



Università Politecnica delle Marche

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

**EFFETTI DEL TEMPO E DELLA TEMPERATURA DI  
MISCELAZIONE NEL CONGLOMERATO BITUMINOSO  
RICICLATO A CALDO**

**Effects of mixing time and temperature on the mechanical properties of  
Hot Recycled Mix Asphalt**

TESI DI LAUREA DI

*Michele Di Ianni*

RELATORE

*Prof. Ing. Maurizio Bocci*

*Correlatore*

*Ing. Emiliano Prospero*

---

Anno Accademico 2020-2021





## Sommario

Sommario .....	3
Introduzione .....	5
1. Capitolo 1 - Riciclaggio del conglomerato bituminoso.....	6
1.2 Rap (Reclaimed Asphalt Pavement).....	6
1.2.1 Definizioni e proprietà .....	8
1.3 Tecniche di riciclaggio .....	10
1.3.1 Riciclaggio a caldo.....	10
1.3.2 Riciclaggio a freddo .....	17
1.4 Invecchiamento del bitume e additivi rigeneranti .....	19
2 Capitolo 2 - Programma sperimentale .....	21
2.1 Obiettivi e miscele realizzate .....	21
2.2 Materiali.....	22
2.2.1 Aggregati vergini.....	23
2.2.2 Fresato .....	31
2.2.3 Bitume vergine: Vis Breaking e Primario .....	35
2.2.4 Additivi rigenerati .....	35
2.3 Apparecchiature e protocolli di prova .....	38
2.3.1 Definizione delle curve granulometriche di progetto .....	38
2.3.2 Miscelazione e compattazione dei provini – Pressa a taglio giratoria – UNI EN 12697-31).....	41
2.3.3 Determinazione delle proprietà volumetriche .....	46
2.3.4 Prova di modulo a trazione indiretta (UNI EN 12697-26) .....	50
2.3.5 Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23).....	61
2.3.6 Calcolo RI e TI .....	65

2.3.7 Estrazione del bitume .....	65
2.3.8 Prova FTIR.....	68
2.4 Specifiche del capitolato.....	72
Conclusioni .....	108
Bibliografia e Sitografia.....	110

## Introduzione

Attraverso lo studio nel traffico veicolare si è visto che negli ultimi decenni le infrastrutture stradali hanno avuto un notevole aumento sul trasporto su strada, in particolare il volume relativo ai veicoli pesanti ed il carico per asse è di gran lunga maggiore rispetto al passato.

A causa dell'azione dei carichi di traffico e degli agenti atmosferici a cui sono soggette in esercizio, le pavimentazioni stradali subiscono un progressivo degrado. Primariamente delle caratteristiche superficiali (aderenza e regolarità) e, successivamente, delle caratteristiche strutturali (portanza). Nel caso in cui non si intervenga tempestivamente, i fenomeni di degrado potrebbero interessare l'intero pacchetto stradale e quindi comportare l'asportazione e il rifacimento della rete. Tutte queste operazioni portano alla formazione di una grande quantità di conglomerato bituminoso di recupero, detto anche fresato, che può essere riutilizzato per la costruzione di nuove pavimentazioni stradali.

Anche se il riciclaggio del fresato comporta numerosi vantaggi sia economici che ambientali, il suo riutilizzo fino ad ora è limitato a causa dell'elevato stato di ossidazione del bitume in esso contenuto, dovuto all'invecchiamento a breve e a lungo termine. Infatti, il legante invecchiato presenta una minor duttilità e capacità di ricoprire gli aggregati rispetto al bitume vergine, nonché una maggiore rigidità della miscela e quindi una predisposizione a fenomeni di fessurazione. È in questo ambito che si inserisce l'utilizzo di additivi rigeneranti, in grado di riattivare le proprietà reologiche e chimiche del bitume invecchiato con conseguente miglioramento della lavorabilità del conglomerato.

Nella presente tesi verranno appunto testati vari tipi di additivi rigeneranti in miscele contenenti fresato, confezionati secondo la tecnica del riciclaggio a caldo. In particolare, viene utilizzato il RAP (0/8 e 8/16) e diverse percentuali di additivo, andando a valutare le caratteristiche volumetriche (volume dei vuoti residui), e meccaniche, mediante prove di modulo di rigidità (NAT) e di resistenza (Brasiliana) a trazione indiretta.

# 1. Capitolo 1 - Riciclaggio del conglomerato bituminoso

In questo capitolo sarà illustrato il tema del riciclaggio dei leganti bituminosi, nello specifico delle miscele derivanti da riciclaggio a caldo. Si parlerà del fresato, più precisamente delle procedure di produzione e delle proprietà fondamentali che si riflettono sulle miscele che andrà a costituire. Infine, si descriveranno con una breve panoramica le varie tecniche di riciclaggio, a freddo e a caldo, in impianto e in sito.

## 1.2 Rap (Reclaimed Asphalt Pavement)

Per conglomerato bituminoso di recupero o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) si intende un materiale costituito di aggregati lapidei, a loro volta caratterizzabili attraverso una curva granulometrica, e bitume invecchiato derivante dalle fasi di fresatura o scarifica degli strati di conglomerato bituminoso che costituiscono la pavimentazione stradale.

Il processo di asportazione può essere eseguito con diverse apparecchiature e in modo più o meno selettivo a seconda dei successivi utilizzi:

- Fresatrici: consentono di demolire in modo selettivo i vari strati della pavimentazione, il che permette di separare le varie tipologie di conglomerato bituminoso demolito, in relazione al tipo di bitume e alla granulometria; il conglomerato bituminoso derivante da demolizione con frese viene chiamato fresato
- Scarificatrici: vengono impiegate quando non è richiesta regolarità superficiale al termine del processo di asportazione. Per mezzi scarificatrici si intendono ripper, escavatori o altre apparecchiature simili.



*Figura 1.1: Demolizione con fresa*

Il riutilizzo di tale materiale è sconsigliato nella formazione di sottofondi e/o strati di fondazione non legati sia per motivi tecnici, infatti il RAP senza l'aggiunta di leganti ha una scarsa capacità portante a causa della mancanza di fine e dell'attrito interno tra i granuli per la presenza del bitume, sia per motivi economici: il conglomerato bituminoso è comunque costituito da aggregati pregiati ovvero di elevate caratteristiche meccaniche e da bitume, quindi non è opportuno utilizzarlo al fine di rimpiazzare materiali più economici e facilmente reperibili.

Per tutto l'arco della sua vita di esercizio, la pavimentazione deve poter garantire con la massima efficienza le sue funzionalità. I requisiti richiesti riguardano:

- funzioni strutturali: distribuzione delle azioni indotte dal traffico al sottofondo; resistenza al degrado causato da carichi ciclici e da sollecitazioni di natura termica;
- funzioni superficiali: protezione del sottofondo stradale dalle azioni dell'acqua e del gelo; garanzia di regolarità e aderenza del piano viabile, al fine di raggiungere sicurezza e comfort di marcia.

Come già accennato, la pavimentazione ha un arco di vita utile nel quale, se progettata in maniera corretta, è capace di mantenere i requisiti prestazionali. In alcuni casi, però, anche durante questo arco di tempo si possono verificare fenomeni di degrado, generati soprattutto dall'azione combinata del traffico e dalle sollecitazioni di natura termica. I fattori ambientali possono interessare gli strati superficiali della sovrastruttura: i raggi ultravioletti favoriscono l'indurimento e l'invecchiamento precoce del bitume riducendo la propria elasticità e in seguito agli sforzi di compressione e dilatazione (aumentati dalle continue sollecitazioni termiche) favoriscono la fessurazione del manto stradale. Anche i carichi veicolari contribuiscono all'aumento di fessurazioni e deformazioni a fatica, dovute soprattutto dalle sollecitazioni cicliche indotte dal passaggio degli automezzi più pesanti. Dato che tra i vari fenomeni di degrado esiste una stretta correlazione, è necessario intervenire in maniera tempestiva appena si verifica il dissesto con delle tecniche di manutenzione preventiva, prima che i danni compromettano l'intero pacchetto stradale.

### 1.2.1 Definizioni e proprietà

La norma tecnica UNI EN 13108-8 definisce il fresato d'asfalto come "conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura che può essere utilizzato come materiale costituente per miscele bituminose prodotte in impianto a caldo".

Il fresato, materiale dismesso da vecchi pacchetti stradali la cui pavimentazione risulta essere danneggiata per fessurazione o degrado, è una miscela di aggregati con una curva granulometrica propria caratterizzata da un'elevata percentuale di fini e contenente bitume invecchiato, cioè bitume che con il tempo ha modificato le sue proprietà chimico-fisico.

La rimozione della pavimentazione, o di un solo strato, avviene per mezzo di opportuni macchinari (fresatrice, escavatore, ripper, scraper, ecc.) che producono blocchi a lastre irregolari di conglomerato bituminoso da frantumarsi, se necessario, in seguito. La scelta dell'attrezzatura più idonea per l'operazione di rimozione è funzione dello spessore dello strato da demolire, che dipende dallo stadio e dall'entità del degrado; si opera con una fresatrice che arriva a rimuovere conglomerato fino ad una profondità di 50 mm per singola passata, mentre se si vuole togliere completamente la sovrastruttura si ricorre a bulldozer o a sistemi pneumatici.

Al termine della demolizione, il fresato ottenuto può essere sottoposto a due tecniche messe a disposizione nell'ambito del riciclaggio, possono essere macroscopicamente divise in:

- riciclaggio in impianto fisso;
- riciclaggio in situ.

Un'altra caratterizzazione può essere fatta in relazione agli scambi energetici presenti all'atto del confezionamento del nuovo conglomerato:

- riciclaggio a caldo;
- riciclaggio a freddo.

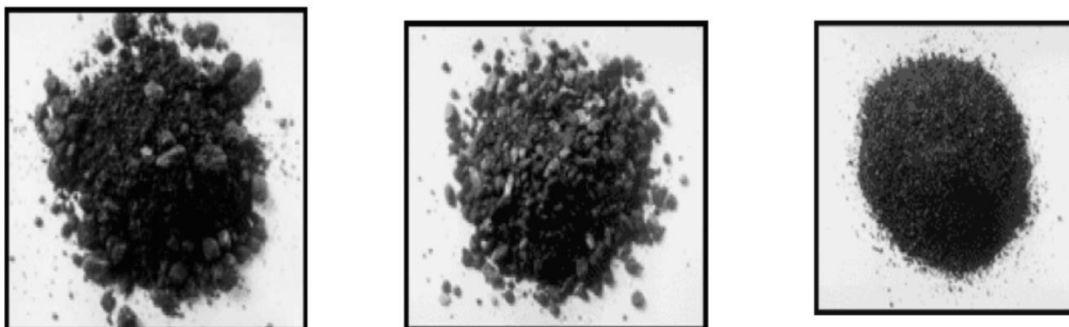


Figura 1.2: Fresato

Preliminarmente alla definizione del *Mix Design* di progetto, in cui si determinano i requisiti qualitativi e quantitativi di ogni componente al fine di ottenere una miscela equilibrata, è opportuno analizzare le caratteristiche del conglomerato di recupero attraverso il prelievo di campioni e successiva analisi in laboratorio per definire i seguenti aspetti:

- percentuale di legante;
- invecchiamento del legante;
- tipo e qualità dell'aggregato utilizzato;
- curva granulometrica.

Le caratteristiche del legante originario sono importanti sia per assicurarsi che esso sia in grado di recuperare nella rigenerazione tutte le caratteristiche perse a seguito dell'invecchiamento e conseguente ossidazione, sia per verificare che non diventi eccessivamente "rigido" a causa degli aggregati, elementi principali del fresato di origine calcarea o silicea. È importante stabilire la loro natura e a tal proposito è buona regola predisporre opportune prove di laboratorio, al fine di verificare la compatibilità col legante, l'opportuna lavorabilità dell'impasto e l'idonea presa finale.

Le caratteristiche prestazionali e quindi anche meccaniche del RAP sono fortemente influenzate dai materiali che lo compongono e dalla funzione del conglomerato d'origine (strato di base, usura o binder) che determina sostanziali differenze sulla natura, qualità e pezzatura degli aggregati. Ad esempio, in uno strato d'usura, per conferire un'aderenza accettabile, gli aggregati devono essere altamente resistenti all'abrasione; tali qualità non sono invece richieste per il confezionare uno strato di binder avente solo una funzione di collegamento.

Nonostante la carenza in letteratura di dati a disposizione riguardanti il fresato, si può affermare che con una buona approssimazione, la densità di volume del materiale frantumato, alla fine di tutti i trattamenti, è lievemente inferiore a quella degli aggregati vergini e si colloca tra 1940 e 2600 kg/m<sup>3</sup>; generalmente l'umidità naturale del materiale si aggira intorno al 5% ed un'eventuale esposizione alla pioggia può provocare un incremento di tali valori, raggiungendo il 7 e l'8%. Dal punto di vista del ripristino energetico la permanenza di RAP nelle riserve dovrà essere minima, il conglomerato bituminoso proveniente dalla demolizione di pavimentazioni esistenti presenta un contenuto di legante tra 4.5 e 6% ed è piuttosto rigido a causa dell'ossidazione subita durante la stesa e la fase di esercizio. Estrahendo ed analizzando

il bitume RAP, questo esibisce una bassa penetrazione ed un alto valore di viscosità che variano con la durata in servizio della pavimentazione originaria.

### 1.3 Tecniche di riciclaggio

Il fresato è riciclabile al 100%, ma nella pratica il suo utilizzo è limitato a causa dell'elevato stato di ossidazione in cui si trova il bitume in esso contenuto, dovuto al duplice invecchiamento che il legante subisce in opera: il primo legato al confezionamento che determina un invecchiamento a breve termine (*Short Term Aging*), il secondo è il prodotto dall'azione ossidante degli agenti atmosferici che causa un invecchiamento a lungo termine (*Long Term Aging*).

L'ossidazione provoca una riduzione della matrice oleosa con conseguente modifica della lavorabilità e viscosità rispetto alle condizioni originarie; quindi, il bitume contenuto nel fresato si presenta come un legante rigido che a basse temperature può presentare problemi di fessurazione termica (*Thermal Cracking*), mentre alle temperature di produzione e stesa del conglomerato può presentare problemi di lavorabilità. Di conseguenza, l'aumento della percentuale di fresato nella miscela potrebbe provocare problemi legati al *Thermal Cracking* nelle regioni con clima freddo. Si suggerisce quindi l'impiego di additivi di tipo rigenerativo, i quali, aggiunti alla miscela permettono di ridurre la rigidità di quest'ultima.

Negli anni si è studiato un modo per utilizzare il RAP, ad oggi le tecniche più utilizzate che consentono di rimpiangere il materiale, classificate in funzione della procedura di miscelazione tra gli aggregati vergini e quelli di risulta, sono due:

- riciclaggio a caldo;
- riciclaggio a freddo.

#### 1.3.1 Riciclaggio a caldo

Nella tecnica a caldo, la procedura di confezionamento del conglomerato bituminoso prevede una fase di riscaldamento degli inerti oltre i 140°C.

#### **“IN SITU”**

Nella tecnica di riciclaggio a caldo “in situ” del conglomerato bituminoso tutte le operazioni si sviluppano in cantiere. Ciò comporta il vantaggio di evitare il trasporto e lo stoccaggio del materiale recuperato, ma anche lo svantaggio di richiedere macchine da cantiere più



complesse e costose. Un ulteriore limite è quello di poter utilizzare tale tecnica solo in caso di ammaloramenti della parte superficiale della sovrastruttura (sgranamenti, perdita di aderenza, ormaiamento, buche, ondulazioni...) potendo agire su una profondità di 5 o 6 cm.

Le fasi operative sono realizzate per mezzo di impianti mobili e semoventi detti anche "treni di riciclaggio", costituiti da diverse macchine che permettono di eseguire una:

- a) Fase di rimozione: prevede un preriscaldamento della pavimentazione a temperature superiori a 110°C con l'utilizzo di piastre radianti o a infrarossi; oppure si realizza una rimozione "a freddo" dello strato superficiale della pavimentazione seguita da un riscaldamento degli aggregati di apporto e del fresato in separata unità.
- b) Studio della miscela: si valutano le percentuali di aggregato e di bitume vergine che devono essere miscelate con il fresato recuperato dalla vecchia pavimentazione. In questa fase bisogna tener conto dell'ulteriore ossidazione che il bitume della pavimentazione subisce nella fase di preriscaldamento.

Al di là dei vantaggi logistici ed economici, dovuti all'assenza di fasi di trasporto e di stoccaggio e dalla possibilità di poter riciclare anche il 100% di RAP, a differenza della tecnica in impianto, il riciclaggio in sito viene progressivamente abbandonato per:

- Problematiche ambientali (il preriscaldamento della pavimentazione, e quindi del bitume, produce fumi nocivi di notevole impatto ambientale);
- Problematiche logistiche (ingombro dei macchinari, necessità di sistemi di depurazione per abbattimento delle polveri emesse, difficoltà nell'ottenere una correzione granulometrica esatta);
- Problematiche economiche (costo delle attrezzature).

## **IN IMPIANTO**

Il fresato viene aggiunto direttamente nella miscela di aggregati vergini, bitume ed eventuali additivi nell'impianto di produzione del conglomerato bituminoso. La tecnica è senza dubbio quella che conferisce prestazioni più elevate al conglomerato riciclato, e che lo rendono idoneo per ogni tipo di impiego, dallo strato di base a quello di usura. La quantità di RAP che può essere riciclata varia in base a diversi fattori:

- modalità di riscaldamento (quantità di RAP maggiore se riscaldato nel tamburo essiccatore; quantità minore se riscaldato per contatto con gli aggregati vergini);

- tipo di strato da realizzare (10-15% di RAP per il tappeto d'usura, 50% di RAP per lo strato di base, 30% di RAP per il binder);
- capacità di correggere le caratteristiche fisiche e chimiche del bitume invecchiato.

Ovviamente, tanto più alte sono le percentuali di fresato che si vuole riutilizzare, tanto più accurata dovrà essere la gestione e selezione di tale materiale, sia in termini qualitativi che di omogeneità. Considerando le caratteristiche del bitume invecchiato, è noto che esso mostra una minore duttilità e capacità di ricoprire gli aggregati rispetto al bitume vergine, rendendo il prodotto finito troppo rigido e fragile.

Come avviene per il normale confezionamento del conglomerato bituminoso, anche per tale tecnica di riciclaggio si apportano opportune modifiche agli impianti utilizzati per il normale confezionamento del conglomerato bituminoso, che possono essere di tipo continuo e discontinuo.

### 1) Impianto discontinuo

È la tipologia più diffusa in Europa in quanto dotata di maggiore flessibilità di utilizzo e di una maggiore qualità del prodotto finale. Tra gli svantaggi c'è da sottolineare che è un impianto costoso e, a parità di condizioni iniziali, ha una minore produttività dell'impianto continuo.

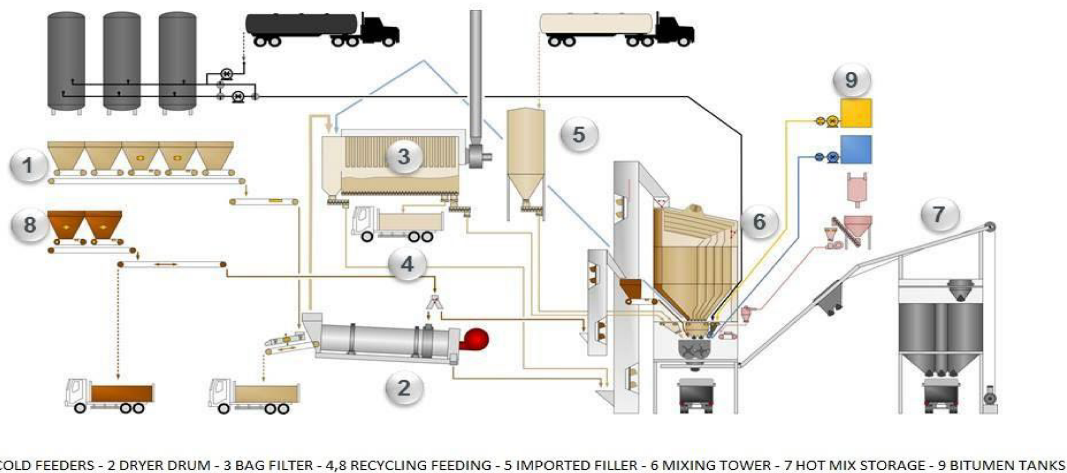


Figura 1.3: impianto di tipo discontinuo

Fasi operative:

- Mediante delle pale caricatorie viene prelevato il materiale dai cumuli e disposto sulle tramogge (o vasche predosatrici) in modo che ogni vasca contenga una determinata pezzatura degli inerti;

- Tramite un nastro trasportatore posto su una bilancia peso le quantità delle varie frazioni granulometriche da inserire; dopodiché gli inerti vengono trasferiti all'interno di un tamburo/cilindro essiccatore;
- Il tamburo essiccatore è un cilindro d'acciaio rotante internamente dotato di una pala (che solleva il materiale stesso) e inclinato nel verso di avanzamento del materiale. Esso presenta inoltre un bruciatore (fiamma) e un ventilatore (per la diffusione del calore) che può funzionare con flussi concorrenti o controcorrenti. Lo scopo principale del tamburo è quello di eliminare l'umidità negli aggregati, raggiungere la temperatura adatta alla miscelazione con il legante e di rendere più omogenea la distribuzione le varie frazioni granulometriche;
- I gas prodotti in questa fase di lavorazione presentano residui di combustione e polveri che devono essere filtrati prima dell'immissione in atmosfera (in modo da recuperare il filler e trasportarlo al silo di stoccaggio) così che dal cilindro fuoriesce solo vapore acqueo;
- Gli aggregati riscaldati fino a 150°-160°C fuoriescono dal cilindro e vengono trasportati mediante un elevatore a tazze nella torre di miscelazione, che prevede:
  - Una rifelezione granulometrica degli aggregati mediante dei vagli vibranti e stoccaggio in silos a caldo (per il controllo e l'eliminazione degli errori commessi nella prima selezione);
  - dosaggio degli aggregati in base alla ricetta granulometrica e introduzione della camera di miscelazione;
  - introduzione di additivi, bitume e filler nel mescolatore e miscela di tutte le componenti.
- Il conglomerato bituminoso viene scaricato direttamente negli automezzi o accumulato in silos provvisori.

Nel momento in cui tra gli inerti vergini deve essere inserito anche il fresato, per ottenere il riciclaggio a caldo della pavimentazione vecchia, osserviamo che esso può essere riscaldato e introdotto in diversi modi:

- a) **Nel tamburo essiccatore provvisto di un anello esterno:** il fresato viene inserito nel cilindro essiccatore insieme agli aggregati vergini; per evitare il contatto diretto tra RAP e bruciatore, che potrebbe provocare emissione di fumi nocivi ed eccessiva ossidazione del bitume, esso viene inserito all'interno di un apposito anello e quindi

protetto da una paratia di acciaio, così da scaldarsi per induzione. L'anello consente di introdurre percentuali di RAP fino al 35%.

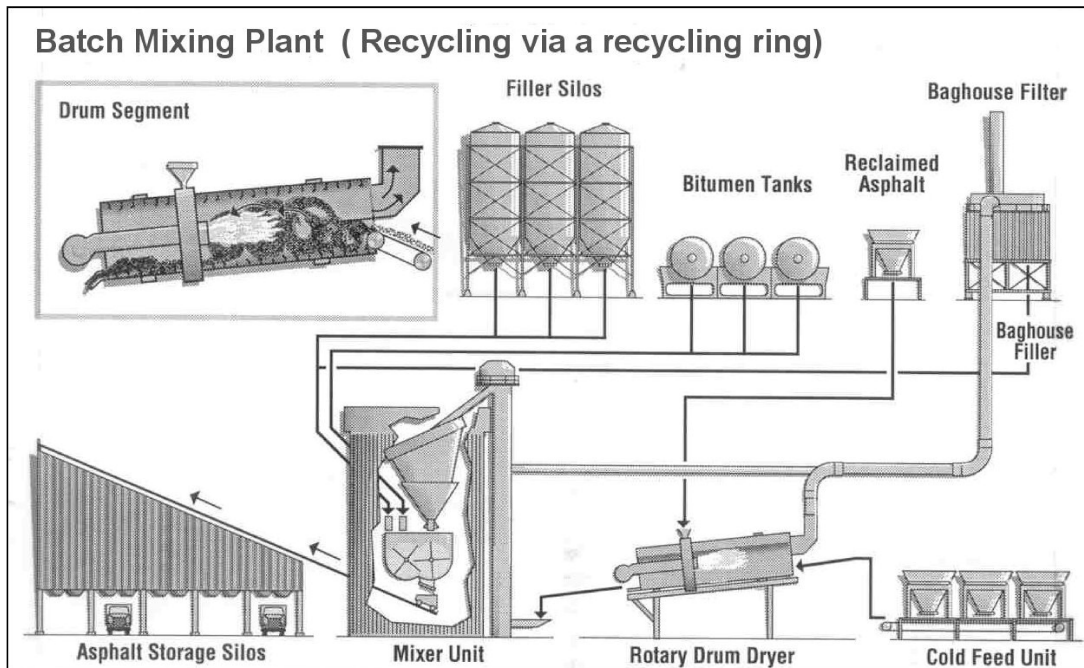


Figura 1.4: Impianto di riciclaggio a caldo con introduzione del RAP attraverso un apposito anello

- b) **Doppio tamburo essiccatore:** il fresato viene riscaldato in un tamburo separato, il quale opera ad una temperatura inferiore rispetto a quella del tamburo per gli aggregati vergini, evitando così l'eccessiva produzione di fumi. Questa soluzione rappresenta quella più corretta ma anche quella più sconveniente dal punto di vista economico, in quanto è necessaria un'importante quantità aggiuntiva di energia per il funzionamento del secondo tamburo. Tale linea di produzione consente l'impiego di riciclato con un massimo del 50% in rapporto al peso totale della miscela secca e rimane consentito l'utilizzo del vaglio vibrante.

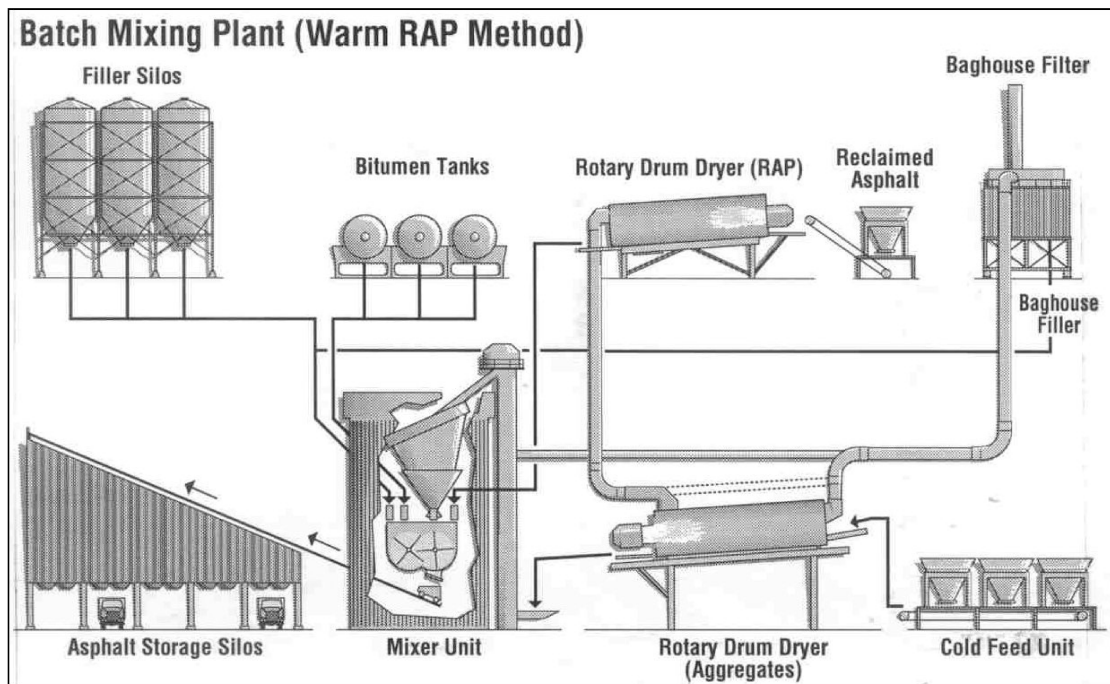


Figura 1.5: Impianto di riciclaggio a caldo con speciale essiccatore in equicorrente per il RAP

- c) **Aggiunta del fresato freddo al piede dell'elevatore:** tale tecnica consente un impiego massimo del 15-20% di conglomerato di recupero ed in questo caso viene esclusa la ri-selezione mediante vaglio vibrante. Il riciclo scaricato nell'elevatore entrerà direttamente in contatto con gli inerti caldi provenienti dall'essiccazione e si scalderà a sua volta lungo tutto il ciclo produttivo.
- d) **Aggiunta del fresato a freddo nella camera di miscelazione:** in questa tecnica, al fresato si aggiungono gli aggregati riscaldati e successivamente la miscela viene introdotta all'interno del miscelatore. In questo modo si ottiene uno scambio termico tra aggregati e fresato che comporta un abbassamento della temperatura finale del conglomerato. Questa tecnica è la più usata ma anche la più sbagliata in quanto:
- creo uno shock termico perché introduco del materiale freddo a contatto con quello caldo;
  - il conglomerato bituminoso è troppo freddo per essere steso perciò sarebbe richiesto un soprariscaldamento degli aggregati vergini che però rischia di danneggiare il bitume nuovo;
  - il bitume si potrebbe carbonizzare.
- e) **Aggiunta del fresato combinando due metodi (RAP nell'anello del cilindro essiccatore e RAP freddo nel mescolatore):** tale metodologia, adottata per la produzione di miscele testate per i due campi prova successivamente descritti consente di riciclare

una percentuale maggiore di fresato in quanto non vi è più il limite di capienza imposto dall'anello essiccatore (circa del 40%).

## 2) Impianto continuo (tipo Drum mixer)

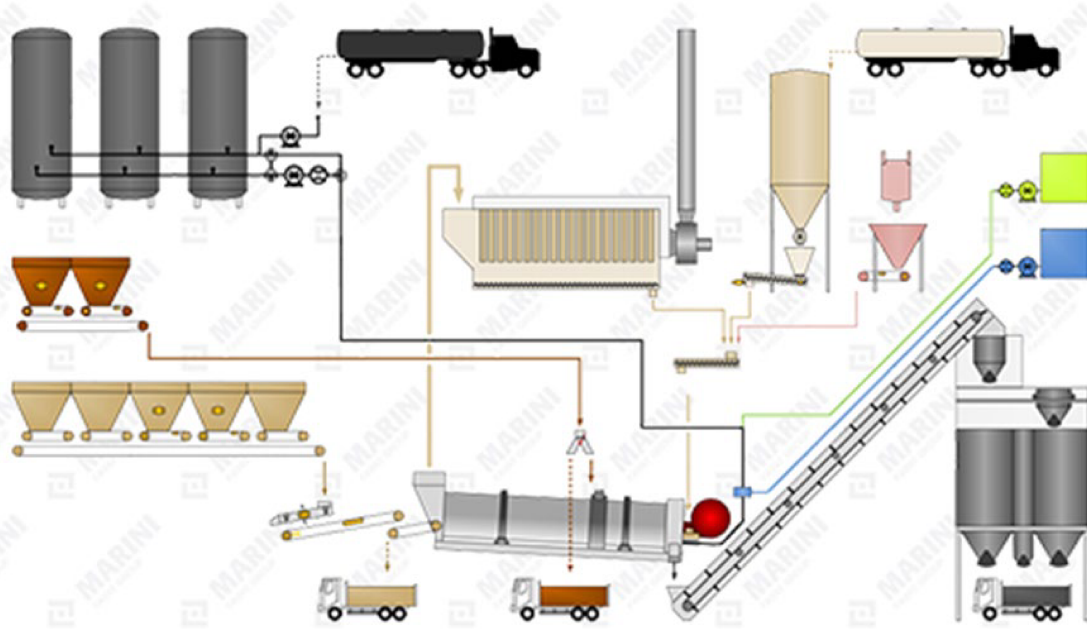


Figura 1.6: impianto di tipo continuo

Le differenze principali presenti negli impianti di tipo Drum-mixer sono l'assenza della torre di miscelazione, quindi di una fase di ri-selezione degli aggregati mediante i vagli vibranti, e l'utilizzo di un tamburo di lunghezza maggiore per consentire sia l'essiccazione degli aggregati vergini sia la miscelazione dei diversi componenti del conglomerato bituminoso.

I vantaggi di tale tipologia di impianto consistono nel minor costo di produzione e gestione, dovuto all'assenza di alcune fasi, e una maggiore capacità di produzione data dalla continuità di esercizio.

Tuttavia, tale scelta produttiva comporta anche numerosi svantaggi come:

- minor qualità del conglomerato prodotto per i ridotti controlli granulometrici delle miscele. Essendo assente la fase di ri-selezione condotta nella torre di miscelazione, è possibile che vengano commessi errori sul miscuglio di pezzature contenute in due tramogge adiacenti e sulla valutazione dell'umidità iniziale degli aggregati, che deve essere sottratta alla loro massa totale per rispettare le quantità indicate nella miscela di progettazione;
- emissioni nocive dovute alla vicinanza del bitume con il bruciatore del Drum-mixer;

- problemi logistici connessi al cambio di produzione: per passare dalla produzione di conglomerato bituminoso per uno strato a quello per un altro si deve fermare tutta la linea di produzione e ricominciare;
- nel cilindro potrebbe essere trattenuto del vapore acqueo, dato dall'essiccazione degli aggregati, che si potrebbe attaccare al bitume;
- per pulire il cilindro è necessario far fare un ciclo di miscelazione a vuoto con soli aggregati vergini.

