



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)*

**Conglomerati bituminosi ad elevato contenuto di  
fresato con bitume rigenerante**

**Asphalt mixtures with high reclaimed asphalt and  
regenerating bitumen**

*Relatore:*

***Prof. Ing. Maurizio Bocci***

*Correlatore:*

***Dott. Ing. Carlo Carpani***

*Tesi di Laurea di:*

***Marzia Palazzese***

*Anno Accademico 2022/2023*



<b>Introduzione.....</b>	<b>3</b>
<b>Capitolo 1 -Stato dell'arte.....</b>	<b>5</b>
1.1 La pavimentazione stradale.....	5
1.2 Il conglomerato bituminoso.....	7
1.3 Il riciclaggio in ambito stradale.....	8
1.3.1 Riciclaggio a caldo, in impianto .....	9
1.3.2 Riciclaggio a caldo, in sito .....	13
1.4 Il fresato stradale.....	14
1.5 Il bitume.....	16
1.5.1 Invecchiamento del bitume.....	17
1.5.2 Additivi.....	20
<b>Capitolo 2 - Programma sperimentale e metodi di prova.....</b>	<b>22</b>
2.1 Obiettivo della ricerca.....	22
2.2 Metodi di prova.....	22
2.1.1 Determinazione della percentuale di vuoti .....	23
2.1.2 Valutazione granulometrica e del bitume nelle miscele .....	25
2.1.3 Prova di Modulo a Trazione Indiretta, ITSM (UNI EN 12697-26).....	30
2.1.4 Prova di Trazione Indiretta, ITS (UNI EN 12697-23).....	33
2.1.5 Prova di resistenza a fatica a trazione indiretta, ITFT (UNI EN 12697-24) .....	37
2.1.6 Caratterizzazione reologica del bitume .....	39
2.1.6.1 Prova di Strain Sweep, SS .....	41
2.1.6.2 Prova di Frequency Sweep, FS.....	42
2.1.6.3 Prova Multiple Stress Creep Recovery, MSCR.....	44
2.1.6.4 Prova Linear Amplitude Sweep, (LAS).....	45
2.1.7 Spettroscopia a Infrarossi in Trasformata di Fourier, FTIR .....	46
2.1.8 Codifica dei provini.....	50
<b>Capitolo 3 – Materiali indagati e problematiche dell'impianto.....</b>	<b>52</b>
3.1 Materiali indagati.....	52
3.2 Problematiche dell'impianto .....	57

<b>Capitolo 4 – Risultati sperimentali, PARTE A</b> .....	<b>59</b>
4.1 <i>Contenuto di vuoti</i> .....	59
4.1.1 Contenuto di vuoti nello strato di base .....	59
4.1.2 Contenuto di vuoti nello strato di binder .....	62
4.2 <i>Risultati dell'analisi granulometrica e del contenuto di bitume</i> .....	65
4.2.1 Risultati granulometria e contenuto di bitume nello strato di base .....	65
4.2.2 Risultati granulometria e contenuto di bitume nello strato di binder .....	67
4.3 <i>Risultati prove di modulo a trazione indiretta (ITSM)</i> .....	69
4.3.1 Risultati prove di modulo per lo strato di base .....	69
4.3.2 Risultati prove di modulo per lo strato di binder .....	71
4.4 <i>Risultati prove a trazione indiretta (ITS)</i> .....	73
4.4.1 Risultati prove a trazione indiretta per lo strato di base .....	74
4.4.2 Risultati prove a trazione indiretta per lo strato di binder .....	77
4.5 <i>Risultati prove a fatica (ITFT)</i> .....	79
<b>Capitolo 5 – Risultati sperimentali, PARTE B</b> .....	<b>83</b>
5.1 <i>Risultati Strain Sweep</i> .....	83
5.2 <i>Risultati Frequency Sweep</i> .....	85
5.2.1 Modello 2S2P1D BINDER15% .....	90
5.2.2 Modello 2S2P1D BINDER50% .....	91
5.2.3 Rappresentazione dei dati nelle prove in regime oscillatorio .....	92
5.2.3.1 Piano di Black e Cole-Cole Binder15% .....	93
5.2.3.2 Piano di Black e Cole-Cole Binder50% .....	94
5.2.4 Confronto tra le miscele indagate .....	95
5.3 <i>Risultati Multiple Stress Creep Recovery</i> .....	97
5.4 <i>Risultati Linear Amplitude Sweep, LAS</i> .....	101
5.5 <i>Risultati Spettroscopia a Infrarossi in Trasformata di Fourier, FTIR</i> .....	101
<b>Capitolo 6 – Conclusioni</b> .....	<b>106</b>
<b>Capitolo 7 - Bibliografia e Sitografia</b> .....	<b>109</b>
7.1 <i>Normativa di riferimento</i> .....	110

## ***Introduzione***

La crescente consapevolezza sulle problematiche relative all'impatto dell'uomo sull'ambiente e la maggiore attenzione all'utilizzo consapevole delle risorse ha messo in primo piano l'esigenza di procedere verso uno sviluppo economico di tipo sostenibile che incentivi il riutilizzo delle materie prime. In tale prospettiva anche l'ingegneria stradale sta muovendo i suoi passi investendo sia sullo studio di soluzioni innovative che siano in grado di garantire infrastrutture sempre più green, sicure e durevoli sia sulla ricerca di materiali ecosostenibili che consentano di ridurre i consumi energetici e le emissioni nocive, oltre che permettere un consistente risparmio delle risorse. Difatti uno dei temi di particolare interesse, in quest'ambito, è quello del riciclaggio delle pavimentazioni stradali. Viene definito RAP o più comunemente "fresato" il materiale proveniente dalla demolizione di pavimentazioni stradali ammalorate o a termine della loro vita utile. Si tratta di un materiale ricco in quanto contiene in sé materiali preziosi quali aggregati e legante che, se opportunamente trattati, possono costituire un'importante risorsa. Il loro utilizzo, infatti, consente di perseguire e raggiungere significativi benefici ambientali unitamente ad un consistente risparmio economico.

In questo contesto la seguente tesi di ricerca ricade nell'ambito di una convenzione tra l'Università Politecnica delle Marche e la società "Aeroporti di Roma" che prevede la valutazione delle caratteristiche prestazionali di una miscela sperimentale con bitume contenente agenti rigeneranti e il 50% di fresato riciclato a caldo realizzata sia per lo strato di base che di binder, che sono state poi confrontate con miscele di riferimento con il 15% di fresato, con l'intento di verificare sperimentalmente la possibilità di poter incrementare la percentuale di materiale di riuso da poter impiegare. Inoltre, si è focalizzata l'attenzione sulle criticità dell'impianto che si è occupato della realizzazione di questi impasti che non ha le dovute caratteristiche per riciclare elevati quantitativi di fresato.

Il programma d'indagine ha previsto una prima fase di caratterizzazione volumetrica, granulometrica e meccanica dei conglomerati suddetti e una seconda fase di studio delle proprietà reologiche del legante estratto dalle miscele. Infine, si è proceduto con un'analisi semi qualitativa delle caratteristiche chimiche del bitume stesso.

La presente tesi è strutturata come segue:

- *Capitolo 1 – Stato dell’arte;*  
Sono sintetizzate le principali tipologie e caratteristiche delle pavimentazioni stradali e dei suoi materiali costituenti. Nel dettaglio sono poi analizzate le principali tecniche del riciclaggio a caldo e vengono descritti i limiti sulle percentuali di fresato da poter utilizzare;
- *Capitolo 2 – Programma sperimentale e metodi di prova:*  
Viene esposto l'obiettivo del programma sperimentale e si presentano le apparecchiature utilizzate e le procedure di prova seguite.
- *Capitolo 3 – Materiali indagati e problematiche dell’impianto:*  
Vengono descritti i materiali oggetto di questa sperimentazione con riferimento alle indicazioni riportate nelle Norme Tecniche di Aeroporti di Roma e si evidenziano le criticità dell’impianto che si è occupato della preparazione delle miscele;
- *Capitolo 4 – Risultati sperimentali, PARTE A:*  
Si riportano i risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione volumetrica, granulometrica e meccanica e i confronti tra i vari materiali mediante grafici e tabelle opportunamente commentati;
- *Capitolo 5 – Risultati sperimentali, PARTE B:*  
Si riportano i risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione reologica e chimica e i confronti tra i vari materiali mediante grafici e tabelle opportunamente commentati;
- *Capitolo 6 – Conclusioni;*
- *Capitolo 7 – Sitografia e Bibliografia.*

## Capitolo 1 - Stato dell'arte

### 1.1 La pavimentazione stradale

Con il termine pavimentazione stradale si intende una struttura costituita da un insieme di strati legati e non legati a spessori differenti su cui è ammessa principalmente la circolazione di veicoli. La sua principale funzione è dunque quella di garantire un'adeguata capacità di sopportare le azioni indotte dai carichi veicolari e trasmetterli, attenuati, agli strati sottostanti fino al sottofondo. Non meno importanti sono i requisiti di funzionalità, regolarità e aderenza utili ad assicurare un adeguato livello di confort e sicurezza durante la circolazione stradale.

Tipicamente vengono utilizzate tre tipologie di soluzioni di pacchetti stradali:

- *La pavimentazione flessibile* costituita unicamente da strati in conglomerato bituminoso e fondazione in misto granulare;
- *La pavimentazione semirigida* composta da strati in conglomerato bituminoso e strati in misto cementato;
- *La pavimentazione rigida* formata da un'unica lastra in calcestruzzo armato posata su uno o più strati di fondazione in misto cementato e/o misto granulare o direttamente poggiate sul terreno di sottofondo.

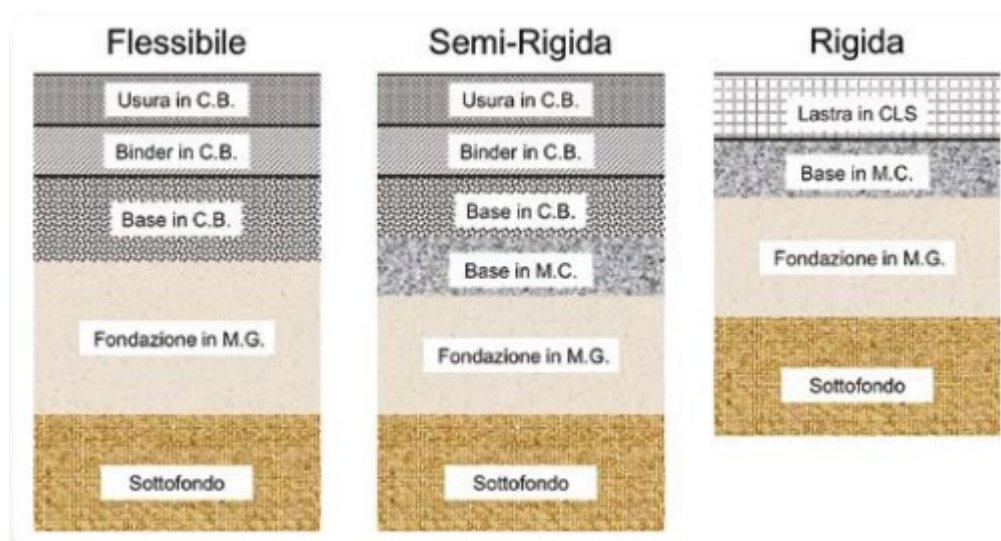


Figura 1 Composizione stratigrafica delle diverse soluzioni di pavimentazioni [1]

Le pavimentazioni flessibili costituiscono la stragrande maggioranza della rete viaria urbana e extraurbana mentre quelle semirigide sono solitamente impiegate in ambito autostradale e per piste di volo e vie di rullaggio [1].

I principali strati che costituiscono queste pavimentazioni sono:

- **Strato d'usura:** è lo strato più superficiale della pavimentazione il cui spessore può variare tra i 3 e i 6cm. Viene realizzato in conglomerato bituminoso e ha il compito di proteggere gli strati sottostanti dalle azioni ambientali e garantire aderenza e regolarità per assicurare un adeguato livello di sicurezza e confort di marcia.
- **Strato di collegamento, binder:** è lo strato intermedio e di transizione tra quello successivo di base e quello di usura più superficiale e ha spessore variabile tra i 6 e gli 8 cm. La sua funzione è quella di trasferire i carichi verso gli strati più profondi e garantire sufficiente regolarità per la buona stesa del tappeto d'usura. Viene realizzato in conglomerato bituminoso e, per il confezionamento della sua miscela, è consentito l'uso di materiale fresato.
- **Strato di base:** è uno strato di spessore compreso tra gli 8 e i 30 cm e la sua funzione è soprattutto strutturale: esso deve consentire il trasferimento delle sollecitazioni flessionali indotte dai carichi veicolari verso gli strati più profondi in maniera opportunamente attenuata. Viene realizzato in misto cementato o in conglomerato bituminoso a caldo, con eventuale impiego di fresato in un quantitativo massimo del 30% in peso degli aggregati, o in conglomerato bituminoso riciclato a freddo, in cui il fresato rappresenta almeno il 70% della miscela [1].
- **Fondazione:** costituisce la parte a diretto contatto con il sottofondo e ha uno spessore tra 15 e 35 cm. Il suo ruolo è quello di ridistribuire ulteriormente i carichi verso lo strato sottostante. Solitamente viene realizzato con materiale non legato come terre stabilizzate o misto granulare. Nelle pavimentazioni semirigide può essere anche in misto cementato(legato).
- **Sottofondo:** costituisce il piano di posa della fondazione e generalmente è possibile considerare uno spessore di riferimento di 1 m. Il suo compito è quello di distribuire correttamente le sollecitazioni, così da non avere concentrazioni di carichi e garantire una buona portanza che rappresenta un aspetto di cruciale importanza per assicurare funzionalità e durabilità della pavimentazione.



## 1.2 Il conglomerato bituminoso

Il conglomerato bituminoso è un materiale composito costituito da una miscela opportunamente dosata di aggregati lapidei, filler, legante bituminoso e, eventualmente, additivi. Gli strati di usura, binder e base delle pavimentazioni flessibili e semirigide sono realizzati in conglomerato bituminoso ma poiché ad ogni strato vengono richieste caratteristiche funzionali e strutturali differenti, è necessario operare sulla qualità e la quantità dei materiali costituenti la miscela di ciascuno di essi, al fine di ottenere prodotti che soddisfino le diverse esigenze prestazionali.

In tutte le miscele adottate in ambito stradale, gli aggregati costituiscono, in termini volumetrici, la componente presente in maggiori quantitativi: essi rappresentano l'80% del volume totale della miscela.

Possono essere classificati in funzione delle loro dimensioni in:

- Aggregato grosso con dimensione massima  $D < 31,5$  mm e dimensione minima  $d > 4$  mm;
- Aggregato fine con  $D < 4$  mm e  $d = 0$  mm;
- Filler per la maggior parte passante al setaccio 0,063 mm.

I primi due possono essere ottenuti da materiali:

- Naturali: materiali provenienti da rocce e ottenuti da processi di frantumazione;
- Artificiali: ottenuti da processi industriali
- Riciclati: risultanti dalla lavorazione di materiale precedentemente utilizzato in costruzioni o derivanti dalla rimozione di pavimentazioni esistenti.

La loro caratterizzazione richiede la definizione delle loro caratteristiche fisiche e meccaniche, geometriche e chimiche ed in particolare granulometria, forma dei grani, massa volumica e composizione mineralogica, resistenza alla compressione, all'abrasione, la levigabilità superficiale e la resistenza ai cicli di gelo e disgelo. Inoltre, la composizione granulometrica influisce sulle proprietà di rigidità, lavorabilità, stabilità, compattabilità, resistenza a fatica, durabilità e aderenza.

Il filler in una miscela può invece provenire parzialmente dalla frazione fina o essere totalmente di additivazione. Esso viene aggiunto alle miscele con lo scopo di favorire la dispersione del bitume all'interno della miscela e permettere la formazione del mastice (filler + bitume) che ha la funzione di evitare trasudamento e spogliamento e allo stesso tempo garantire una maggiore

stabilità della miscela. Inoltre, esso può essere aggiunto qualora la curva granulometrica mancasse della sua frazione fine.

Come definito nella norma UNI EN 12597 “Bitumen and bituminous binders” [a], il bitume è un “materiale virtualmente non volatile, adesivo e impermeabile derivato dal petrolio greggio oppure presente nell’asfalto nativo; completamente o quasi completamente solubile in toluene, molto viscoso o quasi solido a temperatura ambiente”. Il bitume si forma come residuo della distillazione del petrolio greggio. Generalmente è presente nelle miscele di conglomerato bituminoso per un quantitativo di circa il 5% in peso rispetto agli aggregati. Esso rappresenta la fase legante della miscela e ha proprietà tempo e termo dipendente e cioè il suo comportamento e le sue proprietà variano in funzione della frequenza con cui viene caricato e della temperatura a cui è sottoposto.

### **1.3 Il riciclaggio in ambito stradale**

Negli ultimi decenni il tema del riciclaggio in ambito stradale ha assunto sempre più importanza in relazione al costante aumento della domanda di traffico, della circolazione di mezzi pesanti e sempre più veloci che hanno incrementato il deterioramento già presente sulle pavimentazioni richiedendo opere di manutenzione sempre più frequenti e costose sia in termini di nuove risorse che di dismissione dei materiali di risulta. Una soluzione a questi problemi è rappresentata dal riciclaggio e cioè dalla possibilità di poter recuperare e riutilizzare il materiale proveniente da operazioni di fresatura di vecchie pavimentazioni ammalorate o a fine vita utile.

Il conglomerato bituminoso da recupero (o aggregato fresato di riciclo) ottenuto da tali operazioni, prende il nome di RA (Reclaimed Asphalt).

I vantaggi derivanti dall'utilizzo di questo materiale sono ad oggi effettivamente misurabili:

- riduzione della produzione di rifiuti;
- limitazione dell'inquinamento legato sia alle procedure di smaltimento dei rifiuti e alle emissioni di fumi;
- limitare il consumo energetico legato al trasporto del materiale di scarto e abbassare i costi di costruzione e ricostruzione;
- minor ricorso a siti di dismissione e discariche;
- riduzione dello sfruttamento di nuove risorse da cave di prestito.

Le principali tecniche utilizzate per il riciclaggio possono essere classificate in due categorie:

- a caldo;
- a freddo.

Un'altra distinzione che è possibile fare si basa sul luogo di confezionamento della miscela:

- in situ;
- in impianto.

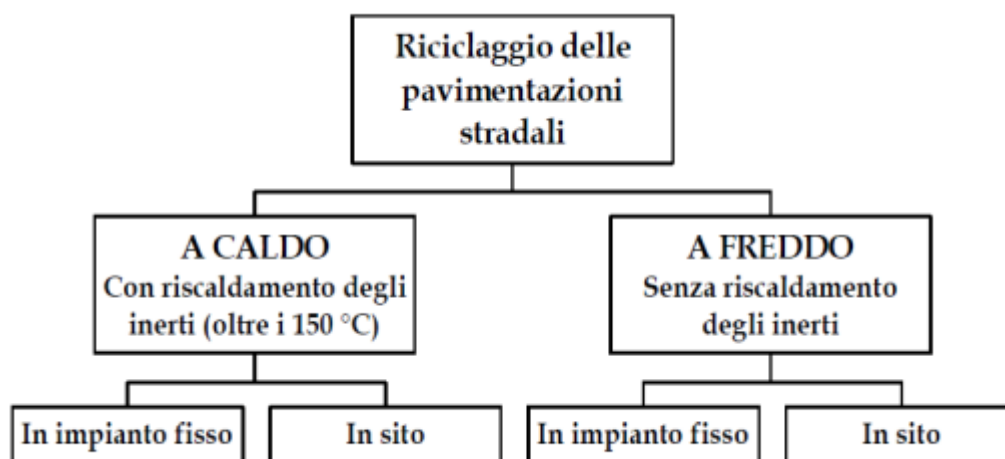


Figura 2 Metodi di riciclaggio [2]

Nel seguito focalizzeremo l'attenzione sui metodi di riciclaggio a caldo che costituisce il metodo utilizzato per la realizzazione nelle miscele testate.

### **1.3.1 Riciclaggio a caldo, in impianto**

Con il termine riciclaggio a caldo in impianto si indica tutto quell'insieme di tecniche impiegate per il recupero di conglomerato bituminoso che richiedono il preventivo riscaldamento degli inerti da aggiungere alla miscela. In genere i materiali vengono riscaldati fino a temperature che superano i 150°C.

Con questa modalità si ottengono miscele costituite da quattro elementi fondamentali quali fresato, aggregati vergini, bitume normale o modificato e additivi rigeneranti.

Tutti gli impianti possono essere suddivisi in due categorie a seconda che la miscelazione sia realizzata in modo discontinuo o continuo.

## 1. Impianto discontinuo

Esso costituisce la tipologia più diffusa in Europa in quanto garantisce una maggiore flessibilità di utilizzo, una migliore qualità del prodotto finito e, grazie alla presenza di filtri, consente un efficace controllo sulle emissioni di fumi. Di contro ha come svantaggio quello di essere un impianto molto costoso e, a parità di condizioni iniziali, permette una minore produttività rispetto ad un impianto continuo [3].

Il ciclo produttivo prevede una fase iniziale in cui gli aggregati vergini, precedentemente vagliati e stoccati in vari cumuli per ciascuna pezzatura, vengono posizionati, tramite pale meccaniche, all'interno di varie tramogge dette predosatori. Questi alimentano un nastro trasportatore che consentono il dosaggio delle varie frazioni granulometriche e conducono i materiali fino ad un essiccatore, ovvero un forno a tamburo.

Il forno essiccatore si presenta come un cilindro rotante in acciaio dotato di una serie di palettature interne che sollevano il materiale per poi lasciarlo ricadere sulla fiamma del bruciatore che può funzionare con flussi concorrenti o controcorrenti; esso ha la funzione di riscaldare il materiale promuovendo il raggiungimento della temperatura adatta alla miscelazione e contemporaneamente, eliminando l'umidità contenuta negli inerti. Esso costituisce il punto fondamentale della catena produttiva; la sua efficienza, infatti, ha forti ripercussioni sulla capacità produttiva dell'impianto [4].

Durante questa fase vengono prodotti ampi quantitativi di gas contenenti aria, polveri e prodotti della combustione che devono essere opportunamente filtrati prima di poter essere reimmessi in atmosfera.

Una volta fuoriusciti dall'essiccatore, gli inerti caldi (alla temperatura di 150-160°) raggiungono un elevatore a tazze che li trasporta nella torre di miscelazione contenente vagli vibranti utili per una rifelezione granulometrica degli aggregati e il loro successivo dosaggio sulla base della ricetta granulometrica precedentemente definita.

Successivamente, i molteplici aggregati opportunamente dosati raggiungono un mescolatore all'interno del quale vengono miscelati insieme ad additivi, bitume e filler.

Il materiale impastato viene poi scaricato o direttamente su automezzi o inviati ad appositi silos di stoccaggio.

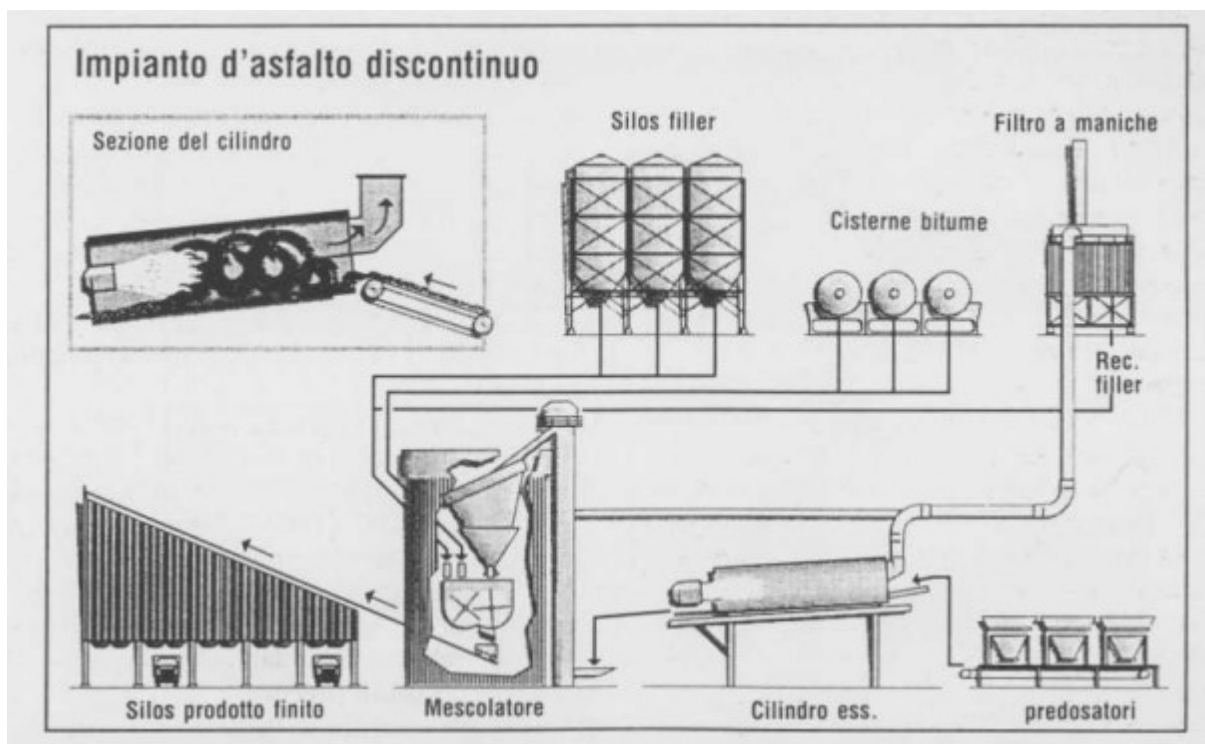


Figura 3 Schema d'impianto discontinuo [3]

Per l'utilizzo del fresato è opportuno prevedere una modifica nel ciclo produttivo dell'impianto al fine di evitare che il bitume residuo venga a diretto contatto con la fiamma del bruciatore. In tal modo, si riduce il rischio che il legante stesso possa ossidare.

I metodi utilizzati per ovviare a questo problema sono molteplici:

- Nel tamburo essiccatore provvisto di un anello esterno: qui il fresato è inserito nell'essiccatore insieme agli altri inerti ma viene opportunamente protetto mediante un anello esterno che gli consente di scaldarsi per induzione evitando il contatto diretto con il bruciatore;
- Aggiunta del fresato a freddo nella camera di miscelazione: il fresato viene introdotto nel miscelatore a T ambiente e, una volta entrato in contatto con gli aggregati vergini riscaldati, scambierà con essi calore determinando un abbassamento della temperatura finale del conglomerato;
- Combinazione dei due metodi (RAP nell'anello del cilindro essiccatore e RAP freddo nel mescolatore);
- Aggiunta del fresato freddo al piede dell'elevatore: il materiale di riciclo viene scaricato direttamente nell'elevatore entrando in contatto con gli inerti vergini caldi;

- Doppio tamburo essiccatore: la catena produttiva prevede la presenza di un secondo tamburo nel quale scaldare il fresato ad una temperatura inferiore rispetto a quella del tamburo per gli aggregati vergini, evitando così l'eccessiva produzione di fumi [5].

## 2. Impianto continuo

Si tratta di una tipologia produttiva che risulta molto vantaggiosa dal punto di vista economico e della produttività e questo perché l'impianto continuo prevede che le fasi di riscaldamento, di rimozione dell'umidità negli aggregati e di miscelazione di questi con filler e bitume avvenga direttamente all'interno del tamburo essiccatore. In particolare, nella parte iniziale del cilindro, dove è situato il bruciatore, gli aggregati vergini vengono riscaldati, mentre nella seconda parte il bitume fluido ed il filler vengono immessi e insieme vengono mescolati.

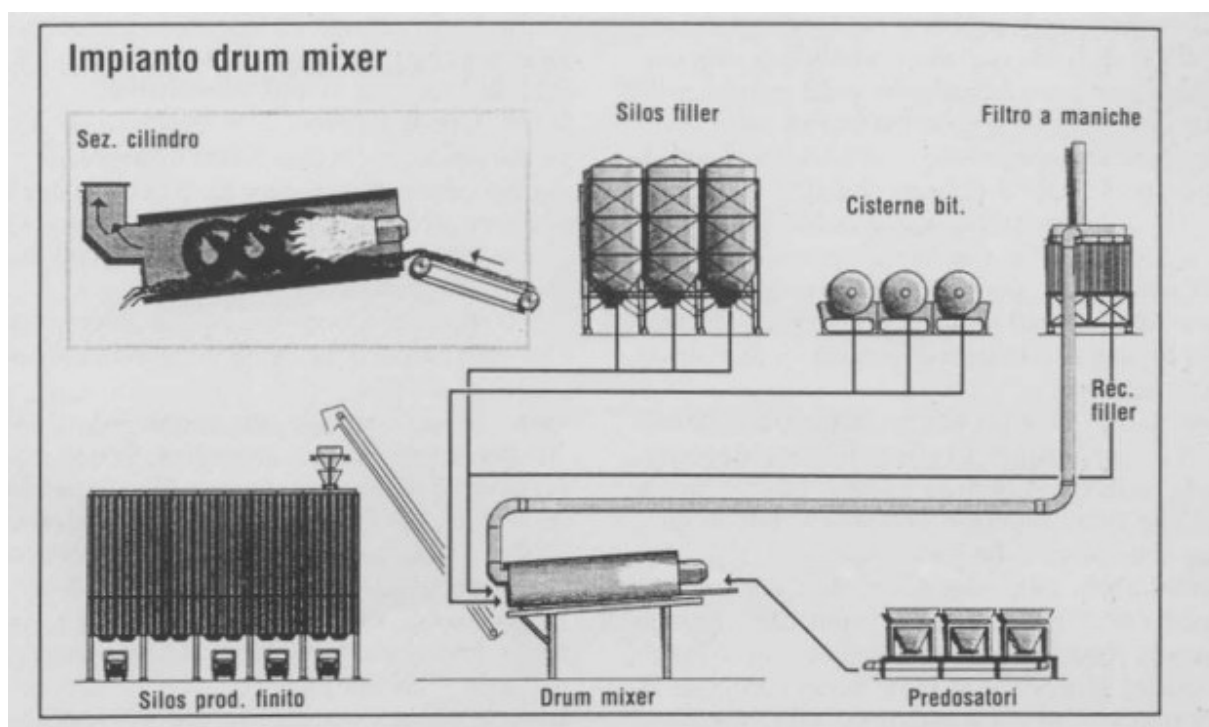


Figura 4 Schema di impianto continuo [3]

Tuttavia, tale scelta produttiva comporta numerosi svantaggi, tra cui la minor qualità del prodotto finale dovuta ad un minor controllo sulla granulometria delle miscele. Infatti, l'assenza della torre di miscelazione e del vaglio vibrante potrebbe comportare errori sia sulla valutazione dell'umidità iniziale degli inerti sia sul miscuglio delle differenti pezzature. Inoltre, potrebbero esserci emissioni nocive dovute alla vicinanza del bitume a zone ad elevate temperature.

Al fine di permettere l'utilizzo del fresato e il confezionamento di miscele di conglomerato bituminoso riciclato a caldo, le modifiche apportate all'impianto continuo prevedono due diversi sistemi:

- *Sistema a doppia alimentazione (dual-feed)*: in questo sistema, il diretto contatto tra il materiale di riciclo e il bruciatore è reso possibile attraverso l'inserimento a metà del cilindro e quindi sufficientemente lontano dalla fiamma. Il suo riscaldamento avviene poi per diretto contatto e mescolamento con gli aggregati vergini nel cilindro stesso.
- *Sistema del cilindro nel cilindro (drum-in-drum)*: in questo caso si ricorre all'uso di uno speciale cilindro, di diametro ridotto rispetto al principale, che viene posizionato davanti al bruciatore e all'interno del quale viene inserito l'aggregato vergine per essere riscaldato. Il materiale di recupero, invece, viene introdotto poco dopo tra i due cilindri ed inizia a riscaldarsi senza però entrare a diretto contatto con la fiamma data la presenza del cilindro interno.

### **1.3.2 Riciclaggio a caldo, in sito**

La rigenerazione delle pavimentazioni in sito è una tecnica che prevede che tutte le operazioni si sviluppino in cantiere. Di conseguenza è possibile abbattere notevolmente i costi legati al trasporto dei materiali e al loro stoccaggio. D'altro canto, però questa tipologia di intervento è limitata solo agli strati più superficiali, agendo su profondità di 5 o 6 cm.

Il ciclo produttivo richiede l'uso di impianti mobili semoventi, costituiti da una serie di macchine chiamati anche "treni di riciclaggio", che permettono di scaldare e scarificare la pavimentazione ammalorata e successivamente consentono la preparazione della nuova miscela da stendere, aggiungendo al materiale recuperato eventuali aggregati vergini, bitume nuovo e agenti additivanti.

Tuttavia, questa tecnica viene progressivamente abbandonata in quanto:

- Non permette un efficace controllo della granulometria della miscela;
- Provoca la produzione di gas nocivi per effetto del riscaldamento delle pavimentazioni, che non possono essere opportunamente filtrati;
- Richiede l'impiego di mezzi ingombranti e costosi.

## **1.4 Il fresato stradale**

Il fresato o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), così come definito dalla norma UNI EN13108 (Miscele bituminose – Specifiche del materiale, Parte 8: conglomerato bituminoso di recupero) [b], è un “conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura che può essere utilizzato come materiale costituente per miscele bituminose prodotte in impianto a caldo”.

Si tratta dunque di un materiale solido costituito da una miscela di aggregati che presentano una curva granulometrica caratterizzata da un'elevata percentuale di fino e bitume invecchiato.

