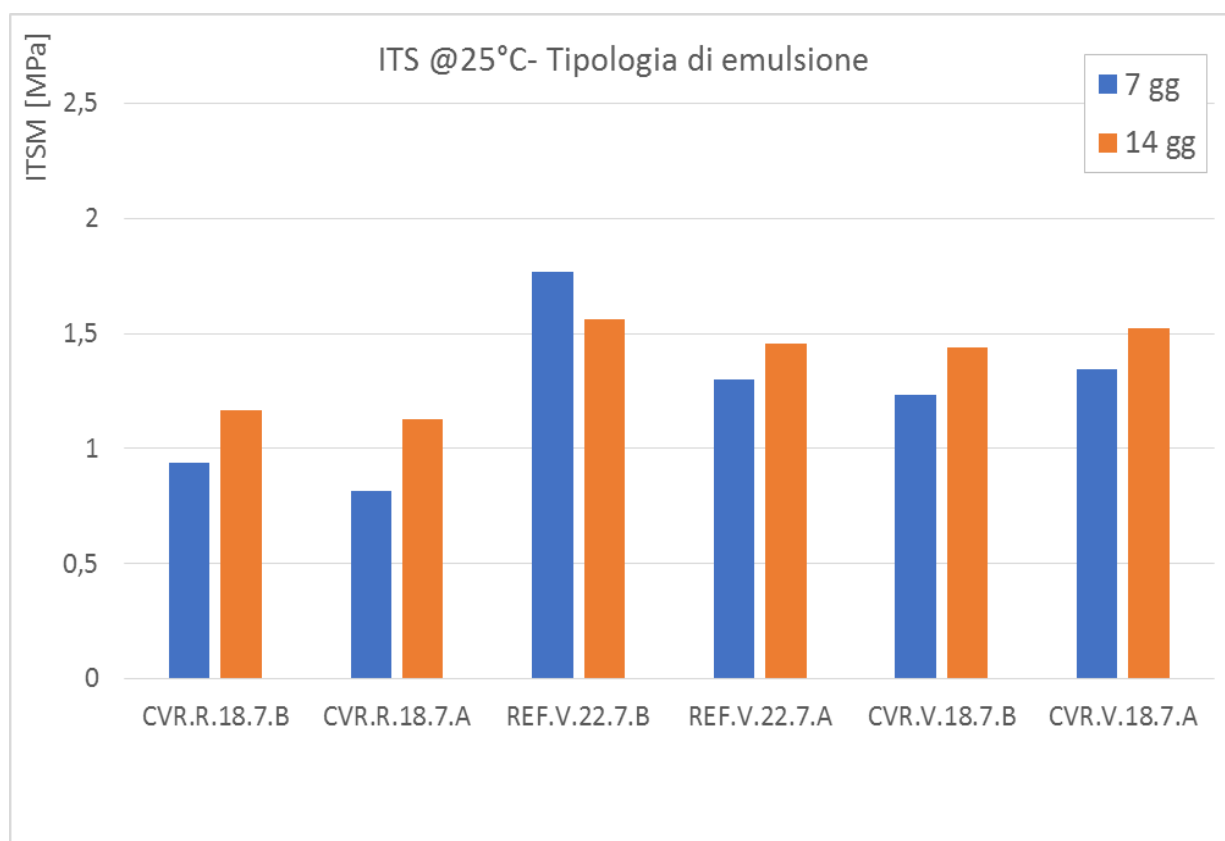


Figura 77- confronto ITS miscele con diversa tipologia di emulsione

Anche in questa prova, come per la prova di modulo, la tipologia di emulsione non incide molto sui valori ottenuti.

Si deduce quindi che il comportamento meccanico delle miscele non dipende dalla tipologia di emulsione che è stata usata.