Le modifiche apportate all'impianto continuo per poter permettere l'utilizzo del fresato riguardano diversi modi per evitare il più possibile il contatto tra la fiamma del bruciatore e il bitume vecchio del materiale da riciclo. Essi sono:

- 1) **Sistema a doppia alimentazione (dual-feed)**: il materiale di recupero viene introdotto (in un secondo momento rispetto al materiale vergine) a metà cilindro, in modo da non essere danneggiato dalla fiamma del bruciatore; il riscaldamento del fresato avviene dunque per contatto, grazie al mescolamento con gli inerti vergini, nella seconda metà del cilindro;
- 2) **Sistema del cilindro nel cilindro (drum-in-drum)**: il materiale vergine viene immesso all'altezza del bruciatore in uno speciale cilindro, interno al principale, ma più piccolo; il materiale di recupero, invece, viene introdotto poco dopo tra i due cilindri ed inizia a riscaldarsi, rimanendo tuttavia protetto dalla fiamma, grazie al cilindro interno che si interpongono tra i due ed evita loro qualsiasi possibile contatto. Ad una certa distanza di sicurezza dalla fiamma, il cilindro interno termina e i due materiali (vergine e di recupero) si mescolano nella rimanente parte del cilindro principale;

### 1.3.2 Riciclaggio a freddo

Tale tecnica di riciclaggio consiste nell'utilizzo di RAP e di aggregati lapidei di primo impiego senza una fase preventiva di riscaldamento, ma miscelandoli con il legante a temperatura ambiente. Il riciclaggio a freddo presenta dei vantaggi che ne fanno un'alternativa sempre più utilizzata di riqualificazione e manutenzione della pavimentazione:

- limita lo sfruttamento delle risorse ambientali per la riduzione dell'attività estrattiva degli aggregati;
- riduce i costi, essendo garantita la medesima durabilità di una pavimentazione costruita con materiali vergini;

- risparmia l'energia necessaria al riscaldamento degli aggregati e, in caso di riciclaggio *in situ*, al trasporto del materiale all'impianto;
- riduce l'impatto ambientale limitando i fumi emessi dal combustibile bruciato e dall'ossidazione del bitume contenuto nel fresato;
- permette l'utilizzo di un'elevata quantità di RAP (fino al 100% della massa degli aggregati lapidei).

## **IN IMPIANTO**

La produzione in impianto è simile a quella di un misto cementato. Questa alternativa è preferibile in quanto si realizza un controllo più efficace della produzione e si riesce ad ottenere una maggiore omogeneità della miscela attraverso le fasi di vagliatura e conseguente suddivisione in classi granulometriche.

Le miscele ottenibili dal riciclaggio a freddo differiscono dalle classiche miscele. In esse sono presenti: il cemento che svolge la duplice funzione di filler e di rompere l'emulsione bituminosa (se utilizzata); la tipologia di legante bituminoso impiegato che a seconda dell'intervento da svolgere può variare dal bitume schiumato, all'emulsione di bitume tal quale o emulsione di bitume modificato; acqua. Lo studio della miscela si basa su quattro fasi fondamentali: determinazione della composizione granulometrica, determinazione del contenuto d'acqua, scelta del tipo di legante (in funzione della destinazione d'uso del materiale prodotto) e determinazione del dosaggio del legante.

## **IN SITU**

Il processo avviene in strada attraverso treni a unità singola o multipla. Vengono utilizzate delle macchine stabilizzatrici capaci di frantumare la vecchia pavimentazione e miscelarla sotto un'apposita campana con acqua, aggregato d'integrazione, cemento e leganti bituminosi (emulsione bituminosa e bitume schiumato).

Il riciclaggio condotto in sito permette quindi di evitare la movimentazione e lo stoccaggio di materiale recuperato dalla pavimentazione ammalorata, comportando determinati vantaggi:

- minor costo di costruzione;
- minor durata dell'intervento (per l'eliminazione di alcune fasi intermedie);
- minor rischio di incidenti (per l'assenza della fase di trasporto e per il minor numero di mezzi coinvolti);



- minor disagio per gli utenti grazie alla collocazione delle apparecchiature lungo una sola corsia stradale.

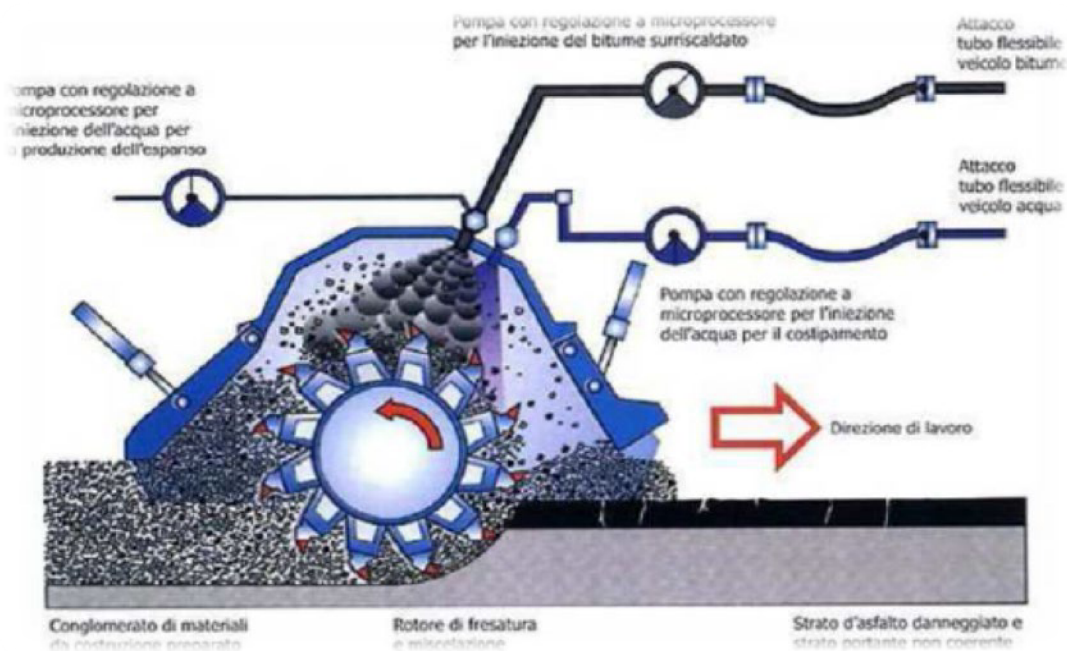


Figura 1.7: rotore di fresatura-miscelazione

## 1.4 Invecchiamento del bitume e additivi rigeneranti

A partire dall'istante in cui il conglomerato bituminoso viene miscelato nell'impianto di produzione e per tutta la sua vita nella pavimentazione stradale, esso subisce un'importante evoluzione delle sue caratteristiche. Ciò è dovuto in particolare al fenomeno di alterazione che riguarda il legante, noto come invecchiamento del bitume.

Con il termine invecchiamento si vuole raggruppare l'intero complesso di fenomeni strettamente legati all'azione combinata di temperatura e presenza di ossigeno che portano alla progressiva e irreversibile perdita delle caratteristiche originarie proprie del legante.

Si possono individuare tra principali meccanismi alla base dell'invecchiamento del bitume:

- **VOLATILIZZAZIONE:** fenomeno che consiste nella perdita delle componenti più leggere del materiale, ovvero caratterizzate da bassi punti di ebollizione. Questo processo arriva quasi al termine già della fase di miscelazione con gli aggregati a causa delle temperature raggiunte.
- **OSSIDAZIONE:** reazione dell'ossigeno con le lunghe molecole idrocarburiche, anch'essa è favorita dalle elevate temperature ma non si esaurisce nelle fasi di produzione progredendo anche oltre questa fase.

- **POLIMERIZZAZIONE:** reazione che avviene solo nei bitumi modificati con polimeri; si basa sulla formazione di nuovi legami intermolecolari con conseguente formazione di catene di maggiori dimensioni. Anche la polimerizzazione, come l'ossidazione, è favorita dalle elevate temperature ma non si esaurisce nella fase di produzione del conglomerato bituminoso.

Il fenomeno dell'invecchiamento, quindi, si sviluppa nel tempo e si possono distinguere due fasi:

- Invecchiamento a breve termine
- Invecchiamento a lungo termine

➤ **INVECCHIAMENTO A BREVE TERMINE**

Si sviluppa durante le prime fasi della realizzazione della pavimentazione, ovvero produzione della miscela, trasporto al cantiere e messa in opera (stesa e compattazione). In questa fase il bitume, esposto all'azione combinata dell'elevata temperatura e della disponibilità di ossigeno, subirà un processo di irrigidimento dovuto alla combinazione di tutti e tre i meccanismi di invecchiamento sopra indicati.

➤ **INVECCHIAMENTO A LUNGO TERMINE**

Riguarda l'intera fase di servizio, dall'apertura al traffico fino al termine della vita utile della pavimentazione. Gli agenti che contribuiscono al fenomeno dell'invecchiamento sono fenomeni meteorici, e in particolare l'acqua, le radiazioni solari e le variazioni di temperatura: inoltre ricoprono un importante ruolo caratteristiche intrinseche alla pavimentazione e al materiale come la posizione dello strato in questione all'interno della pavimentazione, lo spessore del film di bitume che riveste gli aggregati e il tenore di vuoti che caratterizza la miscela. Durante questa fase i principali meccanismi che agiscono sono ossidazione e polimerizzazione.

Nell'ambito del riciclaggio a caldo del fresato, l'utilizzo di bitume già invecchiato, prevede la necessità di utilizzare degli additivi detti rigeneranti (e anti-ossidanti) che hanno il compito di integrare il bitume invecchiato del fresato con le sostanze che si sono perse o modificate

durante il processo di invecchiamento e migliorarne le proprietà di adesione, consistenza e viscosità, migliorando perciò le prestazioni del conglomerato bituminoso finale. Allo stesso tempo, essi devono essere stabili in un ampio intervallo di temperature, da quella di stoccaggio a quella di applicazione, e non devono evaporare né essudare durante le fasi di realizzazione e di servizio, altrimenti il loro contributo sarebbe solo sulla lavorabilità del materiale e non sulle prestazioni a medio e lungo termine.

Il loro dosaggio, da specificare obbligatoriamente nello studio della miscela, potrà variare a seconda delle condizioni di impiego in funzione del contenuto, del tipo e delle caratteristiche del bitume presente nel fresato e dalle prestazioni del conglomerato bituminoso di progetto. Generalmente vengono eseguite prove di laboratorio impiegando non uno, ma più additivi per valutare la miglior compatibilità tra l'additivo e quel bitume specifico che deve essere trattato; inoltre, ogni additivo dovrebbe essere testato in diverse percentuali al fine di individuare il dosaggio ottimale. In maniera indicativa, la quantità introdotta nell'impasto dovrà essere compresa tra il 2% e il 7% in peso rispetto al bitume invecchiato (bitume da "curare") presente nel fresato. In funzione dell'impiego, l'additivo per il riciclaggio a caldo potrà essere disperso nel legante o spruzzato direttamente sul fresato, mediante attrezzature idonee a garantire l'esatto dosaggio e l'omogenea dispersione all'interno del conglomerato bituminoso.

## 2 Capitolo 2 - Programma sperimentale

Nel seguente capitolo vengono riportate tutte le operazioni eseguite in laboratorio, illustrando gli obiettivi del programma d'indagine, i materiali utilizzati, le apparecchiature adoperate e le metodologie di prova eseguite.

### 2.1 Obiettivi e miscele realizzate

Lo scopo dell'analisi sperimentale condotta riguarda lo studio dell'invecchiamento a breve termine del conglomerato bituminoso all'aumentare del tempo tra miscelazione e stesa, simulata in laboratorio tramite diversi tempi di permanenza in forno (30 minuti, 90 minuti, 180 minuti). Viene inoltre testata la capacità di diversi additivi (A e B) nel rigenerare il bitume vecchio contenuto nel fresato, valutando la lavorabilità della miscela, la rigidità e la resistenza a trazione indiretta dei provini confezionati con conglomerato bituminoso di

recupero. In totale sono state realizzate e testate 96 miscele, schematizzate nella seguente tabella (Tab. 2.1):

% RAP	T [°C]	BITUME	ADDITIVO	PROVINI	% ADDITIVO	PROVE
0RAP	140	API	-	2 X 30, 90, 180 min	-	ITSM ITS FTIR su 32 provini
0RAP	170	API	-	30, 90, 180 min	-	
50RAP	140	API	-	30, 90, 180 min	-	
50RAP	170	API	-	30, 90, 180 min	-	
50RAP	140	API	ACF1000	30, 90, 180 min	9% BITUME RAP	
50RAP	170	API	ACF1000	30, 90, 180 min	9% BITUME RAP	
50RAP	140	API	SYLVAROAD	30, 90, 180 min	6% BITUME RAP	
50RAP	170	API	SYLVAROAD	30, 90, 180 min	6% BITUME RAP	

Tabella 2.1: Tabella riassuntiva delle miscele realizzate e testate

Le analisi sperimentali sono state svolte interamente nel Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche tramite le seguenti fasi:

- 1) Determinazione della curva granulometrica di progetto delle miscele in modo tale da rientrare all'interno del fuso di riferimento del binder del Capitolato dell'ANAS;
- 2) Preparazione dei provini con diametro di 100 mm mediante l'utilizzo di miscelatrice e pressa giratoria (ad altezza imposta);
- 3) Valutazione del modulo elastico in configurazione di trazione indiretta, utilizzando il NAT (Nottingham Asphalt Tester);
- 4) Determinazione della resistenza a trazione in configurazione di trazione indiretta.

## 2.2 Materiali

I materiali utilizzati per il confezionamento dei provini di conglomerato bituminoso sono stati: filler, sabbia, calcare, bitume 50/70, fresato e additivi rigeneranti (A e B).

### 2.2.1 Aggregati vergini

Nell'ambito della presente indagine sono stati impiegati diversi tipi di aggregati, in termini di pezzatura e mineralogia. La granulometria di ogni aggregato è stata effettuata in accordo alle norme UNI EN 933-1.

Per ottenere la curva si prende un campione di materiale ottenuto per quartatura, ovvero una selezione di un campione rappresentativo dell'intero lotto di materiale lapideo e poi viene posto in forno a 105 °C per eliminare l'acqua interstiziale presente per il tempo necessario a raggiungere un peso costante.

Per quanto riguarda l'analisi granulometrica per via secca, si pesa del materiale prima della prova e poi si dispongono i setacci uno sopra l'altro, con retinatura di diametro via via minore e si versa sulla sommità il campione di aggregato da analizzare. Il vibrovaglio scuote vigorosamente attraverso un movimento "rotatorio-sussultorio" la pila di setacci per 15 minuti per facilitare il passaggio degli aggregati: i materiali più grossolani si fermano più in alto e via via i più fini finiscono più in basso.

Terminata l'operazione, si pesa il materiale raccolto in ciascun setaccio, a cominciare da quello più fino, misurando così il TRATTENUTO PARZIALE che poi viene espresso in percentuale, utilizzando la seguente formula, essendo N il numero totale dei setacci:

$$T_i = 100 \cdot \frac{P_i}{\sum_{j=1}^N P_j}$$

dove:

- ✓  $T_i$ : trattenuto parziale in percentuale;
- ✓  $P_i$ : passante all'i-esimo setaccio.

Successivamente, vengono calcolati i TRATTENUTI CUMULATIVI nei vari setacci relativi a tutta la quantità di materiale trattenuta nel setaccio i-esimo ed in quelli sovrastanti ( $j=1,2,\dots,i$ ), espressi in percentuale rispetto al peso totale del campione.

$$TC_i = 100 \cdot \frac{\sum_{j=1}^i P_j}{\sum_{j=1}^i P_j}$$

Vengono infine calcolati i PASSANTI CUMULATIVI nei vari setacci calcolati come complemento a 100 dei trattenuti cumulativi, espressi in percentuale rispetto al peso totale del campione:

$$TC_i = 100 - TC_i$$

L'analisi granulometrica per via umida prevede che un quantitativo preciso di materiale, posto in un setaccio con maglie di dimensioni pari a 0,063 mm, venga lavato sotto l'acqua corrente, con l'aiuto di una mano, per il tempo necessario perché avvenga il completo distacco della frazione più fine (filler) e la completa disgregazione dei grumi. Al termine di questa operazione (quando l'acqua che passa attraverso il setaccio ritorna ad essere limpida), il residuo viene posto in forno ad asciugare alla temperatura di 105 °C per poi effettuare una setacciatura "tradizionale" come è stata descritta qui sopra.

Il risultato dell'analisi granulometrica è reso visibile attraverso la creazione di grafici detti CURVE GRANULOMETRICHE in cui sull'asse delle ascisse viene riportato l'apertura del setaccio che ha trattenuto il materiale in scala logaritmica, mentre sulle ordinate la percentuale del materiale trattenuto dal rispettivo setaccio. La curva granulometrica ottenuta per ogni materiale è stata in seguito utilizzata per la realizzazione della curva di progetto e quindi per il calcolo delle quantità di ogni singola pezzatura da impiegare nelle miscele.

#### 2.2.1.1 Calcare

Il calcare è una roccia sedimentaria la cui composizione dipende dalle condizioni di formazione (chimica, organica o clastica). Il componente principale è rappresentato dal minerale calcite nel quale sono presenti impurità argillose o quarzatiche più o meno evidenti.

Le cave per l'estrazione del calcare si trovano prevalentemente lungo i corsi d'acqua o laghi e, di conseguenza, si trovano distribuite più o meno in tutte le regioni italiane.

In particolare, si sono utilizzate due diverse pezzature (in cui i rapporti 6/12 e 12/16 si riferiscono al d/D, dove d sta per diametro minimo e D per diametro massimo):

- Calcare 6/12 (Tabella 2.2, Figura 2.3 e 2.4);
- Calcare 12/16 (Tabella 2.5, Figura 2.6 e 2.7).

APERTURA d (mm)	TRATTENUTO PARZIALE g	PASSANTE CUMULATIVO %P
20	0	100
16	0	100
12,5	0	100
10	223,6	77,64
8	492,7	28,37
4	283,7	0
2	0	0
0,5	0	0
0,25	0	0
0,125	0	0
0,063	0	0
fondo	0,00	0
TOTALE	1000	

Tabella 2.2: Calcare 6/12

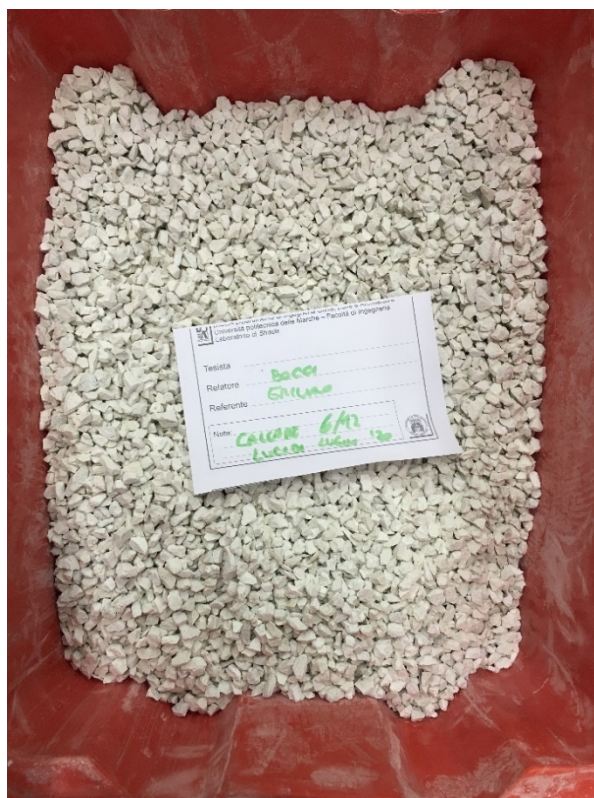


Figura 2.3: Calcare 6/12

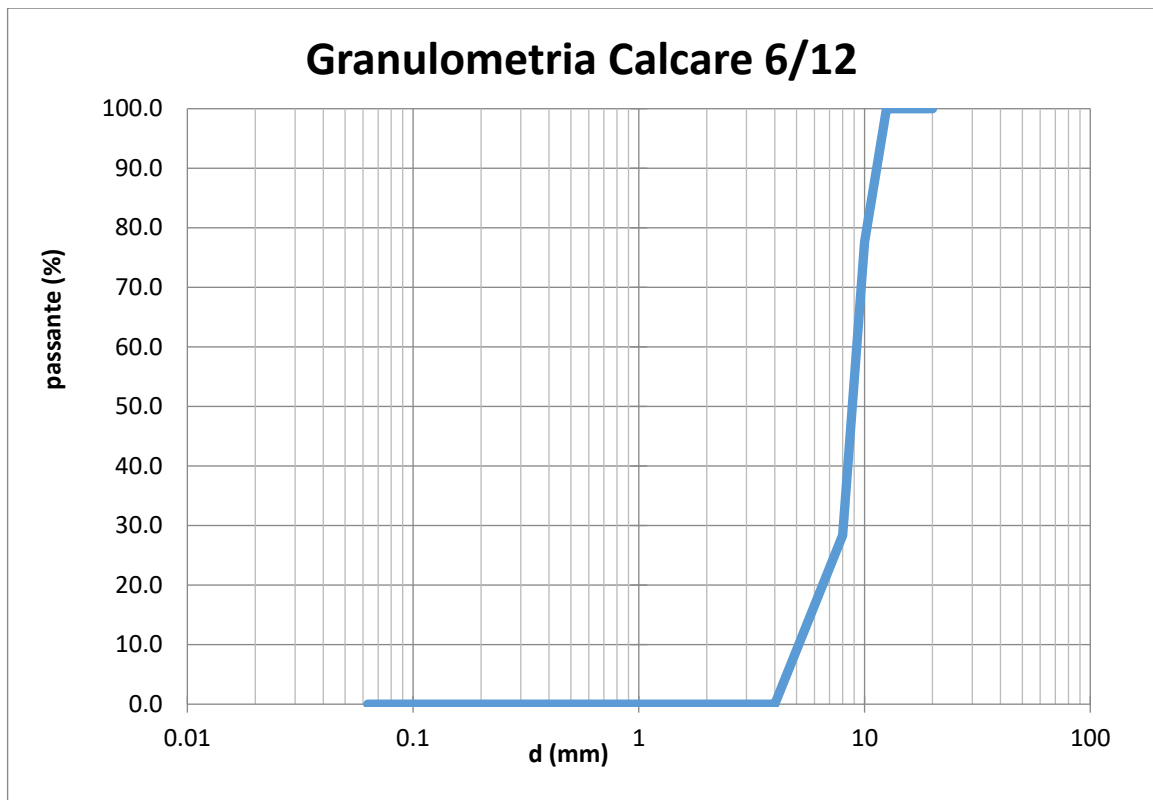


Figura 2.4: Curva granulometrica Calcare 6/12

APERTURA <i>d</i> (mm)	TRATTENUTO PARZIALE <i>g</i>	PASSANTE CUMULATIVO <i>%P</i>
31	0	100
20	0	100,0
16	563,2	53,5
12,5	519,2	10,6
10	128	0,0
8	0	0,0
4	0	0,0
2	0	0,0
0,5	0	0,0
0,25	0	0,0
0,125	0	0,0
0,063	0	0,0
fondo	0,00	0
TOTALE	1210,4	

Tabella 2.5: Calcare 12/16





Figura 2.6: Calcare 12/16

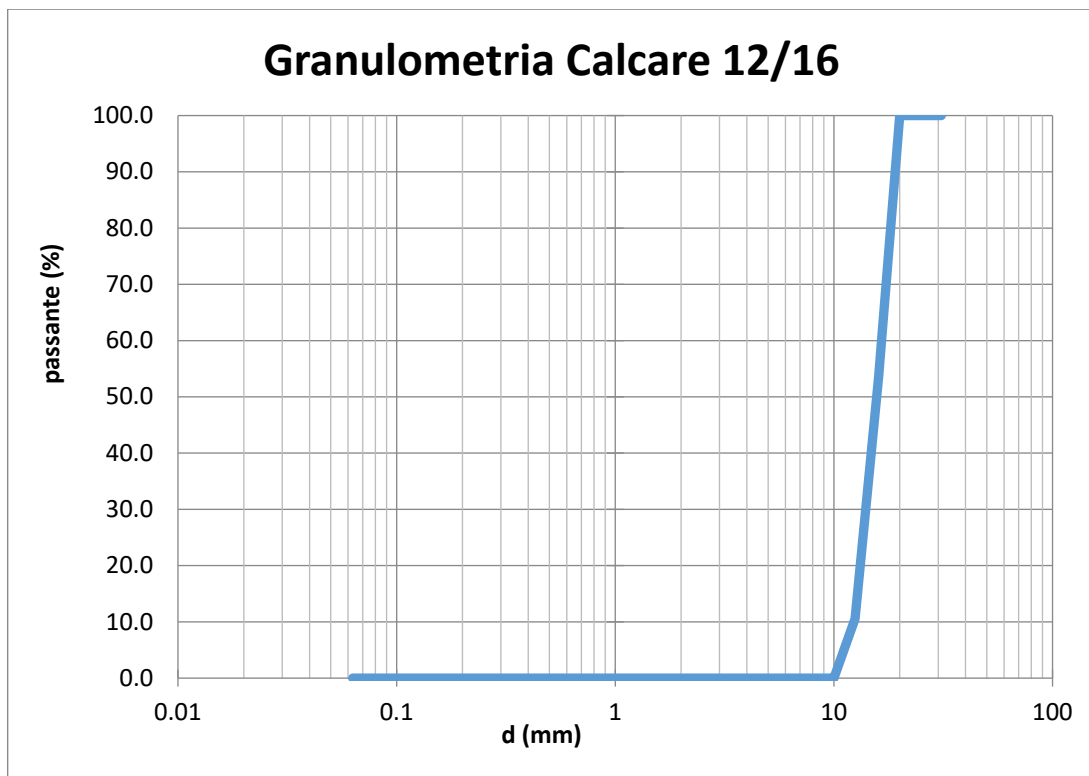


Figura 2.7: Curva granulometrica Calcare 12/16

### 2.2.1.2 Sabbia calcarea

La sabbia utilizzata per la realizzazione di questa indagine sperimentale è di natura calcarea con pezzatura 0/6 (Tabella 2.8, Figura 2.9 e 2.10):

APERTURA <i>d</i> (mm)	TRATTENUTO PARZIALE <i>g</i>	PASSANTE CUMULATIVO <i>%P</i>
20	0	100
16	0	100
12,5	0	100
9,5	0	100
8	0	100
4	74,7	92,5
2	321,1	60,4
0,5	378,8	22,5
0,25	65,5	16,0
0,125	41,7	11,8
0,063	25,9	9,2
fondo	92,3	0,0
TOTALE	1000	

Tabella 2.8: Sabbia calcarea 0/6

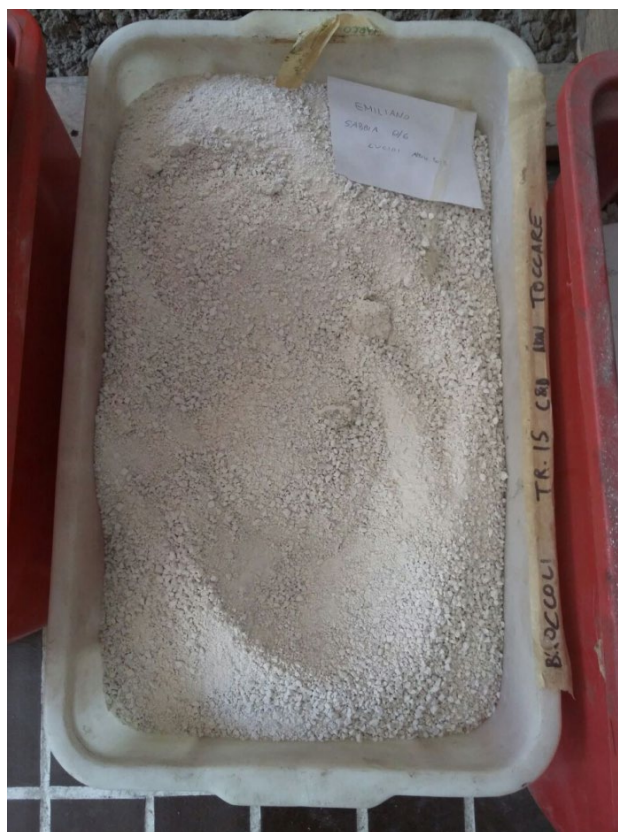


Figura 2.9: Sabbia calcarea

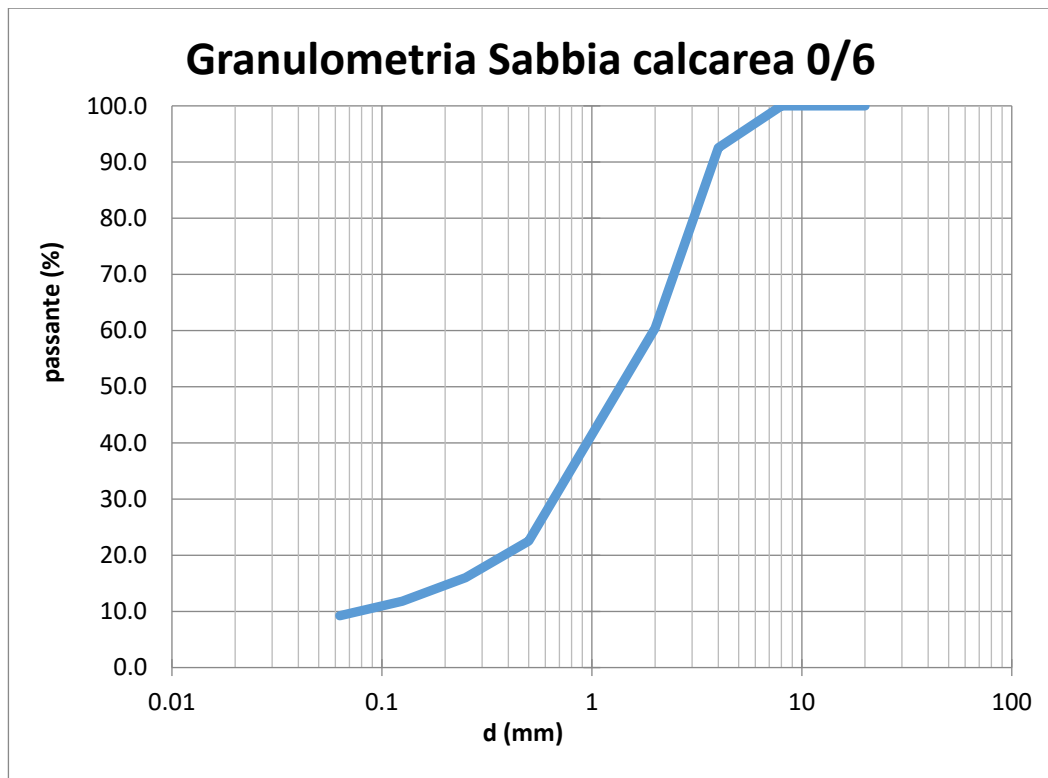


Figura 2.10: Curva granulometrica Sabbia

### 2.2.1.3 Filler industriale di recupero

Il filler è la frazione di aggregato avente dimensioni minori di 0,075 mm secondo la norma CNR 139 (la normativa UNI EN 933-1 invece richiede l'utilizzo del setaccio da 0,063 mm). In realtà sono consentite tolleranze (100% passante al setaccio da 0,18 mm e l'80% passante al setaccio da 0,075 mm). Il filler viene utilizzato nella produzione di conglomerati bituminosi per conferirgli una certa plasticità una volta unito al legante.

<i>APERTURA d (mm)</i>	<i>TRATTENUTO PARZIALE g</i>	<i>PASSANTE CUMULATIVO %P</i>
20	0	100
16	0	100
12,5	0	100
9,5	0	100
8	0	100
6,3	0	100
4	0	100
2	2	99
1	6	96
0,5	9,2	91,4
0,25	10,6	86,1
0,063	33,2	69,5
fondo	139	0
TOTALE	200	

*Tabella 2.11: Filler*



*Figura 2.12: Filler industriale di recupero*

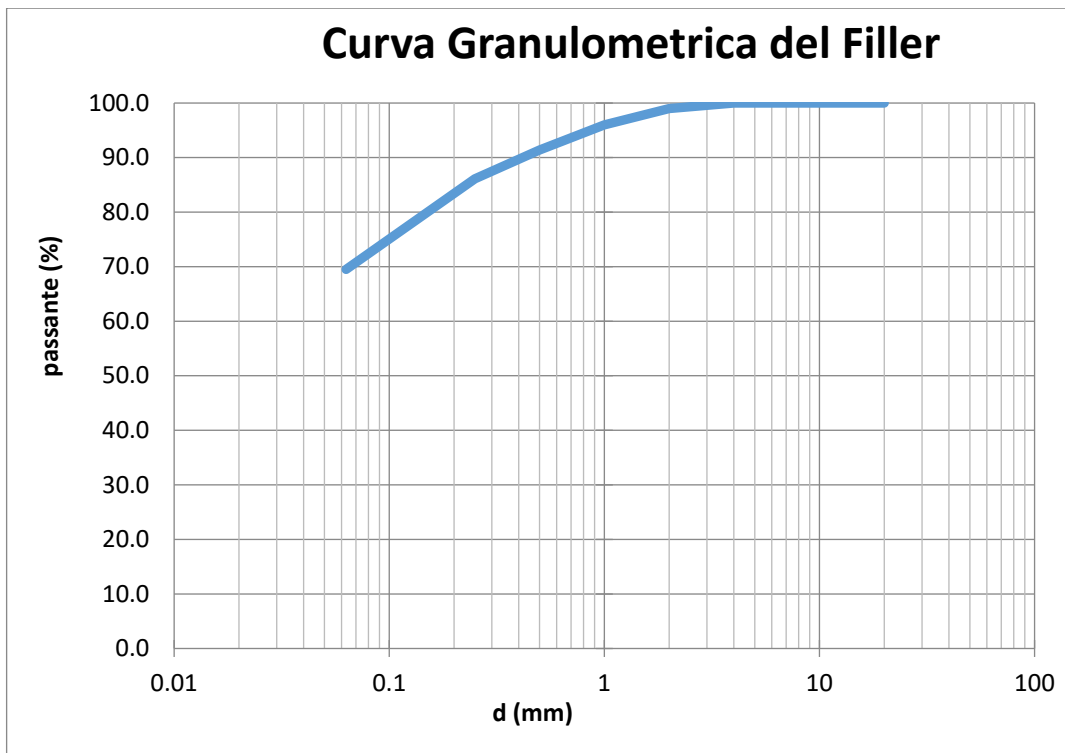


Figura 2.13: Curva granulometrica del Filler

## 2.2.2 Fresato

È un materiale proveniente dalla fresatura degli strati legati di pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Esso è costituito per il 93-97% in peso da aggregati litici e per il resto da bitume invecchiato. Il fresato è stato sottoposto ad una prova di estrazione del bitume invecchiato e successivamente la distribuzione granulometrica dell'aggregato contenuto nel fresato è stata determinata con gli stessi setacci usati con gli aggregati vergini, seguendo la procedura descritta dalla normativa UNI EN 933-1. Si sono ottenute così due pezzature: RAP 8/16 e RAP 0/8.

Si riportano di seguito le caratteristiche granulometriche del RAP (8/16 e 0/8).