Il materiale è ottenuto a partire dagli interventi di dismissione o da operazioni di rifacimenti di pavimentazioni stradali ammalorate o degradate, attraverso operazioni di fresatura o di demolizione.

La fresatura consiste nella rimozione della parte superficiale della vecchia pavimentazione e ha l'obiettivo di garantire l'aderenza del nuovo strato a quello sottostante e assicurare una corretta livellazione del piano stradale. In genere, la procedura prevede l'uso di macchine fresatrici o scarificatrici, le quali vista la presenza di corpi cilindrici rotanti con utensili da taglio e nastro trasportatore consentono l'asportazione e la raccolta del materiale fresato [6]. Una scelta più rigorosa dell'attrezzatura più idonea da adottare nelle operazioni di rimozione viene realizzata in funzione dello spessore dello strato da demolire e in funzione dello stato di avanzamento del degrado.

In un'ottica di recupero, il fresato ottenuto può essere utilizzato per il successivo confezionamento di conglomerato bituminoso facendo ricorso ad una delle metodologie di riciclo di cui si è discusso nel paragrafo precedente.

Ovviamente il suo impiego richiede un'opportuna analisi delle sue caratteristiche in termini di:

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

Le caratteristiche prestazionali del RAP, infatti, sono fortemente influenzate dai materiali che lo compongono e dalla funzione dello strato dal quale è stato recuperato (strato di base, usura o binder) poiché questo apporta sostanziali differenze sulla natura, qualità e pezzatura degli aggregati che lo costituiscono.



Il fresato è un materiale riciclabile al 100% ma le attuali Normative sul riciclaggio a caldo dei conglomerati bituminosi (in sito o in impianto) consentono il riutilizzo di una limitata percentuale del fresato prodotto (non più del 40%, in funzione dello strato e della tipologia di infrastruttura interessata) [7]. Le principali motivazioni per tali valori ridotti sono legate all'elevato stato di ossidazione in cui si trova il bitume in esso contenuto che lo rende più fragile del bitume vergine, determinando così una maggiore suscettibilità alla fatica, e al thermal and reflection cracking della miscela finale [8]. Per tali ragioni vengono spesso aggiunti alle miscele additivi rigenerati che consentano al bitume invecchiato il recupero delle caratteristiche perse nel corso del tempo, migliorando la qualità del prodotto finale in termini di rigidità, viscosità e lavorabilità e permettendo di poter aumentare potenzialmente la percentuale di RAP da poter utilizzare negli HMA.

Le percentuali di materiale riciclabile nella miscela poi possono variare anche in relazione all'impianto utilizzato e alla modalità di immissione della miscela.

In particolare, per quanto riguarda gli impianti discontinui per il confezionamento di conglomerato bituminoso di riciclo a caldo, si raggiungono tipicamente le seguenti percentuali [5]:

- Fino al 15-20% nei sistemi con introduzione del riciclato freddo al piede dell'elevatore caldo;
- Fino al 35% nei sistemi con immissione del riciclato nel cilindro essiccatore, attraverso un apposito anello di riciclaggio;
- Del 40% in impianti con utilizzo combinato dei due metodi suddetti;
- Si possono raggiungere quantitativi del 50% di fresato utilizzato quando si procede per essiccazione e riscaldamento del riciclato in uno speciale essiccatore in equicorrente.

Gli impianti in continuo sono invece la tipologia che meglio si presta maggiormente ad essere modificata per consentire le operazioni di riciclo nel caso in cui si debbano produrre conglomerati con notevoli percentuali di materiali di recupero (fino al 70%).

## 1.5 Il bitume

Il bitume può essere definito un composto organico eterogeneo che viene usualmente ricavato da processi di distillazione del petrolio greggio. Le caratteristiche dei bitumi provenienti dalla raffinazione del petrolio dipendono sia dal tipo di greggio di partenza che dal tipo di procedimento produttivo utilizzato. Di conseguenza le prestazioni in opera del legante sono strettamente legate alla sua composizione chimica e strutturale. In termini da analisi composizionale elementare il bitume risulta essere principalmente costituito da Carbonio (80÷88% in peso) e Idrogeno (8÷12% in peso), in percentuali minori da Zolfo (0÷9% in peso), Ossigeno (0÷2% in peso), Azoto (0÷2% in peso) e tracce di metalli pesanti quali Vanadio, Nichel e Ferro.

Lo studio delle caratteristiche elementari del legante però non risultano sufficienti ad inquadrarne le principali proprietà. A tale scopo occorre procedere attraverso analisi di tipo chimico strutturale mediante metodi di frazionamento (solventi selettivi, tecniche cromatografiche di adsorbimento e desorbimento, procedure di precipitazione chimica), che consentano l'identificazione delle cosiddette frazioni SARA, acronimo di Saturi, Aromatici, Resine e Asfalteni che rappresentano le principali frazioni costituenti il legante e alle quali si riconducono le sue peculiarità. In particolare, il bitume può essere rappresentato come un sistema multifase costituito da una componente oleosa (saturi e aromatici) all'interno della quale sono dispersi gli asfalteni, grazie all'azione peptizzante delle resine. Ciascuna frazione risulta caratterizzata da specifiche caratteristiche e funzioni [9]:

- Le resine svolgono un'azione disperdente nei confronti degli asfalteni, che altrimenti tenderebbe a flocculare, e conferiscono al bitume proprietà di flessibilità ed elasticità;
- Gli asfalteni giocano un ruolo di fondamentale importanza nel conferire al legante caratteristiche di viscosità, elasticità o plasticità in funzione della temperatura, oltre che definirne la resistenza nei confronti delle sollecitazioni meccaniche;
- Gli oli maltenici sono suddivisi a loro volta in oli aromatici e oli saturi. In particolare i primi sono responsabili della capacità di scorrimento del bitume alle alte temperature tale da garantire un efficace ricoprimento degli aggregati durante le fasi di miscelazione, mentre i secondi contengono la maggior parte delle cere presenti nei bitumi le quali possono determinare un aumento di rigidità e viscosità del legante quando questo, durante la sua vita in esercizio, viene a trovarsi per diverso tempo a temperature inferiori a quelle alla quale si assiste alla cristallizzazione delle cere.

### **1.5.1 Invecchiamento del bitume**

La principale problematica legata all'impiego del fresato in miscele di conglomerato bituminoso a caldo di nuova realizzazione è l'elevato stato di ossidazione in cui si trova il bitume in esso contenuto per effetto dell'invecchiamento che esso ha subito durante la sua vita utile.

Con il termine invecchiamento o ageing viene indicato, infatti, il processo di degrado che interessa il legante sin dalle fasi di miscelazione per poi svilupparsi nel tempo e che ne provoca cambiamenti delle proprietà chimiche, fisiche e reologiche, determinando importanti conseguenze sulle prestazioni delle pavimentazioni. Le principali problematiche dovute all'invecchiamento del bitume che possono sopraggiungere nelle miscele che costituiscono il manto stradale sono:

- Il problema dello spogliamento che risulta causato dalla perdita di capacità legante del bitume che ne determina il distacco dagli aggregati;
- Una maggiore suscettibilità alla fessurazione, più marcata alle basse temperature, dovuta ad una minore resistenza alle azioni cicliche;
- Un'aumentata rigidità che determina una più alta probabilità di incorrere in problematiche di crack termico.

Nell'applicazione del bitume come legante nelle miscele di conglomerato bituminoso è possibile distinguere due tipologie di invecchiamento:

- A breve termine (short-term ageing), ovvero la forma d'invecchiamento che interessa il bitume durante le fasi di produzione della miscela, stoccaggio, stesa e compattazione per effetto delle alte temperature e dei processi di reazione con l'ossigeno atmosferico;
- A lungo termine (long-term ageing): invecchiamento che avviene durante la vita in servizio della pavimentazione dovuto a processi chimici e fisici causati dall'azione dei carichi stradali, delle radiazioni solari e del clima, oltre che dal contenuto percentuale di vuoti che costituiscono la miscela e dalla posizione dello strato all'interno della pavimentazione stradale che influisce sulla possibilità d'interazione tra ossigeno e bitume.

I principali meccanismi di invecchiamento che interessano il bitume possono essere distinti in invecchiamento chimico e invecchiamento fisico.

*L'invecchiamento chimico* riguarda tutti quei processi irreversibili che tendono ad alterare la natura chimica del legante e di conseguenza il suo comportamento reologico. Tra questi distinguiamo:

- *Evaporazione delle componenti volatili*: questo fenomeno è legato alla volatilizzazione delle frazioni costituenti il bitume più leggere per effetto delle alte temperature a cui esso è sottoposto durante le fasi di produzione;
- *Ossidazione*: consiste nella reazione tra l'ossigeno e le macromolecole idrocarburiche, favorita dalle alte temperature;
- *La polimerizzazione*: è una reazione che avviene solo nei bitumi modificati con polimeri e che si verifica quando molecole vicine tra di loro reagiscono andando a formare lunghe catene polimeriche.

Gli effetti dell'invecchiamento sulla chimica del bitume provocano modifiche nei rapporti tra le componenti delle frazioni SARA. Tipicamente l'ageing causa una diminuzione del contenuto di aromatici, un aumento del contenuto di resine e di asfalteni mentre il contenuto dei saturi resta pressoché costante. La perdita della fase maltenica può determinare la flocculazione degli asfalteni (tipicamente sospesi nella soluzione di maltene e stabilizzati da resine) la quale provoca un incremento della rigidità e fragilità del legante [10].

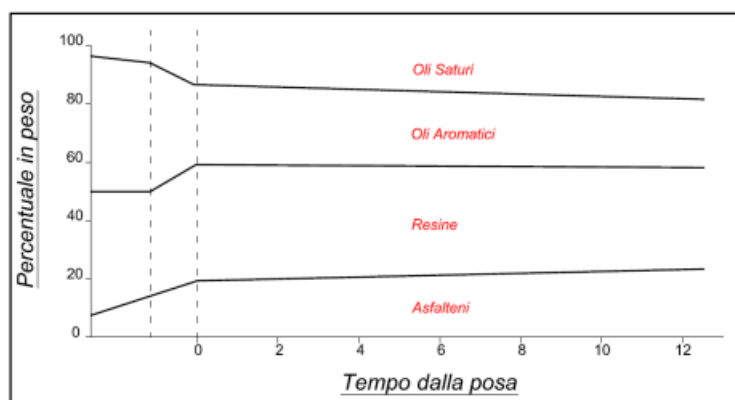


Figura 5 Variazione delle frazioni durante i processi di invecchiamento [11]

L'invecchiamento fisico (reversibile) determina invece una modifica delle caratteristiche meccaniche del bitume e comporta una perdita di adesività e un incremento di rigidità e fragilità, pur mantenendo inalterata la sua composizione chimica. Questo tipo di invecchiamento può essere classificato in due fenomeni distinti [12]:

- Lo “steric hardening” che rappresenta il processo che si manifesta alle alte/intermedie temperature che permettono una riorganizzazione delle molecole con conseguenti modifiche nella risposta deformativa del materiale;
- Il physical hardening o indurimento fisico, nonché un fenomeno legato alla riorganizzazione interna delle molecole del legante che tende a svilupparsi più velocemente alle basse temperature, alle quali esso assumerà una maggiore rigidità.

Gli effetti dell'invecchiamento sulla reologia del bitume vengono generalmente valutati per mezzo di indici. Uno degli indici di invecchiamento (ageing index) più utilizzati è quello basato sul rapporto tra la viscosità del bitume estratto e quello del bitume vergine di partenza:

$$AI = \frac{\eta_r}{\eta_0}$$

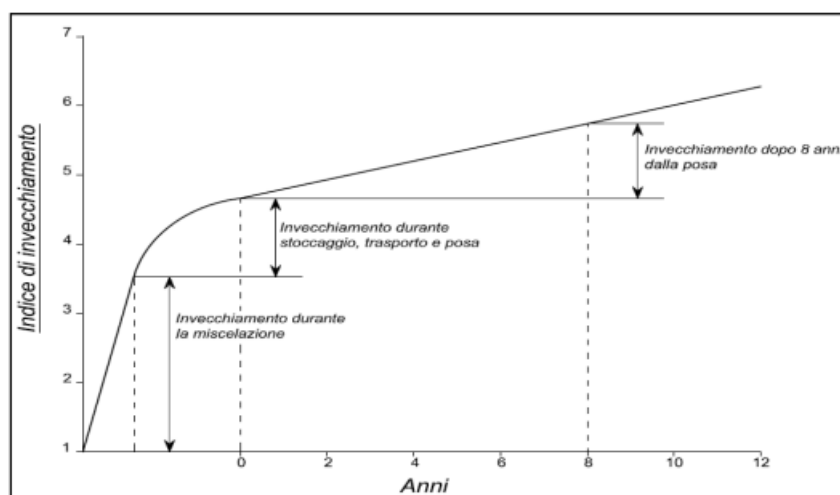


Figura 6 Processo di ageing valutato in termini di viscosità [11]

La figura 6 mostra l'evoluzione degli effetti dell'invecchiamento nella vita di un bitume: in particolare le condizioni più severe nei confronti dell'ageing del legante si osservano durante le fasi iniziali di miscelazione, stoccaggio, trasporto e posa in opera in cui il bitume riveste gli aggregati sottoforma di film sottile e di conseguenza risulta maggiormente esposto all'azione combinata di alte temperature e ossigeno che ne favoriscono i processi di ossidazione e la volatilizzazione delle sue componenti più leggere. Dopo la compattazione in opera, il legante subisce comunque processi di invecchiamento, dovuti a fattori climatici e ambientali, ma questi progrediscono più lentamente [13].

Con lo scopo di valutare gli effetti dell'aging sulle proprietà dei leganti, sono state sviluppate delle prove di laboratorio che consentano di simulare le condizioni di invecchiamento che il bitume subisce nel breve e lungo termine. In particolare, si parla rispettivamente di:

- Prova di Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) normata dalla EN 12607-1 [c], con la quale valutare la suscettibilità del bitume all'invecchiamento durante le fasi di miscelazione per il confezionamento del conglomerato bituminoso, per effetto dell'azione combinata di ossigeno e alte temperature che investono il sottile film di bitume (da cui il nome della prova "Rolling thin film") che riveste gli aggregati. Il test prevede che il bitume venga posizionato all'interno di otto bicchierini cilindrici a loro volta posti su una piastra rotante attorno al proprio asse che consente di centrifugare il bitume sulle pareti dei recipienti. Il tutto è posizionato all'interno di un forno che sottopone il legante a temperature di 163°C per 75 minuti. Esso poi risulta munito di una ventola che assicura una omogenea circolazione di aria calda sulla totalità del campione.
- Prova di Pressure Ageing Vessel (PAV) definita dalla UNI EN 14769 [d] permette di simulare l'invecchiamento che interessa la pavimentazione stradale durante la sua vita in esercizio (nei primi 5-10 anni dopo la posa in opera) per effetto di fattori ambientali e agenti climatici. La prova prevede che il bitume, precedentemente sottoposto a RTFOT, venga colato su appositi piattini metallici porta campioni. Quest'ultimi, a loro volta, vengono impilati su un cestello e posizionati all'interno di una cella pressurizzata e riscaldata alla temperatura di 90, 100 o 110°C per 20+4h. La temperatura di prova viene scelta e definita sulla base della temperatura massima di progetto della sovrastruttura.

### ***1.5.2 Additivi***

Come descritto nel paragrafo precedente (§ 1.5.1) la principale problematica nell'impiego del fresato nei conglomerati di nuova realizzazione è legata all'elevato stato di ossidazione in cui si trova il bitume in esso contenuto che ne modifica le proprietà rispetto a quelle che possedeva inizialmente. Di conseguenza anche la miscela di conglomerato bituminoso di riciclo risultante avrà caratteristiche differenti rispetto a quelle di una miscela costituita unicamente da materiali (aggregati e bitume) vergini. Essa, infatti, risulterà tendenzialmente più rigida e fragile. Proprio per tali ragioni si ricorre spesso all'utilizzo di opportuni additivi che consentano di ripristinare

le caratteristiche perse del bitume invecchiato. Le tipologie di additivi che possono essere aggiunti sono molte. Generalmente, nel caso di conglomerati bituminosi a caldo, si ricorre a:

- Additivi flussanti, che a loro volta possono dividersi in organici e chimici, i quali hanno come obiettivo principale quello di ridurre la viscosità del bitume invecchiato e garantire una migliore lavorabilità della miscela e facilità di posa in opera. Essi sono spesso costituiti da estratti di oli lubrificanti e diluenti e giocano un ruolo fondamentale sul recupero delle proprietà fisiche del bitume. In particolare, tendono a rendere il bitume più duttile e meno viscoso, permettendo il raggiungimento della rigidità desiderata in fase di produzione delle miscele di conglomerato. Essi, però, non agiscono apportando un'azione rigenerante a livello strutturale e chimico poiché tendenzialmente non rinnovano i gruppi funzionali mancanti nel legante invecchiato.
- Gli additivi rigeneranti consentono, invece, di riattivare le caratteristiche perse del bitume contenuto nel fresato recuperandone sia le proprietà chimiche che fisiche, garantendo alte prestazioni nel tempo. In particolar modo essi tendono ad agire sulle frazioni SARA del bitume ricostituendo i gruppi funzionali fondamentali, permettendo di riportare il processo di aggregazione degli asfalteni allo stato originale. Inoltre, i rigeneranti garantiscono un miglioramento delle proprietà di adesione, suscettibilità termica e coesione. La scelta del dosaggio deve essere effettuata in relazione alla tipologia di additivo rigenerante da impiegare e alla quantità di RAP da rigenerare e deve essere tale da non rammollire eccessivamente il bitume poiché questo renderebbe la miscela più suscettibile al fenomeno dell'ormaiamento. La percentuale ottimale può essere valutata attraverso prove di laboratorio con le quali testare l'additivo a diversi dosaggi. In aggiunta sono richieste ulteriori prove di laboratorio, da effettuarsi su diversi tipi di additivi ringiovanenti, che hanno come obiettivo quello di determinare la tipologia che offre la migliore compatibilità con l'effettivo bitume sul quale dovranno agire. Inoltre, in funzione dell'impiego, l'additivo per il riciclaggio a caldo potrà essere disperso nel legante o direttamente aggiunto sul fresato durante le operazioni di fresatura, mediante l'impiego di attrezzature idonee che ne permettano il corretto dosaggio e l'omogenea dispersione all'interno del conglomerato bituminoso.

## ***Capitolo 2 - Programma sperimentale e metodi di prova***

Nel seguente capitolo verrà descritto l'obiettivo del programma di ricerca e si andranno ad illustrare le strumentazioni e i protocolli di prova utilizzati al fine di indagare la problematica.

### **2.1 Obiettivo della ricerca**

La presente sperimentazione ha visto come obiettivi:

- Lo studio del comportamento di miscele di conglomerato bituminoso riciclato a caldo con una percentuale del 15% e del 50% di fresato utilizzate negli strati di base e binder in ambito aeroportuale;
- La valutazione dell'efficienza e di eventuali criticità dell'impianto che ha realizzato questi impasti.

In particolare, la prima parte della ricerca è stata volta al confronto prestazionale e alla valutazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche delle suddette miscele. La seconda parte ha riguardato l'esame e la verifica di affinità e differenze delle proprietà reologiche del bitume estratto dai conglomerati di solo binder sia per il 15% che per il 50% di fresato. Ed infine si sono studiate, attraverso analisi chimiche, le caratteristiche d'invecchiamento dei due leganti dovute sia alle differenti composizioni delle miscele sia alle modalità di produzione dei conglomerati.

### **2.2 Metodi di prova**

Le analisi sperimentali sono state svolte interamente presso il Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche e le prove eseguite sono state le seguenti:

- Determinazione della percentuale di vuoti;
- Valutazione granulometrica e del bitume nelle miscele;
- Prova di rigidità a trazione indiretta (ITSM);



- Prova di resistenza a trazione indiretta (ITS);
- Prova di resistenza a fatica (ITFT);
- Strain Sweep e Frequency Sweep (SS e FS);
- Multiple Stress Creep Recovery (MSCR);
- Linear Amplitude Sweep (LAS);
- Spettroscopia infrarossa a trasformata di Fourier (FTIR).

### 2.1.1 Determinazione della percentuale di vuoti

Il comportamento delle miscele di conglomerati bituminosi risulta essere fortemente influenzato dalla sua composizione volumetrica. In figura 7 si riportano i principali elementi che le compongono: aggregato, bitume e aria.

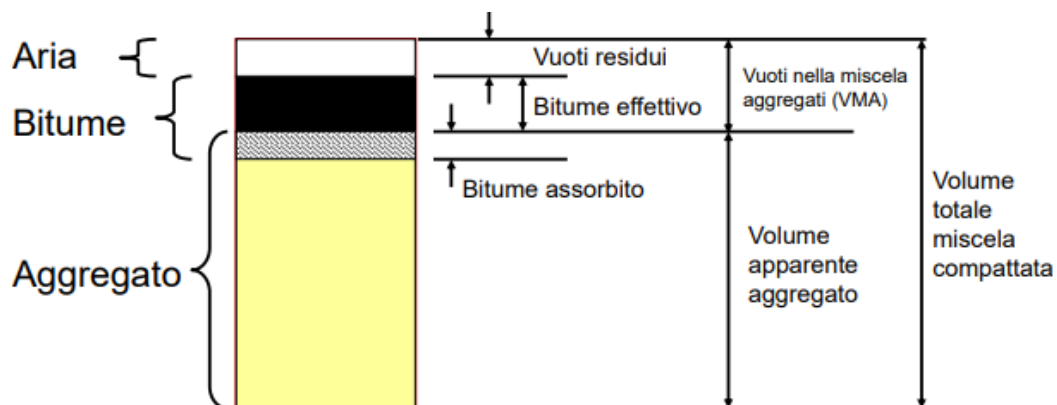


Figura 7 Elementi componenti una miscela di conglomerato bituminoso [14]

In particolare, un ruolo di fondamentale importanza nel comportamento dei conglomerati bituminosi è dato dalla percentuale di vuoti residui in esso contenuti che ne influenzano le caratteristiche di resistenza alle sollecitazioni esterne, di permeabilità e di deformabilità [15].

La stima del volume dei vuoti richiede il calcolo della massima massa volumica, definita come la massa per unità di volume senza considerare i vuoti d'aria a una temperatura di prova nota, e il calcolo della massa volumica apparente che rappresenta la massa per unità di volume di provino ad una temperatura di prova nota che tiene conto anche dei vuoti d'aria.

La normativa UNI EN 12697-08 [e] fornisce la seguente relazione per la valutazione del volume dei vuoti residui:

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

In cui:

- $V_m$  è il volume di vuoti residui;
- $\rho_m$  è la massima massa volumica;
- $\rho_b$  è la massa volumica apparente.

### 1. Determinazione della massima massa volumica

Nella presente sperimentazione la massima massa volumica è stata valutata facendo riferimento alla formulazione fornita dalla normativa UNI EN 12697-5 [f], secondo cui:

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

dove:

- $\rho_m$ : massa volumica massima della miscela in  $\text{kg/m}^3$ ;
- $p_a$ : percentuale di aggregati nella miscela;
- $\rho_a$ : massa volumica apparente degli aggregati in  $\text{kg/m}^3$ ;
- $p_b$ : percentuale di legante nella miscela;
- $\rho_b$ : massa volumica del legante a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  in  $\text{kg/m}^3$ .

### 2. Determinazione della massa volumica apparente

La UNI EN 12697-06 [g] definisce varie procedure per il calcolo della massa volumica apparente. In questa ricerca sono stati utilizzati due metodi:

- **Metodo dry**

Con questo metodo la massa volumica apparente è valutata tenendo conto della massa del provino asciutto e la massa del provino bagnato attraverso la seguente relazione:

$$\rho_{dry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_w$$

Con:

- $m_1$  massa del provino asciutto, in grammi (g);
- $m_2$  massa del provino in acqua, in grammi (g) che, secondo la legge di Archimede, è pari differenza tra la massa del provino e la massa d'acqua spostata dallo stesso;
- $\rho_w$  massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova, in chilogrammi per metro cubo ( $\text{kg/m}^3$ ).
- **Metodo con provino sigillato con paraffina**

Il metodo con provino sigillato con paraffina è normato dalla UNI EN 12697-6, la quale definisce che la valutazione della massa volumica apparente venga effettuata eseguendo prima una misura della massa del campione secco ( $m_1$ ); poi si proceda con la determinazione della massa del provino sigillato con paraffina in acqua ( $m_2$ ), ed infine, si passi alla definizione della massa del provino paraffinato in acqua a mezzo di un cestello per la pesata idrostatica.

$$\rho_{paraff} = \frac{m_1}{\frac{m_2 - m_3}{\rho_w} - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{paraff}}} \rho_w$$

Dove

- $m_1$  è la massa del provino asciutto, in grammi (g);
- $m_2$  è la massa del provino sigillato con paraffina asciutto, in grammi (g);
- $m_3$  è la massa del provino con paraffina in acqua, in grammi (g);
- $\rho_w$  è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova, in chilogrammi per metro cubo ( $\text{kg/m}^3$ ).
- $\rho_{paraff}$  è la massa volumica della paraffina alla temperatura di prova, in chilogrammi per metro cubo ( $\text{kg/m}^3$ ).

### 2.1.2 Valutazione granulometrica e del bitume nelle miscele

Su alcune delle carote a disposizione sia per lo strato di base che per lo strato di binder si è eseguita l'estrazione con la quale è stato possibile separare il bitume dall'aggregato.



*Figura 8 Materiale prima dell'estrazione*



*Figura 9 Materiale post estrazione*



*Figura 10 Filler estratto*

Lo scopo è quello di

- Determinare il quantitativo di legante;
- Eseguire analisi granulometriche sugli aggregati dopo l'estrazione del bitume.

Il peso del bitume contenuto nella miscela è stato calcolato con

$$P_b = P_1 - P_2 - P_{filler}$$

Dove

- $P_1$  è il peso lordo del materiale, del cestello e della capsula con carta filtro prima dell'estrazione;
- $P_2$  è il peso lordo dell'aggregato, del cestello e della capsula dopo estrazione;
- $P_{filler}$  è il peso del filler residuo.

Il peso dell'aggregato contenuto nella miscela è pari a

$$P_a = P_2 - T + P_{filler}$$

In cui

- $T$  è la tara del cestello con carta filtro.

Dunque, la percentuale di bitume rispetto al peso degli aggregati sarà data da

$$\%b_a = 100 \frac{P_b}{P_a}$$

Mentre il suo quantitativo riferito al peso della miscela è stato valutato come

$$\%b_c = 100 \frac{P_b}{P_a + P_b}$$

Sull'aggregato invece si è proceduto all'esecuzione di prove di analisi granulometrica.

Attraverso la metodologia fornita dalla UNI EN 933-1 [h] è stato possibile valutare la distribuzione delle dimensioni degli aggregati che compongono una miscela.

La procedura viene effettuata per mezzo di una serie di setacci impilati l'uno sull'altro e disposti con apertura decrescente dall'alto verso il basso. Le dimensioni delle maglie e il numero dei

setacci da utilizzare sono definiti tenendo conto della natura del campione ed alla precisione richiesta.



*Figura 11 Setacci*

Nel nostro caso la pila è stata composta dai setacci mostrati in tabella 1:

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

*Tabella 1 Dimensione aperture dei setacci*

Il materiale viene versato in cima alla pila. Questa viene posizionata in un vibro-vaglio che, attraverso agitazione meccanica, consente la vagliatura del materiale. In seguito, si rimuovono i setacci e si pesa il trattenuto di ognuno di essi.



Figura 12 Pesatura del materiale trattenuto nei setacci

Noto il trattenuto parziale nei vari setacci espresso in percentuale rispetto al peso totale del campione, si possono calcolare:

- la percentuale di trattenuto cumulativa sommando progressivamente alla quantità di materiale contenuta nel setaccio considerato, quelli sovrastanti espressa in percentuale rispetto al peso totale del campione;
- la percentuale di passante per ogni setaccio pari al complemento a cento del trattenuto cumulativo.

In tabella 2 si riporta un esempio di calcolo effettuato per lo strato di binder con il 15% di fresato:

Campione Setaccio/crivello	Binder15%_CPC_37			
	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	0	0,0	0,0	100,0
16	106,5	12,6	12,6	87,4
10	137	16,2	28,8	71,2
8	104,2	12,3	41,1	58,9
4	108,4	12,8	53,9	46,1
2	113,8	13,5	67,4	32,6
1	85	10,1	77,5	22,5
0,5	51,2	6,1	83,6	16,4
0,25	14,4	1,7	85,3	14,7
0,125	27,5	3,3	88,6	11,4
0,063	25,9	3,1	91,7	8,3
FONDO	71,2	8,4	100	0

Tabella 2 Esempio di calcolo di trattenuto e passante percentuale ai vari setacci



Infine, si costruisce la curva granulometrica del campione analizzato riportando in un grafico semi-logaritmico il passante progressivo in funzione dell'apertura del vaglio, di cui un esempio in figura 13.

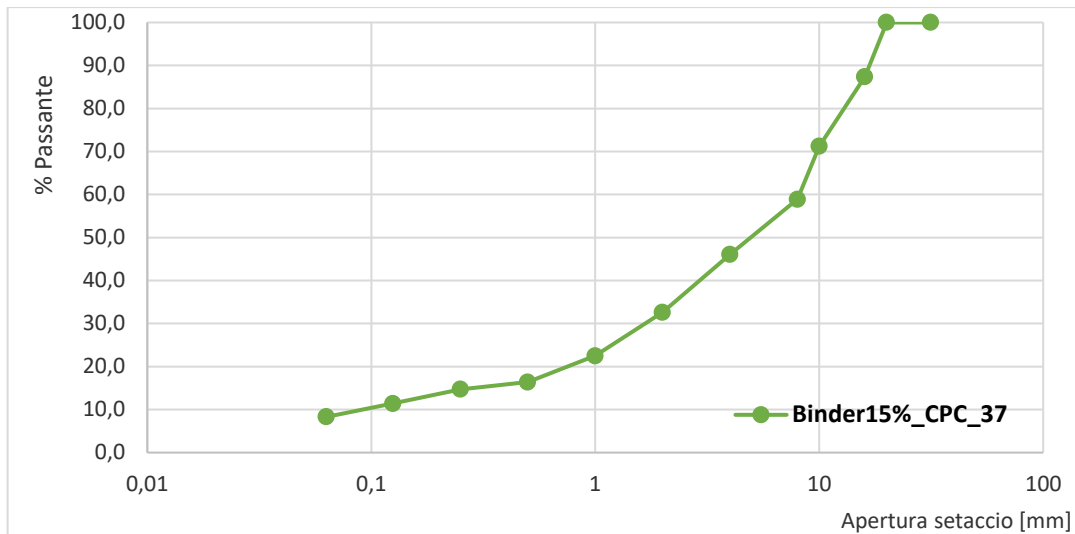


Figura 13 Esempio di curva granulometrica

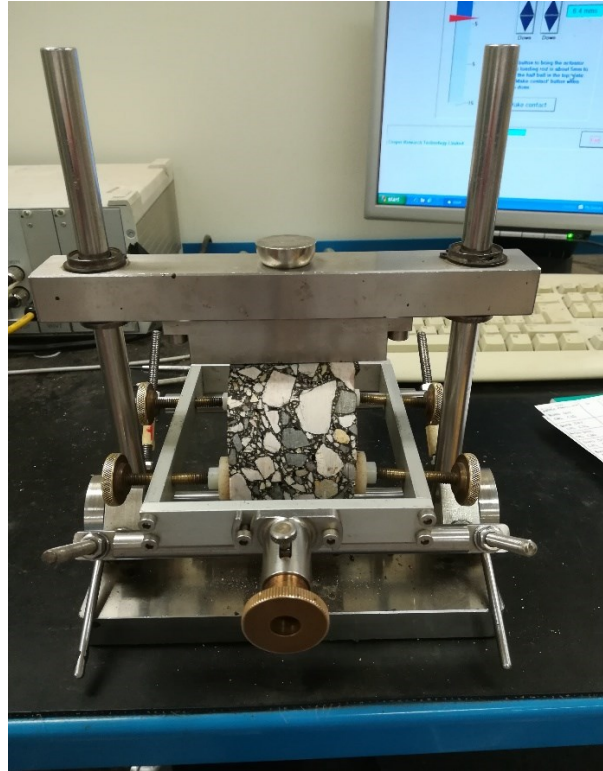
### **2.1.3 Prova di Modulo a Trazione Indiretta, ITSM (UNI EN 12697-26)**

Il modulo di rigidità di un conglomerato bituminoso può essere definito come la capacità di una miscela di deformarsi se sottoposto all'applicazione di un carico, nonché la sua capacità di assorbire e diffondere i carichi derivanti dal passaggio veicolare.

La rigidità dei provini è stata testata attraverso la prova di modulo a trazione indiretta *Indirect Tensile Stiffness Modulus*, ITSM (UNI EN 12697-26) [i]. La misurazione avviene attraverso l'utilizzo del macchinario "Nottingham Asphalt Tester (NAT)", che risulta costituito da:

- Una camera climatica la quale assicura che i campioni e la strumentazione utilizzata rimangano alla temperatura di prova stabilita;
- Un telaio di carico in acciaio con base rettangolare costituito da due montanti, una trave di contrasto regolabile e da un attuatore pneumatico per l'applicazione dei carichi verticali collegato a un pistone e una cella di carico che permette la trasmissione delle misure al sistema di acquisizione e controllo dati;
- Un telaio porta-trasduttori che, attraverso un sistema di guide e viti, permette il posizionamento di due trasduttori sul diametro orizzontale del provino fissato al telaio stesso attraverso 4 morsetti.