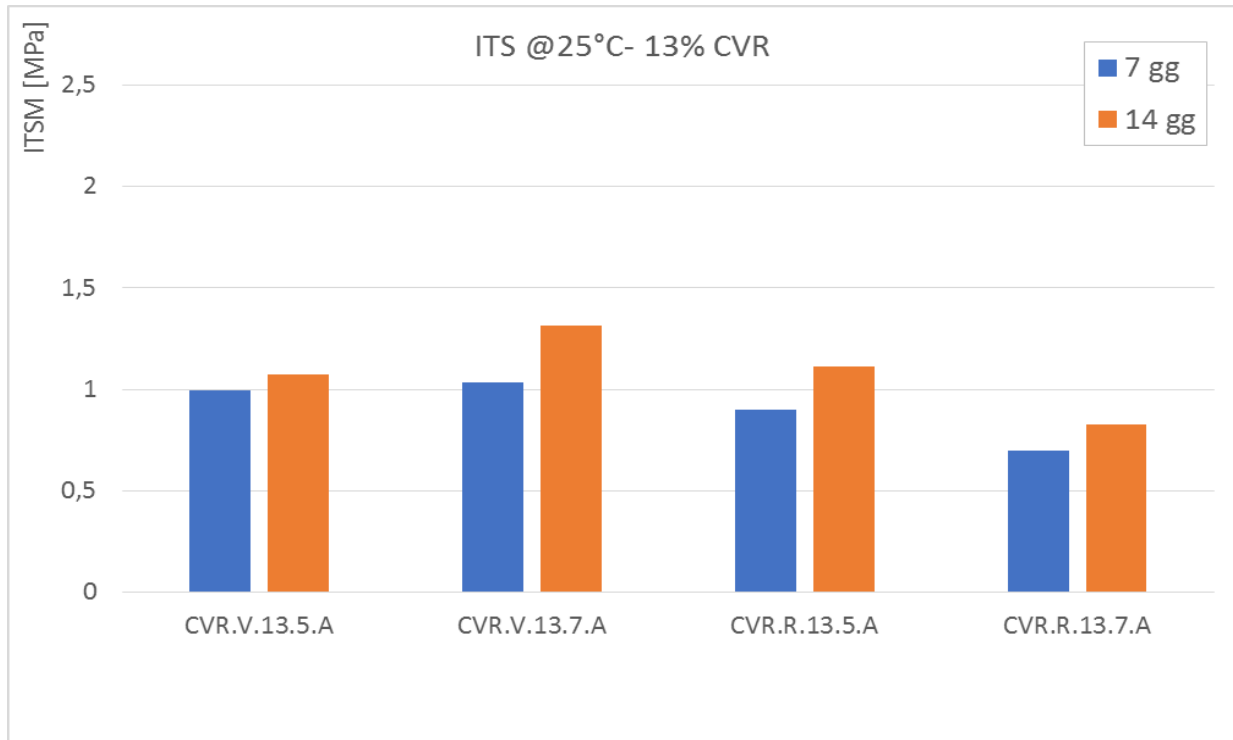


Figura 78- confronto ITS miscele 13% CVR

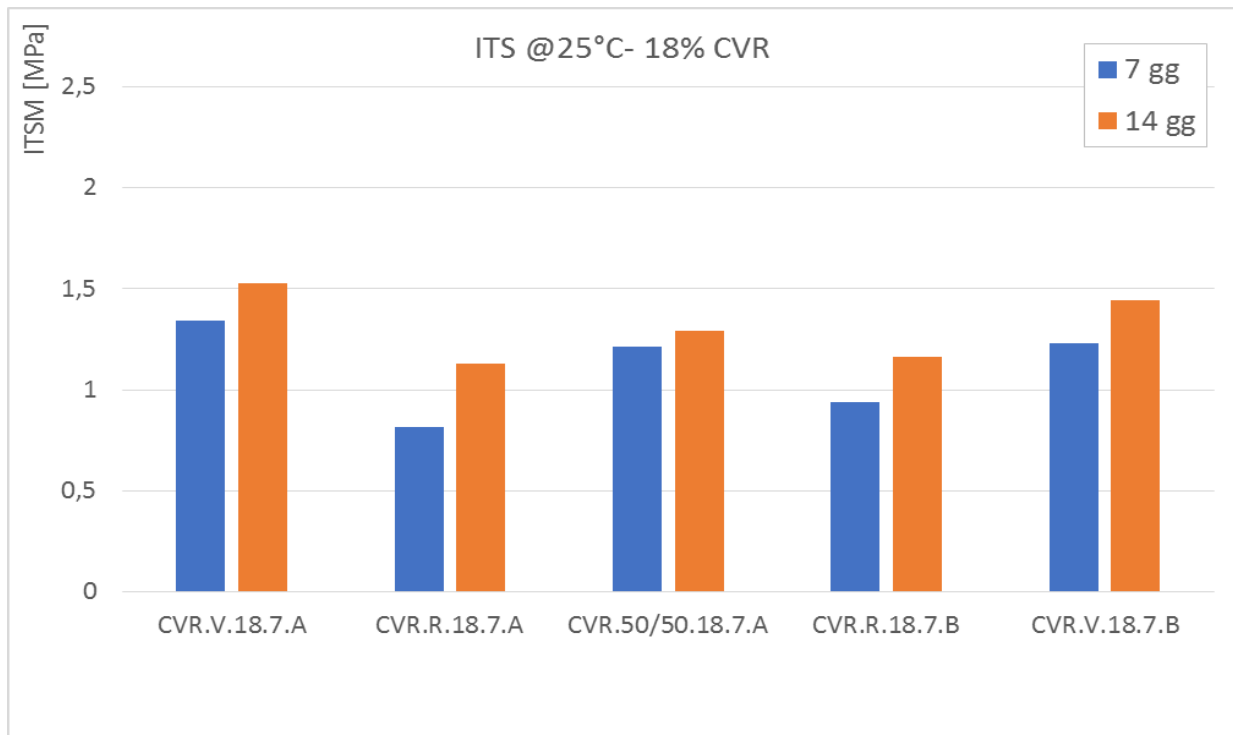


Figura 79- confronto ITS miscele 18% CVR

Dalle figure 78 e 79 si può notare come, variando il quantitativo di filler, passando dal 13 al 18%, non ci sono state significative variazioni di resistenza.

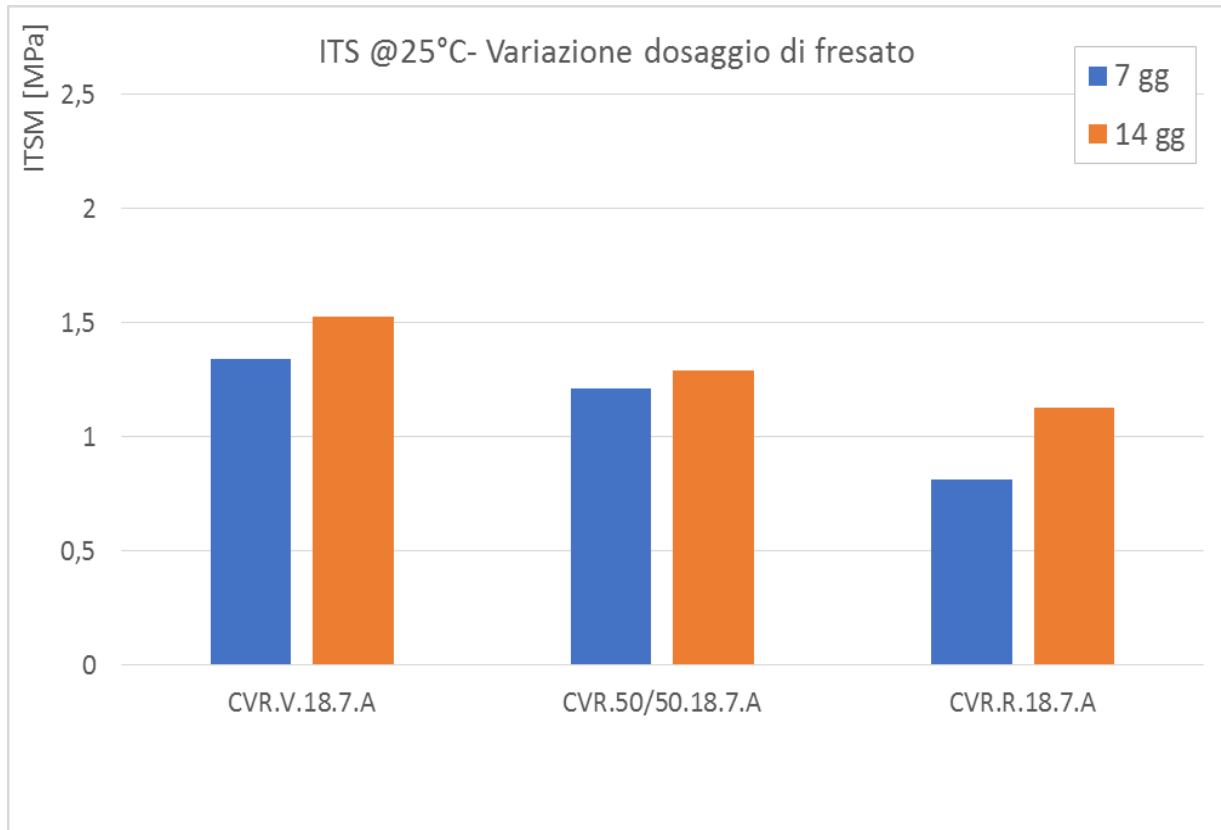


Figura 80- confronto ITS miscele con diversi dosaggi di fresato

Nella figura 80 si può notare come, aumentando il dosaggio di fresato, vi è una riduzione della resistenza. Questo accadeva anche nelle prove ITSM, ma in questo caso, anche se in termini assoluti, questa riduzione è minore. Si è passati infatti da un valore medio di circa 1,4 Mpa per aggregati vergini a circa 1 Mpa per 100% di fresato, riportando quindi un'incidenza di circa il 30%.