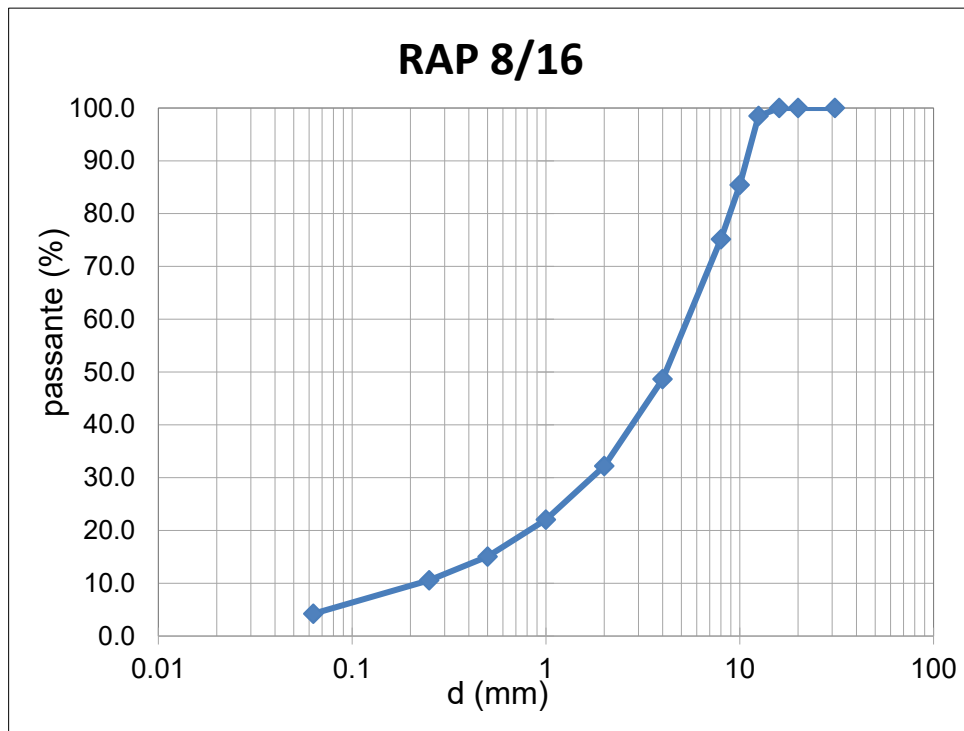


Figura 2.14: Curva granulometrica del RAP 8/16

APERTURA <i>d (mm)</i>	TRATTENUTO PARZIALE <i>g</i>	PASSANTE CUMULATIVO <i>%P</i>
31	0	100,0
20	0	95,3
16	0	100.0
12,5	14.3	98.5
9,5	124	85.4
8	97.5	75.2
4	251.5	48.6
2	156.2	32.2
1	96.1	22.1
0,5	66.5	15.00
0,25	42.6	10.6
0,063	60.1	4.2
fondo	40.10	0
TOTALE	948.9	

Tabella 2.15: RAP 8/16





Figura 2.16: RAP 8/16

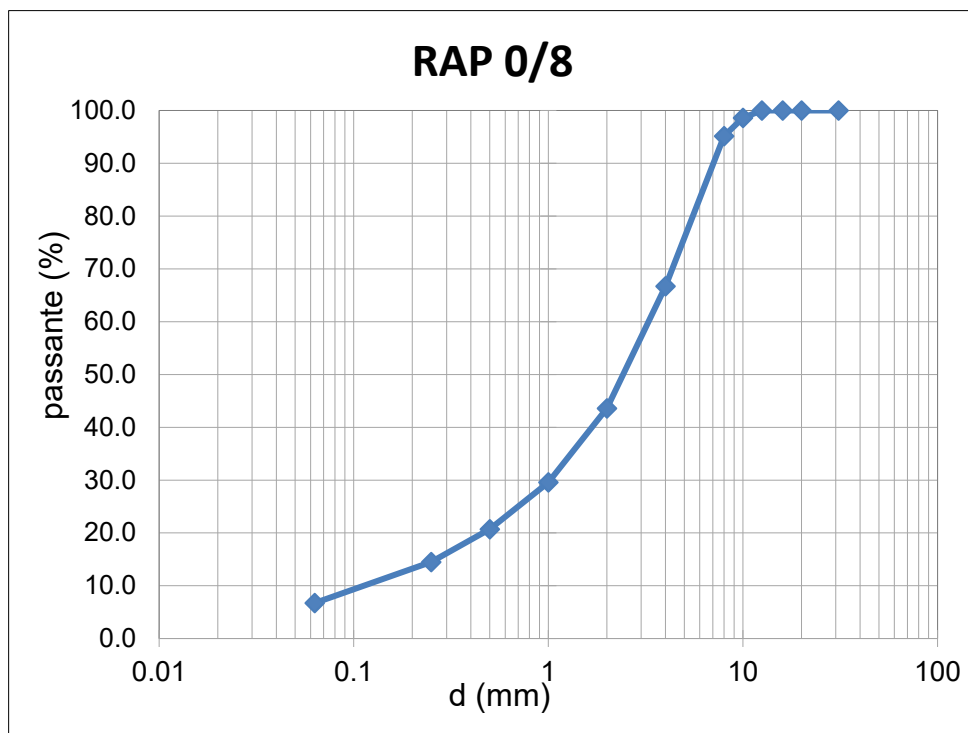


Figura 2.17: Curva granulometrica del RAP 0/8

<i>APERTURA d (mm)</i>	<i>TRATTENUTO PARZIALE g</i>	<i>PASSANTE CUMULATIVO %P</i>
<i>31</i>	<b>0</b>	<b>100</b>
<i>20</i>	<b>0</b>	<b>100,0</b>
<i>16</i>	<b>0</b>	<b>100,0</b>
<i>12,5</i>	<b>0</b>	<b>100,0</b>
<i>10</i>	<b>13.3</b>	<b>98.6</b>
<i>8</i>	<b>32.9</b>	<b>95.1</b>
<i>4</i>	<b>270.7</b>	<b>66.7</b>
<i>2</i>	<b>220.1</b>	<b>43.6</b>
<i>1</i>	<b>133.4</b>	<b>29.6</b>
<i>0,5</i>	<b>84.5</b>	<b>20.7</b>
<i>0,25</i>	<b>59.1</b>	<b>14.5</b>
<i>0,063</i>	<b>73.9</b>	<b>6.7</b>
<i>fondo</i>	<b>64</b>	<b>0</b>
<i>TOTALE</i>	951.9	

*Tabella 2.18: RAP 0/8*



*Figura 2.19: RAP 0/8*



### 2.2.3 Bitume vergine: Vis Breaking e Primario

Per tutta la sperimentazione è stato utilizzato il bitume VIS BRAKING 50/70 mentre il bitume PRIMARIO solo per eseguire le prove FTIR per poterle confrontare tra loro .

La sigla composta da due numeri, in questo caso 50/70, per un bitume viene impiegata per effettuare una caratterizzazione/classificazione del legante basata su prove di carattere empirico normalizzate. Nello specifico la prova da cui si ricavano questi numeri è la prova di penetrazione



Figura 2.20: Bitume 50/70

### 2.2.4 Additivi rigenerati

Gli additivi utilizzati durante la sperimentazione sono del tipo rigenerante, anche se possono presentare caratteristiche aggiuntive, la cui qualità principale risulta essere quella di

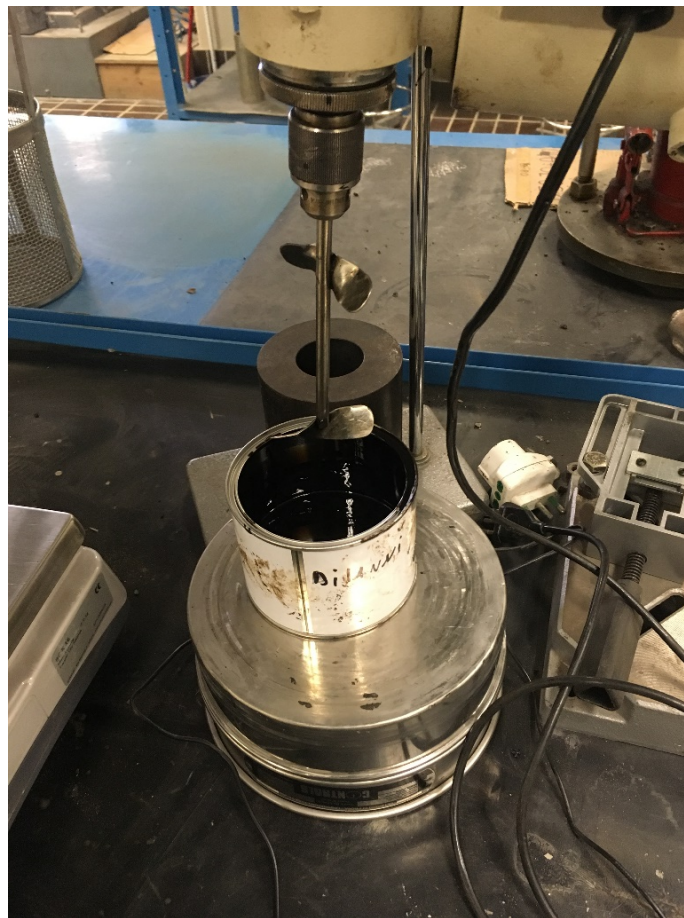
rigenerare il bitume invecchiato come descritto nel capitolo precedente. Sono stati testati 2 diversi tipi di additivi con caratteristiche leggermente differenti fra loro, denominati A e B.

#### 2.2.4.1 Additivo A

L'additivo A è un rigenerante utilizzato per la produzione di miscele bituminose con alte percentuali di fresato. Esso è costituito da componenti chimici che agiscono sia sul bitume invecchiato sia sul bitume vergine ed ha una duplice funzione:

- Rigenerante;
- Promotore di adesione.

Tale additivo viene inserito all'interno del bitume vergine 50/70 per poi essere miscelato



*Figura 2.21: Applicazione dell'additivo A nel bitume*

Di seguito vengono riportate le caratteristiche chimico-fisiche dell'additivo fornito dalla ditta:

Aspetto a 25°C	Liquido
Colore	Marrone scuro
Odore	lieve
Densità a 25°C	950 kg/m <sup>3</sup>
Viscosità a 25°C	50 mPa.s
Punto di Infiammabilità	> 200°C
Punto di Ebollizione	> 250°C

Figura 2.22: Caratteristiche chimico-fisiche dell'additivo A

#### 2.2.4.1 Additivo B

L'additivo B è un additivo liquido che mobilita il legante invecchiato di pavimentazione in asfalto rigenerato (RAP). Ciò migliorerà la termica e resistenza alla fessurazione per fatica della pavimentazione contenente RAP e consentirà l'utilizzo di una maggiore quantità di RAP in una miscela di asfalto. Un contenuto di RAP più elevato migliora la resistenza all'ormaiamento di un mix riducendo il consumo di materiale vergine.

L'additivo migliora la sensibilità all'acqua rispetto al RAP non trattato e riduce la viscosità.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche chimico-fisiche dell'additivo:

SPECIFICATIONS*		
Acid Value (mg KOH/g)	Max 15	
Kinematic Viscosity at 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	40-46	
Color (Gardner)	Max 8	
TYPICAL PROPERTIES*		
Flash Point (°C)	>295	
Dynamic Viscosity at 25°C (mPa.s)	71	
Kinematic viscosity (mm <sup>2</sup> /s)	-20°C	1615
	0°C	355
	20°C	98
	40°C	43
	100°C	9
Density (ton/m <sup>3</sup> )	0.93	
Appearance	Clear and bright, yellow to amber	

Figura 2.23: Caratteristiche chimico-fisiche B

Tale additivo è applicato attraverso l'utilizzo di una pistola a pressione d'aria come rappresentato in figura:



*Figura 2.24: Applicazione dell'additivo B*

## 2.3 Apparecchiature e protocolli di prova

Nel presente paragrafo vengono rappresentate nel dettaglio tutte le apparecchiature e le procedure di laboratorio per la preparazione e la valutazione delle miscele di conglomerato bituminoso prodotte con il fresato e l'aggiunta degli additivi, riportando, per completezza, anche il metodo di confezionamento dei provini.

### 2.3.1 Definizione delle curve granulometriche di progetto

La ricetta granulometrica di progetto utilizzata è stata studiata attraverso le specifiche dettate dal Capitolato Anas. Esso impone che la curva granulometrica ottenuta variando le percentuali delle varie pezzature di aggregati sia contenuta all'interno di un fuso granulometrico delimitato da una curva superiore e una inferiore. Esso è utilizzato in modo da combinare le varie classi di inerti per ottenere una curva che consenta l'addensamento ottimale del conglomerato bituminoso. Per lo strato di binder il Capitolato Anas prescrive il seguente fuso:

<i>Capitolato ANAS Binder</i>		
<i>Apertura [mm]</i>	<i>Pmin</i>	<i>Pmax</i>
20	100	100
16	90	100
12,5	66	86
8	52	72
4	34	54
2	25	40
0,5	10	22
0,25	6	16
0,063	4	8
<i>% bit (sul mix)</i>	4,1	5,5

*Tabella 2.25: Fuso granulometrico ANAS adottato*

Conoscendo le curve granulometriche dei singoli inerti utilizzati e considerato i limiti del fuso granulometrico, si è potuta determinare la curva di progetto mediante il calcolo su un foglio Excel e ricavare le percentuali in peso di aggregato da inserire. Da qui si sono calcolate le quantità in grammi.

Di seguito vengono riportate le miscele realizzate con diversi contenuti di RAP.

### 2.3.1.1 Miscela con 00\_RAP

Il primo conglomerato è stato realizzato con 0% di RAP e quindi con soli aggregati vergini.

<i>Apertura setaccio [mm]</i>	<i>Filler</i>	<i>Sabbia</i>	<i>Calcare 4/8</i>	<i>Calcare 6/12</i>	<i>Calcare 12/16</i>	<i>00RAP</i>
31,5	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	100	100	100,0	99,7	10,6	77,6
10	100	100	100,0	77,1	0,0	69,2
8	100	100	99,4	38,8	0,0	59,6
6,3	100	100	87,8	5,7	0	51,3
4	100	92,5	22,4	2,1	0,0	46,9
2	99	60,4	3,2	1,7	0,0	31,7
1	96		1,8	1,7	0	
0,5	91,4	22,5	1,6	1,6	0,0	13,7
0,25	86,1	16,0	1,6	1,6	0,0	10,5
0,125		11,8		1,6	0,0	
0,063	69,5	9,2	0,6	1,6	0,0	6,8
<i>% volume</i>	3,0	46,9	0,0	25,1	25,0	100,0

*Tabella 2.26: Determinazione della miscela di progetto per 00RAP*



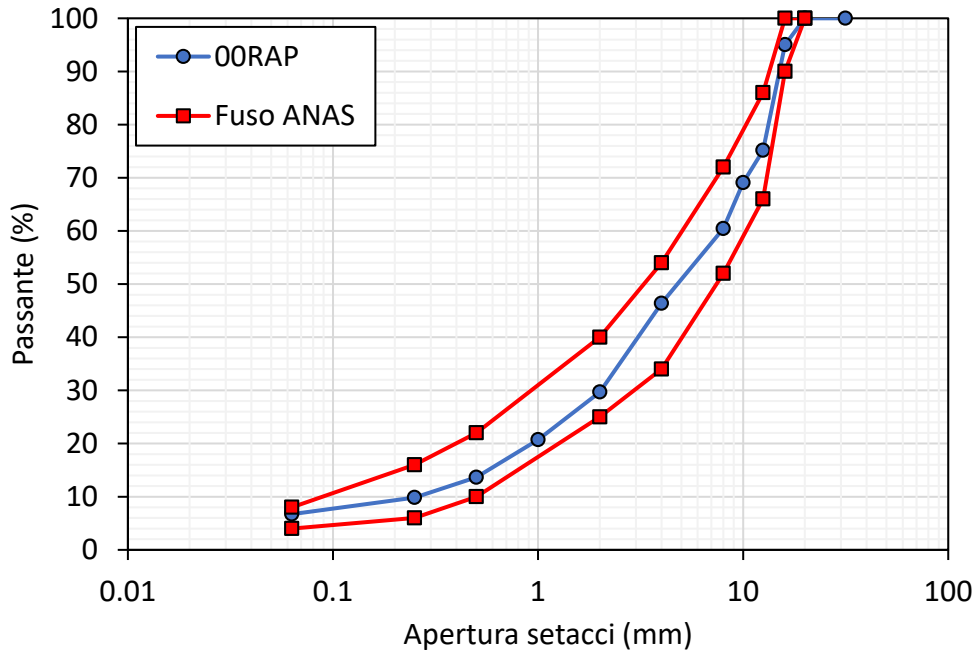


Figura 2.27: Fuso granulometrico ANAS e curva granulometrica per 00\_RAP

### 2.3.1.2 Miscela con 50\_RAP

Per quanto riguarda le miscele con il 50% di RAP, è stato eseguito un mix design.

Si riportano le tabelle delle percentuali in peso per il RAP (Tabella 2.12):

	Filler	Sabbia	Calcare 4/8	Calcare 6/12	Calcare 12/16	RAP 8/16	RAP 0/8	50RAP
31,5	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	100	100	100,0	99,7	10,6	98,5	100,0	78,2
10	100	100	100,0	77,1	0,0	85,4	98,6	70,5
8	100	100	99,4	38,8	0,0	75,2	95,1	63,8
6,3	100	100	87,8	5,7	0,0			
4	100	92,53	22,4	2,1	0,0	48,6	66,7	45,5
2	99	60,42	3,2	1,7	0,0	32,2	43,6	31,0
1	96		1,8	1,7	0,0			
0,5	91,4	22,54	1,6	1,6	0,0	15,0	20,7	15,5
0,25	86,1	15,99	1,6	1,6	0,0	10,6	14,5	11,7
0,125	79,2	11,82	0,0	1,6	0,0			
0,063	69,5	9,23	0,6	1,6	0,0	4,2	6,7	6,6
% volume	3,4	12,5	0,0	9,1	23,1	19,2	28,8	96,1

Tabella 2.28: Determinazione della miscela di progetto per 50\_RAP

### 2.3.2 Miscelazione e compattazione dei provini – Pressa a taglio giratoria – UNI EN 12697-31)

Dopo aver pesato le quantità delle varie pezzature di aggregati con l'utilizzo di un'apposita bilancia di precisione (Figura 2.29), si dispone il materiale in apposite teglie (dividendo aggregati vergini, filler e fresato) e lo si riscalda in forno (Figura 2.30) alla temperatura di 140 C° o 170 C° (in base alla miscela che si sta studiando) per 1 ora, in modo da eliminare l'umidità e raggiungere la temperatura di miscelazione.

- Anche il bitume scelto viene inserito nel forno alla stessa temperatura, per un tempo necessario affinché diventi liquido (circa 60 minuti). Viene scaldata una quantità maggiore rispetto a quella necessaria (620 g per lo 00RAP e 400g per il 50RAP) per via della possibilità che il bitume rimanga attaccato ai bordi del barattolo e che non possa bastare.



*Figura 2.29: Bilancia di precisione*

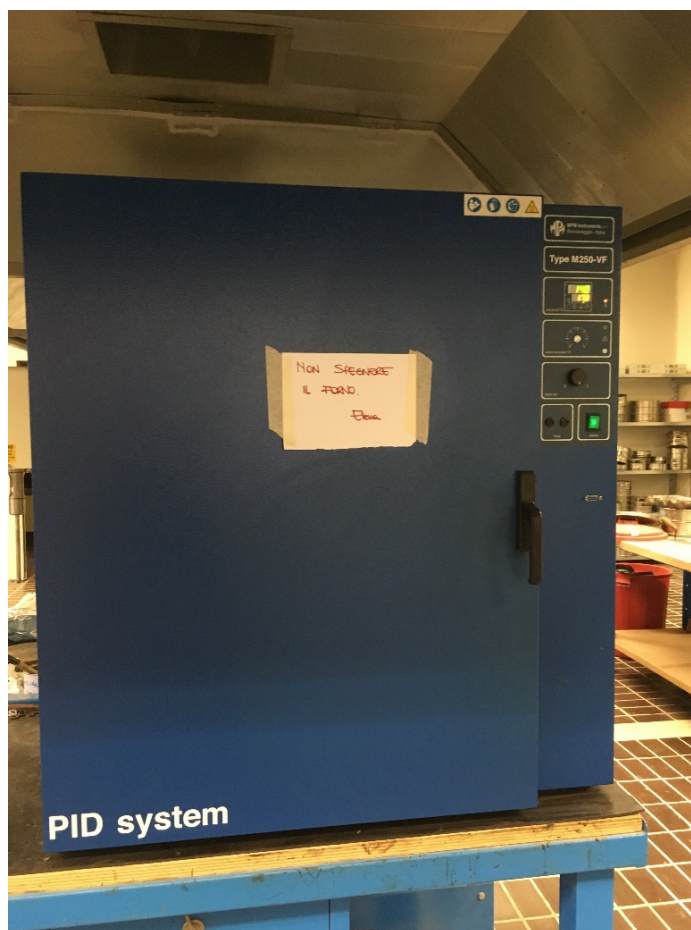


Figura 2.30: Forno

In alcune miscele è previsto l'aggiunta dell'additivo, di conseguenza, mezz'ora prima della miscelazione si aggiunge l'additivo A all'interno della lattina contenente il bitume vergine. L'additivo viene disperso nel legante già riscaldato mediante un miscelatore che viene fatto agire per 5-6 minuti.

Il dosaggio utilizzato viene valutato in percentuale sulla quantità di bitume prevista dal mix design: per gli additivi A esso corrisponde al 9% sul bitume totale (vergine e proveniente dal fresato), mentre il B è stata utilizzata una percentuale pari del 6%. L'effettiva quantità in grammi inserita viene valutata effettuando un'ulteriore proporzione rispetto ad una quantità leggermente maggiore rispetto a quella necessaria per l'impasto, per il fatto che parte del legante aderisce alle pareti del barattolo e non scola. Dopo la miscelazione bitume-additivo, la lattina è tenuta nuovamente in forno per un'altra mezz'ora, per far sì che al momento della miscelazione il legante sia il più fluido possibile.

Successivamente le varie componenti della miscela vengono inserite nel seguente ordine nel recipiente dell'impastatrice meccanica:

- Inerti calcarei (Calcare 6/12, Calcare 12/16, Sabbia calcarea) più fresato (8/16 e 0/8);



- Bitume (con o senza additivo);
- Filler.

Dopo ogni aggiunta vengono attivate le pale meccaniche del macchinario che consentono di ottenere un impasto più omogeneo: la pala centrale ruota su se stessa, mentre quella perimetrale percorre la circonferenza del recipiente. Il macchinario, in particolare l'unità in cui avviene la miscelazione, sono stati portati precedentemente alla temperatura di 170°C o 140°C e mantenuti caldi per facilitare l'esecuzione dell'operazione e per non creare uno shock termico con il materiale caldo. Particolare attenzione deve essere fatta per l'inserimento della corretta quantità di bitume. E' necessario infatti procedere volta per volta valutando con una bilancia esterna al macchinario la quantità aggiunta. La fase di miscelazione ha una durata che dipende dal raggiungimento del corretto rivestimento degli aggregati.



*Figura 2.31: Impastatrice con all'interno il conglomerato*

Una volta terminata questa fase, si divide il materiale in 8 pesate da 1080g ciascuna e disposto in 8 teglie diverse. Esse vengono poi inserite nuovamente nel forno alla temperatura di 170°C o 140°C per ottenere una temperatura omogenea della miscela e per simulare la fase di trasporto che avviene dall'impianto fino al sito di stesa.

L'impasto viene tenuto nel forno ad intervalli di tempo crescenti, in modo da valutare l'efficacia degli additivi rigeneranti all'aumentare del tempo tra miscelazione (che avviene nell'impianto) e stesa (rappresentata dalla compattazione mediante la pressa di taglio giratoria). Quindi per ogni miscela sono stati compattati 6 provini secondo il seguente ordine temporale:

- 1° e 2° provino dopo 30 minuti dalla miscelazione;
- 3° e 4° provino dopo 90 minuti dalla miscelazione;
- 5° e 6° provino dopo 180 minuti dalla miscelazione.



*Figura 2.32: Conglomerato pronto per la compattazione*

Il confezionamento dei provini è stato realizzato mediante la pressa a taglio giratoria, macchinario introdotto alla fine degli anni '50. Essa è composta da un telaio di carico al cui interno sono inseriti un supporto inclinabile, dove verrà inserita la fustella, un pistone di carico che permette l'applicazione del carico verticale, e una base rotante. È dotata inoltre di un sistema di acquisizione e controllo dei dati dal quale è possibile impostare, tra le altre cose, il tipo di prova, cioè se a numero di giri imposto o ad altezza imposta, la pressione (600 kPa) e il diametro della fustella. Tutto l'apparato è collegato ad un pannello di controllo che registra l'andamento dell'altezza del provino ad ogni giro.

La prova si svolge innanzitutto mettendo il materiale all'interno di una fustella del diametro di 100 mm che poi viene inserita all'interno del telaio di carico. La fase di preparazione di ogni singola fustella, riscaldata precedentemente in forno a 170°C, prevede che si inserisca in essa una piastra di base ed un dischetto di carta-filtro per evitare l'adesione del provino alla piastra

stessa. Riempita la fustella con la quantità di impasto necessaria a raggiungere il peso prestabilito (1200g), si ripone un dischetto di carta-filtro con su scritto il nome del provino (ad es. 50\_RAP/3%\_LowTherm RAP-1) e, a seguire, la piastra superiore. La fustella è pronta e si può procedere alla compattazione tramite pressa giratoria.

A questo punto la fustella viene inserita all'interno della camera di prova, ruotandola leggermente fino ad incontrare l'apposito contrasto posto alla sua base e, tramite il pannello di controllo, si setta il macchinario con precise impostazioni. In questa sperimentazione è stato utilizzato il metodo di compattazione a numero di giri imposti:

- Pressione: 600 KPa;
- Diametro della piastra: 100 mm;
- Numero di giri: 100.

Eseguito il "setting", è possibile dare inizio alla prova premendo il tasto START.

Fatto ciò, il pistone inizia a scendere fino ad imprimere la pressione desiderata (600 kPa). Dopo questa fase, i sostegni laterali si alzano facendo inclinare la fustella, per poi iniziare a ruotare. Con l'ausilio di una tabella prestampata, si registrano le altezze del provino a 1, 5, 10, 25, 50, 100 giri.

Raggiunto il numero di giri pre-impostato, il macchinario va in modalità "self-parking": il pistone risale dando, perciò, la possibilità di estrarre la fustella con all'interno il provino compattato. Si conclude con l'estrazione del provino mediante martinetto idraulico che lo solleva dal basso verso l'alto, provocandone la fuoriuscita (Figura 2.33).



Figura 2.33: Pressa a taglio giratoria, fustella con  $d=100$  mm, provino compattato

### 2.3.3 Determinazione delle proprietà volumetriche

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 2.34:

- Inerti;
- Legante;
- Vuoti.

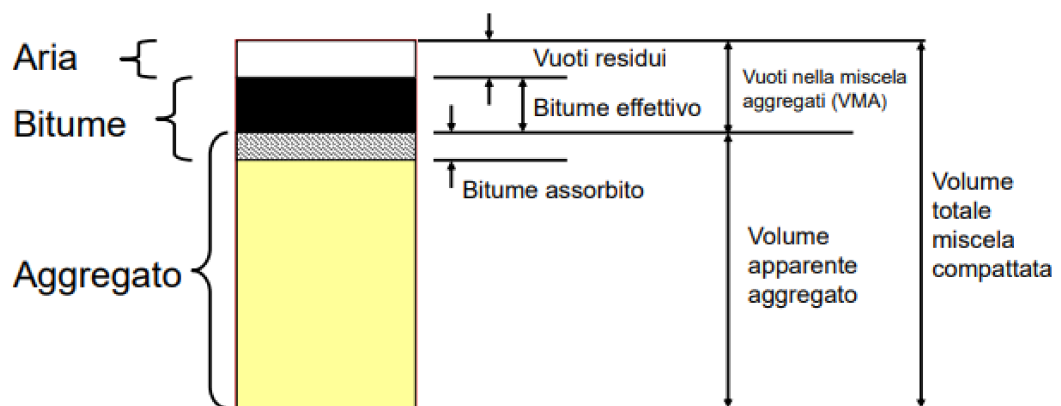


Figura 2.34: schema che evidenzia i rapporti quantitativi dei principali costituenti del conglomerato



In questo paragrafo si elencano i metodi per il calcolo volumetrico del provino utilizzati nella presente sperimentazione, che ha rispettato la procedura seguente:

**1) Massa volumica apparente metodo dry (UNI EN 12697-6)**

Questa modalità di prova consiste in una serie di pesate e calcoli del volume tramite pesate in aria e in acqua, sfruttando il principio di Archimede. Nella pesata idrostatica si utilizza una bilancia con l'ausilio di un cestello a filo, attraverso la quale si determina la massa e lo spostamento d'acqua mediante taratura, con una precisione di almeno 0,1 g. Secondo la norma il bagno d'acqua deve essere mantenuto ad una temperatura uniforme con una tolleranza di 1° C e deve possedere una capacità di almeno tre volte superiore al volume del campione



*Figura 2.35: Pesata idrostatica*

La procedura di determinazione della massa volumica viene elencata direttamente dalla norma:

- determinare la massa del provino secco tramite pesata in aria;
- misurare la temperatura del bagno d'acqua



Figura 3.36: Misurazione dell'acqua della pesata idrostatica

- determinare la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova (attraverso l'ausilio della tabella sotto riportata):

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

Figura 3.37:: Tabella delle caratteristiche dell'acqua in base alla temperatura

- Determinare la massa del campione (fuori dall'acqua)
- immergere il provino nel bagno d'acqua, cercando di fermare le oscillazioni della bilancia delicatamente con una mano e leggere il valore della massa del provino subito dopo che l'acqua risulta in quiete.

La formula utile al calcolo matematico è:

$$\rho_{b,sea} = \frac{m_1}{\frac{m_2 - m_3}{\rho_w} - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}}$$

dove:

$\rho_{b,sea}$  è la massa volumica sigillata, espressa in megagrammi per metro cubo [Mg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>];

$m_1$  è la massa del campione secco, espressa in grammi [g];

$m_2$  è la massa del campione sigillato a secco, in grammi [g];

$m_3$  è la massa del campione sigillato in acqua, espressa in grammi [g];

$\rho_w$  è la densità dell'acqua alla temperatura di prova [Mg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>];

$\rho_{sm}$  è la densità del materiale di tenuta alla temperatura di prova [Mg/m<sup>3</sup> oppure g/cm<sup>3</sup>].

## 2) Determinazione della massa volumetrica apparente (UNI EN 12697-6)

Si definisce massa volumica apparente 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 D (procedura geometrica) in accordo con la normativa UNI EN 12697-6.

La procedura D 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.

## 3) Determinazione del volume dei vuoti (UNI EN 12697-8)

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:

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

### 2.3.4 Prova di modulo a trazione indiretta (UNI EN 12697-26)

In questa sperimentazione per la misurazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta è stata utilizzata l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester). In linea generale essa consente di applicare un carico di compressione in una direzione e di misurare la deformazione tramite trasduttori nella direzione ruotata di  $90^\circ$  rispetto a quella di applicazione del carico. La determinazione del modulo di rigidezza con il NAT avviene mediante una prova di trazione indiretta ripetuta. Nel corso della sperimentazione, le prove di modulo sono state eseguite secondo quanto stabilito dalla rispettiva normativa UNI EN 12697-26 con modalità a deformazione controllata.

Le prove devono essere eseguite su almeno due diametri del provino (con un angolo tra i due diametri di  $90^\circ \pm 2^\circ$ ).

Attraverso il software dell'apparecchiatura è possibile controllare in maniera automatica tutte le variabili in gioco: il tempo di picco (rise time), il carico fissato, la deformazione di target fissata (in questo caso  $2 \mu\text{m}$ ) o il carico imposto, il coefficiente di Poisson, la temperatura di prova.

Il controllo di tali grandezze avviene tramite un sistema di gestione che opera in maniera da effettuare una taratura durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Gli impulsi di condizionamento servono anche ad assestare il carico sulla superficie del campione. Le specifiche condizioni di prova rendono lecita l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare, assumendo valide anche le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo. Nella prova di trazione indiretta ripetuta, il modulo del campione è funzione della sua stessa geometria, della deformazione orizzontale, del rise time, della temperatura di prova e del coefficiente di Poisson.

In Figura 2.38 è riportato lo stato di sollecitazione a cui è sottoposto il provino durante la prova di trazione indiretta.



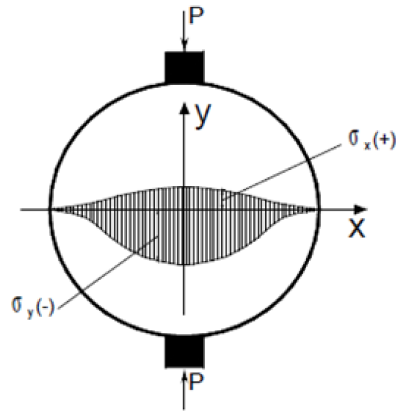


Figura 2.38: Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova a trazione indiretta

In corrispondenza del diametro orizzontale le sollecitazioni medie e massime nelle direzioni x (trazione) ed y (compressione) sono date 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 di tale distribuzione teorica delle sollecitazioni può essere rappresentata in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato biassiale di tensioni. 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:

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

Sostituendo le espressioni ricavate per le tensioni medie 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 ottiene:

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

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

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

La versione del software utilizzata fornisce anche un valore di modulo corretto da un fattore AF (Adjustment Factor), che tiene conto della forma dell'onda di carico impostata. Qualora il rapporto tra l'area sottesa dalla curva di carico e quella data dal prodotto del rise-time per il carico di picco non sia pari a  $0,60 \pm 0,10$ , viene proposta una correzione al modulo ricavato attraverso la seguente equazione:

$$E' = E[1 - 0,322(\log(E) - 1,82)(0,60 - k)]$$

dove:

- $E'$  è il modulo di rigidezza aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa;
- $k$  è il rapporto tra le aree;
- $E$  è il modulo di rigidezza in MPa.