*Figura 14 Montaggio del provino sul castelletto*

La prova è eseguita in controllo di spostamento. L'apparecchiatura consente di applicare un carico lungo una generatrice di un provino cilindrico (diametro verticale) e misurare la deformazione diametrale nella direzione ortogonale (diametro orizzontale). Il carico applicato è di tipo sinusoidale, impulsivo in modo da simulare al meglio l'effetto prodotto nelle pavimentazioni dal passaggio di un veicolo.

Attraverso il software dell'apparecchiatura è possibile impostare i principali parametri in gioco:

- La temperatura di prova. Nella seguente sperimentazione le carote sono state testate a tre temperature: 0, 20 e 40 °C;
- Diametro e altezza del provino;
- Coefficiente di Poisson preso pari a 0,35;
- Il tempo di picco (rise time) che rappresenta il tempo impiegato da un impulso a raggiungere il valore di picco, pari a  $(124 \pm 1)$  ms;

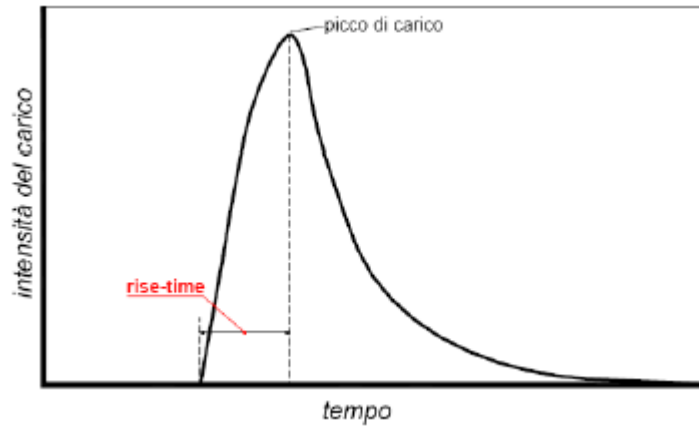


Figura 15 Andamento di una curva di carico

- Il valore di deformazione target fissata, che si è preso pare a 3 microns;
- Il numero di colpi di condizionamento utili a tarare il valore di carico da imporre per ottenere il valore di deformazione imposta.

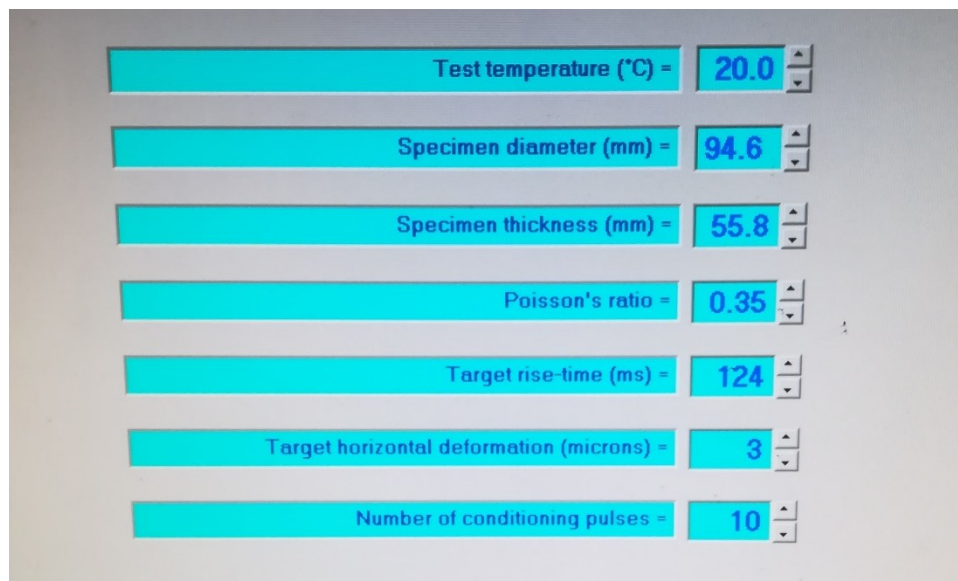


Figura 16 Parametri di prova da impostare

Il vero e proprio test per il calcolo della rigidità ha inizio una volta conclusa la prima fase di condizionamento. A questo punto la prova prosegue mediante l'applicazione di cinque ulteriori impulsi. Il software restituisce direttamente la media della rigidità derivante dai 5 impulsi e ne fornisce due valori per impulso:

- Un valore di rigidità teorica basata sulla curva realistica dell'impulso di carico calcolata mediante la seguente relazione

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

- Un valore di modulo elastico corretto tramite un fattore AF (Adjustment Factor), che tiene conto della forma dell'onda di carico impostata:

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

Dove k è il rapporto tra le aree.

Le prove devono essere eseguite su almeno due diametri del provino (con un angolo tra i due diametri di  $90^\circ \pm 2^\circ$ ) in modo da misurare il modulo nell'altra direzione. Infine, viene effettuata la media dei moduli delle due diagonali.

#### **2.1.4 Prova di Trazione Indiretta, ITS (UNI EN 12697-23)**

La prova di trazione indiretta (UNI EN 12697-23) [j], nota anche come prova alla Brasiliana, consiste nell'applicare una forza di compressione lungo una generatrice di un provino cilindrico (diametro verticale) fino a determinarne la rottura che, per effetto Poisson, avviene a trazione (figura 17). L'aggettivo "indiretta", infatti, è proprio legato al fatto che, nonostante il provino venga sollecitato a compressione, sono le sollecitazioni di trazione che si sviluppano che ne determinano la rottura lungo il piano diametrale orizzontale.

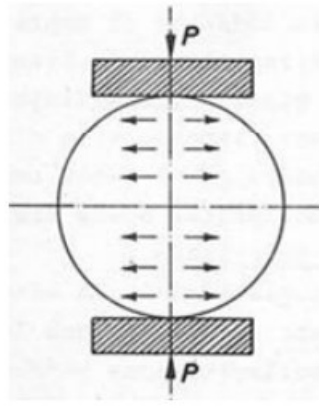


Figura 17 Andamento delle tensioni sul provino [16]

La prova permette di indagare la resistenza a trazione indiretta del materiale che costituisce un parametro rappresentativo della capacità del materiale di trasmettere di carichi veicolari attraverso gli strati di binder e di base alla fondazione e, quindi, al sottofondo. L'azione dei carichi esterni, infatti, può determinare flessioni degli strati in conglomerato bituminoso che possono determinare l'innescò di una microfessurazione diffusa che può evolvere fino a raggiungere la superficie della pavimentazione stradale, diventando via preferenziale d'infiltrazione delle acque meteoriche favorendo una maggiore esposizione al degrado.

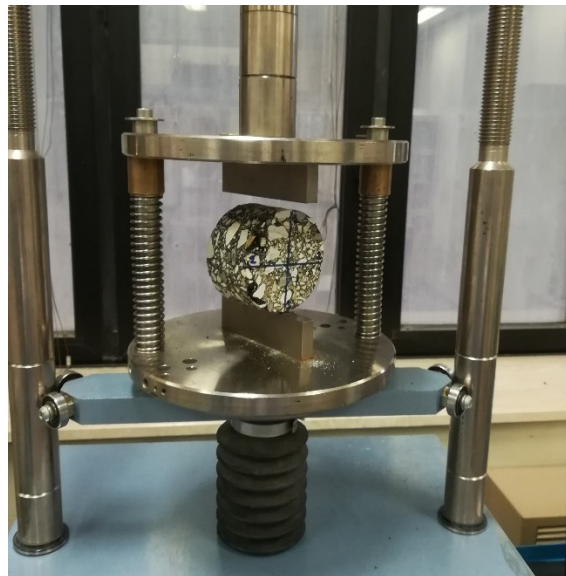
La prova di trazione indiretta è stata eseguita in linea con le disposizioni della UNI EN 12697-23. L'apparecchiatura di prova utilizzata è una pressa statica costituita principalmente da un telaio di carico, formato da due piatti paralleli orizzontali, di cui quello inferiore è fissato ad una base dotata di due guide che consentono lo spostamento verticale delle due teste di carico, fino a che il piatto superiore non viene a contatto con il provino e ne inizia la compressione con velocità di deformazione costante pari a  $50 \pm 2$  mm/min.

Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli che presentano una superficie leggermente concava per favorire il corretto posizionamento del provino.



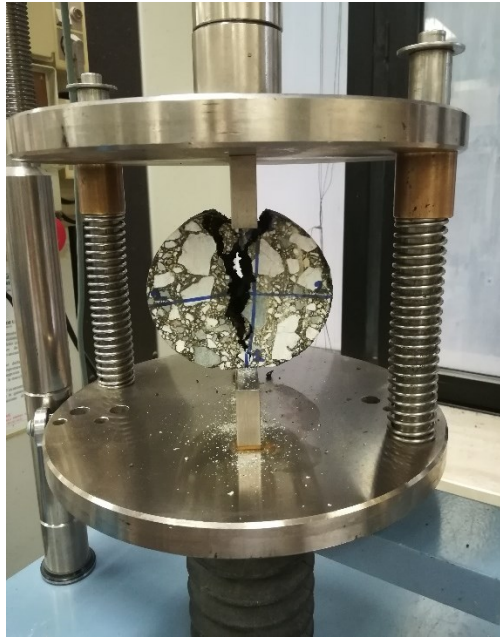
*Figura 18 Apparecchiatura utilizzata per la prova ITS*

Il provino viene quindi collocato tra i piatti della pressa in modo che esso risulti ben centrato, verificando che il suo asse sia orizzontale, che l'asse del listello di carico superiore e inferiore risultino tra loro perfettamente paralleli e che entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino stesso.



*Figura 19 Montaggio del provino sulla strumentazione di prova*

Successivamente viene avviata la prova mediante l'applicazione di un'azione di compressione diametrale continua: la testa di carico inferiore viene fatta avanzare ad una velocità costante di  $50 \pm 2$  mm/min fino a raggiungere un valore di carico di picco e poi la prova prosegue fino a quando il provino non raggiunge la rottura. La prova viene svolta in controllo di deformazione e una cella di carico consente di misurare lo sforzo opposto dal materiale al suo schiacciamento.



*Figura 20 Fase di rottura del provino*

L'apparecchiatura di prova è collegata a un sistema computerizzato di acquisizione e controllo dati, tramite il software UTM II, che permette di impostare i principali parametri di prova (quali diametro e altezza del provino, velocità di avanzamento e carico di fine prova) e restituisce in output sia la curva carico-corsa (carico-deformazione verticale già visualizzabile durante l'esecuzione del test), sia il valore di resistenza a trazione indiretta, cioè la massima tensione di trazione applicata al provino pari a

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

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.

La prova è stata eseguita a  $25^{\circ}\text{C}$ .

### **2.1.5 Prova di resistenza a fatica a trazione indiretta, ITFT (UNI EN 12697-24)**

L'ultima fase di caratterizzazione meccanica, di questa sperimentazione, ha avuto come obiettivo la determinazione della resistenza a fatica dei materiali attraverso la prova di ITFT, *Indirect Tensile Fatigue Test*.

La resistenza a fatica di un materiale rappresenta la resistenza che esso è in grado di sviluppare se sottoposto a carichi di intensità inferiore a quelli che comporterebbero una rottura immediata ma che se ripetuti ciclicamente per un certo periodo di tempo e con una certa frequenza possono determinarne il collasso. Attraverso la prova ITFT è possibile riprodurre abbastanza fedelmente quello che accade in una pavimentazione stradale per effetto del ricorrente passaggio degli autoveicoli, i quali producono un progressivo danneggiamento della pavimentazione stessa che porta alla comparsa di fessure e alla loro propagazione fino al raggiungimento della condizione ultima (fine vita utile di servizio).

La caratterizzazione in laboratorio del comportamento a fatica avviene, infatti, sottoponendo il materiale a prove cicliche che consentono di determinare il numero di cicli di rottura. La misurazione avviene attraverso l'utilizzo del macchinario "Nottingham Asphalt Tester (NAT)", attrezzatura analoga a quella utilizzata per la valutazione del modulo di rigidità, ma applicando protocolli di prove diversi secondo le disposizioni riportate dalla norma UNI EN 12697-24 [k].

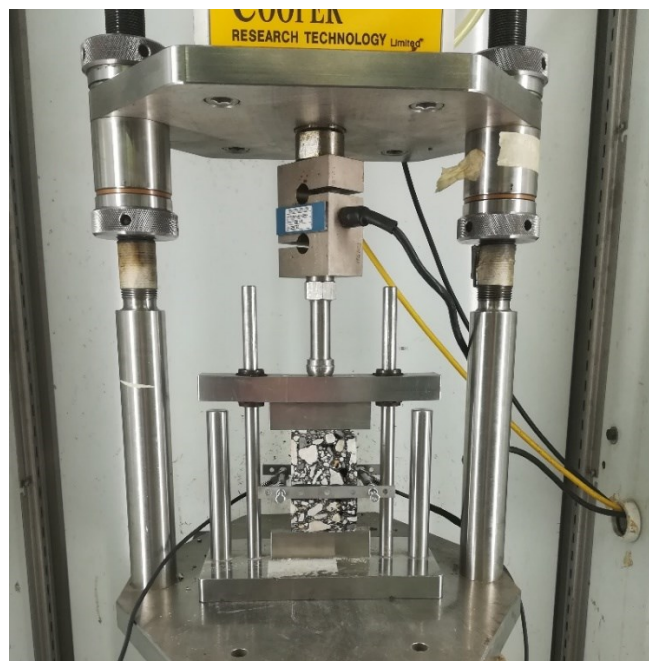
Per l'esecuzione della prova è necessario che sui provini vengano incollate delle barrette, disposte in punti opposti lungo uno dei due diametri, che serviranno nella fase di montaggio dei trasduttori ovvero dei dispositivi che permettono la misura delle deformazioni.





*Figura 21 Incollaggio delle barrette*

Una volta terminata questa fase, il provino viene messo in camera climatica per almeno 8 ore in modo tale che raggiunga la temperatura a cui deve essere effettuata la prova, in questo caso 20°C. Dopodiché viene montato sul castelletto e inserito all'interno del macchinario dove è tenuto fermo dalla barra di carico su cui andrà ad agire il pistone e si procede al fissaggio dei trasduttori.

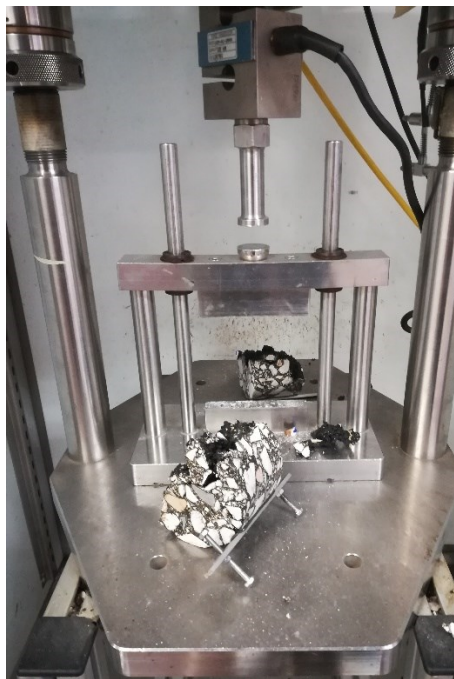


*Figura 22 Assemblaggio della prova*



Successivamente è possibile avviare il software di controllo ed esecuzione della prova. La fase preliminare consiste nell'introduzione dei parametri di prova: temperatura (in questa sperimentazione 20°), dati geometrici (diametro e altezza media del provino), target horizontal stress (definito di volta in volta tenendo conto del valore di modulo di rigidezza ottenuto dalla prova ITSM), rise-time (124ms) e deformazione verticale massima.

Si procede quindi al corretto posizionamento dei trasduttori che vengono regolati attraverso le due viti di cui è dotato il castelletto e all'avvio della prova: da qui in poi, il pistone procederà ad applicare una serie di impulsi di durata 0,1 secondi ad intervalli di 0,4 secondi, fino alla completa rottura del provino.



*Figura 23 Rottura del provino a fatica*

### **2.1.6 Caratterizzazione reologica del bitume**

Terminata la fase di caratterizzazione fisica e meccanica delle carote di conglomerato oggetto di questa ricerca, è stata realizzata un'estrazione a freddo dei resti di campioni, in maniera tale poi da poter procedere all'esecuzione di test finalizzati alla valutazione delle proprietà reologiche del legante stesso. Tale operazione è stata realizzata a freddo in modo tale da non influenzare le caratteristiche chimiche del bitume.

Il bitume, infatti, è un materiale viscoelastico caratterizzato da un comportamento intermedio tra quello di un fluido viscoso e di un solido elastico. I parametri che ne descrivono la reologia

sono: l'angolo di fase  $\delta$  e la norma del modulo complesso  $|G^*|$ . Questi possono essere valutati attraverso prove in oscillatorie che richiedono l'uso del DSR (Dynamic Shear Rheometer, UNI EN 14770 [1]). Tale apparecchiatura prevede che i campioni di bitume, a temperatura controllata, vengano sottoposti a sollecitazioni di tipo sinusoidale mediante l'applicazione di una coppia torcente che simula l'azione del passaggio dei carichi veicolari sulla pavimentazione con una frequenza di prova pari a  $\omega=2\pi\nu$ , che dovrebbe riprodurre la velocità di transito veicoli stessi [17].

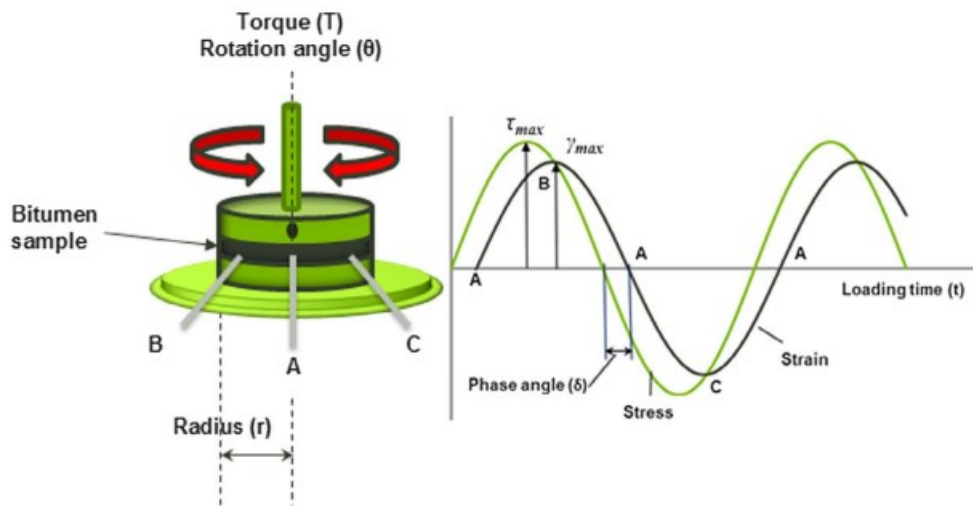


Figura 24 Rappresentazione schematica del funzionamento del DSR [18]

La natura viscoelastica del bitume fa sì che la sua risposta deformativa oscilli con la stessa frequenza della sollecitazione applicata, ma che sia in ritardo rispetto a questa. L'angolo di fase è il parametro che descrive l'entità di tale ritardo. Esso può variare tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$  e consente di valutare l'entità delle proprietà viscosse del materiale rispetto a quelle elastiche reversibili: un angolo di fase  $\delta = 0^\circ$  è rappresentativo di un comportamento puramente elastico e tensioni e deformazioni saranno perfettamente in fase;  $\delta = 90^\circ$  invece implica un comportamento puramente viscoso e lo sfasamento sarà massimo.

La determinazione dei due parametri caratteristici del materiale ( $|G^*|$ ,  $\delta$ ) è possibile grazie alla relazione che lega il momento torcente alla velocità angolare che consente di risalire alle tensioni e deformazioni tangenziali ( $\tau$  e  $\gamma$ ) di seguito riportate

- $\tau = \frac{2 \cdot T}{\pi \cdot r^3}$
- $\gamma = \frac{\theta \cdot r}{h}$

### **2.1.6.1 Prova di Strain Sweep, SS**

In accordo con la normativa UNI EN 14770:2012, preliminarmente alla caratterizzazione vera e propria delle proprietà reologiche del materiale finalizzate alla ricerca del modulo complesso e del relativo angolo di fase di un materiale, è necessario stabilire il limite di viscoelasticità lineare, ovvero il valore di ampiezza di sollecitazione oltre il quale potrebbero intervenire fenomeni deformativi di natura plastica.

Una volta determinato il limite di linearità è possibile definire il valore di deformazione massima con la quale andare ad eseguire la prova di Frequency Sweep (FS).

Il campo di linearità è stato indagato tramite la prova di *Strain Sweep*, letteralmente “Spazzata di deformazioni”. L'apparecchiatura di prova utilizzata è il DSR in configurazione piatto-piatto di diametro di 8mm: in particolare, il sistema è costituito da un piatto inferiore che è fisso ed un piatto superiore che invece può abbassarsi e oscillare attorno ad un asse verticale. Un altro importante parametro geometrico (oltre al raggio) è il cosiddetto “gap”, ovvero la distanza tra i due piatti in posizione di misura, che per diametri di 8mm è fissato pari a 2mm.

Il software Rheoplus consente l'acquisizione dei dati e il controllo dei parametri di prova. Per la prova di Strain Sweep i principali parametri impostati sono:

- La frequenza di 10 rad/sec, che viene mantenuta costante durante tutta la durata della prova;
- La deformazione da applicare al campione che va dallo 0,001% all'1%;
- Le temperature di prova che sono di 5 °C, 15 °C e 30 °C.

Preliminarmente allo svolgimento della prova, vi è una fase di condizionamento per ciascuna temperatura di prova, necessaria ad assicurare che ogni parte del campione si trovi effettivamente alla temperatura desiderata. Poi attraverso il piatto superiore si applica al materiale una deformazione con legge sinusoidale, la cui ampiezza di deformazione viene gradualmente incrementata. Contemporaneamente vengono misurati i corrispondenti valori di tensioni tangenziali. Il rapporto tra le due grandezze consente di determinare il valore del modulo complesso  $|G^*|$ . Tipicamente il limite superiore di linearità del materiale coincide con quel valore di deformazione in corrispondenza del quale si osserva una riduzione dell'entità del modulo complesso del 5% rispetto al suo valore iniziale.

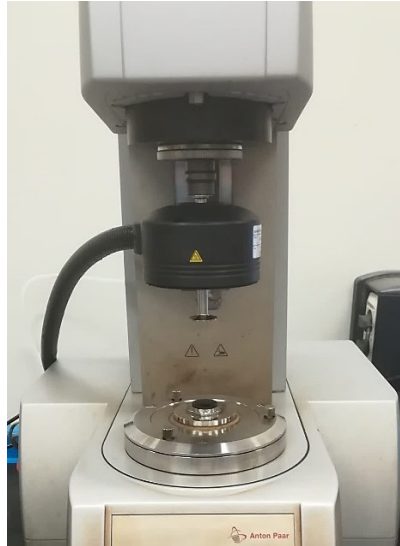
Nella presente sperimentazione, i risultati delle prove hanno portato a scegliere un valore di deformazione limite da adottare nella successiva prova di Frequency Sweep dello 0,1%.

### **2.1.6.2 Prova di Frequency Sweep, FS**

Definito il limite del campo di linearità tramite la SS, i campioni di bitume sono stati testati tramite la prova di *Frequency Sweep* o “Spazzata di frequenze”. L’obiettivo di questa prova è quello di costruire le curve maestre del materiale cioè curve a temperatura costante che consentono di rappresentare una grandezza viscoelastica in un ampio range di frequenze. In particolare, dalle prove di Frequency Sweep è stato possibile valutare l’andamento del modulo complesso e dell’angolo di fase in funzione della frequenza e a varie temperature. Sfruttando poi il principio di equivalenza tempo-temperatura (noto anche come principio di sovrapposizione tempo-temperatura), è possibile traslare tali curve, per mezzo di uno stesso fattore detto shift factor, ed ottenere un’unica curva isoterma ad una fissata temperatura di riferimento e per intervalli di frequenze più ampi di quelli che è possibile ottenere con la strumentazione di laboratorio.

Anche questa prova è stata eseguita con il DSR ed è stato possibile impostare i parametri di prova tramite il software Rheoplus. Il test prevede che al campione di bitume venga applicata una deformazione costante pari a  $\gamma = 0,1\%$  (valore definito tramite la prova di SS), ed uno spettro di frequenze che variano da 0,1 a 10 Hz. Le temperature di prova indagate sono: 0, 4, 16, 28, 40, 52, 64, 76 e 88 °C. Al variare della temperatura è stato necessario modificare i parametri geometrici di prova: per T da 0° a 40° si è utilizzato il piatto da 8mm che meglio si presta alle basse temperature, mentre si è utilizzato un piatto da 25mm per quelle più alte.

Una volta impostati tutti i principali parametri di prova, si procede posizionando il campione di bitume sul piattino inferiore che dovrà essere sufficientemente caldo a garantire l’adesione con il provino. Una spatola, precedentemente scaldata, viene poi passata sull’altra superficie del provino in modo che questo possa aderire in maniera efficace al piatto superiore.



*Figura 25 Posizionamento del campione di bitume sulla strumentazione di prova*

Attraverso il comando “Meas. Position” il piatto superiore raggiunge la posizione di misura e schiaccia il bitume. Il materiale in eccesso viene rimosso, si imposta la temperatura iniziale di prova e si avvia alla prova.



*Figura 26 Piatto superiore nella posizione di misura e schiacciamento del bitume*

Prima di ogni misurazione, vi è una fase di condizionamento alla temperatura di prova per assicurarsi che l'intero campione si trovi effettivamente alla temperatura impostata.

Durante la prova, la zona in corrispondenza di piattini e campione viene opportunamente protetta mediante una cappa, di cui la strumentazione è dotata, in modo da evitare qualsiasi perturbazione esterna.



Figura 27 Chiusura della cappa durante lo svolgimento della prova

L'andamento del test può essere costantemente monitorato sulla schermata principale del software dove viene riportato il grafico di prova che mostra, su un piano bi-logaritmico, l'andamento del modulo complesso  $|G^*|$  (in ordinata) in funzione della velocità angolare  $\omega$  (in ascissa) per ciascuna temperatura di prova.

### **2.1.6.3 Prova Multiple Stress Creep Recovery, MSCR**

L'ulteriore prova che è stata effettuata per la caratterizzazione reologica del legante estratto dalle carote oggetto di questa sperimentazione è quella del *Multiple Stress Creep Recovery*, MSCR (ASTM D7405) [m]. Il test consente di caratterizzare la risposta elastica del bitume e valutare la sua resistenza nei confronti dell'accumulo di deformazioni permanenti, dovuto all'applicazione ciclica di carichi veicolari alle alte temperature. Dai risultati della prova, dunque, sarà possibile valutare la percentuale di deformazione recuperabile e non recuperabile.

La prova viene eseguita utilizzando il DSR in configurazione piatto-piatto da 25mm con gap di 1mm. La procedura di preparazione e montaggio del provino è la stessa utilizzata anche nelle prove di FS.

Nel caso in esame, il test è stato eseguito considerando tre differenti temperature (70, 76, 82 °C). All'inizio è prevista una fase di condizionamento alla prima temperatura di prova per permettere al campione di raggiungere la temperatura desiderata in modo omogeneo. Successivamente ha inizio la prova vera e propria: essa prevede l'applicazione di 10 cicli consecutivi di carico e scarico di durata 10 secondi ciascuno, di cui 1 secondo di carico e 9 secondi di recovery. I valori di tensione tangenziale applicati sono di 0,1 e 3,2 kPa. Questo iter viene ripetuto per ogni temperatura di prova. In figura 28 si riporta un esempio dell'andamento di un ciclo di creep-recovery.

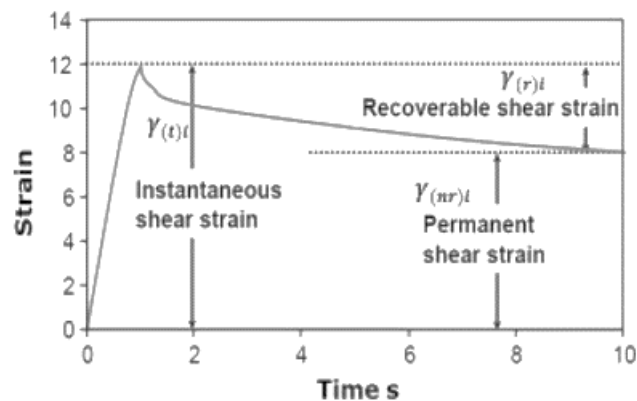


Figura 28 Tipico andamento di un ciclo di carico e scarico [19]

Il grafico fornito in output dal software avrà un andamento del tutto simile a quello sopra riportato per ogni ciclo di carico e scarico; da questo è immediatamente osservabile la porzione di deformazione recuperata e la parte di deformazione permanente che caratterizzano il comportamento dei materiali viscoelastici come i bitumi. Di conseguenza i due principali parametri che è possibile determinare da questa prova saranno:

- $J_{nr}$  che rappresenta il valore di deformazione media non recuperata in funzione del carico applicato;
- $R$  che invece indica il recupero elastico a ciascun livello tensionale applicato.

#### 2.1.6.4 Prova Linear Amplitude Sweep, (LAS)

La prova che usualmente viene utilizzata per la caratterizzazione del comportamento del bitume all'aumentare del danno è la prova LAS, *Linear Amplitude Sweep* (Norma AASHTO TP101) [n].

L'apparecchiatura di riferimento, anche in questo caso, è il Dynamic Shear Rheometer in configurazione piatto-piatto da 8 mm e le fasi di assemblaggio e avvio della prova risultano del tutto simili a quelle descritte nelle prove precedenti.

Il test prevede che all'inizio venga eseguita una prova di Frequency Sweep a deformazione costante  $\gamma = 0,1\%$  e con un range di frequenze che vanno da 0,2 a 30 Hz che permette di valutare la risposta del materiale non ancora danneggiato.

In seguito, ha inizio la prova di Amplitude Sweep vera e propria, in cui l'ampiezza della deformazione viene fatta progressivamente aumentare da 0,1% a 30%: in particolare si osserva un aumento del 0,05% al secondo [20]. In figura 29 si riporta un esempio di andamento della curva tensione tangenziale-deformazione che è possibile ottenere da questa prova

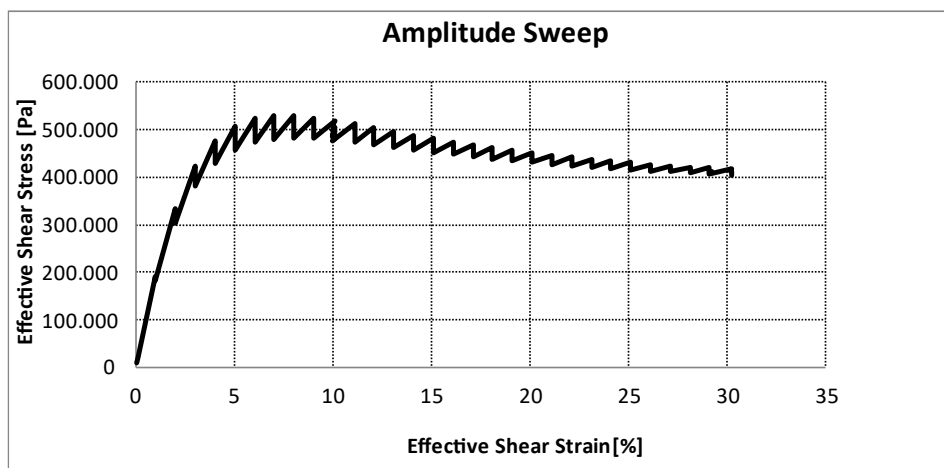


Figura 29 Tipico andamento di una curva tensione tangenziale-deformazione in una prova LAS

Tradizionalmente, il punto di rottura del campione viene identificato come punto di picco della curva.

### **2.1.7 Spettroscopia a Infrarossi in Trasformata di Fourier, FTIR**

Nell'ultima parte della ricerca i risultati precedentemente ottenuti sono stati ulteriormente approfonditi mediante delle prove chimiche FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), con le quali è stato possibile indagare le eventuali differenze di invecchiamento che è possibile leggere a livello molecolare dovute alle differenti percentuali di fresato utilizzato nelle miscele, alla presenza di additivi rigeneranti in quelle con il 50% e alla tecnologia di confezionamento



degli impasti utilizzata dall'impianto di produzione. Inoltre, essa consente anche di investigare la percentuale di polimeri SBS contenuti nei bitumi.

La Spettroscopia Infrarossa a Trasformata di Fourier è una tecnica spettroscopica di assorbimento che studia i legami chimici e che permette di ottenere lo spettro di assorbimento del materiale, funzione della sua capacità di trasmettere il segnale. Lo strumento utilizzato in questa prova è lo spettrometro. Esso risulta costituito da:

- Un interferometro composto a sua volta da una sorgente e tre specchi, di cui uno fisso, uno semimobile e uno mobile. La loro funzione è quella di direzionare il raggio emesso dalla sorgente verso il campione;
- Un comparto celle dove viene sistemato il campione da analizzare;
- Un rivelatore che è un sensore che riceve la radiazione che ha attraversato il campione generando un interferogramma;
- Un sistema di acquisizione e rielaborazione dei dati: lo spettrometro è infatti collegato ad un computer che permette di rielaborare in automatico i dati ricevuti e fornisce in output lo spettro di assorbimento del materiale.

Lo strumento, quindi, emette un raggio infrarosso. Quando questo colpisce il campione, tende a trasmettergli energia e le sue molecole che costituiscono il materiale iniziano a vibrare. Le vibrazioni che è possibile avere sono varie. Le due tipologie fondamentali sono: lo stretching che si manifesta con uno stiramento del legame chimico e il bending con il quale si osserva una variazione dell'angolo di legame. Nel momento in cui l'interazione del raggio infrarosso con la molecola comporta una variazione del momento dipolare, viene registrato un segnale nello spettro infrarosso.