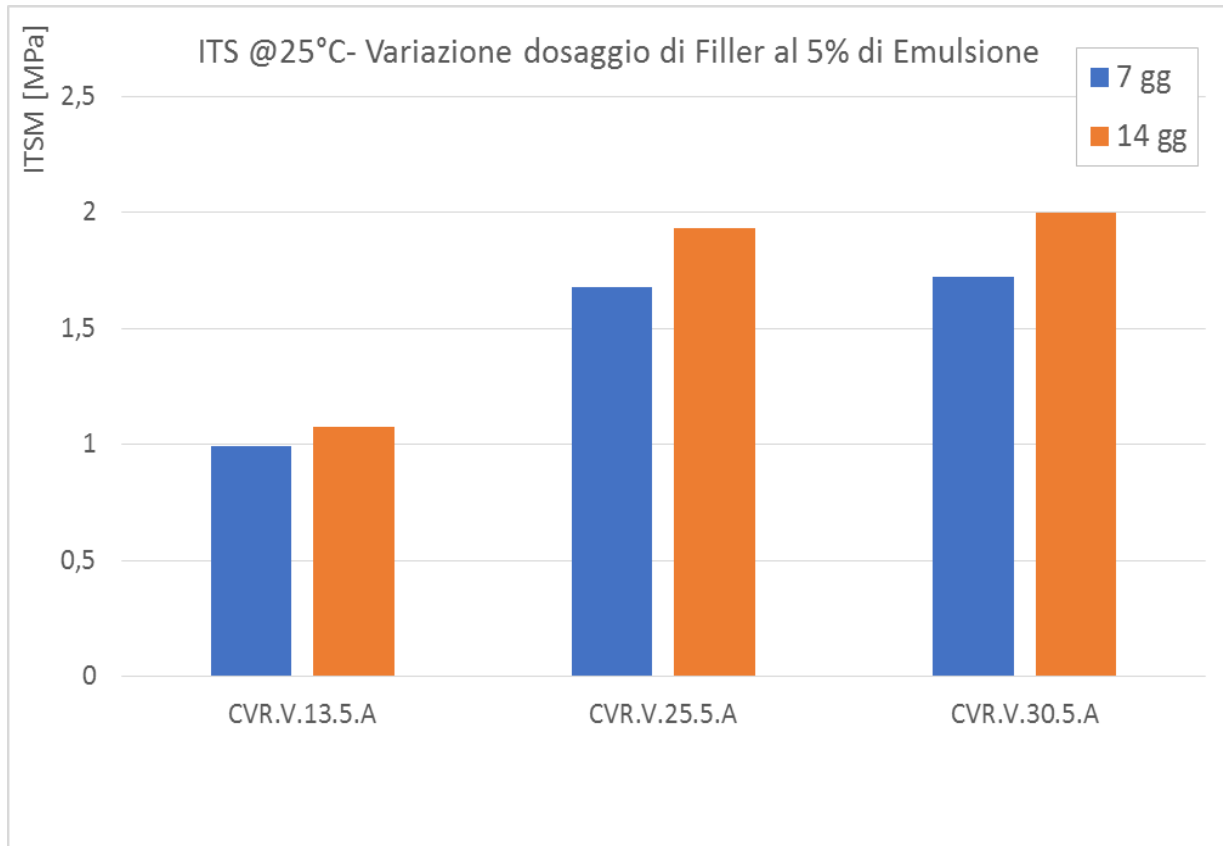


Figura 81- confronto ITS miscele con diverso dosaggio di filler al 5% di emulsione

Come ultima osservazione per le prove ITS si può notare nella figura 81 come raddoppiando il quantitativo di filler, si raddoppia anche il valore della resistenza a trazione indiretta. Un altro aspetto deducibile da questo grafico è che passando dal 25% al 30% di dosaggio non ci sono miglioramenti significativi.

## ***Capitolo 6 - Conclusioni***

La sperimentazione oggetto della tesi, condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile ed Architettura - sezione Infrastrutture - area Strade” dell’Università Politecnica delle Marche, è stata svolta al fine di studiare le caratteristiche meccaniche e prestazionali di differenti tipologie di conglomerato bituminoso impastato a freddo al variare della composizione granulometrica degli aggregati, della quantità e tipologia di emulsione bituminosa, del dosaggio e della tipologia di legante cementizio (quindi la presenza di filler attivo o cemento), e dell’utilizzo parziale o totale nonché assenza di materiale riciclato (RAP).