Affinché la prova possa essere considerata correttamente eseguita, si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibile, i tempi di picco intorno ad una tolleranza di  $\pm 4$  ms ed una deformazione di  $5,0 \pm 0,2$   $\mu\text{m}$ . Le variabili che maggiormente influenzano la determinazione del modulo sono:

- *temperatura*: affinché sia valida la formula per il calcolo del modulo  $E$ , occorre che quest'ultimo risulti uguale sia a compressione che a trazione. Questa affermazione può essere considerata vera solo per temperature sotto i  $25^\circ\text{C}$ . In questo studio le prove di modulo sono state eseguite alla temperatura di  $20^\circ\text{C}$ ;
- *rise-time (tempo di picco)*: a causa della natura viscoelastica del legante, la risposta meccanica dei conglomerati dipende fortemente dal tempo di applicazione del carico. In particolare, il rise-time, in prove di carico di tipo impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante di raggiungere il valore massimo come mostra la Figura 2.39.

Una variazione del tempo di picco su una prova di tipo impulsivo crea, sulla rigidezza del conglomerato, gli stessi effetti di una variazione della frequenza di carico su una prova di tipo ciclico (sinusoidale).

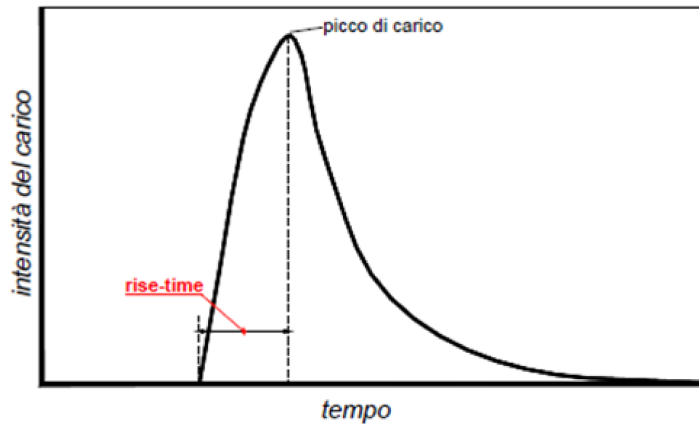


Figura 2.39: Rappresentazione del rise-time di un impulso di carico

La relazione che lega la frequenza di carico (espressa in Hz) con il tempo di picco (in ms) è la seguente:

$$f = \frac{1000}{4 \cdot r_i}$$

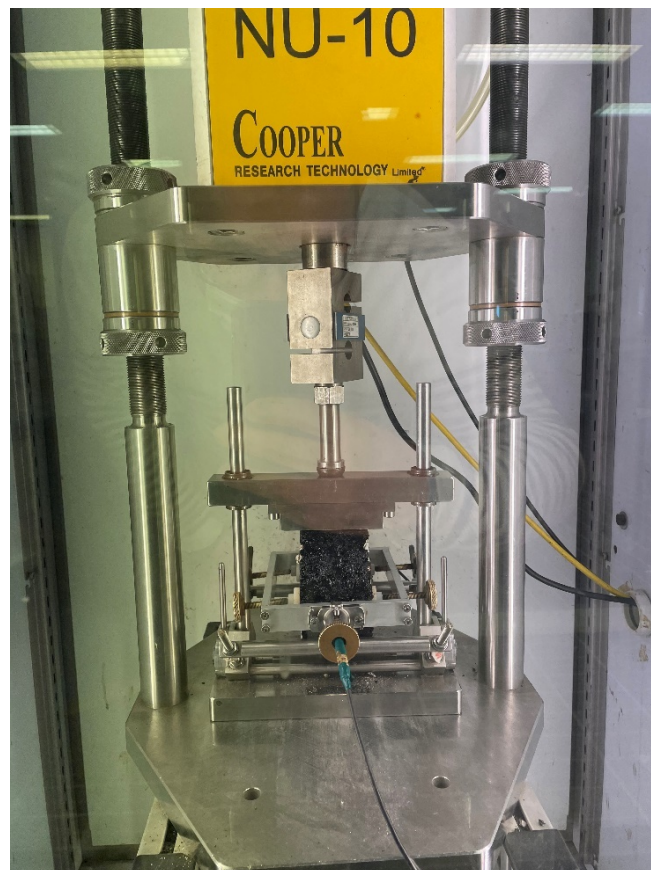
In questa campagna sperimentale il rise-time è stato mantenuto costante e pari a 124 ms.

- *deformazione orizzontale imposta:* a causa del comportamento non lineare, le proprietà meccaniche del conglomerato dipendono dal livello di deformazione imposta durante la prova. Nel caso in esame, le prove sono state effettuate imponendo una deformazione pari a 2  $\mu\text{m}$ ;
- *numero di colpi di condizionamento iniziale:* si è già visto come, attraverso un sistema di gestione ed acquisizione dati, sia possibile operare una taratura durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Tali impulsi servono anche ad assestare le strisce di carico sulla superficie del campione. Per ottenere valori di rigidezza affidabili è necessario scegliere accuratamente il numero di colpi per il condizionamento iniziale. Utilizzando un basso numero di colpi si favoriscono tempi di prova più brevi, ma a discapito di misurazioni affidabili. Il BSI (British Standard Institute) suggerisce un numero di colpi di condizionamento pari a 5, ma da indagini sperimentali si è visto come questo numero di colpi non sia da ritenere sufficiente.

Pertanto nella presente sperimentazione, tutte le prove sono state eseguite dopo 10 colpi iniziali di condizionamento.

Il NAT è posto all'interno di una camera climatica che permette il raggiungimento e il mantenimento della temperatura di prova. La misurazione della temperatura all'interno della camera avviene tramite un apposito termometro a sonda collegato con un display digitale posto sul pannello superiore della macchina.

Il primo elemento che viene illustrato nel dettaglio è la cella di carico che supporta un carico massimo pari a 20 kN a cui subito sotto è collegato il pistone che permette l'applicazione del carico alla testa di carico posta a contatto con il provino. Tale cella di carico è collegata al computer che la controlla e ne registra i dati.



*Figura 2.40: Cella di carico del NAT con al di sotto il castelletto contenente il provino*

La misurazione della deformazione nella direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico avviene tramite dei trasduttori che, collegati al computer, consentono di rilevare con estrema precisione ogni minimo spostamento. Per il montaggio dei trasduttori in posizione corretta, si utilizzano due strumenti illustrati in figura 2.41. In tale illustrazione si possono notare i trasduttori (2) che vengono inseriti nei loro appositi fori, le viti che consentono di

mettere in posizione corretta i trasduttori (1), il telaio al cui interno va posto il provino da testare (3), i morsetti di fissaggio che collegano il provino al telaio (4), il canale che permette il centramento del provino (5), le barre che permettono di posizionare i trasduttori a metà del provino (6), le viti che tengono in posizioni tali barre (7) ed infine la leva che permette di abbassare il supporto al telaio che sostiene i trasduttori (8).

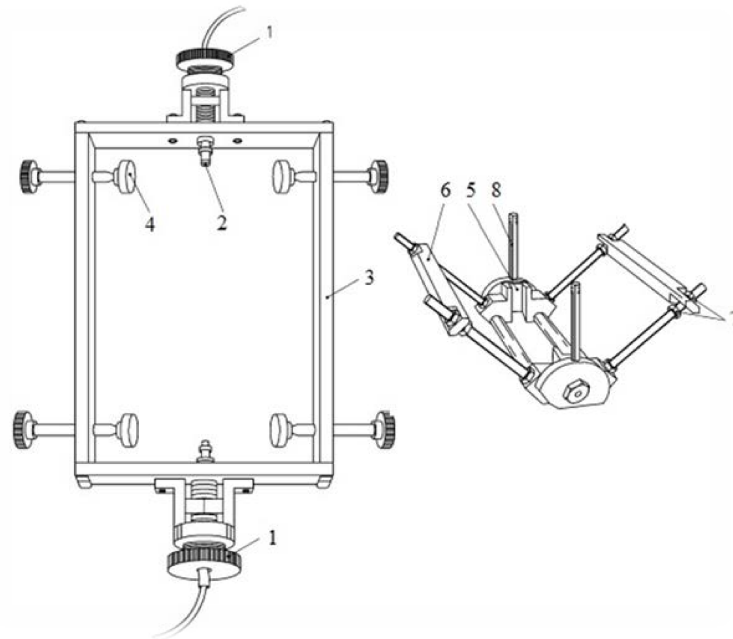


Figura 2.41: Componenti del castelletto

Prima di iniziare la procedura atta alla realizzazione del test, l'altezza dei provini sono state misurate tramite calibro con una precisione non inferiore a 0,1 mm, in quanto l'altezza finale derivante dal compattatore giratorio risulta essere imprecisa. Per tale dato, si è misurata l'altezza su quattro punti, e si è presa come altezza del provino da testare la media dei quattro valori misurati.

In accordo alla norma UNI EN 12697-26, i provini da testare sono stati condizionati termicamente alla temperatura di prova desiderata, per un tempo sufficiente a raggiungere la tale anche all'interno del provino con una differenza tra centro e superficie esterna non maggiore di 0,4 °C.

Si illustra ora in dettaglio come è stata effettuata la misurazione del modulo a trazione indiretta. Innanzitutto, è stato usato un software grazie al quale è possibile il controllo di tutte le fasi della prova. La schermata iniziale del software è quella indicata in figura 2.42.

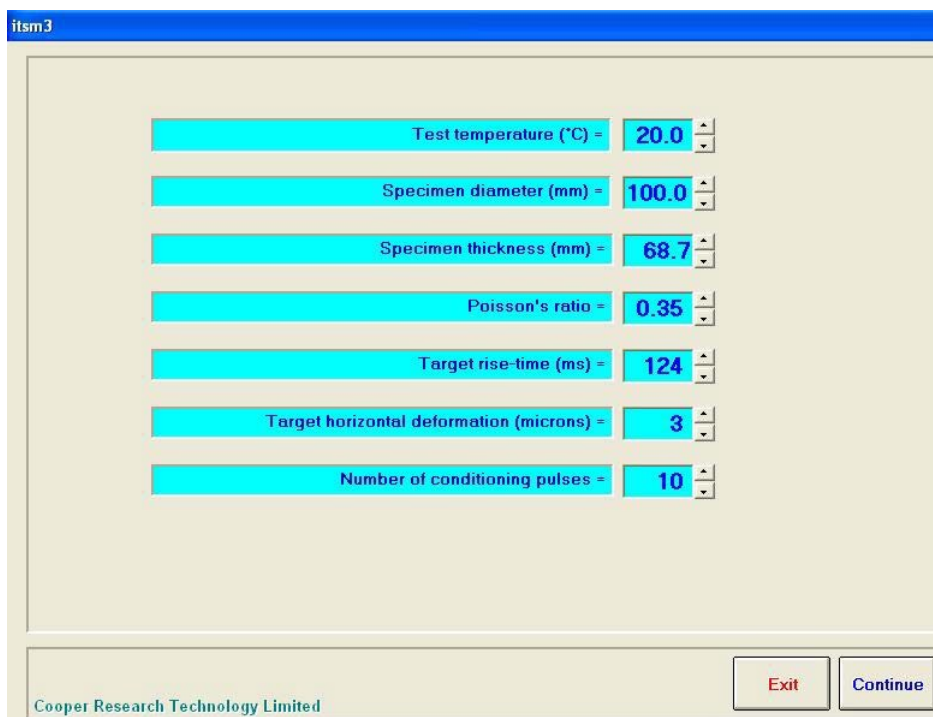


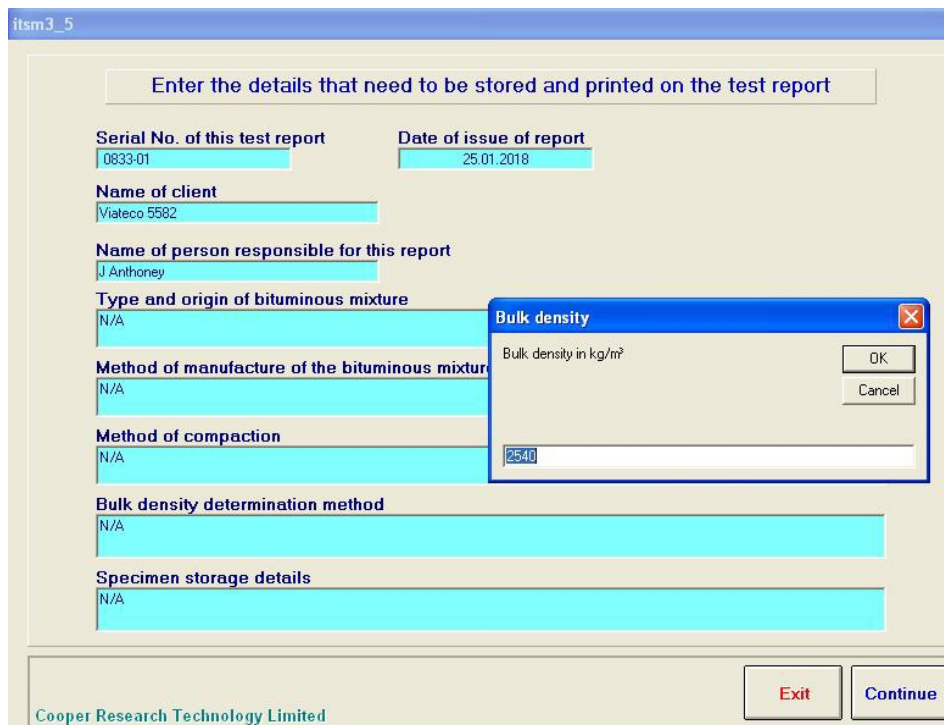
Figura 2.42: Schermata iniziale del software ITSM con dati input

La prima fase di prova consiste quindi nell'inserimento dei dati relativi al provino da testare all'interno del software. Come si può notare dalla figura precedente vanno inseriti i seguenti parametri:

- Test Temperature [°C]: temperatura alla quale viene effettuata la prova;
- Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test;
- Specimen Thickness [mm]: altezza del provino sottoposto a test;
- Poisson's Ratio: modulo di Poisson. Come definito dalla norma, in mancanza di una sua specifica misurazione è assunto pari a 0,35;
- Target Rise-Time [ms]: tempo in ms che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario a raggiungere la deformazione indicata;
- Target horizontal Deformation [ $\mu\text{m}$ ]: deformazione che la macchina deve far raggiungere al provino;
- Number of Conditioning Pulses : numero di impulsi di pre-carico, ovvero impulsi utili alla macchina ad auto-calibrarsi per far raggiungere al provino una deformazione di 2  $\mu\text{m}$ .

Nella finestra più piccola in alto a destra va invece inserita la denominazione del provino, cioè il nome di riferimento che comparirà nel rapporto finale.

Dopo aver inserito i dati appena elencati con un clic del mouse su Continue si passa alla schermata visualizzata in Figura 2.40, dove vanno inseriti i dati del provino riguardanti la data di effettuazione del test, l'addetto che lo esegue, il metodo di produzione del campione, ecc. Questi dati sono utili solo alla stesura del rapporto di prova.



The screenshot shows a software window titled 'itrm3\_5' with a header 'Enter the details that need to be stored and printed on the test report'. The form contains the following fields:

Serial No. of this test report	Date of issue of report
0833-01	25.01.2018

Other fields include:

- Name of client: Viateco 5582
- Name of person responsible for this report: J. Anthony
- Type and origin of bituminous mixture: N/A
- Method of manufacture of the bituminous mixture: N/A
- Method of compaction: N/A
- Bulk density determination method: N/A
- Specimen storage details: N/A

A 'Bulk density' dialog box is open, showing 'Bulk density in kg/m³' with a text input field containing '2540'. The dialog has 'OK' and 'Cancel' buttons. At the bottom of the main window are 'Exit' and 'Continue' buttons, and the text 'Cooper Research Technology Limited'.

Figura 2.43: Seconda schermata

La schermata successiva a cui si arriva tramite il clic sempre su Continue è quella di figura 2.44. Essa è utile al controllo del pistone pneumatico; infatti una volta che il provino è stato montato sull'apposito "castelletto" con la relativa barra di carico posta al di sopra, si deve portare a contatto con essa il pistone che permette l'applicazione del carico. Questa operazione è effettuata automaticamente dal software, cliccando sul pulsante *Make Contact* infatti, il pistone si porta a contatto applicando sul provino una forza di pre-carico pari a circa 30 N.

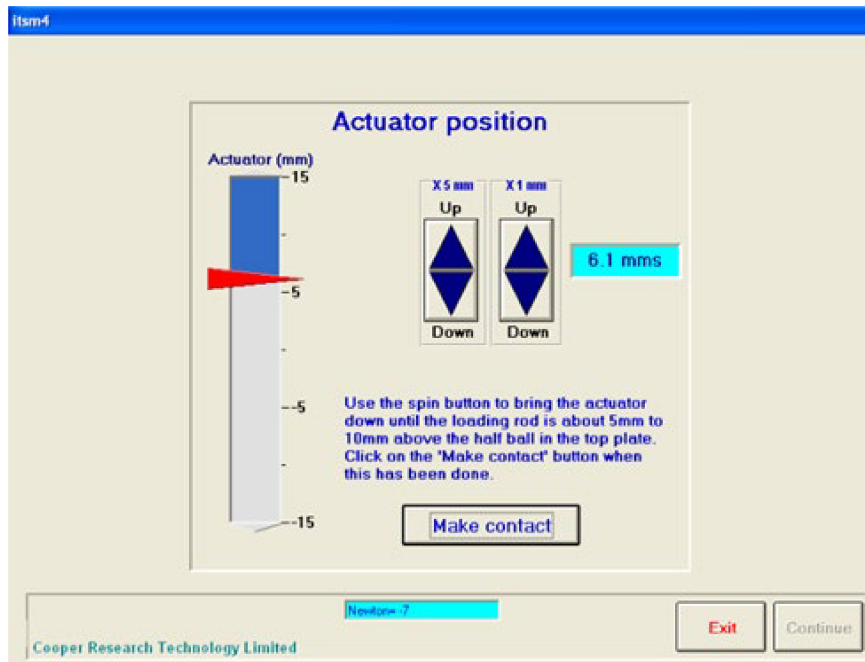


Figura 2.44: Schermata con il comando "Make contact"

Successivamente viene visualizzata la schermata di Figura 2.45, utile al controllo dei trasduttori. Essi infatti vanno regolati finché le due frecce diventano rosse come in Figura 2.46, a quel punto significa che i trasduttori sono in grado di misurare correttamente la deformazione. Se i trasduttori non fossero così regolati la macchina misurerebbe una deformazione che non è quella reale del provino, questo porta ad una errata applicazione del carico, in quanto si avrebbe un'auto-calibrazione errata e quindi il risultato del test verrebbe falsato.

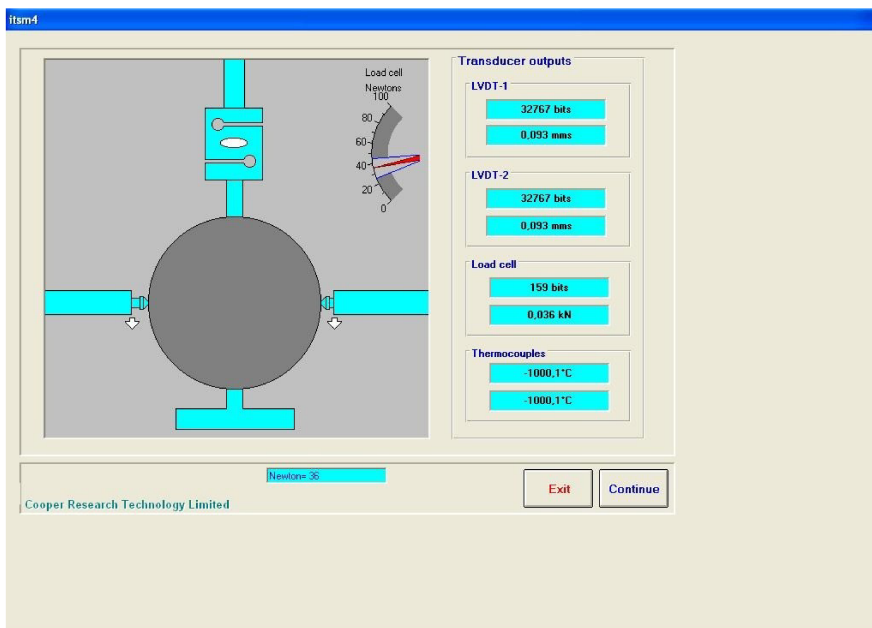


Figura 2.45: Schermata prima della regolazione dei trasduttori



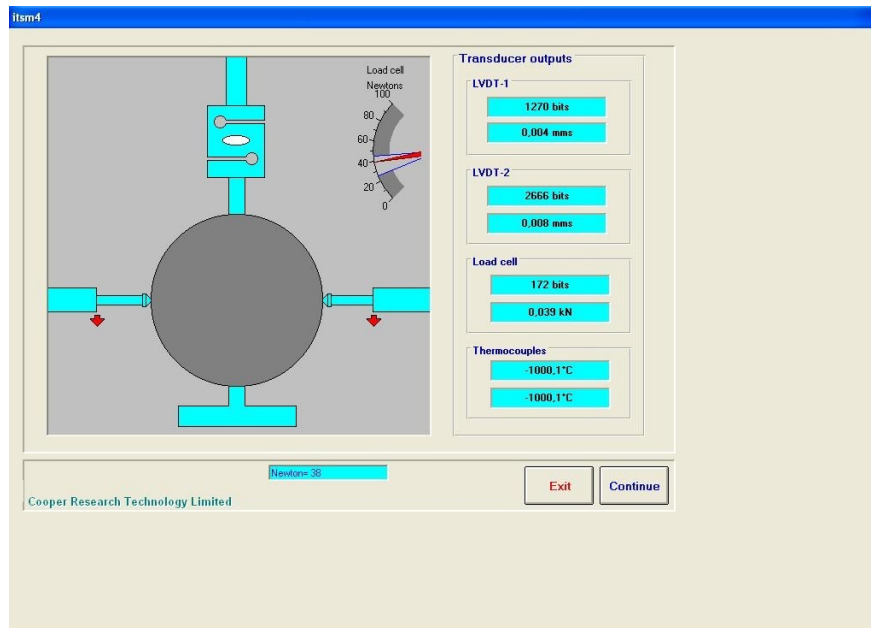


Figura 2.46: Schermata dopo la regolazione dei trasduttori

Una volta che i trasduttori sono in posizione corretta, va controllata la temperatura della camera climatica al cui interno è posizionata tutta l'apparecchiatura con il provino montato su essa. In particolare, tale temperatura non dovrà essere differente da quella di prova di un valore  $\pm 0.5$  °C. Una volta sicuri che anche la temperatura è corretta si prosegue il test cliccando sul tasto Continue di figura 2.46. A questo punto si passa alla schermata visualizzata in figura 2.47. Qui vengono visualizzati i dati che la macchina misura ed applica durante i 10 impulsi di pre-carico.

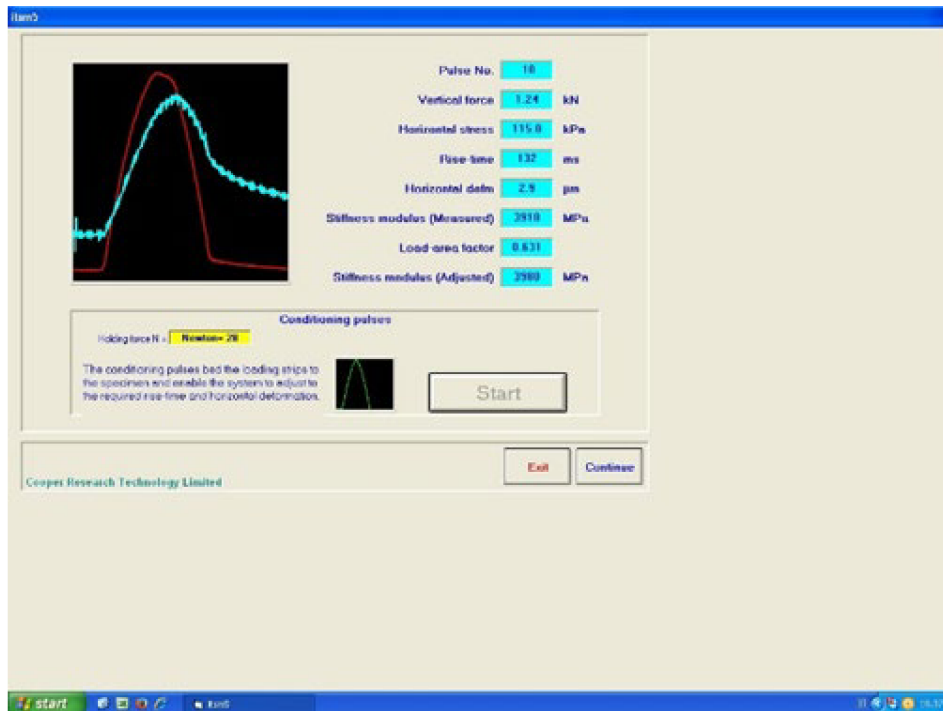


Figura 2.47: Schermata degli impulsi pre-carico

Infine, si visualizzano i risultati come in figura 2.48. In questa schermata finale si visualizzano i 5 impulsi di prova e ad ogni impulso si visualizzano tutti i parametri descritti appena sopra, con l'aggiunta dei valori medi di ogni parametro.

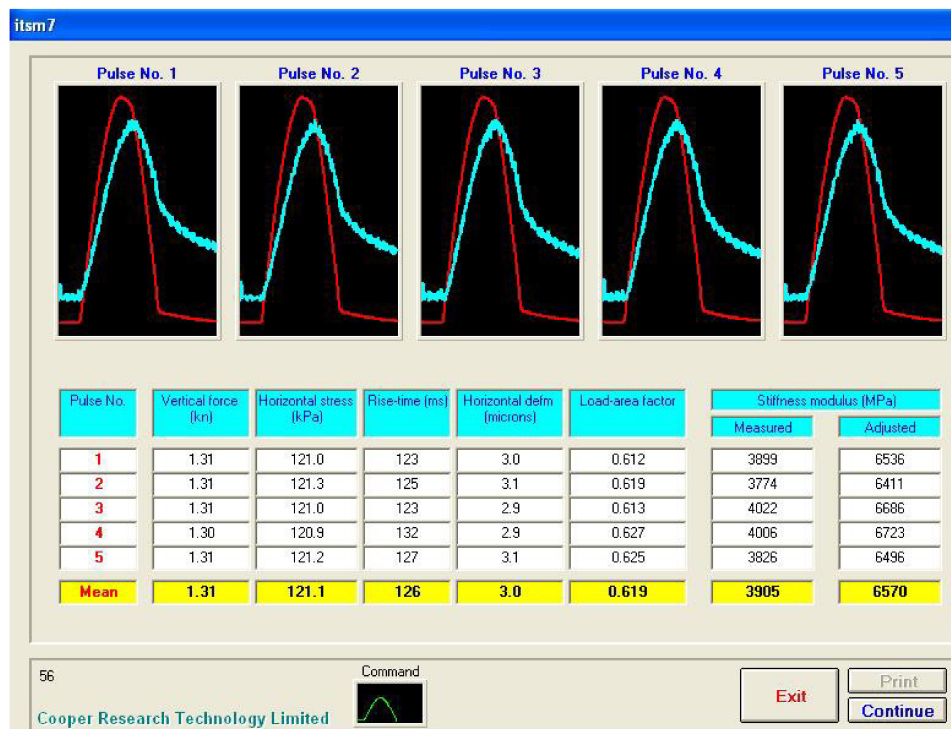


Figura 2.48: Applicazione dei 5 impulsi di prova e visualizzazione dei risultati

Successivamente il software richiede che il provino venga ruotato di un angolo pari a ( $90^\circ \pm 10^\circ$ ) ed in seguito si procede al test con i passaggi appena descritti. Secondo la norma i moduli calcolati sui due diametri possono differire fino ad un massimo del 20%.

### 2.3.5 Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23)

La prova di trazione indiretta, nota anche come prova Brasiliana, consiste nel comprimere, fino a rottura, un provino lungo un piano diametrico verticale. La rottura nel materiale avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico (effetto Poisson). La prova di resistenza a trazione indiretta può essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C. In questa indagine, e di norma, la prova è effettuata alla temperatura di 25°C. Infatti, prima della realizzazione della prova, i provini vengono tenuti per almeno 3 ore nella camera climatica a 25°C rappresentata in Figura 2.49.



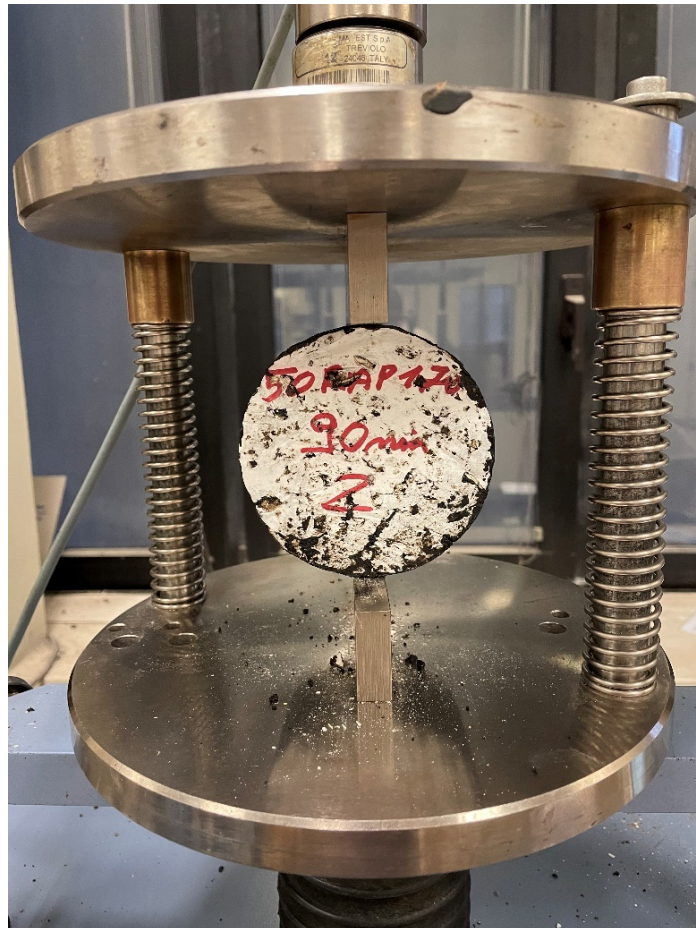
Figura 2.49: Camera climatica a 25°C

L'apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione di tale prova è costituita da un sistema di carico, formato da due piatti paralleli infinitamente rigidi: la testa di carico inferiore è fissata ad una base munita di due guide verticali lungo le quali scorre, senza apprezzabile attrito mediante due manicotti, la testa di carico superiore. Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli, caratterizzati dalle seguenti dimensioni:

- larghezza:  $15 \pm 2$  mm;

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

Il provino viene collocato, ben centrato, tra i piatti della pressa, in maniera tale che il suo asse sia orizzontale, che l'asse del listello di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del listello inferiore e che entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino (Figura 2.50).



*Figura 2.50: Posizionamento del provino tra i piatti della pressa*

Durante la prova la testa di carico inferiore viene fatta avanzare ad una velocità costante di  $50 \pm 2$  mm/min. Il sistema di controllo, mediante due comparatori, permette di misurare sia la deformazione (verticale ed orizzontale) subita dal provino durante l'applicazione del carico, che il carico stesso. La prova, in accordo con la norma UNI EN 12697-23, viene svolta in controllo di deformazione.

In Figura 2.51 troviamo invece un provino rotto al termine della prova Brasiliana.





Figura 2.51: Provino rotto dopo la prova

La macchina di prova può essere guidata mediante un pannello di controllo oppure in remoto con un computer tramite il software UTM II. Nel controllo in remoto, si impostano parametri di prova (i principali sono diametro e altezza del provino, velocità di avanzamento e carico di fine prova) e si ottengono in output oltre alla curva carico-corsa (carico-deformazione verticale) visualizzabile già durante l'esecuzione del test, tutti i punti che formano tale curva, il carico di rottura a compressione e la deformazione a compressione. Si può chiedere al software di fornire già calcolati anche la resistenza a trazione indiretta ITS e il coefficiente di trazione indiretta ITC. Nelle figure seguenti si possono vedere i passaggi principali eseguiti con UTM II.

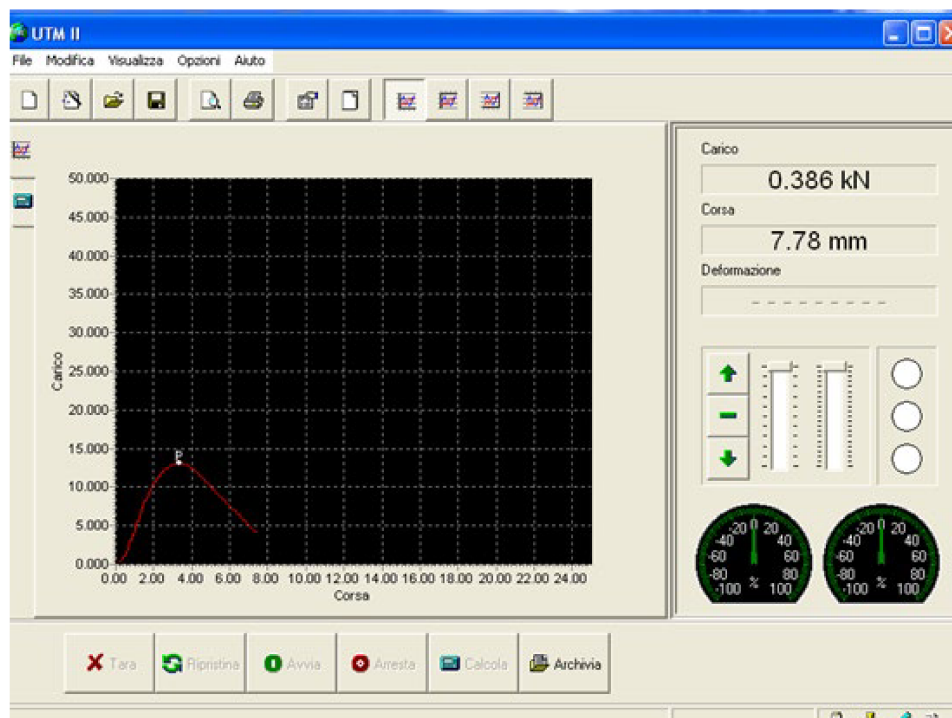


Figura 2.52: Curva sforzo-deformazione risultante dall'applicazione del carico assiale

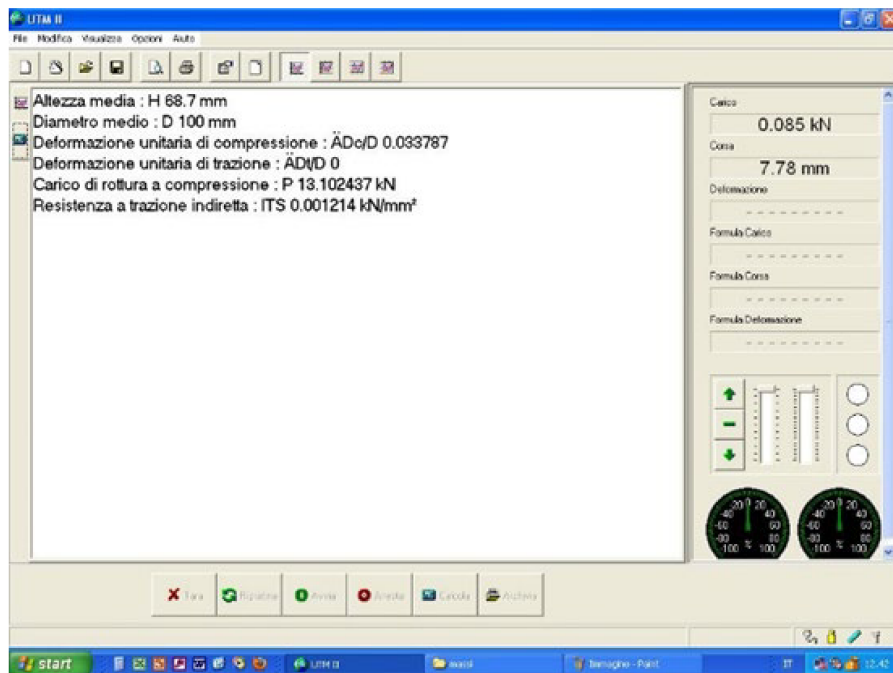


Figura 2.53: Schermata con rielaborazione dei risultati

Viene calcolata la Resistenza a Trazione Indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, a partire dal carico di picco e dalle dimensioni del provino, mediante la seguente espressione:

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

dove:

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



Figura 2.54: Provino rotto a seguito della prova a trazione indiretta

### 2.3.6 Calcolo RI e TI

Il parametro Ri rappresenta l'indice di rigenerazione cioè quando quell'additivo funziona sul provino.

Considerando ad esempio la prova ITSM, il parametro RI viene calcolato considerando l'aggiunta di additivo rispetto a quello vergine mediato attraverso la differenza tra il 50 RAP e il 0 RAP.

$$RI_{X,Add,T_i} [\%] = 100 \cdot \left( 1 - \frac{X_{Add,T_i} - X_{0RAP,T_i}}{X_{50RAP,T_i} - X_{0RAP,T_i}} \right)$$

Tale parametro risulta verificato se le caratteristiche del conglomerato bituminoso miscela fresato con l'additivo sono vicine a quella miscela senza fresato.

TI rappresenta l'indice di prestazione del bitume al variare della temperatura dello stesso provino diviso le caratteristiche di prestazione calcolate in base alla prova eseguita, in seguito è rappresentata la formula utilizzata.

$$TI_{X,Mix} [\%] = 100 \cdot \frac{|X_{Mix,170^{\circ}C} - X_{Mix,140^{\circ}C}|}{X_{ref}}$$

### 2.3.7 Estrazione del bitume

Lo scopo della prova è quello di recuperare il legante (bitume) presente in una soluzione composta da bitume aggregati filler.

Il presente metodo, inteso a consentire la determinazione delle caratteristiche attuali del bitume estratto, non è utilizzabile per la valutazione delle caratteristiche originali presentate dal bitume prima del suo impiego per la preparazione della miscela.

Disporre i provini all'interno dei contenitori Fig. 2.55, si riempie il contenitore con un quantitativo sufficiente di solvente tale da sommergere il campione introdotto.



*Figura 2.55: Parte del provino alla quale viene eseguita l'estrazione del bitume*

Dopo 48 ore, inizia la centrifugazione del materiale Fig. 2.56 portando gradualmente la centrifuga alla sua massima velocità e provvede a raccogliere il solvente entro apposito recipiente.





*Figura 2.56: Centrifuga*

Ripetere l'operazione di centrifuga, introducendo nuovo solvente attraverso il tubo centrale di alimentazione della centrifuga fino a quando la soluzione bituminosa estratta, si presenta limpida.

La soluzione ottenuta sarà bitume e solvente Fig. 2.57



Figura 2.57: Bitume e solvente

### 2.3.8 Prova FTIR

La Spettroscopia Infrarossa a Trasformata di Fourier è una tecnica spettroscopica di assorbimento, che studia i legami chimici, tale prova è stata eseguita sul bitume estratto dalla prova eseguita precedentemente.

Quando un fotone infrarosso viene assorbito da una molecola, questa passa da uno stato fondamentale ad uno stato vibrazionale eccitato e avviene, quindi, una transizione tra livelli energetici vibrazionali. Le transizioni vibrazionali possono essere di due tipi:

- stiramento del legame chimico (stretching);
- deformazione dell'angolo di legame (bending)

Lo stretching può essere simmetrico o asimmetrico. Anche il bending, a sua volta, può essere simmetrico (scissoring, apertura e chiusura di una forbice) o asimmetrico (rocking, oscillazione) nel piano; oppure simmetrico (twisting, torsione) o asimmetrico (wagging, agitazione) fuori dal piano.

Per molecole lineari il numero di modi vibrazionali sono:

$$\begin{aligned} 3n - 5 & \text{ per molecole lineari} \\ 3n - 6 & \text{ per molecole non lineari} \end{aligned}$$

Dove

$n$  = numero di atomi nella molecola;

I modi visibili, sotto forma di bande o picchi, su uno spettro nella regione dell'IR, sono solo quelli che comportano una variazione del momento dipolare.

Per la presente ricerca è stato utilizzato lo spettrometro FTIR del tipo "PerkinElmer"

Le parti che compongono lo spettrometro sono:

- Interferometro di Michelson;
- comparto celle;
- rivelatore;
- sistema di elaborazione segnale e presentazione dati



Figura 2.58: Strumentazione spettrometro FTIR

L'interferometro è composto dalla sorgente, da uno specchio fisso, da uno specchio mobile e da un beam splitter o separatore di raggio. La radiazione elettromagnetica viene generata dalla sorgente e mandata sul beam splitter. Qui la radiazione viene separata in due componenti, che vengono mandate rispettivamente sullo specchio fisso e sullo specchio mobile. La prima rimbalza sullo specchio e torna al beam splitter in un intervallo di tempo costante. La seconda, invece, impiega un tempo variabile per ritornare sul beam splitter, in relazione alla posizione dello specchio mobile. Le due componenti della radiazione percorrono

quindi cammini ottici diversi e ritornano al separatore. Qui, si ha fenomeno di interferenza costruttiva o distruttiva. A questo punto la radiazione può investire il campione.

Nel comparto celle vi è l'alloggiamento del campione. La cella deve essere trasparente all'infrarosso, ciò significa che non dà il suo contributo sullo spettro. Il rivelatore è un sensore DTGS (tridiglicinsolfato deuterato) che riceve la radiazione che ha attraversato il campione generando un interferogramma. Il segnale sull'interferogramma corrisponde quindi all'energia della radiazione incidente privata di quella assorbita dal campione ed è in funzione del tempo. Per il sistema di elaborazione segnale e presentazione dati, lo spettrometro è interfacciato ad un computer che provvede automaticamente ad elaborare i dati. Grazie alla trasformata di Fourier, l'interferogramma diventa spettro in funzione del numero d'onda. Lo spettro è più facilmente interpretabile rispetto ad un interferogramma. Grazie al confronto con database e analisi di composti noti, si procede all'interpretazione dei dati acquisiti e al riconoscimento del campione.

Per quanto riguarda l'analisi dei bitumi, la prova può essere fatta sia sul bitume oppure anche sul bitume ottenuto dall'estrazione a partire dal conglomerato bituminoso (usando un solvente per la separazione bitume aggregato).

Si inserisce il campione all'interno del macchinario vedi Fig. 2.59



*Figura 2.59: Campione all'interno del macchinario*

tramite un alloggiamento apposito e alla fine si ottengono dei dati di output sottoforma di spettri in funzione della lunghezza d'onda  $\lambda$  e dell'assorbanza A.

L'esposizione del conglomerato bituminoso agli agenti come aria, raggi UV, ma anche carichi veicolari, porta il materiale ad invecchiarsi nel tempo. L'invecchiamento è causato da un'ossidazione irreversibile dovuta alla presenza di ossigeno nell'aria, creando gruppi carbonile (C=O) e gruppi solfossido (S=O), modificando la composizione del bitume ed indurendo il legante bituminoso rendendolo più fragile. Questi gruppi sono considerati marcatori rilevanti per la qualificazione dell'invecchiamento.

I gruppi solfossido possono essere presenti prima dell'invecchiamento, a seconda dell'origine del petrolio greggio. Essi si formano più velocemente e a temperature più elevate rispetto ai gruppi carbonilici

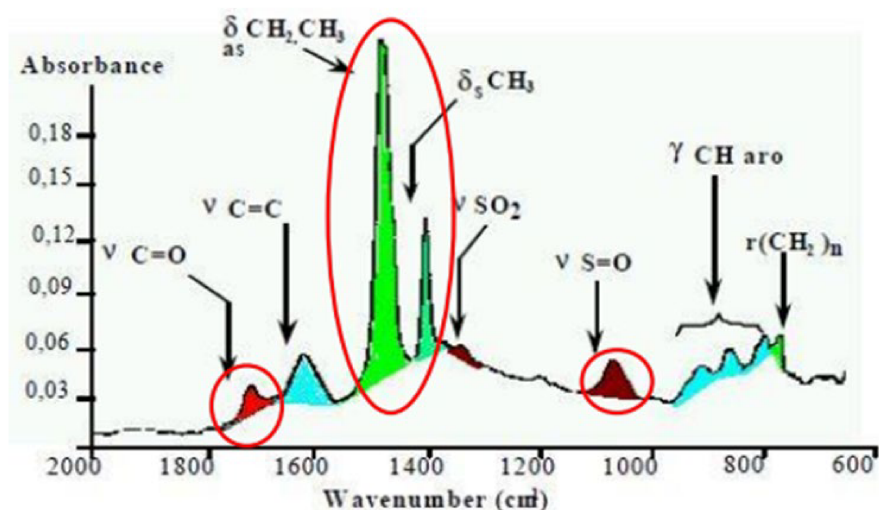


Figura 2.60: Spettro FITR del bitume – picchi del carbonile, solfossido e riferimento (cerchiati in rosso)

La determinazione degli indici di carbonile o solfossido (indicati rispettivamente  $I_{CO}$  e  $I_{SO}$ ) può essere fatta utilizzando le seguenti formule:

$$I_{CO} = \frac{A_1}{A_0}$$

Dove

- $A_1$  è l'area del picco del gruppo carbonile centrato a 1690  $\text{cm}^{-1}$
- $A_0$  è l'area dei picchi riferita ai gruppi etilene e metile (picchi di riferimento) e centrata rispettivamente a 1460 e 1375  $\text{cm}^{-1}$

$$I_{SO} = \frac{A_2}{A_0}$$

Dove

- $A_2$  è l'area del picco del gruppo solfossido centrato a  $1030 \text{ cm}^{-1}$

## 2.4 Specifiche del capitolato

Per la caratterizzazione e l'accettazione dei conglomerati bituminosi tradizionali, bisogna attenersi alle norme tecniche contenute nei Capitolati d'Appalto forniti dai vari enti che gestiscono la rete stradale. Tali norme prevedono il rispetto di determinati requisiti prestazionali sia per quanto riguarda i materiali impiegati nelle miscele (aggregati lapidei, filler, bitume) che per i conglomerati stessi. Infatti, la non rispondenza ad uno di questi requisiti può comprometterne l'impiego o comunque portare ad una riduzione del prezzo del materiale da utilizzare. Da quanto appena detto, bisogna effettuare un'analisi accurata dei materiali che verranno impiegati nella miscela al fine di scegliere i componenti più adatti per la realizzazione di essa.

Nella presente sperimentazione ci si è attenuti alle prescrizioni fornite dal Capitolato Speciale d'Appalto ANAS, in particolare per quanto riguarda i requisiti volumetrici, in termini di contenuto di vuoti residui ottenuti mediante pressa a taglio giratoria, e per la caratterizzazione meccanica dei conglomerati, andando a valutare la resistenza a trazione indiretta e il coefficiente di trazione indiretta (CTI). Nella seguente tabella vengono riportate le specifiche di capitolato alle quali si è fatto riferimento:

Proprietà	Valori richiesti
<b>Vuoti a 100 rotazioni [%]</b>	3% - 6%
<b>ITS [MPa]</b>	0.72 - 1.45
<b>CTI [MPa]</b>	$\geq 65 \text{ MPa}$

*Tabella 2.61: Requisiti forniti dal Capitolato ANAS*

Le miscele dovranno avere una composizione granulometrica determinata in conformità con la UNI EN 13108-1 e UNI EN 12697-2 utilizzando i setacci e compresa nei fusi di seguito elencati e una percentuale di bitume riferita al peso della miscela, compresa tra i sottoindicati intervalli per i diversi tipi di conglomerato. [pag. 47, cpt. 7.1.7 Capitolato Strade ANAS]



e facendo riferimento allo strato di binder con bitume modificato e tal quale, la distribuzione granulometrica con conseguente fuso granulometrico di riferimento sono quelle riportate nella tabella seguente:

Apertura setacci UNI	passante totale in peso %
setaccio 20	100
setaccio 16	90-100
setaccio 12,5	66-86
setaccio 8	52-72
setaccio 4	34-54
Setaccio 2	25-40
Setaccio 0,5	10-22
setaccio 0,25	6-16
setaccio 0,063	4-8

Tabella 2.62: Fuso granulometrico

### 3 Capitolo 3 - Risultati sperimentali

In questo capitolo vengono riportati i risultati sperimentali ottenuti, sia riguardanti le caratteristiche volumetriche sia i parametri meccanici dei provini realizzati. Inoltre, sono stati confrontati provini confezionati a tempi e temperature differenti, oltre che miscele realizzate con due diversi tipi di additivi rigeneranti

IMPASTO	Tempo	Numero	Giri	hm [mm]	m [g]	m in acqua [g]	$\rho_{geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{dry}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	V <sub>m,geom</sub> [%]	V <sub>m,dry</sub> [%]
00RAP_V_140	30 min	1	66	58,1	1065,5	620,2	2,335	2,383	5,5	3,5
		2	31	57,9	1027,7	588,5	2,260	2,331	8,5	5,7
	90 min	1	67	58,1	1071,5	625,2	2,348	2,391	5,0	3,2
		2	91	58	1080	632,6	2,371	2,404	4,0	2,9
	180 min	1	70	58,1	1078,6	629,7	2,364	2,393	4,3	3,1
		2	70	58	1079,7	630,2	2,370	2,392	4,1	3,2
00RAP_V_170	30 min	1	71	58,1	1075	627,3	2,356	2,392	4,7	3,2
		2	67	58,2	1066,8	618,8	2,334	2,372	5,5	4,0
	90 min	1	84	58	1075,2	629,5	2,360	2,403	4,5	2,8
		2	83	58,1	1079,2	630,2	2,365	2,394	4,3	3,1
	180 min	1	94	58	1078,3	634,1	2,367	2,418	4,2	2,1
		2	89	58,2	1076	628,4	2,354	2,394	4,7	3,1

50RAP_V_140	30 min	1	100	58,1	1078,4	632,3	2,363	2,408	4,4	2,6
		2	57	57,8	1082,5	629,9	2,385	2,382	3,5	3,6
	90 min	1	79	58,1	1080,5	633	2,368	2,405	4,2	2,7
		2	54	57,9	1082,7	630,1	2,381	2,383	3,6	3,6
	180 min	1	85	58,2	1072,4	626	2,346	2,393	5,1	3,2
		2	80	57,9	1086,2	635,5	2,389	2,400	3,3	2,9
50RAP_V_170	30 min	1	65	58,2	1079,3	630,2	2,361	2,394	4,4	3,1
		2	72	58,1	1082,3	634,6	2,372	2,408	4,0	2,6
	90 min	1	73	58	1081	632,2	2,373	2,399	4,0	2,9
		2	81	57,8	1081,3	633,2	2,382	2,403	3,6	2,7
	180 min	1	76	57,9	1078	628,7	2,371	2,390	4,1	3,3
		2	72	57,9	1080	631,4	2,375	2,398	3,9	3,0
50RAP_V_140 ACF1000	30 min	1	49	57,9	1081,1	632,8	2,377	2,402	3,8	2,8
		2	40	58,1	1070,5	621,6	2,346	2,375	5,1	3,9
	90 min	1	59	58,1	1077,9	630,4	2,362	2,399	4,4	2,9
		2	43	58	1073,3	625,3	2,356	2,386	4,6	3,4
	180 min	1	51	58	1078,6	629,5	2,368	2,392	4,2	3,2
		2	53	58,2	1081	632,2	2,365	2,399	4,3	2,9
50RAP_V_170 ACF1000	30 min	1	57	57,9	1072,3	626,2	2,358	2,394	4,6	3,1
		2	42	58	1079,4	628,3	2,370	2,383	4,1	3,5
	90 min	1	64	57,9	1076,4	630,3	2,367	2,403	4,2	2,7
		2	44	58,2	1076,3	625,3	2,355	2,377	4,7	3,8
	180 min	1	73	57,9	1074,1	628,7	2,362	2,402	4,4	2,8
		2	50	58,1	1080	629,8	2,367	2,389	4,2	3,3
50RAP_V_140 SYLVAROAD	30 min	1	57	57,9	1079,4	628,4	2,374	2,384	3,9	3,5
		2	80	57,8	1078,4	631,4	2,376	2,403	3,9	2,7
	90 min	1	50	58,1	1077	625	2,360	2,373	4,5	4,0
		2	84	57,9	1080,7	633,1	2,376	2,405	3,8	2,7
	180 min	1	64	58,1	1078	627,1	2,362	2,381	4,4	3,6
		2	90	57,9	1080,4	633,3	2,376	2,407	3,8	2,6
50RAP_V_170 SYLVAROAD	30 min	1	74	57,9	1072,4	631,2	2,358	2,421	4,6	2,0
		2	45	58	1068,2	620,1	2,345	2,374	5,1	3,9
	90 min	1	83	57,9	1079,1	633,3	2,373	2,411	4,0	2,4
		2	45	58	1075,8	626	2,362	2,382	4,4	3,6
	180 min	1	88	58	1083,1	635,5	2,378	2,410	3,8	2,5
		2	70	58,1	1080	629,7	2,367	2,389	4,2	3,3

Tabella 3.1: caratteristiche volumetriche delle miscele



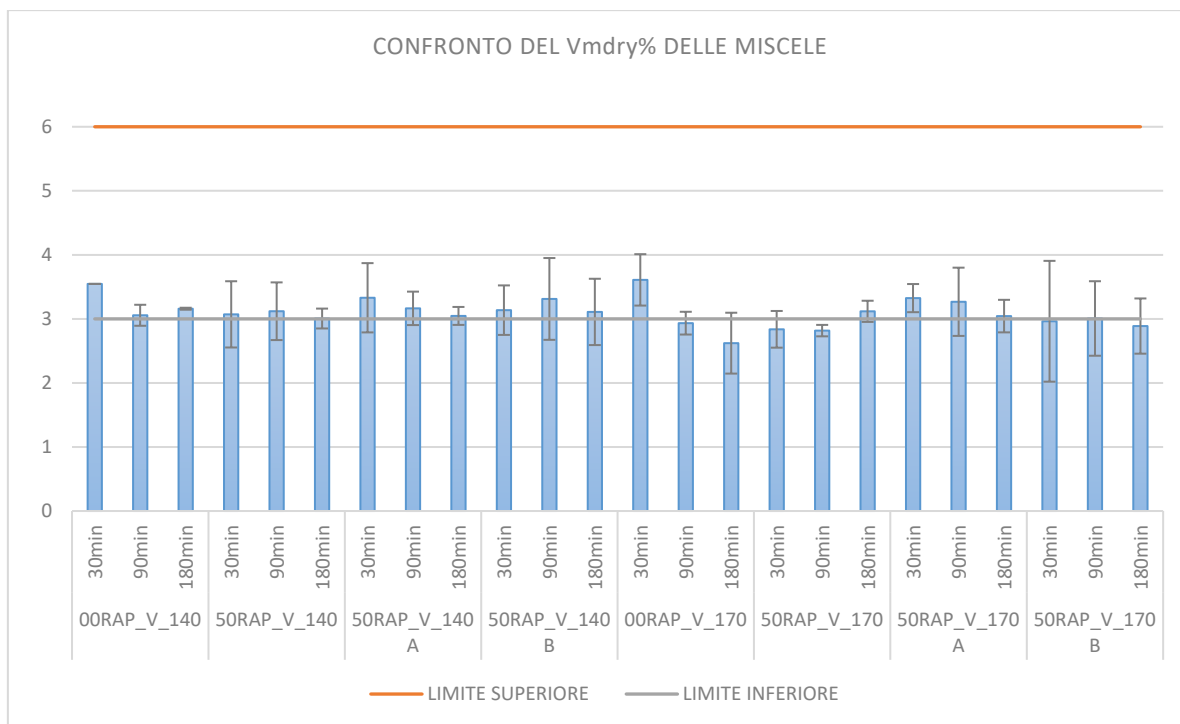


Figura 3.2: Vuoti (dry) delle miscele

Come si può notare dal grafico, per quasi tutti i provini la percentuale di vuoti rientra nei limiti del range previsto dal Capitolato ANAS (3-6 %), con qualche leggera eccezione; i provini 00RAP\_V\_170 180 min e 50RAP\_V\_170 30min e 90 min sono quelli con la percentuale di vuoti residui più bassa (2,6 %). In linea di massima tutti i provini si trovano al limite inferiore di tale requisito.

### 3.2 Confronto delle proprietà meccaniche al variare del tempo in forno a parità di temperatura

In questo paragrafo viene effettuato un confronto delle caratteristiche meccaniche delle diverse miscele, al variare del tempo in forno, ma a pari temperatura di miscelazione. Quindi si riportano di seguito 3 grafici per le miscele a 140°C e 3 grafici per le miscele a 170°C: in un grafico si confronteranno i valori dei moduli a trazione indiretta (*ITSM*), in un altro i valori della resistenza a trazione indiretta (*ITS*) e infine i valori del *logCt-i*.

### 3.2.1. Miscele a 140°C

<i>IMPASTO</i>	<i>Tempo</i>	<i>Numero</i>	<i>ITSMm</i> [Mpa]	<i>ITS [Mpa]</i>	<i>logCT-i</i>
<b>00RAP_V_140</b>	30 min	1	5769	1,01	2,10
		2			
	90 min	1	6075	1,1	2,07
		2			
	180 min	1	7416,5	1,2065	1,81
		2			
<b>50RAP_V_140</b>	30 min	1	12659,5	1,81	1,11
		2			
	90 min	1	12865,25	1,9	1,19
		2			
	180 min	1	14340,25	1,92	1,09
		2			
<b>50RAP_V_140</b> <b>A</b>	30 min	1	7555	1,24	1,79
		2			
	90 min	1	8743,5	1,405	1,46
		2			
	180 min	1	10077,75	1,495	1,45
		2			
<b>50RAP_V_140</b> <b>B</b>	30 min	1	9830	1,41	1,38
		2			
	90 min	1	9986,75	1,525	1,44
		2			
	180 min	1	10846,75	1,525	1,43
		2			

*Tabella 3.3: proprietà meccaniche delle miscele a T=140°C al variare del tempo in forno*

Di seguito si riportano i grafici in cui si confrontano l'ITSM, l'ITS e il logCt-i delle miscele riportate in Tabella 3.4:

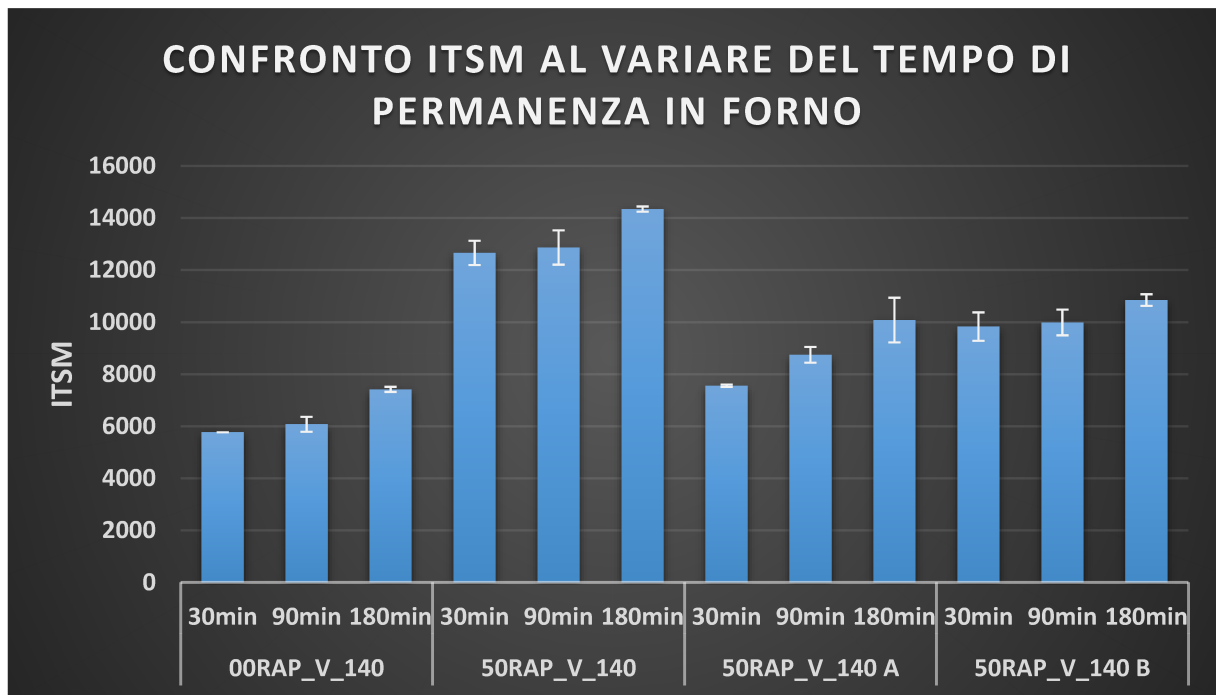


Figura 3.4: Confronto ITSM delle miscele a  $T=140^{\circ}\text{C}$  al variare del tempo in forno

Dal grafico possiamo notare come:

La presenza di fresato rende più rigida la miscela: i moduli dei provini della miscela 50RAP\_140 hanno valori di ITSM molto più alti rispetto ai provini della miscela 00\_RAP\_140.

- L'aggiunta di un additivo rigenerante nella miscela permette di avere un conglomerato bituminoso meno rigido rispetto alla miscela senza additivo, con valori del modulo ITSM che tendono ai valori della miscela 00\_RAP\_140.
- Analizzando il valore dei moduli al variare del tempo in forno, si nota che per tutte le miscele si ha un aumento dell'ITSM all'aumentare del tempo.
- Per quanto riguarda i due additivi usati, non si notano grandi differenze nei valori dell'ITSM tra il mix con additivo A e il mix con additivo B, ma dal grafico notiamo come i moduli della miscela con additivo A siano leggermente inferiori.

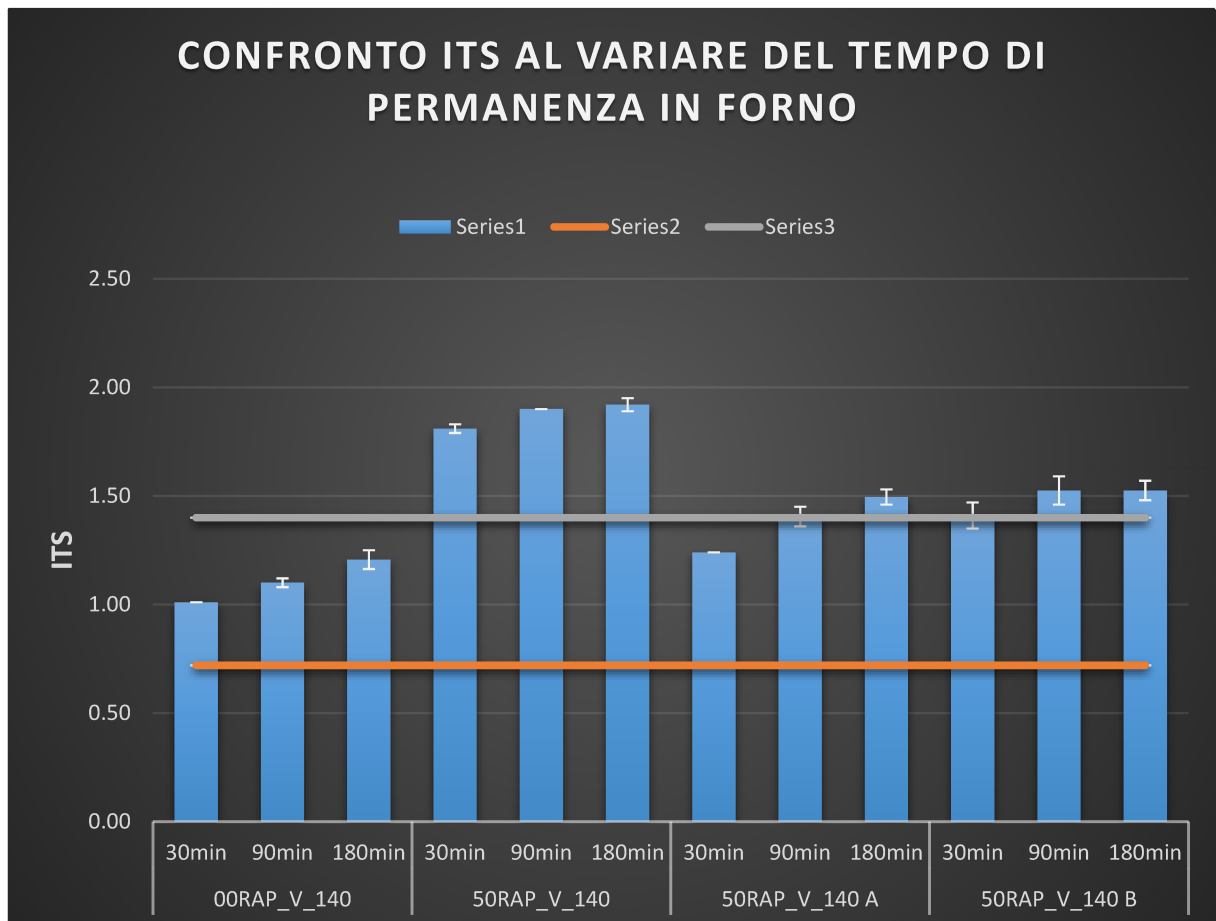


Figura 3.5: Confronto ITS delle miscele a T=140°C al variare del tempo in forno

Dal grafico notiamo come:

- nella miscela con il fresato, la resistenza a trazione indiretta sia molto più alta rispetto alla miscela 00RAP e non rientri nel range previsto dal Capitolato, a prescindere dal tempo in forno.
- L'aggiunta degli additivi permetta di ridurre notevolmente i valori di ITS dei provini, avvicinandosi ai valori del mix senza fresato. In particolare, l'additivo che è risultato più efficace nella riduzione di ITS è l'additivo A, ma entrambi gli additivi, per le miscele a 140°C, consentono di rientrare nei limiti del Capitolato.
- Analizzando l'andamento dell'ITS per una stessa miscela al variare del tempo in forno, notiamo che anche l'ITS cresce all'aumentare del tempo di permanenza in forno.

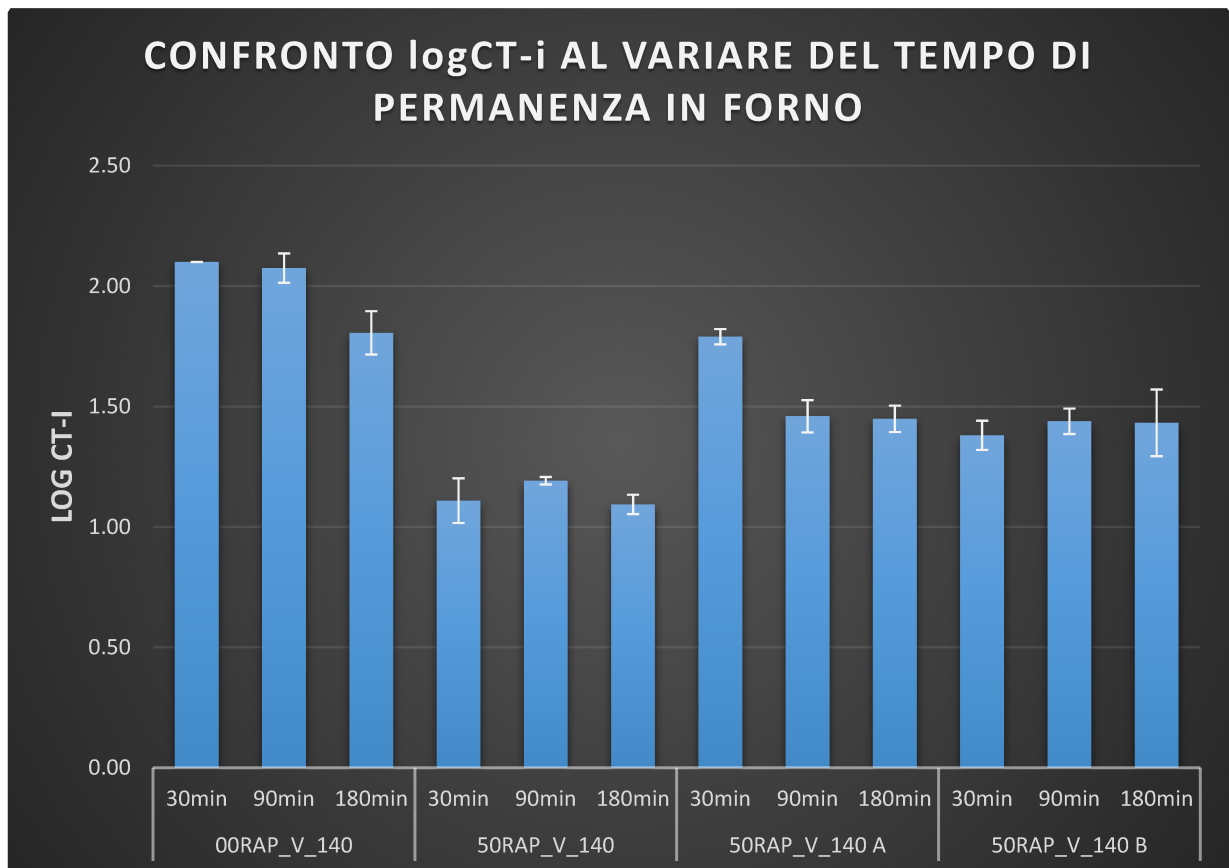


Figura 3.6: Confronto logCT-i delle miscele a T=140°C al variare del tempo in forno

Il logCt-i è un parametro che permette di valutare la qualità, dal punto di vista delle proprietà meccaniche, di un conglomerato bituminoso. In particolare, più il valore è grande più il conglomerato si presenta come un materiale dal comportamento più duttile e meno fragile.

Detto ciò, dal grafico notiamo che:

- la miscela realizzata con il fresato presenta un comportamento più fragile rispetto a un conglomerato bituminoso tradizionale (senza RAP).
- L'aggiunta di un additivo rigenerante modifica il comportamento del materiale, che diventa meno rigido e quindi il meccanismo di rottura sarà simile a quello della miscela 00\_RAP, ovvero di tipo duttile.
- Tra i due additivi utilizzati, anche in questo caso, quello che ha dato risultati migliori è l'additivo A; infatti, la miscela 50\_RAP\_140\_A presenta valori di logCt-i molto simili a quelli del mix 00RAP\_140.
- Il logCt-i tende a diminuire con l'aumentare del tempo di permanenza in forno, con qualche eccezione per le miscele compattate dopo 180 minuti

### 3.2.2. Miscele a 170°C

Di seguito si riportano i grafici in cui si confrontano l'ITSM, l'ITS e il logCt-i delle miscele riportate in Tabella 3.7:

<i>IMPASTO</i>	<i>Tempo</i>	<i>Numero</i>	<i>ITSMm [Mpa]</i>	<i>ITS [Mpa]</i>	<i>logCT-i</i>
<b>00RAP_V_170</b>	30 min	1	6171,75	1,065	1,81
		2			
	90 min	1	8932	1,245	1,53
		2			
	180 min	1	11254	1,59	1,18
		2			
<b>50RAP_V_170</b>	30 min	1	15072,5	1,905	0,90
		2			
	90 min	1	17421,25	2,115	0,89
		2			
	180 min	1	18837,5	2,14	0,76
		2			
<b>50RAP_V_170 B</b>	30 min	1	11132,75	1,46	1,38
		2			
	90 min	1	13068,25	1,665	1,20
		2			
	180 min	1	14774	1,835	0,89
		2			
<b>50RAP_V_170 B</b>	30 min	1	13738	1,78	1,05
		2			
	90 min	1	15994,25	2,025	0,96
		2			
	180 min	1	16936,75	2,03	0,81
		2			

*Tabella 3.7: proprietà meccaniche delle miscele a T=170°C al variare del tempo in forno*

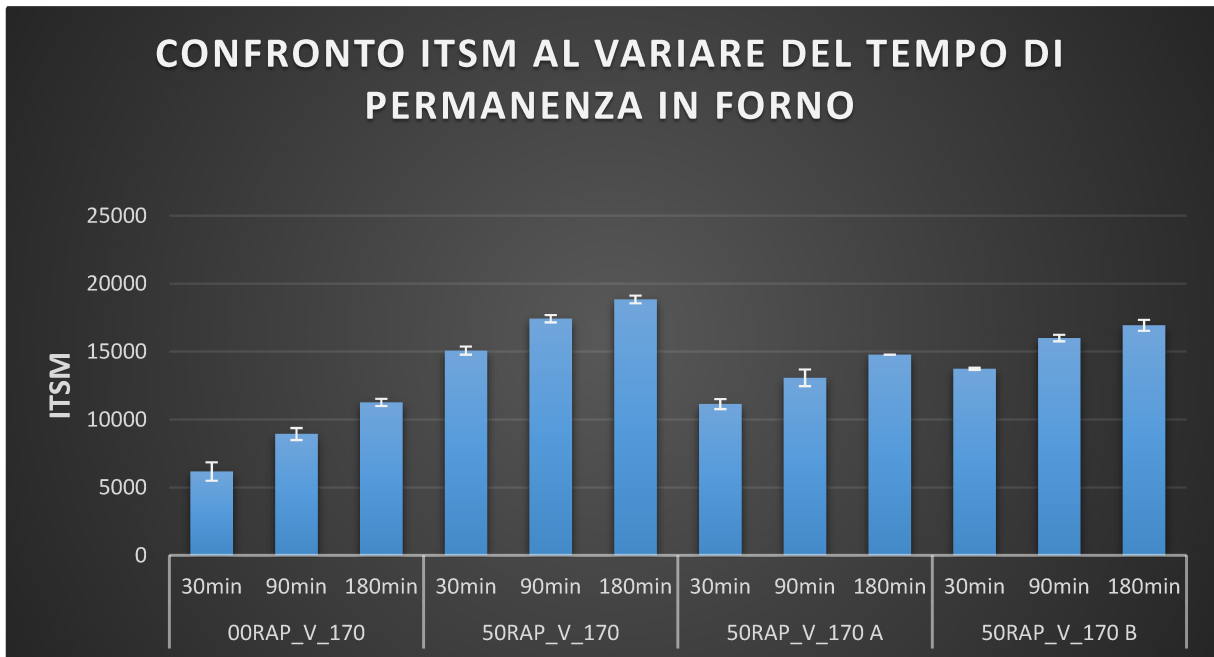


Figura 3.8: Confronto ITSM delle miscele a  $T=170^{\circ}\text{C}$  al variare del tempo in forno

Come già visto per le miscele a  $140^{\circ}\text{C}$ , possiamo notare che

- Anche per le miscele a  $170^{\circ}\text{C}$  notiamo un aumento del modulo e quindi della rigidità del conglomerato con il fessato.
- Le miscele con additivi rigeneranti presentano una riduzione della rigidità rispetto al mix 50\_RAP\_170, con dei valori di ITSM che sono comunque superiori rispetto a quelli della miscela 00\_RAP.
- Tra i due additivi utilizzati non si evidenziano grandi differenze. L'effetto dell'additivo A si è ridotto aumentando la temperatura di miscelazione

Confrontando l'ITSM dei provini di una stessa miscela a tempi diversi, possiamo dire che i moduli (e quindi la rigidità) aumentino al crescere del tempo in forno.

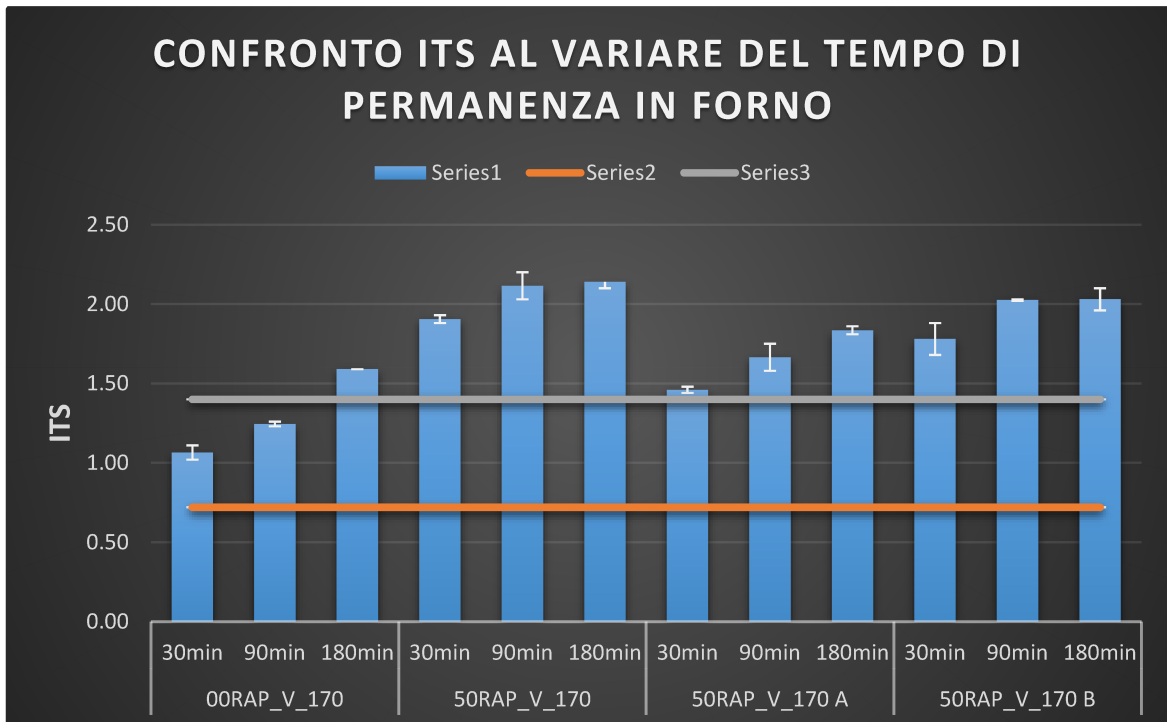


Figura 3.9: Confronto ITS delle miscele a  $T=170^{\circ}\text{C}$  al variare del tempo in forno

Dal grafico si può notare che:

- Anche per le miscele a  $170^{\circ}\text{C}$ , si ha un aumento della resistenza a trazione indiretta (ITS) per le miscele con il fresato.
- L'aggiunta degli additivi rigeneranti comporta una riduzione dei valori di ITS, ma, come si evince dal grafico, nessun provino delle miscele con l'additivo A e S rientra nel range del Capitolato ANAS. L'effetto rigenerante degli additivi quindi, a causa dell'elevata temperatura di miscelazione è nettamente calato.
- Confrontando i provini di una stessa miscela al variare del tempo in forno, notiamo che si ha un aumento dell'ITS al crescere del tempo di permanenza in forno.



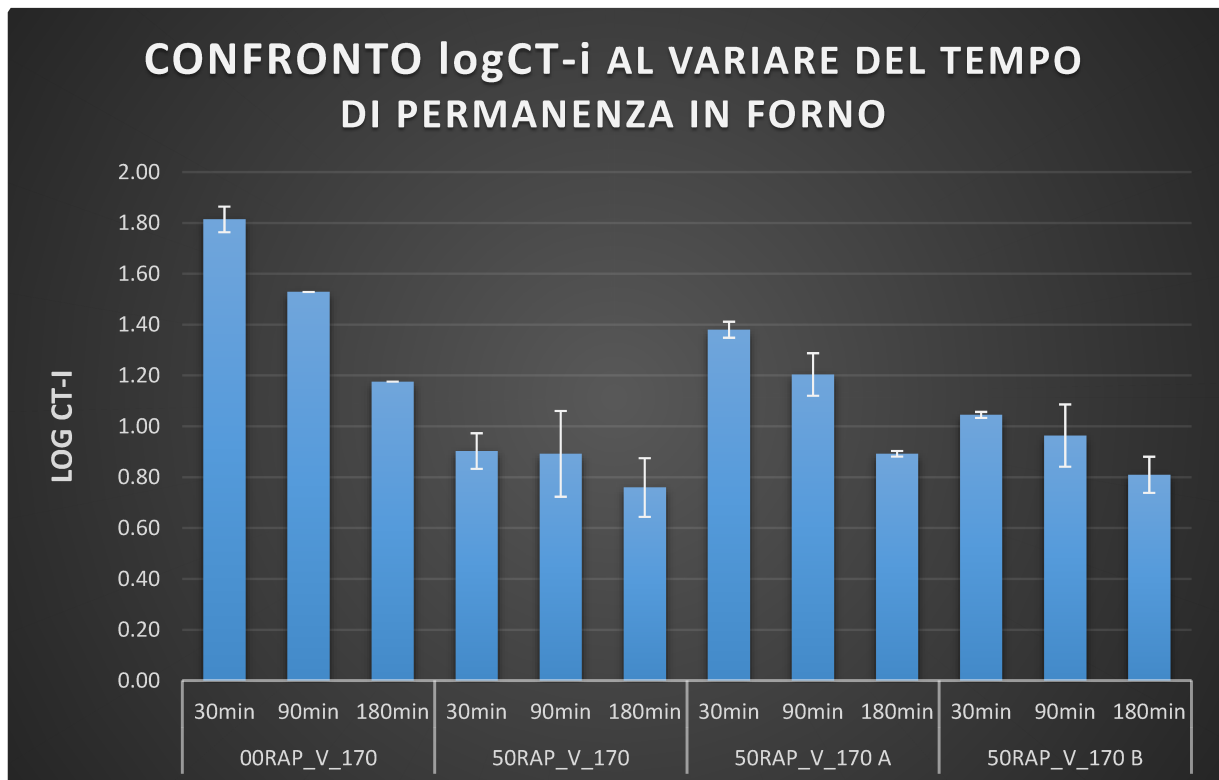


Figura 3.10: Confronto logCt-i delle miscele a T=170°C al variare del tempo in forno

Possiamo notare che:

- il logCt-i si abbassa notevolmente nel mix 50RAP\_170 rispetto alla miscela senza fresato.
- Nelle miscele con additivi rigeneranti, i valori del logCt-i aumentano e tendono ai valori della miscela 00\_RAP\_170. Ciò sta ad indicare l'efficacia degli additivi nel rendere il conglomerato con il fresato meno rigido, con un meccanismo di rottura di tipo duttile.
- Tra i due additivi utilizzati non si notano grandi differenze e possiamo dire che in entrambe le miscele si nota una riduzione dell'efficacia dell'additivo al crescere del tempo di permanenza in forno.
- Inoltre, il logCt-i tende generalmente a ridursi, a parità di miscela e al tempo di permanenza in forno.

### 3.3. Confronto delle proprietà meccaniche al variare della temperatura

In questo paragrafo vengono confrontate le caratteristiche meccaniche dei provini di miscele uguali, realizzate a due diverse temperature (140 e 170°C). Le proprietà meccaniche confrontate sono le stesse viste nel paragrafo precedente: ITS, ITSM, logCt-i.

### 3.3.1. Mix 00\_RAP

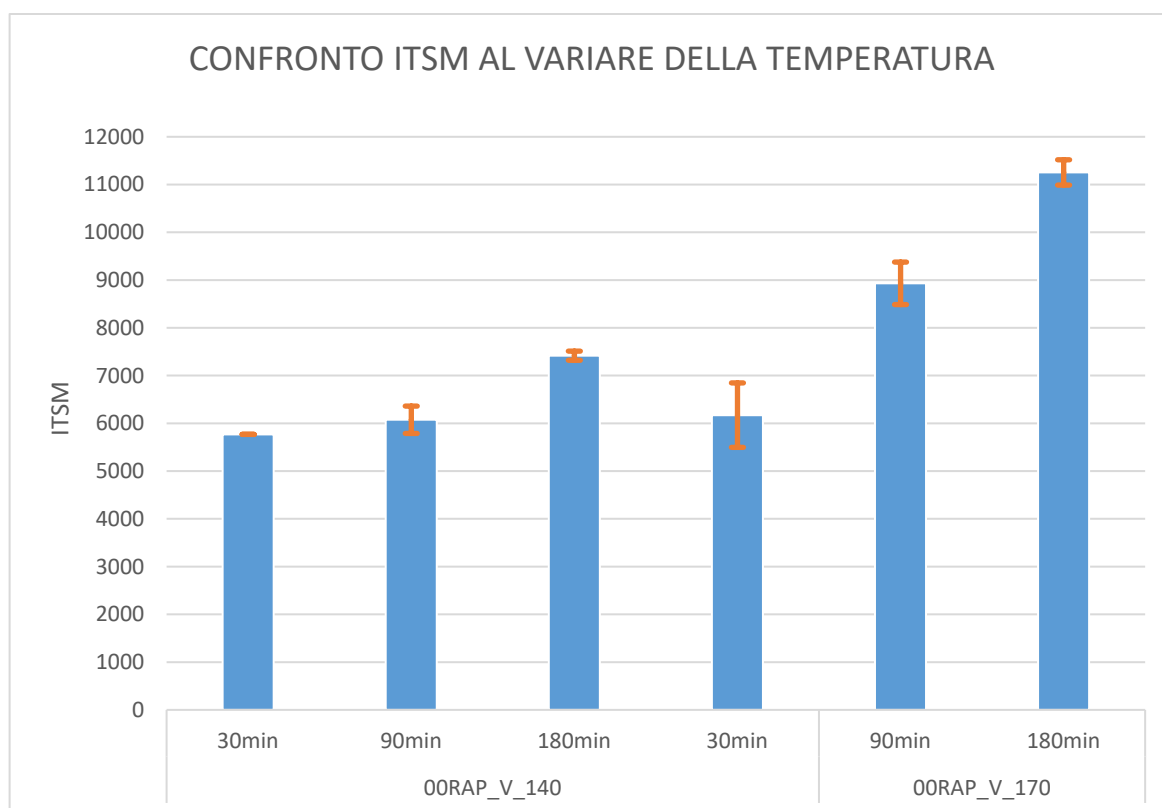


Figura 3.11: Confronto ITSM della miscela 00\_RAP al variare della temperatura

Dal grafico della figura 3.11 notiamo che per la miscela 00\_RAP si ha:

- un aumento del modulo elastico del conglomerato all'aumentare della temperatura di miscelazione. Ciò vuol dire che la miscela 00\_RAP\_170 si presenta più rigida rispetto alla miscela 00\_RAP\_140.
- Inoltre, possiamo notare anche che per temperature più alte, il tempo di permanenza in forno influenza maggiormente la rigidezza della miscela; infatti, mentre nel mix 00\_RAP\_140 il modulo aumenta lievemente passando da un tempo in forno di 30 minuti a uno di 180 minuti, nel mix a 170°C l'aumento dell'ITSM è molto più evidente.

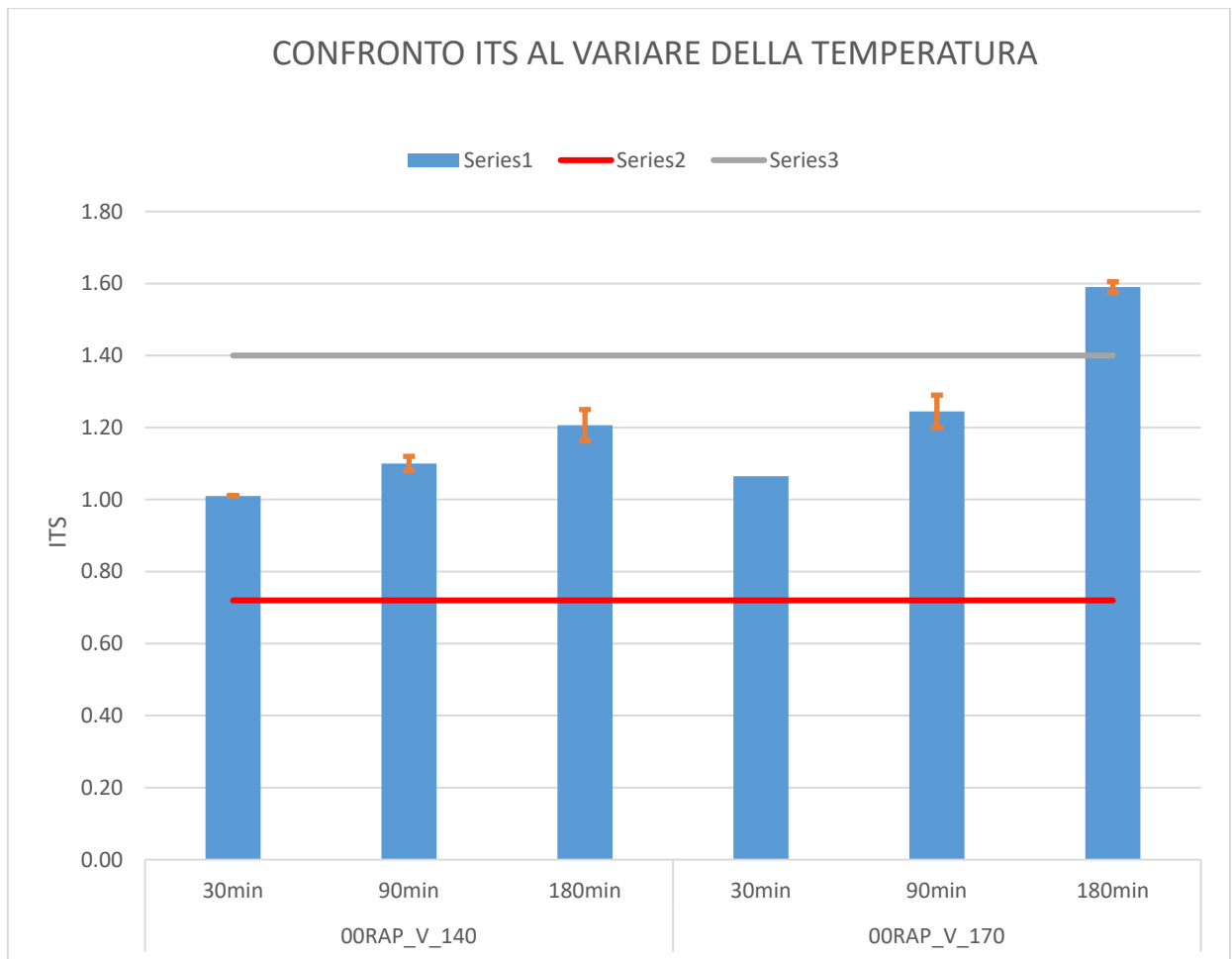
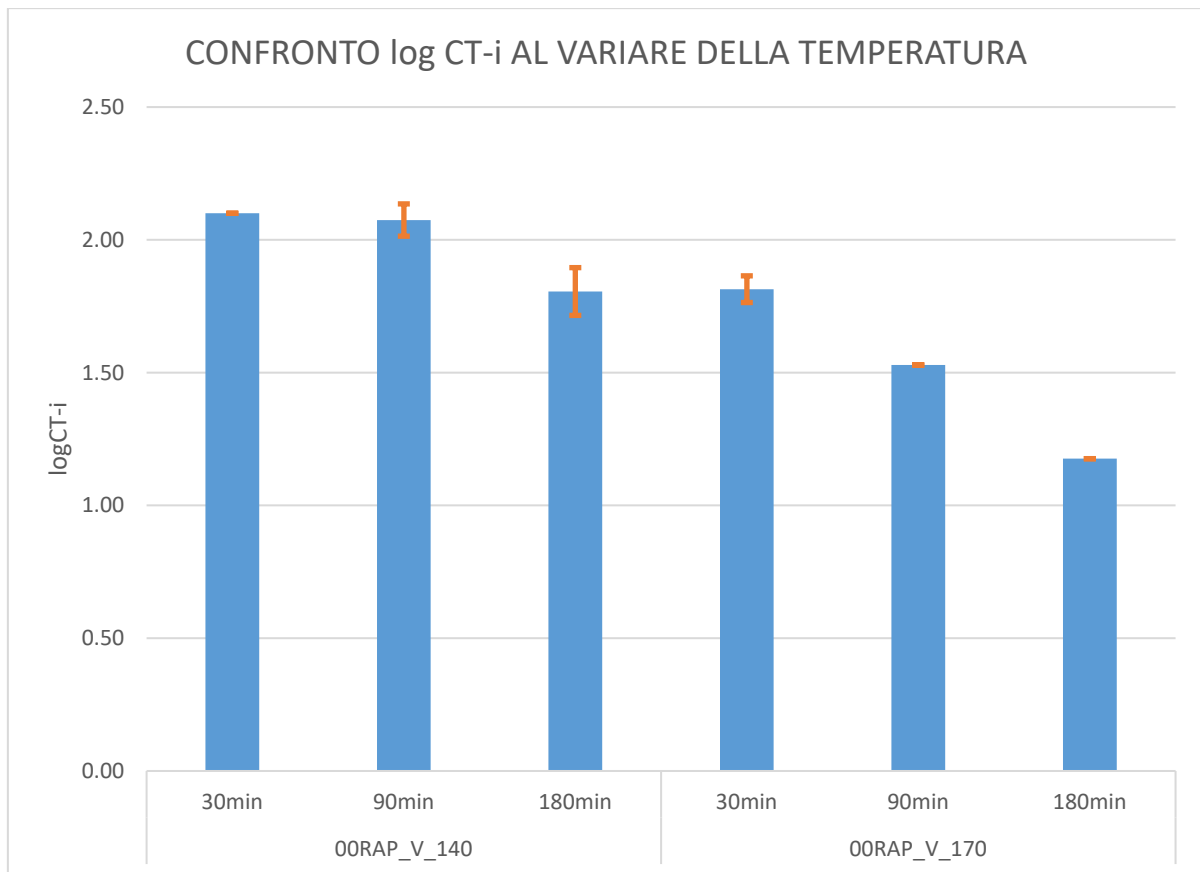


Figura 3.12: Confronto dell'ITS del mix 00\_RAP al variare della temperatura

Possiamo notare che:

- a prescindere dalla temperatura di miscelazione in entrambi i casi i valori di ITS rientrano nel range previsto dal Capitolato ANAS ad eccezione per la miscela 00RAP\_V\_170 180 min..
- la resistenza a trazione indiretta aumenta per temperature maggiori, soprattutto a tempi in forno più alti. Infatti, il tempo di permanenza in forno è un fattore più determinante per il conglomerato a 170°C, piuttosto che per quello a 140°C.



*Figura 3.13: Confronto del logCt-i del mix 00\_RAP al variare della temperatura*

In quest'ultimo grafico (fig.3.13) è stato confrontato il logCt-i della miscela 00\_RAP alle due diverse temperature. Possiamo notare che:

- il valore del logCt-i diminuisce all'aumentare della temperatura, se confrontiamo le due miscele a parità di tempo si vede che i provini con temperatura in forno a 140°C hanno valori più alti rispetto alla temperatura in forno di 170°C.

### 3.2. Mix 50\_RAP

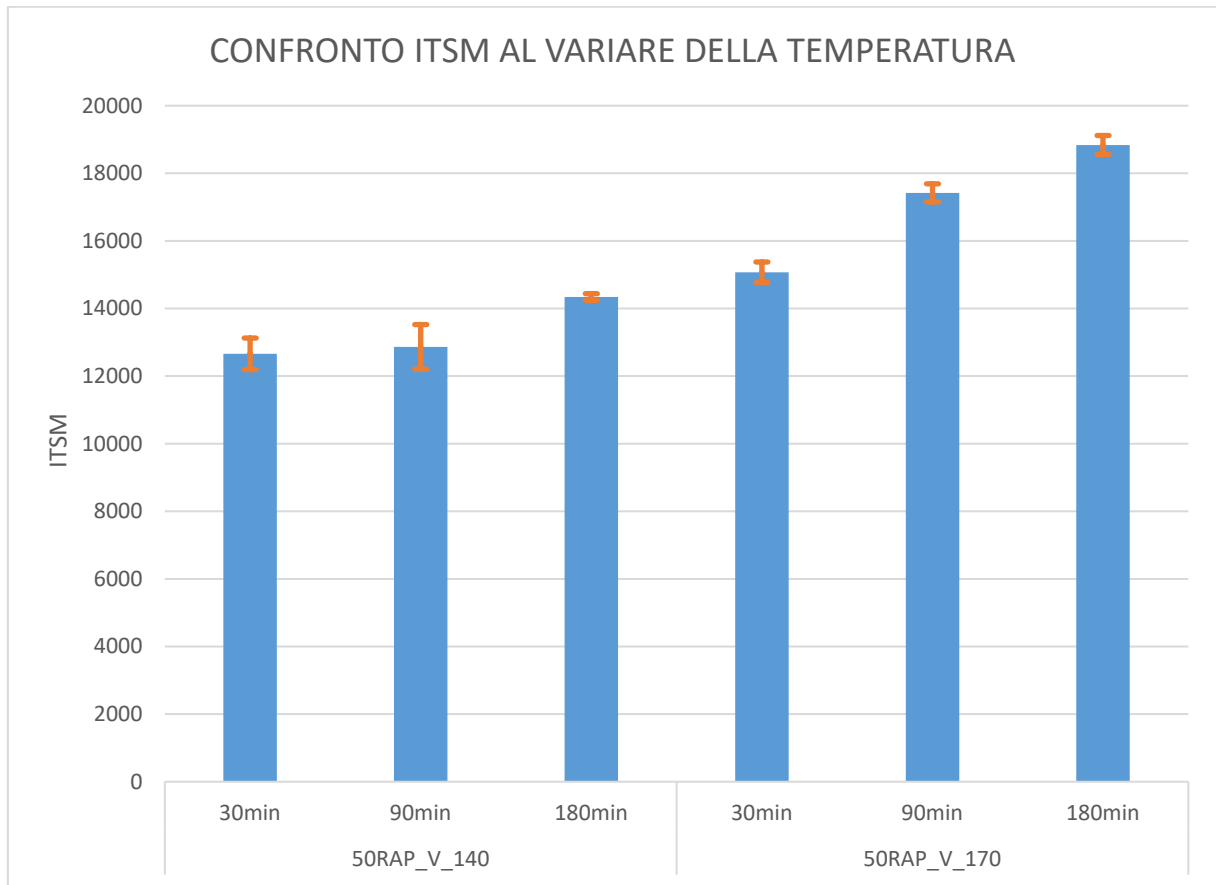


Figura 3.14: Confronto ITSM della miscela 50\_RAP al variare della temperatura

Anche per le miscele 50RAP, notiamo come:

- il modulo di rigidezza aumenta al crescere della temperatura. Inoltre, anche in questo caso.
- Il tempo di permanenza in forno sia un fattore che influenza maggiormente la rigidezza del conglomerato per temperature più alte, mentre per temperature più basse la variazione dei moduli al crescere del tempo è minore.

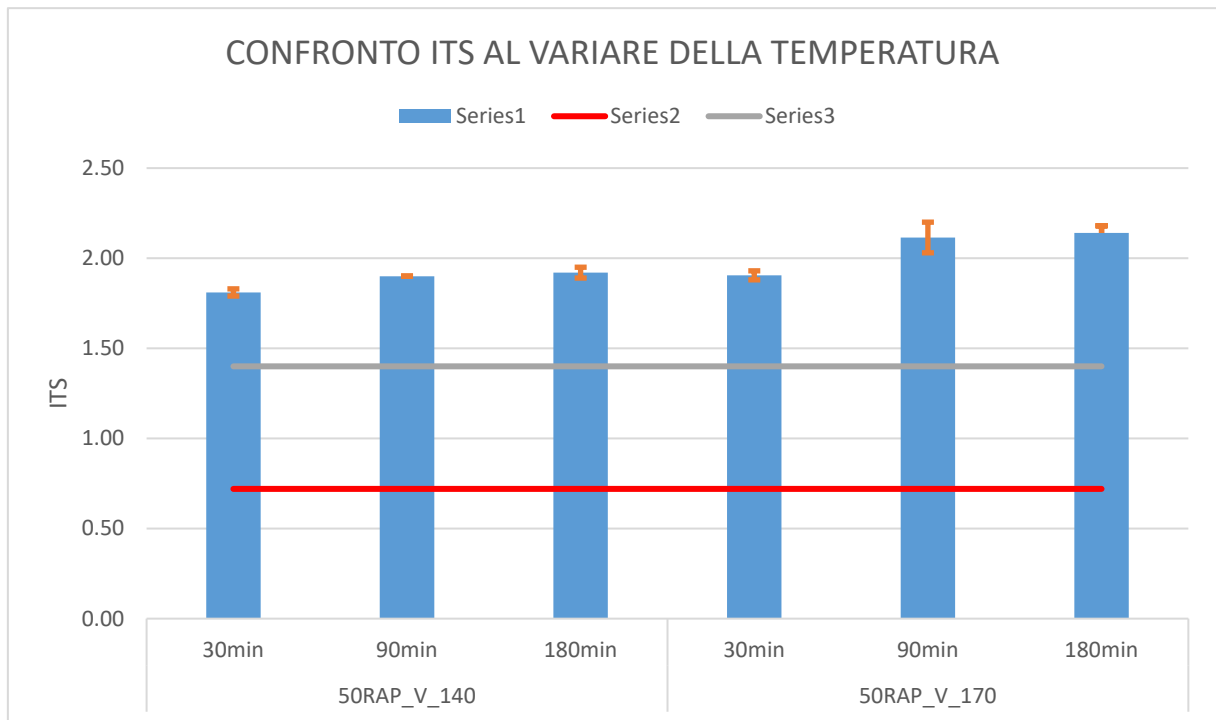
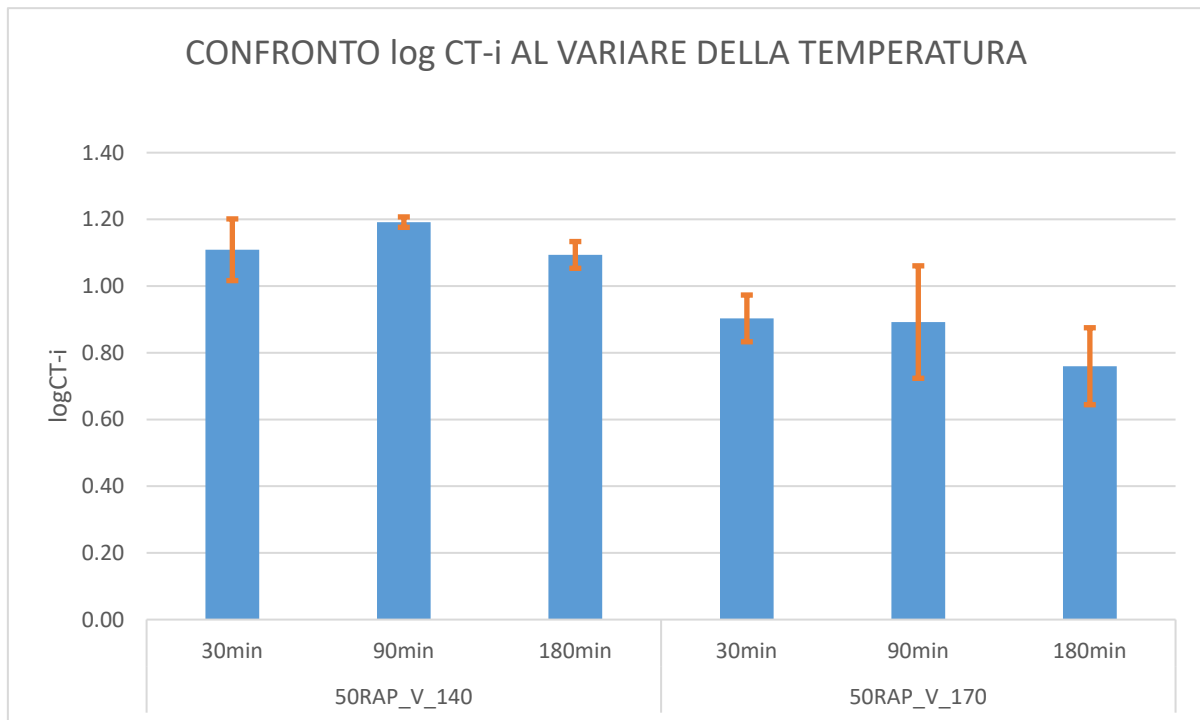


Figura 3.15: Confronto dell'ITS della miscela 50\_RAP al variare della temperatura

Con questo grafico si nota come:

- la miscela realizzata a una temperatura maggiore sia caratterizzata da una resistenza a trazione indiretta superiore.
- Indipendentemente dalla temperatura, possiamo notare che nessun provino delle due miscele realizzate ha valori di ITS che rientrino nei limiti del range del Capitolato ANAS.



*Figura 3.16: Confronto del logCT-i della miscela 50\_RAP al variare della temperatura*

Come si può notare dal grafico di figura 3.16, la temperatura influenza il comportamento meccanico e il meccanismo di rottura del conglomerato bituminoso. Infatti notiamo che:

- all'aumentare della temperatura, i valori di logCt-i sono inferiori e ciò indica che la miscela 50RAP\_170 abbiamo un comportamento più rigido della stessa miscela a 140°C.



### 3.3.3. Mix 50\_RAP\_A

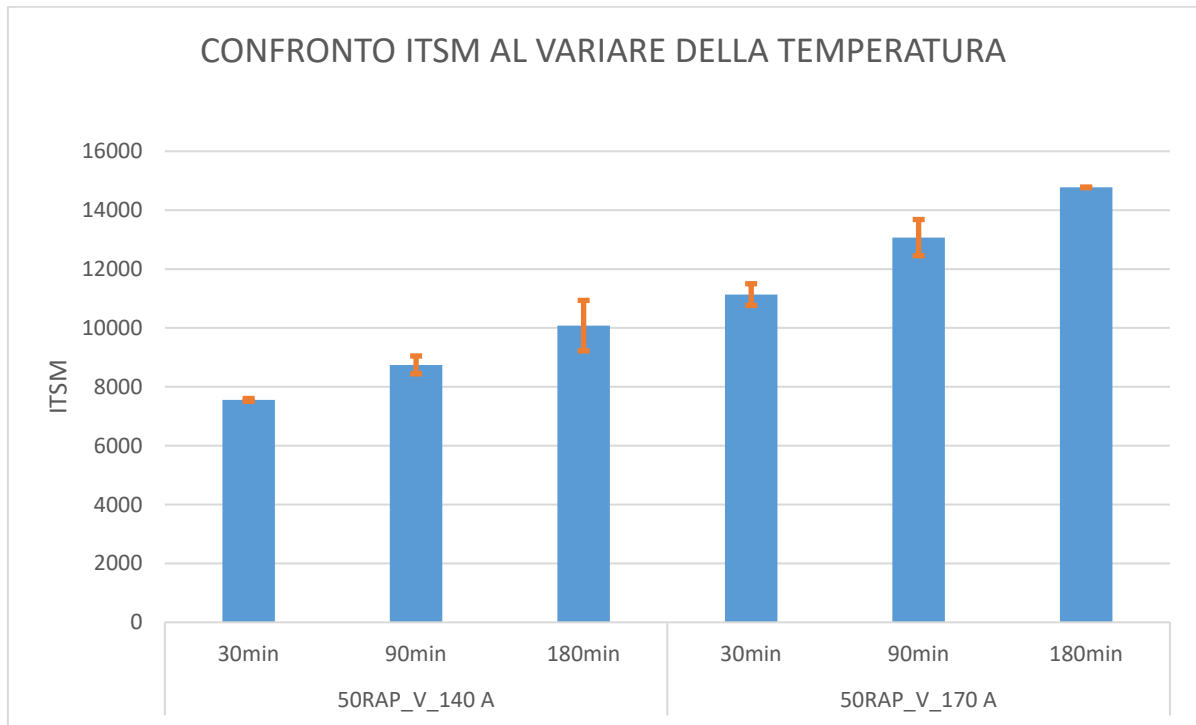


Figura 3.17: Confronto dell'ITSM della miscela 50RAP\_A al variare della temperatura

Dal grafico (fig. 3.17) notiamo che:

- l'aumento della temperatura di miscelazione incrementa notevolmente la rigidità della miscela;
- mentre nella miscela a 140°C i valori di ITSM variano poco per diversi tempi di miscelazione, nella miscela a 170°C notiamo che il modulo tende a crescere più rapidamente al crescere del tempo in forno.

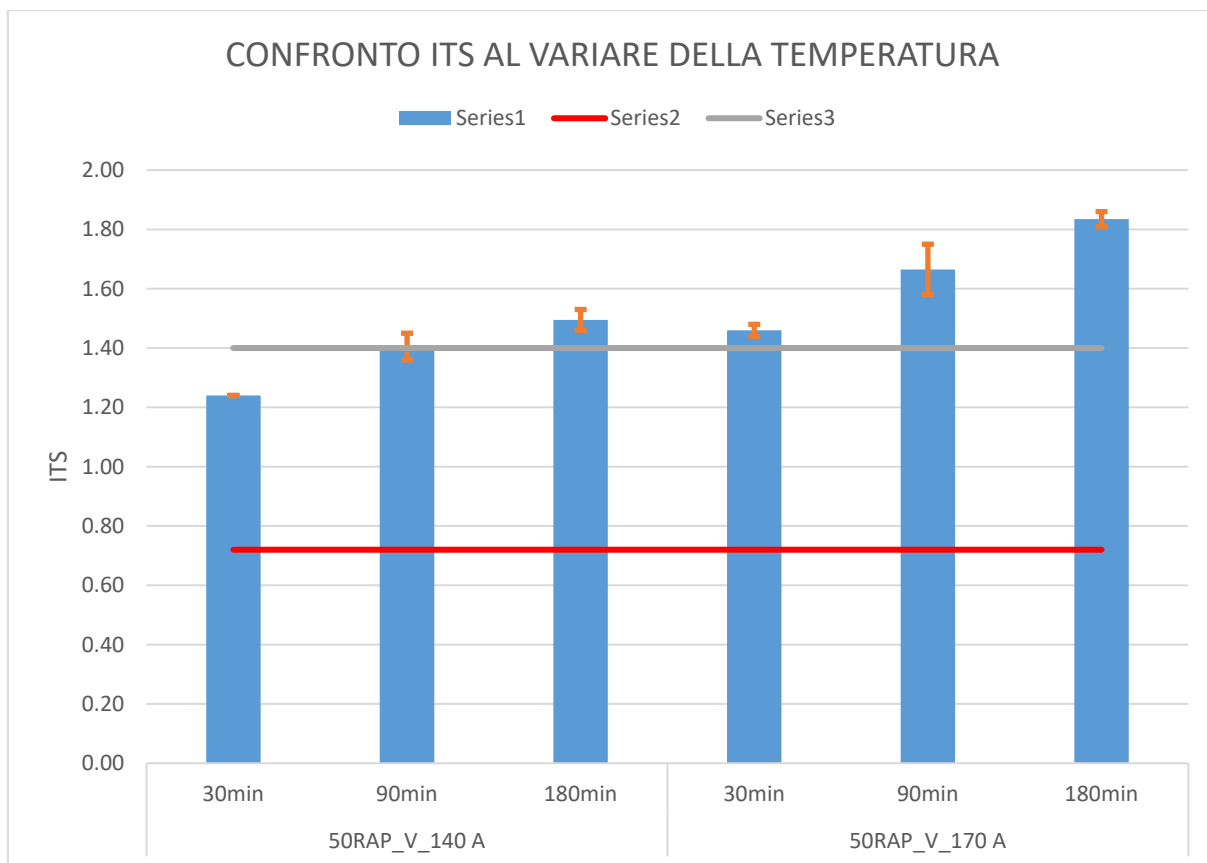
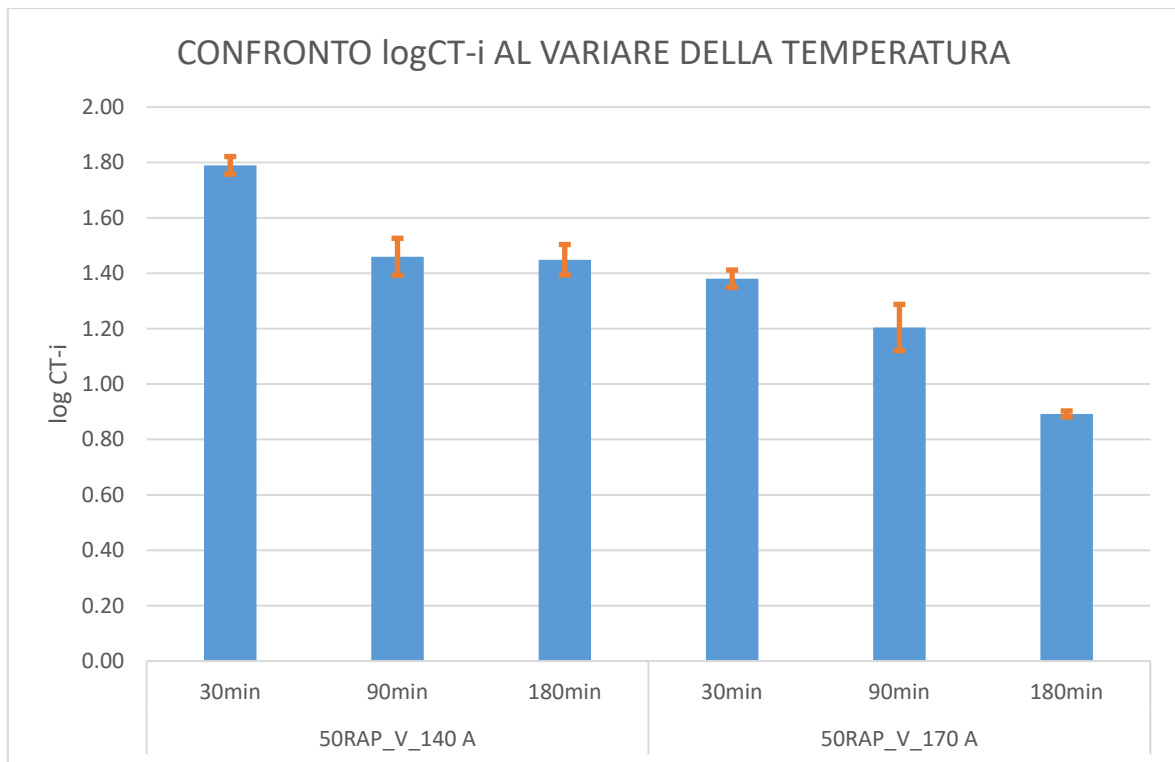


Figura 3.18: Confronto dell'ITS della miscela 50\_RAP\_A al variare della temperatura

Dal grafico di figura 3.18 possiamo notare che:

- i valori di ITS della miscela a 170°C sono superiori a quelli della miscela a 140°C e, a differenza di questi, non rientrano nei limiti del range prescritto dal Capitolato ANAS, eccetto per il provino compattato dopo 30 minuti in forno (valore leggermente inferiore al limite superiore).
- anche per la resistenza a trazione indiretta possiamo dire che questa aumenta più rapidamente col tempo di permanenza in forno per temperature più elevate.



*Figura 3.19: Confronto del logCt-i della miscela 50RAP\_A al variare della temperatura*

Da questo grafico notiamo che:

- all'aumentare della temperatura di miscelazione, i valori del logCt-i decrescono, in particolare per tempi di permanenza in forno superiori; ciò sta ad indicare che i provini realizzati a 170°C hanno un comportamento a rottura meno duttile, rispetto a quelli della stessa miscela a 140°C.
- per il mix 50RAP\_170\_A i valori del logCt-i decrescono maggiormente al crescere del tempo in forno. Questo ci permette di dire che l'efficacia dell'additivo A è minore per temperature più elevate, a causa del maggior stress termico subito dal bitume.

### 3.3.4. Mix 50\_RAP\_B

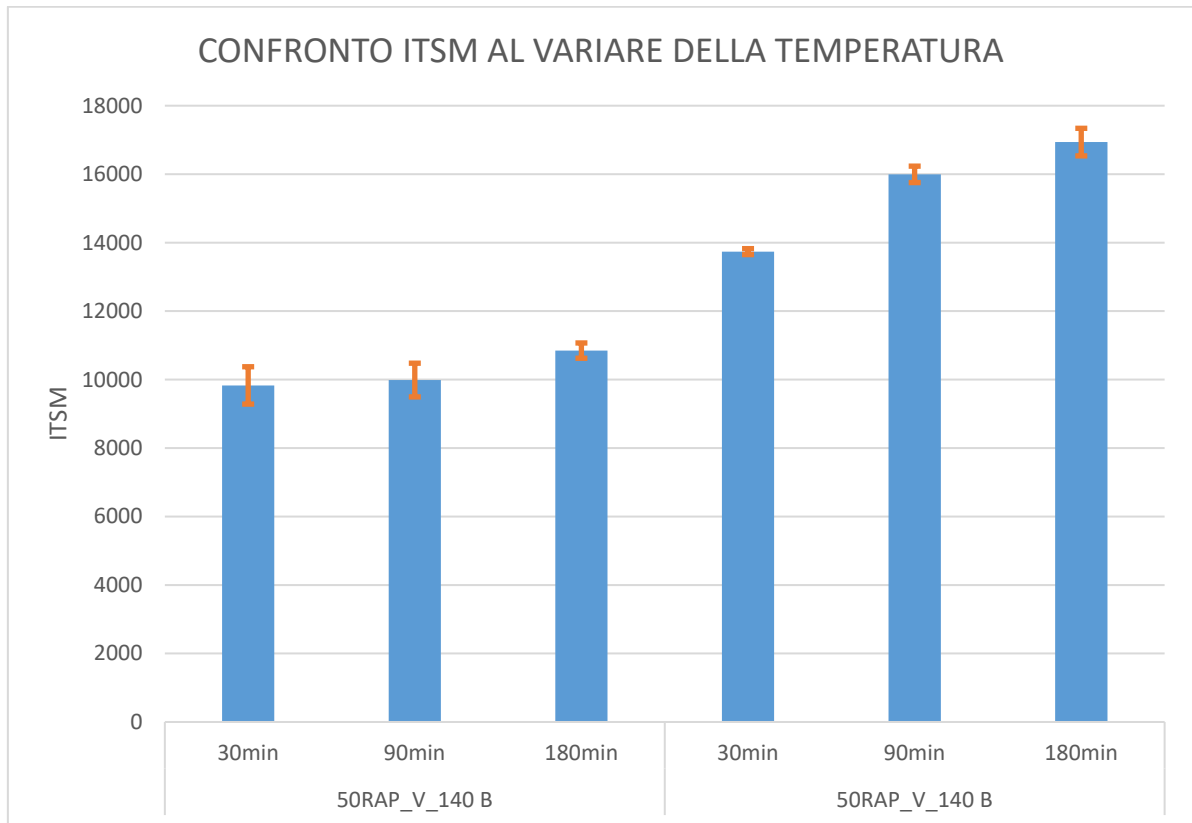


Figura 3.20: Confronto dell'ITSM della miscela 50\_RAP\_S al variare della temperatura

Dal grafico (fig. 3.20) si può evidenziare:

- una crescita dei moduli elastici del conglomerato bituminoso confezionato a una temperatura superiore; ciò indica che la miscela 50RAP\_170\_B sarà più rigida della stessa miscela a 140°C.
- un aumento maggiore dell'ITSM al crescere del tempo in forno per la miscela a 170°C, mentre per la miscela a 140°C i valori dei moduli si discostano di poco.

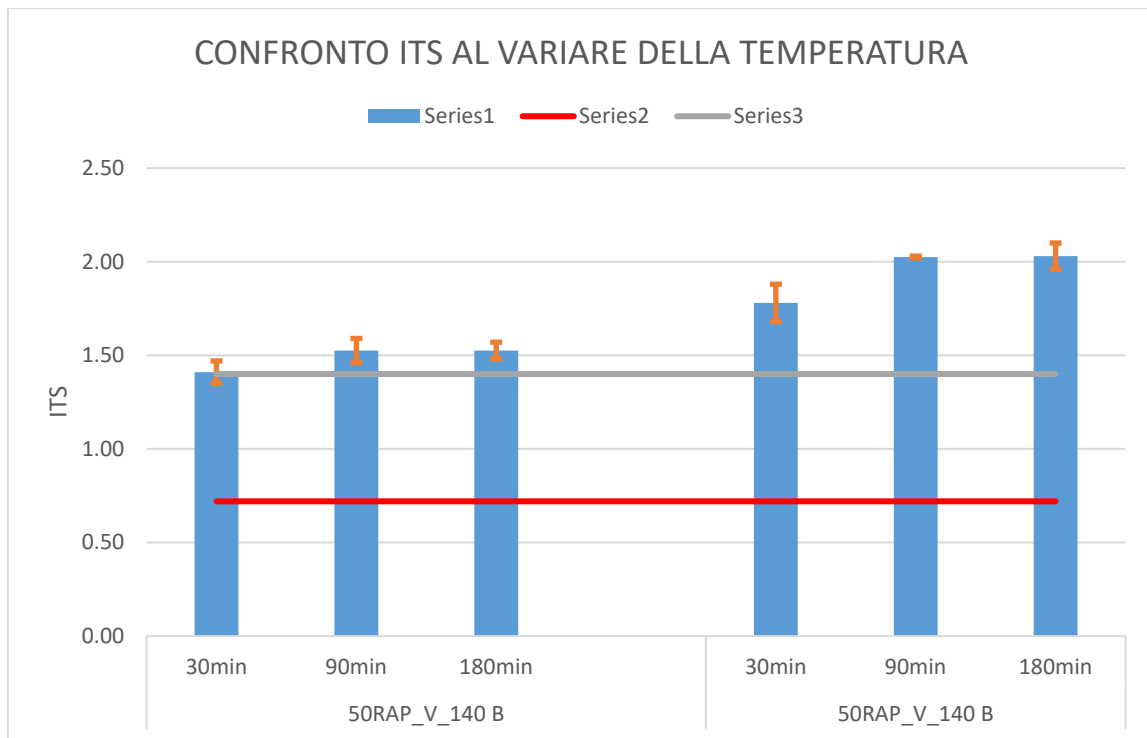
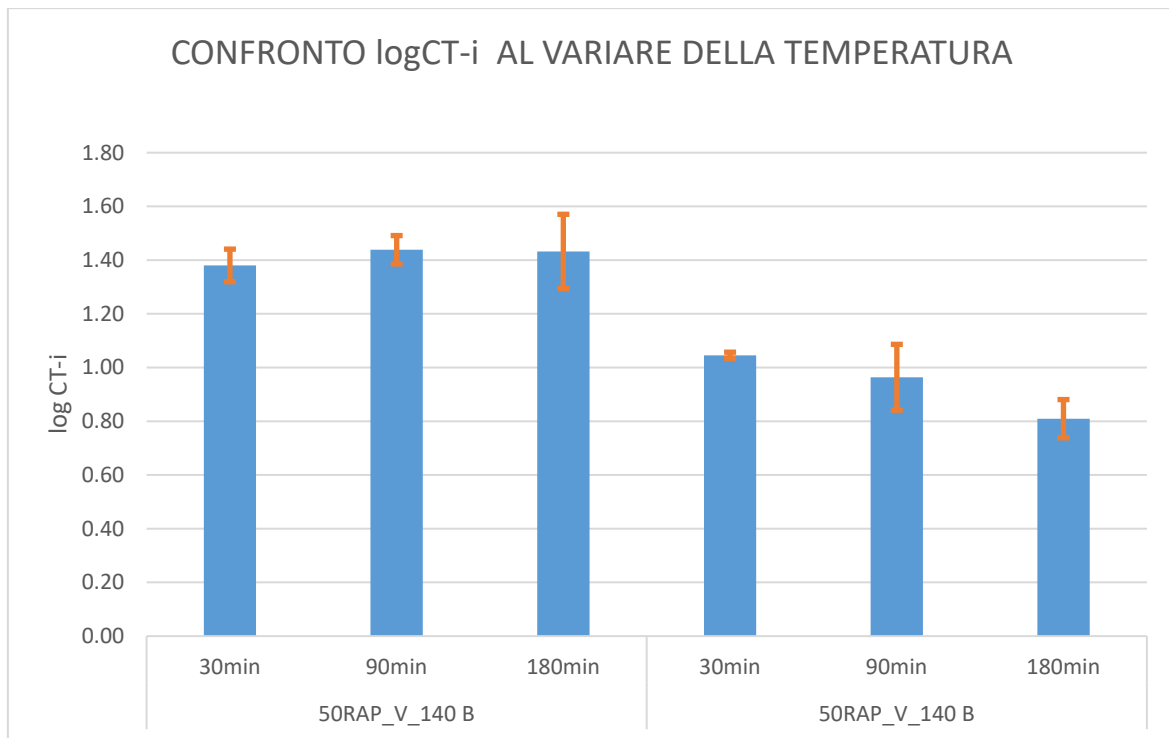


Figura 3.21: Confronto ITS della miscela 50\_RAP\_B al variare della temperatura

Dal grafico di figura 3.21, si può notare che:

- la resistenza a trazione indiretta della miscela sia maggiore al crescere della temperatura.
- mentre per la miscela a 140°C i valori di ITS rientrano nei limiti del range del Capitolato ANAS (eccetto il provino compattato dopo 180 minuti, che ha un valore di ITS leggermente superiore al limite superiore), per la miscela a 170°C nessun provino ha un valore di ITS che rientri in tale range.
- i valori di ITS crescano molto di più al variare del tempo in forno per la miscela a 170°C, mentre per la miscela a 140°C i valori di ITS non cambiano molto al variare del tempo in forno.



*Figura 3.22: Confronto logCt-i della miscela 50\_RAP\_S al variare della temperatura*

Dal grafico sopra riportato (fig. 3.22), possiamo notare che:

- il logCt-i diminuisce leggermente passando da una temperatura di 140°C a una di 170°C;
- la riduzione dei valori è più evidente nei provini compattati dopo 90 e 180 minuti in forno, mentre per i provini a 30 minuti il valore del logCt-i varia di poco.
- l'efficacia dell'additivo B non varia molto all'aumentare della temperatura di miscelazione, a differenza di quanto abbiamo visto per l'additivo A; ciò può essere dovuto al fatto che l'additivo B non è inserito nel bitume vergine, che subisce uno stress termico maggiore a 170°C, ma viene spruzzato direttamente sul fresato.

### **3.4. Confronto di RI e TI**

In questo paragrafo si riportano dei grafici in cui si valutano e confrontano i valori dei parametri RI (per le miscele con additivi rigeneranti) e TI (per valutare l'effetto della variazione della temperatura). Questi due parametri sono stati già definiti nel Capitolo 2, paragrafo 2.3.7.

- RI

<i>IMPASTO</i>	<i>Tempo</i>	<i>Numero</i>	<i>ITSMm [Mpa]</i>	<i>ITS [Mpa]</i>	<i>logCT-i</i>
<b>50RAP_V_140 A</b>	30 min	1	74,1	71,3	68,7
		2			
	90 min	1	60,7	61,9	30,3
		2			
	180 min	1	61,6	59,6	49,9
		2			
<b>50RAP_V_170 A</b>	30 min	1	44,3	53,0	52,4
		2			
	90 min	1	51,3	51,7	49,0
		2			
	180 min	1	53,6	55,5	31,8
		2			
<b>50RAP_V_140 B</b>	30 min	1	41,1	50,0	27,4
		2			
	90 min	1	42,4	46,9	28,0
		2			
	180 min	1	50,5	55,4	47,6
		2			
<b>50RAP_V_170 B</b>	30 min	1	15,0	14,9	15,6
		2			
	90 min	1	16,8	10,3	11,3
		2			
	180 min	1	25,1	20,0	12,0
		2			

*Tabella 3.23: RI delle miscele con additivi rigeneranti al variare della temperatura e del tempo in forno*

Nella tabella 3.23 sono stati confrontati i valori di RI per ciascun parametro (ITSM, ITS e logCt-i) per tutti i provini delle miscele con l'additivo A e l'additivo B, sia a 140°C sia a 170°C; possiamo notare che:

- RI-ITSM, a prescindere dal tempo in forno, si riduce all'aumentare della temperatura; ciò è più evidente all'aumentare del tempo di permanenza in forno e quindi per i provini compattati dopo 180 minuti la differenza tra i valori di RI-ITSM sarà maggiore.
- anche RI-ITS si riduce, a parità di tempo in forno, all'aumentare della temperatura.
- per quanto riguarda il logCt-i, invece, non possiamo individuare un andamento tipico al variare della temperatura; infatti, mentre per i provini a 30 minuti si ha un aumento di RI-logCt-i all'aumentare della temperatura, per i provini a 90 minuti e 180 minuti possiamo notare che il valore di RI-logCt-i si riduce all'aumentare della temperatura.
- in linea generale, possiamo dire che l'additivo A ha un'efficacia maggiore per T=140°C, in particolare per tempi in forno alti.
- infine, per quanto riguarda RI-logCt-i dell'additivo B, si può notare come questo tenda ad aumentare al crescere della temperatura, eccetto per i provini compattati dopo 180 minuti.
- l'additivo B non presenta grandi differenze in termini di efficienza al variare della temperatura, eccetto che per bassi tempi di permanenza in forno, dove si presenta molto efficace a temperature più alte.

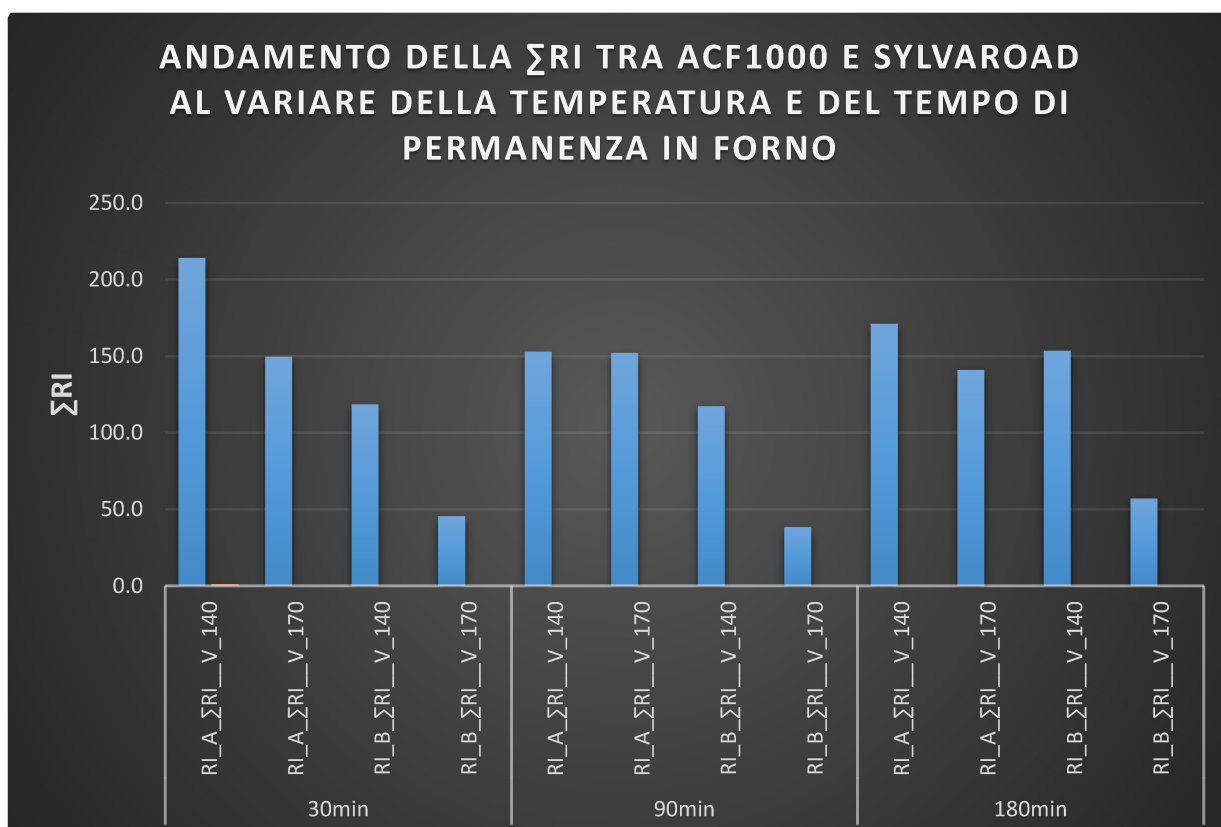


Figura 3.24: Confronto  $\Sigma$ RI tra ACF1000 e SYLVAROAD al variare del tempo e della temperatura



Andando invece a confrontare i valori di  $\Sigma RI$  dal grafico di figura 3.24, notiamo che

- i valori per le miscele con l'additivo A sono sempre maggiori di quelli delle miscele con l'additivo S, a parità di temperatura e tempo in forno. Ciò ci permette di dire che l'additivo A si presenta più efficace dal punto di vista delle proprietà meccaniche del conglomerato.
- Per le miscele realizzate a 170°C i valori di  $\Sigma RI$  si riducono molto per le miscele con l'additivo A, mentre per le miscele con l'additivo S la variazione di  $\Sigma RI$  al variare della temperatura è minore. L'additivo A sembra quindi soffrire maggiormente la temperatura.
- Per i provini compattati dopo 180 minuti possiamo notare che, a 170°C, si ha un valore di  $\Sigma RI$  maggiore per le miscele con l'additivo B.
- In conclusione, possiamo dire che per le miscele realizzate a 140°C si è mostrato più efficace l'additivo A, mentre per le miscele a 170°C non si notano grandi differenze tra i due additivi, eccetto che per i provini compattati dopo 30 minuti.

- **TI**

<i>IMPASTO</i>	<i>Tempo</i>	<i>Numero</i>	<i>ITSMm [Mpa]</i>	<i>ITS [Mpa]</i>	<i>logCT-i</i>
<b>00RAP_V_170</b>	30 min	1	7,0	5,2	13,6
		2			
	90 min	1	47,0	13,7	26,3
		2			
	180 min	1	51,7	36,2	34,9
		2			
<b>50RAP_V_170</b>	30 min	1	19,1	9,0	18,6
		2			
	90 min	1	35,4	20,3	25,1
		2			
	180 min	1	31,4	20,8	30,5
		2			
<b>50RAP_V_170 A</b>	30 min	1	47,4	20,8	22,9
		2			
	90 min	1	49,5	24,5	17,5
		2			

50RAP_V_170 B	180 min	1	46,6	32,1	38,4
		2			
	30 min	1	39,8	34,9	24,3
		2			
	90 min	1	60,2	47,2	33,0
		2			
180 min	1	56,1	47,6	43,5	
	2				

Tabella 3.25: TI delle miscele con additivi rigeneranti al variare della temperatura e del tempo in forno

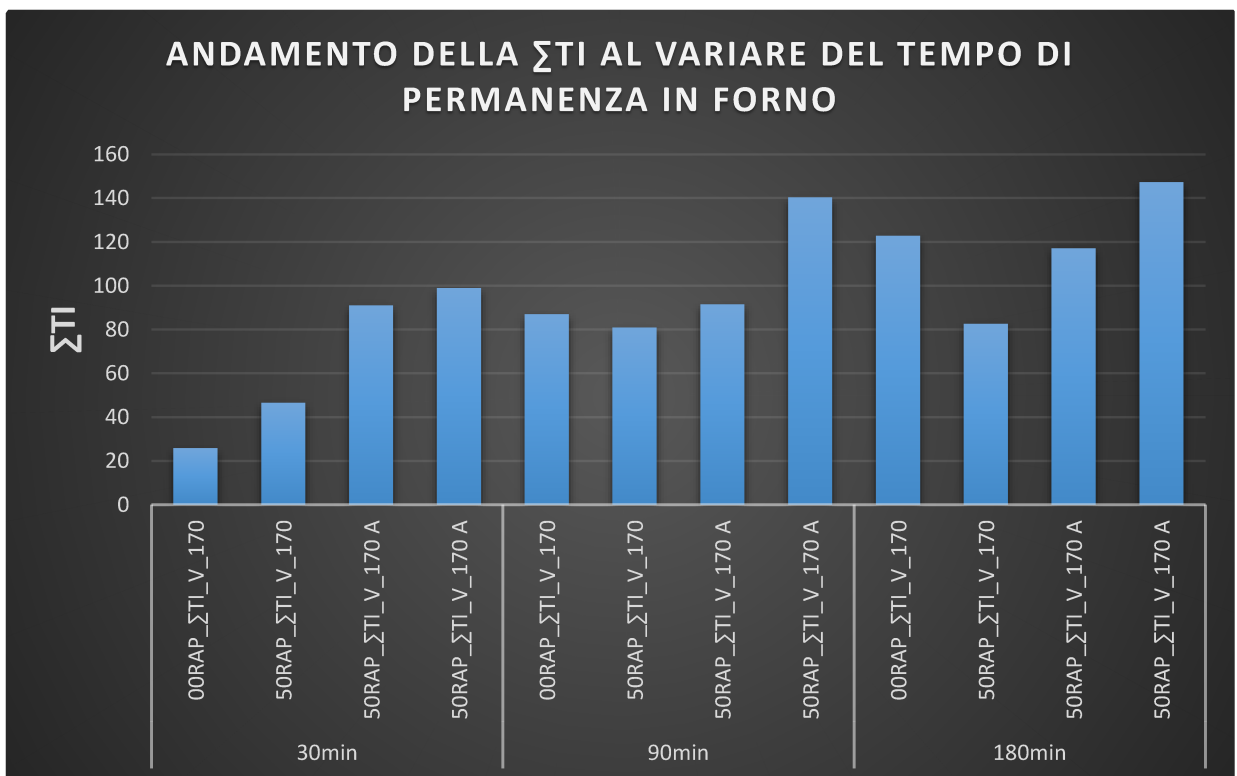


Figura 3.26: Confronto della  $\Sigma$ TI al variare del tempo in forno per tutte le miscele

Dal grafico di figura 3.26 notiamo che:

- a parità del tempo in forno, i valori più bassi di  $\Sigma$ TI si hanno per la miscela 00\_RAP, mentre quelli più alti per la miscela 50\_RAP\_A. Questo dimostra ancora una volta l'elevata suscettibilità dell'additivo A alla temperatura.
- A parità di miscela, notiamo che i valori più alti di  $\Sigma$ TI si hanno per i provini compattati dopo 180 minuti in forno, mentre quelli più bassi per i provini compattati dopo 30

minuti. Dunque possiamo dire che, all'aumentare del tempo in forno del conglomerato aumenta l'influenza della temperatura sulle proprietà meccaniche del conglomerato stesso.

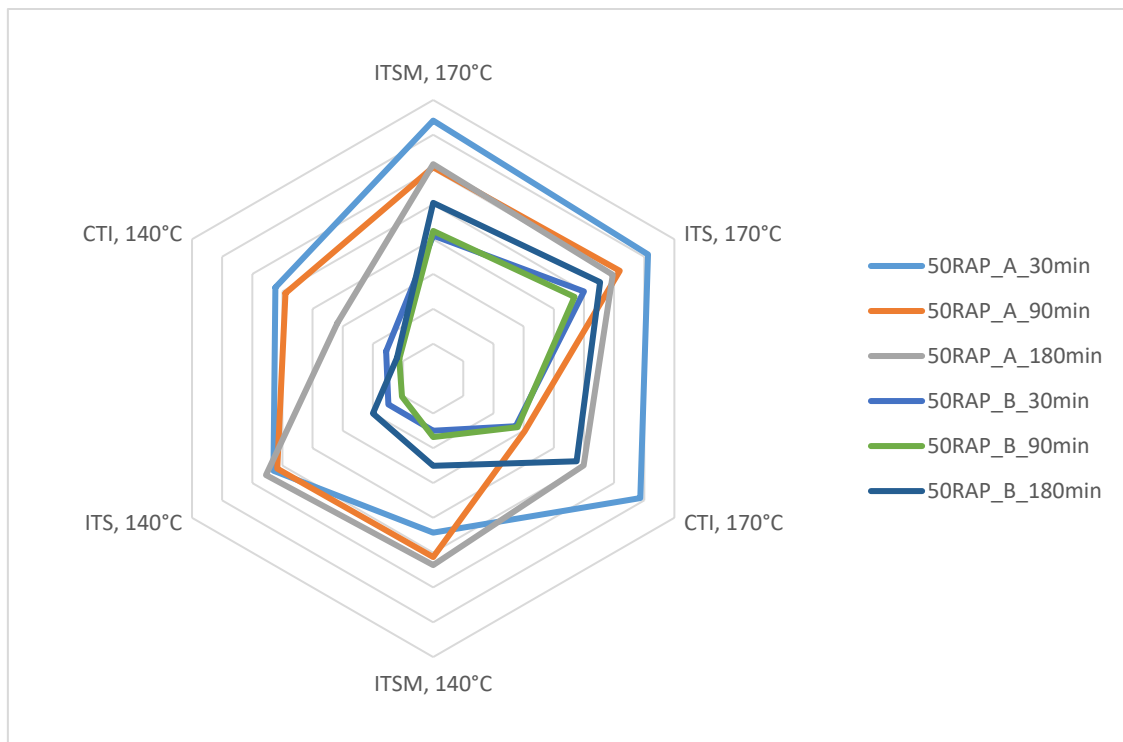


Figura 3.27: RI delle miscele con l'additivo A e B

Questo grafico (fig. 3.27) permette di analizzare al meglio i valori di RI delle miscele realizzate con additivi rigeneranti e di confrontarli tra loro. Come possiamo osservare, ad ogni miscela corrisponde un esagono, i cui vertici corrispondono ai valori di RI (ITSM, ITS e logCT-i) a 140°C e 170°C.

Ovviamente, più grandi sono i valori di RI per ogni parametro, più i lati dell'esagono saranno lunghi e l'area dell'esagono maggiore.

Osservando la figura, notiamo che:

- Tutte le miscele propongono degli esagoni maggiormente sviluppati dal lato dei 140°C, testimoniando l'azione negativa della temperatura.
- Gli esagoni più grandi sono quelli delle miscele con l'additivo A. Tale additivo è infatti risultato essere il più efficace.
- A parità di miscela gli esagoni tendono a diventare più piccoli all'aumentare del tempo in forno, testimoniandone l'azione negativa.

### 3.5 Grafici prove FTIR

È stato eseguito lo studio dell'indice del carbonile e del solfossido (indicati rispettivamente  $I_{CO}$  e  $I_{SO}$ ) sia sul bitume VIS BEAKING e sul PRIMARIO.

Qui di seguito sono riportati grafici ottenuti dalla prova FTIR.

#### Indice $I_{CO}$

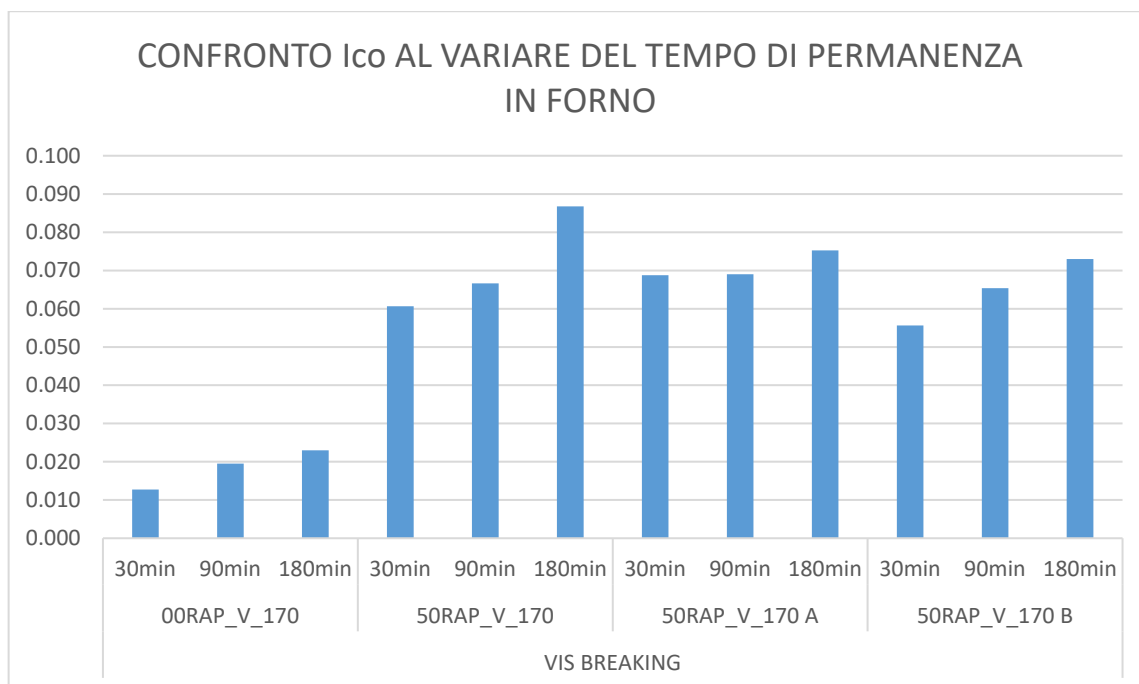


Figura 3.28: CONFRONTO  $I_{CO}$  AL VARIARE DEL TEMPO DI PERMANENZA IN FORNO

- Si nota che l'indice  $I_{CO}$  (carbonile) aumenta all'aumentare del tempo in forno;
- Nella miscela dove non è presente il fresato, abbiamo un basso indice di carbonile.

## Indice Iso

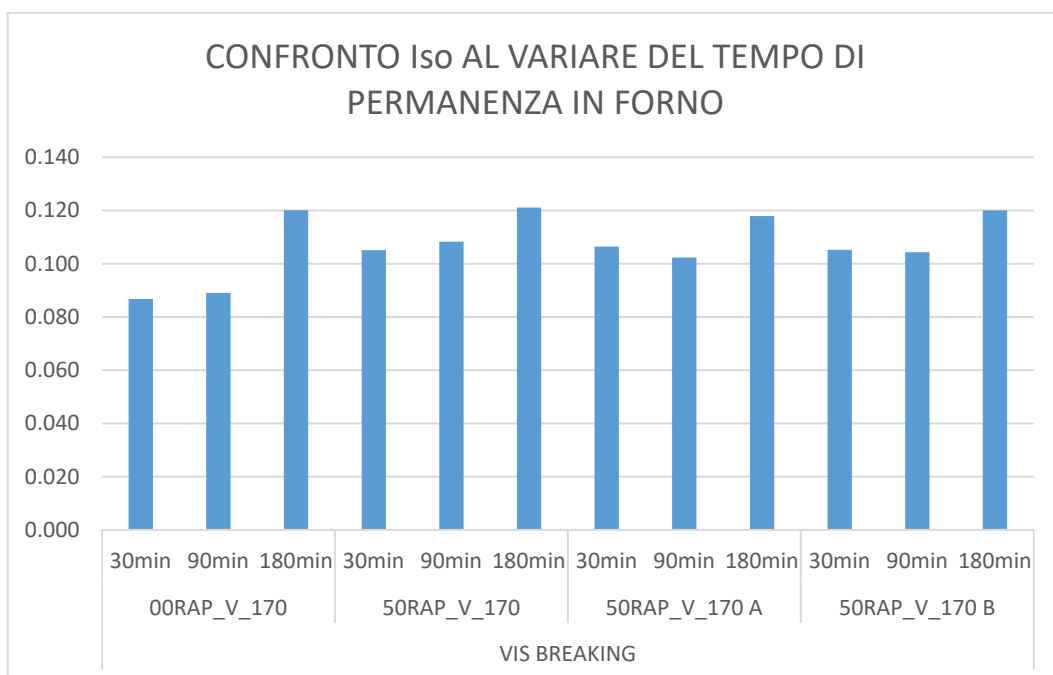


Figura 3.29: CONFRONTO Iso AL VARIARE DEL TEMPO DI PERMANENZA IN FORNO

- L'indice Iso (solfossido) tende ad aumentare all'aumentare del tempo in forno sulla miscela 00RAP\_V\_170 e 50RAP\_V\_170
- Nelle miscele dove è presente l'additivo, tale indice resta costante a tempo 30 e 90 minuti, mentre a tempo 180 minuti cresce.
- I valori di solfossido nelle miscele sono costanti a parità di tempo tranne per la miscela dove non è presente il fresato

## Indice Ico+Iso

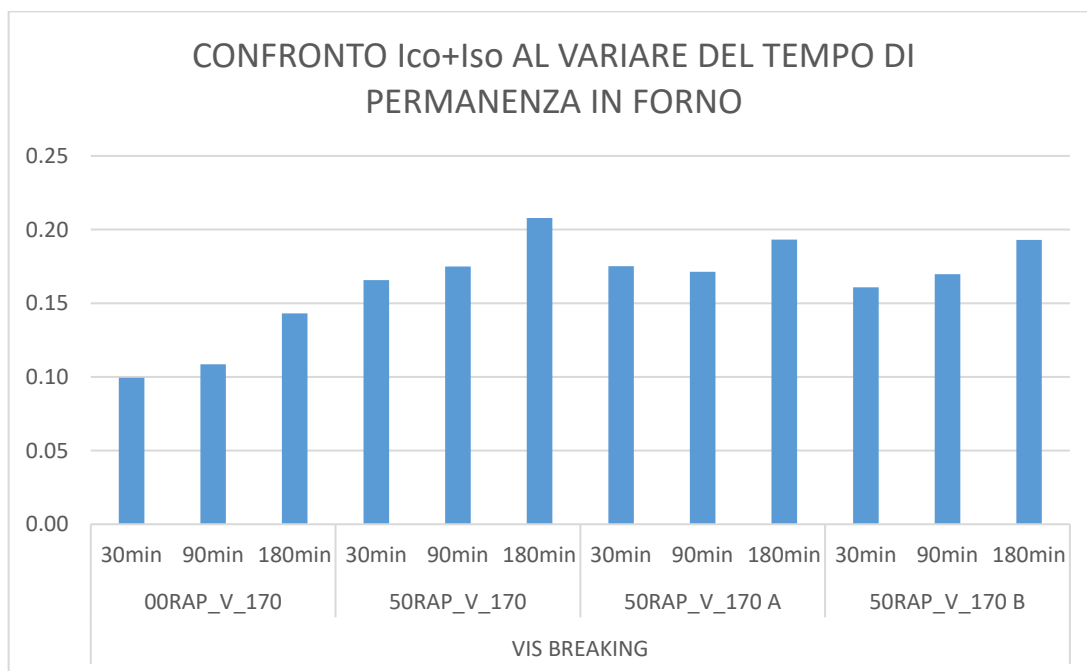


Figura 3.30: CONFRONTO Ico+Iso AL VARIARE DEL TEMPO DI PERMANENZA IN FORNO

- Tali indici aumentano all'aumentare del tempo in forno su tutte le miscele;
- I valori di carbonile e solfossido sono simili su tutte le miscele tranne per la miscela; dove non è presente il fresato 00RAP;

### Confronto Ico a parità di tempo in forno al variare del tipo di miscela.

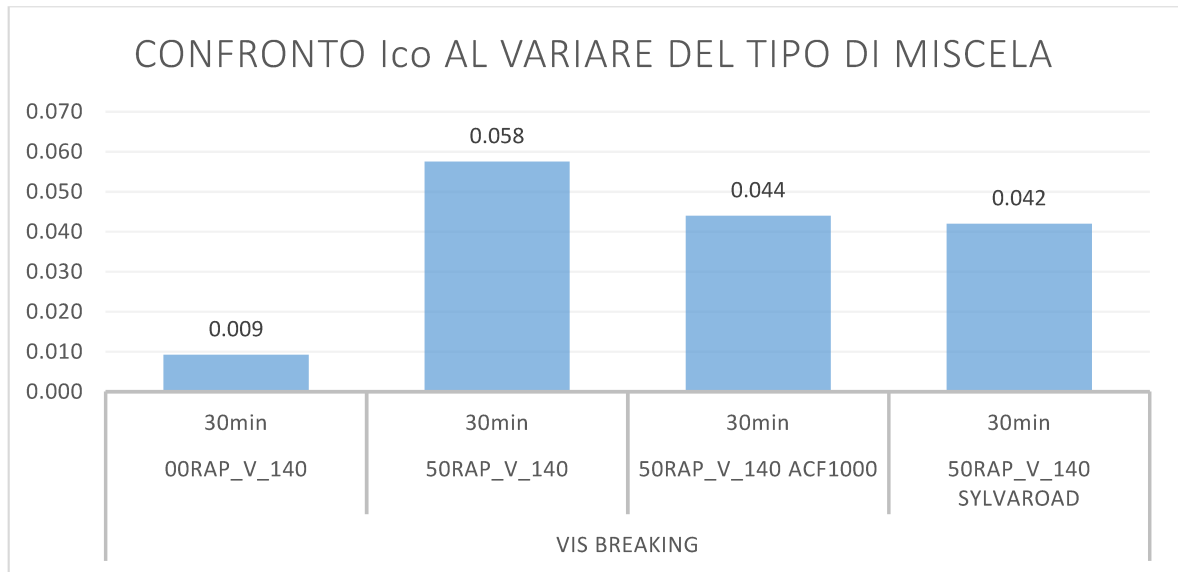


Figura 3.31: CONFRONTO Ico AL VARIARE DEL TIPO DI MISCELA

- Il carbonile assume valori elevati sulla miscela dove non è presente nessun additivo;
- Tale indice ha valori simili sulle miscele dove è presente l'additivo;
- Nella miscela 00RAP\_V\_140 ha valori molto bassi rispetto alle altre miscele;

### Confronto Iso a parità di tempo in forno al variare del tipo di miscela.

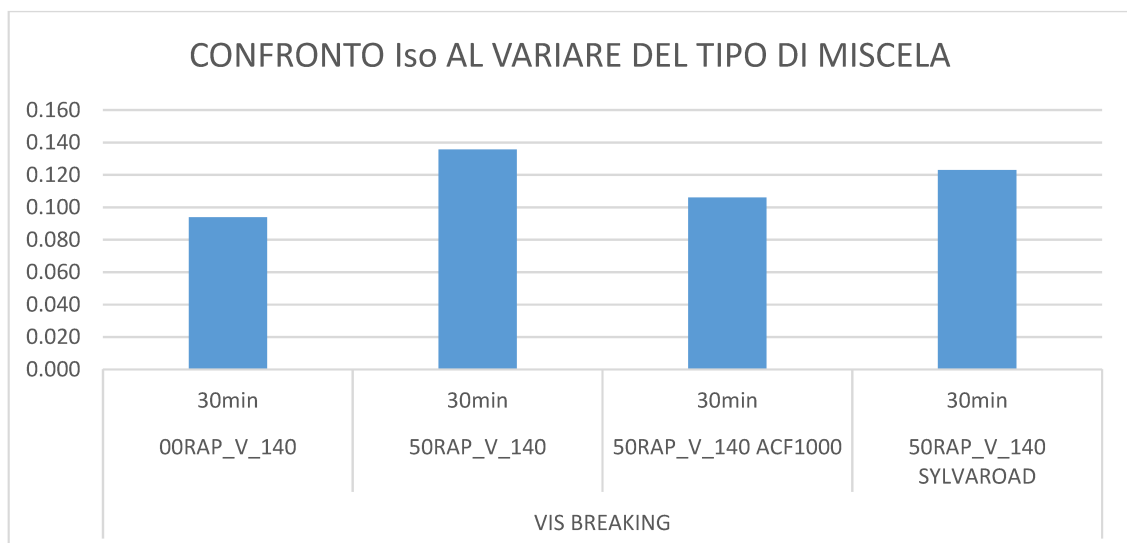


Figura 3.32: CONFRONTO Iso AL VARIARE DEL TIPO DI MISCELA

- I valori del solfossido sono maggiori nella miscela 50RAP\_V\_140 rispetto alle altre miscele, come abbiamo visto per il carbonile;

### Confronto Ico a parità di tempo in forno al variare del tipo di bitume

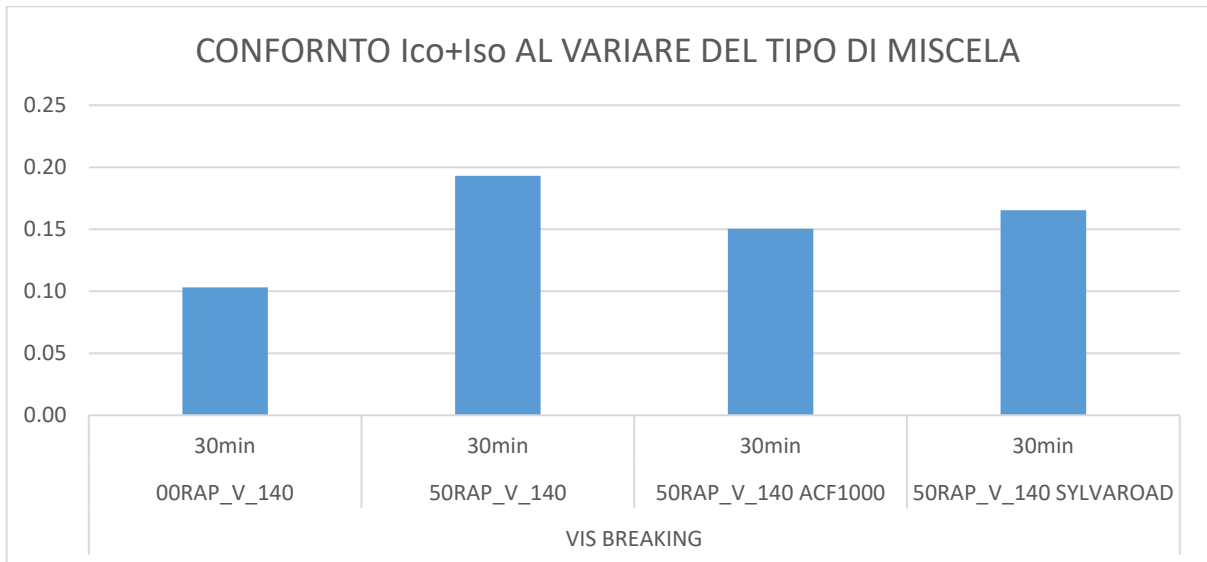


Figura 3.33: CONFORNTO Ico+Iso AL VARIARE DEL TIPO DI MISCELA

In questo grafico si presenta lo stesso andamento dei grafici visti precedentemente.

### Confronto Ico a parità di tempo in forno al variare del tipo di bitume

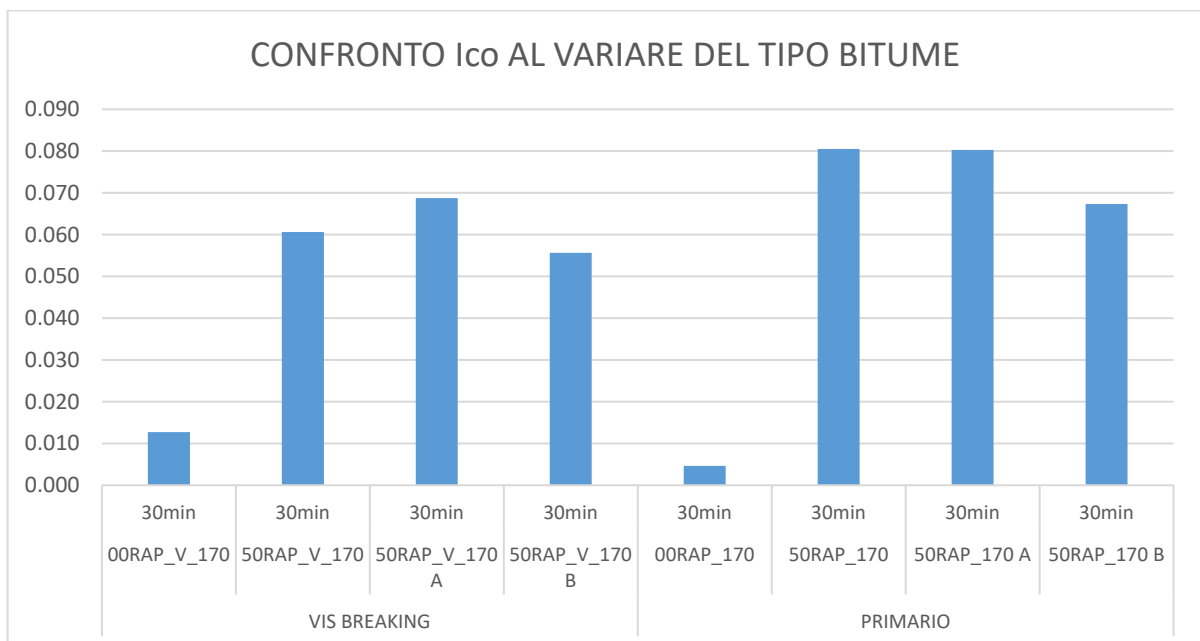


Figura 3.34: CONFRONTO Ico AL VARIARE DEL TIPO BITUME



- La miscela 50RAP\_V\_170 A assume valori di Ico più alti rispetto alle altre miscele;
- L'indice Ico assume valori più bassi per il bitume VIS BRAKING rispetto al bitume PRIMARIO salvo per la miscela 00RAP\_V\_170 VIS BRAKING.

### Confronto Iso a parità di tempo in forno al variare del tipo di bitume

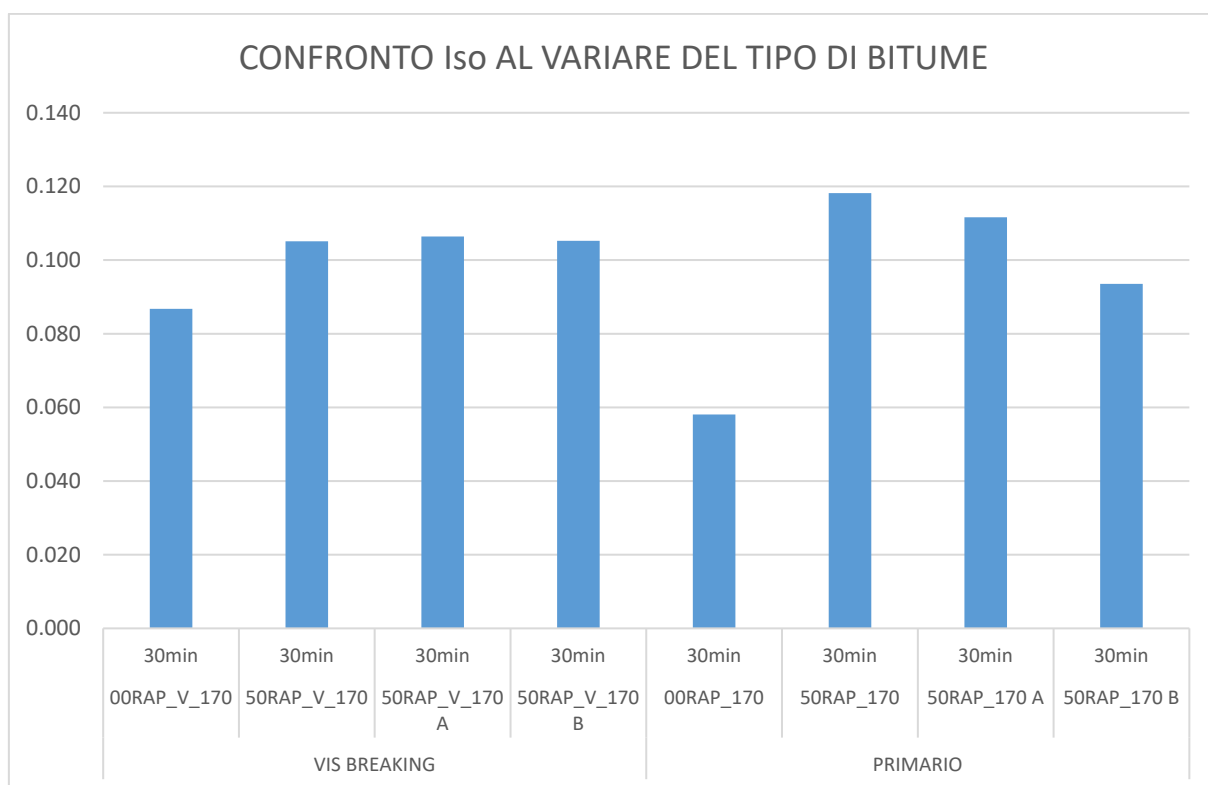


Figura 3.35: CONFRONTO Iso AL VARIARE DEL TIPO DI BITUME

- Il solfossido presenta valori simili nelle miscele ad esclusione nella miscela dove non è presente il fresato 00RAP
- l'indice Iso nel bitume VIS BRAKING ha valori simili rispetto al bitume PRIMARIO ad esclusione per le miscele 00RAP dove il primario ha un valore molto inferiore.

### Confronto Ico+Iso a parità di tempo in forno al variare del tipo di bitume

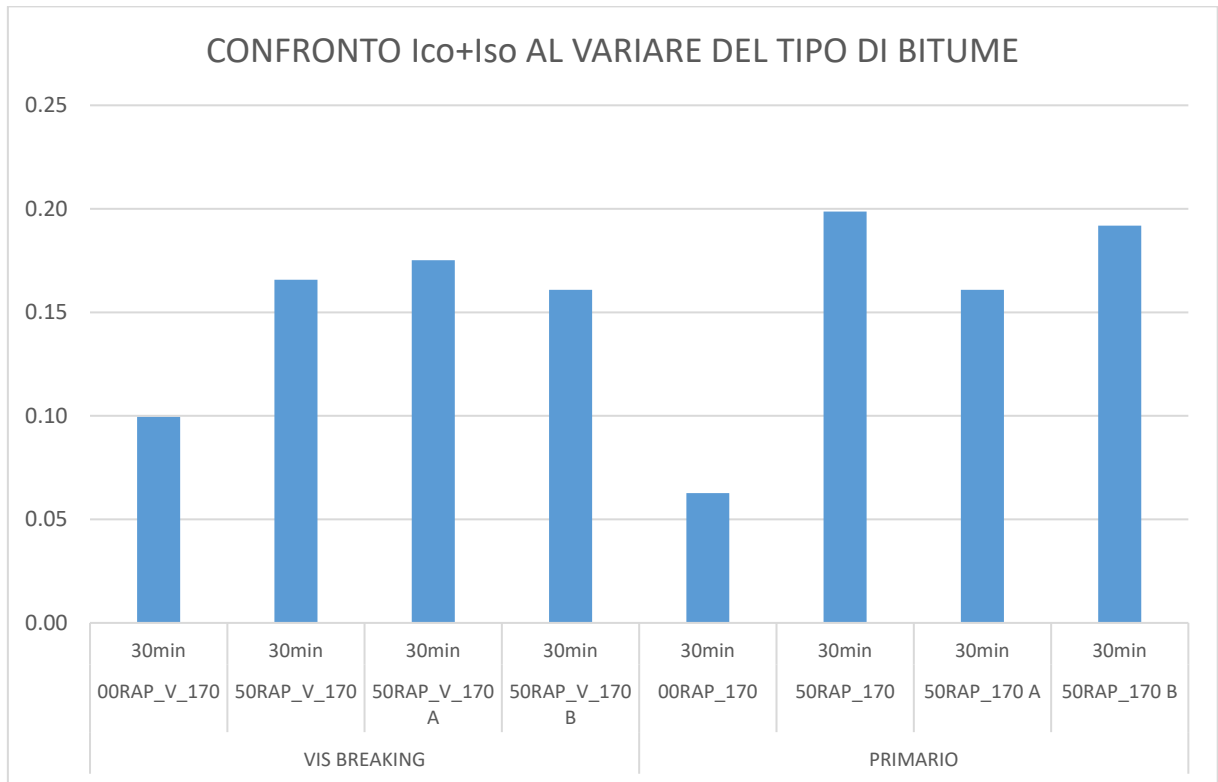


Figura 3.36: CONFRONTO Ico+Iso AL VARIARE DEL TIPO DI BITUME

- Dal grafico si evince che i valori Ico+Iso sono più alti per il bitume PRIMARIO rispetto al bitume VIS BRAKING, ad esclusione per la miscela OORAP.

## Conclusioni

Nella presente tesi ci si è occupati dell'invecchiamento a breve termine del conglomerato bituminoso, realizzato con materiale di risulta, all'aumentare del tempo tra miscelazione e stesa, simulata in laboratorio tramite diversi tempi di permanenza in forno (30 minuti, 90 minuti, 180 minuti), e dell'eccessiva ossidazione del bitume vergine nella fase di confezionamento effettuata a 140°C e 170°C. In particolare è stata testata la capacità di diversi additivi rigeneranti nel recuperare il bitume vecchio contenuto nel fresato, valutando la lavorabilità della miscela, la rigidità e la resistenza a trazione indiretta dei provini confezionati. Inoltre, per valutare l'efficienza di tali additivi, essi sono stati applicati su due diversi tipi di RAP, andandone a confrontare i risultati ottenuti.

Alla fine di questo lavoro sperimentale possiamo concludere che:

- L'aggiunta del 50% di fresato aumenta notevolmente sia il modulo di rigidità che la resistenza a trazione indiretta della miscela rispetto al 00RAP. Inoltre, l'utilizzo degli additivi rigeneranti fa diminuire i valori delle caratteristiche meccaniche, ma non a sufficienza da rientrare nelle specifiche di Capitolato tranne per i provini 50RAP\_V\_140\_A 30 minuti, 50RAP\_V\_140\_A 60 minuti e 50RAP\_V170\_B 30 minuti;
- Per tutte le miscele testate, i valori, sia delle caratteristiche volumetriche che di quelle meccaniche (ITSM, ITS, ITC), crescono all'aumentare del tempo di permanenza in forno;
- Nel confronto delle miscele realizzate con il RAP, contrariamente a quanto ci si aspettava, il modulo di rigidità della miscela 50\_RAP è più alto rispetto a quello delle miscele con additivi rigeneranti. La miscela 50\_RAP è la più fragile in quanto presenta valori di resistenza a trazione indiretta più elevati. Tra i due additivi rigeneranti utilizzati, quello che risulta essere più efficace l'additivo A che presenta valori di ITS molto vicini al limite di Capitolato. Per quanto riguarda il coefficiente di trazione indiretta più basso è quello della miscela senza fresato, ma allo stesso modo rispetta il limite inferiore del Capitolato. Tutti gli altri mix presentano valori molto al di sopra di tale limite;
- Nel confronto delle miscele a 170°C, a parità di tempo in forno, si nota un peggioramento generale delle proprietà meccaniche e la causa di ciò è il maggior invecchiamento subito dal bitume vergine. Ciò giustifica anche il fatto che a 170°C le

miscele realizzate con gli additivi non rientrino nei range del Capitolato ANAS, per quanto riguarda la resistenza a trazione indiretta (ITS).

- Nel confronto delle miscele realizzate con il RAP, notiamo che l'utilizzo degli additivi abbassa notevolmente il modulo di rigidezza del conglomerato dopo mezz'ora, ma la differenza dell'ITSM tra la miscela con 50% di fresato e quelle con l'additivo diminuisce sempre più all'aumentare della permanenza in forno e dopo 3 ore si può notare come l'effetto dell'additivo sia trascurabile. L'additivo che ha abbassato più di tutti la resistenza del conglomerato è A contrastando anche abbastanza bene l'invecchiamento della miscela all'aumentare del tempo di permanenza in forno. Per quanto riguarda l'ITS, però, siamo ancora al di sopra dei limiti di Capitolato. Si può notare come, in particolare nei provini realizzati dopo mezz'ora, i due additivi rigeneranti, a parità di vuoti, hanno risultati pressoché uguali;

Inoltre, dal confronto dei valori dei parametri RI e TI, possiamo affermare che:

- I valori di RI più alti si hanno per le miscele a 140°C e ciò testimonia l'effetto negativo della temperatura sulle prestazioni meccaniche delle miscele;
- Per le miscele a 140°C, i valori più alti di RI si hanno per l'additivo A; nelle miscele a 170°C, invece, non si evidenziano grandi differenze tra i due additivi;
- In generale, i valori di TI più alti si hanno per le miscele 50\_RAP\_A e ciò evidenzia il fatto che l'additivo A sia particolarmente dipendente dalla temperatura; per quanto riguarda l'additivo S i valori di TI sono minori rispetto all'additivo A.

Infine, nella prova FTIR possiamo dire che:

- il carbonile e il solfossido nel bitume VIS BRAKING aumentano al variare della miscela e nel bitume PRIMARIO sono presenti valori più alti di carbonile rispetto al bitume VIS BRAKING eccetto per il provino 00RAP\_V\_170.

## Bibliografia e Sitografia

- Felice A. Santagata, "Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali", Pearson. Vol. 1 e vol.2;
- Tesi di Laurea di varie sperimentazioni realizzate all'interno del Laboratorio di Strade del DICEA dell'Università Politecnica delle Marche;
- Cataloghi ACTIVA (Asphalt Applications);
- UNI EN 12697-5 - Determinazione della massa volumica massima - 2008;
- UNI EN 12697-6 - Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi - 2012;
- UNI EN 12697-8 - Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi - 2003;
- UNI EN 12697-26 - Rigidezza - 2012;
- UNI EN 12697-23 - Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi - 2006;
- [http://pqrs-itm.it/images/stories/documenti/Le\\_pavimentazioni\\_stradali.pdf](http://pqrs-itm.it/images/stories/documenti/Le_pavimentazioni_stradali.pdf).