Innanzitutto, la prova richiede che venga effettuato il "background" del supporto che verrà utilizzato per la realizzazione del campione da testare, ovvero dei dischetti di cloruro di sodio; in questo modo è possibile ottenere lo spettro del supporto che poi il software sottrarrà in automatico a quello del bitume analizzato. Il passo successivo prevede la preparazione del campione. In questa fase si procede sciogliendo un po' di bitume con del cloroformio che poi viene depositato in un sottile strato sui dischetti di NaCl.



Figura 30 Fluidificazione del bitume con cloroformio

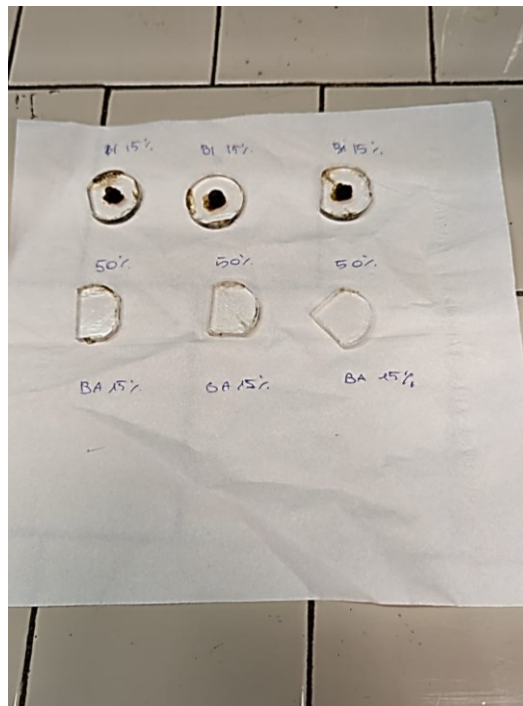


Figura 31 Dischetti di NaCl con campione di bitume

Atteso il tempo di evaporazione del  $\text{CHCl}_3$ , si dispone il tutto (bitume e dischetto) all'interno del comparto cella che viene poi inserito nell'apposito alloggiamento sul macchinario di prova.



Figura 32 Posizionamento del campione nel comparto cella

A questo punto si avvia la prova e il computer restituirà in automatico lo spettro del materiale che sarà funzione nel numero d'onda (in ascissa) e della trasmittanza o dell'assorbanza (in ordinata) che sono l'uno il reciproco dell'altro.

Dallo spettro è stato possibile valutare gli effetti dell'invecchiamento del bitume: questo è determinato dalla formazione di nuovi legami in corrispondenza delle bande  $1700\text{ cm}^{-1}$  e  $1030\text{ cm}^{-1}$  dove ricadono rispettivamente i legami C=O dei gruppi carbonili e i legami S=O dei gruppi solfossidi. Sono stati quindi calcolati gli indici  $I_{CO}$  e  $I_{SO}$ , che sono indici d'invecchiamento, attraverso le seguenti relazioni:

- $$I_{CO} = \frac{\text{Area around } 1700\text{ cm}^{-1}}{\text{Area around } 1460\text{ cm}^{-1} + \text{Area around } 1375\text{ cm}^{-1}}$$
- $$I_{SO} = \frac{\text{Area around } 1030\text{ cm}^{-1}}{\text{Area around } 1460\text{ cm}^{-1} + \text{Area around } 1375\text{ cm}^{-1}}$$

L'altro parametro che è stato possibile valutare è la percentuale di polimero SBS, calcolata attraverso due correlazioni note in letteratura:

- $\%SBS_{966} = \frac{(\frac{H_{966}}{H_{1377}} - 0.000959)}{0.06062}$

- $\%SBS_{699} = \frac{(\frac{H_{699}}{H_{1377}} - 0.00251)}{0.05709}$

### **2.1.8 Codifica dei provini**

La prima parte della sperimentazione ha riguardato il confronto prestazionale, sia per i conglomerati di base che di binder, tra le miscele oggetto di questo studio ovvero quelle con un contenuto di fresato del 50% e quelle con il 15% di RAP.

Per consentirne un'identificazione univoca, le carote testate sono state codificate in base allo strato di appartenenza, alla percentuale di fresato in esse contenuto e alla porzione di strada dell'aeroporto dalla quale sono state estratte e al numero della carota. Si riporta, a titolo di esempio, il seguente codice:

BI15%\_CPH\_43

Di conseguenza il codice alfanumerico di riferimento è il seguente:

$\alpha \beta \gamma \delta$

dove:

- $\alpha$  = BI (binder); BA (base);
- $\beta$  = 15%, 50% percentuale di RAP;
- $\gamma$  = A, B, C, D ... zona dell'aeroporto dalla cui pavimentazione è stata estratta la carota;
- $\delta$  = numero della carota.

Nella seconda parte della sperimentazione, invece, ci si è concentrati sulla caratterizzazione reologica e chimica del bitume del solo strato di binder, estratto a freddo dalle carote precedentemente testate. Anche in questa fase l'obiettivo era quello di confrontare le prestazioni

di un legante proveniente da una miscela con il 50% di fresato con quella di riferimento che ha un contenuto del 15% di materiale riciclato.

La nomenclatura utilizzata per la denominazione dei bitumi testati fa riferimento allo strato di provenienza e alla percentuale di RAP della miscela. Di seguito se ne riporta un esempio:

BI15%

## ***Capitolo 3 – Materiali indagati e problematiche dell'impianto***

Nel seguente capitolo verranno descritti i materiali che sono oggetto di studio della presente sperimentazione e verranno individuate e definite le criticità dell'impianto che si è occupato della realizzazione di tali miscele.

### **3.1 Materiali indagati**

In una prima fase, la presente ricerca si è occupata di valutare le caratteristiche prestazionali di miscele di conglomerato bituminoso riciclato a caldo con bitume con rigenerante e con un contenuto di fresato del 50% sia per strati di binder che di base, andandole a confrontare con una miscela di riferimento senza additivi e con un quantitativo di RAP del 15% per entrambi gli strati. In particolare, l'indagine è stata effettuata su carote prelevate da un campo prova sulle vie di rullaggio (taxiway) dell'aeroporto di Fiumicino. Queste sono state suddivise in varie tratte in corrispondenza di ciascuna delle quali sono state utilizzate una combinazione di base e di binder realizzate con varie tipologie di miscele: quella usuale con il 15% di fresato o quella sperimentale con il 50%. In figura si riportano le tratte in cui è stato suddiviso il campo prova.

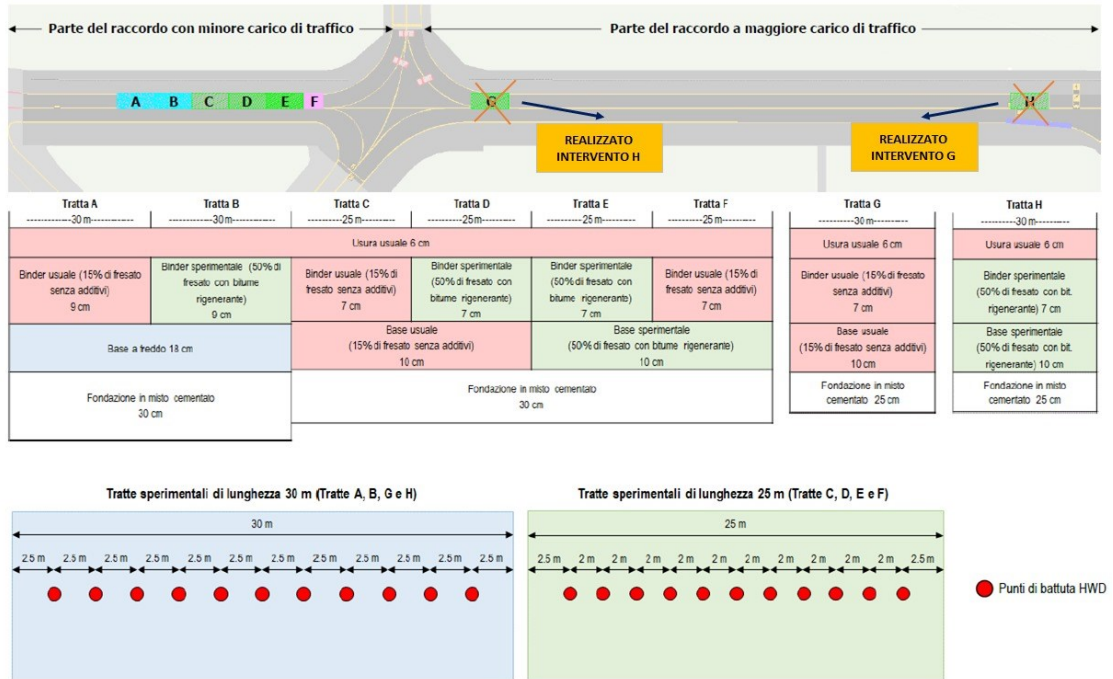


Figura 33 Suddivisione in tratte del campo prova

Le miscele di aggregati utilizzate per la realizzazione delle ricette dei conglomerati devono risultare conformi alle prescrizioni riportate nelle normative di riferimento. In generale, queste definiscono i principali requisiti di qualificazione ed accettazione in termini prestazionali sia dei singoli materiali, quali aggregati, leganti ed eventuali additivi, sia della miscela di conglomerato finale che ne scaturisce. Lo scopo è quello di ottenere un prodotto finale che abbia raggiunto i necessari standard di qualità richieste per ogni opera da dover realizzare.

In questa sperimentazione, le specifiche tecniche a cui si è fatto riferimento sono le Norme Tecniche per Opere Civili di Aeroporti di Roma rilasciate dall'aeroporto di Fiumicino per lavori di adeguamento delle vie di rullaggio November Echo.

Per quanto concerne le varie pezzature di aggregati che vengono impiegate nello scheletro litico dei conglomerati per gli strati di base e binder, tali Norme Tecniche prevedono analisi delle proprietà fisiche, chimiche e geometriche e la conformità alle prescrizioni definite nella Norma armonizzata UNI EN 13043 [o], *Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti ed altre aree soggette a traffico*.

Le Norme di riferimento forniscono inoltre prescrizioni inerenti all'impiego di conglomerato bituminoso riciclato negli strati di base e binder. In particolare, si definisce che per lo strato di base possa essere impiegato materiale fessato di qualsiasi provenienza (strati di base, binder e usura), mentre per il binder è consentito unicamente l'uso di RAP prelevato da strati di binder

e usura. Inoltre, si prescrive che la classificazione di questi materiali debba essere eseguita in conformità con la Norma UNI EN 13108-8.

Tuttavia, per quanto concerne l'intera miscela di aggregati, essa dovrà essere caratterizzata da una distribuzione granulometrica tale da rispettare i limiti previsti dal fuso granulometrico.

Di seguito si riportano i requisiti granulometrici della miscela di aggregati per strati di base e binder in conglomerato bituminoso tradizionale e con bitume modificato [21]:

**1) Strato di base**

Apertura maglia dei setacci UNI EN (mm)	Passante (%)	
31,5	100	100
20	100	70
16	91	63
8	64	40
4	50	29
2	36	20
0,5	22	10
0,25	18	6
0,063	9	3

Tabella 3 Distribuzione granulometrica strato di base

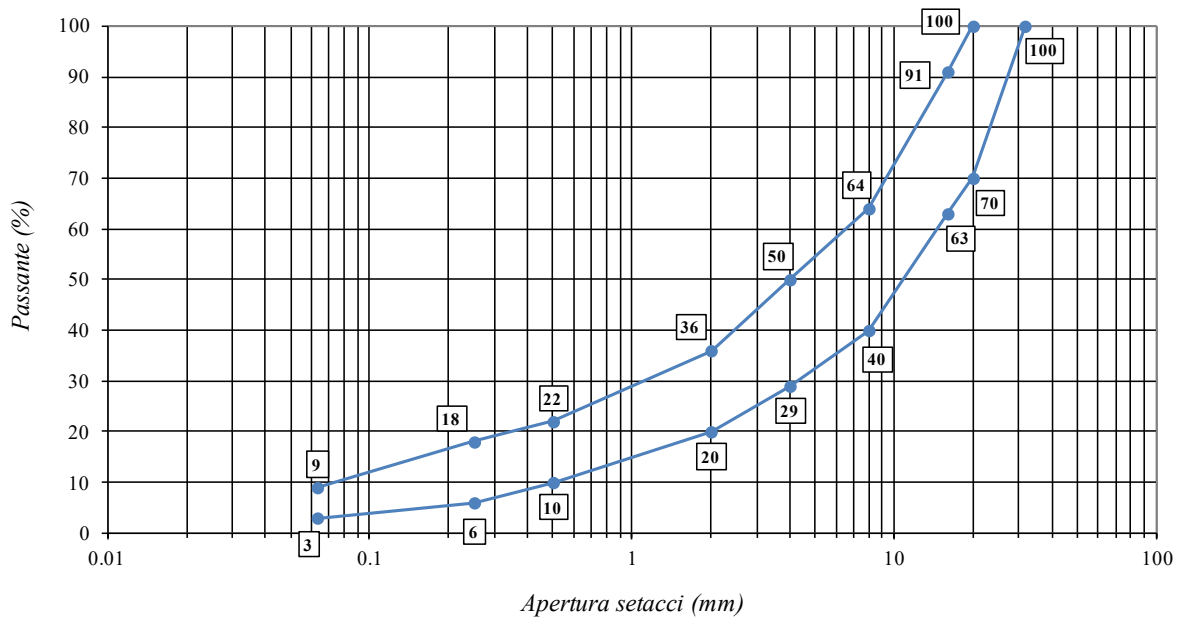


Figura 34 Fuso granulometrico strato di base



2) Strato di binder

Apertura maglia dei setacci UNI EN (mm)	Passante (%)	
22,4	100	100
20	100	85
16	100	70
8	70	40
4	55	30
2	40	20
0,5	22	10
0,25	17	7
0,063	9	3

Tabella 4 Distribuzione granulometrica strato di binder

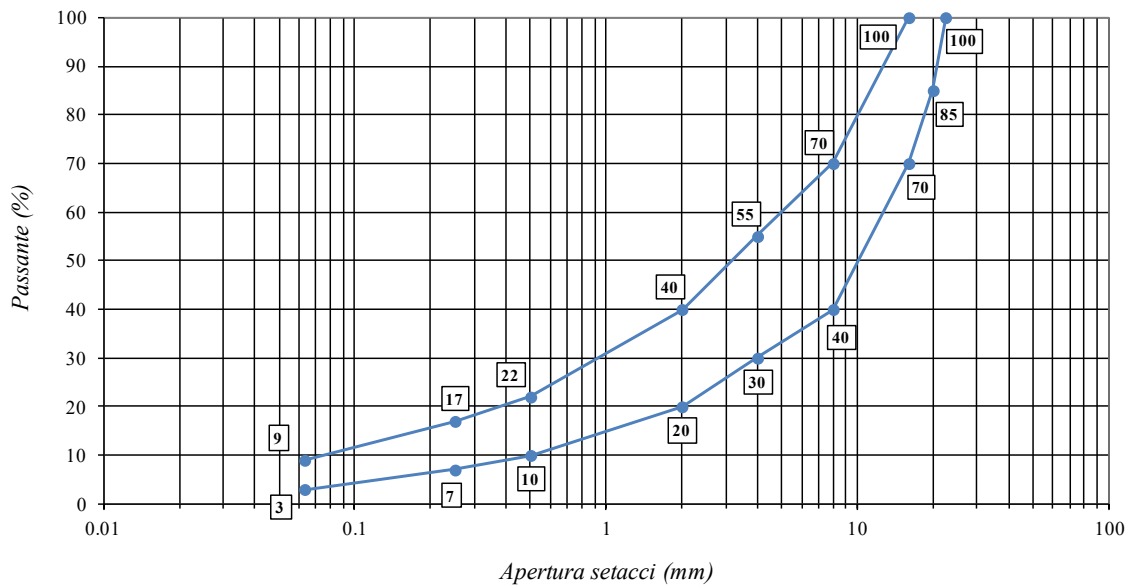


Figura 35 Fuso granulometrico strato di binder

L'impresa che ha eseguito i lavori nell'aeroporto non ha fornito indicazioni riguardo la curva granulometrica impiegata per il confezionamento delle miscele. Tuttavia, in fase di verifica dei materiali, si è eseguito l'estrazione del bitume con le prove di laboratorio e successivamente è stato possibile procedere con l'analisi granulometrica degli aggregati post estrazione. I risultati di tali analisi verranno presentati nei capitoli successivi come risultati delle indagini fatte in laboratorio.

Per la realizzazione dei conglomerati è stato utilizzato un bitume di tipo hard e con classe di penetrazione 45/80-70. In particolare, si tratta di un Polymer Modified Bitumen di tipo Hard [22].

Tale bitume è stato additivato mediante l'impiego di rigeneranti che consentono di migliorarne le caratteristiche di adesione, consistenza e viscosità e soprattutto hanno il compito di ripristinare le caratteristiche del legante invecchiato proveniente dal fresato, migliorando perciò le prestazioni del conglomerato bituminoso finale.

Il bitume proveniente da fresato, infatti, presenta caratteristiche alterate rispetto a quelle che esso possedeva originariamente in quanto ha subito processi di invecchiamento sia nella sua prima miscelazione e sia durante la sua precedente vita utile, determinandone un irrigidimento e infragilimento. Di conseguenza, l'uso di additivi rigenerante risulta necessario e fortemente raccomandato soprattutto nelle miscele con elevate percentuali di fresato per riattivare quelle proprietà che il legante aveva perso.

Di seguito si riporta la scheda tecnica fornita dal produttore dalla quale è possibile rilevare le principali proprietà che lo caratterizzano

Caratteristiche	Proprietà	Metodo	U.d.M.	Prestazione		Classe
				min	max	
Consistenza alle temperature intermedie di servizio	Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm	45	80	4
Consistenza alle temperature elevate di servizio	Punto di Rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	70		4
Coesione	Force Ductility Test a 10°C	UNI EN 13589 UNI EN 13703	J/cm²	3,0		7
Durabilità Resistenza all'invecchiamento RTFOT EN12607-1	Variazione di massa	-	%		0,5	3
	Penetrazione a 25°C residua	UNI EN 1426	%	60		7
	Incremento del punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C		5	2
Infiammabilità	Flash point	EN ISO 2592	°C	250		2
Viscosità dinamica	Viscosità a 160°C	UNI EN 13302	Pa.s	0,35		
Recupero di deformazione	Ritorno Elastico a 25°C.	UNI EN 13398	%	85		2
Stabilità allo stoccaggio EN13399	Δ Punto di rammollimento.	UNI EN 1427	°C		5	2
	Δ Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	°C		9	2
<b>Temperature di utilizzo</b>				<b>Valori indicativi</b>		
Temperatura di stoccaggio			°C	170 ÷ 180		
Temperatura di stoccaggio prolungato oltre 5 giorni			°C	110 ÷ 120		
Temperatura impasto con inerti			°C	165 ÷ 180		
Temperatura minima di compattazione			°C	> 145		

Figura 36 Scheda tecnica bitume

### **3.2 Problematiche dell'impianto**

Oltre alla valutazione delle caratteristiche prestazionali delle miscele di conglomerato con un quantitativo del 50% di RAP e lo studio delle reali possibilità di utilizzo di queste qualora si ottengano rendimenti paragonabili a quelli che è possibile avere con materiali vergini, si è focalizzata l'attenzione sulle criticità dell'impianto che si è occupato della realizzazione di questi impasti che non ha le dovute caratteristiche per riciclare elevati quantitativi di fresato. La pratica odierna, con l'utilizzo di impianti e strumentazioni sempre più innovative e sofisticate, consente infatti di poter raggiungere quantitativi di materiale riciclato nelle miscele ben superiori al 50%. Di conseguenza si è voluto indagare la qualità degli impasti prodotti da un impianto che invece risulta tecnologicamente molto arretrato.

Lo stabilimento di produzione è infatti molto vecchio e utilizza una tecnologia produttiva che poco si adatta alle esigenze dell'uso di materiale riciclato. Esso prevede un cilindro essiccatore che lavora controcorrente per cui i materiali, aggregati vergini e riciclato, si muovono verso la fiamma del bruciatore che tende a scaldarli eccessivamente. Le elevate temperature stressano particolarmente i materiali e il bitume contenuto nel fresato può "crackizzare" [23], o addirittura bruciare. Inoltre, c'è il rischio di immettere sostanza nocive in atmosfera.



*Figura 37 Impianto di produzione*



*Figura 38 Impianto di produzione*

Per tali ragioni la presente ricerca si è anche occupata di indagare gli eventuali effetti che le modalità produttive del suddetto impianto possono apportare al prodotto finale.

## Capitolo 4 – Risultati sperimentali, PARTE A

Nel seguente capitolo verranno illustrati i risultati ottenuti dalle analisi delle caratteristiche volumetriche, granulometriche e meccaniche delle carote degli strati di base e di binder oggetto di questa ricerca. Inoltre, verrà effettuato un confronto tra le due differenti tipologie di miscele utilizzate per il loro confezionamento, con il 15% e con il 50% di fresato.

### 4.1 Contenuto di vuoti

Per la determinazione del contenuto dei vuoti è stato necessario inizialmente valutare la massima massa volumica  $\rho_{max}$  e si è proceduto poi al calcolo della massa volumica apparente utilizzando il metodo dry e il metodo con la paraffina, ottenendo in questo modo tutti i parametri necessari per la valutazione della percentuale dei vuoti come riportato al paragrafo § 2.1.1. Di seguito si riportano tabelle che mostrano i risultati ottenuti e grafici per il confronto tra le miscele con il 15% e il 50% di fresato utilizzate sia nello strato di base che in quello di binder.

#### 4.1.1 Contenuto di vuoti nello strato di base

BA15%	
$P_{bitume}$	4,3
$P_{calcare}$	95,7
$\rho_{bitume} [g/cm^3]$	1,02
$\rho_{calcare} [g/cm^3]$	2,68
<b><math>\rho_{max} [g/cm^3]</math></b>	<b>2,50</b>

Tabella 5 Massima massa volumica base15%

BA50%	
$P_{bitume}$	4,7
$P_{calcare}$	95,3
$\rho_{bitume} [g/cm^3]$	1,02
$\rho_{calcare} [g/cm^3]$	2,68
<b><math>\rho_{max} [g/cm^3]</math></b>	<b>2,49</b>

Tabella 6 Massima massa volumica base50%

• **Metodo dry**

Codice	m <sub>secca</sub> [g]	$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	m <sub>dry</sub> [g]	$\rho_{dry}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	V <sub>dry</sub> [%]
BA15%_CPA_1	2464,3	0,998	1419,5	2,35	5,99
BA15%_CPA_2	2574,3		1473,3	2,33	6,81
BA15%_CPE_7	2556,0		1472,7	2,36	5,96
BA15%_CPE_8	2603,2		1509,3	2,38	5,15
BA15%_CPH_9	2659,3		1545,8	2,38	4,81
BA15%_CPH_10	2604,6		1511,6	2,38	5,02

Tabella 7 Vuoti dry base15%

Codice	m <sub>secca</sub> [g]	$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	m <sub>dry</sub> [g]	$\rho_{dry}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	V <sub>dry</sub> [%]
BA50%_CPG_11	2608,8	0,998	1496,4	2,34	5,96
BA50%_CPG_12	2581,4		1493	2,37	4,89
BA50%_CPF_13	2565,4		1481,7	2,36	5,07
BA50%_CPF_14	2575,7		1485,6	2,36	5,25
BA50%_CPA_15	2570,1		1485,6	2,37	4,97
BA50%_CPA_16	2557,8		1452,9	2,31	7,17

Tabella 8 Vuoti dry base50%

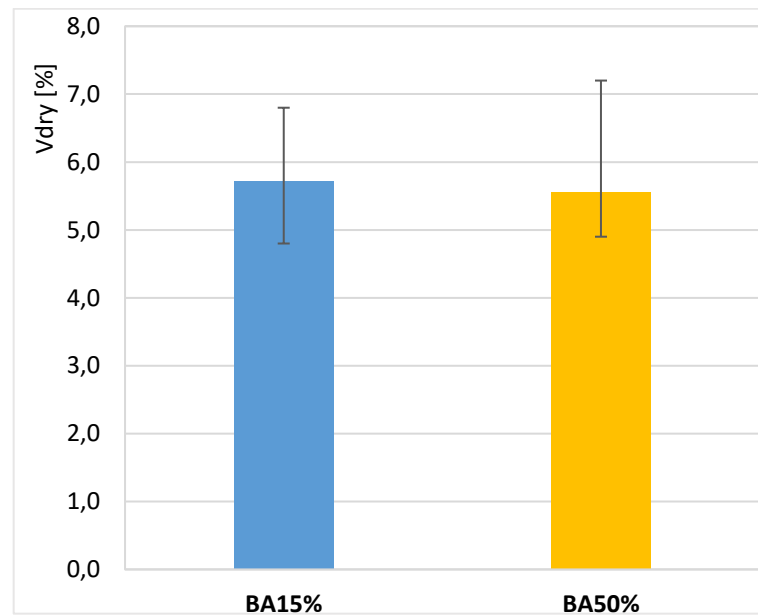


Figura 39 Confronto vuoti dry base 15% e 50%

Come è possibile osservare dal confronto tra le due basi (fig.39) la percentuale di vuoti dry ottenuta nella miscela sperimentale con il 50% di fresato e quella con il 15% risultano tra di loro del tutto confrontabili.

• Metodo con paraffina

Codice	$m_{secca}$ [g]	$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$m_{secca+paraff.}$ [g]	$m_{paraff\ in\ acqua}$ [g]	$\rho_{paraff.}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{paraff.}$ [%]
BA15%_CPA_2	2574,3	0,998	2601,3	1451,4	2,29	8,39
BA15%_CPE_8	2603,2		2644,2	1468	2,30	8,25

Tabella 9 Vuoti con paraffina base 15%

Codice	$m_{secca}$ [g]	$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$m_{secca+paraff.}$ [g]	$m_{paraff\ in\ acqua}$ [g]	$\rho_{paraff.}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{paraff.}$ [%]
BA50%_CPG_12	2581,4	0,998	2608,7	1484,2	2,35	5,41
BA50%_CPA_15	2570,1		2598,7	1475,1	2,35	5,62

Tabella 10 Vuoti con paraffina base 50%

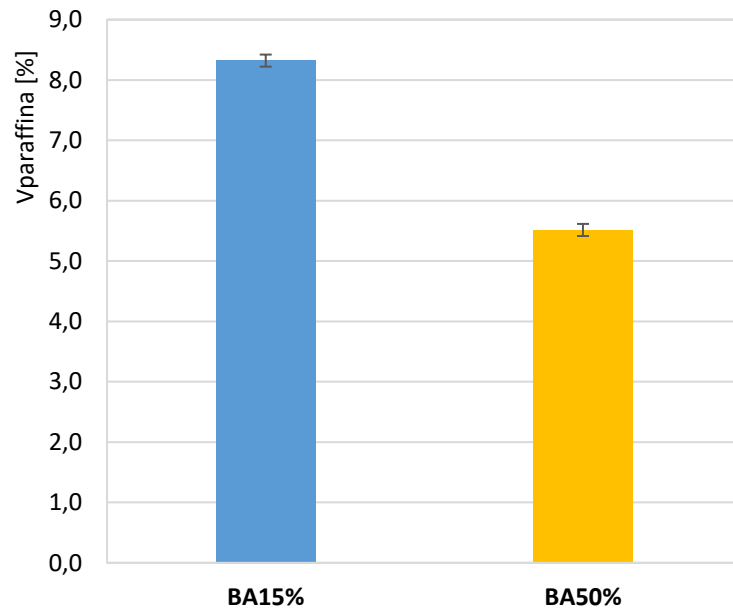


Figura 40 Confronto vuoti con paraffina base 15% e 50%

#### 4.1.2 Contenuto di vuoti nello strato di binder

BI15%	
$P_{\text{bitume}}$	4,4
$P_{\text{calcare}}$	95,6
$\rho_{\text{bitume}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	1,02
$\rho_{\text{calcare}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,68
$\rho_{\text{max}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	<b>2,50</b>

Tabella 11 Massima massa volumica binder 15%

BI50%	
$P_{\text{bitume}}$	4,9
$P_{\text{calcare}}$	95,1
$\rho_{\text{bitume}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	1,02
$\rho_{\text{calcare}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,68
$\rho_{\text{max}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	<b>2,48</b>

Tabella 12 Massima massa volumica binder 50%

- **Metodo dry**

Codice	$m_{\text{secca}} [\text{g}]$	$\rho_w [\text{g}/\text{cm}^3]$	$m_{\text{dry}} [\text{g}]$	$\rho_{\text{dry}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	$V_{\text{dry}} [\%]$
BI15%_CPB_3	852,7	0,9983	482,7	2,30	8,01
BI15%_CPB_4	818,2		463,6	2,30	7,90
BI15%_CPB_5	831,8		467,8	2,28	8,79
BI15%_CPB_6	870,7		498,1	2,33	6,73
BI15%_CPC_17	638,1		363,4	2,32	7,28
BI15%_CPC_18	881,1		503,4	2,33	6,89
BI15%_CPC_19	889,7		511,1	2,35	6,20
BI15%_CPC_20	877,2		498,3	2,31	7,59
BI15%_CPE_25	901,5		519,3	2,35	5,85
BI15%_CPE_26	885,7		508,7	2,35	6,23
BI15%_CPE_27	883,9		508,9	2,35	5,92
BI15%_CPE_28	884,5		509,6	2,36	5,83
BI15%_CPH_37	900,5		521,8	2,37	5,09
BI15%_CPH_38	855,9		485,5	2,31	7,77
BI15%_CPH_40	909,1		522,6	2,35	6,12

Tabella 13 Vuoti dry binder 15%



Codice	m <sub>secca</sub> [g]	$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	m <sub>dry</sub> [g]	$\rho_{dry}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	V <sub>dry</sub> [%]
BI50%_CPD_21	884,2	0,998	504,8	2,33	6,27
BI50%_CPD_22	863,8		488,8	2,30	7,36
BI50%_CPD_23	872,5		496,7	2,32	6,63
BI50%_CPD_24	887,4		509,9	2,35	5,46
BI50%_CPF_29	776,4		437,5	2,29	7,87
BI50%_CPF_30	824		467,2	2,31	7,12
BI50%_CPF_31	842,5		476,1	2,30	7,52
BI50%_CPF_32	824,5		468,4	2,31	6,88
BI50%_CPG_33	846		479,4	2,30	7,19
BI50%_CPG_34	855,1		484,5	2,30	7,21
BI50%_CPG_35	809,1		464,1	2,34	5,68
BI50%_CPG_36	847,6		477,6	2,29	7,87
BI50%_CPA_41	878,7		500,5	2,32	6,56
BI50%_CPA_42	866,4		490,6	2,30	7,28
BI50%_CPA_43	877,7		501,4	2,33	6,20
BI50%_CPA_44	891,2		510,7	2,34	5,80

Tabella 14 Vuoti dry binder 50%

Di seguito si riporta il grafico di confronto delle proprietà volumetriche (vuoti dry) dei due diversi conglomerati bituminosi di binder studiati.

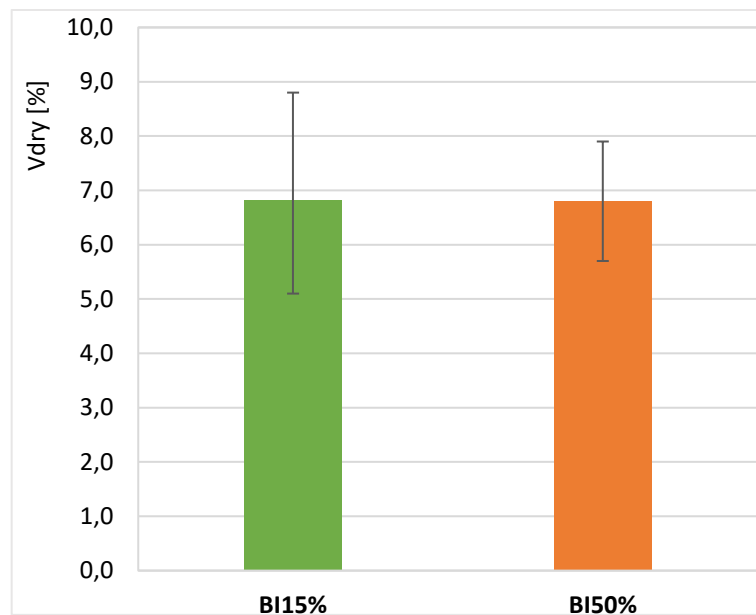


Figura 41 Confronto vuoti dry binder 15% e 50%

Con il metodo dry è possibile osservare come variando la percentuale di fresato contenuta nella miscela utilizzata nello strato di collegamento, il valore medio dei vuoti si mantenga pressoché identico.

- **Metodo con paraffina**

Codice	$m_{secca}$ [g]	$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$m_{secca+paraff.}$ [g]	$m_{paraff}$ in acqua [g]	$\rho_{paraff.}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{paraff.}$ [%]
BI15%_CPC_20	877,2	0,998	891,9	495,7	2,31	7,83
BI15%_CPH_38	855,9		869,4	476,5	2,26	9,60

Tabella 15 Vuoti con paraffina binder 15%

Codice	$m_{secca}$ [g]	$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$m_{secca+paraff.}$ [g]	$m_{paraff}$ in acqua [g]	$\rho_{paraff.}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{paraff.}$ [%]
BI50%_CPF_30	824	0,998	842,6	448,7	2,20	11,22
BI50%_CPA_42	866,4		880,2	483,6	2,27	8,61

Tabella 16 Vuoti con paraffina binder 50%

Tali valori tabellati sono riportati in forma grafica tramite istogrammi che permettono il confronto tra le due miscele dello strato di collegamento.