In particolare questa tesi tratta dello studio di un particolare conglomerato bituminoso realizzato a freddo che consente sia la diminuzione dello spessore dello strato necessario, grazie alla presenza di un elevato quantitativo di filler attivo o cemento, sia di mantenere in parte le proprietà visco-elastiche del bitume dovute alla presenza di emulsione bituminosa.

Sono state preparate sedici miscele differenti e per ogni miscela sono stati preparati tre provini. Per ogni miscela sono state svolte le seguenti prove

- Modulo di rigidità a trazione indiretta ITSM a 7 e 14 giorni
- Resistenza a rottura per trazione indiretta ITS dopo 7 e 14 giorni

Oltre all’analisi dei risultati ottenuti da queste due prove si otterranno conclusioni anche riguardo la compattabilità delle diverse miscele.

Dall'analisi dei dati è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Per quanto riguarda la compattabilità, le miscele si comportano tutte in modo analogo, non mostrando grandi differenze al variare della miscela, riportando parametri simili tra loro.
- Le miscele realizzate con aggregati vergini, senza l'utilizzo del RAP, non sono termo dipendenti in termini di ITSM, quindi il valore del modulo non è influenzato dalla temperatura di prova. Nelle miscele dove invece sono stati usati alti quantitativi di fresato si manifesta un comportamento più simile ai conglomerati bituminosi tradizionali in cui la temperatura influenza le prestazioni (con valori di modulo tuttavia nettamente più alti);
- Il modulo ITSM diminuisce nei provini in cui si aumenta il dosaggio di emulsione bituminosa;
- La tipologia di emulsione bituminosa usata non influisce sul comportamento meccanico in termini di modulo e resistenza a trazione;
- Nelle miscele con un più alto contenuto di filler aumenta sia il valore di ITSM che di ITS, anche se l'ITS ha un aumento maggiore, visto che è direttamente proporzionale all'aumento del dosaggio di filler. Il comportamento meccanico sembra raggiungere il picco per entrambi i parametri con una percentuale di filler del 25%, visto che aumentando ulteriormente la percentuale al 30% non si notano nette differenze;
- L'ITS aumenta quando si alza il dosaggio di emulsione bituminosa;
- L'ITS ha valori più alti a 14 giorni rispetto ai valori misurati a 7 giorni, cosa che non si manifesta nell'ITSM, che ha un comportamento più vario e imprevedibile.

## ***Capitolo 7 - Sitografia***

- (1) Il bitume ([e-nsight.com](http://e-nsight.com))
- (2) Penetrazione con ago EN 1426: Bitumi e leganti bituminosi - Determinazione della penetrazione con ago ([eurobitume.eu](http://eurobitume.eu))
- (3) Cemento - composizione - tipologie ([wikipedia.org](http://wikipedia.org))
- (4) La Pressa a taglio Giratoria secondo la normativa UNI EN 12697-31 ([geoconsultingitalia.com](http://geoconsultingitalia.com))
- (5) Il modulo di rigidezza del conglomerato bituminoso secondo la normativa UNI-EN 12697-26 ([geoconsultingitalia.com](http://geoconsultingitalia.com))

## ***Ringraziamenti***

Innanzitutto vorrei ringraziare il professor Bocci per avermi dato l'opportunità di svolgere questa sperimentazione con lui.

Ringrazio anche i due correlatori che mi hanno aiutato durante questo percorso di sperimentazione e stesura della tesi, Carlo ed Emiliano, per la loro infinita disponibilità e tempestività ad ogni mia richiesta. Grazie anche a tutti i ragazzi del laboratorio di strade perché hanno reso il periodo del mio tirocinio piacevole e costruttivo.

Devo dire grazie soprattutto alla mia famiglia, ai miei genitori e ai miei fratelli, che mi hanno sempre supportato, sopportato ed incoraggiato nei momenti più duri in cui volevo mollare.

Grazie anche a tutti i parenti, e soprattutto a mia nonna che anche in un momento di difficoltà come quello che ha vissuto è sempre stata presente cercando di aiutare per quanto possibile.

E infine grazie anche agli amici, quelli di infanzia e quei pochi che mi sono portato dietro dalle superiori e da questo periodo universitario, che mi hanno aiutato ad affrontare con più spensieratezza questo percorso.

Adesso sarebbe il momento di festeggiare, ma c'è poco da festeggiare... "avete mai visto un postino che esulta mentre consegna la posta?" ... è il mio lavoro...