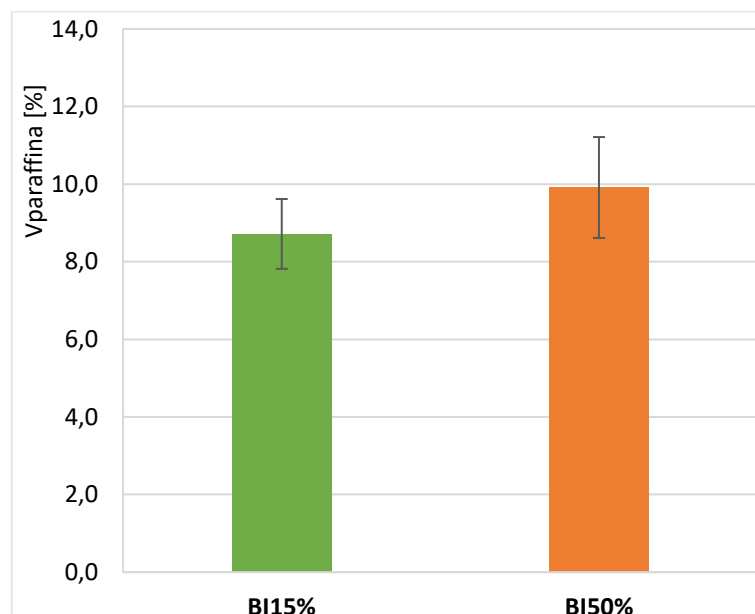


Figura 42 Confronto vuoti con paraffina binder 15% e 50%

Con il metodo con paraffina è possibile osservare (fig.42) come variando la percentuale di fresato contenuta nella miscela il valore di vuoti sia molto simile nelle due diverse miscele (8.5% nella miscela 15% contro 9.5% nella miscela 50%).

## **4.2 Risultati dell'analisi granulometrica e del contenuto di bitume**

Attraverso il processo di estrazione, si sono potuti separare gli aggregati dal bitume. Di conseguenza è stato possibile determinare la percentuale di bitume riferita al peso dell'aggregato e al peso della miscela come definito al paragrafo § 2.1.2. Sull'aggregato è stata invece effettuata l'analisi granulometrica che ha consentito di costruire la "curva bianca", e cioè quella post estrazione. Di seguito si riportano i risultati ottenuti.

### **4.2.1 Risultati granulometria e contenuto di bitume nello strato di base**

Miscela	Bitume [%]	
Base 15%	% bitume riferita agli aggregati	4,4
	% bitume riferita alla miscela	4,3
Base 50%	% bitume riferita agli aggregati	4,9
	% bitume riferita alla miscela	4,7

Tabella 17 Percentuale di bitume base 15% e 50%

Campione	Base15%_CPE_7			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
31,5	0	0	0	100
20	62,6	5,5	5,5	94,5
16	186,6	16,4	21,9	78,1
12,5	140	12,3	34,2	65,8
8	167,3	14,7	48,9	51,1
4	116,8	10,3	59,2	40,8
2	131,3	11,5	70,7	29,3
1	98,4	8,7	79,4	20,6
0,5	66,9	5,9	85,3	14,7
0,25	15	1,3	86,6	13,4
0,125	49,6	4,4	91	9
0,063	15,8	1,4	92,4	7,6
FONDO	86,7	7,6	100	0

Tabella 18 Analisi granulometrica base 15%

Campione	Base50%_CPF_13			
	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
31,5	0	0	0	100
20	35,5	2,8	2,8	97,2
16	207,9	16,6	19,4	80,6
12,5	98,5	7,8	27,2	72,8
8	182,5	14,5	41,7	58,3
4	148,8	11,9	53,6	46,4
2	171	13,6	67,2	32,8
1	123,5	9,8	77	23
0,5	80,2	6,4	83,4	16,6
0,25	19,5	1,6	85	15
0,125	66,1	5,3	90,3	9,7
0,063	15,2	1,2	91,5	8,5
FONDO	106,5	8,5	100	0

Tabella 19 Analisi granulometrica base 50%

La figura sottostante (fig. 43) riporta in forma grafica i risultati dell'analisi granulometrica sulle due miscele dello strato di base.

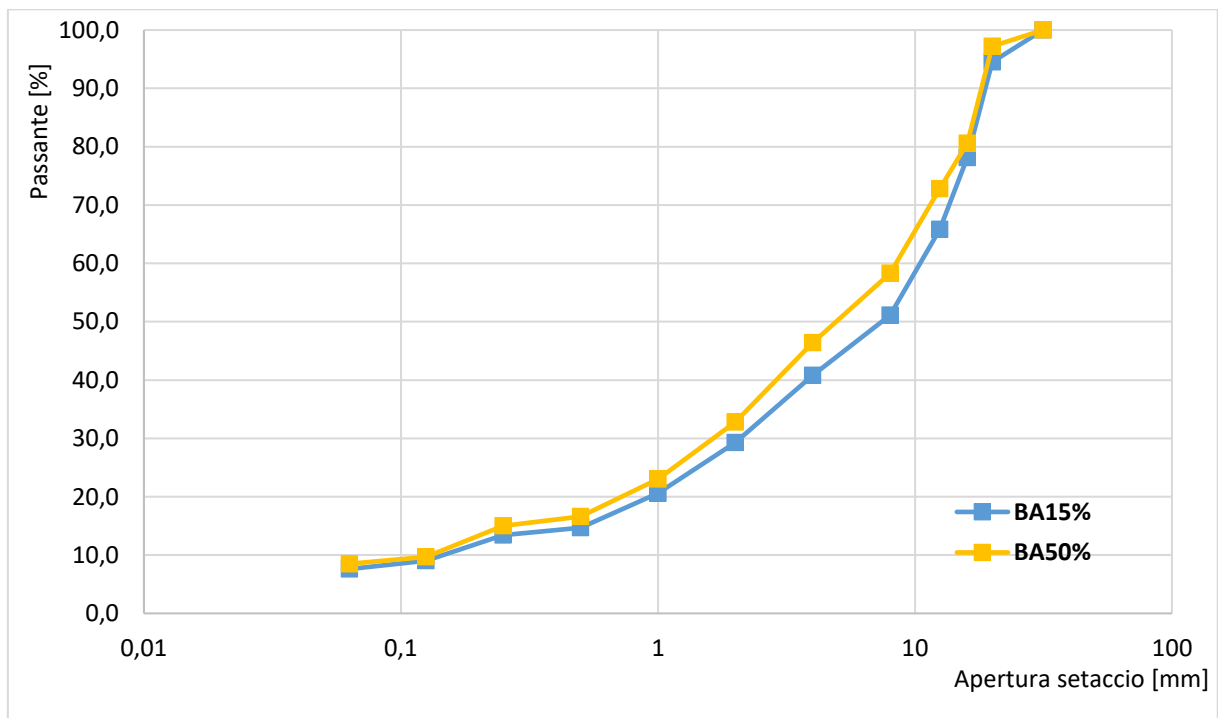


Figura 43 Curve bianche base 15% e 50%

**4.2.2 Risultati granulometria e contenuto di bitume nello strato di binder**

Miscela	Bitume [%]	
Binder 15%	% bitume riferita agli aggregati	4,7
	% bitume riferita alla miscela	4,4
Binder 50%	% bitume riferita agli aggregati	5,2
	% bitume riferita alla miscela	4,9

Tabella 20 Percentuale di bitume binder 15% e 50%

Nella tabella sottostante (tab. 21) vengono poi riportati i risultati dell'analisi granulometrica effettuata sia per le miscele di binder con il 15% di fresato che quelle con il 50%.

Campione	Binder15%_CPC_37			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
31,5	0	0	0	100
20	0	0	0	100
16	106,5	12,6	12,6	87,4
10	137	16,2	28,8	71,2
8	104,2	12,3	41,1	58,9
4	108,4	12,8	53,9	46,1
2	113,8	13,5	67,4	32,6
1	85	10,1	77,5	22,5
0,5	51,2	6,1	83,6	16,4
0,25	14,4	1,7	85,3	14,7
0,125	27,5	3,3	88,6	11,4
0,063	25,9	3,1	91,7	8,3
FONDO	71,2	8,4	100,1	0

Tabella 21 Analisi granulometrica binder 15%

Campione	Binder50%_CPA_43			
	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
31,5	0	0	0	100
20	0	0	0	100
16	85,8	10,6	10,6	89,4
10	149,9	18,5	29,1	70,9
8	67,2	8,3	37,4	62,6
4	135,7	16,7	54,1	45,9
2	99,8	12,3	66,4	33,6
1	79,5	9,8	76,2	23,8
0,5	53,2	6,6	82,8	17,2
0,25	20,1	2,5	85,3	14,7
0,125	18,7	2,3	87,6	12,4
0,063	23,1	2,8	90,4	9,6
FONDO	79,2	9,8	100,2	0

Tabella 22 Analisi granulometrica binder 50%

Il confronto tra le due curve granulometriche ottenute dall'analisi post estrazione vengono riportate di seguito (fig. 44).

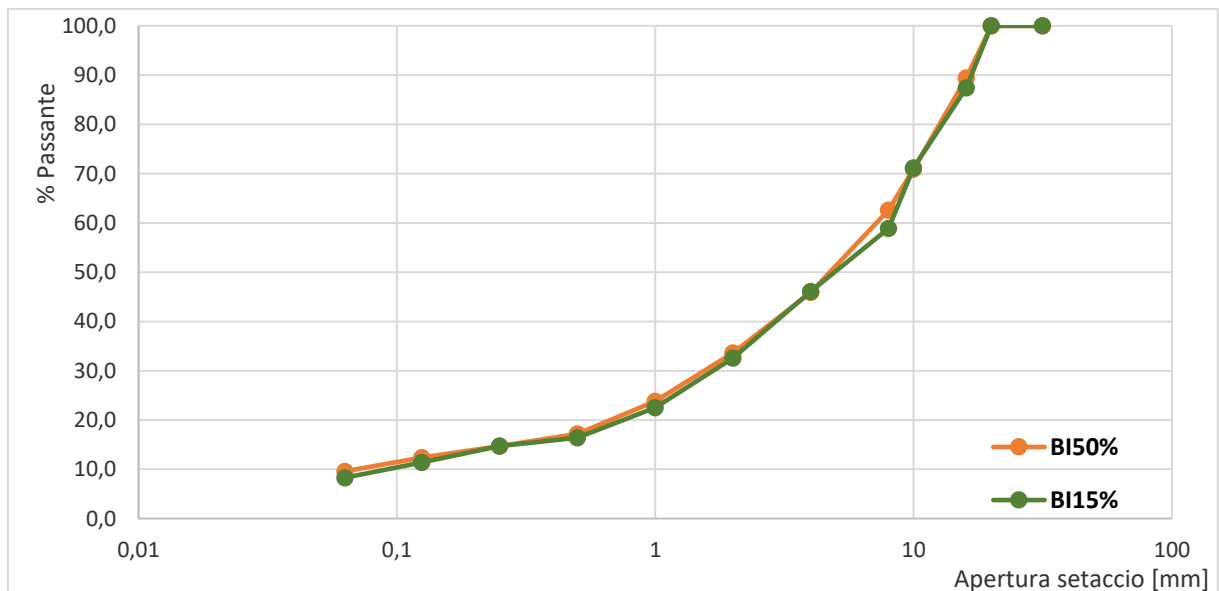


Figura 44 Curve bianche binder 15% e 50%

### 4.3 Risultati prove di modulo a trazione indiretta (ITSM)

Di seguito si riportano i risultati della prova di modulo a trazione indiretta eseguita su due diametri ortogonali tra loro dei provini per poi considerare come valore finale di modulo la media delle due ripetizioni.

#### 4.3.1 Risultati prove di modulo per lo strato di base

MODULI DI RIGIDEZZA									
Codice	0 °C			20 °C			40 °C		
	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]
BA15%_CPA_1	14507	13464	13985,5	2916	3029	2972,5	403	423	413
BA15%_CPA_2	12923	14564	13743,5	3701	3257	3479	416	409	412,5
BA15%_CPE_7	13315	11409	12362	3240	2969	3104,5	391	357	374
BA15%_CPE_8	16101	13917	15009	3626	3265	3445,5	463	458	460,5
BA15%_CPH_9	18999	17782	18390,5	5479	5950	5714,5	916	970	943
BA15%_CPH_10	21342	20149	20745,5	6132	6234	6183	1012	952	982
BI15%_CPH_39 (bis)	17387	17268	17327,5	6084	6183	6133,5	992	1056	1024
		<b>media</b>	<b>15706</b>		<b>media</b>	<b>4149,833</b>		<b>media</b>	<b>597,5</b>

Tabella 23 ITSM base15%

MODULI DI RIGIDEZZA									
Codice	0 °C			20 °C			40 °C		
	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]
BA50%_CPG_11	18932	15637	17284,5	5251	5321	5286	682	764	723
BA50%_CPG_12	17331	17500	17415,5	5052	5109	5080,5	725	563	644
BA50%_CPF_13	14683	14314	14498,5	3863	3776	3819,5	458	469	463,5
BA50%_CPF_14	13437	14159	13798	3267	2850	3058,5	474	349	411,5
BA50%_CPA_15	18781	19016	18898,5	5552	5508	5530	940	842	891
BA50%_CPA_16	14399	14010	14204,5	3996	3842	3919	720	654	687
		<b>media</b>	<b>16016,58</b>		<b>media</b>	<b>4448,92</b>		<b>Media</b>	<b>636,67</b>

Tabella 24 ITSM base50%

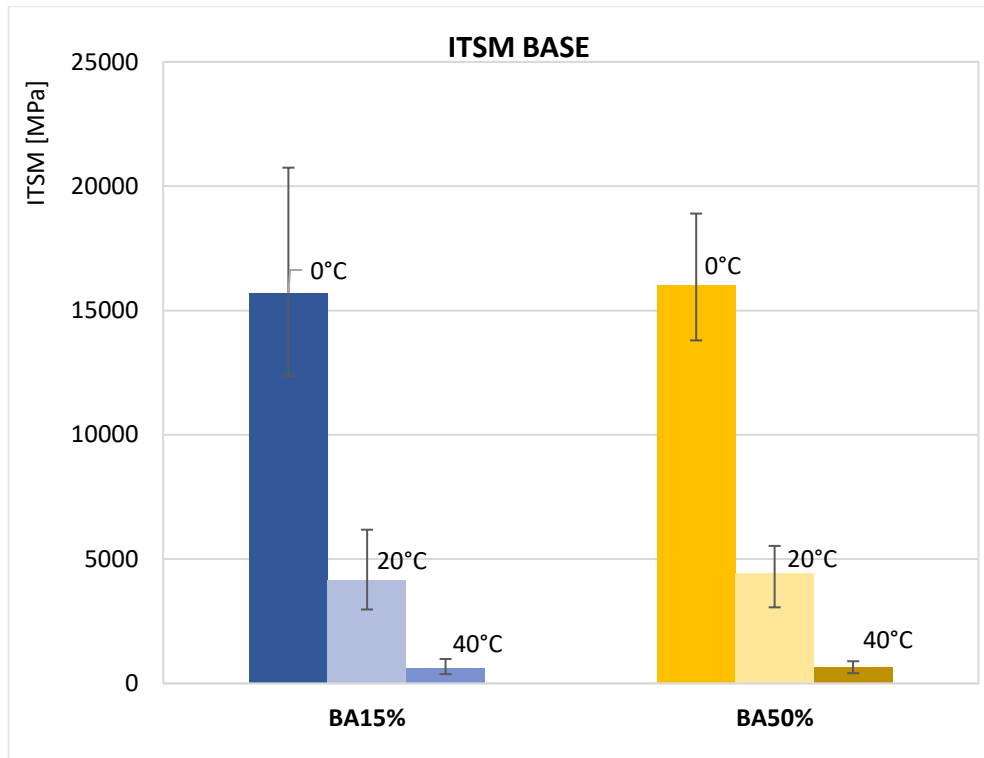


Figura 45 Confronto ITSM base 15% e 50%

Dal grafico di confronto (fig. 45) delle due miscele dello strato di base è possibile osservare come all'aumentare della temperatura di prova, il valore di modulo tenda a ridursi. Inoltre, a parità di temperatura, al variare della percentuale di fresato i valori di ITSM rimangono pressoché invariati. Questo aspetto potrebbe essere imputabile alla presenza di additivi rigeneranti nel bitume utilizzato come aggiunta vergine nelle miscele con il 50% di RAP che riesce a bilanciare la maggiore rigidità che ci si aspetterebbe in presenza di una maggiore percentuale di fresato.



**4.3.2 Risultati prove di modulo per lo strato di binder**

<b>MODULI DI RIGIDEZZA</b>									
Codice	0 °C			20 °C			40 °C		
	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]
BI15%_CPB_3	8275	8056	8165,5	2577	2923	2750	146	135	140,5
BI15%_CPB_4	5007	5608	5307,5	1296	1372	1334	206	181	193,5
BI15%_CPB_5	11588	6884	9236	2837	2568	2702,5	532	347	439,5
BI15%_CPB_6	12819	11390	12104,5	3254	2886	3070	390	437	413,5
BI15%_CPC_17	12601	13241	12921	3363	3944	3653,5	391	426	408,5
BI15%_CPC_18	14279	13503	13891	3232	3377	3304,5	471	380	425,5
BI15%_CPC_19	14838	13337	14087,5	3127	3137	3132	377	437	407
BI15%_CPC_20	13646	12747	13196,5	3481	3489	3485	376	366	371
BI15%_CPE_25	15457	13338	14397,5	3530	3616	3573	462	472	467
BI15%_CPE_26	13989	13548	13768,5	3823	3733	3778	480	433	456,5
BI15%_CPE_27	14561	13475	14018	2901	2587	2744	391	313	352
BI15%_CPE_28	14298	13955	14126,5	3060	3058	3059	408	338	373
BI15%_CPH_37	14001	13205	13603	2918	2803	2860,5	428	321	374,5
BI15%_CPH_38	12349	11615	11982	3226	2621	2923,5	409	337	373
BI15%_CPH_40	14981	13457	14219	3217	3227	3222	435	339	387
		<b>Media</b>	<b>12334,93</b>		<b>media</b>	<b>3029,78</b>		<b>Media</b>	<b>372,13</b>

Tabella 25 ITSM binder 15%

MODULI DI RIGIDEZZA									
Codice	0 °C			20 °C			40 °C		
	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]
BI50%_CPD_21	16284	14865	15574,5	4411	4553	4482	687	553	620
BI50%_CPD_22	15338	14195	14766,5	4238	4081	4159,5	569	555	562
BI50%_CPD_23	15496	15355	15425,5	4046	3991	4018,5	632	562	597
BI50%_CPD_24	15607	14137	14872	4321	3687	4004	631	572	601,5
BI50%_CPF_29	11790	11444	11617	3318	3071	3194,5	417	321	369
BI50%_CPF_30	11107	11345	11226	3396	3122	3259	316	327	321,5
BI50%_CPF_31	13003	10865	11934	3777	3159	3468	399	350	374,5
BI50%_CPF_32	13170	11418	12294	3454	3110	3282	398	316	357
BI50%_CPG_33	12663	11579	12121	3164	3288	3226	380	330	355
BI50%_CPG_34	12559	11321	11940	2856	2942	2899	335	281	308
BI50%_CPG_35	10889	10195	10542	2888	3029	2958,5	385	321	353
BI50%_CPG_36	12833	12379	12606	3271	3526	3398,5	413	380	396,5
BI50%_CPA_41	14135	14124	14129,5	3844	4040	3942	655	629	642
BI50%_CPA_42	15022	13411	14216,5	4241	4234	4237,5	632	564	598
BI50%_CPA_43	15537	14835	15186	4836	4867	4851,5	749	642	695,5
BI50%_CPA_44	15785	14763	15274	4598	4952	4775	734	721	727,5
		<b>media</b>	<b>13357,78</b>		<b>media</b>	<b>3759,72</b>		<b>Media</b>	<b>492,38</b>

Tabella 26 ITSM binder 50%

I precedenti risultati tabellati possono essere poi raccolti graficamente (fig. 46) al fine di avere una migliore lettura del comportamento dei materiali e di poter confrontare i loro comportamenti da prove di modulo a trazione indiretta.

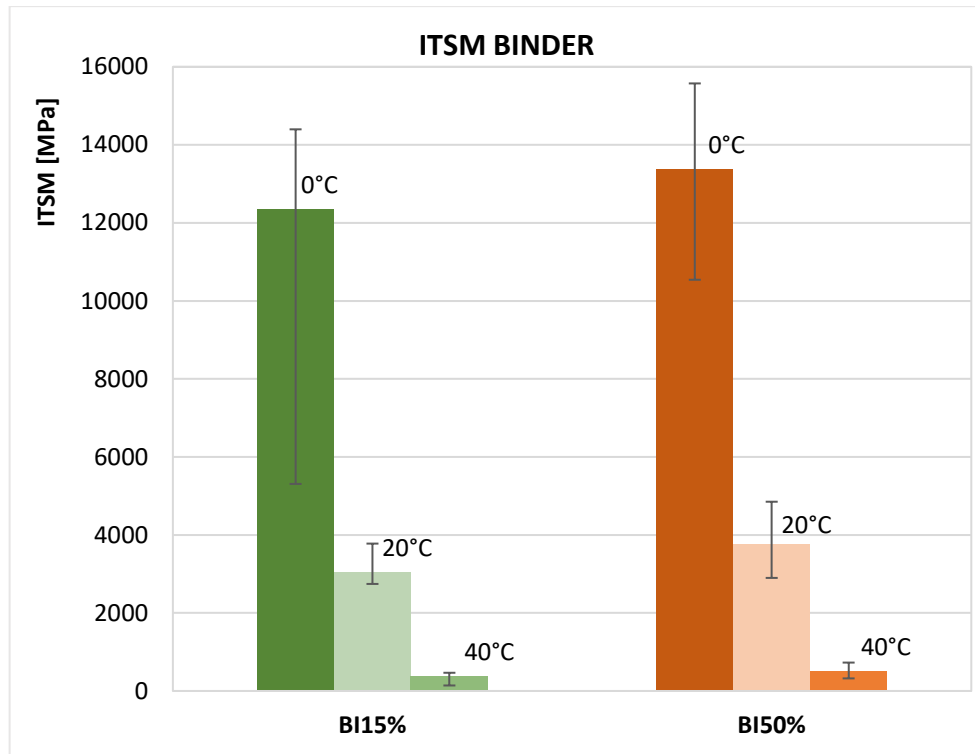


Figura 46 Confronto ITSM binder 15% e 50%

Anche per le due miscele dello strato di binder si osserva una riduzione del modulo di rigidezza con la temperatura. Il valore di ITSM risulta leggermente maggiore nei conglomerati di binder con una percentuale del 50% di fresato ma complessivamente non si riscontrano differenze significative. Di conseguenza anche per lo strato di collegamento con il 50% di RAP sembrerebbe che la presenza di additivi rigeneranti consenta di ridurre la maggiore rigidezza che ci si aspetterebbe in presenza di quantitativi maggiori di materiale riciclato per effetto dell'invecchiamento del bitume in esso contenuto.

#### 4.4 Risultati prove a trazione indiretta (ITS)

Di seguito si riportano tabelle e grafici dei risultati delle prove di resistenza a trazione indiretta di tutte le miscele testate. In particolare, i parametri valutati sono:

- Resistenza a trazione indiretta, ITS;
- Coefficiente di trazione indiretta, CTI;
- L'indice di tolleranza al cracking,  $CT_{index}$ .

**4.4.1 Risultati prove a trazione indiretta per lo strato di base**

TRAZIONE INDIRETTA					
Codice	ITS				
	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	CTI	CT-index
BA15%_CPA_1	3,850	9,167	0,632	37,4	96
BA15%_CPE_7	3,109	9,693	0,655	39,4	151,7
BA15%_CPH_9	3,862	16,781	0,114	82,9	51,8
BA15%_CPH_10	3,179	15,781	0,109	79,7	42,7
		<b>media</b>	<b>0,378</b>	<b>59,85</b>	<b>85,55</b>

Tabella 27 ITS, CTI e CTindex base 15%

TRAZIONE INDIRETTA					
Codice	ITS				
	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	CTI	CT-index
BA50%_CPG_11	4,337	14,004	0,951	74,9	48,2
BA50%_CPF_13	2,936	11,942	0,827	35,3	118
BA50%_CPF_14	4,649	10,445	0,708	43,3	135,5
BA50%_CPA_16	4,048	13,353	0,912	51,8	261,7
		<b>media</b>	<b>0,850</b>	<b>51,325</b>	<b>140,85</b>

Tabella 28 ITS, CTI e CTindex base 50%

Nelle figure successive (fig.47-48-49) sono riportati gli istogrammi di confronto dei parametri ottenuti dalla prova di trazione indiretta eseguita sui due conglomerati dello strato di base con differenti percentuali di fresato.

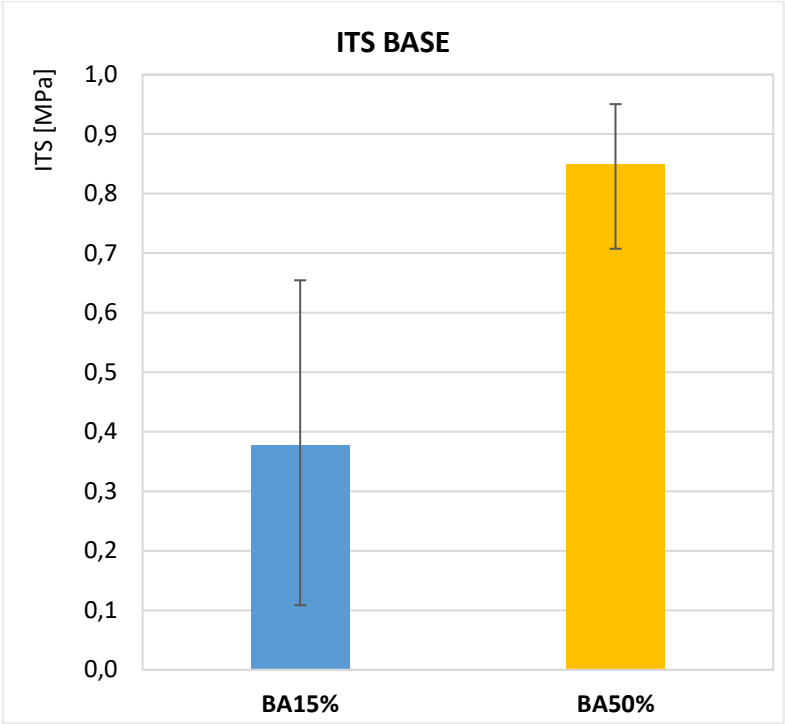


Figura 47 Confronto ITS base 15% e 50%

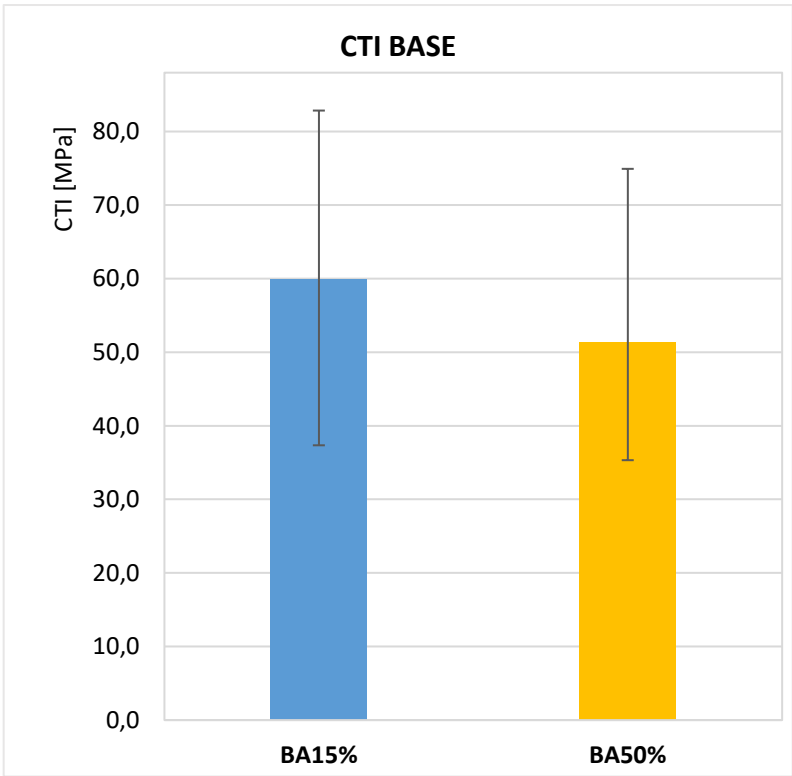


Figura 48 Confronto CTI base 15% e 50%

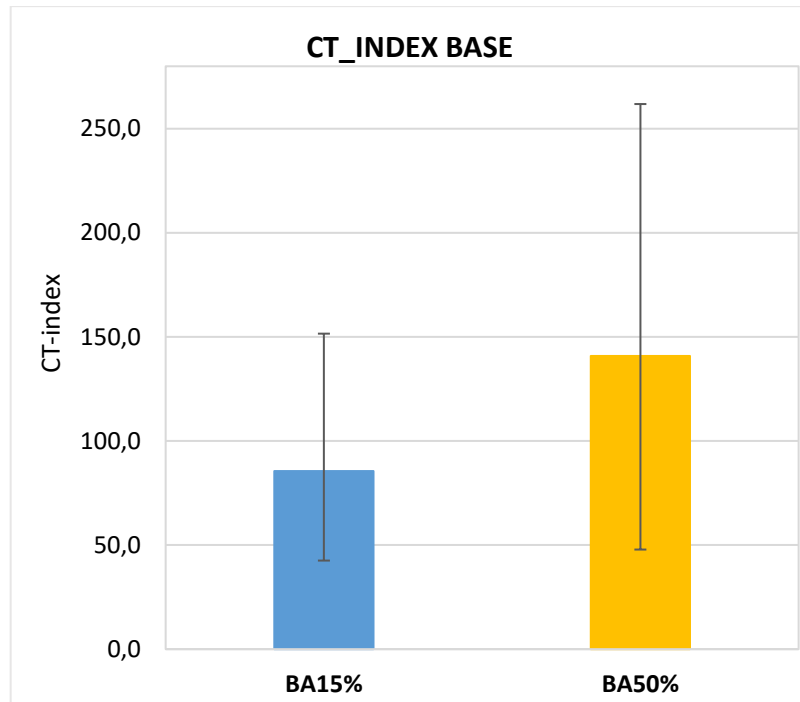


Figura 49 Confronto CTindex base 15% e 50%

Dal confronto dei grafici tra le due differenti tipologie di miscela si rileva che quelle con il 50% di fresato sono caratterizzate da valori di ITS molto superiori di quelli nei conglomerati con il 15% di RAP (circa 2.5 volte maggiori). Inoltre, è possibile osservare che la base con 50% di fresato è caratterizzata anche da indice di tolleranza al cracking ( $CT_{index}$ ) più elevato e quindi da valori più bassi di fragilità. Al contrario le miscele di base con il 15% di fresato sono caratterizzate da una minore resistenza a trazione indiretta ma presentano valori di coefficiente di trazione indiretta CTI leggermente più elevati rispetto a BA50%, il che garantisce comunque prestazioni soddisfacenti in termini di deformabilità del materiale. Infatti, il CTI è un parametro che permette di mettere in relazione la resistenza del materiale alla sua risposta deformativa, essendo funzione non solo della resistenza a trazione indiretta ma anche della massima deformazione diametrale a rottura. Tali risultati sono molto positivi, poiché l'incremento di fresato nel conglomerato, grazie all'impiego delle giuste accortezze e del corretto additivo, è riuscito a dare prestazioni migliori rispetto al materiale con meno fresato, sia in termini di ITS, che CTI, che CT-index.

#### 4.4.2 Risultati prove a trazione indiretta per lo strato di binder

TRAZIONE INDIRETTA					
Codice	ITS				
	$\varepsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	CTI	CT-index
BI15%_CPC_18	3,243	6,505	0,792	31,5	210,2
BI15%_CPC_20	2,895	6,280	0,77	34,07	225,4
BI15%_CPE_27	2,583	6,474	0,795	39,37	124,4
BI15%_CPH_40	2,464	7,043	0,837	44,89	146,2
		<b>media</b>	<b>0,799</b>	<b>37,4575</b>	<b>176,55</b>

Tabella 29 ITS, CTI e CTindex binder 15%

TRAZIONE INDIRETTA					
Codice	ITS				
	$\varepsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	CTI	CT-index
BI50%_CPD_22	2,668	7,492	0,913	44,1	100,9
BI50%_CPF_30	3,187	5,705	0,694	28,12	220,9
BI50%_CPG_33	2,590	7,122	0,878	43,19	162,5
BI50%_CPA_42	2,475	7,006	0,851	44,47	86,2
		<b>media</b>	<b>0,834</b>	<b>39,97</b>	<b>142,625</b>

Tabella 30 ITS, CTI e CTindex binder 50%

I precedenti risultati possono essere poi raccolti graficamente (Fig. 50-51-52) al fine di comprendere meglio il comportamento delle singole miscele e di poterle confrontare tra di loro.

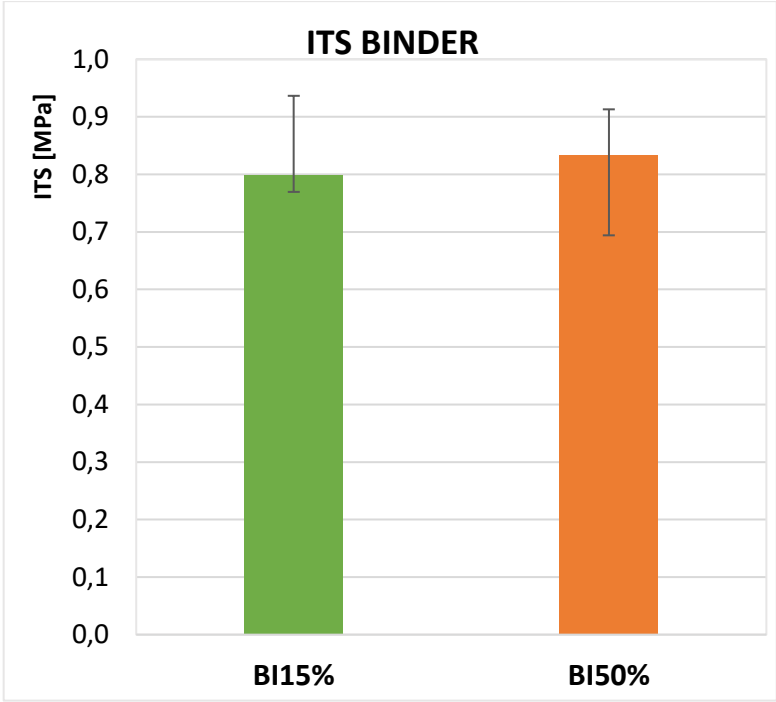


Figura 50 Confronto ITS binder 15% e 50%

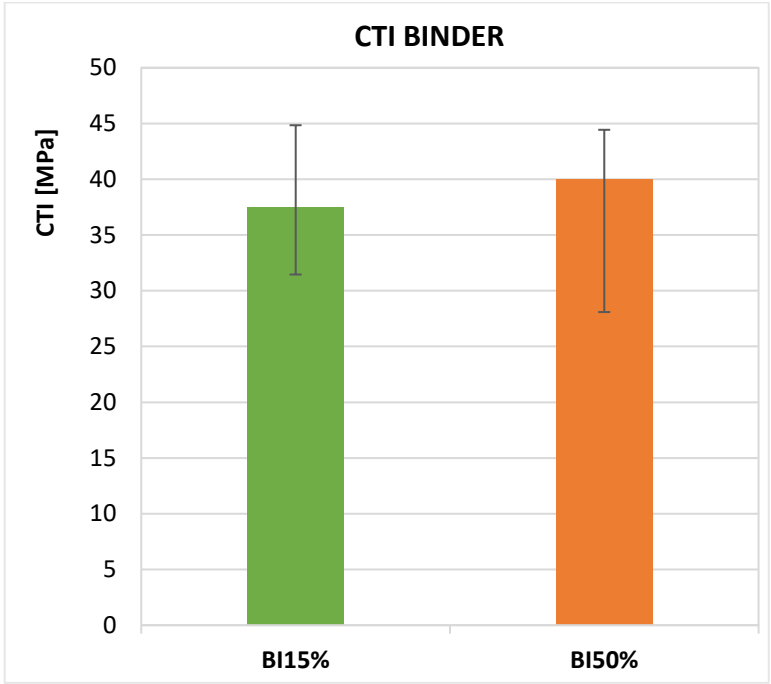


Figura 51 Confronto CTI binder 15% e 50%



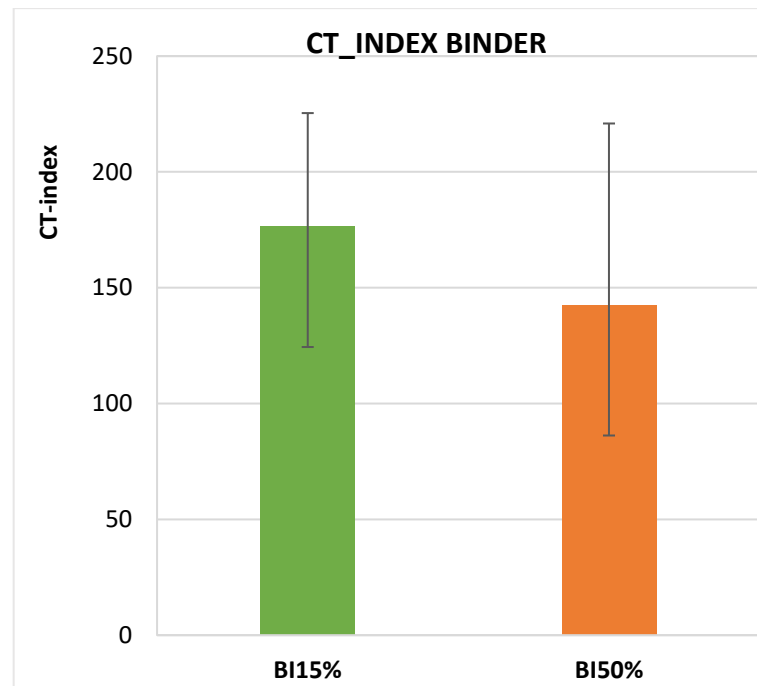


Figura 52 Confronto CTindex binder 15% e 50%

I valori di resistenza a trazione indiretta (ITS), coefficiente di trazione indiretta (CTI) relativi alle due miscele di binder studiate, come mostrato negli istogrammi sopra riportati (fig. 50-51), risultano tra loro confrontabili. Si registrano inoltre valori leggermente più bassi di  $CT_{index}$  conglomerati con il 50% di fresato, il che potrebbe essere rappresentativo di una maggiore fragilità. Tuttavia, andrebbe tenuto anche conto della maggiore dispersione dei dati ottenuta dai risultati di CT-index.

#### **4.5 Risultati prove a fatica (ITFT)**

La prova ITFT ha consentito di determinare il numero di cicli che il materiale riesce a sopportare prima di raggiungere la rottura. La presente prova è stata eseguita per il solo strato di binder e, di seguito, si riportano i risultati ottenuti. In particolare, dalla tabella sottostante sarà possibile leggere, per ciascuna delle carote testate, il valore di tensione fornito come dato di input al software, il livello deformativo iniziale  $\epsilon_{115}$  restituito dal programma dopo i primi 115 cicli ed infine, il numero di cicli che hanno determinato la rottura del campione.

PROVE DI FATICA			
Codice	$\sigma$ [kPa]	$\epsilon_{115}$ [ $\mu$ strain]	N° cicli
BI15%_CPB_3	200	477	71500
BI15%_CPB_5	150	226	131500
BI15%_CPB_6	300	531	15000
BI15%_CPC_17	350	535	12000
BI15%_CPC_19	250	453	96500
BI15%_CPE_25	400	653	3500
BI15%_CPE_26	400	1009	5500
BI15%_CPE_28	275	454	29000
BI15%_CPH_37	175	208	281500

Tabella 31 Risultati fatica binder 15%

PROVE DI FATICA			
Codice	$\sigma$ [kPa]	$\epsilon_{115}$ [ $\mu$ strain]	N° cicli
BI50%_CPD_21	400	451	7000
BI50%_CPD_23	400	745	5000
BI50%_CPF_29	250	687	19500
BI50%_CPF_31	250	467	32500
BI50%_CPF_32	225	297	89000
BI50%_CPG_34	150	211	596000
BI50%_CPG_35	150	204	123000
BI50%_CPG_36	225	306	149500
BI50%_CPA_43	450	614	4500

Tabella 32 Risultati fatica binder 50%

Tali dati sono stati poi inseriti all'interno di un grafico bi-logaritmico, di seguito riportato, che presenta in ascissa il numero di cicli che portano a rottura il provino (N° cicli) mentre in ordinata si è posto una volta il valore di deformazione iniziale fornito dal software ( $\epsilon_{115}$ ) e una volta la tensione ( $\sigma$ ) che è stata applicata. L'interpolazione dei risultati sperimentali, mediante la funzione potenza, consente di ottenere la retta di fatica della miscela. Dall'analisi di tale regressione lineare si cerca di ottenere un coefficiente di correlazione  $R^2$  il più possibile vicino ad 1.

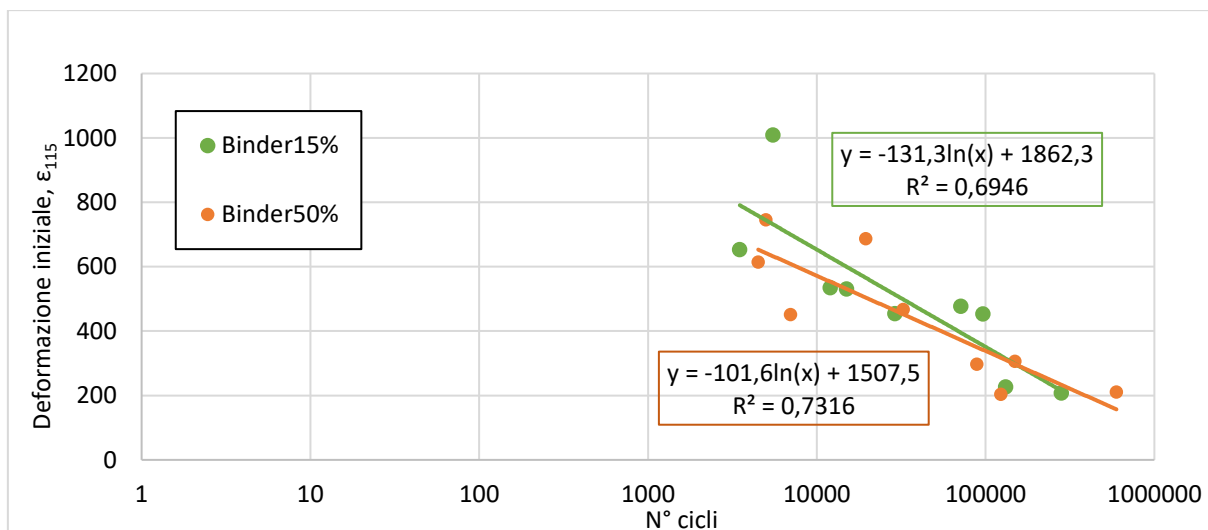


Figura 53 Confronto rette di fatica binder 15% e 50%

Dal confronto tra le rette di fatica delle due miscele è possibile osservare come per livelli deformativi inferiori la miscela con il 50% di fresato ha un miglior comportamento a fatica; infatti, a parità di  $\epsilon$ , la rottura avviene ad un numero di cicli maggiori. Per valori di deformazione maggiori, è la miscela con il 15% di RAP quella che manifesta una maggiore resistenza alle azioni cicliche.

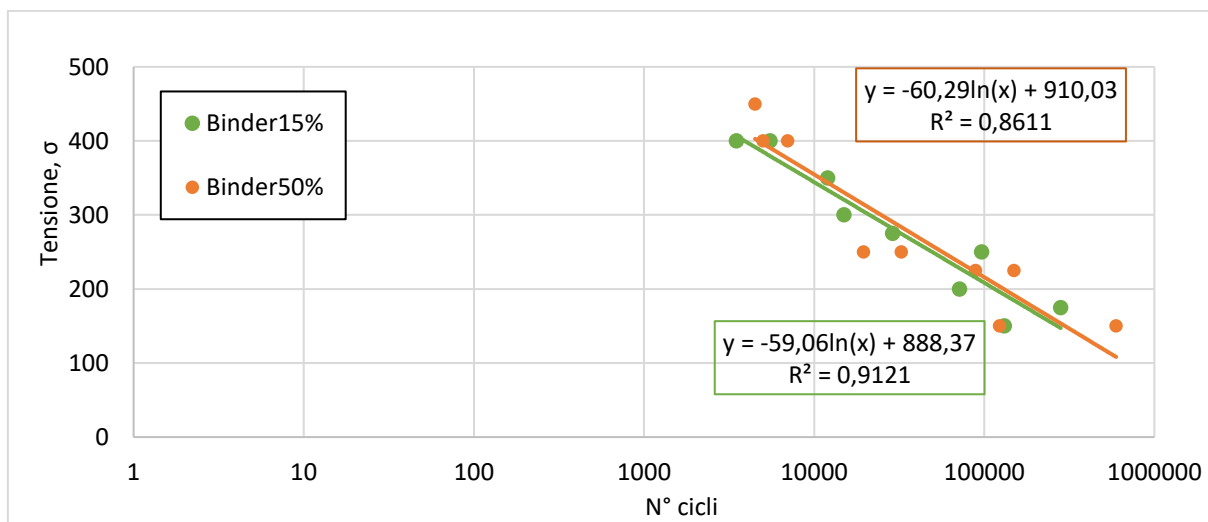


Figura 54 Confronto rette di fatica binder 15% e 50%

Comparando le rette di fatica in termini tensionali delle due miscele si osserva che esse sono caratterizzate pressoché dalla stessa pendenza e che dunque le caratteristiche di resistenza a fatica risultano del tutto comparabili. Tale aspetto potrebbe essere associato all'utilizzo, nei

binder con 50% di fresato, di bitume modificato con polimeri e alla presenza di additivi rigeneranti che, com'è noto, migliorano la resistenza ai carichi e alla fatica.

Dai due precedenti grafici andrebbe tuttavia preso maggiormente in considerazione il grafico del numero di cicli in funzione della deformazione iniziale rispetto che quello in funzione della tensione, poiché solitamente quest'ultima rappresentazione tende più frequentemente a mettere in buona luce i materiali più rigidi, che tuttavia non sempre sono sintomo di materiale maggiormente resistenza a fatica; in questo caso le rigidità dei materiali erano confrontabili, quindi i risultati erano molto simili in tale rappresentazione.

## Capitolo 5 – Risultati sperimentali, PARTE B

Le proprietà viscoelastiche dei bitumi sono valutate in termini di variazione del modulo complesso  $|G^*|$  e dell'angolo di fase  $\delta$  in funzione di frequenza di sollecitazione e temperatura mediante l'esecuzione di prove oscillatorie con apparecchiatura DSR. Di seguito verranno riportati tutti i risultati ottenuti dalle varie prove eseguite sulle sole miscele dello strato di binder.

### 5.1 Risultati Strain Sweep

Come riportato al capitolo § 2.1.6.1, la caratterizzazione reologica del bitume deve essere preceduta da prove di Strain Sweep con le quali determinare il limite di viscoelasticità lineare, ovvero il valore di deformazione di taglio corrispondente ad una riduzione del 5% del modulo complesso iniziale e con il quale, poi, stabilire i livelli deformativi da applicare nelle successive prove di Frequency Sweep. Per ciascuna miscela dello strato di binder (15% e 50% di fresato) sono state eseguite due ripetizioni a tre temperature; 5, 15, 30 °C. A seguire viene mostrata una tabella riassuntiva dei valori ottenuti e i grafici relativi a ciascuna ripetizione.

Bitumen	Repetition	Temperature					
		5 °C		15 °C		30 °C	
	No.	$ G^* $ [Pa]	$\gamma_{lim}$ [%]	$ G^* $ [Pa]	$\gamma_{lim}$ [%]	$ G^* $ [Pa]	$\gamma_{lim}$ [%]
BI15%	1	22000000	0,807	7735000	0,414	1300000	0,812
	2	23700000	1,33	8650000	1,07	1410000	1,33
BI50%	No.	$ G^* $ [Pa]	$\gamma_{lim}$ [%]	$ G^* $ [Pa]	$\gamma_{lim}$ [%]	$ G^* $ [Pa]	$\gamma_{lim}$ [%]
	1	19800000	1,33	6650000	1,6	975000	2,13
	2	19000000	1,33	6420000	1,6	956000	2,13

Tabella 33 Risultati SS

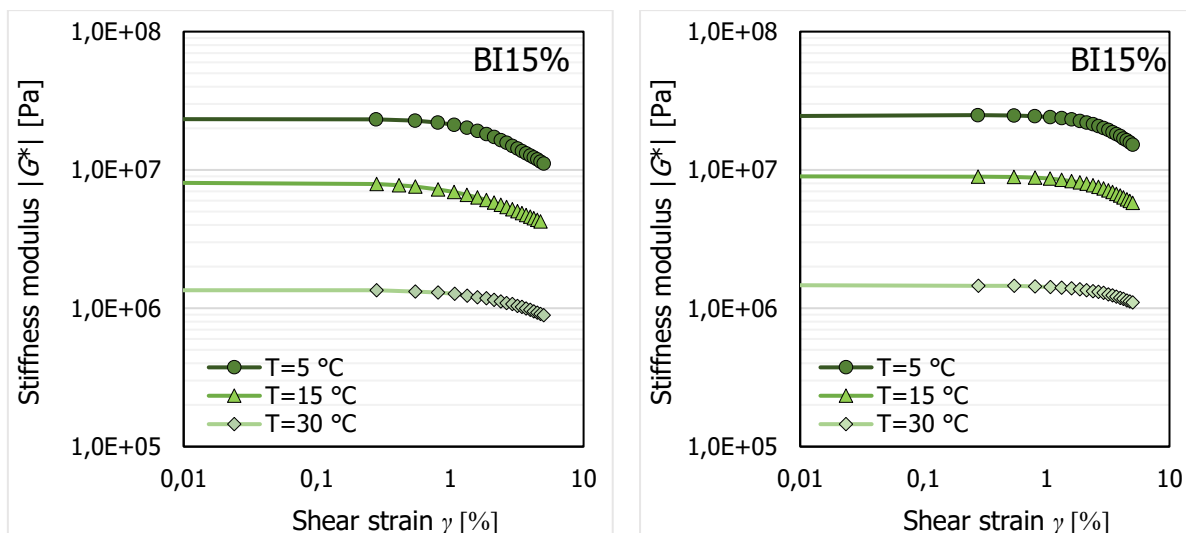


Figura 55 Risultati SS binder 15% nelle due ripetizioni

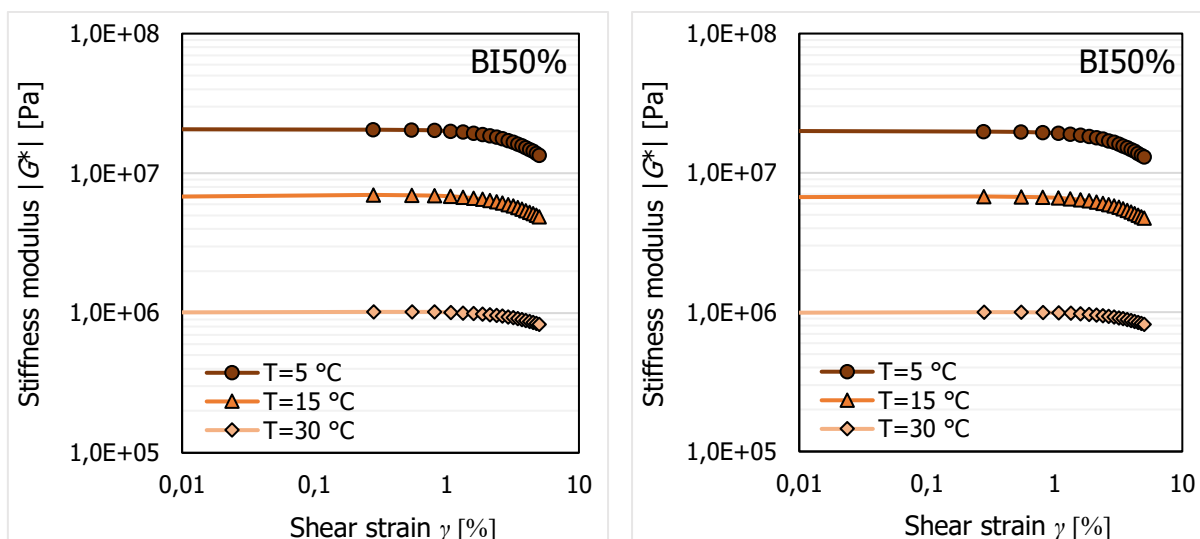


Figura 56 Risultati SS binder 50% nelle due ripetizioni

Dalle figure 55-56 è possibile rilevare che il modulo complesso, e quindi la rigidità del materiale, tende ad aumentare al diminuire della temperatura e a diminuire all'aumentare del livello di deformazione. Inoltre, i risultati mostrano come il valore di modulo complesso in corrispondenza della deformazione limite tenda ad abbassarsi al diminuire della temperatura per entrambe le miscele oggetto di questa ricerca, manifestando una stretta correlazione tra il comportamento reologico del legante e la temperatura stessa.

Inoltre, la prova ha consentito di definire il livello di deformazione limite pari a 0.414%. A partire da questo limite si è poi deciso di adottare una deformazione per le successive prove di frequency sweep cautelativamente pari a 0.1%.

## **5.2 Risultati Frequency Sweep**

La prova di Frequency Sweep consente di determinare curve che rappresentano l'andamento del modulo complesso e dell'angolo di fase in funzione delle frequenze di carico e temperature indagate. Applicando il principio di sovrapposizione tempo-temperatura è possibile traslare tali curve e avere un'unica curva isoterma ad una data temperatura di riferimento (nella presente sperimentazione  $T_{rif} = 40^{\circ}\text{C}$ ) e per tutte le frequenze. Tale curva è definita curva maestra. Essa svolge un ruolo di centrale importanza nell'interpretazione del comportamento di materiali visco-elastici come il bitume, consentendo la valutazione delle sue proprietà reologiche in intervalli di temperatura e frequenza più ampi di quelli spesso riproducibili in laboratorio.

I fattori di traslazione orizzontale da applicare ai dati sperimentali sono stati valutati tramite l'equazione empirica di Williams-Landel-Ferry o indicata con l'acronimo WLF sotto riportata

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{rif})}{C_2 + (T - T_{rif})}$$

In cui

- $C_1$  e  $C_2$  sono due costanti che dipendono dalla temperatura e dal materiale;
- $T_{rif}$  è la temperatura di riferimento.

Determinati gli shift factor per tutte le temperature di prova, la curva maestra alla temperatura di riferimento la si ottiene trasladando verso destra i risultati sperimentali ottenuti a temperature più basse di quella riferimento e viceversa verso sinistra quelli per  $T < T_{rif}$  come mostrato nella figura 57 sottostante.

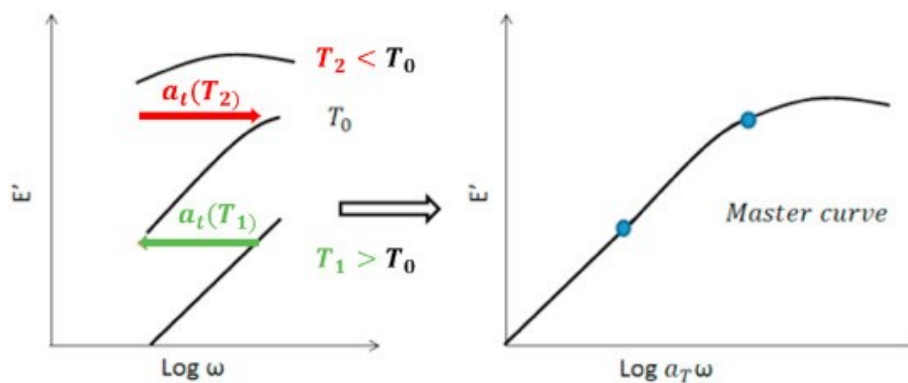


Figura 57 Costruzione della curva maestra

A questo punto occorre individuare una funzione che meglio approssimi i risultati dedotti dalla sperimentazione. A tale scopo è possibile far riferimento a vari modelli presenti in letteratura come quello sigmoideale, il modello Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM), 2S2P1D ecc. Nella presente tesi si è fatto riferimento al modello generale 2S2P1D.

Si tratta di un modello che proposto da Di Benedetto [24] pensato per poter essere applicato sia ai leganti che ai conglomerati e che consente di descrivere la rigidità intrinseca del materiale in un ampio range di frequenze a una temperatura di riferimento. Il modello è composto da due molle, due elementi parabolici ed un dissipatore viscoso che, in inglese, ne definiscono il nome:

- 2S corrisponde a 2 springs;
- 2P sta per 2 parabolic elements;
- 1D corrisponde a 1 dashpot.

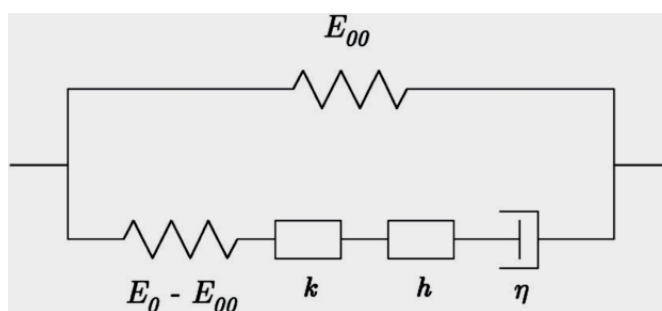


Figura 58 Modello generale 2S2P1D

La legge costitutive del modello, di seguito riportata, dipende da 7 parametri quali  $E_{00}$ ,  $E_0$ ,  $\delta$ ,  $k$ ,  $h$ ,  $\beta$  descrivono completamente il materiale investigato. In particolare, i parametri di maggiore interesse nella presente sperimentazione sono  $\delta$ ,  $k$ ,  $h$  e  $\beta$  poiché legati al bitume presente nella miscela



$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}}$$

Dove:

- $i$  è l'unità immaginaria nei numeri complessi;
- $\omega$  è la frequenza angolare;
- $E_0$  è il modulo statico per bassi valori di frequenze a  $\omega \rightarrow 0$ ;
- $E_\infty$  è il modulo vetroso relativo a  $\omega \rightarrow \infty$ ;
- $\delta$  è un parametro adimensionale di forma;
- $k, h$  sono i parametri degli elementi parabolici  $0 < k < h < 1$ ;
- $\beta$  è un parametro adimensionale della viscosità Newtoniana  $\eta$  dello smorzatore;
- $\tau$  è il valore del tempo caratteristico funzione della temperatura.

Tutti i 7 parametri del modello devono essere opportunamente tarati affinché la curva del modello si adatti bene ai risultati sperimentali (fig. 59-60-61-62).

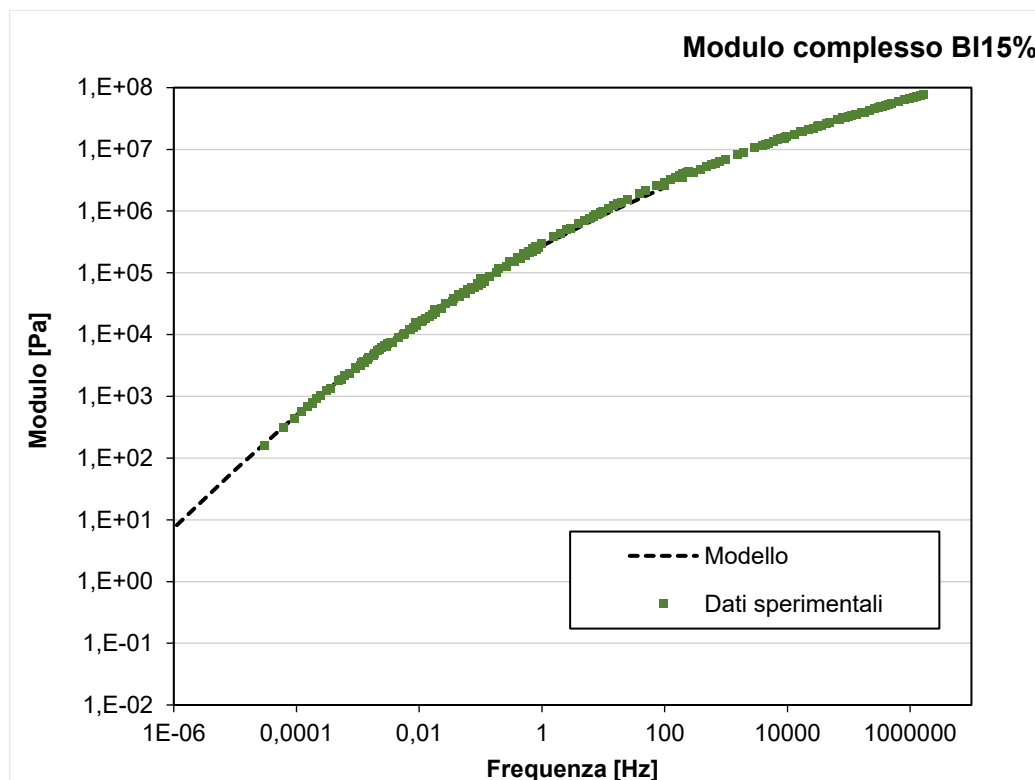


Figura 59 Curva maestra modulo complesso binder 15%

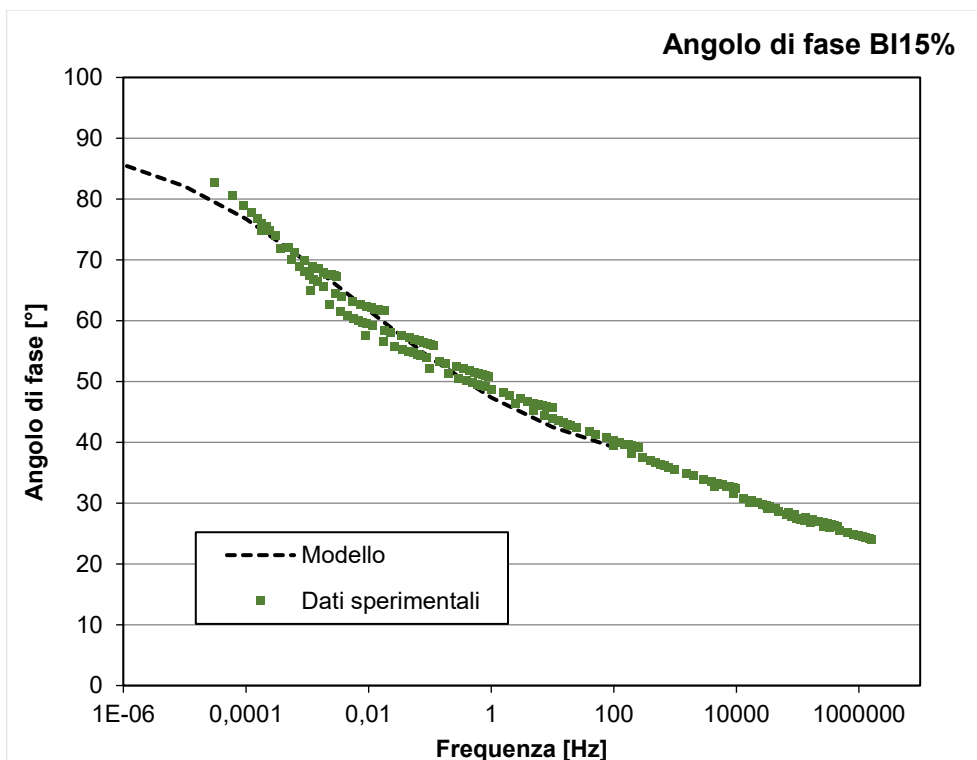


Figura 60 Curva maestra dell'angolo di fase binder 15%

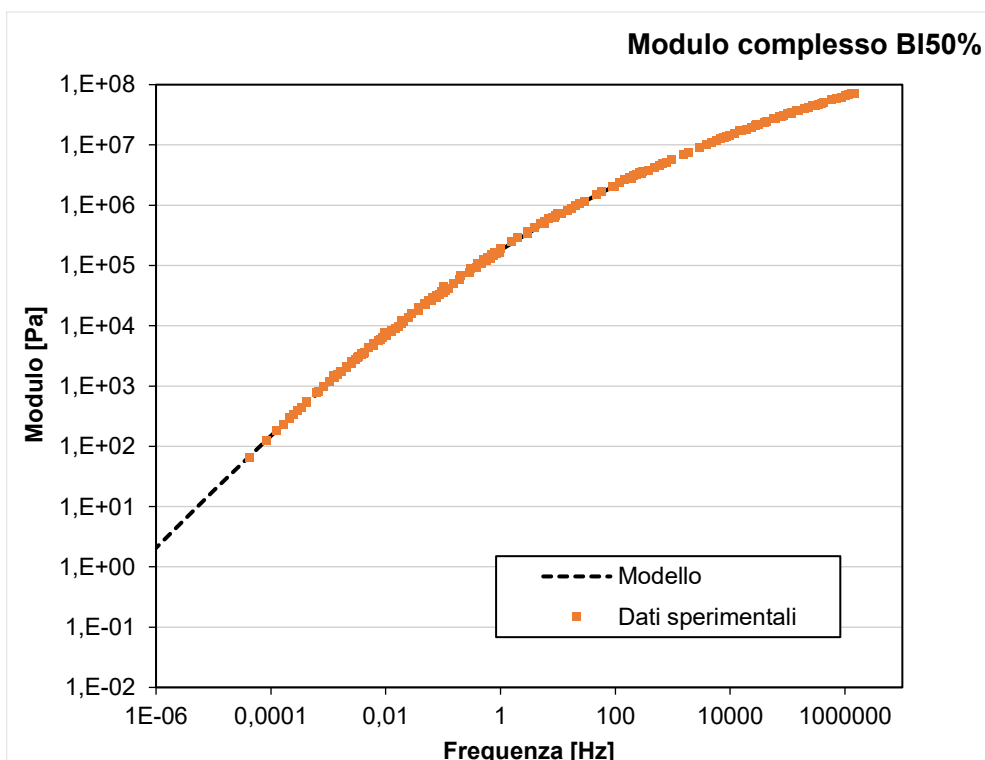


Figura 61 Curva maestra modulo complesso binder 50%

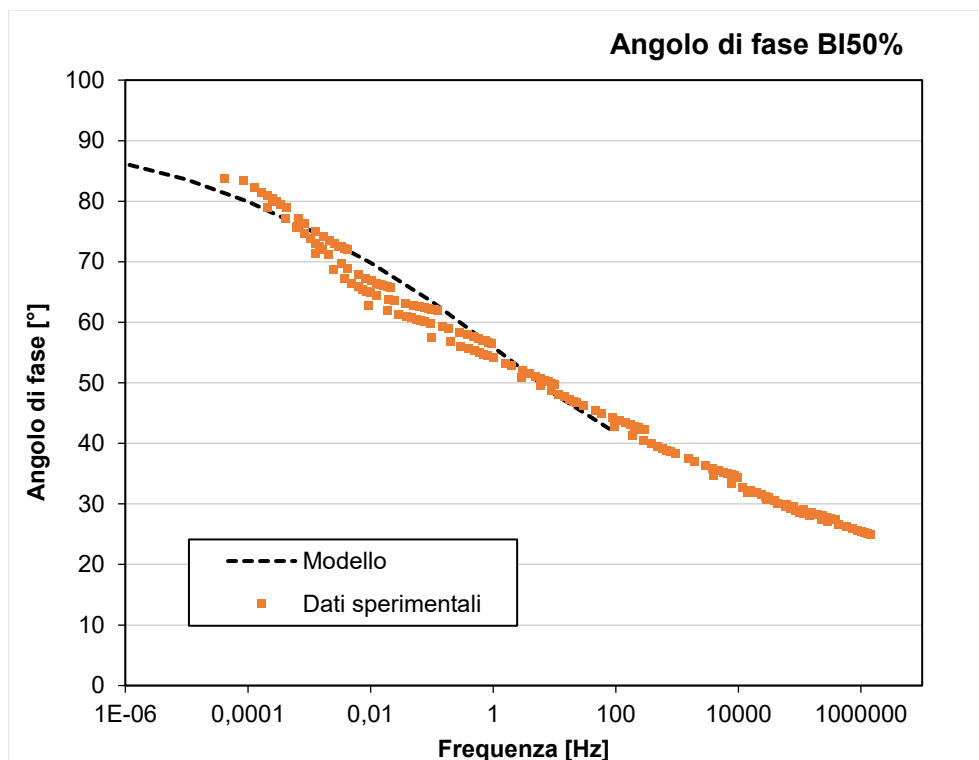


Figura 62 Curva maestra angolo di fase binder 50%

I risultati delle prove sul bitume estratto da una miscela di binder con il 15% di fresato e una con il 50% con applicazione del modello 2S2P1D sono illustrati nelle seguenti figure (fig. 63-64-65-66).

5.2.1 Modello 2S2P1D BINDER15%

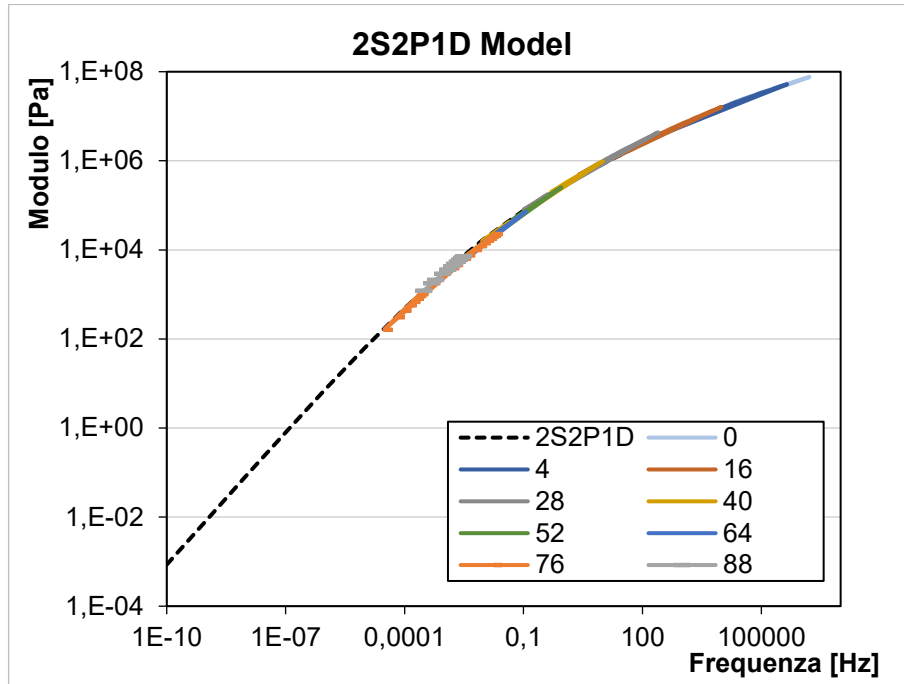


Figura 63 Curva maestra  $G^*$  modello 2S2P1D binder 15%

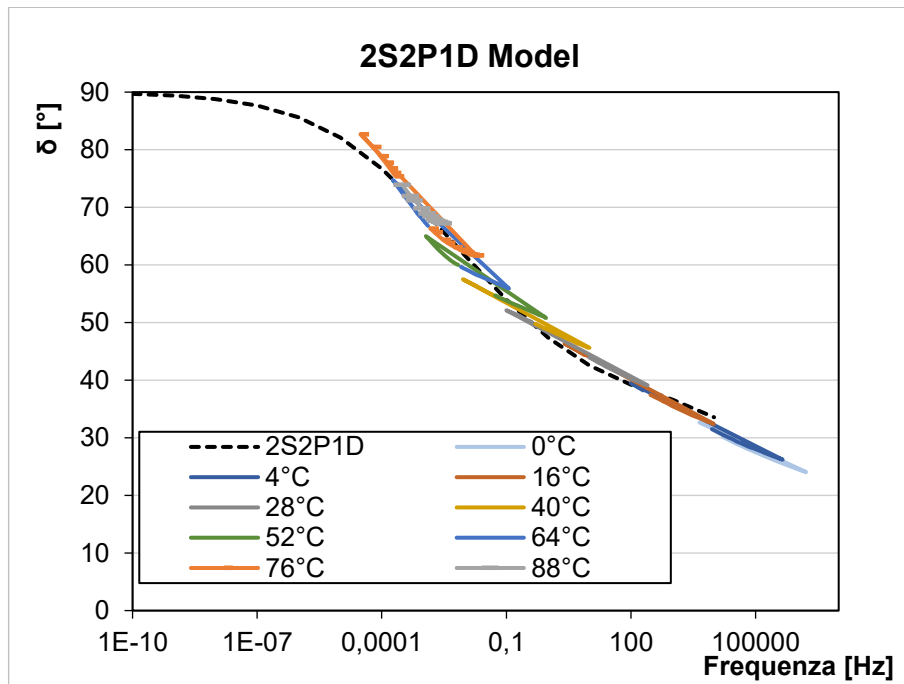


Figura 64 Curva maestra  $\delta$  modello 2S2P1D binder 15%

5.2.2 Modello 2S2P1D BINDER50%

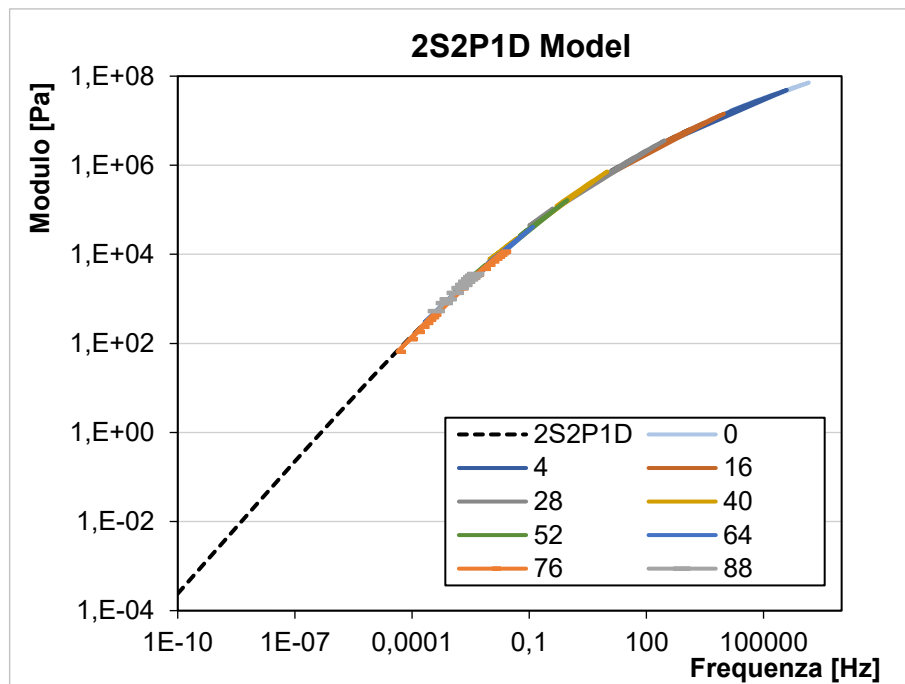


Figura 65 Curva maestra  $G^*$  modello 2S2P1D binder 50%

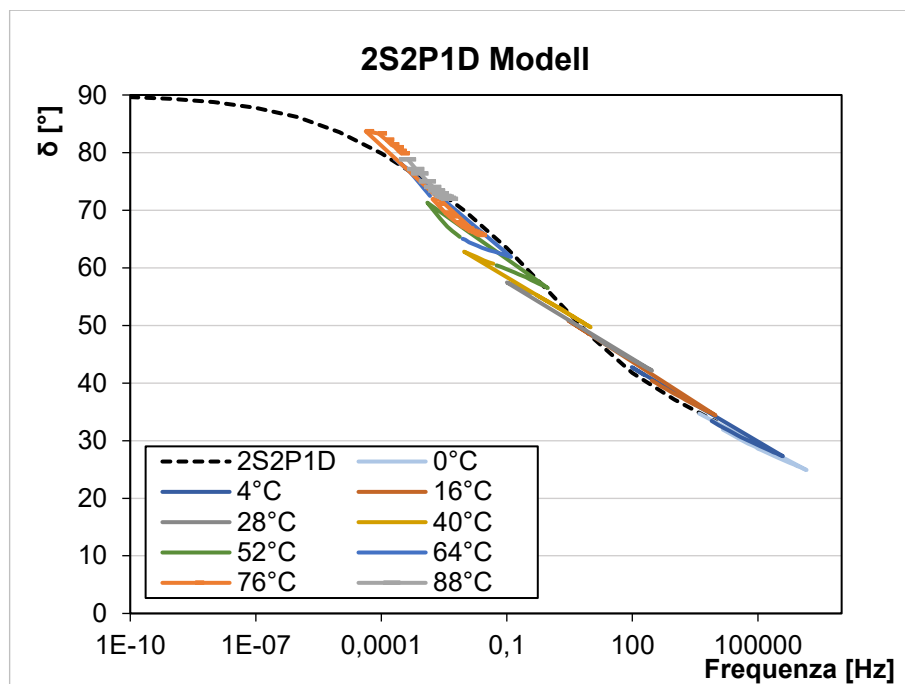


Figura 66 Curva maestra  $\delta$  modello 2S2P1D binder 50%

### 5.2.3 Rappresentazione dei dati nelle prove in regime oscillatorio

In alternativa alla rappresentazione delle funzioni viscoelastiche nel dominio delle frequenze, sono possibili altre modalità di rappresentazione dei dati provenienti da prove in regime oscillatorio sinusoidale quali:

- **Piano di Black** nel quale vengono messi in relazione modulo dinamico  $|G^*|$  e angolo di fase  $\delta$ . Esso consente di valutare la validità del principio di sovrapposizione tempo-temperatura (TTS): nella condizione in cui tutte le isoterme ottenute alle diverse temperature, per i materiali testati, risultano ben allineate a formare un'unica curva continua, tali materiali possono definirsi termoreologicamente semplici ed è pertanto possibile applicare il principio di TTS e la costruzione delle relative curve maestre;
- **Piano di Cole-Cole** che riporta in ascissa il modulo di immagazzinamento  $G_1$  ed il modulo di dissipazione  $G_2$ . In particolare,  $G_1$  è la parte reale del modulo complesso e prende il nome di modulo di restituzione elastica o di immagazzinamento (storage modulus) in quanto definisce l'energia immagazzinata dal materiale;  $G_2$  costituisce la parte immaginaria e viene detto modulo di dissipazione (loss modulus) in quanto rappresenta l'energia dissipata dal materiale per effetto dell'accumulo di deformazioni permanenti.

Di seguito si riportano i grafici di cui sopra ottenuti dai dati sperimentali sulle due differenti tipologie di campioni di bitume testati.

5.2.3.1 Piano di Black e Cole-Cole Binder15%

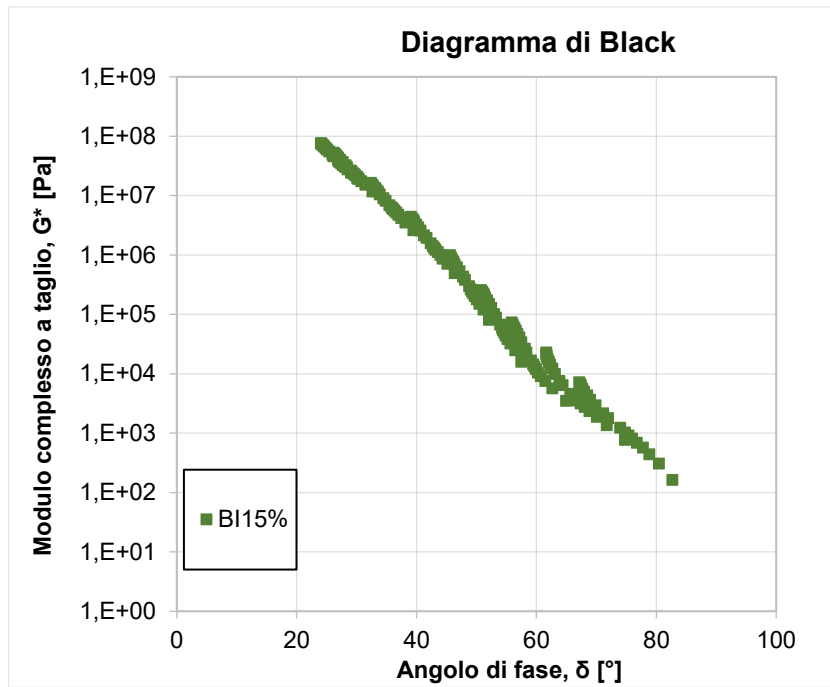


Figura 67 Diagramma di Black binder15%

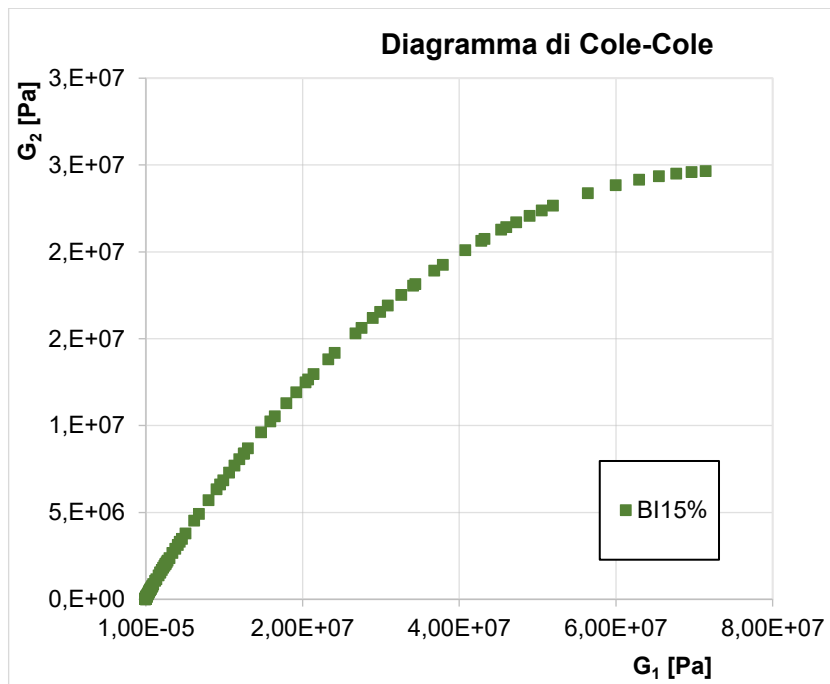


Figura 68 Diagramma di Cole-Cole binder15%

5.2.3.2 Piano di Black e Cole-Cole Binder50%

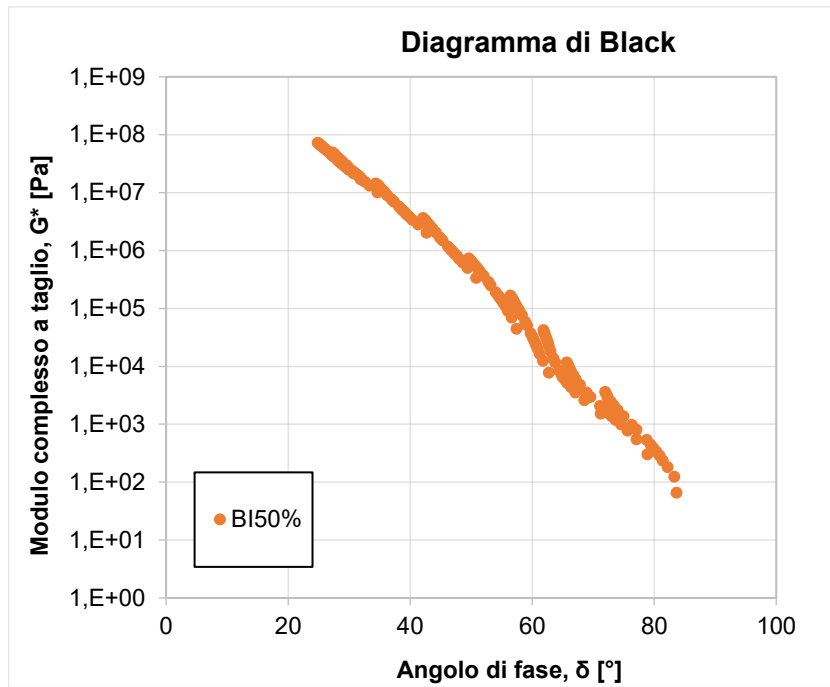


Figura 69 Diagramma di Black binder50%

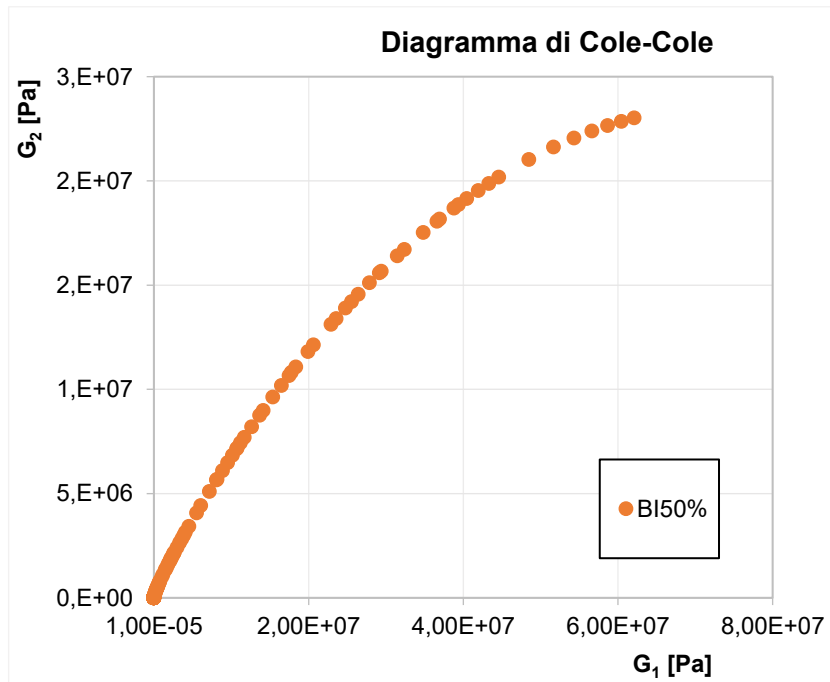


Figura 70 Diagramma di Cole-Cole binder50%



### 5.2.4 Confronto tra le miscele indagate

Vengono di seguito riportati grafici relativi ai due differenti tipi di bitumi testati prelevati da miscele con il 15% e il 50% di fresato.

Primariamente si riporta il diagramma di Black con il quale è possibile valutare la validità del principio di sovrapposizione tempo temperatura. In particolare, se tutte le curve ottenute elaborando i risultati della prova di FS alle diverse temperature sono ben allineate a formare un'unica curva isoterma continua, i campioni di materiale testati possono definirsi termoreologicamente semplici e risulta dunque possibile applicare il principio di TTS.

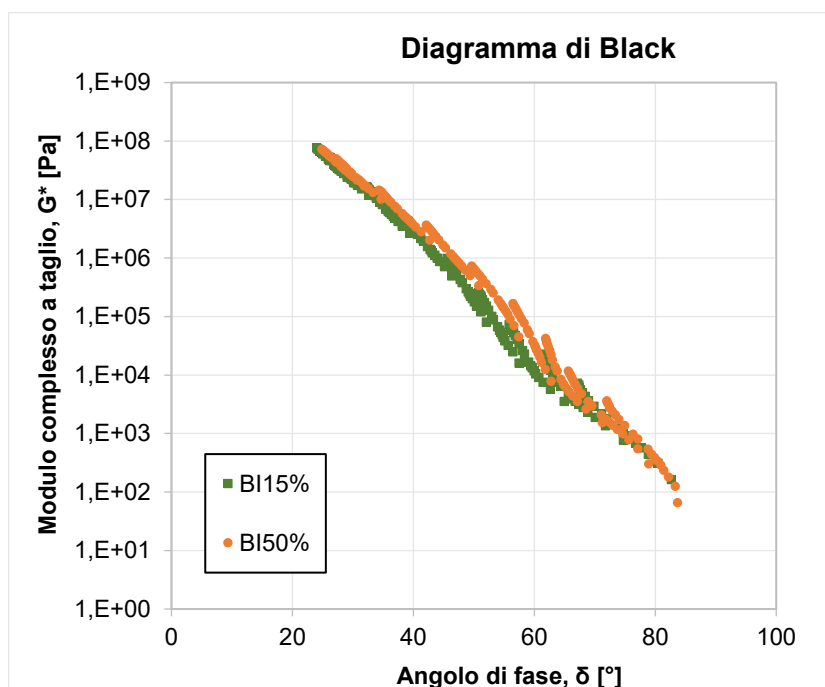


Figura 71 Confronto Diagramma di Black binder 15% e 50%

Dal diagramma di Black è possibile notare come al diminuire della temperatura, avviene un incremento del modulo complesso  $G^*$  e parallelamente ad una riduzione dell'angolo di fase  $\delta$ . Quello che è possibile osservare è che, in particolare alle temperature più basse, non si riscontrano particolari differenze di comportamento tra i due materiali. Per T intermedie si registrano valori di modulo complesso e angolo di fase leggermente superiori nelle miscele con il 50% di fresato, ma complessivamente le differenze non risultano così marcate.

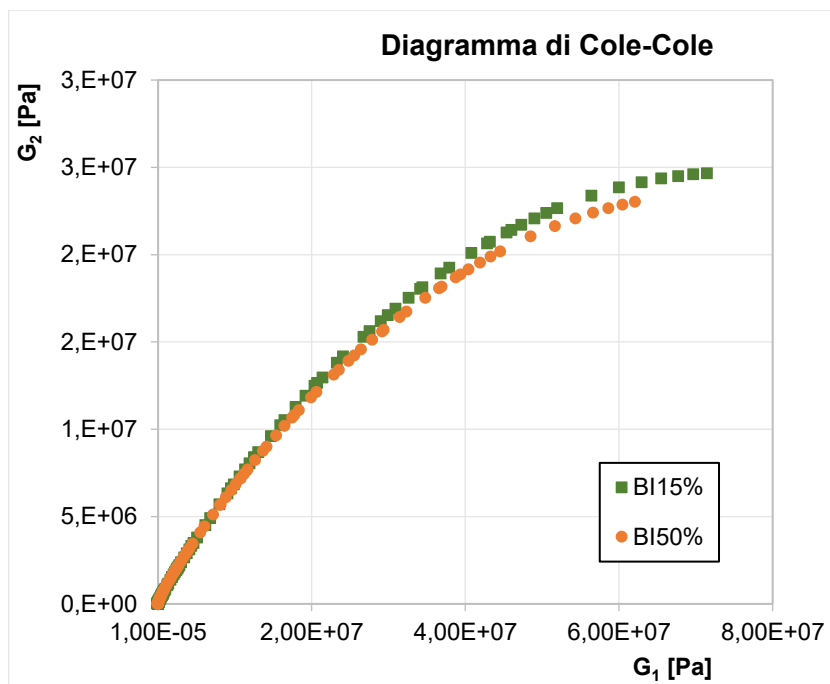


Figura 72 Confronto diagramma Cole-Cole binder 15% e 50%

Anche dal diagramma di Cole-Cole (fig. 72) emerge immediatamente che i due materiali non mostrano comportamenti tra loro molto diversi. Inoltre, quello che emerge è che il campione con il 15% di fresato consente di raggiungere valori di viscosità leggermente più elevati, mentre quello con il 50% ha maggiore elasticità alle basse temperature.

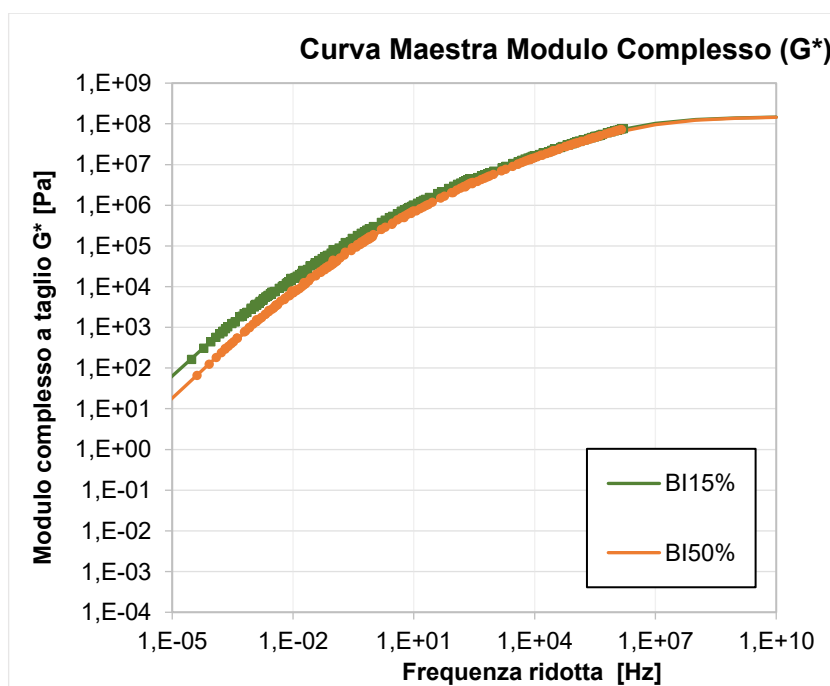


Figura 73 Confronto curve maestre  $G^*$  binder 15% e 50%

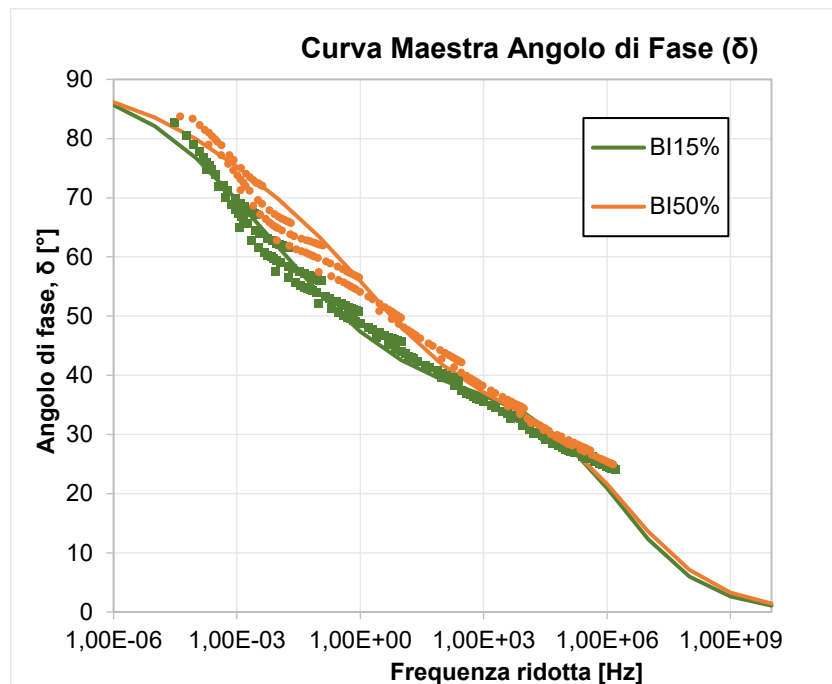


Figura 74 Confronto curve maestre  $\delta$  binder 15% e 50%

Dal grafico (fig.73) si può notare che il modulo di rigidezza  $|G^*|$  dei due differenti bitumi sono pressoché identici alle elevate frequenze / basse temperature. Viceversa, alle basse frequenze/ alte temperature le due curve tendono a discostarsi leggermente e il bitume proveniente dalla miscela con il 15% di fresato risulta caratterizzata da valori di modulo complesso più elevati.

Come emerge dalla fig. 74, i differenti leganti analizzati, quello da 50% di RAP mostra valori di  $\delta$  superiori a tutte le frequenze/temperature di prova. Di conseguenza il materiale sembra avere proprietà viscoso più marcate.

Le differenze di angolo di fase appaiono più evidenti alle intermedie e basse frequenze mentre si annullano quasi del tutto alle basse temperature dove i comportamenti dei due materiali risultano più simili.

### 5.3 Risultati Multiple Stress Creep Recovery

Come già spiegato al paragrafo §2.1.6.4 la prova consente di caratterizzare la risposta elastica del legante e la sua tendenza all'accumulo di deformazione non recuperabile durante i cicli di carico-scarico, indicatori della resistenza nei confronti delle deformazioni permanenti. I principali parametri indagati mediante questa prova sono:

- Jnr che rappresenta il valore di deformazione media non recuperata in funzione del carico applicato;
- R che invece indica il recupero elastico a ciascun livello tensionale applicato;
- Jnr, diff che rappresenta la differenza tra la Jnr<sub>0,1</sub> e la Jnr<sub>3,2</sub>.

I risultati ottenuti durante la sperimentazione vengono di seguito riportati.

BI15%					
T [°C]	R <sub>0,1</sub>	Jnr <sub>0,1</sub>	R <sub>3,2</sub>	Jnr <sub>3,2</sub>	Jnr, diff
70°C	54,98	0,17	46,12	0,22	28,43
76°C	45,18	0,43	28,85	0,64	47,57
82°C	30,71	1,38	8,43	2,53	83,26

Tabella 34 Risultati MSCR BI15%

BI50%					
T [°C]	R <sub>0,1</sub>	Jnr <sub>0,1</sub>	R <sub>3,2</sub>	Jnr <sub>3,2</sub>	Jnr, diff
70°C	41,43	0,62	24,94	0,90	46,17
76°C	32,24	1,40	11,04	2,36	68,94
82°C	22,85	3,78	3,15	7,23	91,43

Tabella 35 Risultati MSCR BI50%

I precedenti risultati possono essere poi raccolti graficamente allo scopo di confrontare le due tipologie di bitume oggetto di indagine.

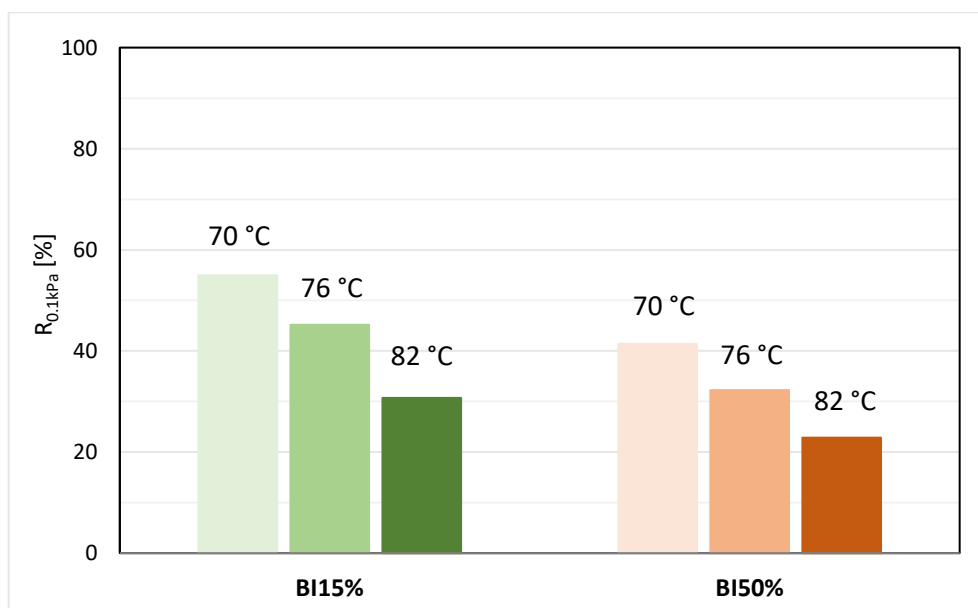


Figura 75 Confronto recupero per  $\tau=0,1$  kPa

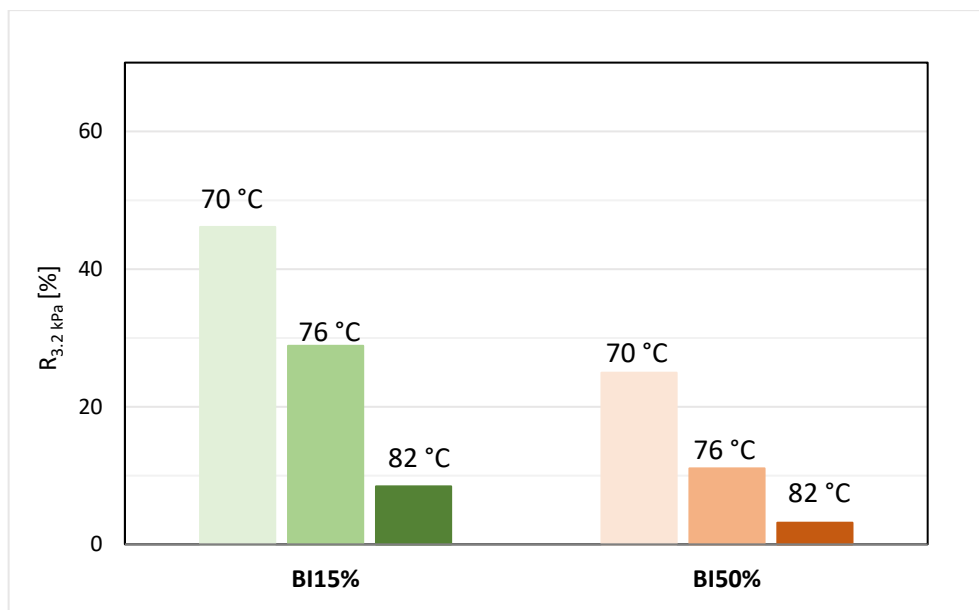


Figura 76 Confronto recupero per  $\tau=3,2$  kPa

Dai grafici sovrastanti (fig. 75 e 76) è possibile notare come indipendentemente dal tipo di materiale indagato e dal carico applicato, il recupero tende a diminuire con l'aumentare della temperatura. Inoltre, a parità di temperatura i due differenti campioni mostrano un minor recupero passando da un livello tensionale di 0,1 kPa a quello di 3,2 kPa. In generale poi si osservano valori meno elevanti della caratteristica R nel BI50%.

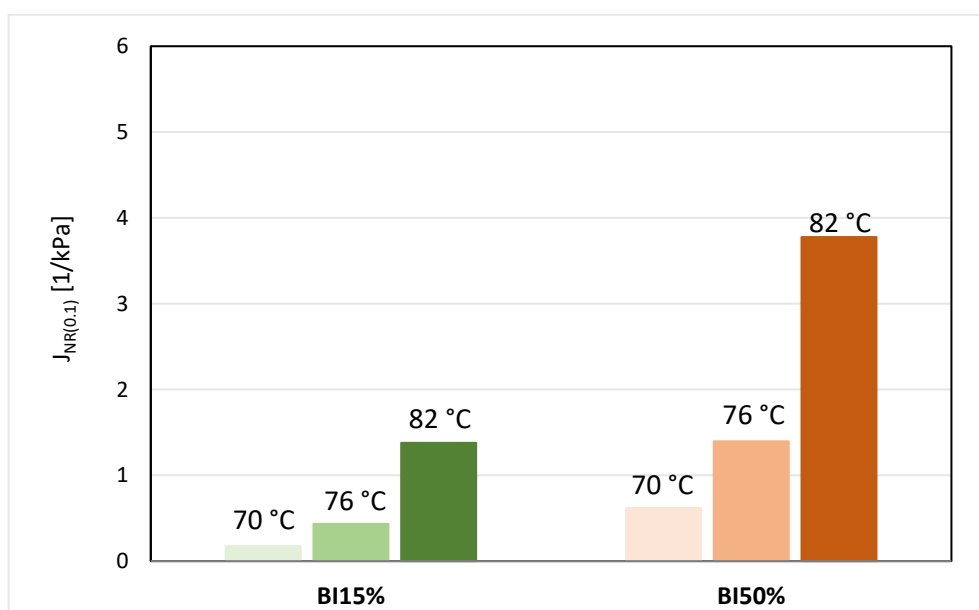


Figura 77 Confronto  $J_{nr}$  per  $\tau=0,1$  kPa

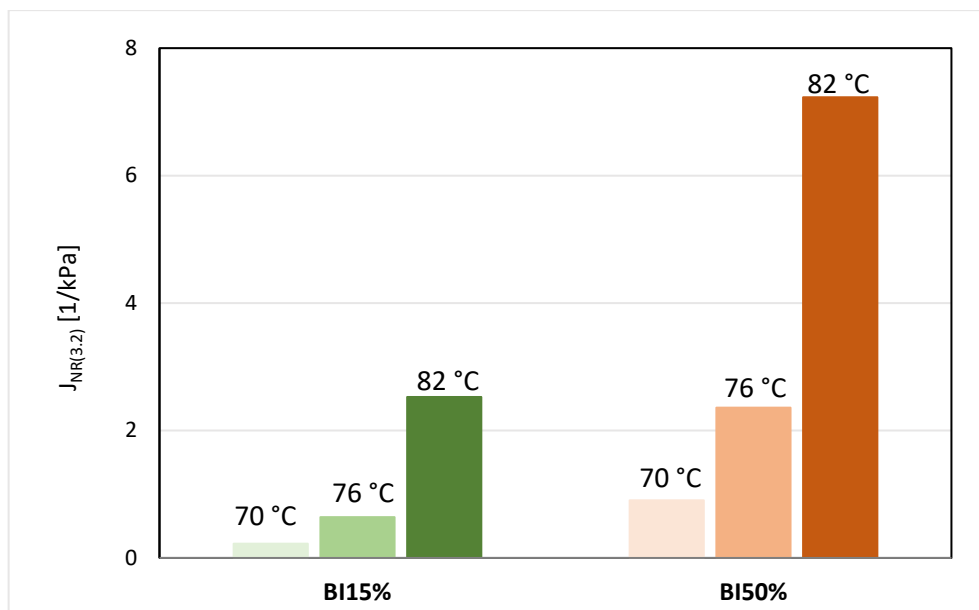


Figura 78 Confronto  $J_{nr}$  per  $\tau=3,2$  kPa

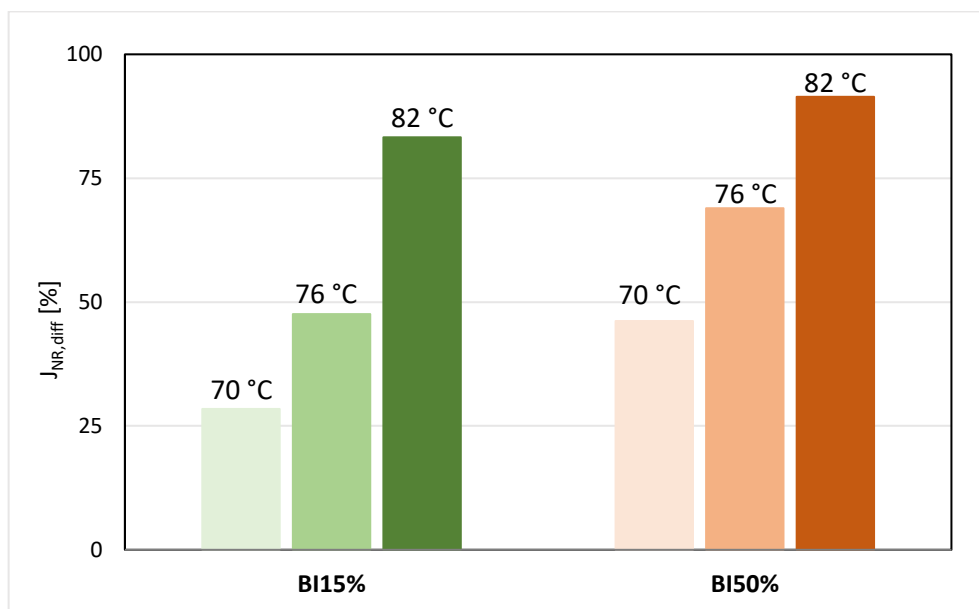


Figura 79 Confronto  $J_{nr,diff}$  [%]

In maniera del tutto speculare al recupero, dagli istogrammi della non-recoverable creep compliance ( $J_{nr}$ ) emerge che all'aumentare della temperatura di prova la deformabilità tende ad aumentare indipendentemente dal tipo di legante e dal livello tensionale applicato. Il BI50% manifesta una più spiccata tendenza all'accumulo di deformazioni permanenti. Inoltre, a parità di legante e temperatura di prova, la non-recoverable creep compliance tende a raddoppiare all'aumentare del carico. Da notare, infine, la maggiore differenza di deformabilità si registra nel legante da miscela con 50% di fresato.

## 5.4 Risultati Linear Amplitude Sweep, LAS

La prova LAS (Linear Amplitude Sweep), come già descritto al paragrafo §2.1.6.4 è un test che permette la caratterizzazione della resistenza del materiale sottoposto a danneggiamento. A tale scopo è interessante confrontare le curve sforzo-tensione ottenute per ciascuna delle ripetizioni effettuate e per i due differenti materiali indagati (fig. 80).

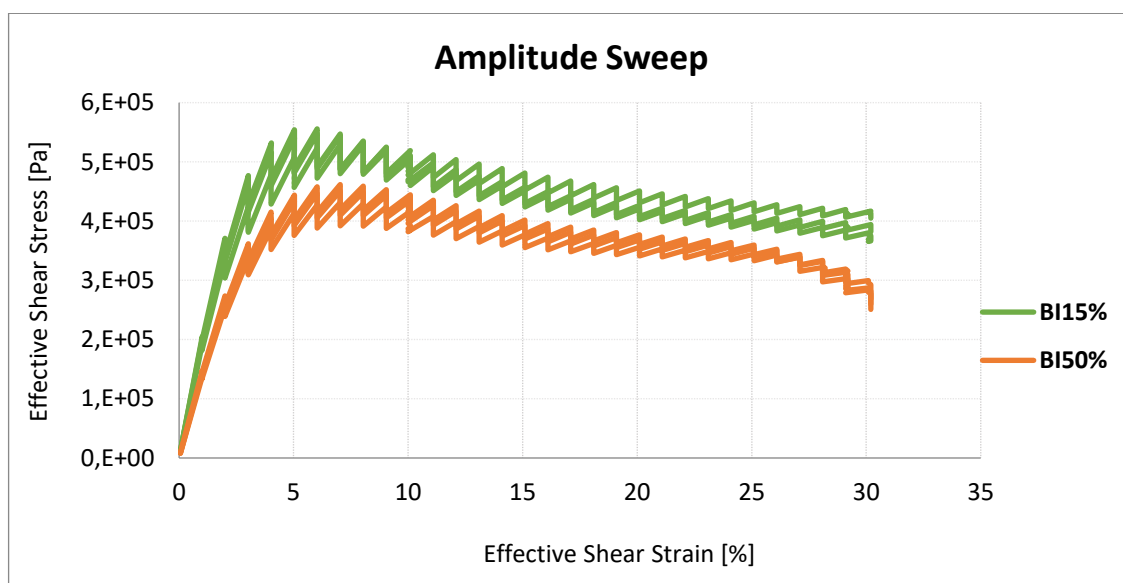


Figura 80 Confronto risultati LAS

Osservando il grafico si può notare che le curve  $\tau$ - $\gamma$  sono molto ravvicinate per i vari provini e che il BI15% ha un picco di tensione superiore rispetto al BI50% e dopo la rottura, il valore di  $\tau$  si riduce ma complessivamente resta maggiore rispetto a quello dell'altro bitume.

Il bitume BI50% invece ha una  $\tau$  di picco inferiore e dopo la rottura il materiale mostra il valore residuo più basso in termini di sforzo.

## 5.5 Risultati Spettroscopia a Infrarossi in Trasformata di Fourier, FTIR

L'ultima parte della sperimentazione ha previsto una fase di caratterizzazione chimica del bitume mediante prova FTIR. Come già definito al paragrafo § 2.1.7 il test può essere utilizzato per valutare quantitativamente e qualitativamente il cambiamento di certi gruppi funzionali

(C=O e S=O) per identificare il grado di invecchiamento del legante e per indagare la presenza di polimeri SBS.

La prova restituisce in output lo spettro del campione di materiale indagato (fig. 81)

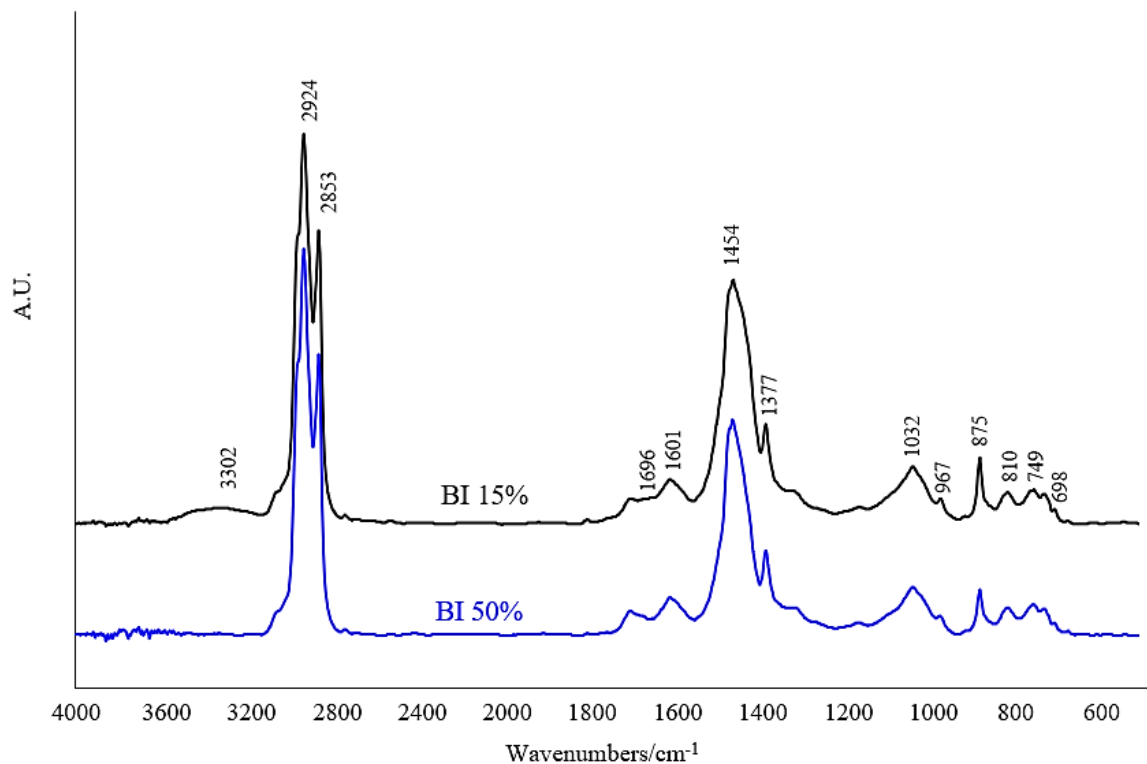


Figura 81 Spettro di assorbanza

Per un'analisi semi qualitativa dei leganti oggetto di studio sono stati introdotti alcuni indici strutturali basati sull'area delle bande osservate nello spettro:

- Indice carbonile  $I_{CO}$  che fa riferimento all'area dei picchi in corrispondenza del numero d'onda  $1700\text{ cm}^{-1}$ ;
- Indice solfossido  $I_{SO}$  il cui gruppo funzionale di riferimento ricade a valori di wave number di  $1032\text{ cm}^{-1}$ .



I risultati ottenuti vengono di seguito riportati

Nome campione	Area 1700	Area 1375	Area 1030	Area 1375+1460	Area 966	ICO	ISO
BI15%	0,76	2,02	8,99	57,93	0,49	0,013	0,155
BI50%	1,8	2,26	7,97	47,72	0,37	0,038	0,167

Tabella 36 Indici Ico e Iso

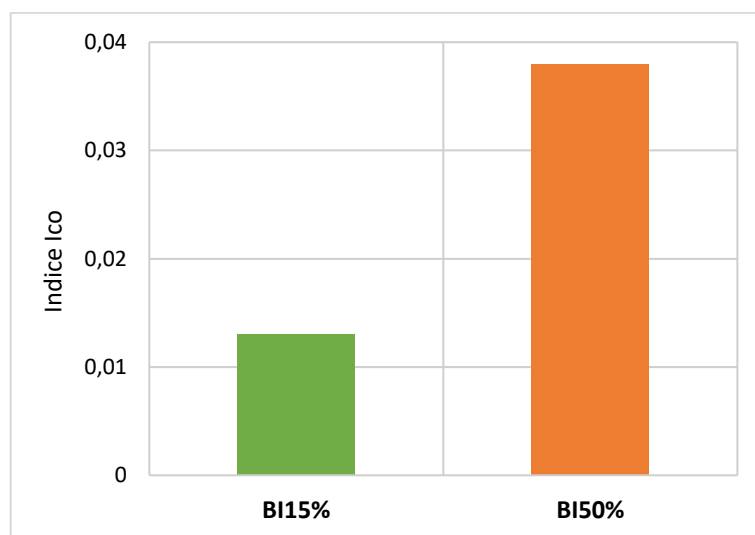


Figura 82 Confronto indice Ico

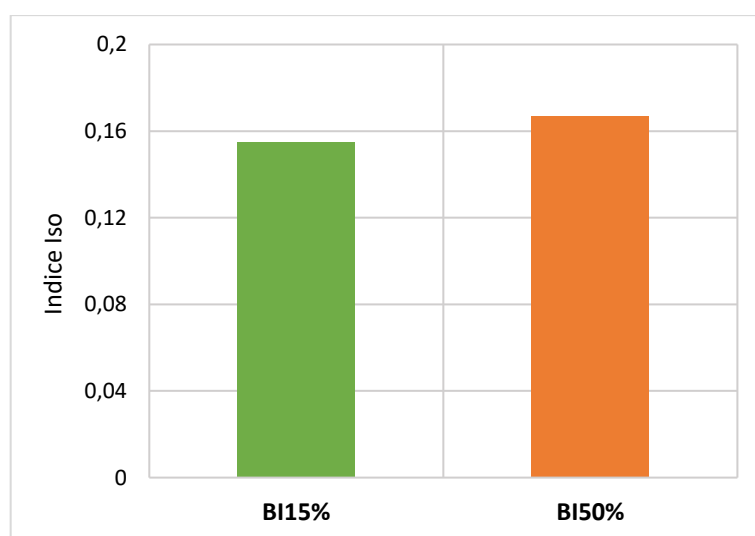


Figura 83 Confronto indice Iso

Dai grafici di confronto (fig. 83) è possibile come l'indice Iso risulti molto simile tra i due materiali, mentre l'Ico (fig. 82) è leggermente superiore nel BI50%. Di conseguenza è possibile

assumere che il bitume da miscela con 50% di fresato ha subito un invecchiamento leggermente superiore rispetto a quello da 15%, ma questo è dovuto principalmente alla presenza di maggiore quantitativo di legante invecchiato (non rigenerato dall'additivo) presente nella miscela.

Per la valutazione della percentuale di SBS si è fatto riferimento ad una correlazione che tiene conto dell'altezza dei picchi in corrispondenza della banda  $966\text{cm}^{-1}$  e  $699\text{cm}^{-1}$

Nome campione	H1377	H966	H699	966/1377	699/1377	SBS (966)	SBS (699)
						%	%
BI 15%	0,155	0,034	0,026	0,219	0,168	3,603	2,982
BI 50%	0,153	0,024	0,015	0,157	0,098	2,572	1,761

Tabella 37 Percentuale di SBS

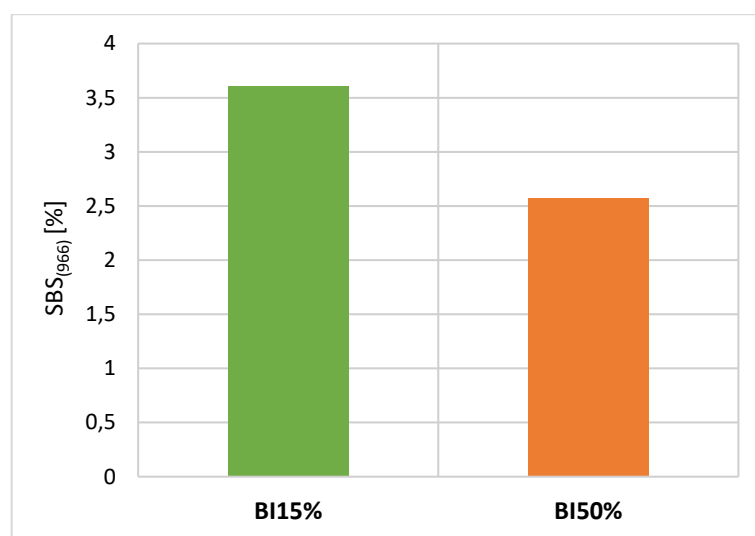
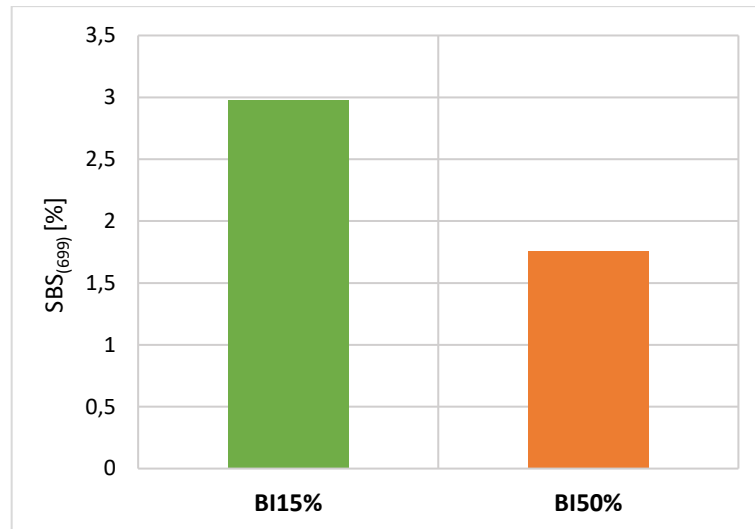


Figura 84 Confronto percentuale SBS<sub>966</sub>



*Figura 85 Confronto percentuale SBS<sub>699</sub>*

Il confronto tra i due materiali (fig. 84-85) mostra che la percentuale di polimero SBS identificato nel 15% è maggiore e questo era molto prevedibile poiché la miscela 50% presenta un maggior quantitativo di fresato (che è ricoperto da bitume con polimero degradato dai processi di invecchiamento) e di conseguenza è stato aggiunto un minor quantitativo di bitume vergine e quindi di polimero.

## ***Capitolo 6 – Conclusioni***

La sperimentazione oggetto di questa tesi, condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile ed Architettura – sezione Infrastrutture – area Strade” dell’Università Politecnica delle Marche, rientra all’interno di una collaborazione con la società “Aeroporti di Roma” e ha avuto come obiettivo fondamentale la valutazione delle caratteristiche prestazionali di miscele, realizzate sia per strati di binder che di base, con il 50% di fresato opportunamente additivate, le quali sono state poi confrontate con le rispettive proprietà di miscele (di riferimento) con il 15% di fresato, senza additivi. In particolare, sono state condotte analisi volumetriche, granulometriche e meccaniche sia sulle carote degli strati di base che di collegamento mentre si è focalizzata l’attenzione sulle proprietà reologiche e chimiche del solo strato di binder. I risultati delle prove eseguite sono stati utili sia per considerare la possibilità di incrementare la percentuale di fresato da poter utilizzare, sia per valutare l’efficienza dell’impianto che si è occupato della realizzazione di queste miscele sperimentali che, per le sue caratteristiche tecnologiche, non si presta bene alla produzione di conglomerati bituminosi a caldo con elevati quantitativi di fresato.

Alla luce dei risultati emersi da tale sperimentazione, per le miscele dello strato di base, si evince che:

- La percentuale di vuoti che caratterizza le due miscele risulta tra loro confrontabile;
- Analizzando i dati delle prove di rigidità (ITSM), si ottiene che tutte e due le tipologie di miscele hanno un comportamento simile in termini di rigidità;
- Prendendo a riferimento il comportamento in termini di resistenza a trazione indiretta, le miscele con il maggior quantitativo di fresato dello strato di base mostrano valori più elevati di ITS e  $CT_{index}$  rispetto alla miscela di riferimento;

Di conseguenza in relazione alle considerazioni appena fatte è possibile affermare che, per lo strato di base, la maggiore percentuale di fresato impiegata nella miscela sperimentale non abbia compromesso le prestazioni del conglomerato ma ha consentito di perseguire caratteristiche molto simili a quelle della miscela di riferimento con il 15% per effetto dell’impiego delle giuste accortezze e del corretto additivo. Ovviamente, per il completamento dello studio della miscela sperimentale per lo strato di base sarebbe necessario indagarne ulteriormente il comportamento

mediante altre prove che consentirebbero di avere un quadro più completo delle sue caratteristiche prestazionali.

Analizzando i risultati ottenuti per le miscele oggetto di studio dello strato di binder è possibile trarre le seguenti considerazioni:

- Per quanto riguarda l'analisi volumetrica e delle caratteristiche meccaniche in termini di modulo a trazione indiretta (ITSM), di resistenza a trazione indiretta (ITS), di coefficiente di trazione indiretta (CTI) sembrerebbe che il comportamento delle miscele realizzate con il 50% di fresato sia tendenzialmente comparabile e dello stesso ordine di grandezza di quello che si evince dalla miscela di riferimento con il 15% di fresato;
- Per quanto riguarda il comportamento a fatica si osserva un miglior comportamento della miscela sperimentale con il 50% di fresato per bassi livelli deformativi mentre la situazione si inverte alle alte deformazioni;
- Passando invece ai risultati del legante estratto dalla miscela, dalle curve maestre del modulo complesso si evince come i due bitumi hanno comportamenti paragonabili alle alte frequenze, mentre si rileva una maggiore rigidità nel legante estratto dal binder con 15% di fresato alle alte temperature;
- In termini di curve maestre ( $\delta$ ) è importante sottolineare che il BI50% ha un comportamento più viscoso (maggiore angolo di fase) rispetto al BI15% e tali differenze di angolo di fase appaiono più evidenti alle intermedie e basse frequenze mentre si annullano quasi del tutto alle basse temperature;
- I risultati delle prove di MSCR mostrano come il bitume estratto dalle miscele con 15% di RAP manifesti migliori prestazioni nei confronti delle deformazioni permanenti, poiché hanno un recupero (R) maggiore ed una deformazione permanente ( $J_{nr}$ ) minore rispetto al BI50%; si osserva, inoltre, che l'incremento di carico ha effetti più significativi sul legante da 50% di fresato per il quale si rileva un raddoppio di valore della non recoverable creep compliance ( $J_{nr}$ ) e un parallelo dimezzamento della caratteristica R;
- Osservando i risultati delle prove LAS è evidente come il BI15% abbia valori di resistenza a fatica maggiori rispetto al BI50% il quale, dopo la rottura, mostra un valore residuo più basso in termini di sforzo;
- Dalle prove chimiche emerge che il bitume da 50% di fresato ha subito un invecchiamento leggermente superiore rispetto a quello da 15% e che, come atteso per

effetto della maggiore quantità di bitume invecchiato presente nella miscela, è caratterizzato da una minore percentuale di polimero SBS.

Alla luce di quanto esposto è dunque possibile considerare che anche per la miscela sperimentale dello strato di binder con il 50% di fresato e opportunamente additivato si sono ottenute prestazioni sufficientemente buone, nonostante in alcuni casi tale materiale ha mostrato caratteristiche leggermente inferiori rispetto alla miscela di riferimento. Dunque, i risultati ottenuti in questa sperimentazione possono essere ritenuti incoraggianti verso l'impiego di maggiori percentuali di fresato nella produzione di miscele di conglomerati bituminosi a caldo, riuscendo così a perseguire importanti benefici ambientali unitamente ad un consistente risparmio economico.

Inoltre, i risultati ottenuti consentono di ritenere che l'impianto che ha proceduto alla produzione di questi conglomerati sia riuscito a confezionare delle miscele con caratteristiche sufficientemente discrete nonostante le tecnologie utilizzate non sia del tutto compatibili con le esigenze richieste per la produzione di impasti con elevanti quantitativi di materiale riciclato.

## ***Capitolo 7 - Bibliografia e Sitografia***

- [1] Anas – “Quaderni Tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture, Volume V”, 2019.
- [2] Ranieri Andrea, tesi di laurea “L’effetto del dosaggio di legante sulle proprietà meccaniche delle miscele bituminose a freddo”.
- [3] Ravaioli Stefano, Rassegna del bitume, Rivista del SITEB – Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade, estratto n° 26/96,” Tecnologie per la produzione dei conglomerati e problemi ambientali”.
- [4] Loprencipe G., Drago D., Quaderno AIPCR “Tecniche e aspetti normativi del riciclaggio nelle pavimentazioni stradali” per il XXV Convegno Nazionale Stradale - Comitato Tecnico C 4.3 “Pavimentazioni stradali”, Napoli 4-7 Ottobre 2006.
- [5] Lucia Rosa, tesi di laurea “Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali”.
- [6] <https://www.ordineingegnerimantova.it/wp-content/uploads/2015/04/06-Ciclo-tecnologico-opere-asfaltatura.pdf>.
- [7] [https://www.stradeeautostrade.it/asfalti-e-bitumi/il-riciclaggio-a-caldo-di-alti-quantitativi-di-fresato-nei-conglomerati-bituminosi-conglomerati-bituminosi/#:~:text=Le%20attuali%20Normative%20sul%20riciclaggio,infrastruttura%20interessata\)%20del%20fresato%20prodotto](https://www.stradeeautostrade.it/asfalti-e-bitumi/il-riciclaggio-a-caldo-di-alti-quantitativi-di-fresato-nei-conglomerati-bituminosi-conglomerati-bituminosi/#:~:text=Le%20attuali%20Normative%20sul%20riciclaggio,infrastruttura%20interessata)%20del%20fresato%20prodotto).
- [8] Mazzoni G., Bocci E., Canestrari F., ScienceDirect “Influence of rejuvenator on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures” per Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2018.
- [9] Lopez Gamarra G. S., tesi di laurea “Effetto della tipologia di additivo sull’invecchiamento di bitumi riciclati a caldo”.
- [10] Crocioni L., tesi di laurea “La chimica del processo di invecchiamento e rigenerazione del bitume”.
- [11] Mazzotta F., tesi di laurea “Studio reologico avanzato di bitumi modificati e additivati: proposta di una nuova procedura di aging”.
- [12] Paglialonga I., tesi di laurea “Studio sperimentale sull’ indurimento fisico dei leganti bituminosi alle basse temperature”.
- [13] Giavarini C., Scarsella M., Rassegna del bitume, Rivista del SITEB – Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade, estratto n° 29/97, “Simulazione e valutazione dell’invecchiamento del bitume”.

- [14] Di Litta L., tesi di laurea “Il dosaggio del filler nei conglomerati bituminosi riciclati a freddo”.
- [15] <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/34245009>
- [16] Marastoni Diego, tesi di laurea “Caratterizzazione meccanica delle malte attraverso prove non distruttive eseguite su differenti campagne di indagine”.
- [17] Bocci M., rapporto finale “Caratterizzazione sperimentale di un legante sintetico trasparente denominato EVIzero per applicazioni in ambito stradale”.
- [18] Estimé Mambula Mukandilaa, Wynand Jacobus van der Merwe Steynb and Terence Ian Milne, “Modelling of cohesion and adhesion damage of seal based on dynamic shear rheometer testing”
- [19] Ayad Subhy, in Construction and Building Materials, 2017, “Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterisations of modified bitumen: Literature review”.
- [20] Bocci M., rapporto finale “Analisi reologica di bitumi modificati con polimeri SBS di riciclo ottenuti da pneumatici fuori uso (PFU)”.
- [21] Norme Tecniche per Opere Civili, Aeroporti di Roma, Aeroporto di Fiumicino Lavori di adeguamento delle vie di rullaggio November Echo.
- [22] Valli Zabban, Scheda tecnica RIGENERVAL HARD.
- [23] Ravaioli Stefano, Rassegna del bitume, Rivista del SITEB – Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade, estratto n° 35/00, “Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali”.
- [24] Olard, F., & Di Benedetto, H. (2003). General “2S2P1D” model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. *Road materials and pavement design*, 4(2), 185-224.

## **7.1 Normativa di riferimento**

- [a] UNI EN 12597:2004, Bitume e leganti bituminosi – Terminologia.
- [b] UNI EN 13108-8:2016, Miscele bituminose – Specifiche del materiale, Parte 8: Conglomerato bituminoso di recupero.
- [c] UNI EN 12607-1:2015, Bitumi e leganti bituminosi – Determinazione della resistenza all’indurimento per effetto del calore e dell’aria - Parte 1: Metodo RTFOT.



- [d] UNI EN 14769:2013, Bitume e leganti bituminosi – Invecchiamento, condizionamento accelerato a lungo termine mediante l'utilizzo di un recipiente d'invecchiamento pressurizzato (PAV).
- [e] UNI EN 12697-08, Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi.
- [f] UNI EN 12697-5, Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 5: Determinazione della massa volumica massima.
- [g] UNI EN 12697-06:2020, Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi.
- [h] UNI EN 933-1:2012, Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati – Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica – Analisi granulometrica per setacciatura.
- [i] UNI EN 12697-26:2018, Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 26: Rigidezza.
- [j] UNI EN 12697-23:2018, Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi.
- [k] UNI EN 12697-24:2018, Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 24: Resistenza alla fatica.
- [l] UNI EN 14770:2012, Bitume e leganti bituminosi – Determinazione del modulo complesso di elasticità e dell'angolo di fase – Reometro dinamico di elasticità/scorrimento (DSR).
- [m] ASTM D7405, Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.
- [n] Norma AASHTO TP101, Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep.
- [o] UNI EN 13043:2004, Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico.