



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)

Analisi reologica di bitumi ad alto contenuto di polimeri SBS

Rheological bitumen analysis with a high SBS polymers content

Relatore:

Prof. Ing. Maurizio Bocci

Tesi di Laurea:

Klajdi Sema

Correlatore:

Ing. Carlo Carpani

Anno Accademico 2021 – 2022

Sommario

<i>Introduzione</i>	1
<i>Capitolo 1 – Stato dell’arte</i>	2
1. Il bitume.....	2
1.1. L’origine del bitume	2
1.1.1. La distillazione atmosferica del greggio.....	2
1.1. Costituzione chimica del bitume	3
1.2.1 Analisi chimica elementare	4
1.2.2 Analisi chimica molecolare	4
1.2.3. Analisi chimica strutturale.....	5
2. Il bitume modificato.	9
2.1 Le tipologie dei polimeri	9
2.3. Le proprietà fisiche dei bitumi modificati.	14
3. Riciclaggio del conglomerato bituminoso e l’invecchiamento del bitume	16
3.1 Introduzione al riciclaggio.....	16
3.2 Il fresato.....	16
3.3 Tecniche di riciclaggio.	18
3.3.1. Riciclaggio a caldo in impianto	18
3.3.2 Riciclaggio a caldo in sito.	20
3.3.3. Riciclaggio a freddo.....	21
3.4. L’invecchiamento del bitume.	24
3.4.1. Effetti dell’invecchiamento sulla chimica del bitume	25
3.4.2. Effetti dell’invecchiamento sulla reologia del bitume.	25
3.5 L’effetto degli additivi.....	26
4. Reologia del bitume.....	27
4.1 Le grandezze reologiche.....	27
4.2 Prove in regime oscillatore	28
4.3. Limite di viscoelasticità lineare	30
4.4. Rappresentazione dei dati delle prove in regime oscillatorio lineare	31
4.4.1 Principio di sovrapposizione tempo-temperatura (TTSP)	31
4.4.2 Master curves.....	32
<i>Capitolo 2 – Materiali e metodi.</i>	36
2.1. Programma sperimentale.	36
2.2 Materiali	37
2.2.1. Drenoval hard	37
2.2.2 Drenoval PBT	38
2.2.3. Rigenerval PBT	39
2.2.4. RAP	40

2.2.5. Additivo A	41
2.3. Produzione dei materiali di prova.....	42
2.4. Procedure di prova.....	46
2.4.1 Macchinario utilizzato-Dynamic Shear Rheometer (DSR).....	46
2.4.2. Prova Strain sweep e frequency sweep.....	50
2.4.2. Frequency sweep	51
4.4.3. Prova M.S.C.R (Multiple Stress Creep Recovery)	57
4.4.5. Prova LAS (Linear Amplitude Sweep).....	58
4.4.6. Prova di fatica.....	60
<i>CAPITOLO 3 – Risultati</i>	60
3.1 – DRENOVAL	60
3.2 – DRENOVAL PBT	64
3.3 – DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 5%.....	68
3.4 – DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 10%.....	70
3.5 – DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 15%.....	74
3.6– RIGENEREVAL PBT + BITUME ESTRATTO FRESATO	76
3.7 - Scelta della percentuale ottimale di additivo (grafici di confronto tra i primi 4 bitumi e foglio excel di scelta % additivo).	80
3.8 - Confronto DRENOVAL vs DRENOVAL PBT.....	83
3.9 - Confronto RIGENEREVAL PBT + BITUME ESTRATTO FRESATO vs DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 10%	87
<i>Conclusioni</i>	92

Introduzione

Il bitume è un composto organico eterogeneo ricavato da processi di distillazione del petrolio greggio.

È anche un materiale viscoelastico, infatti, se sottoposto a carichi a breve termine si deforma elasticamente, al contrario, se è soggetto a carichi a lungo termine si comporta come una sostanza viscosa con deformazioni irreversibili.

Inoltre, si dimostra essere un materiale termoplastico, e come tale si presenta in uno stato solido-fragile alle basse temperature, in uno stato solido-semisolido a temperatura ambiente e liquido alle alte temperature.

Nella produzione dei conglomerati con bitumi normali, vi sono dei limiti nella temperatura che coincide o con il punto di rammollimento (55°C) o quando ha un comportamento vetroso, provocando fessurazioni nella pavimentazione(-8°C): il bitume modificato aumenta conseguentemente questo intervallo di temperatura. La produzione di conglomerati bituminosi con l'utilizzo di esso è obbligata a incrementare le prestazioni dei bitumi utilizzati nelle applicazioni su strada, aeroporti e piste, migliorando l'aspettativa di vita e al contempo la riduzione dei livelli di manutenzione.

Per questi motivi, la ricerca sui bitumi è in continua evoluzione ed oggi si può parlare di **bitumi modificati (Polymer Modified Bitumens, PMB)**, ovvero bitumi tradizionali addizionati con polimeri. I polimeri sono macromolecole costituite da catene di monomeri ripetute per un gran numero di volte. La sequenza e la struttura chimica del monomero determinano le proprietà fisiche del polimero.

I polimeri che si utilizzano in ambito stradale sono i termoplastici che hanno un comportamento simile al bitume e si sciolgono in temperature simili.

I polimeri termoplastici elastomerici sono i più utilizzati e migliorano prevalentemente il comportamento duttile ed elastico della miscela finale con conseguente incremento della deformazione a rottura e della resistenza ai carichi ciclici, quindi le deformazioni di traffico vengono recuperate.

Tra i polimeri, quello che attualmente viene maggiormente utilizzato nella modifica dei leganti è il termopolimero stirene-butadiene-stirene (SBS), aggiunto in percentuali variabili fra il 3 e l'8% in peso, a seconda della base bituminosa e delle prestazioni richieste al prodotto finale

Gli obiettivi di questa sperimentazione sono:

1. Valutare l'effetto di un aumento della % di modifica sul bitume modificato hard, confrontando i bitumi Drenoval hard e Drenoval PBT (superhard).
2. Valutare il comportamento del bitume modificato hard e superhard quando miscelato con bitume invecchiato proveniente dal fresato, confrontando Rigenerval + 50% RAP con Drenoval + 50% RAP e la percentuale di additivi tale da ottenere caratteristiche confrontabili con il Drenoval hard.

Capitolo 1 – Stato dell'arte

1. Il bitume

1.1. L'origine del bitume

Il bitume è un composto organico eterogeneo, generalmente ricavato da processi di distillazione del petrolio greggio. È anche un materiale viscoelastico, infatti, se sottoposto a carichi a breve termine si deforma elasticamente, al contrario, se è soggetto a carichi a lungo termine si comporta come una sostanza viscosa con deformazioni irreversibili.

Inoltre, si dimostra essere un materiale termoplastico, e come tale si presenta in uno stato solido-fragile alle basse temperature, in uno stato solido-semisolido a temperatura ambiente e liquido alle alte temperature. Questa termoplasticità dipende dalla sua particolare struttura macromolecolare dove famiglie di molecole con funzionalità e polarità diverse danno luogo a interazioni di intensità variabile.

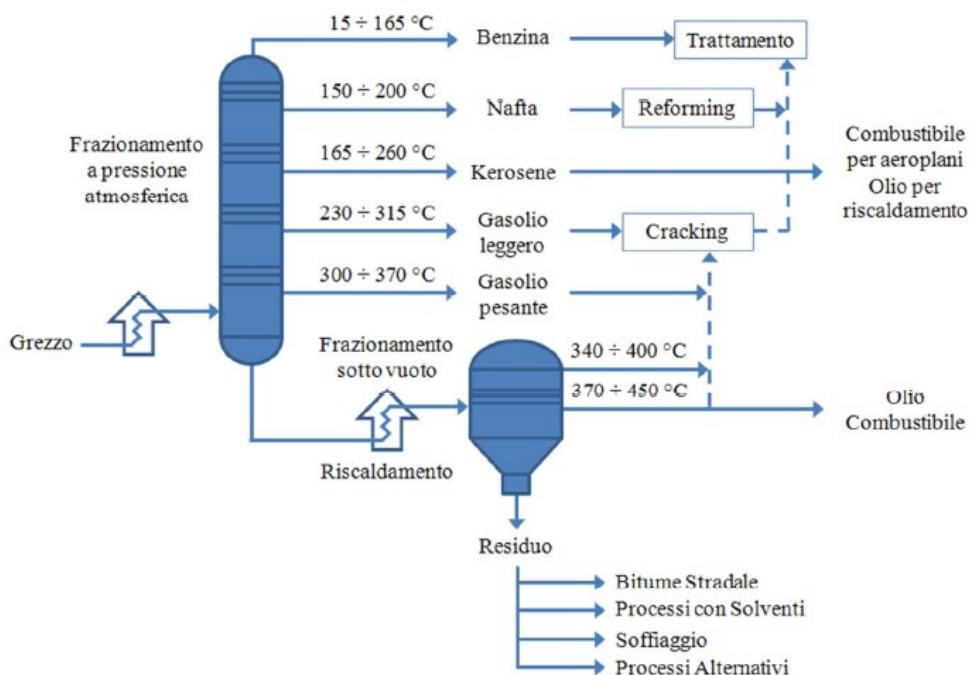


Figura 1.1 – Schema di frazionamento del greggio di petrolio

1.1.1. La distillazione atmosferica del greggio

La distillazione atmosferica si conduce a pressione leggermente maggiore alla pressione atmosferica. Tale processo ha lo scopo di frazionare il greggio in prodotti con caratteristiche diverse tenute a soddisfare la

domanda di mercato di carburanti (benzina, cherosene, gasolio, diesel), combustibili (GPL, cherosene, gasolio da riscaldamento e olio combustibile) e di cariche per la petrolchimica.

La distillazione ha luogo in una torre di frazionamento composta da una colonna di distillazione contenente piatti posti a diverse altezze in relazione ai distinti punti di ebollizione dei costituenti del greggio.

I piatti sono inoltre muniti di fori che consentono il passaggio delle frazioni da un piatto all'altro, da cui fuoriescono i derivati petroliferi:

- Nei piatti in cima alla colonna si depositano gli idrocarburi più leggeri;
- Nei piatti inferiori gli idrocarburi più pesanti;
- Sul fondo i residui della distillazione.

La distillazione frazionata è da considerarsi un processo primario. La presenza di oli idrocarburici rende, però, necessario un ulteriore frazionamento in una seconda colonna di distillazione, a una pressione inferiore alla pressione atmosferica.

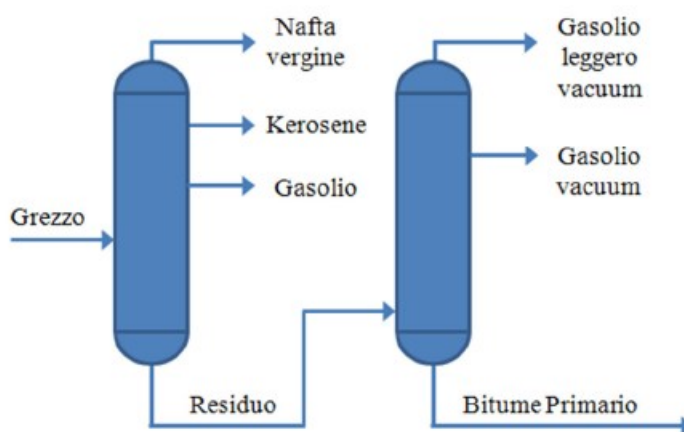


Figura 1.2 - Distillazione frazionata

Combinando opportunamente le principali variabili che regolano la distillazione a due stadi (temperature, condizioni di riflusso, portata, ecc.), si ottengono bitumi a differenti gradi di penetrazione.

Spesso per questioni di convenienza economica, di disponibilità sul mercato o più semplicemente produttivi, vengono inviate alla colonna vacuum residui atmosferici provenienti dalla distillazione di grezzi diversi. Il bitume ottenuto da questo processo ha caratteristiche intermedie, rispetto a quelle ottenute da una sola carica di petrolio grezzo.

1.1. Costituzione chimica del bitume

Le composizioni finali dei bitumi industriali risultano variabili nonostante i tipi di processo di produzione siano paragonabili, poiché eseguiti in uno stesso impianto, e i greggi provengano dalla stessa zona.

In commercio, la classificazione del bitume è definita dalle proprietà fisiche più che chimiche.

1.2.1 **Analisi chimica elementare**

Dall'analisi della composizione elementare si evince che i bitumi ottenuti da un processo di raffinazione contengono molti elementi chimici differenti:

- Carbonio, C, (80÷88% in peso);
- Idrogeno, H, (8÷12% in peso);
- Zolfo, S, (0÷9% in peso);
- Ossigeno, O, (0÷2% in peso);
- Azoto, N, (0÷2% in peso);
- tracce di metalli pesanti: Vanadio, V; Nichel, Ni; Ferro, Fe.

Le percentuali variano a seconda del greggio e del processo di produzione, ma rientrano sempre all'interno di questi range.

I legami chimici che uniscono le molecole sono deboli e possono essere facilmente spezzati mediante il riscaldamento e si riformano durante il raffreddamento. Questo, spiega la natura viscoelastica e termoplastica del bitume e perché la struttura riformata sia differente da quella avente prima del riscaldamento.

1.2.2 **Analisi chimica molecolare**

Il bitume è essenzialmente composto da idrocarburi (percentuale minima 90% in peso). Questi sono molecole formate solo da carbonio e idrogeno e raggruppate in riferimento al tipo di legame che si crea tra due atomi di carbonio (legame semplice, doppio o triplo). Sono suddivisi in aromatici e alifatici a seconda che contengano o meno nella propria molecola anelli di benzene.

1.2.2.1 idrocarburi alifatici

Negli idrocarburi alifatici differenziamo gli **aciclici**, a catena aperta, in cui gli atomi di carbonio si legano formando catene lineari o ramificate, e gli **alicyclici**, a catena chiusa, in cui le catene sono chiuse ad anello.

Un'ulteriore suddivisione è quella tra gli idrocarburi saturi o insaturi a seconda del tipo di legame tra due atomi di carbonio:

- alcani o cicloalcani: sono idrocarburi saturi, aventi legami semplici e formula generale C_nH_{2n+2} con capostipite il metano CH_4 ;
- alcheni o cicloalcheni: sono idrocarburi insaturi, aventi legami doppi e formula generale con capostipite l'etilene C_2H_4 ;
- alchini o cicloalchini: sono idrocarburi insaturi, aventi legami tripli e formula generale C_nH_{2n-2} con capostipite l'acetilene C_2H_2 .

1.2.2.2 Idrocarburi aromatici

Gli idrocarburi aromatici sono idrocarburi insaturi e si distinguono a seconda che contengano un solo o più anelli benzenici. Il loro nome deriva dal fatto che i primi composti scoperti erano profumati. L'esempio più semplice dell'idrocarburo aromatico è il benzene, C_6H_6 .

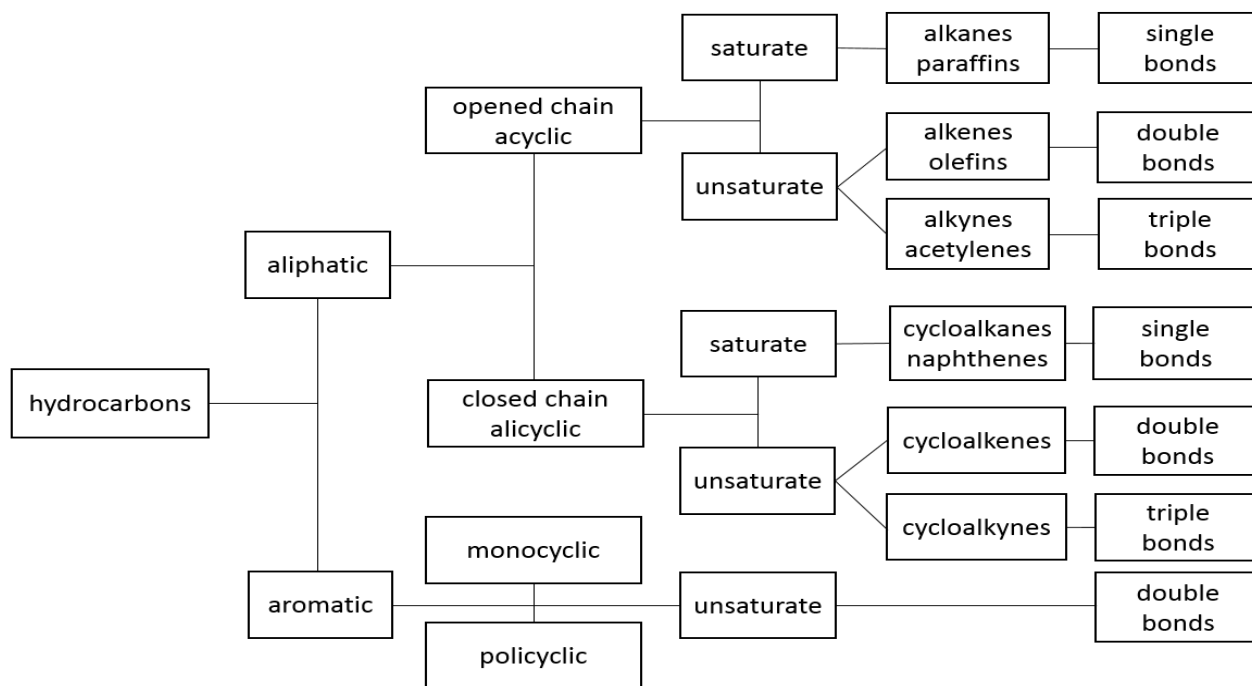


Figura 1.3 – Schema rappresentativo di idrocarburi presenti nel bitume

1.2.3. Analisi chimica strutturale

Per condurre uno studio più accurato e mirato, bisogna eseguire un'ulteriore analisi, quella chimica strutturale. Si procede utilizzando opportuni metodi di frazionamento che scindono il bitume in gruppi molecolari differenti, sfruttando la loro diversa solubilità, le differenze di peso molecolare o l'individuazione di particolari tipologie chimiche.

I metodi di frazionamento possono essere classificati in tre principali categorie:

- metodo dei solventi selettivi;
- metodo di precipitazione chimica;
- tecniche cromatografiche di adsorbimento e desorbimento.

I metodi che utilizzano **solventi selettivi** prevedono il trattamento sequenziale del bitume con solventi a polarità crescente. Non è una tecnica impiegata frequentemente perché non consente di isolare frazioni diverse tra loro a sufficienza.

Il metodo di **precipitazione chimica** permette di individuare i due gruppi principali costituenti il bitume: gli asfaltene e i maltene. I primi si separano per precipitazione in n-pentano, mentre la soluzione residua composta da maltene, si tratta con soluzioni di acido solforico H_2SO_4 contenenti il 30% di anidride solforica SO_3 . Ciò consente una valutazione quantitativa di altre classi molecolari: basi azotate (N), prime acidaffine (A_1) e seconde acidaffine (A_2). Le frazioni residue dei maltene che non hanno reagito vengono denominate paraffine.

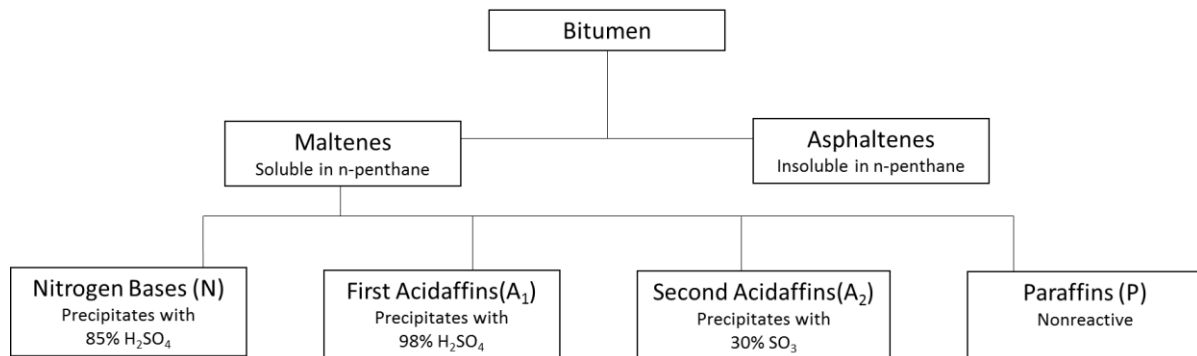


Figura 1.4 – Schema rappresentativo del frazionamento con il metodo di precipitazione chimica

Nelle **tecniche cromatografiche di adsorbimento e desorbimento** prima si ha la separazione degli asfaltene, mediante precipitazione in un solvente paraffinico non polare. In seguito, la soluzione ottenuta viene introdotta in una colonna cromatografica dove le componenti vengono prima adsorbite e poi desorbite tramite l'uso di solventi a maggior polarità consentendo l'isolamento delle frazioni con polarità crescente: i saturi, gli aromatici naftenici (aromatici) e gli aromatici polari (resine). Il metodo più utilizzato è quello di Richardson.

Metodo cromatografico di Richardson

Divide il bitume in quattro classi in base alla solubilità in alcuni solventi:

- carboidi, elementi insolubili in solfuro di carbonio (CS_2);
- carbeni, elementi insolubili in tetracloruro di carbonio (CCl_4);
- asfaltene, elementi insolubili in alcano bassobollente;
- maltene, elementi solubili negli alcani bassobollenti che possono, a loro volta, essere ulteriormente suddivisi mediante l'utilizzo di procedimenti cromatografici di adsorbimento.

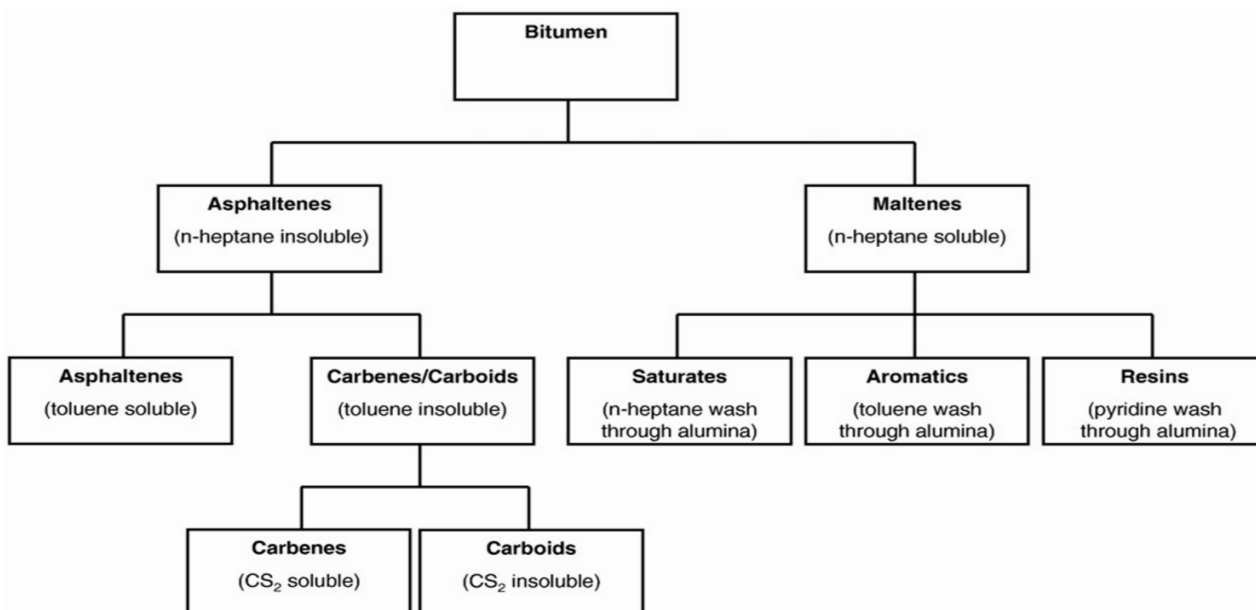


Figura 1.5 – Schema rappresentativo di frazionamento con il metodo di Richardson

Indipendentemente dal metodo di frazionamento usato, parlando di analisi chimica strutturale si fa riferimento ai costituenti del bitume, le cosiddette SARA FRACTIONS, acronimo di Saturi, Aromatici, Resine e Asfaltini.

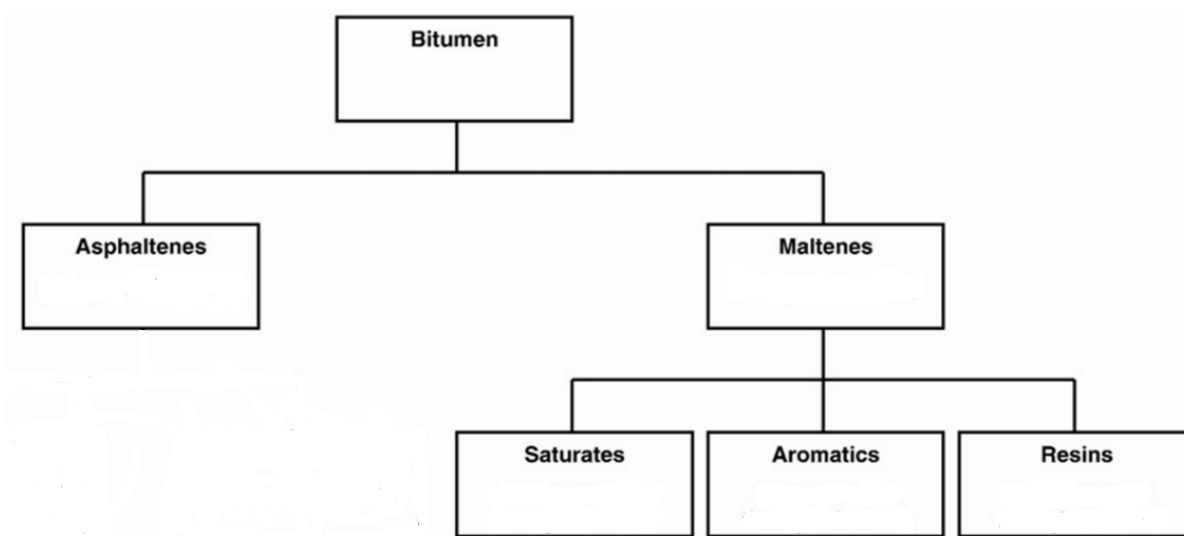


Figura 1.6 – Schema rappresentativo di frazionamento SARA

Saturi

I saturi hanno l'aspetto di un liquido viscoso, di colore biancastro-trasparente, composto da idrocarburi alifatici saturi a lunga catena, alcuni con ramificazioni (paraffine), e da nafteni.

Sono composti non polari, di peso molecolare compreso tra 300 e 1500 mol; costituiscono una percentuale compresa tra il 5% ed il 15% in peso del bitume.

I saturi contengono la maggior parte delle cere dei bitumi, le quali si presentano in forma paraffinica. Tali cere paraffiniche hanno specifici effetti sul comportamento reologico del legante. Quando, in fase d'esercizio, il bitume si trova per molto tempo a una temperatura inferiore a quella di fusione delle cere, si assiste alla cristallizzazione delle cere, che comporta l'indurimento fisico del bitume. Dunque, l'aumento di rigidità e viscosità non è attribuibile solo all'ossidazione chimica del bitume, ma anche alla cristallizzazione delle cere.

Aromatici

Gli aromatici sono rappresentati come un liquido viscoso di colore marrone scuro, costituito da catene di carbonio non polari nelle quali dominano i sistemi di anelli insaturi (aromatici), senza escludere la presenza di anelli naftenici.

Costituiscono la frazione maggiore del bitume con una percentuale compresa tra il 30% e il 45% in peso e con un peso molecolare compreso tra 300 e 2000 mol.

Gli aromatici costituiscono la fase fluida di dispersione degli asfalteni, sono la componente più fluido del bitume, quindi in loro assenza o carenza il bitume perde fluidità anche a temperature medio-alte, risultando duro e appiccicoso per essere lavorato e senza capacità di scorrimento.

Resine

Le resine hanno una struttura molto simile agli asfalteni; infatti questi ultimi provengono dall'ossidazione delle prime, presentando una struttura principalmente aromatica.

Si presentano come un liquido molto viscoso o un solido molto plastico di color marrone scuro.

Esse costituiscono una frazione del bitume compresa tra il 10% e il 25% in peso ed hanno peso molecolare inferiore agli asfalteni, tra 500 e 50000 mol.

Sono note per le loro proprietà leganti ed impermeabilizzanti e assolvono al ruolo di peptizzare gli asfalteni all'interno del bitume, che, altrimenti, tenderebbero a flocculare. Le resine svolgono un'azione disperdente nei confronti degli asfalteni e dei malteni.

Forniscono elasticità, flessibilità, rendono il bitume duttile e adesivo. Per carenza di resine il bitume si dimostra instabile, cioè tende a separare gli asfalteni sotto forma di agglomerato lasciando affiorare gli oli.

Asfalteni

Gli asfalteni sono macromolecole dall'alto peso molecolare compreso tra 600 e 300000 mol, e con una elevata polarità. A livello microscopico sono solidi amorfi di color nero o marrone scuro costituiti da miscele di idrocarburi con struttura aromatica, cioè ciclica non satura, in cui sono presenti ossigeno, azoto, zolfo e metalli pesanti.

Sono generalmente presenti in concentrazioni comprese tra il 5% ed il 20% in peso e hanno un grande effetto sulle caratteristiche del legante: l'aumento del contenuto di asfalteni comporta una diminuzione del valore di penetrazione, un incremento della viscosità e un innalzamento del punto di rammollimento.

Gli asfalti sono i principali responsabili del comportamento viscoso del bitume, della sua elasticità o plasticità in funzione della temperatura, della capacità di resistere a sollecitazioni meccaniche e di depositarsi rapidamente se versato caldo su qualsiasi superficie formando una pellicola molto adesiva.

Per carenza di asfalti il bitume mostra una consistenza ridotta, subisce maggiormente deformazioni indotte da sollecitazioni meccaniche o termiche e perde gran parte delle sue proprietà adesive.

2. Il bitume modificato.

Il bitume è una miscela d'idrocarburi ad alto peso molecolare. Si tratta di un materiale organico, di origine naturale o industriale, solubile in solfuro di carbonio.

Nella produzione dei conglomerati con bitumi normali, vi sono dei limiti nella temperatura che coincide o con il punto di rammollimento (55°C) o quando ha un comportamento vetroso, provocando fessurazioni nella pavimentazione(-8°C): il bitume modificato aumenta conseguentemente questo intervallo di temperatura. La produzione di conglomerati bituminosi con l'utilizzo di esso è obbligata a incrementare le prestazioni dei bitumi utilizzati nelle applicazioni su strada, aeroporti e piste, migliorando l'aspettativa di vita e al contempo la riduzione dei livelli di manutenzione.

Le varianti, rispetto alla formula della miscela tradizionale standard, sono molto numerose e possono riguardare diversi aspetti: la composizione chimica dei bitumi, le temperature di miscelazione dei vari componenti, la granulometria degli aggregati, il tipo di filler, la compatibilità del bitume con il polimero (il polimero più utilizzato è SBS). L'ottimizzazione di questi parametri chimici, fisici e strutturali, porta alla realizzazione del "bitume modificato ideale".

Per questi motivi, la ricerca sui bitumi è in continua evoluzione ed oggi si può parlare di **bitumi modificati (Polymer Modified Bitumens, PMB)**, ovvero bitumi tradizionali addizionati con polimeri. I polimeri sono macromolecole costituite da catene di monomeri ripetute per un gran numero di volte. La sequenza e la struttura chimica del monomero determinano le proprietà fisiche del polimero, e vista la grande varietà sul mercato, è possibile il miglioramento mirato di specifiche prestazioni del bitume.

2.1 Le tipologie dei polimeri

Le tante tipologie di polimeri sul mercato possono essere ricondotte a due grandi famiglie:

- ❖ termoindurenti (non utilizzati in ambito stradale)
- ❖ termoplastici: (comportamento simile al bitume poiché si sciolgono e rapprendono a temperature simili)

- fluidificano e diventano reversibilmente malleabili se riscaldati;
- costituiti da catene macromolecolari lineari raramente anche ramificate;
- vengono inglobati nei bitumi ad alta temperatura, con il risultato di una miscela paragonabile ad un liquido viscoso;
- si dividono, a loro volta, in due grandi gruppi: elastomeri e plastomeri.

I polimeri termoplastici elastomerici sono i più utilizzati e migliorano prevalentemente il comportamento duttile ed elastico della miscela finale con conseguente incremento della deformazione a rottura e della resistenza ai carichi ciclici, quindi le deformazioni di traffico vengono recuperate. Le principali tipologie sono:

- SBS (stirene-butadiene-stirene)
- SIS (stirene-isoprene-stirene)
- SB (stirene-butadiene)
- SBR (stirene-butadiene-rubber)

Non tutti i polimeri però sono adatti per un determinato bitume e non tutti i bitumi sono adatti per un determinato polimero. Ciò fa capire come in un processo industriale si possa ottenere un bitume modificato migliore rispetto a una modifica fatta in cantiere. Questo comporta un bitume che non abbia caratteristiche volute in partenza e soprattutto che ci possa essere una separazione bitume-polimero e problemi sia in fase di stoccaggio sia nella fase di trasporto all'interno delle autobotti.

Tramite l'aggiunta di questi elementi si ha un miglioramento sotto molteplici aspetti:

- maggiore rigidezza alle basse temperature
- migliorata la resistenza all'invecchiamento
- migliorata la resistenza alla fatica (deformazione per sollecitazione carichi)
- minore suscettibilità alle variazioni di temperatura
- maggiori capacità elastiche

Tutti questi potenziamenti sono conseguenti all'aggiunta di una bassissima percentuale di polimeri (2 – 10% in peso), distinguendo in base ad essa: bitume modificato soft (<4%), medium (=5%), hard (>5%).

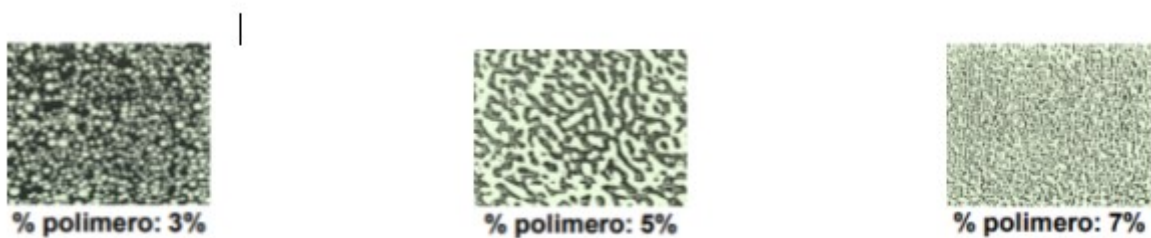


Figura 2.1

Una prova che consente di controllare l'utilizzo di polimeri e nel caso del tipo, elastomerico o plastomerico, è la spettroscopia all'infrarosso. Per realizzarla serve una quantità di bitume molto piccola, basta infatti prelevare 4-5 granuli di conglomerato bituminoso ed estrarre il bitume necessario. La prova produce un grafico e in corrispondenza di particolari lunghezze d'onda, i picchi segnalano i tipi di polimeri.

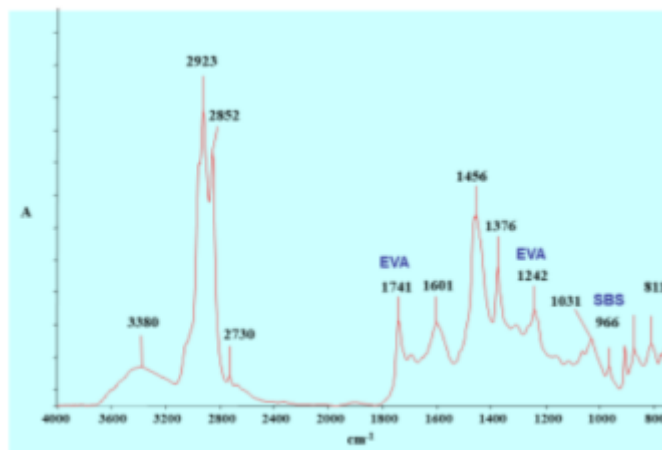


Figura 2.2

Oltre a determinare la presenza, si può fare anche la stima della quantità del polimero presente.

I miglioramenti sono in grado di modificare sostanzialmente il comportamento meccanico del bitume, incrementando notevolmente alcune importanti caratteristiche prestazionali. Difatti, è interessante sottolineare che per il PMB si parla di bitume modificato (e non additivato), in quanto, l'aggiunta del componente polimerico, influenza il comportamento reologico e la suscettività termica del bitume.

Oltre ad allungare la vita utile del manto stradale, la modifica con polimeri ha inoltre consentito la realizzazione di conglomerati bituminosi di tipo "aperto", ossia ad elevato grado di porosità (fino al 18% contro un massimo del 5% consentito da un manto tradizionale), aventi ottime proprietà drenanti e fonoassorbenti. Questo riduce la creazione di film sottili d'acqua ed evita il problema dell'aquaplaning, ovvero lo slittamento dello pneumatico nel caso di manto stradale bagnato, migliorando anche l'impatto del rumore sulle persone.

Da sempre, il bitume viene utilizzato come impermeabilizzante e, con questa aggiunta, le sue capacità idrorepellenti aumentano ulteriormente. Oltre a limitare il problema dell'aquaplaning, con una maggiore impermeabilizzazione, si evitano tutti i dissesti causati dalla penetrazione dell'acqua sotto il manto stradale, causando un indebolimento delle proprietà meccaniche dell'infrastruttura.

Inoltre, l'aggiunta di polimeri permette di prolungare la vita utile delle pavimentazioni di ben oltre 4 anni. Da un punto di vista economico, la produzione di polimeri modificati necessita una spesa maggiore. A parità di spessore del manto stradale, si ha un aumento dei costi intorno al 30%. In virtù dell'allungamento di vita

utile fino a 8 anni, il nuovo bitume consente di risparmiare su eventuali spese di manutenzione e monitoraggio, quindi, nonostante le spese di produzione e messa in opera siano maggiori, nel tempo se ne vedranno i benefici.

Attualmente, sono in corso diverse sperimentazioni che vedono la produzione di PMB con polimeri riciclati ed in particolare con trucioli ricavati da vecchi pneumatici.

Il processo di produzione prevede prima di tutto, di preparare le materie prime anteriormente al processo di miscelazione: il bitume deve essere riscaldato in cisterne di servizio a 170-180°C e i sacchetti di polvere di polimero, devono essere disposti intorno al sistema di dosaggio in base alla ricetta da produrre.

Il bitume deve essere pompato dal serbatoio di servizio esterno fino a T1 o T2 (cisterne di pesatura e miscelazione) grazie alla pompa di riempimento a seconda del peso necessario. Dopo che la quantità minima prestabilita è stata trasferita alle cisterne di pesatura, vengono avviati i sistemi di dosaggio dei polimeri e l'operatore inizia a caricare i sacchetti nelle apposite tramogge. Il peso del bitume è controllato dal sistema di controllo PLC secondo la quantità impostata in ricetta; se la quantità di polimero necessaria non è ancora caricata dall'operatore, il PLC arresta il funzionamento della pompa P1 e attende la conferma del corretto riempimento del polimero. Quando la quantità esatta del polimero è confermata, il PLC completa automaticamente il peso del serbatoio al totale di bitume più polimero. Per una migliore efficacia nella disintegrazione del polimero nel bitume attraverso il mulino, la miscela di polimero e bitume dovrebbe essere pompata fino al mulino senza nessuna attesa. Quando sia il bitume che i polimeri sono caricati nel serbatoio, il PLC inizierà a pompare i 2 componenti tramite P2 (Pompa di alimentazione) e mulino omogeneizzatore alle cisterne di servizio del bitume modificato. È molto importante la qualità del mulino per poter garantire la produzione di un prodotto finale con alte prestazioni: proprio per questo motivo, viene utilizzato un mulino di taglia molto elevata (160 kW) che garantisce la produzione di bitume modificato anche con un solo passaggio nel processo di modifica. Sotto il controllo del PLC, mentre la pompa P2 invia il bitume modificato alla cisterna di deposito, la pompa P1 riempie l'altro serbatoio per il ciclo di produzione successivo. Le suddette fasi di produzione vengono pertanto ripetute in modo completamente automatico fino alla fine del processo di produzione del bitume modificato. Per quanto riguarda la fase di conservazione, il bitume modificato deve essere stoccato in cisterne apposite che permettono di realizzare l'agitazione del PMB. Per evitare l'agglomerazione del polimero, l'agitatore deve essere fatto funzionare circa 5-10 minuti ogni ora.

Per aumentare la stabilità della miscela, il contenuto della cisterna deve essere mantenuto ad una temperatura di 160-180 °C. Il bitume modificato deve essere riscaldato fino alla corretta temperatura idonea per la produzione del conglomerato bituminoso a caldo ed anche durante la produzione di conglomerato, il bitume modificato dovrebbe possibilmente essere mantenuto in agitazione tramite agitatori o almeno tramite ricircolo con la pompa di carico.

Tra i polimeri, quello che attualmente viene maggiormente utilizzato nella modifica dei leganti è il termostimolo polimerico stirene-butadiene-stirene (SBS), aggiunto in percentuali variabili fra il 3 e l'8% in peso, a seconda della base bituminosa e delle prestazioni richieste al prodotto finale. Questo particolare copolimero SBS, si produce industrialmente attraverso la polimerizzazione anionica vivente in solventi cicloalifatici ed è una gomma artificiale appartenente a elastomeri termoplastici. Il bitume SBS o bitume di gomma, si ottiene aggiungendo gomma artificiale. A differenza di APP (una miscela ottenuta con mezzi meccanici), una miscela SBS di alta qualità è una miscela chimica di gomma e molecole di bitume.

Quando l'SBS viene a contatto ad alta temperatura con il bitume, quest'ultimo "rigonfia" il polimero e diffonde al suo interno. Inizialmente le interazioni tra bitume e SBS si manifestano coinvolgendo preferenzialmente la fase flessibile del polimero, sia perché questa ne rappresenta la matrice, sia per il suo maggior volume libero. Il processo di miscelamento coinvolge prevalentemente la fase più flessibile del polimero, con i domini stirenici solo parzialmente rigonfiati e quindi ancora segregati ed in grado di esplicare la loro funzione di nodi di un reticolo tridimensionale. In tal modo il polimero, anche se aggiunto in quantità modeste, riesce a conferire proprietà elastomeriche all'intero sistema. Pertanto, è importante che le modifiche siano prodotte in condizioni di stress termomeccanici non eccessivi, in maniera tale che la parte polimerica conserva "memoria" della sua struttura originale. Una caratteristica unica della modifica del bitume con l'aiuto di SBS è la creazione di una matrice polimerica che rappresenta una griglia tridimensionale formata dall'integrazione di blocchi di polistirene nei cosiddetti domini di polistirene. All'interno di questa maglia elastomerica, il bitume è distribuito nella forma della più piccola dispersione

Lo stoccaggio ed il successivo trasporto vengono effettuati in serbatoi riscaldati privi di agitazione. Ecco allora che in tali condizioni, i PMB sono intrinsecamente vincolati ad una situazione di rischio per quanto riguarda la stabilità della miscela, che risulta sempre essere l'aspetto critico per il loro impiego. In sintesi, se la compatibilità tra fase polimerica e fase bituminosa non è sufficiente, durante lo stoccaggio si può verificare una macroscopica separazione di fase con conseguenze negative dal punto di vista applicativo; viceversa, se le condizioni di miscelazione sono tali da causare una dissoluzione troppo spinta del polimero nella fase bituminosa, l'effetto sulle proprietà meccaniche del bitume modificato può risultare molto modesto. La vera difficoltà del processo di modifica del bitume stradale consiste pertanto nel trovare le condizioni ottimali, in relazione alla natura chimica dei componenti impiegati, al fine di ottenere il miglior compromesso per quanto riguarda le proprietà termiche e meccaniche del bitume modificato e la sua stabilità allo stoccaggio. Il problema è stato affrontato, sia variando le apparecchiature di miscelamento o l'ordine di aggiunta dei componenti, sia mediante l'impiego di agenti compatibilizzanti o di polimeri funzionalizzati in grado di stabilire un legame chimico con alcuni componenti del bitume.

Dal punto di vista morfologico il bitume modificato con elastomeri costituisce un sistema multifase: una fase ricca in polimero contenente una certa percentuale di malteni assorbiti dallo stesso, una fase ricca di asfaltini ed una fase costitutiva principalmente da malteni. Una tecnica che consente di visualizzare facilmente il grado di miscelazione raggiunto fra bitume e polimero e stabilire se è avvenuta o meno l'inversione di fase è

la microscopia in fluorescenza. A basse concentrazioni del modificante (solitamente inferiori al 4%, ma la soglia è variabile) si osserva una fase bituminosa continua nella quale è disperso il polimero: ne risulta un materiale meno fragile alle basse temperature, con caratteristiche della miscela ancora dipendenti dal legante di partenza. Ad elevate concentrazioni di SBS (superiori al 5-7%) si forma una matrice polimerica continua nella quale il bitume funge da agente plastificante; le proprietà di questo sistema dipendono principalmente da quelle del polimero. Se il contenuto in polimero è intermedio, intorno al 4-6%, si possono formare microstrutture nelle quali le due fasi sono continue ed interconnesse; questa dispersione è difficile da controllare perché le proprietà dipendono spesso dalla storia termica. Quando l'SBS è miscelato con la base bituminosa, la fase elastomerica del copolimero assorbe la frazione maltenica (frazione oleosa) e si rigonfia, aumentando il suo volume fino a nove volte, in funzione del tipo di base. Percentuali di polimero medio-alte, intorno al 5-7% in peso, creano una rete tridimensionale polimerica che modifica radicalmente le proprietà del bitume. Il prodotto ottenuto ha un intervallo di elastoplasticità molto più ampio, miglior comportamento ad alte e basse temperature e maggior resistenza alla fatica e all'usura dettato dall'incremento delle proprietà elastiche. Il problema derivante dalla modifica con questo copolimero è che la struttura non è termicamente stabile.

Gli asfalteni e il polimero competono per il potere solvente della fase maltenica e, se la quantità di maltene è insufficiente, si può creare una separazione di fase; questa separazione è un indice della incompatibilità della base bituminosa con la fase polimerica. L'efficacia della modifica e la stabilità durante il trasporto, lo stoccaggio e la messa in opera del prodotto, si basano sull'ottimizzazione di molti parametri:

- composizione e quantità del modificante;
- composizione del bitume;
- profilo termico del processo di miscelamento;
- entità dello sforzo di taglio nella miscelazione e adeguato tempo di contatto;

2.3. Le proprietà fisiche dei bitumi modificati.

Le proprietà fisiche dei bitumi modificati elastomerici sono:

- per un bitume ideale la consistenza rimane costante all'interno dell'intervallo della temperatura di esercizio e decresce improvvisamente nel campo delle temperature di posa in opera
- per un bitume reale convenzionale la consistenza tende ad avere un andamento lineare al variare della temperatura, questo comporta di norma proprietà inadeguate alle temperature di servizio;
- per un bitume modificato con SBS il comportamento si approssima a quello del bitume ideale proprio all'interno dell'intervallo della temperatura di esercizio.

Possiamo poi analizzare la differenza tra le proprietà fisiche di un bitume naturale con uno modificato con polimeri SBS. Del bitume si sfrutta la termo-dipendenza, ovvero, la possibilità di portarlo a uno stato liquido

con un riscaldamento a temperature intorno ai 150-180°C in modo da poterlo impastare con gli aggregati e poi avere un prodotto rigido alle temperature di esercizio.

In realtà, la consistenza del bitume varia all'aumentare della temperatura, quindi se riscaldo perde di consistenza, al contrario se raffreddo ho una maggiore consistenza.

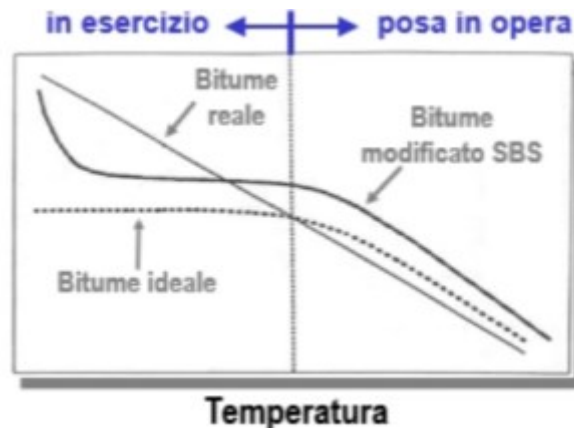


Figura 2.3

- per un bitume ideale la consistenza rimane costante all'interno dell'intervallo della temperatura di esercizio e decresce improvvisamente nel campo delle temperature di posa in opera;
- per un bitume reale convenzionale la consistenza tende ad avere un andamento lineare al variare della temperatura, questo comporta di norma proprietà inadeguate alle temperature di servizio;
- per un bitume modificato con SBS il comportamento si approssima a quello del bitume ideale proprio all'interno dell'intervallo della temperatura di esercizio.

Gli effetti che il bitume comporta all'interno del conglomerato bituminoso sono:

- maggiore adesione, ovvero il contatto tra superficie di aggregato e bitume, quindi aderisce in maniera più forte alla superficie degli aggregati;
- maggiore coesione, si intende il contatto bitume-bitume cioè, in un'ipotetica sollecitazione che tende a strappare il bitume, le molecole hanno una maggiore resistenza nel caso di bitume modificato rispetto a quello normale;
- maggiore elasticità e minori deformazioni permanenti;
- maggiore flessibilità, miglioramento del comportamento a fatica dato dalle sollecitazioni cicliche;
- maggiore resistenza alle fessurazioni termiche, cioè date dalle differenze di temperature tra il giorno e la notte.

3. Riciclaggio del conglomerato bituminoso e l'invecchiamento del bitume

3.1 Introduzione al riciclaggio

Nel corso degli ultimi cinquant'anni abbiamo assistito a un notevole sviluppo in tutti i campi delle infrastrutture, con particolare attenzione in quelle stradali.

Si continua a preferire l'uso delle strade, anziché delle rotaie, per questioni di rapidità e flessibilità. E si è verificato un incremento del volume delle merci, con un aumento della quantità degli automezzi necessari al loro trasporto. Questi fattori, insieme, provocano l'inizio del degrado della pavimentazione. Infatti, molte strade raggiungono il limite della loro vita utile, a causa del deterioramento e dell'usura, e necessitano di interventi di manutenzione con lo scopo di mantenere livelli ottimali di servizio.

Di fronte a un budget non sufficiente per la costruzione di nuove strade e la manutenzione di quelle vecchie, gli enti gestori optano sempre più spesso per manutenzioni a basso costo che costituiscono una soluzione temporanea a problemi che si aggravano nel tempo.

Il risparmio diventa quindi una tematica di molta importanza quando si parla di costruzione stradale, e tra le varie soluzioni economiche vi è l'utilizzo di materiali di riciclo. Il migliore da impiegare nella produzione di nuovo conglomerato bituminoso è il *fresato d'asfalto*.

La **UNI EN 13108-8** con il termine **fresato d'asfalto** intende il "*conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura degli strati di rivestimento stradale, che può essere riutilizzato come materiale costituente per miscele bituminose prodotte in impianto a caldo*".

Le principali motivazioni che spingono verso l'impiego di tale materiale sono numerose:

- riduzione della quantità di aggregati vergini da utilizzare.
- riduzione della quantità di bitume da aggiungere e quindi risparmio in termini economici.
- riduzione della quantità di rifiuti prodotti, in quanto se non destinato al riutilizzo, il fresato viene smaltito in discarica.
- riduzione di energia consumata per il trasporto e lo smaltimento dello stesso.

3.2 Il fresato

Con il termine Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), o più comunemente fresato, si indica il materiale recuperato e riciclato dalla rimozione di conglomerati bituminosi. In termini pratici, il RAP è una miscela di

aggregati con curva granulometrica propria caratterizzata da una elevata percentuale di fini e contenente bitume invecchiato.

Questo particolare materiale di riciclo si ottiene per fresatura a caldo o a freddo utilizzando una fresa autocarrata, o per demolizione degli strati bituminosi con opportuni macchinari (escavatore, ripper, scraper, ecc.) che producono blocchi a lastre irregolari, frantumate eventualmente in seguito.

Una volta effettuata la demolizione, per il fresato ottenuto, vi sono due possibilità:

- il trasporto in centrale dove verrà trattato con processi di schiacciatura, vagliatura, raccolta e stoccaggio;
- la polverizzazione in sito e la successiva incorporazione negli strati granulari, fondazione o strati di base ad opera di mezzi semoventi.

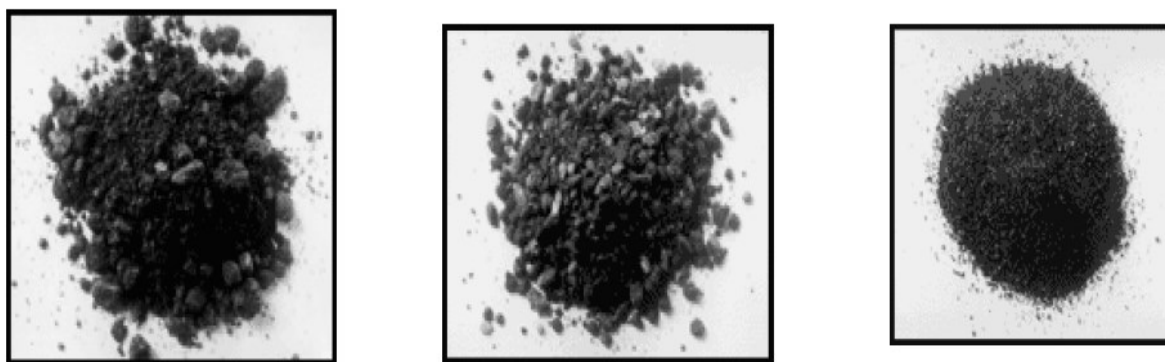


Figura 3.1 -Conglomerato bituminoso di recupero “fresato”

Prima del riutilizzo del RAP è necessario il riconoscimento di requisiti qualitativi, da valutare in laboratorio sulla base dei seguenti aspetti:

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

La presenza del legante è importante in quanto assicura la rigenerazione delle caratteristiche perse con l’invecchiamento e con l’ossidazione che comportano un’eccessiva rigidità alla pavimentazione.

Sugli aggregati, generalmente di origine calcarea o silicea, si verifica la compatibilità col legante, l’opportuna lavorabilità dell’impasto e l’idonea presa finale.

Le proprietà meccaniche e le caratteristiche prestazionali del RAP dipenderanno quindi anche dallo strato della pavimentazione in cui si preleva; infatti, ogni strato si distingue per la sua funzione (base, usura, binder, ecc.) e i suoi diversi requisiti. Ad esempio, allo strato di usura si conferisce un’aderenza accettabile gli aggregati devono essere altamente resistenti all’abrasione, qualità non richieste nel binder che agisce solo da collegamento.

3.3 Tecniche di riciclaggio.

Le tecniche di riciclaggio possono essere distinte in due categorie diverse:

- riciclaggio in impianto fisso;
- riciclaggio in sito.

Nel **riciclaggio in impianto fisso** il fresato deve essere trasportato dal luogo di recupero del materiale all'impianto stesso. I vantaggi di questo tipo di riciclaggio sono:

- alta qualità tecnica del processo di riciclaggio. La frantumazione, la setacciatura e la miscelazione risultano essere migliori;
- possibilità di effettuare analisi di laboratorio e controlli di qualità sul materiale fresato con un alto grado di affidabilità;
- omogeneità del prodotto finale che può essere stoccato temporaneamente;
- maggior flessibilità nella produzione di diverse miscele e dal punto di vista operativo.

Ma le problematiche legate all'uso di un impianto fisso sono:

- maggiori costi di trasporto;
- elevati costi di stoccaggio e gestione del materiale in cantiere;
- in impianto, non è possibile creare miscele con percentuali di fresato superiori al 50- 60%.

Nel **riciclaggio in sito**, invece, i costi di trasporto e gestione del materiale fresato sono ridotti al minimo, e si può arrivare a un riciclo del RAP pari al 100%. Tali caratteristiche lo rendono uno degli interventi più effettuati.

Entrambe le categorie di riciclaggio possono essere suddivise a loro volta in due sottocategorie in relazione agli scambi energetici presenti durante il confezionamento del nuovo conglomerato:

- riciclaggio a caldo;
- riciclaggio a freddo.

La sperimentazione condotta in questa sede coinvolge solo i conglomerati bituminosi recuperati con la tecnica del riciclaggio a caldo.

3.3.1. Riciclaggio a caldo in impianto

Per riciclaggio a caldo si intendono tutte quelle tecniche che consentono il confezionamento di una miscela di conglomerato bituminoso tramite l'utilizzo di aggregati lapidei di primo impiego preventivamente riscaldati e portati a una temperatura di oltre 150° C. Il risultato è una miscela con ottime prestazioni meccaniche anche aggiungendo percentuali elevate di fresato, adatta praticamente a qualsiasi utilizzo, dallo strato di base a quello di usura.

Esistono due tipologie di impianto che eseguono il riciclaggio a caldo, **discontinuo** oppure **continuo**.

Nel primo caso ogni 40/50 secondi viene realizzato un impasto completo di tutti i costituenti, pesati e dosati separatamente, mentre nel secondo caso non c'è un'interruzione d'esercizio e quindi non ci sono impasti che scandiscono il ritmo della produzione.

3.3.1.1 Impianto discontinuo.

L'impianto discontinuo è certamente il più diffuso in Europa, consente una miglior qualità del prodotto finito e una maggior flessibilità di utilizzo. La presenza del filtro garantisce un controllo superiore dell'emissione dei fumi.

Di contro, a causa delle sue diverse componenti (torre di miscelazione, vaglio vibrante, ecc.) è un impianto molto costoso.

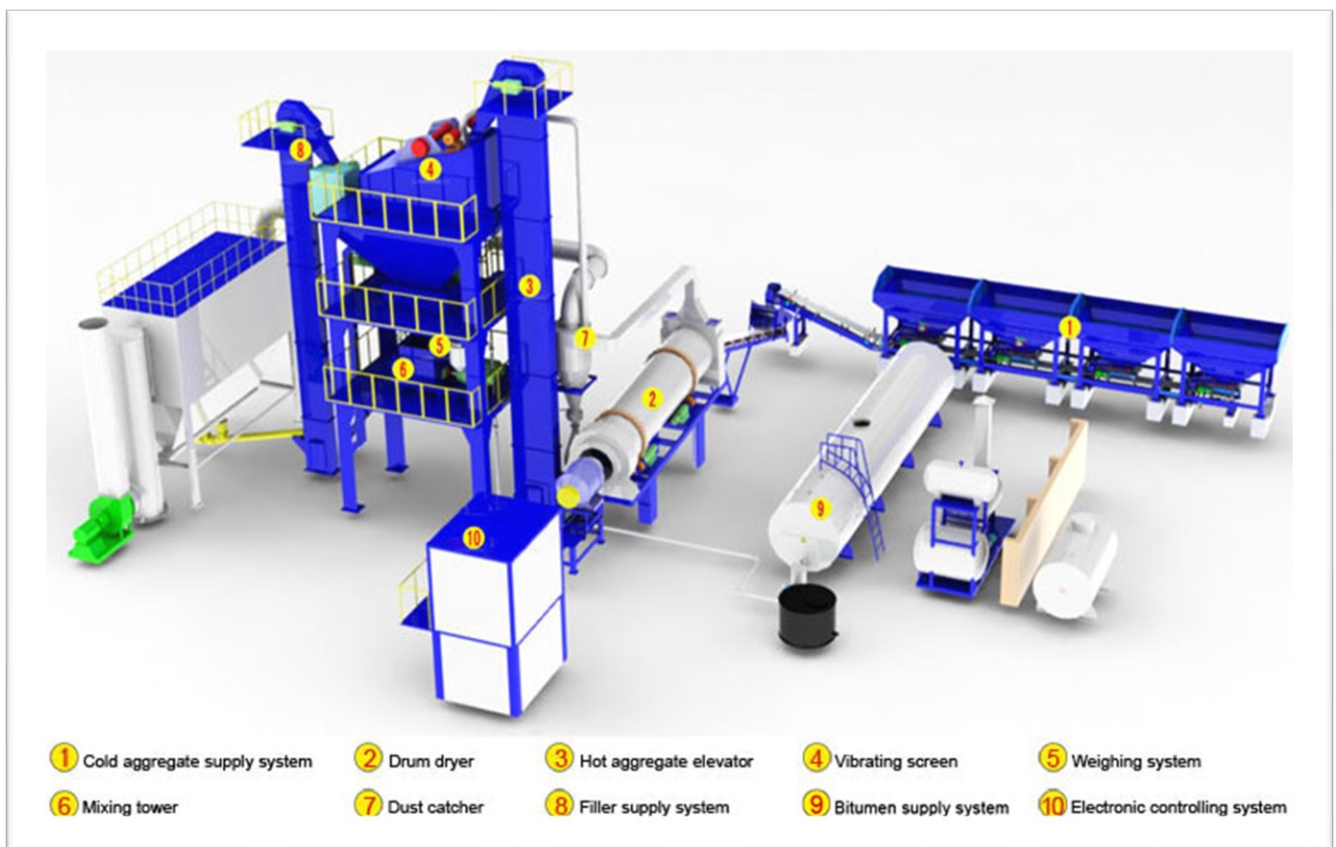


Figura. 1.2 – Impianto di tipo discontinuo

Il fresato si introduce nella miscela sia a caldo che a freddo. Nel caso del riciclaggio a caldo con tale tipologia di impianto, si deve evitare il passaggio del fresato contenente bitume attraverso la fiamma del bruciatore all'interno del cilindro essiccatore. Il contatto potrebbe provocare il rilascio di sostanze nocive dal bitume del fresato nell'atmosfera.

3.1.1.2 Impianto continuo tipo Drum mixer.

A differenza dello schema precedente, non c'è torre di miscelazione né vaglio vibrante perciò i costi risultano ridotti e con una produttività maggiore rispetto all'impianto discontinuo.

Le caratteristiche negative di tale tipologia di impianto sono la produzione di un conglomerato di minor qualità perché si effettuano minori controlli, e la miscelazione del bitume in zone ad alta temperatura che provoca la formazione di composti difficilmente filtrabili.

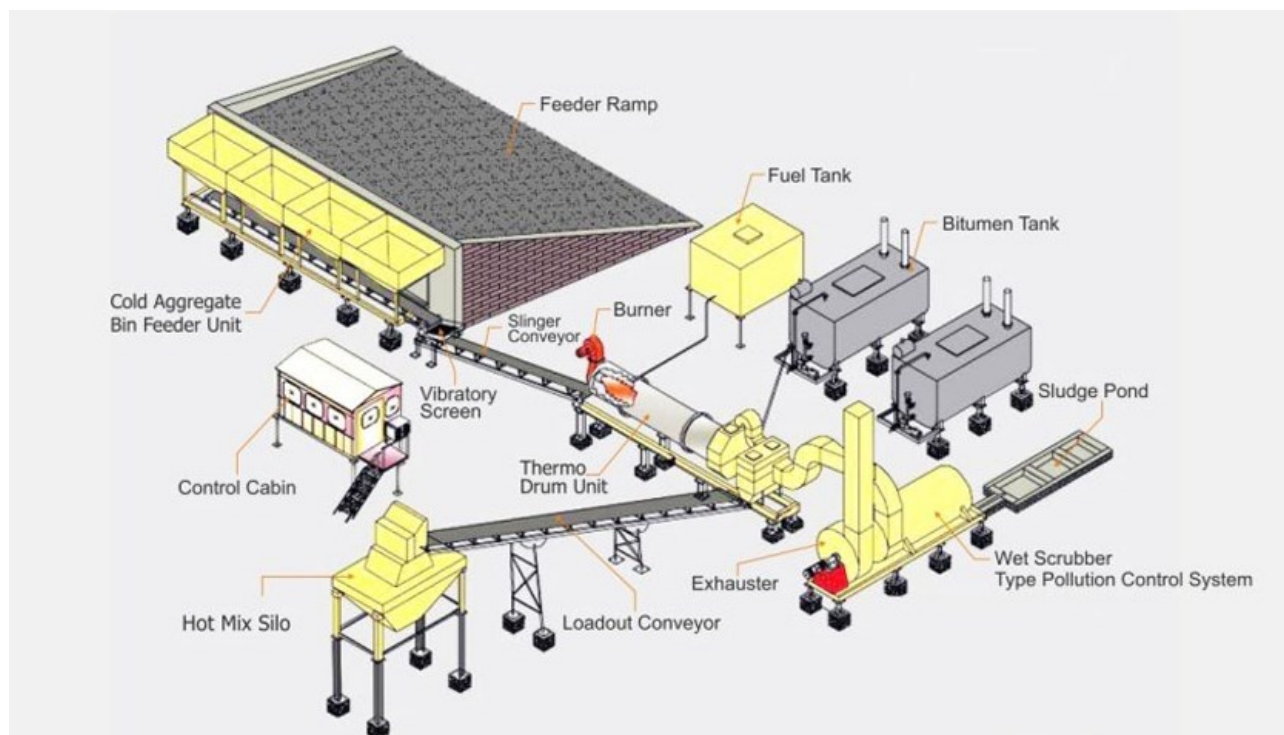


Figura 3.3 – Impianto di tipo continuo “Drum-mixer”

L'impianto di tipo continuo è molto utilizzato nella produzione di conglomerati con notevoli percentuali di materiali di recupero (fino al 70%). In quel caso bisogna impedire che il bitume nuovo ed il bitume residuo entrino a contatto con la fiamma del bruciatore, evitando rischi di ossidazione del legante.

3.3.2 Riciclaggio a caldo in sito.

Si usa uno speciale treno di attrezzature in grado di eseguire le seguenti operazioni:

- scarifica la vecchia pavimentazioni fino alla profondità desiderata;
- riscalda il materiale recuperato all'interno del tamburo essiccatore;
- aggiunta di materiali nuovi (bitume ed aggregati);
- miscelazione e posa in opera del conglomerato riciclato.

Il riciclaggio in sito si effettua solo sugli strati superficiali, con una profondità massima pari a 5 o 6 cm. Non è un intervento da utilizzare su pavimentazioni con danni strutturali situati negli strati più profondi.

Generalmente si sceglie per le fessurazioni superficiali, per ripristinare la rugosità, quindi l'aderenza, migliorando la sicurezza stradale.

3.3.3. Riciclaggio a freddo.

Il riciclaggio a freddo prevede la realizzazione di una miscela in cui il RAP non ha subito fenomeni di riscaldamento. Per ottenere questo, il conglomerato viene demolito con una fresa, che non altera la temperatura, e stoccato (fig. 3.4).



Figura 3.4 - Fresatura a freddo

Il non riscaldamento del materiale ha il vantaggio, inoltre, di avere minor costo economico ed energetico. Le miscele nel riciclaggio a freddo sono composte da:

- Materiale di recupero derivante da una pavimentazione
- Legante bituminoso, che può essere emulsione bituminosa o schiuma di bitume
- Filler
- Acqua di aggiunta, per scopi esecutivi
- Aggregati vergini per modificare la curva granulometrica degli inerti provenienti dal RAP.

Il riciclaggio a freddo può essere scelto per diversi scopi e con metodologie diverse:

- Depolverizzazione: Viene realizzato un tappeto superficiale (10-15cm) tramite il riciclo della ghiaia presente nella pavimentazione non “asfaltata”. Tramite l’aggiunta di emulsione bituminosa o bitume schiumato la ghiaia si fissa alla pavimentazione. L’intervento è volto ad aumentare l’aderenza, l’impermeabilizzazione e a depolverare.



Figura 3.5 – Depolverizzazione

- *Riciclaggio superficiale:* È volto a migliorare il piano viabile eliminando i punti di discontinuità, si mantiene la fondazione originaria purché soddisfi la portanza richiesta, l'intervento coinvolge uno spessore di 8-15 cm.
- *Riciclaggio in profondità:* L'intervento è più invasivo dei precedenti, prevede la demolizione e la ricostruzione di uno strato di spessore maggiore di 15 cm. Sarà previsto un manto superficiale in conglomerato bituminoso o slurry seal per strade non molto trafficate.

3.3.3.1. In impianto e in situ.

Esistono due tipologie di macchinari per il riciclaggio a freddo, la prima tipologia può essere installata in modo fisso la seconda è di tipo semovente, ossia posizionata all'interno del cantiere, così da permettere una riduzione dei costi di trasporto. In questa tipologia di impianto, quello di tipo semovente, è possibile effettuare un preciso dosaggio delle varie componenti, e ha una produttività di 100-150 tonn/ora.

L'impianto può essere: discontinuo o continuo. Nel primo caso inerti e legante vengono pesati e al raggiungimento di un determinato quantitativo vengono inviati al ciclo produttivo. Nel secondo caso i materiali vengono immessi in continuo, il processo sarà più veloce ma con dosaggio meno preciso (fig.3.6).

L'impianto fisso è composto da:

- Un sistema di frantumazione
- Pre-dosatori per il fresato e per gli aggregati
- Un silos per il cemento
- Un contenitore di stoccaggio dell'emulsione bituminosa
- Un serbatoio per l'acqua
- Un mescolatore di tipo continuo
- Rampe di spruzzatura per l'acqua
- Rampa per l'emulsione bituminosa
- Strumenti di pesatura, per garantire un costante controllo del processo
- Un nastro di carico del prodotto finito sull'autocarro



Figura 3.6 - Produzione di conglomerato a freddo

All'ingresso all'impianto il materiale fresato viene rifrantumato e selezionato, si sceglierà il mix di RAP e nuovo aggregato in funzione della curva granulometrica. Il mescolatore sarà preposto ad accogliere, tramite un nastro, il materiale e far avvenire la miscelazione. Durante la miscelazione viene aggiunto il legante (emulsione o bitume schiumato), acqua, filler e additivi che possono essere calcarei o silicei. Finita la miscelazione il CB viene prelevato e portato in cantiere.

Le modalità di riciclaggio a freddo più utilizzate sono:

- Con bitume schiumato e cemento
- Con emulsione bituminosa e cemento

Treno di riciclaggio.

Il treno di riciclaggio è composto da macchine semoventi, disposte l'una dietro l'altra e la loro composizione dipende dal tipo di intervento. È presente una fresatrice, un mescolatore, una cisterna per emulsione, una livellatrice e un rullo vibrante; questa configurazione generalmente è usata per l'utilizzo di emulsione bituminosa. La presenza di una cisterna di acqua è necessaria in caso di uso di bitume schiumato, cemento o calce. Il macchinario posto in testa è la fresa, tale strumento permette la demolizione della pavimentazione. Il materiale risultante dalla fresatura è posto in cumuli lungo la strada e raccolto dalla macchina mescolatrice che segue.

Successivamente, sarà mescolato con emulsione o schiuma di bitume, acqua e additivi; questo composto sarà steso e compattato opportunamente.

Il treno di riciclaggio può essere anche configurato come segue:

- Spandi-cemento
- Autocisterna contenente acqua
- Autocisterna contenente emulsione bituminosa o bitume caldo
- Riciclatrice
- Rullo compattatore
- Livellatrice

- Rullo gommato



Figura 3.7 - Treno di riciclaggio a freddo

Il treno di riciclaggio può essere diverso a seconda del tipo di impiego e dal tipo di stabilizzante impiegato. Generalmente la riciclatrice è posta come locomotiva, traina tutte le macchine ad essa collegata.

In questo capitolo viene illustrato quali siano le prescrizioni dell'ente ANAS riguardo le varie componenti della miscela di conglomerato bituminoso riciclato a freddo.

3.4. L'invecchiamento del bitume.

Il termine invecchiamento o *aging* identifica il processo di deterioramento del bitume causato da processi di ossidazione e dalla perdita dei componenti volatili. Tale degrado avviene nel tempo e provoca cambiamenti delle proprietà chimiche, fisiche, colloidali e reologiche del bitume, incidendo sulla vita utile della pavimentazione stradale; infatti, tale fenomeno rende il legante più fragile e quindi il conglomerato più soggetto alla fessurazione.

I problemi di durabilità e di deterioramento sono quindi legati alla suscettibilità del bitume all'invecchiamento sia reversibile che irreversibile.

L'**invecchiamento reversibile** è di natura fisica e dipende dal cambiamento della struttura durante la fase di raffreddamento, dalla perdita di sostanze volatili, dall'assorbimento selettivo da parte degli aggregati lapidei e dall'azione dell'acqua. Tale variazione della struttura del bitume causa una modifica delle caratteristiche meccaniche e comporta una perdita di adesività e un incremento di rigidità assumendo un comportamento fragile.

L'**invecchiamento irreversibile** è, invece, di natura chimica e causa il deterioramento del bitume, provocato da alterazioni di natura chimica della composizione del bitume stesso. I cambiamenti chimici sono dovuti dall'ossidazione, indotta dalla temperatura e dalla luce che fungono da catalizzatori delle reazioni.

L'invecchiamento del bitume è di due tipi ed avviene in istanti diversi:

- Invecchiamento primario o a breve termine: nella fase di produzione e messa in opera dei conglomerati bituminosi.
- Invecchiamento secondario o di lungo termine: durante l'esercizio della pavimentazione.

3.4.1. Effetti dell'invecchiamento sulla chimica del bitume

Il bitume subisce una modifica nel quantitativo di frazioni che lo compongono dopo l'invecchiamento. La causa è una diminuzione del contenuto di aromatici e di conseguenza un aumento del contenuto di resine e di asfaltini. La **figura 3.8** mostra come variano le percentuali SARA dopo l'invecchiamento a breve termine simulato tramite uno (85') o quattro (340') *Rolling Thin Film Oven Test* (RTOTF) per 4 diversi bitumi provenienti da luoghi distinti.

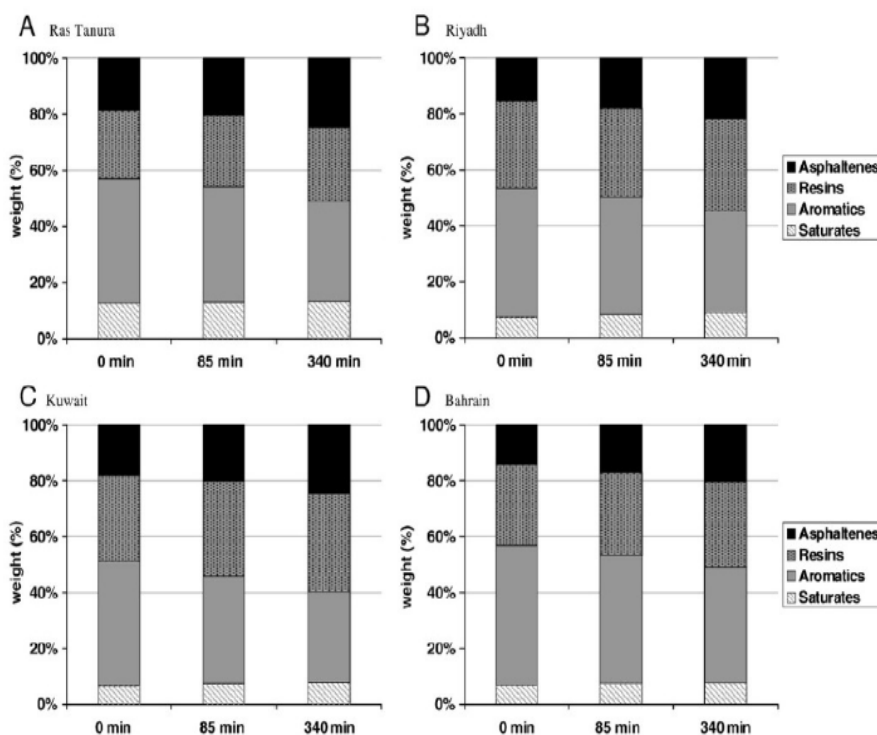


Figura 3.8 – Variazione delle frazioni SARA pre e post RTFOT

3.4.2. Effetti dell'invecchiamento sulla reologia del bitume.

L'invecchiamento del legante ha effetti anche sul comportamento reologico del bitume; di conseguenza tutti gli indici reologici sono utilizzati per studiare il problema dell'aging. Un parametro molto diffuso è dato dall'indice di invecchiamento (aging index) che si basa sulla variazione della viscosità.

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

Tale parametro mette in relazione la viscosità del bitume estratto rispetto alla viscosità del bitume originale.

In **figura 3.9** si osserva come l'effetto principale si esaurisca durante la fase primaria, in seguito all'accelerazione dei fenomeni di ossidazione conseguenti alle elevate temperature richieste ai fini della miscelazione di bitume ed aggregati lapidei in impianto.

È possibile definire gli effetti dell'invecchiamento sulla base di variazioni che avvengono nella composizione chimica. Basti pensare che il solo invecchiamento a breve termine fa sì che la viscosità raddoppi e la percentuale di asfalteni incrementi dall' 1% al 4% in peso.

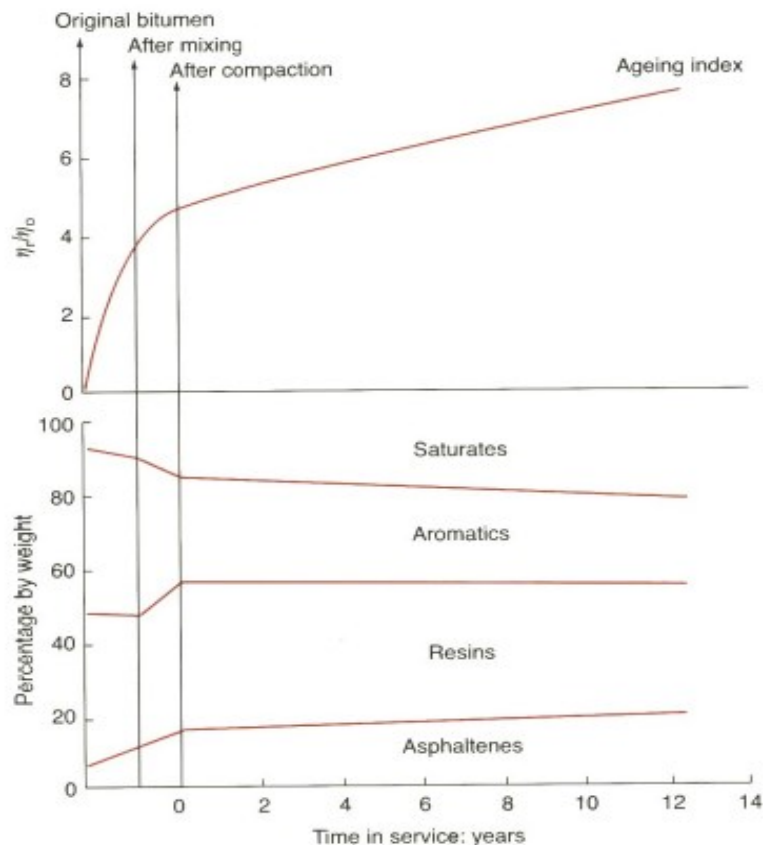


Figura 3.9 – Variazione delle frazioni SARA e dell’Aging Index

3.5 L’effetto degli additivi.

Se fino a pochi anni fa si aggiungevano basse percentuali di RAP al nuovo conglomerato, oggi tali valori sono aumentati assieme alla necessità di impiegare i cosiddetti *additivi rigeneranti*. Questi sono essenziali quando si parla di riciclaggio perché riattivano il legante contenuto all’interno del fresato e a garantiscono il target richiesto al conglomerato bituminoso recuperato in termini di Performance Grade (PG).

Gli additivi rigeneranti hanno lo scopo di ripristinare le proprietà chimico-fisiche del bitume invecchiato contenuto nei conglomerati bituminosi di recupero, apportando le frazioni volatili che durante la vita utile della pavimentazione sono state perse a causa dell'invecchiamento provocato dagli agenti atmosferici e modificando la consistenza fino a raggiungere un livello adeguato di lavorabilità.

Vengono eseguite prove di laboratorio impiegando più additivi per valutare la miglior compatibilità tra l'additivo e quel bitume specifico che deve essere trattato; inoltre sarebbe buona norma, se possibile, testare ogni additivo in diverse percentuali al fine di individuare il dosaggio ottimale.

Gli additivi utilizzati devono risultare non pericolosi stabili su una vasta gamma di temperature, dalla produzione all'applicazione, esenti da fenomeni di essudazione o evaporazione, al fine di garantire un buon servizio nell'arco della vita utile della pavimentazione stradale.

4. Reologia del bitume.

La reologia è la scienza che studia l'origine, la natura e le caratteristiche di deformazione dei corpi sottoposti a sollecitazioni esterne.

Sull'ambito delle infrastrutture stradali, la reologia si occupa specificamente del bitume. Esso viene rappresentato mediante il modello viscoelastico ed è perciò caratterizzato da un comportamento intermedio tra quello di un fluido viscoso e di un solido elastico. L'interazione tra queste due fasi provoca una dissipazione di energia interna, e quindi una deviazione della risposta tenso-deformativa rispetto ad uno stato puramente elastico.

In conclusione, il bitume utilizzato per le pavimentazioni stradali è caratterizzato da proprietà meccaniche che dipendono sia dalla temperatura che dal carico applicato (entità, modalità di applicazione del carico e tempo di permanenza del carico), perciò è importante studiarle in condizioni che rappresentino le situazioni di impiego e di servizio in termini tensionali e termici.

4.1 Le grandezze reologiche.

Le problematiche connesse all'esecuzione delle prove reologiche sui bitumi costituiscono materia affrontata dalla reometria. Questa, può essere definita come la branca della reologia che si occupa della misura delle grandezze reologiche.

Per una buona valutazione prestazionale di un legante, risulta essere di notevole importanza lo studio e la comprensione di tali grandezze; ad esempio, un legante che sotto l'applicazione di un carico manifesta elevate deformazioni potrebbe generare nel conglomerato fenomeni di ormaiamento, al contrario un bitume molto

rigido potrebbe conferire alla pavimentazione maggiore sensibilità alla fessurazione per fatica e per gradienti termici.

I parametri che descrivono la reologia del bitume sono: l'angolo di fase δ e la norma del modulo complesso $|G^*|$ determinati utilizzando apparecchiature che operano in **regime oscillatorio**, tra cui il *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), le quali permettono di studiare le proprietà elastiche, viscoso e viscoelastiche del bitume in una vasta gamma di temperature e frequenze di carico. In questa tipologia di prove la *forzante* non si mantiene costante nel tempo, ma varia secondo una legge predefinita e usualmente di tipo sinusoidale. Per forzante si intende, in generale, la sollecitazione, la deformazione o il gradiente di deformazione che viene imposto durante la prova e che rappresenta pertanto la variabile indipendente.

4.2 Prove in regime oscillatore

Le sollecitazioni sinusoidali cercano di riprodurre l'effetto generato sulla pavimentazione e quindi sul legante dal passaggio di un veicolo e la frequenza utilizzata nella prova è funzione della velocità con cui tale mezzo transita sulla pavimentazione. Facendo riferimento, ad esempio, alla sollecitazione nel dominio delle piccole ampiezze, questa può essere descritta secondo la seguente formula:

$$\tau_0 \cdot \sin(\omega t) \quad [4.1]$$

con:

- τ_0 ampiezza di oscillazione della tensione
- ω frequenza di oscillazione

La corrispondente deformazione misurata sarà:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cdot \sin(\omega t - \delta) \quad [4.2]$$

con:

- γ_0 ampiezza della deformazione
- δ angolo di fase

La natura viscoelastica del bitume fa sì che la deformazione oscilli con la stessa frequenza della sollecitazione, ma che sia in ritardo rispetto a questa. L'entità del ritardo è rappresentata dall'angolo di fase δ ; esso può assumere valori compresi nell'intervallo tra 0° e 90° e misura il rapporto tra le componenti reversibili e viscoso: al valore 0° corrisponde una condizione di perfetta elasticità con sollecitazione e deformazione perfettamente in fase, mentre per $\delta=90^\circ$ il materiale si comporta come un fluido viscoso ideale e lo sfasamento è il massimo possibile.

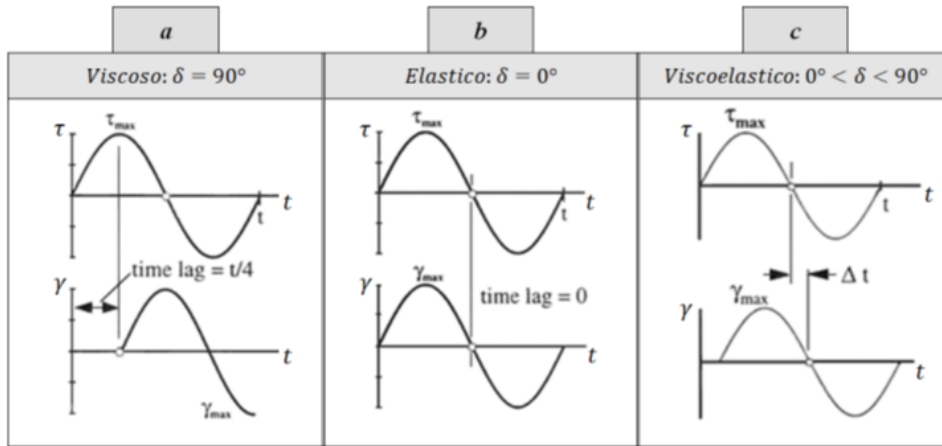


Figura 4.1 – Sfasamento delle curve in funzione dell'angolo di fase

Si definisce modulo complesso G^* , come per qualunque modulo di rigidezza, il rapporto tra la sollecitazione applicata τ^* e la deformazione misurata γ^* scritte nella formulazione complessa (ogni grandezza con “*” è un numero complesso):

$$G^* = G_0 e^{i\delta}$$

Difatti il modulo complesso G^* è un vettore la cui intensità è pari a G_0 e la direzione è individuata dal versore unitario $e^{i\delta}$, in cui compare l'angolo di fase δ .

Dal momento che è scomodo lavorare con i vettori, d'ora in poi si farà riferimento alla norma del modulo complesso $|G^*|$ che è appunto un numero complesso. Esso è funzione della frequenza, oltre che ovviamente della temperatura e della natura del materiale, di modulo pari al rapporto tra la massima ampiezza della tensione applicata e la massima ampiezza della deformazione risultante e ruotato rispetto all'asse reale dell'angolo di fase δ .

In definitiva, il parametro Modulo Complesso può essere rappresentato come segue:

$$G^* = G_0 e^{i\delta} = G_0 (\cos\delta + i\sin\delta) = G' + iG'' \quad [4.3]$$

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} = G_0 \quad [4.4]$$

$$G' = G_0 \cos(\delta) \quad [4.5]$$

$$G'' = G_0 \sin(\delta) \quad [4.6]$$

$$\delta = \arctg \frac{G''}{G'} \quad [4.7]$$

con:

- G' (o G_1) rappresentazione della parte reale del modulo complesso, prende il nome di modulo di restituzione elastica o di immagazzinamento (*storage modulus*) in quanto definisce l'energia immagazzinata dal materiale;
- G'' (o G_2) rappresentazione della parte immaginaria del modulo complesso, è definito modulo di dissipazione (*loss modulus*) in quanto indica l'energia dissipata dal materiale per l'accumulo di deformazioni permanenti di natura viscosa.

Alla luce di quanto appena esposto, si comprende che il modulo di restituzione elastica G' è in fase con la forzante applicata, mentre G'' rappresenta la componente in opposizione di fase. La loro rappresentazione grafica nel piano complesso è la seguente:

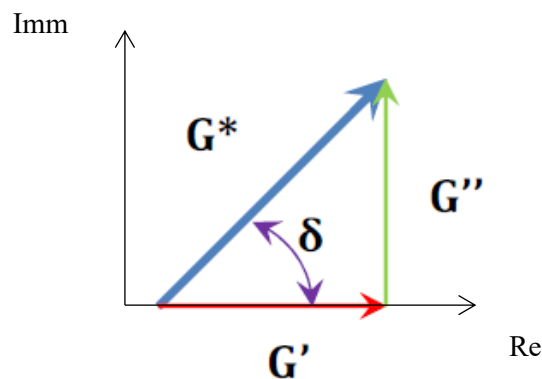


Figura 4.2 - Modulo complesso ed angolo di fase

Valgono le medesime considerazioni se si opera in controllo di deformazione (controlled strain).

4.3. Limite di viscoelasticità lineare

In accordo con la normativa EN 14770:2012 il primo passo da effettuare quando si vogliono eseguire indagini reologiche finalizzate alla ricerca del modulo complesso e del relativo angolo di fase di un materiale, è quello di stabilire il **limite di viscoelasticità lineare** dello stesso alle diverse temperature di prova.

I parametri G^* e δ sono fondamentali nell'analisi prestazionale di un bitume, ma come è noto essi dipendono:

- dalla temperatura;
- dall'entità e dalla frequenza della deformazione applicata.

Tali parametri si possono in genere svincolare dallo stato tenso-deformativo applicato, verificando che la massima deformazione applicata al provino sia inferiore ad una deformazione limite, detta **limite di linearità**, oltre la quale la risposta del materiale non è più lineare pur conservandosi visco-elastica.

La prova impiegata per determinare il limite di visco-elasticità lineare del bitume è una prova in oscillatorio preferibilmente condotta in controllo di deformazione a taglio denominata **Strain Sweep**, letteralmente “Spazzata di deformazioni”.

Strain sweep

In tale prova si impone una deformazione sinusoidale del tipo $\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t)$ con frequenza ω pari a 10 rad/s e temperatura T fissate; si fa crescere progressivamente l'ampiezza della deformazione γ_{0i} e si misura la corrispondente τ_{0i} e dal rapporto dei due si ricava il modulo del modulo complesso $|G^*|$. Si osserva che per i primi valori di γ_{0i} sufficientemente piccoli, $|G^*|$ si mantiene pressoché costante rientrando ancora ampiamente nel campo della linearità, poi oltre un certo valore di γ_{0i} , $|G^*|$ inizia a diminuire.

Per convenzione si fa corrispondere il limite di linearità γ_{0L} a quel valore di deformazione per cui $|G^*|$ si è ridotto di oltre il 5% rispetto al valore immediatamente precedente.

Si ripete la prova di Strain Sweep per diverse temperature e in generale il valore critico γ_{0L} tende a ridursi all'aumentare della temperatura.

Se le massime deformazioni subite dalla pavimentazione in opera durante la propria vita ad una determinata frequenza e temperatura di applicazione sono inferiori al limite di linearità, calcolato alla stessa frequenza e temperatura, allora il Modulo Complesso è costante per tutte le deformazioni subite dalla pavimentazione, alla temperatura e frequenza in esame, e quindi si svincola il G^* dalla deformazione.

4.4. Rappresentazione dei dati delle prove in regime oscillatorio lineare

Le proprietà viscoelastiche sono altamente dipendenti dalla temperatura e dal tempo. Diversi studi dimostrano che i moduli G' e G'' registrati a temperature diverse possono essere riuniti insieme in un'unica curva, detta **Master Curve** (o Curva Maestra), per mezzo del principio di equivalenza tempo-temperatura, noto anche come **principio di sovrapposizione tempo-temperatura (TTSP)**.

4.4.1 Principio di sovrapposizione tempo-temperatura (TTSP)

Il principio implica che la stessa variazione di una grandezza meccanica, quale il modulo complesso G^* , ottenuta variando la temperatura a frequenza fissata può essere ricavata variando la frequenza e tenendo fissa la temperatura (**figura 3.3**)

I materiali il cui comportamento segue il principio di TTS si dicono termoreologicamente semplici. Il principio di sovrapposizione tempo-temperatura prevede quindi che una variazione di temperatura cambi tutti i tempi di rilassamento di uno stesso fattore detto **shift factor**. Se cioè $\tau_1(T_0)$, $\tau_2(T_0)$, $\tau_3(T_0)$, sono i tempi di rilassamento ad una temperatura di riferimento T_0 allora l'effetto di variare la temperatura ad un valore differente T sarà

quello di cambiare questi tempi in: $\tau_1(\alpha_T)$, $\tau_2(\alpha_T)$, $\tau_3(\alpha_T)$ dove α è lo shift factor, funzione di T e vale 1 per $T=T_0$ quindi:

$$\tau_1(T) = \alpha_T \cdot \tau_1(T_0) \quad [4.8]$$

La legge di variazione dei fattori di traslazione α_T con la temperatura viene descritta dall'equazione empirica di **Williams – Landel – Ferry** valida per $T > T_g$ (condizione normalmente verificata essendo le temperature d'esercizio maggiori di quella di transizione vetrosa):

$$\log(\alpha_T) = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad [4.9]$$

con:

- C_1 e C_2 costanti dipendenti dal materiale e dalla T_{ref} (o T_0); normalmente in laboratorio si prendono i valori che fanno fittare bene il modello ai risultati reali;
- $T_0=20^\circ\text{C}$ temperatura di riferimento.

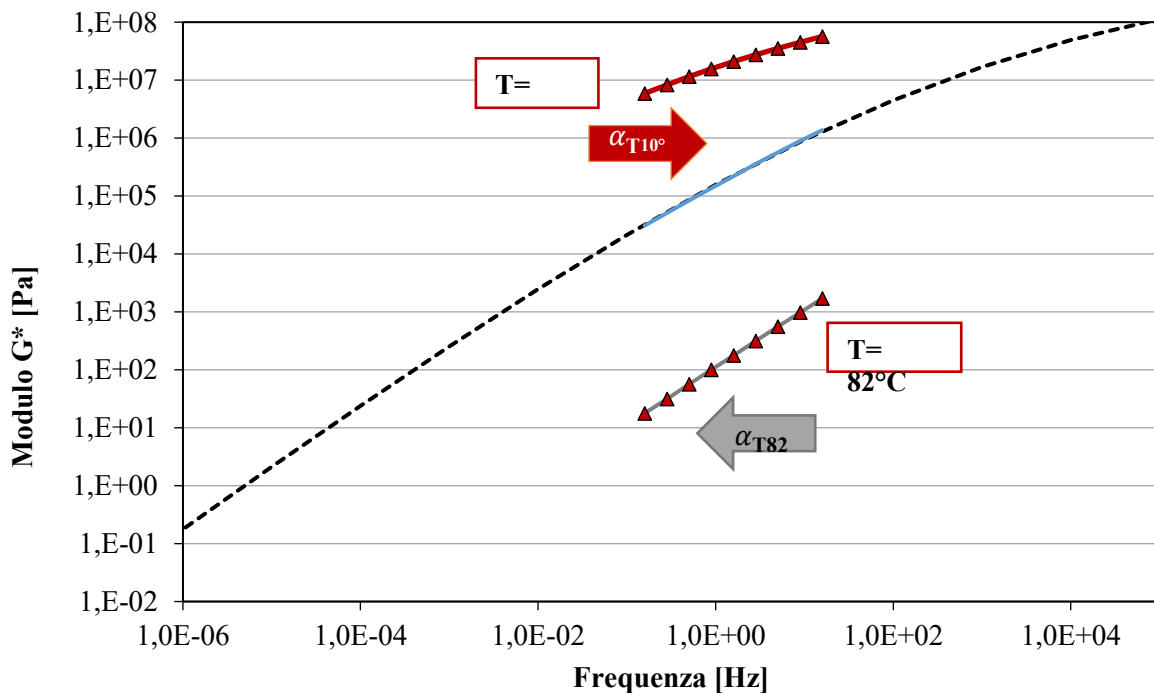


Figura 4.3 - Costruzione master curve con principio TTS alla temperatura di riferimento di 34°C

4.4.2 Master curves.

La Master Curve o Curva Maestra è la rappresentazione grafica di una grandezza viscoelastica, ad una temperatura fissata, in un ampio intervallo di tempo (o frequenza).

Il principio TTS si applica nella costruzione delle curve maestre, le quali rappresentano curve ottenute dalla traslazione dei dati misurati a diverse temperature di prova, in modo da determinare l'andamento

della funzione viscoelastica in esame in un nuovo dominio, più esteso rispetto a quello delle singole curve iniziali, e nel quale coesistono gli effetti delle variabili tempo e temperatura.

L'entità della traslazione delle singole curve definisce il fattore di traslazione. In alcuni materiali termo-reologicamente semplici la sovrapposizione delle curve con traslazioni orizzontali (horizontal shift factors) lungo l'asse della variabile temporale. Nel caso di dati riconducibili ad analisi in regime oscillatorio sinusoidale si ottiene la traslazione dei dati secondo la determinazione delle frequenze ridotte:

$$\omega_r(T_0) = \alpha_T \cdot \omega(T)$$

[4.10]

4.4.2.1 Modello generale 2S2P1D

Per l'elaborazione dei dati ricavati dalla sperimentazione, ci si avvale del modello generale 2S2P1D.

Questo modello prende il nome dall'acronimo dei termini inglesi degli elementi che lo costituiscono, cioè: (fig. 4.4)

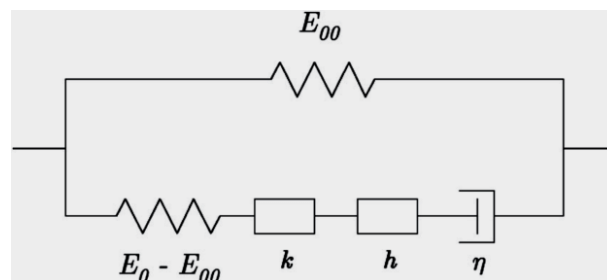


Figura 4.4 - Rappresentazione modello 2S2P1D

Tale modello in funzione di 7 parametri G_0 , G_∞ , δ , k , h , β , τ , permette di ricavare il modulo complesso G^* :

$$G^*(i\omega\tau) = G_0 + \frac{G_\infty - G_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}}$$

Dove:

- i è l'unità immaginaria del numero complesso $i^2 = -1$;
- ω è la frequenza angolare: $\omega = 2\pi f$ con f = frequenza di carico;
- G_0 è il modulo statico relativo a $\omega \rightarrow 0$;
- G_∞ è il modulo vetroso relativo a $\omega \rightarrow \infty$;
- δ è un parametro adimensionale di forma;
- k, h sono i parametri degli elementi parabolici $0 < k < h < 1$;

- β è un parametro adimensionale della viscosità Newtoniana η del dashpot;
- τ è il valore del tempo caratteristico funzione della temperatura.

Dal TTSP, solo il parametro τ dipende dalla temperatura T, e si definisce:

$$\tau(T) = a_T(T) \tau(T_{rif}) = a_T(T) \tau_0$$

Con:

- a_T ricavato dall'equazione di WLF
- τ_0 è il tempo caratteristico alla temperatura di riferimento
- $T_{rif} = T_0 = 34 \text{ }^\circ\text{C}$.

Il modello 2S2P1D permette di rappresentare il comportamento visco-elastico lineare del mastice bituminoso, tramite un modello meccanico avente 7 parametri che possono essere determinati fittando il modello con i dati sperimentali.

4.4.2.2 Rappresentazione grafica della curva maestra

I risultati sperimentali ottenuti dalla prova dinamica in regime oscillatorio frequency sweep, possono essere rappresentati graficamente grazie al principio di TTS e utilizzando il modello 2S2P1D. Le possibili rappresentazioni grafiche sono:

- Curva Maestra o Master Curve (figure 4.5)

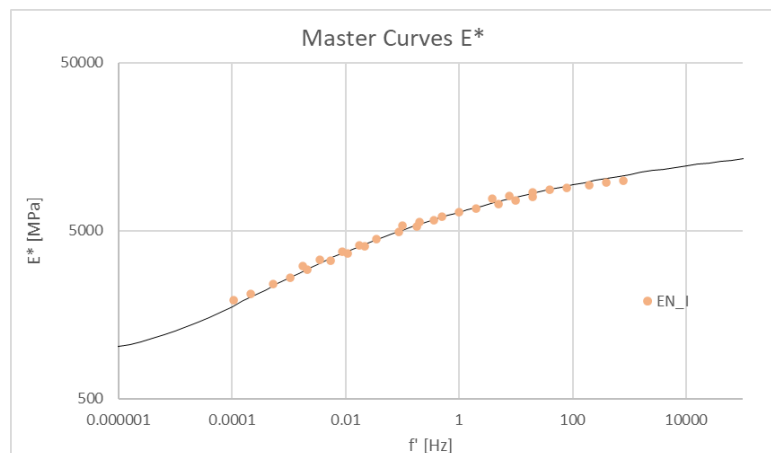


Figura 4.5 - Esempio di curva maestra

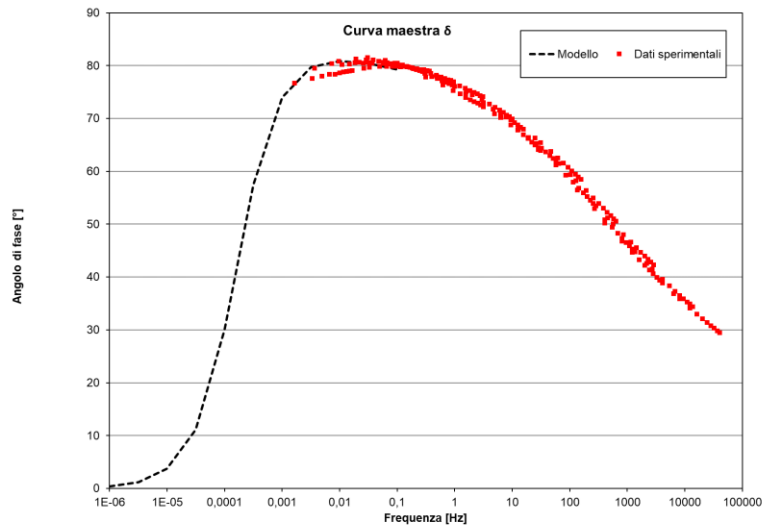


Figura 4.6 - Esempio di curva maestra

- Piano di Black

I dati provenienti da prove in regime oscillatorio sinusoidale possono avere un'ulteriore rappresentazione nel piano di Black, nel quale ogni coppia $\delta-G^*$ è rappresentativa di una frequenza e di una temperatura (**figura 4.7**). Attraverso tale risultato è possibile valutare la validità del principio di sovrapposizione tempo-temperatura (TTS) e l'ordine di grandezza dell'asintoto vetroso utilizzato nella successiva costruzione delle master curves.

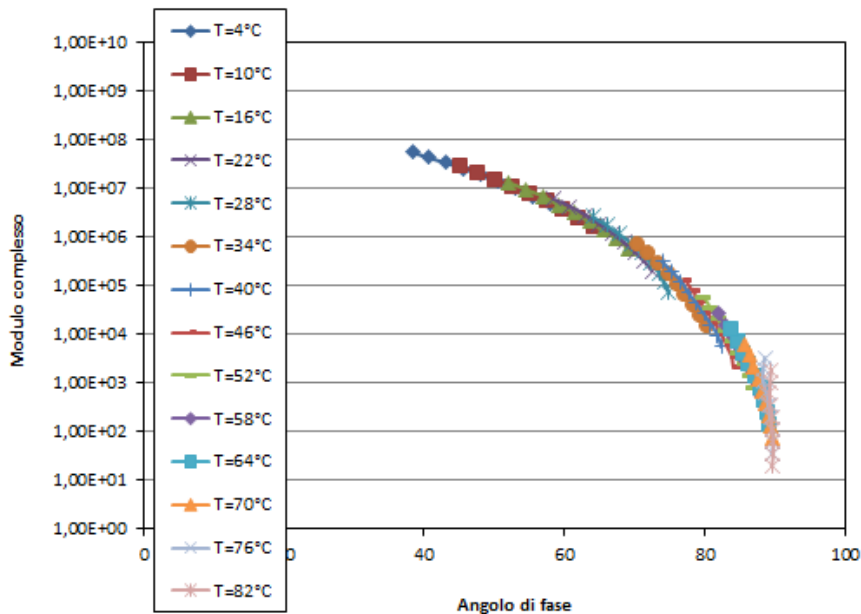


Figura 4.7 – Rappresentazione dei dati nel piano di Black

- Piano di Cole-Cole.

Un'altra rappresentazione dei dati delle prove in regime oscillatorio sinusoidale è possibile nel piano di Cole-Cole, dove le funzioni da considerare sono il modulo di immagazzinamento G' ed il modulo di dissipazione G'' .

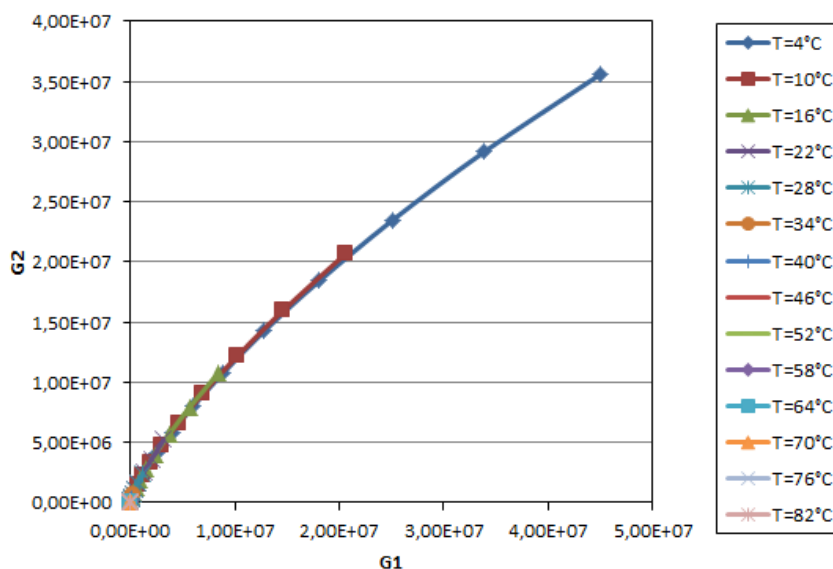


Figura 4.8 – Rappresentazione dei dati nel piano Cole-Cole

Capitolo 2 – Materiali e metodi.

2.1. Programma sperimentale.

L'intera campagna sperimentale si è svolta nel Laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Ancona.

Essendo il bitume un materiale viscoelastico termo-tempo dipendente, risulta importante lo studio delle proprietà reologiche in un ampio range di temperature e frequenze ai fini di confrontare i diversi materiali tra di loro.

Gli obiettivi di questa sperimentazione sono:

1. Valutare l'effetto di un aumento della % di modifica sul bitume modificato hard, confrontando i bitumi Drenoval hard e Drenoval PBT (superhard).

2. Valutare il comportamento del bitume modificato hard e superhard quando miscelato con bitume invecchiato proveniente dal fresato, confrontando Rigenerval + 50% RAP con Drenoval + 50% RAP e la percentuale di additivi tale da ottenere caratteristiche confrontabili con il Drenoval hard.

Al fine di ottenere gli obiettivi prefissati sono stati prodotti e testati i seguenti materiali.

ID	%RAP	Bitume vergine	Aditivi	% Aditivi
Drenoval	0	Drenoval	Nessuno	0
Dren PBT	0	Drenoval PBT	Nessuno	0
Rig + 50% RAP	50%	Regenerval PBT	Nessuno	0
Dren+50% RAP+5%A	50%	Drenoval	A	5%
Dren+50% RAP+15%A	50%	Drenoval	A	15%
Dren+50% RAP+30%A	50%	Drenoval	A	30%

Tabella 1-Materiali prodotti e testati.

Il programma sperimentale si può articolare nelle seguenti fasi:

1. Valutare la percentuale di additivo tale da rigenerare correttamente il bitume estratto dal fresato
2. Valutare l'effetto dell'aumento della percentuale del polimero confrontando Drenoval hard e Drenoval PBT
3. Valutare l'effetto del bitume proveniente dal fresato in funzione della quantità di polimero presente nel bitume vergine (Rigenerval + 50% RAP con Drenoval + 50% RAP e la percentuale di additivi tale da ottenere caratteristiche confrontabili con il Drenoval hard).

2.2 Materiali

In questa sperimentazione sono stato utilizzato i seguenti materiali per produrre i bitumi che poi sono stato testati.

- Drenoval hard
- Drenoval PBT
- Rigenerval PBT
- RAP
- Additivo A

2.2.1. Drenoval hard

Drenoval hard è un bitume modificato con polimero SBS con una percentuale di (4-5) % utilizzati per conglomerati di base binder e usura.

Caratteristiche	Proprietà	Metodo	U.d.M.	Prestazione		
				min	max	Classe
Consistenza alle temperature intermedie di servizio	Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm	45	70	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/cm ²	3,0		7
	Variazione di massa	-	%		0,5	3
Durabilità Resistenza all'invecchiamento RTFOT EN12607-1	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	0,40		
Recupero di deformazione	Ritorno Elastico a 25°C.	UNI EN 13398	%	80		2
Punto di rottura Fraass	Fraass	UNI EN 12593	°C	-18		8
Stabilità allo stoccaggio EN13399	Δ Punto di rammollimento.	UNI EN 1427	°C		3	2
	Δ Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm		9	2
Temperature di utilizzo				Valori indicativi		
Temperatura di stoccaggio			°C	165 ÷ 180		
Temperatura di stoccaggio prolungato oltre 5 giorni			°C	100 ÷ 120		
Temperatura impasto con inerti			°C	165 ÷ 180		
Temperatura minima di compattazione			°C	> 145		

Figura 2.1- scheda tecnica Drenoval hard.

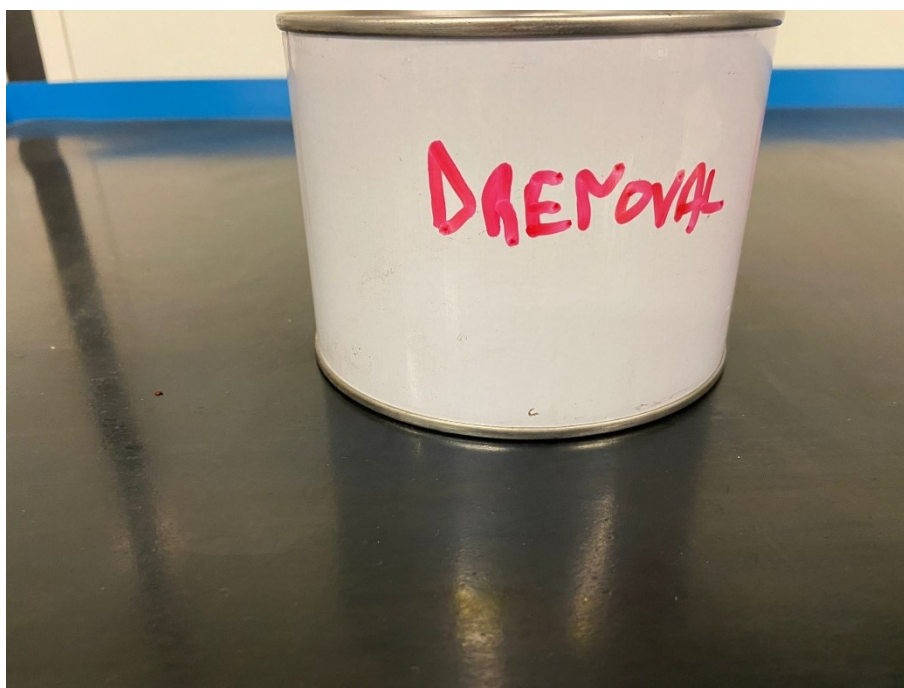


Figura 2.2- Drenoval hard.

2.2.2 Drenoval PBT

Drenoval PBT è un bitume mmodificato con polimero SBS con una percentuale che varia tra (8-9) %, si è sviluppato seguendo la metodologia superpave, si contraddistingue per un'elevata componente elastica che blocca le microfessurazioni alle basse temperature, aumenta la resistenza a fatica a quelle intermedie e scongiura le deformazioni a quelle alte.

Caratteristiche	Norma di riferimento	Drenoal PBT
Penetrazione a 25°C (dmm)	EN1426	50
Punto di Rammollimento (°C)	EN1427	98.0
Coesione – Force Ductility Test a 10°C (J/cm ²)	EN13589/13703	7.44
Viscosità dinamica a 160 °C (Pa·s)	EN13302	0.62
RTFOT a 163°C		
Permanent deformation (T °C = G*/senδ ≥ 2.2 kPa)	EN14770	87
Multi Stress Creep Recovery J _{NR 3,2 Pa} a 64°C (kPa ⁻¹)	EN16659	0.038
Multi Stress Creep Recovery R _{3,2 Pa} a 64°C (kPa ⁻¹)	EN16659	92.1
RTFOT + PAV		
Fatigue cracking (T °C =G*.senδ ≤ 5000kPa)	EN14770	15
Low Temperature cracking (BBR T °C=S ≤ 300MPa)	EN14771	-24

Figura 2.3- scheda tecnica Drenoal PBT.



Figura 2.4- Drenoal PBT.

2.2.3. Rigenerval PBT

Rigenerval PBT è formato dalla miscelazione di drenoal PBT e di additivo rigenerante, quindi contiene all'interno sia il polimero e l'additivo.

Caratteristiche	Proprietà	Metodo	U.d.M.	Prestazione		Classe
				min	max	
Consistenza alle temperature intermedie di servizio	Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm	75	130	6
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/cm ²	3,0		7
	Variazione di massa	-	%		0,5	3
Durabilità Resistenza all'invecchiamento RTFOT EN12607-1	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

Temperature di utilizzo	Valori indicativi	
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	> 140

Figura 2.5- scheda tecnica Rigenerval PBT.

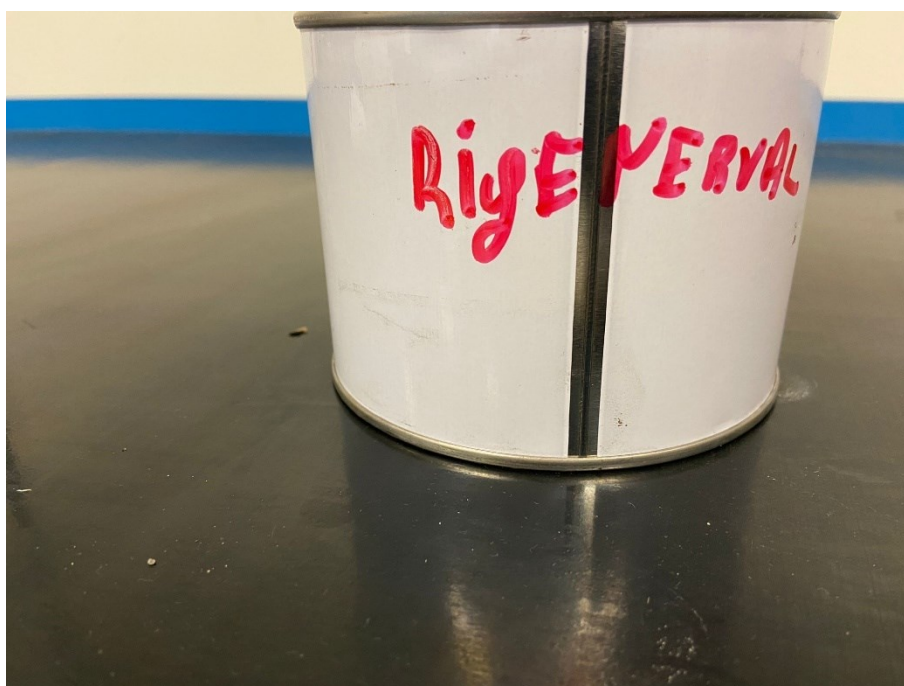


Figura 2.4- RIGRNRVAL PBT.

2.2.4. RAP

Rap è un bitume estratto da un fresato di recupero il quale contiene bitume modificato hard.



Figura 2.5- RAP.

2.2.5. Additivo A

Additivo A è un additivo di origine vegetale a base di olio (tallolio).



Figura 2.6, Additivo A

2.3. Produzione dei materiali di prova.

La preparazione dei materiali di prova consiste in diverse fasi:

Riscaldamento

I bitumi vengono messi nel forno ad una temperatura di per 1.5 ore al fine di ottenere una coesistenza liquida.



Figura 2.7- Forno.

Miscelazione,

Una volta che il bitume ha raggiunto la sua consistenza liquida viene versato in contenitori più piccoli di alluminio facili da versare all'interno dei quali vengono fatte le diverse miscele, nella figura 2.8 si vede che per fare questo processo viene utilizzata una bilancia elettronica.

Drenoal hard e Drenoal PBT viene riempito il contenitore con una quantità che serve per fare tutti i provini che si ha bisogno,

Rigenerval + 50% RAP viene versato nel contenitore 50 percento di Rigenerval e 50 percento di RAP poi vengono miscelati bene utilizzando una bachecca di vetro.

Drenoal + 50 % RAP + 5% Additivo A viene versato nel contenitore 50 percento Drenoal e 50 percento Rap poi viene versato 5 percento rispetto al peso di DRENOVAL+RAP poi vengono miscelati bene utilizzando una bachecca di vetro.

Drenoval + 50 % RAP + 15% Additivo A viene versato nel contenitore 50 percento Drenoval e 50 percento Rap poi viene versato 5 percento rispetto al peso di DRENOVAL+RAP poi vengono miscelati bene utilizzando una bacheca di vetro.

Drenoval + 50 % RAP + 30% Additivo A viene versato nel contenitore 50 percento Drenoval e 50 percento Rap poi viene versato 5 percento rispetto al peso di DRENOVAL+RAP poi vengono miscelati bene utilizzando una bacheca di vetro.

Il processo di miscelazione è molto importante perché si deve creare un materiale omogeneo, in modo quando vengono stampati i provini quelli hanno lo stesso quantità di materiali e additivi all'interno.

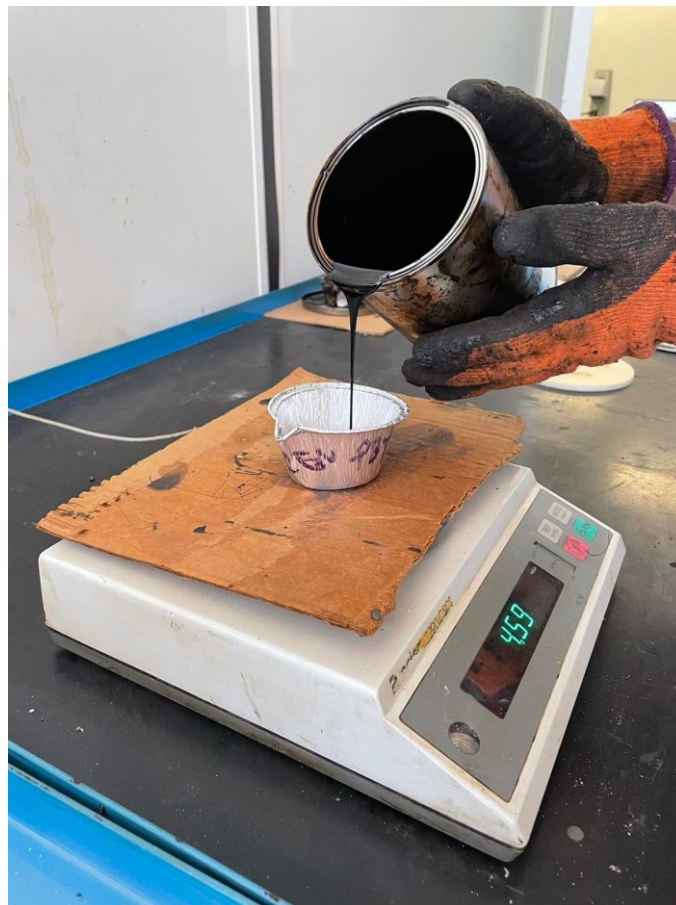


Figura 2.8- proporzionamento del bitume.

Porzionamento,

Quando abbiamo creato le miscele che dobbiamo testare viene fatto lo porzionamento, lo porzionamento viene fatto si stampi di silicone circolare di diametro 8 mm e di spessore 2 mm (**fig 2.9**), e negli stampi di diametro 25mm e di spessore 1 mm (**fig 2.10**), perché il macchinario utilizzato per testare i bitumi utilizza campioni di diametro di 8 mm e di 25 mm.



Figura 2.9- Porzionamento 8mm.



Figura 2.10- Porzionamento 25mm.

Come risultato finale dal processo di produzione di materiali da testare si ottengono per ogni materiale stampi con diametro di 8 mm e stampi con diametro di 25 mm i quali vengono coperti con carta forno e carta stagnola e si conservano in camera climatica a una temperatura costante di 20 gradi celsius.

Gli stampi devono essere in numero tale da eseguire tutte le prove richieste, su tutti gli stampi creati si deve scrivere il nome del materiale per essere riconosciuti.

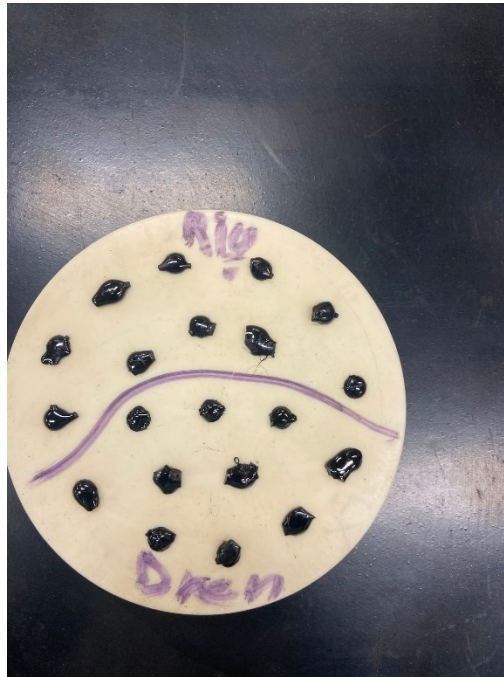


Figura 2.11 Stampa con provini 8 mm.

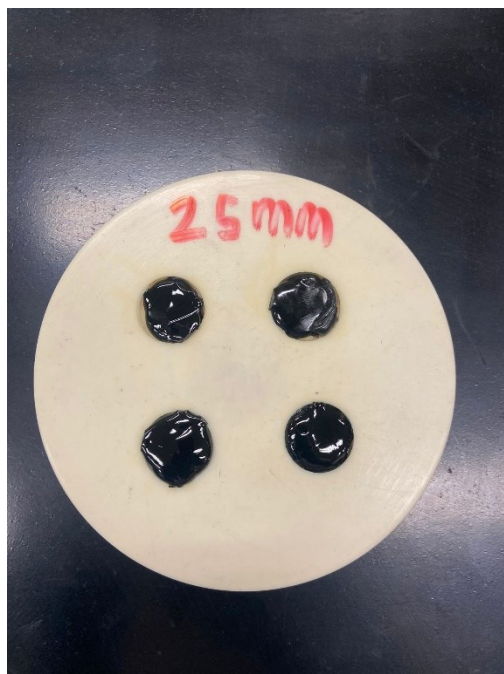


Figura 2.12- Stampa con provini 25 mm.

2.4. Procedure di prova.

2.4.1 Macchinario utilizzato-Dynamic Shear Rheometer (DSR)

Il Dynamic Shear Rheometer (fig. 2.13) permette di studiare le caratteristiche reologiche del materiale, con temperatura controllata. Vengono impiegati strumenti di misura piatto-piatto con dimensioni specifiche.

Lo strumento consente di eseguire prove in regime continuo ed in regime oscillatorio e di operare sia in controllo di deformazione (control strain) che di sollecitazione (control stress). Nel primo caso, lo strumento misura lo sforzo da applicare per mantenere costante un certo livello di deformazione, mentre nel secondo caso misura la deformazione ottenuta applicando un certo valore di sforzo (control stress), consentendo di risalire al valore del modulo complesso di taglio G^* .



Figura 2.13- DSR.

Il DSR è collegato ad un macchinario chiamato criostato che permette il controllo della temperatura, realizzato con resistenze elettriche e serpentine metalliche dove all'interno scorre un fluido (fig. 2.14).



Figura 2.14- Criostato

Il software Rheoplus installato nel computer è deputato all'acquisizione dei dati e al controllo dei parametri di prova. Il sistema di misura è composto da un piatto inferiore fisso ed uno superiore che può muoversi, collegato allo strumento attraverso cui viene applicata la coppia torcente; inoltre è presente una cappa che viene chiusa in fase di misurazione per evitare perturbazioni esterne (fig. 2.15).

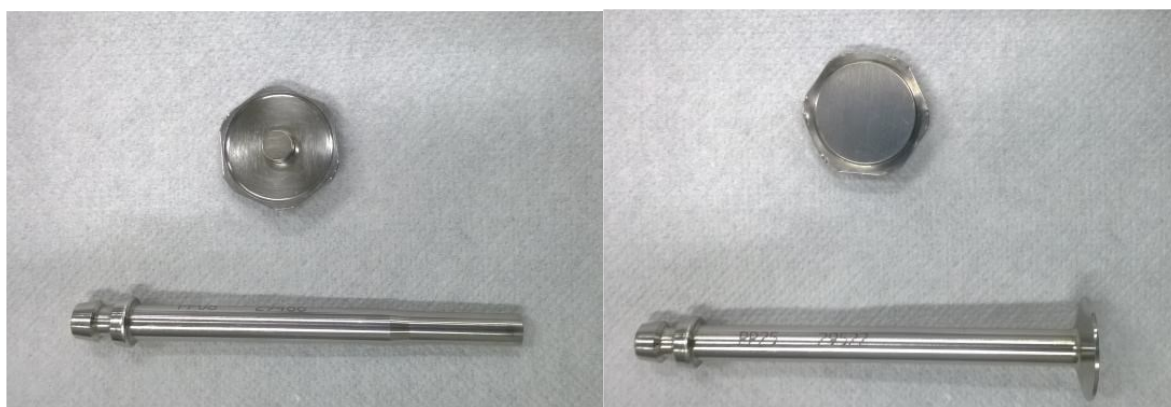


Figura 2.15- piatti di misura 8mm a sinistra e 25mm a destra.

Il software permette di impostare (fig. 2.16):

- le temperature di prova ed i loro intervalli
- frequenze e deformazioni applicate
- intervalli temporali di condizionamento
- forza verticale
- numero di punti misurati

MCR302 PPO8-SN29486		1 2 Pts. 10 min	2 40 Pts. 2 s	3 2 Pts. 10 min	4 40 Pts. 2 s	5 2 Pts. 10 min
Rotation γ, n, ϕ, γ						
Rotation τ, M						
Oscillation ϕ, γ		γ 0.001..1 % f 1 Hz		γ 0.001..1 % f 1 Hz		
Oscillation τ, M						
F_N						
d, v, did						
P-PTD200-H-PTD200-SII	Accessory1 T	T 35 °C		T 5 °C		T 25 °C

Figura 2.16- settaggio parametri.

Nella schermata principale di gestione del dispositivo, l'operatore imposta la temperatura di prova, il gap fra i due piattini e l'avvio della prova stessa (fig. 2.17).



Figura 2.17- schermata di gestione DSR.

I risultati ottenuti vengono rappresentati in un grafico mediante una finestra del programma. I valori sono anche visualizzabili in una tabella, la quale può essere esportata in un foglio di calcolo excel per essere rielaborata successivamente (fig. 2.18).

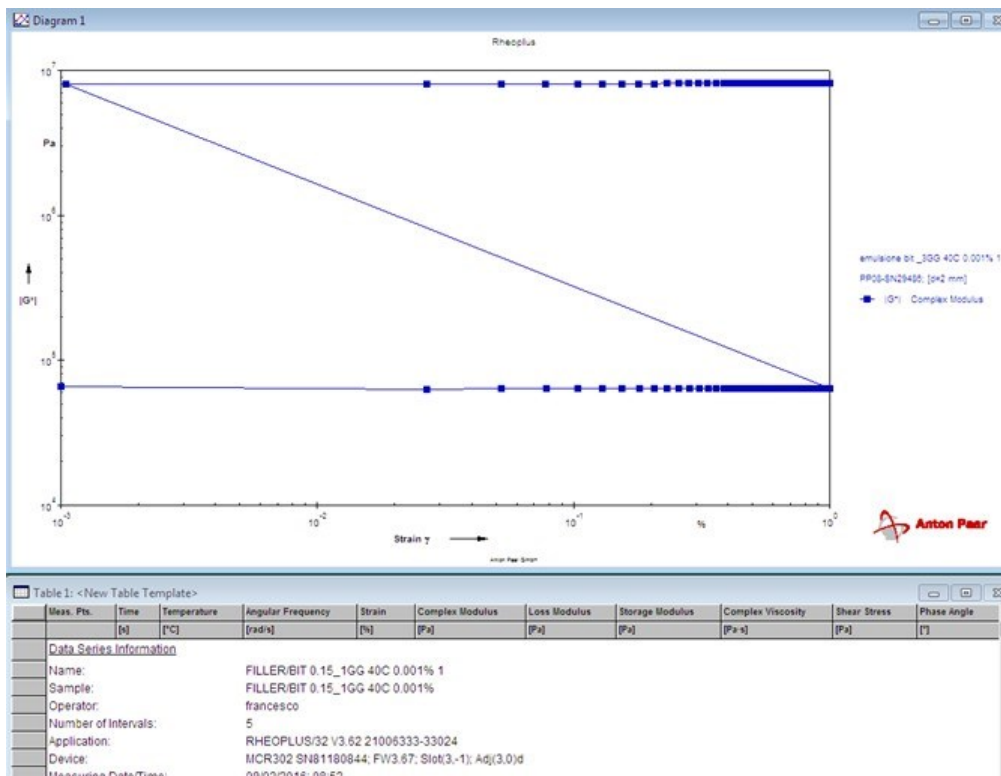


Figura 2.18- grafico per punti e tabella.

Nello specifico il campione viene sollecitato da una coppia torcente T non costante nel tempo in funzione di un regime oscillatorio. Successivamente vengono misurate le deformazioni angolari Θ subite dal campione. Esiste una relazione che lega il momento torcente alla velocità angolare, che permette di risalire alle tensioni e deformazioni tangenziali. Grazie a questo si possono determinare le proprietà reologiche del mastice.

La configurazione utilizzata in questa sperimentazione è quella piatto-piatto, indicata con l'acronimo "PP", in regime di deformazione costante.

Il campione, debitamente sagomato, viene posto al di sopra del piatto fisso debitamente riscaldato. La spaziatura fra i due piatti è definita "gap" ed è impostabile dalla schermata del software. I piatti utilizzati sono di due tipi: da 8 mm con gap di 2 mm e da 25 mm con gap di 1 mm.

All'avvio della prova lo strumento di misura raggiunge il materiale e successivamente, quando il piattino superiore inizia ad entrare in contatto con il provino, tenderà a diminuire la velocità in

modo da non forzare e quindi danneggiare il macchinario. Nel caso di sforzi eccessivi sarà necessario alzare la temperatura del piattino inferiore per “rammollire” il materiale.

La tensione e la deformazione angolare possono essere ricavate dalla coppia e dall’angolo di deflessione (fig. 2.19).

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

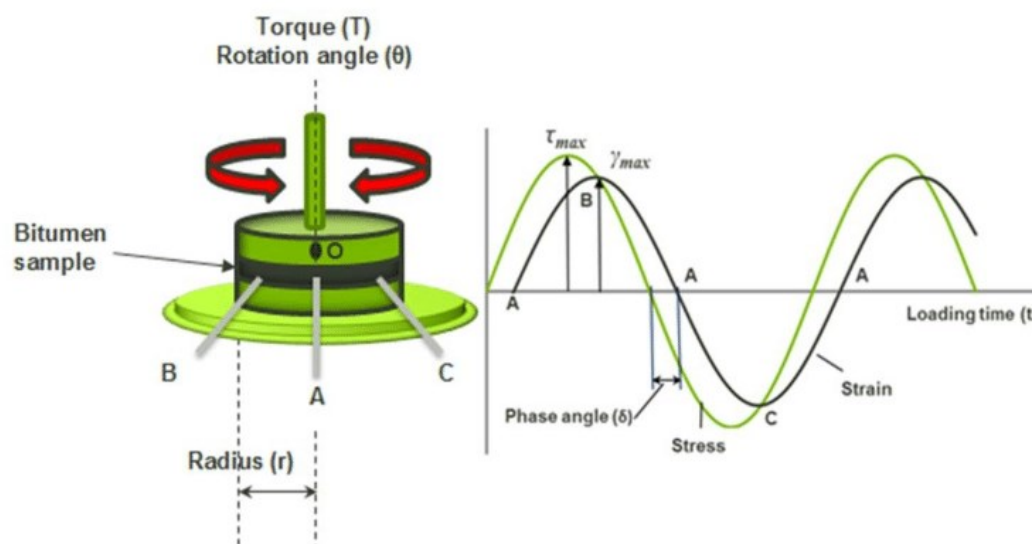


Figura 2.19- parametri caratteristici.

2.4.2. Prova Strain sweep e frequency sweep

La prova di strain sweep (SS) è usata per la determinazione del limite di linearità, per poi definire la deformazione massima con la quale andare ad eseguire la prova di frequency sweep (FS), volta a caratterizzare reologicamente il materiale in esame.

2.4.2.1. Strain sweep

Il campo di linearità verrà indagato e determinato tramite l’utilizzo della strain sweep (SS), andando a utilizzare, come strumento di misura, il piatto-piatto di diametro 8 millimetri. Il piatto 8 mm è adatto alle

basse temperature e permette di non incorrere in errori di misura e danneggiamenti del macchinario, essendo il bitume un materiale termo-dipendente. La frequenza, mantenuta costante durante la prova, è di 1 Hz; al campione viene impressa una deformazione che va dallo 0,001% all'1%. Le temperature di prova sono 5 °C, 15 °C e 30°C (fig. 2.20)

Insert Append Delete...		1	2	3	4	5	6
MCR302 PP08-SN29486		2 Pts. 12,5 min	20 Pts. 2 s	2 Pts. 10 min	20 Pts. 2 s	2 Pts. 10 min	20 Pts. 2 s
	Rotation γ, n, ϕ, γ						
	Rotation τ, M						
	Oscillation ϕ, γ		γ 0,001..10 % ω 10 rad/s		γ 0,001..10 % ω 10 rad/s		γ 0,001..10 % ω 10 rad/s
	Oscillation τ, M						
	F_N						
d, v, d/d							
P-PTD200+H-PTD200-SNI	Accessory1 T	T 5 °C		T 15 °C		T 30 °C	

Figura 2.20- Impostazione parametri (temperatura, frequenza e deformazioni)

Dal pannello principale di gestione del software viene impostata la temperatura di “start” e l’abbassamento del piatto superiore di misura fino ad arrivare al “gap” previsto.

Il limite superiore di linearità del materiale è determinato per una diminuzione, rispetto al valore iniziale, del modulo complesso, pari al 5%, andando ad ottenere un valore di deformazione compreso nel range considerato (0,01%-1%) o esterno a tale range.

Il valore risultante dalla prova SS sarà utilizzato come base di analisi per la frequency sweep.

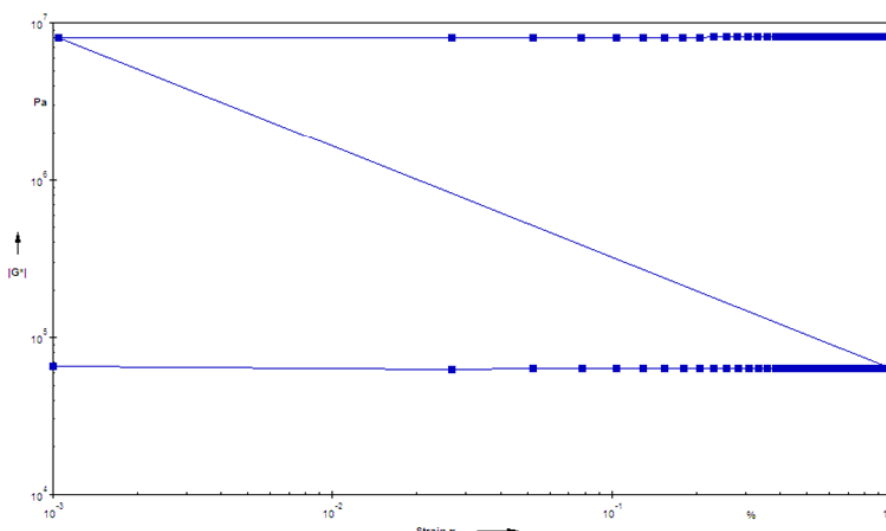


Figura 2.21- Rappresentazione prova SS.

2.4.2. Frequency sweep

I campioni di mastice bituminoso vengono sottoposti alla prova Frequency sweep, una volta determinato il campo di linearità attraverso la prova SS. Questo test prevede una deformazione costante impressa al

campione pari a $\gamma = 0,02\%$ ed uno spettro di frequenze, che variano da 0,1 a 10 Hz. Gli strumenti di misura utilizzati sono:

- piatto da 8 mm
- piatto da 25 mm

Il piatto di diametro inferiore è idoneo per indagare le basse temperature, nello specifico T che vanno da 0 °C a 40 °C. Per quanto riguarda le alte T, da 40 °C a 88 °C, il piatto da 25 mm è quello scelto. Sono state eseguite due ripetizioni per ogni singolo piattino. Nel caso di risultati distanti più del 10% tra loro, è stata effettuata una terza ripetizione di prova (fig.2.22). La scelta dello strumento di misura è funzione del limite di “machine compliance”, cioè il limite di rigidità del materiale che risulta comparabile con quella dello strumento, superare questo limite può fare insorgere anomalie di misura e quindi raccolta di dati alterati.

Confrontando la rigidità torsionale dei campioni, funzione della temperatura e della frequenza, con quella dello strumento DSR è possibile discernere tale limite da non superare. Ad alte temperature la rigidità del provino è di ordini di grandezza inferiore a quella della macchina, questo non influenza la misura.

Quando invece si opera a temperature più basse e/o frequenze più alte, la deformabilità del provino si avvicina a quella del sistema e le misure perdono completamente il loro significato.

Tramite il software “Rheoplus” vengono inseriti i parametri della prova, ossia:

- deformazione applicata al campione = 0,02%
- frequenza da 0,1 a 10 Hz
- condizionamento in termini di tempo pari a 15 min
- intervalli di temperatura
- numero di punti campionati per ogni intervallo di temperatura

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
MCR302 PP08-SN29486		2 Pts. 7,5 mm	10 Pts.	1 Pts.	9 Pts.	2 Pts. 7,5 mm	10 Pts.	1 Pts.	9 Pts.	2 Pts. 7,5 mm
	Rotation $\gamma, n, \varphi, \gamma$									
	Rotation τ, M									
	Oscillation φ, γ		γ 0,02 % f 0,1-1 Hz	γ 0,02 % f 1,59 Hz	γ 0,02 % f 2,10 Hz		γ 0,02 % f 0,1-1 Hz	γ 0,02 % f 1,59 Hz	γ 0,02 % f 2,10 Hz	
	Oscillation τ, M									
	F_N									
	d, v, dd									
P-PTD200-H-PTD200-SN1	Accessory1 T	T 40 °C				T 34 °C				T 28 °C

Figura 2.22- impostazione parametri (temperatura, frequenza e deformazioni)

Eseguita l'inizializzazione dello strumento ed il montaggio del piattino inferiore e superiore, verranno impostati i seguenti parametri:

- altezza del piattino di misura
- gap da raggiungere in fase di misurazione (previa impostazione della posizione di "zero" impostando la temperatura media di prova)

Sul display del macchinario sarà visibile lo status dello stesso ed i parametri, e cioè: gap, temperatura di prova corrente, forza normale agente e strumento di misura utilizzato (fig.2.23-2.34).



Figura 2.23- settaggio DSR



Figura 2.24- Display DSR

Impartendo l'ordine di "Lift position" si solleva lo strumento di misura ed è possibile inserire il campione, precedentemente sagomato, nel piattino fisso. Viene scelta una temperatura sufficientemente alta per permettere l'adesione con il provino (fig. 2.25).



Figura 2.25- Campione posto sul piatto

Dopodiché, si scalda una spatola sopra una piastra elettrica precedentemente accesa e la si passa sopra il campione in modo tale da migliorare l'adesione con il piatto superiore (fig. 2.26).



Figura 2.26 – Spatola sulla piastra riscaldata

Dal pannello di controllo, si preme il comando “Meas. Position” che permette di mandare il piatto superiore nella posizione di misura, causando lo schiacciamento del materiale (fig 2.27-2.28). In questa fase viene monitorato, attraverso il display del macchinario, il valore dello sforzo normale al fine di limitarne l’entità.

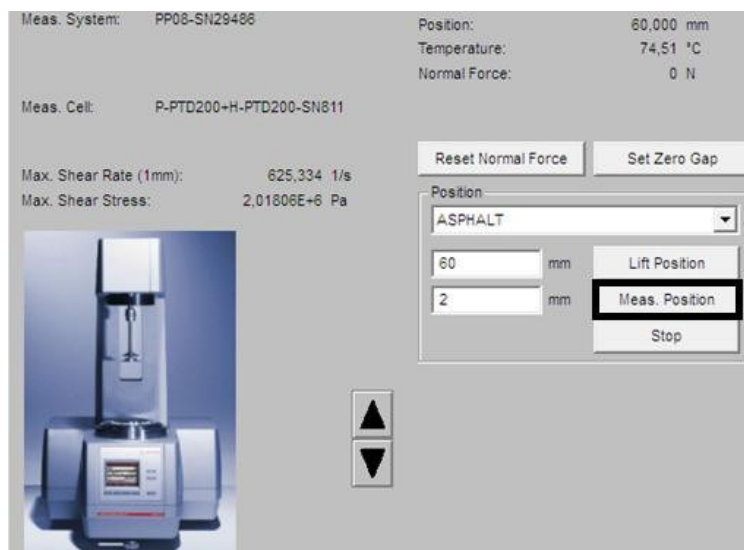


Figura 2.27– Schermata comando “Meas. Position”



Figura 2.28 – Posizione di misura

Al termine di queste operazioni viene impostata la temperatura iniziale di prova e successivamente, tramite l'apposito comando "Play" (posto in alto sulla schermata iniziale del software), si inserirà il nome del test e dell'operatore, ed infine la prova sarà avviata premendo "Start the test now" (fig.2.29).

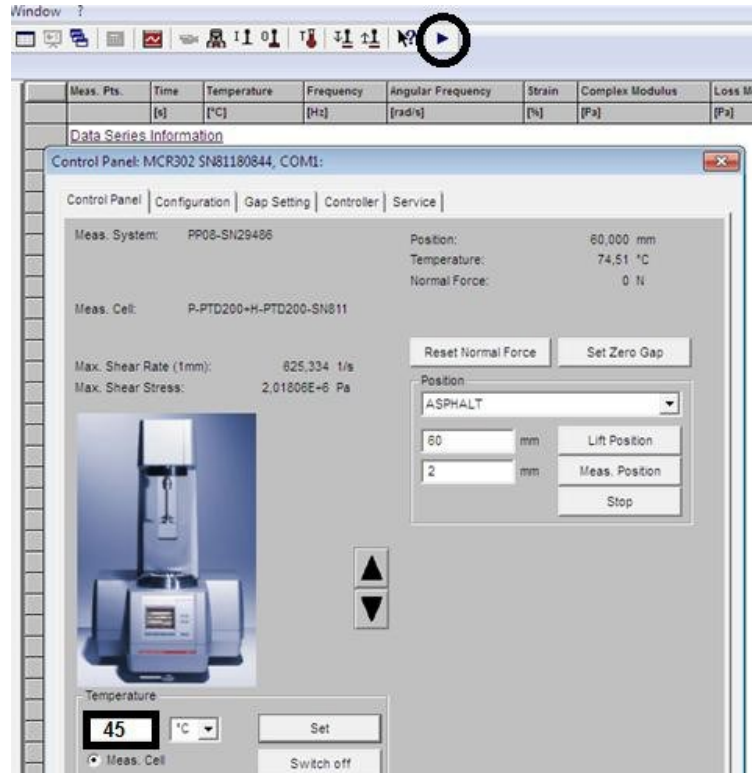


Figura 2.29 – Finestra "play"

Ogni singola prova prevede: una fase di condizionamento di circa 15 min alla temperatura di prova per consentire al campione di raggiungere la temperatura desiderata in modo omogeneo, e una fase di test in cui vengono applicate le diverse condizioni di carico, a seconda del tipo di test eseguito.

La rappresentazione dei dati di prova da parte del programma è come segue (fig. 2.30):

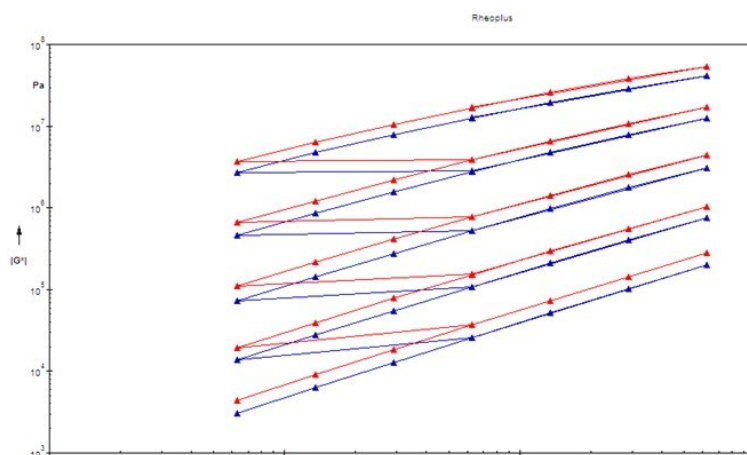


Figura 2.30– Rappresentazione prova FS

4.4.3. Prova M.S.C.R (Multiple Stress Creep Recovery)

La prova MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) è volta alla determinazione della deformazione percentuale recuperabile e non recuperabile, nel caso specifico del mastice bituminoso. Tale prova permette di analizzare il fenomeno del degrado da ormaiamento e più in generale la risposta elastica e anelastica del materiale.

La norma a cui si fa riferimento è la EN 16659-2015, dal titolo “Bitumen and Bituminous Binders — Multiple Stress Creep and Recovery Test”. La prova è utilizzabile su campioni aventi modulo complesso dinamico appartenente a un range che va dai 100 Pa ai 10 Mpa.

La metodologia operativa di preparazione del provino e della macchina DSR è la medesima descritta nel paragrafo precedente.

La sperimentazione effettuata prevede l’utilizzo del piattino da 25 mm con “gap” di 1 mm e le temperature a cui il materiale è stato sottoposto è di 64°C, 70 °C e 76 °C. Esiste una fase di condizionamento iniziale di 20 minuti alla prima temperatura di prova per permettere al campione di condizionare alla temperatura iniziale. Per ogni test effettuato è necessario sostituire il provino con uno nuovo a causa delle deformazioni irreversibili immagazzinate dallo stesso. il provino è caricato con una tensione tangenziale costante di 0,1 kPa per la durata di 1 secondo, durante questo intervallo viene registrata la tensione e la deformazione ogni 0,10 secondi. Successivamente il campione viene scaricato per 9 secondi e in questa fase si registra la deformazione e la tensione ogni 0,45 secondi. Questo ciclo è ripetuto per un totale di 10 volte, per poi passare all’applicazione del carico tangenziale di 3,2 kPa per altrettanti 10 cicli come la fase precedente senza prevedere alcun periodo di riposo del provino(fig.2.31). Questo iter sarà ripetuto per ogni temperatura di prova.

Insert		Append		Delete												Check Profile	Start
MCR002		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
PP25-SN29522		2 Pts	1 Pts	10 Pts	15 Pts	1 Pts	10 Pts	10 Pts	15 Pts	1 Pts	10 Pts	10 Pts	15 Pts	1 Pts	10 Pts		
		10 min		0,1 s	0,01 s	0,3 s	0,45 s	0,1 s	0,01 s	0,3 s	0,45 s						
Rotation γ, n, ϕ, γ																	
Rotation τ, M				0,1 kPa				3,2 kPa									
Oscillation ϕ, γ																	
Oscillation τ, M																	
F_N																	
$d, v, d/d$																	
P-PTD200-H-PTD200-SM	Accessory1 T	T 23	°C												T 94		

Figura 2.31 – Impostazione parametri di prova

Durante la fase di scarico il campione recupera parzialmente la deformazione; quindi, ad ogni temperatura il materiale avrà subito due tensioni tangenziali intervallate da una fase di scarico.

Dal software “RheoPlus” sono stati impostati i parametri della prova (fig.2.32):

	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Rotation γ, n, ϕ, γ										
Rotation τ, M										
Oscillation ϕ, γ										
Oscillation τ, M										
F_n										
d_v, dld										
Accessory (T)										T 20 °C

Figura 2.32 – Impostazione parametri di prova

La rappresentazione dei dati è come segue (fig. 4.32):

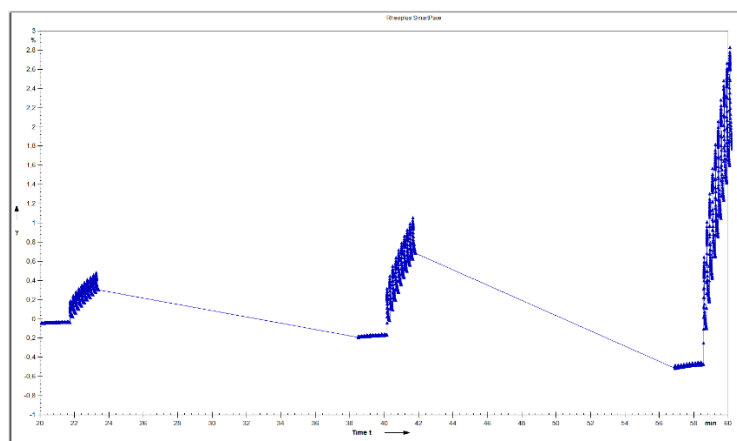


Figura 4.32 – Rappresentazione prova MSCR

4.4.5. Prova LAS (Linear Amplitude Sweep)

La prova Linear Amplitude Sweep (LAS) è utilizzata per studiare il comportamento dei bitumi all’aumentare del danno. Tale test è regolato dalla norma AASHTO TP101.

Il test è eseguito mediante l’utilizzo del DSR e del software Rheoplus; la configurazione scelta è quella “piatto-piatto” da 8 mm di diametro e “gap” 2 mm. La scelta della temperatura della prova è stata fatta in modo tale da avere alla frequenza di prova di 10 hz un modulo complesso confrontabile tra i 4 materiali

testati. In particolare (secondo una pubblicazione deve risultare tra 10 e 70 Mpa.

Si prevede preliminarmente un condizionamento di 15 minuti alla temperatura di prova (fig. 2.34). La fase di preparazione macchina-campione è la medesima delle prove SS, FS e MSCR.

		1	2	3	4	5	6
MCR302 PP08-SN29486		15 Pts. 1 min	5 Pts.	5 Pts.	2 Pts.	1 Pts. 2 min	300 Pts. 2 s
Rotation $\dot{\gamma}$, n, ϕ , γ							
Rotation τ , M							
Oscillation ϕ , γ		γ 0.1 % f 0.2..1 Hz	γ 0.1 % f 2..10 Hz	γ 0.1 % f 20..30 Hz		γ 0.1..30 % f 5 Hz	
Oscillation τ , M							
F_N							
d, v, d/d							
P-PTD200+H-PTD200-SNI	Accessory1 T	T 15 °C				T 15 °C	

Figura 2.34 – Impostazione parametri di prova

Il protocollo di prova seguito prevede una fase preliminare dove al provino verrà eseguita una frequency sweep con deformazione costante $\gamma = 0,1\%$ con frequenze che vanno da 0,2 a 30 Hz.

Si esegue il test vero e proprio con una frequenza di 5 Hz e con deformazione γ che varia da 0,1 % al 30 %, con step di incremento pari a 0,05 % ogni secondo. L'arrivo a rottura del materiale sarà in corrispondenza del valore di picco riferito alla curva sforzo τ -deformazione γ .

La rappresentazione dei dati è come segue (fig. 2.35):

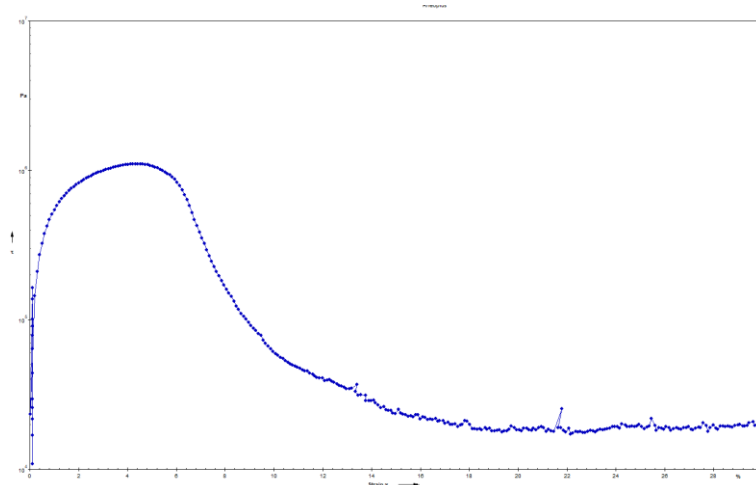


Figura 2.34 – Rappresentazione prova LAS

4.4.6. Prova di fatica

La configurazione della prova di Fatica è analoga della prova Las mentre la procedura di prova è formata dalle seguenti tre fasi.

- Prima fase condizionamento a 15 gradi per 15 minuti.
- Seconda fase fa la prova ogni 30 secondi per 10 volte mantenendo la $\gamma=0.1\%$ e la $f=10$ hz.
- Terza fase la prova di fatica applicando la $\gamma=3\%$ e la $f=10$ hz.

In questo modo si valuta l'andamento del modulo complesso all'aumentare del numero dei cicli.

	2 Pts. 7,5 min	10 Pts. 30 s	3,600 Pts. 2 s	1 Pts. 10 s
Rotation γ, n, ϕ, γ				
Rotation τ, M				
Oscillation ϕ, γ		γ 0,1 % f 10 Hz	γ 3 % f 10 Hz	
Oscillation τ, M				
F_N				
$d, v, d/d$				
Accessory1 T	T 15 °C			T 20 °C

Figura 2.35 – Impostazione parametri di prova

CAPITOLO 3 – Risultati

3.1 – DRENOVAL

In questo paragrafo vengono inseriti i dati del bitume Drenoval:

CURVA MAESTRA

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova Frequency sweep, in Figura 3.1 viene illustrato il modulo dinamico mentre nella Figura 3.2 viene illustrato l'angolo di fase.

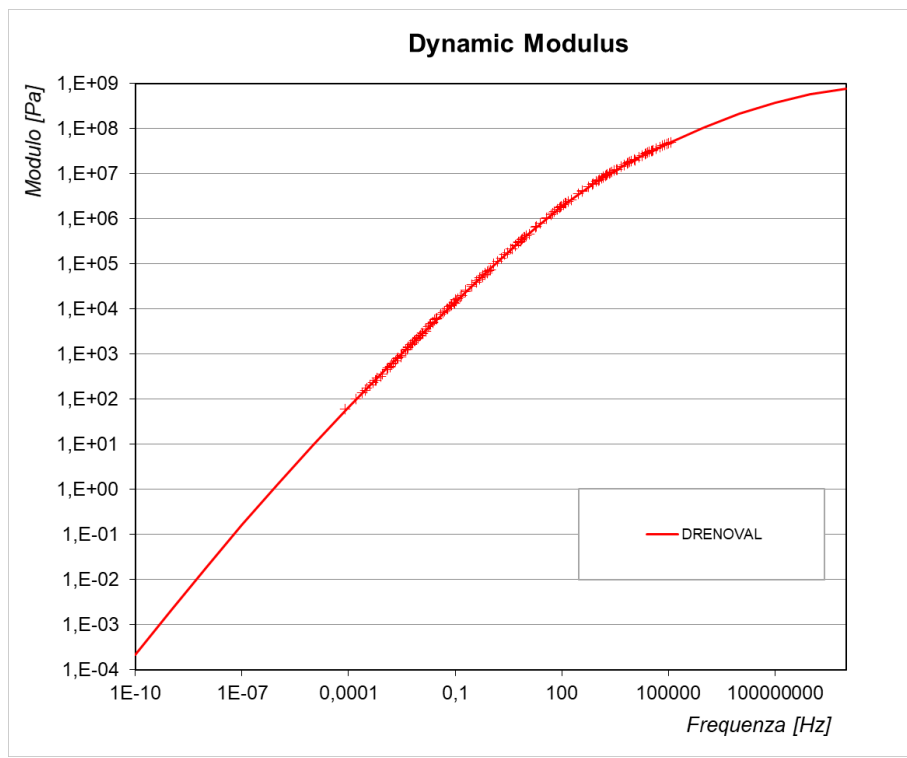


Figura 3.1- Curva maestra (G^*), Drenoval

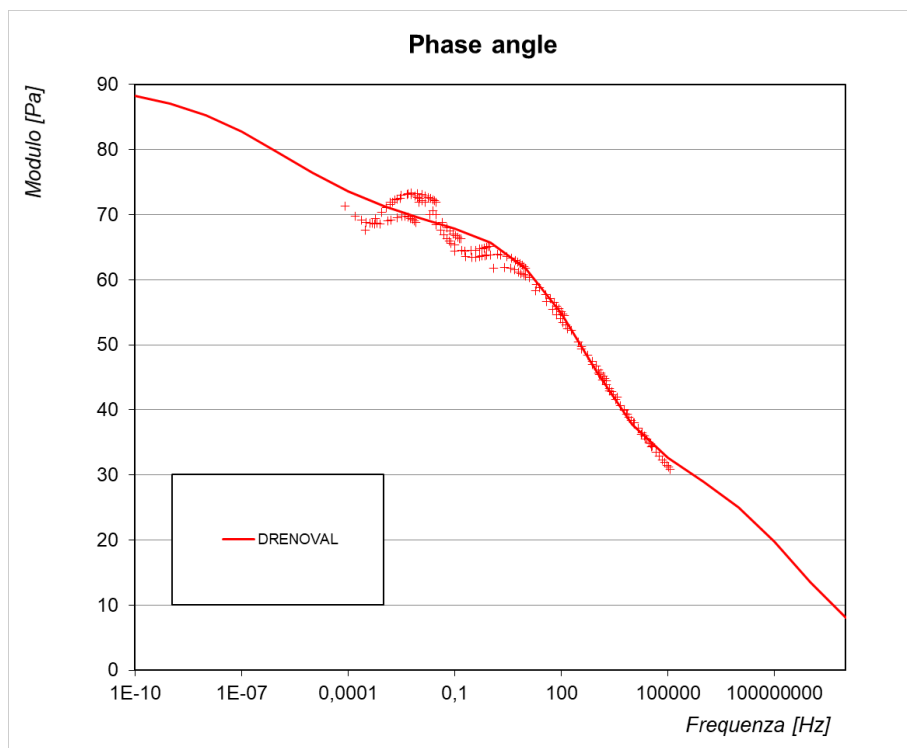


Figura 3.2- Curva maestra (δ , Drenoval

MSCR

In questa tabella vengono inseriti i risultati della prova MSCR.

DRENOVAL						
T [°C]	64		70		76	
τ [kPa]	0,1	3,2	0,1	3,2	0,1	3,2
R	73,83	51,79	77,62	28,38	66,2	5,18
Jnr	0,37	0,74	0,59	2,48	1,65	7,53
Jnr diff	99,87		320,32		357,29	

Tabella 1- Risultati prova MSCR.

Dove:

- R è la media dei recuperi percentuali nei 10 cicli.
- Jnr è la media delle non-recoverable creep compliance dei 10 cicli.

LAS

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova LAS.

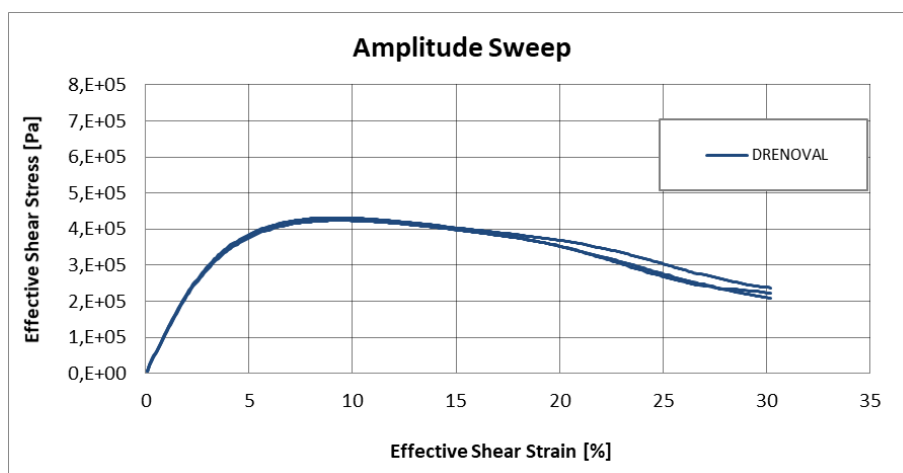


Figura 3.3- Amplitude Sweep.

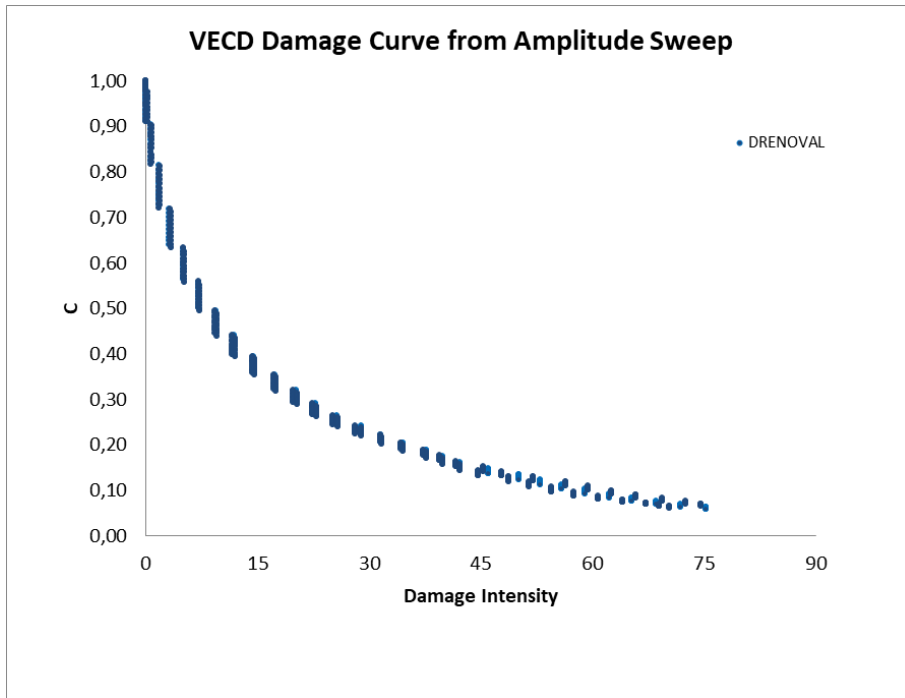


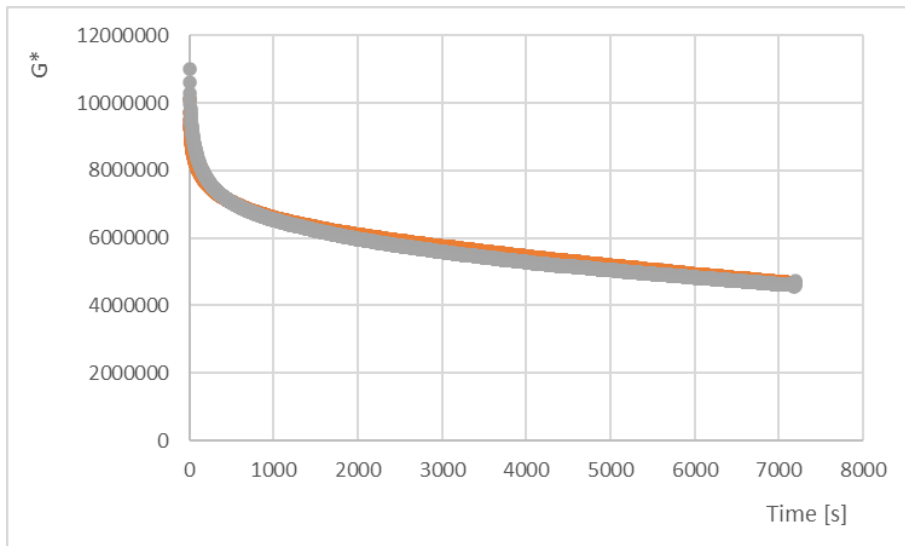
Figura 3.4 VECD Damage Curve from Amplitude Sweep

	2,5%			5,0%		
	1	2	3	1	2	3
DRENOVAL	226	164	260	22	16	23

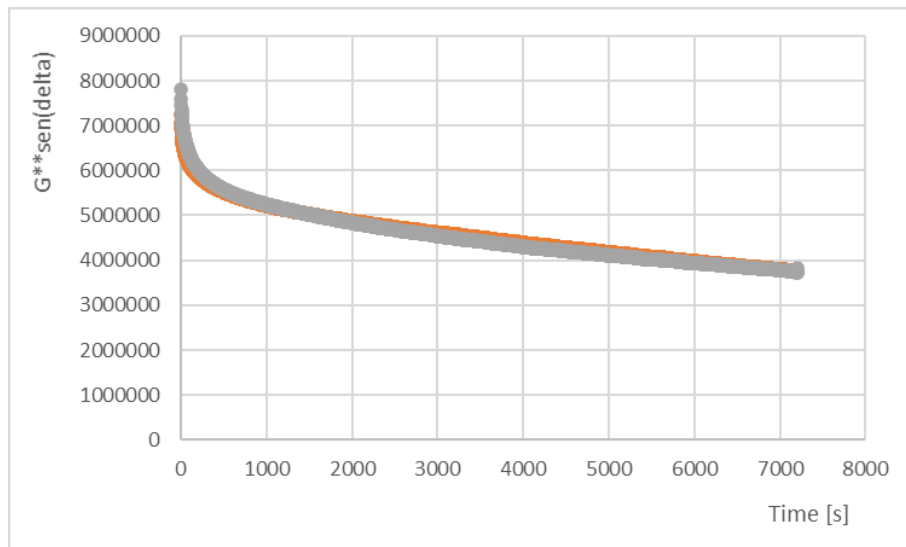
Tabella 2- Risultati prova LAS.

Fatica

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova di Fatica.



*Figura 3.5- G**



*Figura 3.6- G**sen(delta)*

3.2 – DRENOVAL PBT

In questo paragrafo vengono inseriti i dati del bitume Drenoval PBT:

CURVA MAESTRA

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova Frequency sweep, in Figura 3.7 viene illustrato il modulo dinamico mentre nella Figura 3.8 viene illustrato l'angolo di fase.

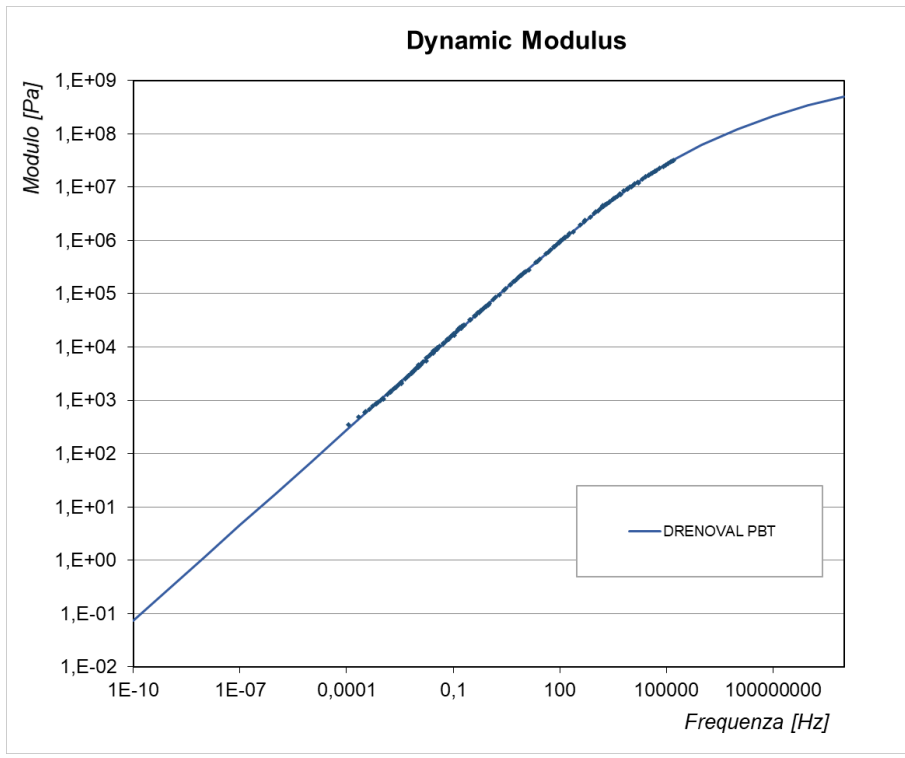


Figura 3.7- Curva maestra (G^*), Drenoval PBT

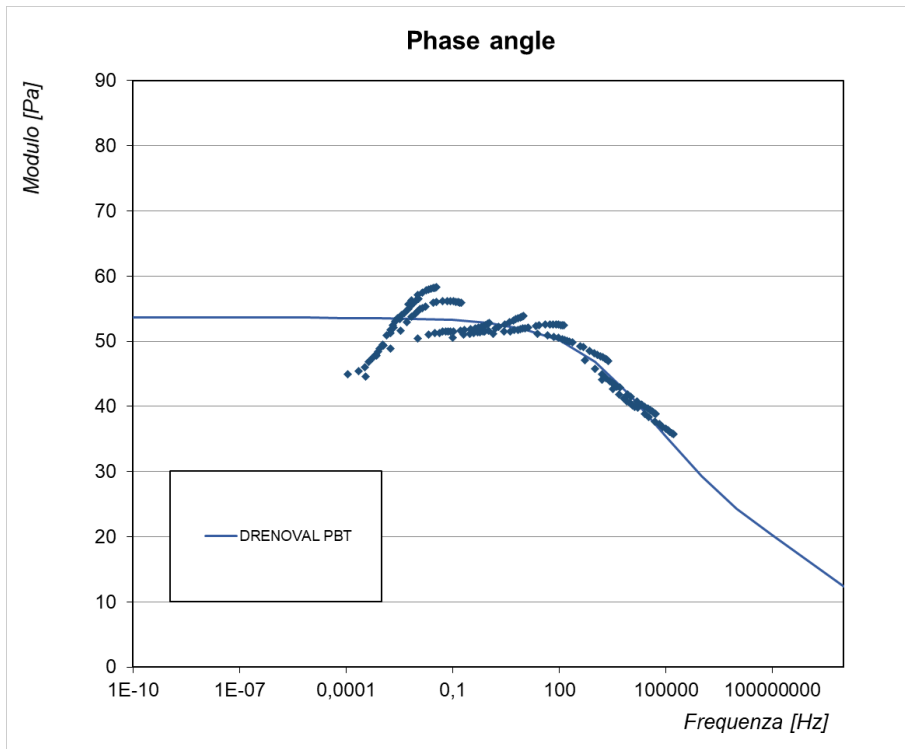


Figura 3.8- Curva maestra (δ), Drenoval

MSCR

In questa tabella vengono inseriti i risultati della prova MSCR.

DRENOVAL PBT						
T [°C]	70		76		82	
τ [kPa]	0,1	3,2	0,1	3,2	0,1	3,2
R	91,77	83,27	92,03	75,09	90,94	57,95
Jnr	0,09	0,2	0,13	0,48	0,21	1,39
Jnr diff	118,9		256,76		577,05	

Tabella 3- Risultati prova MSCR.

Dove:

- R è la media dei recuperi percentuali nei 10 cicli.
- Jnr è la media delle non-recoverable creep compliance dei 10 cicli.

LAS

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova LAS.

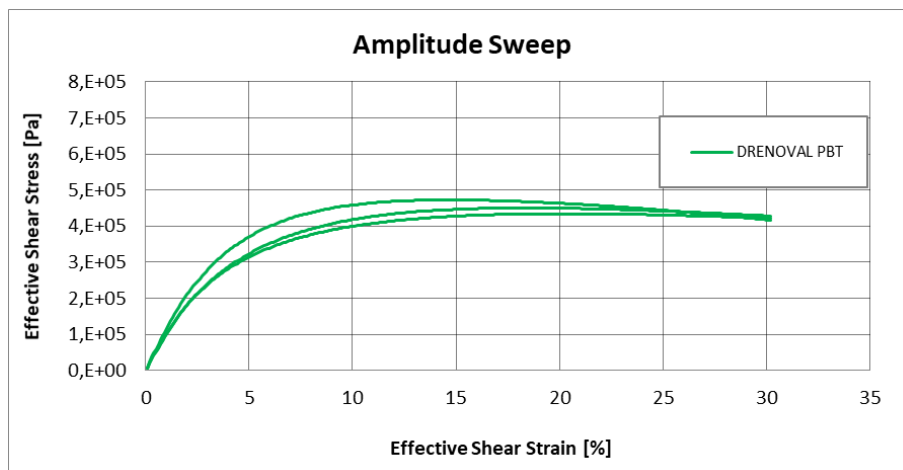


Figura 3.10- Amplitude Sweep.

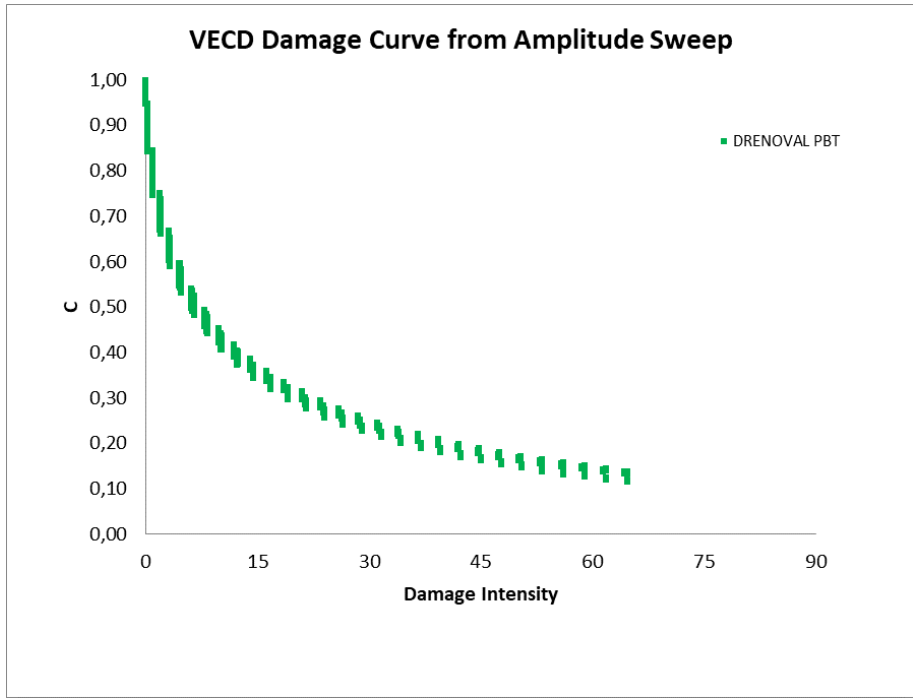


Figura 3.11 VECD Damage Curve from Amplitude Sweep

	2,5%			5,0%		
	1	2	3	1	2	3
DRENOVAL PBT	6905	2889	8114	476	186	618

Tabella 4- Risultati prova LAS.

Fatica

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova di Fatica.

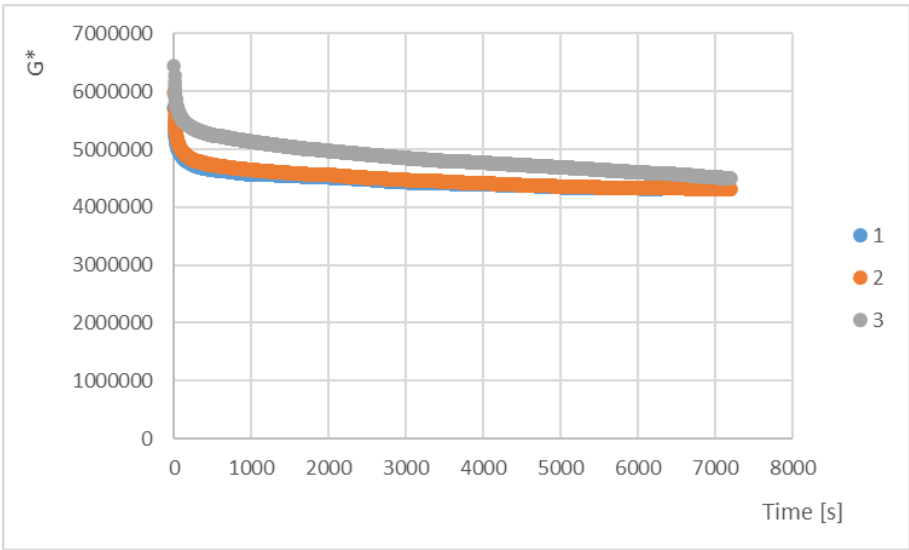


Figura 3.12- G*

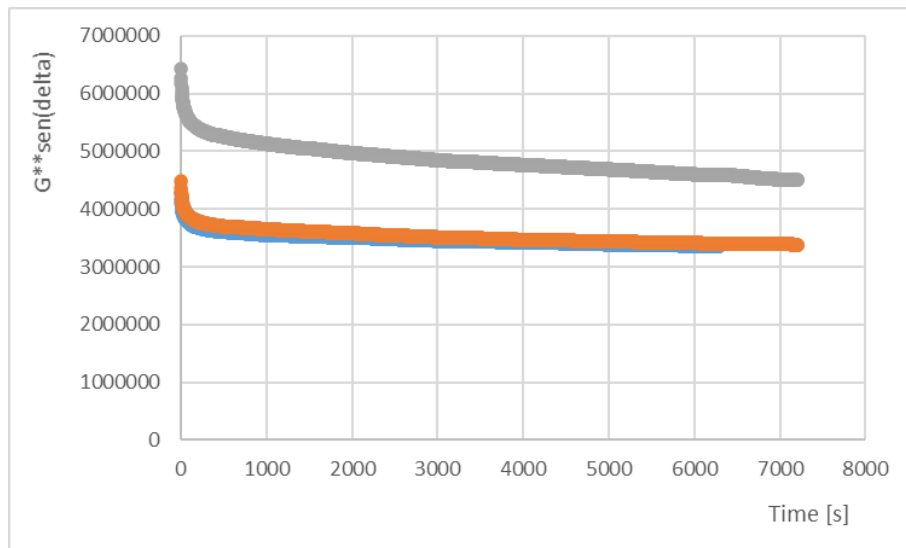


Figura 3.13- $G^{sen}(\delta)$**

3.3 – DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 5%

In questo paragrafo vengono inseriti i dati del bitume DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 5%:

CURVA MAESTRA

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova Frequency sweep, in Figura 3.14 viene illustrato il modulo dinamico mentre nella Figura 3.15 viene illustrato l'angolo di fase.

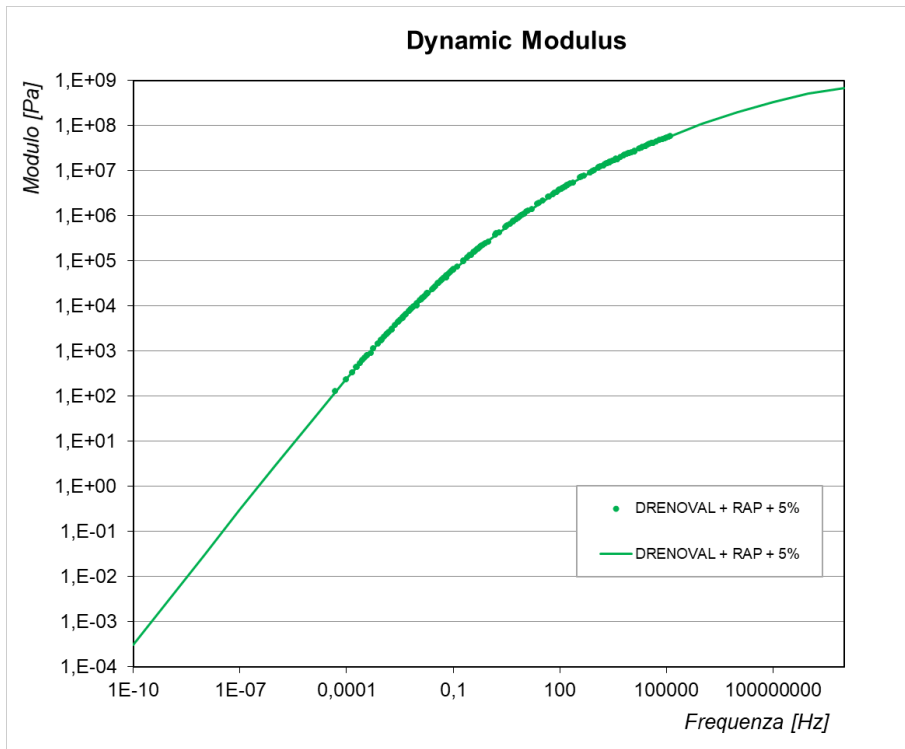


Figura 3.14- Curva maestra (G^*), DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 5%

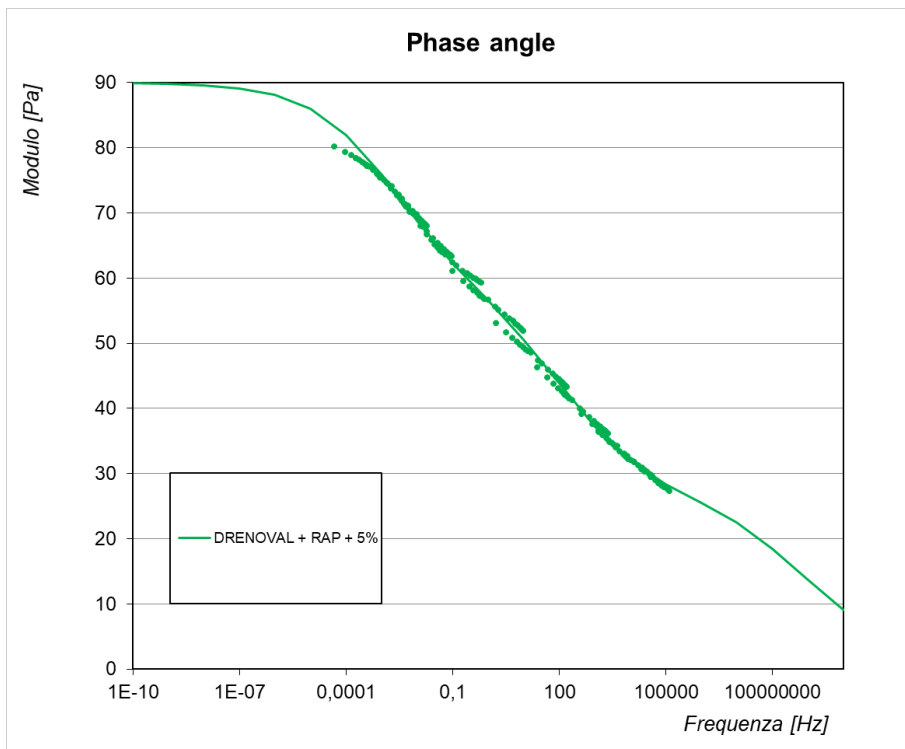


Figura 3.15- Curva maestra (δ), DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 5%

MSCR

In questa tabella vengono inseriti i risultati della prova MSCR.

DRENOVAL + RAP + 5%						
T [°C]	64		70		76	
τ [kPa]	0,1	3,2	0,1	3,2	0,1	3,2
R	45,74	35,16	46,00	29,01	40,94	21,05
Jnr	0,22	0,28	0,42	0,64	0,87	1,54
Jnr diff	27,69		52,2		76,20	

Tabella 5- Risultati prova MSCR.

Dove:

- R è la media dei recuperi percentuali nei 10 cicli.
- Jnr è la media delle non-recoverable creep compliance dei 10 cicli.

3.4 – DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 10%

In questo paragrafo vengono inseriti i dati del bitume DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 10%:

CURVA MAESTRA

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova Frequency sweep, in Figura 3.16 viene illustrato il modulo dinamico mentre nella Figura 3.17 viene illustrato l'angolo di fase.

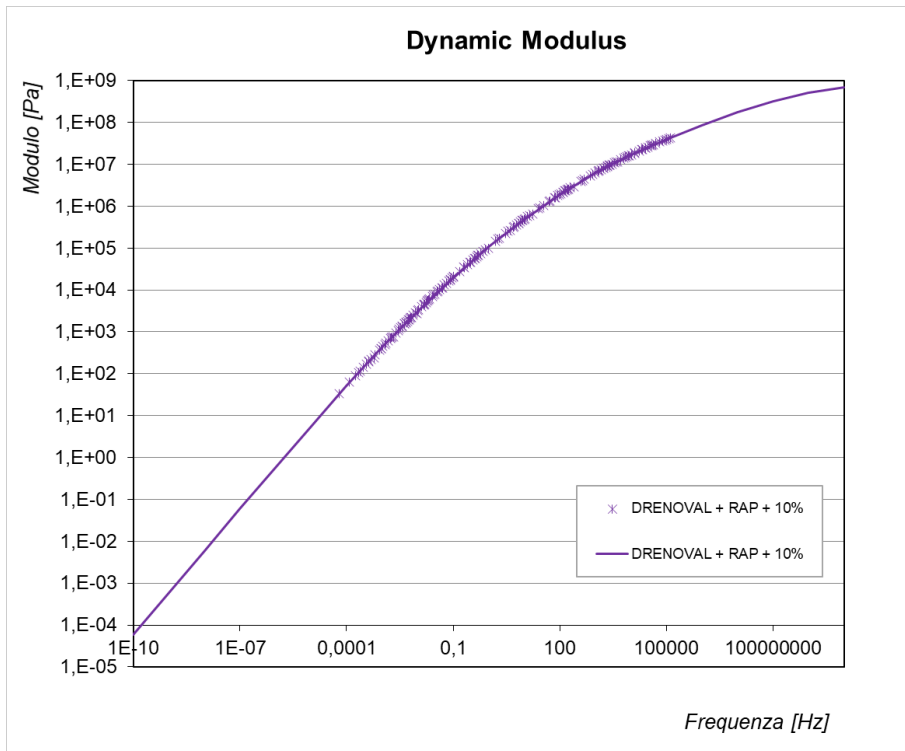


Figura 3.16- Curva maestra (G^*), DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 10%

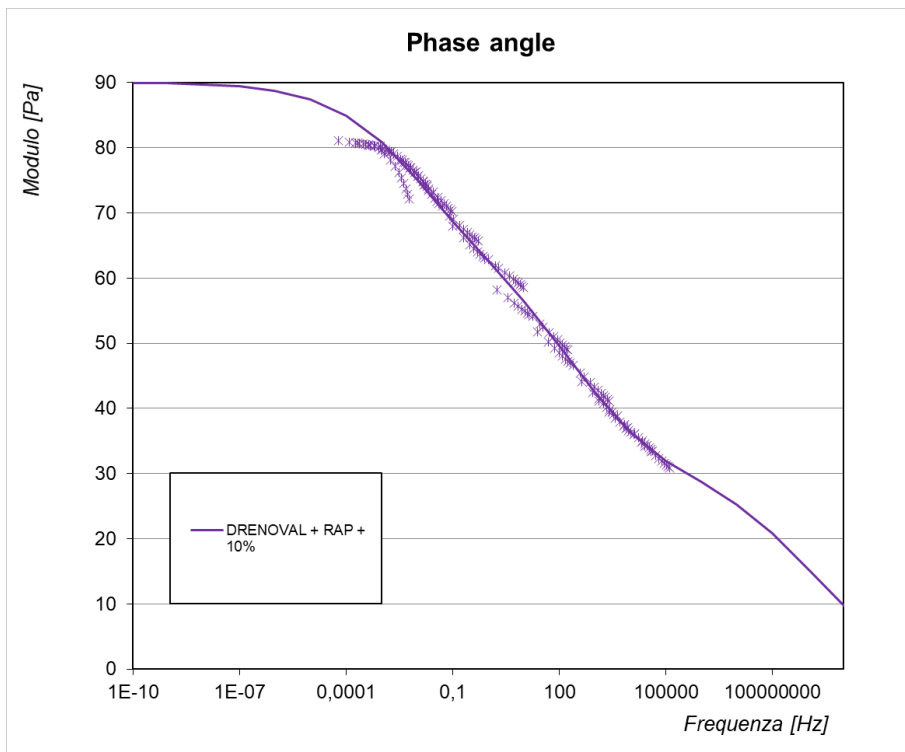


Figura 3.17- Curva maestra (δ), DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 10%

MSCR

In questa tabella vengono inseriti i risultati della prova MSCR.

DRENOVAL + RAP + 10%						
T [°C]	64		70		76	
τ [kPa]	0,1	3,2	0,1	3,2	0,1	3,2
R	40,38	26,96	40,75	19,49	31,52	57,76
Jnr	0,41	0,60	0,91	1,79	2,4	4,55
Jnr diff	45,47		97,06		89,62	

Tabella 6- Risultati prova MSCR.

Dove:

- R è la media dei recuperi percentuali nei 10 cicli.
- Jnr è la media delle non-recoverable creep compliance dei 10 cicli.

LAS

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova LAS.

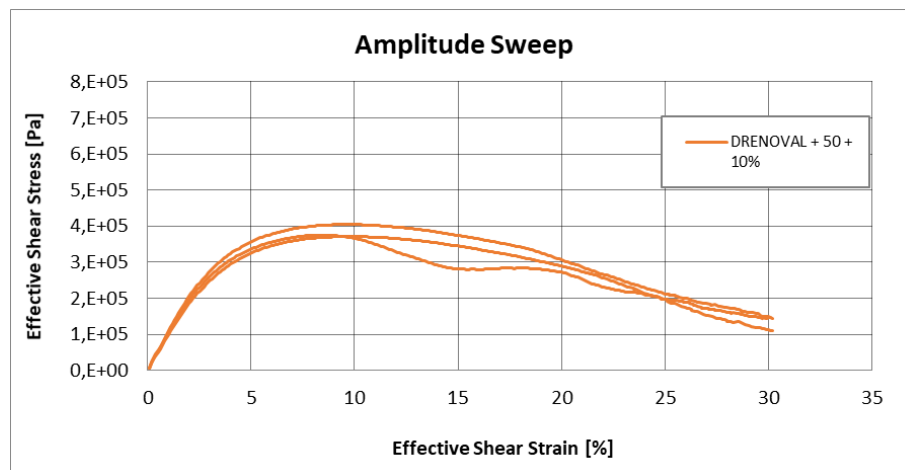


Figura 3.18- Amplitude Sweep.

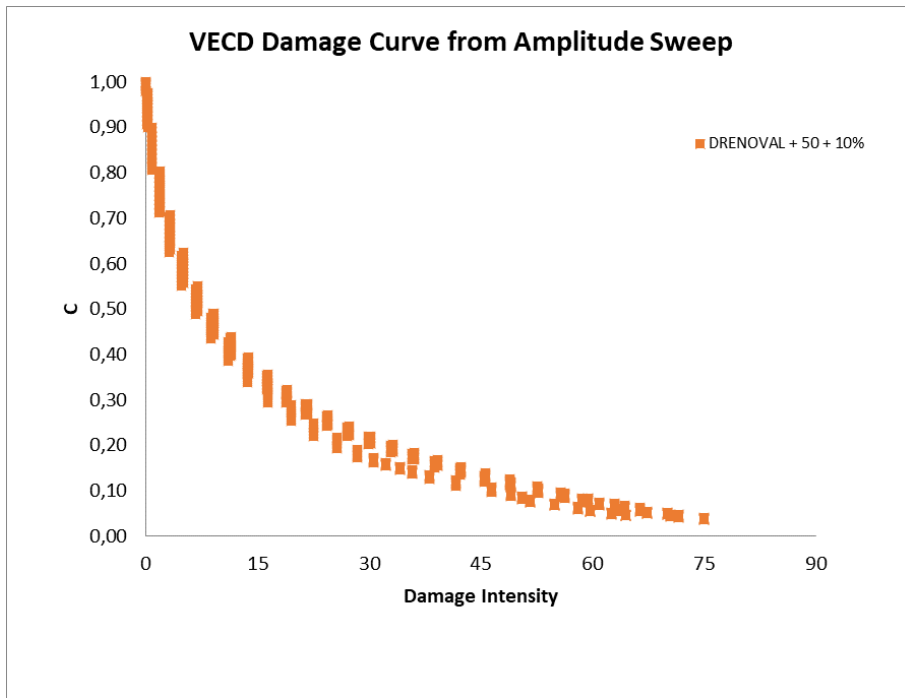


Figura 3.19- VECD Damage Curve from Amplitude Sweep

	2,5%			5,0%		
	1	2	3	1	2	3
DRENOVAL + 50 + 10%	129	389	354	9	29	25

Tabella 6- Risultati prova LAS.

Fatica

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova di Fatica.

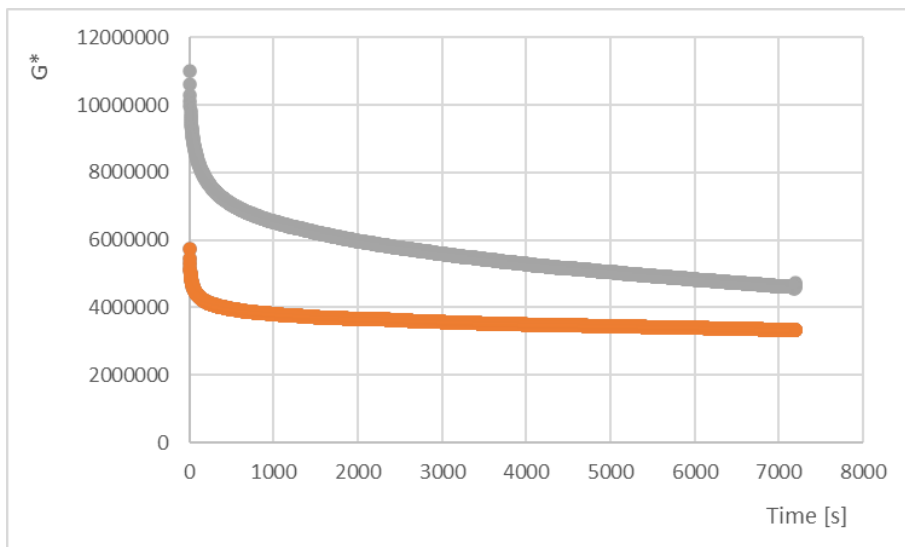


Figura 3.20- G*

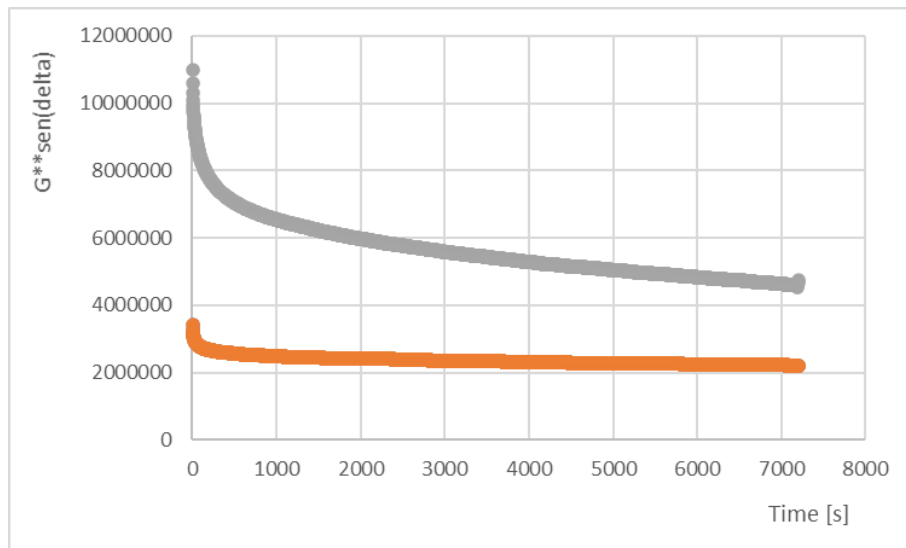


Figura 3.21- $G^{sen}(\delta)$**

3.5 – DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 15%

In questo paragrafo vengono inseriti i dati del bitume DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 15%:

CURVA MAESTRA

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova Frequency sweep, in Figura 3.22 viene illustrato il modulo dinamico mentre nella Figura 3.23 viene illustrato l'angolo di fase.

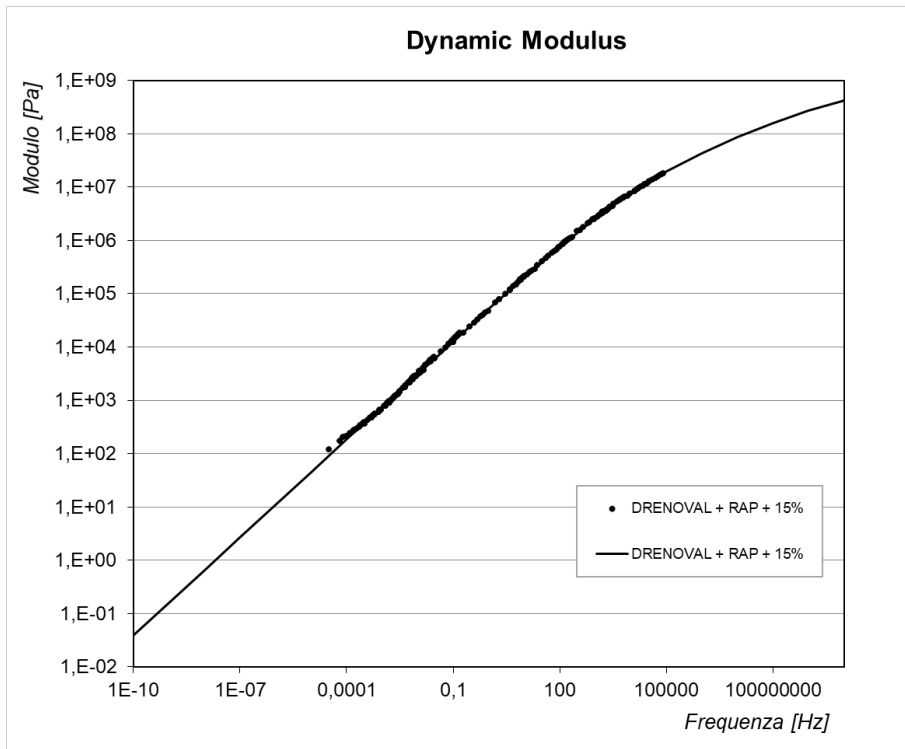


Figura 3.22- Curva maestra (G^*), DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 15%

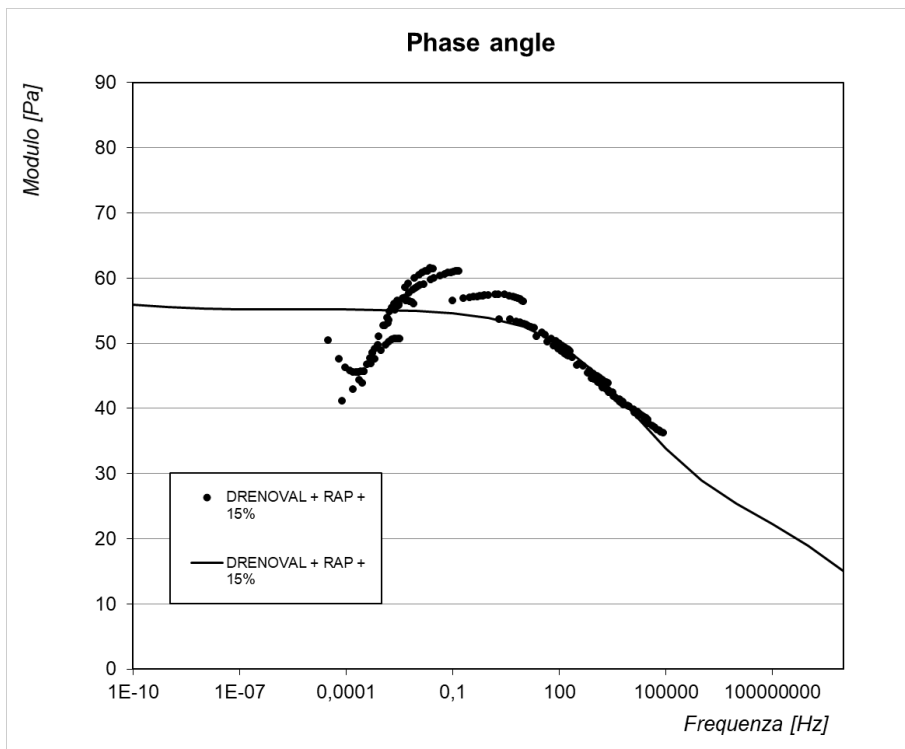


Figura 3.23- Curva maestra (δ), DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 15%

MSCR

In questa tabella vengono inseriti i risultati della prova MSCR.

DRENOVAL + RAP + 15%						
T [°C]	64		70		76	
τ [kPa]	0,1	3,2	0,1	3,2	0,1	3,2
R	84,66	55,29	81,41	24,83	74,34	3,58
Jnr	0,22	1,35	0,45	6,3	1,08	20,98
Jnr diff	527,46		1537,22		1837,03	

Tabella 7- Risultati prova MSCR.

Dove:

- R è la media dei recuperi percentuali nei 10 cicli.
- Jnr è la media delle non-recoverable creep compliance dei 10 cicli.

3.6– RIGENEREVAL PBT + BITUME ESTRATTO FRESATO

In questo paragrafo vengono inseriti i dati del bitume RIGENEREVAL PBT + BITUME ESTRATTO FRESATO:

CURVA MAESTRA

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova Frequency sweep, in Figura 3.24 viene illustrato il modulo dinamico mentre nella Figura 3.25 viene illustrato l'angolo di fase.

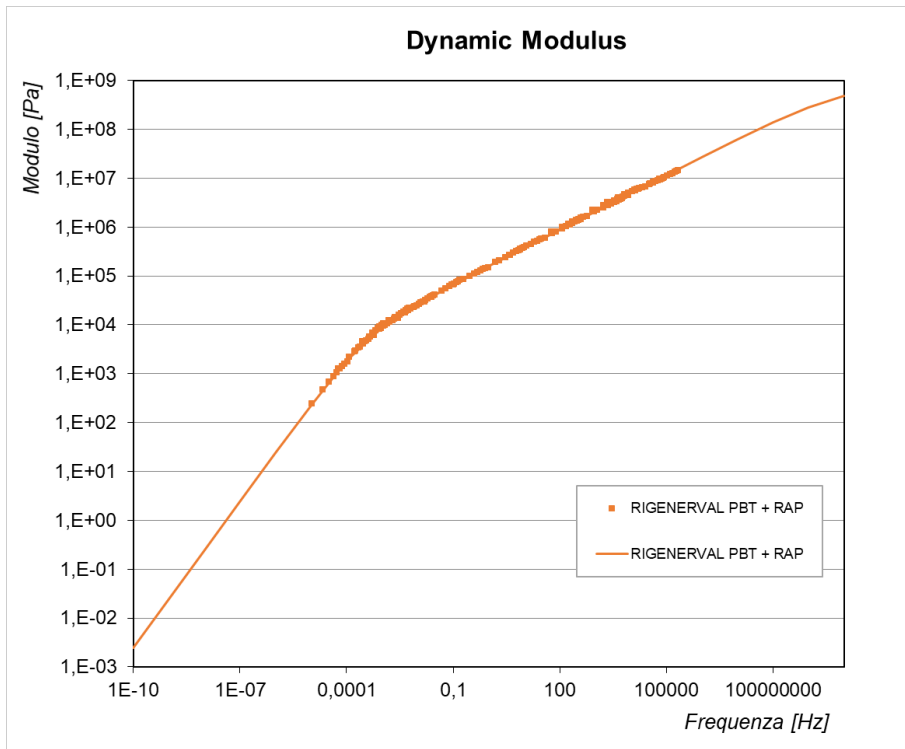


Figura 3.24- Curva maestra (G^*), RIGENERVAL PBT + BITUME ESTRATTO FRESATO

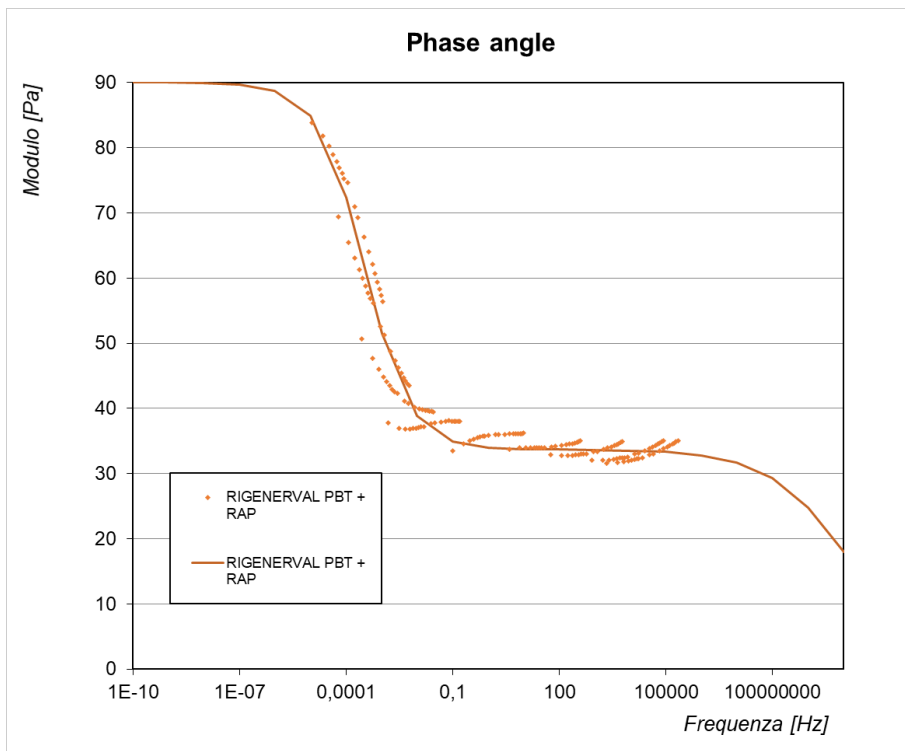


Figura 3.25- Curva maestra (δ), RIGENERVAL PBT + BITUME ESTRATTO FRESATO

MSCR

In questa tabella vengono inseriti i risultati della prova MSCR.

RIGENERVAL PBT + RAP						
T [°C]	70		76		82	
τ [kPa]	0,1	3,2	0,1	3,2	0,1	3,2
R	79,56	59,59	62,54	30,79	47,61	17,14
Jnr	0,03	0,09	0,11	0,37	0,3	1,04
Jnr diff	246,14		241,95		249,05	

Tabella 8- Risultati prova MSCR.

Dove:

- R è la media dei recuperi percentuali nei 10 cicli.
- Jnr è la media delle non-recoverable creep compliance dei 10 cicli.

LAS

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova LAS.

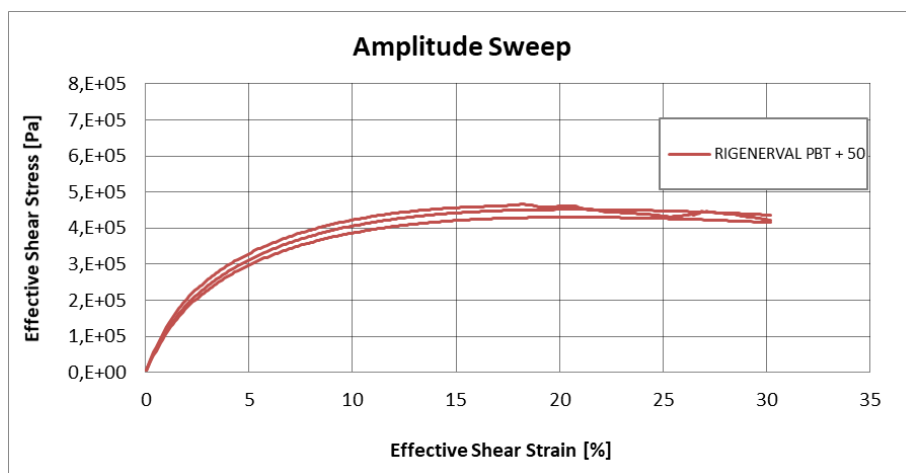


Figura 3.26- Amplitude Sweep.

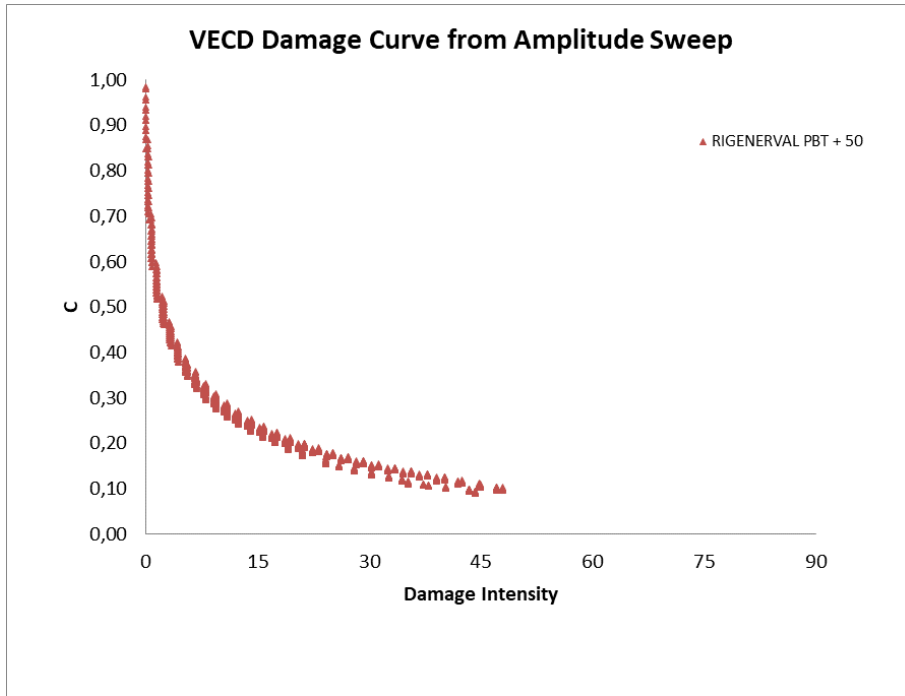


Figura 3.27- VECD Damage Curve from Amplitude Sweep

	2,5%			5,0%		
	1	2	3	1	2	3
RIGENERVAL PBT + 50	74836	26487	70545	955	412	942

Tabella 9- Risultati prova LAS.

Fatica

Nei seguenti grafici vengono illustrati i risultati della prova di Fatica.

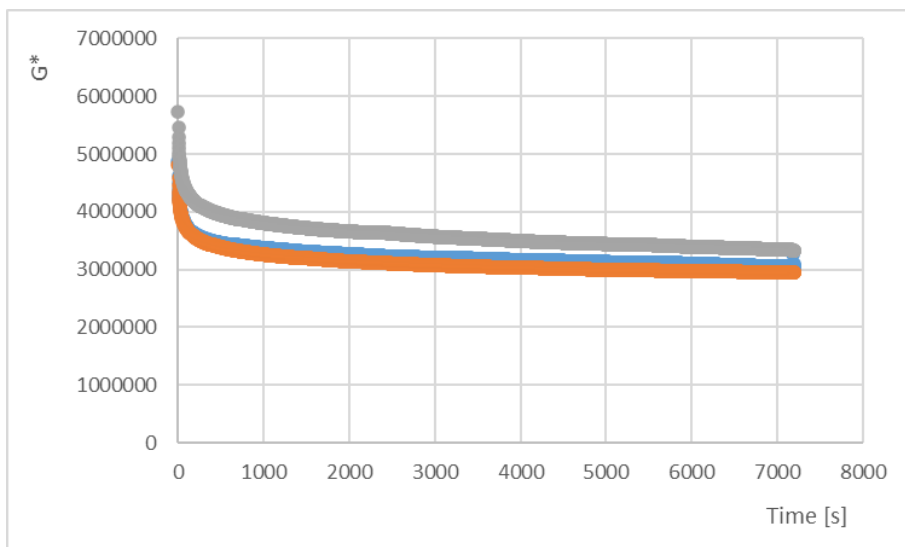
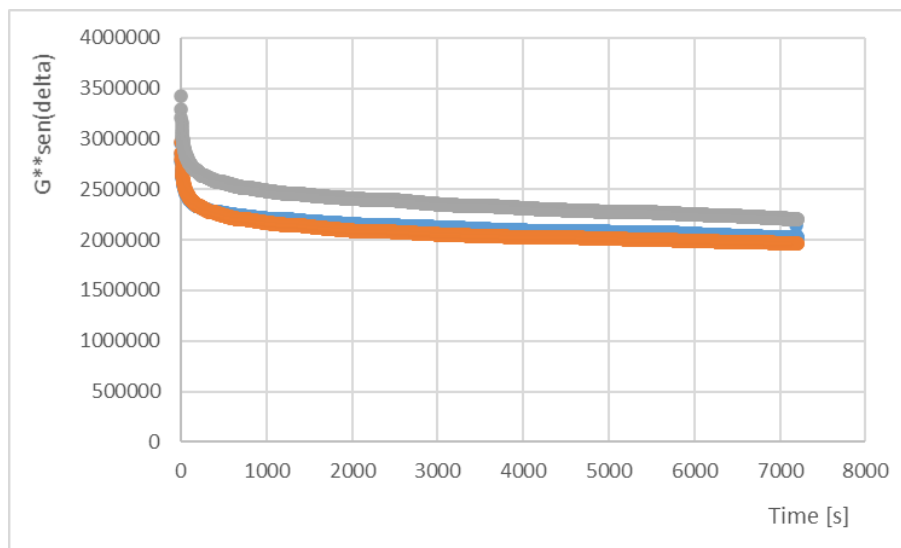


Figura 3.28- G*



*Figura 3.29- G**sen(delta)*

3.7 - Scelta della percentuale ottimale di additivo (grafici di confronto tra i primi 4 bitumi e foglio excel di scelta % additivo).

In questo paragrafo si illustra il procedimento seguito per la valutazione della scelta del percentuale ottimale dell'additivo, questo si fa analizzando i risultati ottenuti dalla prova Frequency sweep e MSCR.

Frequency sweep

In figura 3.30 si evidenzia l'andamento del modulo in funzione di frequenza, in particolare, sono disegnate le quattro curve maestre dei tre materiali con dosaggio di additivo e quello senza additivo, la differenza in ogni punto fra la retta blu (Drenoal) e le altre tre mi da quanto si discosta dal bitume originale.

In particolare, se noi dividiamo questo grafico in due parti, la parte di destra alle basse temperature, in questa parte noi vogliamo trovare il valore minimo dell'additivo perché noi vogliamo di mantenere, alle basse temperature, il modulo uguale o inferiore a quello del bitume originale.

Quindi se noi facciamo tutte le differenze alle tre temperature come si vede in (tabella 10), e andiamo mettere i punti nel grafico (figura 3.31) otteniamo la retta blu a 5% 10% e 15%, laddove interseca l'asse di ascisse ottengo il valore minimo dell'additivo che è poco prima di 10.

A sinistra del grafico abbiamo le alte temperature, dove vogliamo che il modulo non sia troppo basso perché se è troppo basso ho problemi di deformabilità; quindi, anche qui facendo tutte le differenze e riportando nel grafico (figura 3.31) otteniamo la retta rossa e dall'intersezione della retta rossa con le assi delle ascisse otteniamo il valore massimo dell'additivo oltre il quale avremmo problemi con la deformabilità.

Il problema sta nel drenoval con 15% di additivo che si vede in figura 3.30 con la linea nera sta sopra il drenoval originale che in realtà non può essere perché mi dice che è più rigido rispetto a quando non metti l'additivo il che è impossibile, si vede che in figura 3.31 la retta rossa non è molto affidabile per questo noi escludiamo il punto di 15%.

Una volta che abbiamo le due rette blu e rossa otteniamo il valore minimo che deve essere maggiore di 9,8 e il valore massimo che deve essere maggiore di 10,3, quindi abbiamo scelto una percentuale di additivo di 10% analizzando i risultati ottenuti dalla prova Frequency sweep.

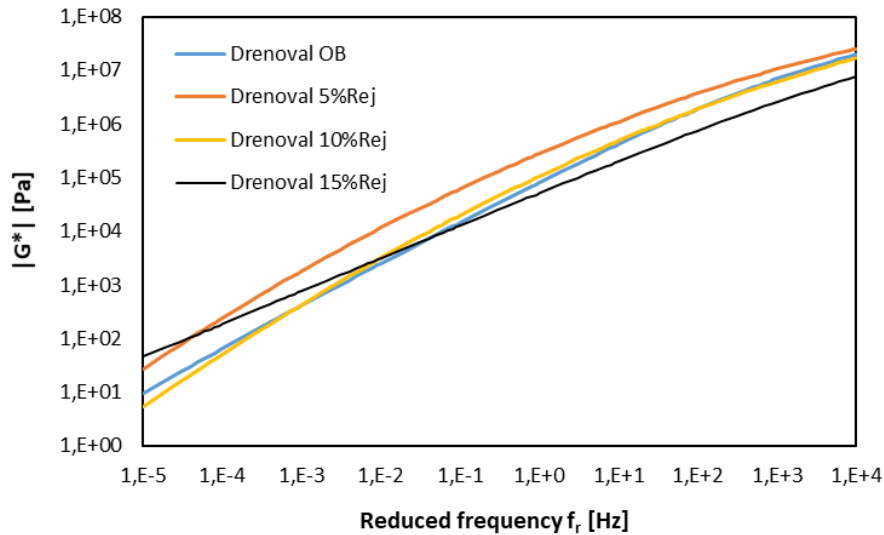


Figura 3.30

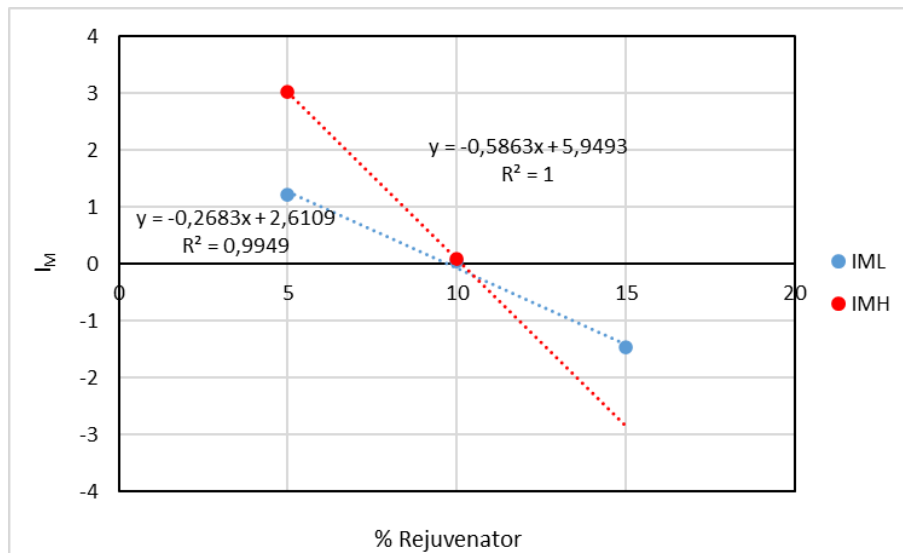


Figura 3.31

% Rej.	5	10	15
I_{MH}	3,017845	0,086396	0,990092
I_{ML}	1,213941	0,038251	-1,46938
	0,142834	-0,06678	0,192838
	0,088133	-0,0337	0,103243
	0,064563	-0,02147	0,069107
	0,051225	-0,01525	0,051282
	0,042587	-0,01154	0,040417
	0,036513	-0,00912	0,033144
	0,032	-0,00742	0,027957
	0,028507	-0,00618	0,024083
	0,025721	-0,00524	0,021089
	0,17414	-0,02771	0,128308
	0,105663	-0,01083	0,066784
	0,076514	-0,00533	0,043786

Tabella 10

MSCR

Dalla prova MSCR i parametri che si tirano fuori sono R e Jnr le quali le abbiamo per carichi di 0.1 kpa e 3.2 kpa alle tre temperature di prova.

- R è la media di recuperi percentuali in 10 cicli di carico e scarico per ogni temperatura.
- Jnr è la media di quanto non ha recuperato durante tutti i 10 cicli di carico e Scarico per ogni temperatura.

Noi vogliamo che quando mettiamo l'additivo, esso non renda il bitume tanto deformabile; quindi, andiamo a vedere quale Jnr al carico di 3.2 kpa è simile al Jnr al carico di 3.2 kpa del Drenoval originale senza additivo.

In tabella 11 si vede il Jnr3.2 per ogni temperatura per Drenoval e per le tre percentuali di additivo e si ha anche la ΔJnr per ogni bitume.

Quando ΔJnr è negativo vuol dire che si deforma di meno rispetto al Drenoval e quando è positivo vuol dire che si deforma di più rispetto al Drenoval.

Se per i tre dosaggi e le tre temperature mettiamo tre linee di tendenza (figura 3.32) abbiamo che l'intersezione di tale linea con l'asse delle ordinate rappresenta il valore massimo di additivo da inserire, se andiamo oltre il materiale si deformerebbe troppo.

Si vede nella figura 3.32 che tutti e tre intersecano a una percentuale di 11.3.

	64 °C		70 °C		76 °C	
	Jnr_3,2	ΔJnr	Jnr_3,2	ΔJnr	Jnr_3,2	ΔJnr
DRENOVAL	0,74	0	2,48	1,74	7,53	6,79
DRENOVAL + RAP + 5%	0,28	-0,46	0,64	-1,84	1,54	-5,99
DRENOVAL + RAP + 10%	0,60	-0,14	1,79	-0,69	4,55	-2,98
DRENOVAL + RAP + 15%	1,35	0,61	6,3	3,82	20,98	13,45

Tabella 11

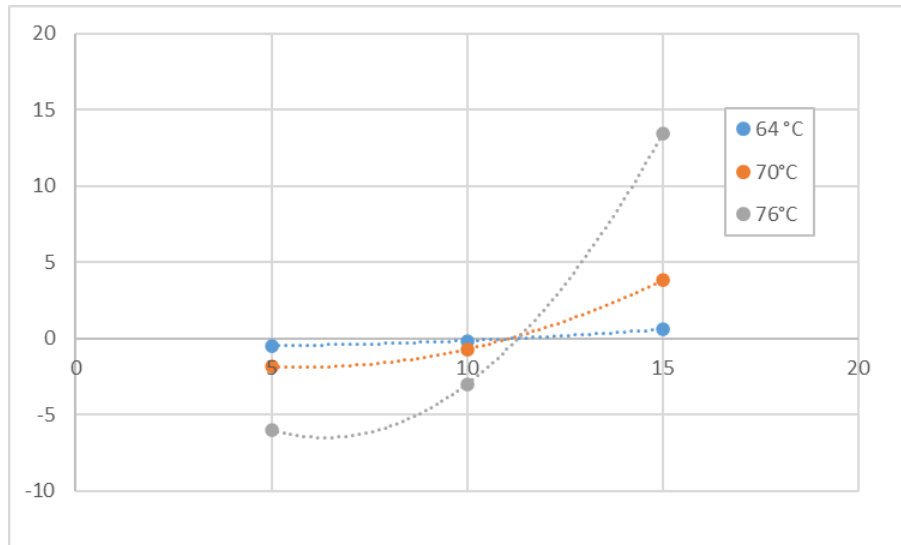


Figura 3.32

Dalla prova Frequency sweep si è visto che la percentuale giusta è intorno al 10% e con la prova MSCR la percentuale che non dobbiamo superare è di 11.3%. Perciò si è deciso scegliere come percentuale ottimale quella del 10%

3.8 - Confronto DRENOVAL vs DRENOVAL PBT

In questo paragrafo si fa un confronto dei risultati ottenuti dalle prove fatte sul Drenoval e dalle prove fatte sul Drenoval PBT.

Curva maestra

Confrontando le due curve maestre di Drenoval è Drenoval PBT possiamo osservare che:

- Il Drenoval è meno rigido alle basse temperature e più rigido alle alte temperature. Tale comportamento è ottimale perché alle basse temperature è meno fragile e alle alte temperature è più rigido resistendo e resiste meglio all'ormaiamento.
- Nel grafico dell'angolo di fase si vede che Drenoval PBT alle alte temperature soprattutto garantisce elasticità. Il plateau (tipico dei bitumi modificati) il Drenoval ce l'ha a 70°C mentre Drenoval PBT ce l'ha a 50°C. Tale comportamento scongiura sicuramente il problema dell'ormaiamento.

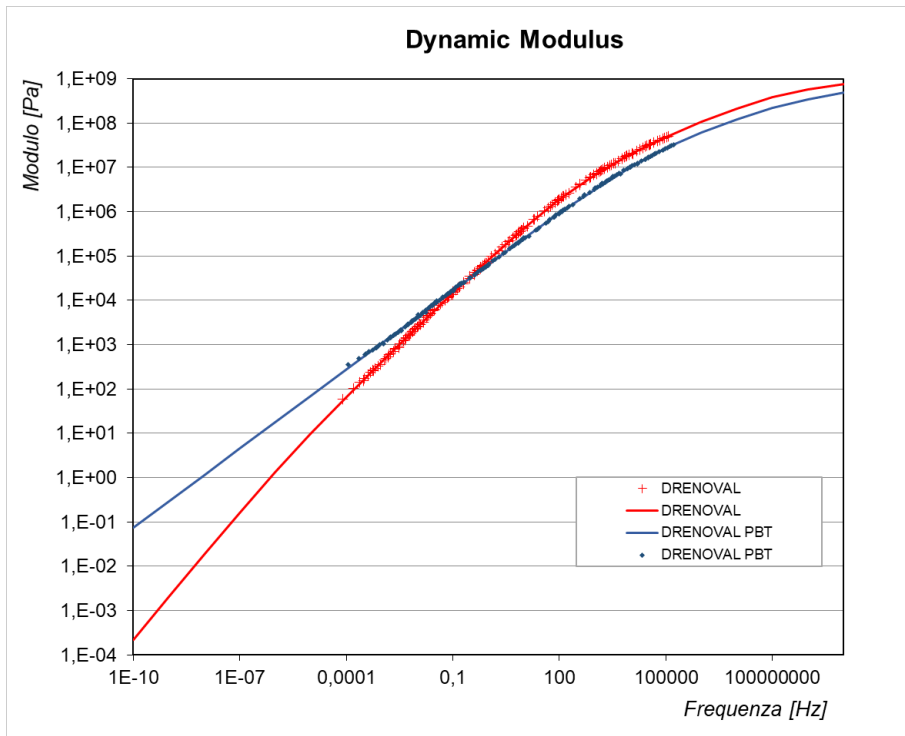


Figura 3.33- Curva maestra (G^*), Drenoval vs Drenoval PBT.

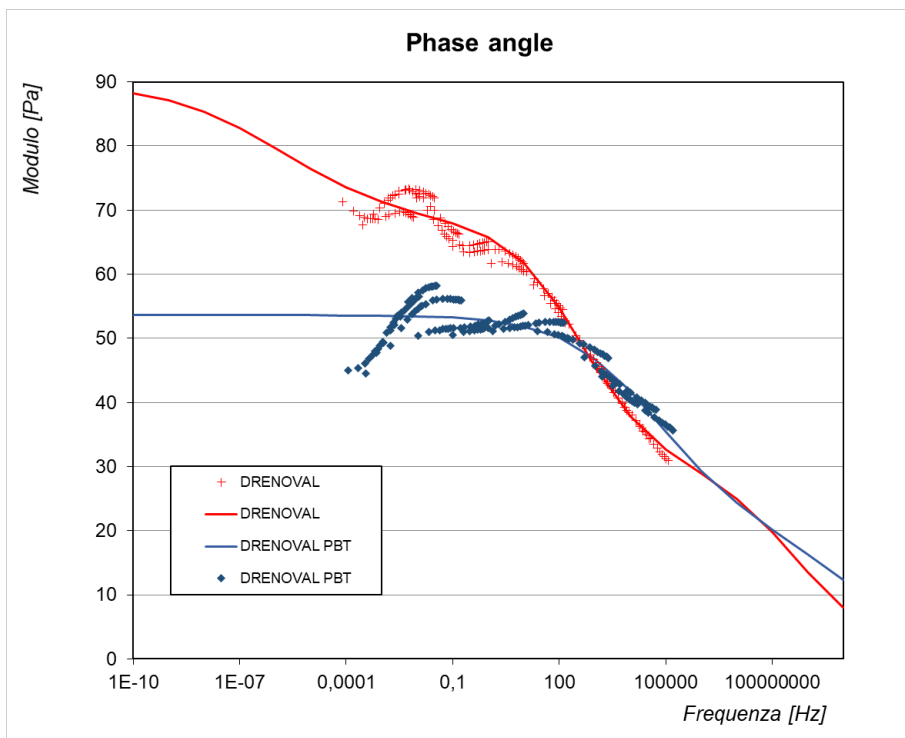


Figura 3.34- Curva maestra (δ), Drenoval vs Drenoval PBT

MSCR

Dalle prove MSCR si può dedurre che:

- Jnr del Drenoval è sempre maggiore di quello del Drenoval PBT ad ogni condizione di temperatura e carico. Drenoval PBT, quindi, risulta meno deformabile alle alte temperature avendo perciò maggiori performance alle alte temperature.
- Inoltre, il recupero R del Drenoval PBT è sempre maggiore di quello del Drenoval tradizionale, cioè il bitume contenente un maggior quantitativo di bitume recupera ad ogni condizione di temperatura e carico sempre più rispetto al tradizionale.

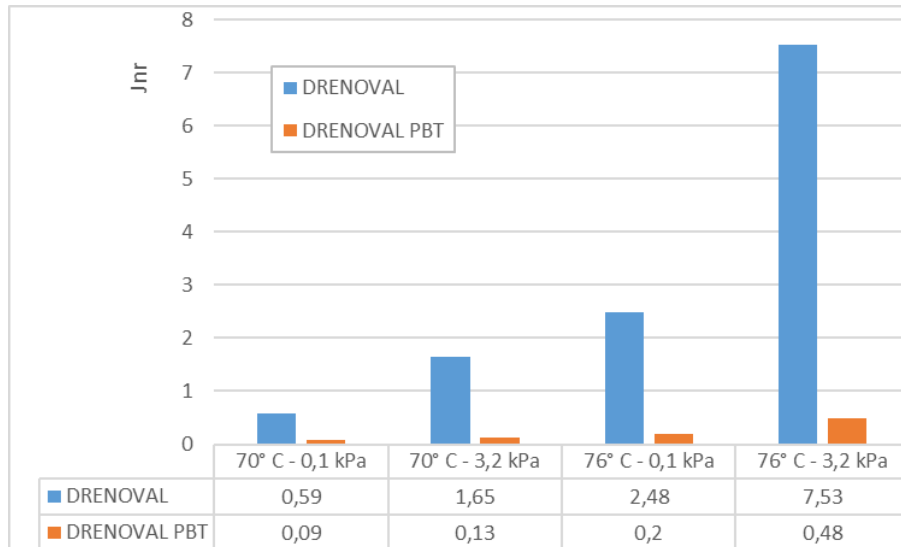


Figura 3.35, Jnr

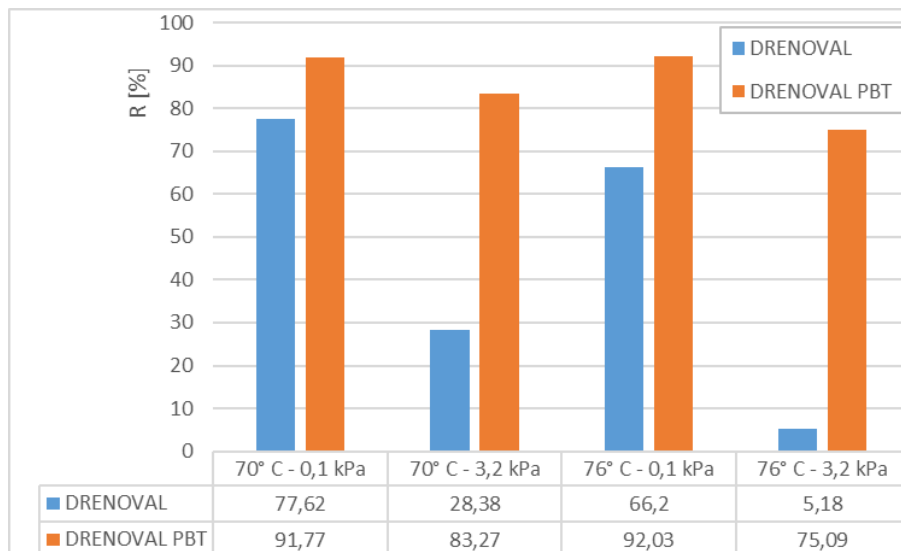


Figura 3.36, R(%)

LAS

Dalle prove LAS si osserva che:

1. Osservando il grafico Sforzo-Deformazione, si nota come il Drenoval ha il classico picco a seguito del quale i valori tendono a decrescere anche se con una discreta aliquota di resistenza post picco.
2. Il Drenoval PBT ha un comportamento migliore, in quanto, dopo la rottura, ha un grande riserva di energia legata alla grandissima elasticità del materiale.
3. La differenza dell'aumento della percentuale di polimero si nota anche dal numero di cicli a fatica. In tutti i campioni i cicli di PBT sono sempre maggiori rispetto al Drenoval tradizionale.

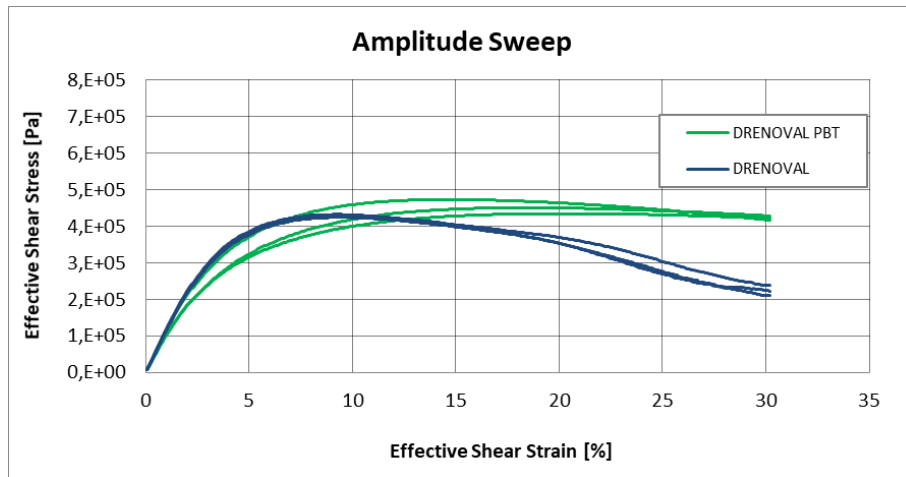


Figura 3.37- Amplitude Sweep.

	2,5%			5,0%		
	1	2	3	1	2	3
DRENOVAL PBT	6905	2889	8114	476	186	618
DRENOVAL	226	164	260	22	16	23

Figura 3.38

Prove di Fatica

Per confrontare i risultati di due materiali ottenuti da questa prova abbiamo normalizzato il modulo rispetto al modulo iniziale. Graficando il modulo normalizzato rispetto al numero dei cicli possiamo notare che:

1. Il Drenoval PBT è quello che si comporta meglio, dopo un calo iniziale i valori si assestano sui 0.7 rispetto al modulo iniziale.
2. Nell Drenoval c'è il calo iniziale poi continua a calare finno a valori di sotto a 0.5 del modulo iniziale.

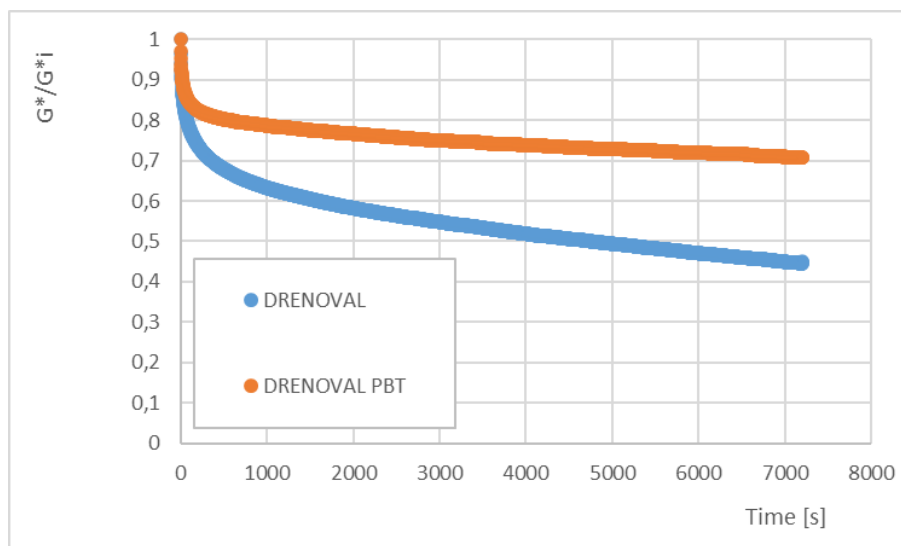


Figura 3.39, G^*/G^*i

3.9 - Confronto RIGENEREVAL PBT + BITUME ESTRATTO FRESATO vs DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 10%

In questo paragrafo si fa un confronto dei risultati ottenuti dalle prove fatte sul RIGENEREVAL PBT + BITUME ESTRATTO FRESATO e quelle fatte sul DRENOVAL + BITUME ESTRATTO FRESATO + 10%

Curva maestra

Gli effetti dovuti all'aumento del polimero si notano anche in questo caso, in particolare:

- Sulle curve maestre del modulo complesso si vede che Rigenerval PBT +Rap è meno rigido alle basse temperature e più rigido alle alte temperature.
- Sulle curve maestre dell'angolo di fase si nota come il plateau del Rigenerval PBT è molto basso intorno ai 35 gradi e il problema al ormaiamento non c'è, anche se, aumentando ulteriormente la temperatura, l'angolo di fase tende a ri-aumentare fino a valori prossimi a 90 gradi.
- Il drenoval + 10% di additivo non ha proprio il plateau, si osserva quindi che il bitume del fresato (nonostante provenga da una pavimentazione realizzata con conglomerato bituminoso modificato, ha perso il plateau (tipico del bitume modificato) in quanto il polimero si è degradato e, anche aggiungendo bitume con modificato hard, il plateau non si riesce a ripristinare. La modifica hard non è in grado di ripristinare la degradazione avuta dal bitume modificato del bitume del RAP.

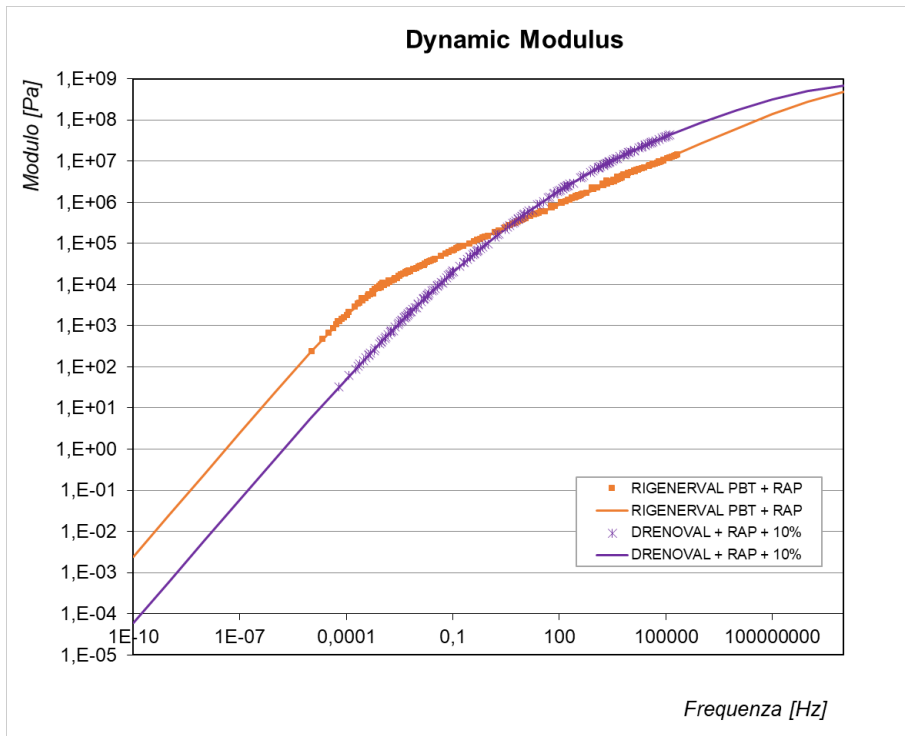


Figura 3.40- Curva maestra (G^*), Drenoval vs Drenoval PBT.

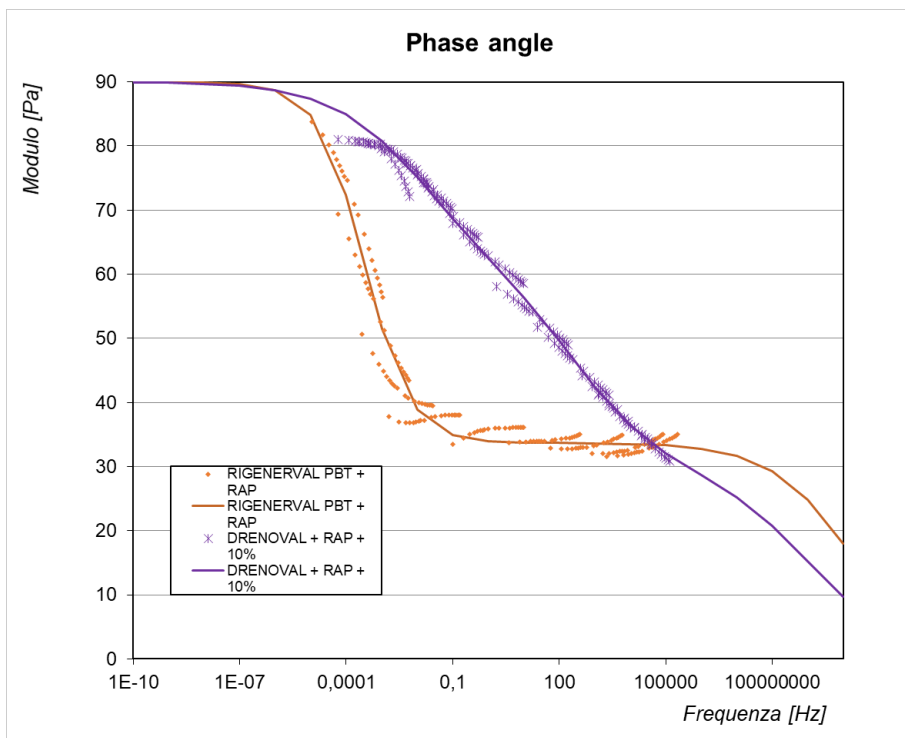


Figura 3.41- Curva maestra (δ), Drenoval vs Drenoval PBT

MSCR

Dalle prove MSCR si osserva che:

- Jnr del Drenoval+ 50% RAP + 10% additivo è sempre maggiore del materiale realizzato con bitume superhard, ad ogni condizione di temperatura e carico. Cioè il Rigenerval PBT+ RAP è meno deformabile alle alte temperature, ha perciò maggior performance alle alte temperature.
- Il recupero R è sempre minore quello del Drenoval+ 50% RAP + 10% additivo, cioè esso recupera ad ogni condizione sempre meno rispetto al Rigenerval PBT+ RAP.

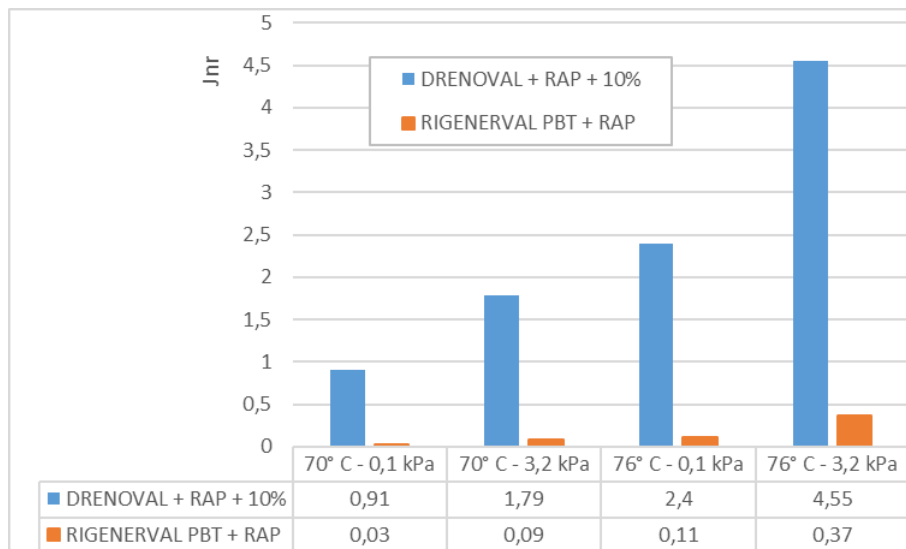


Figura 3.42, Jnr

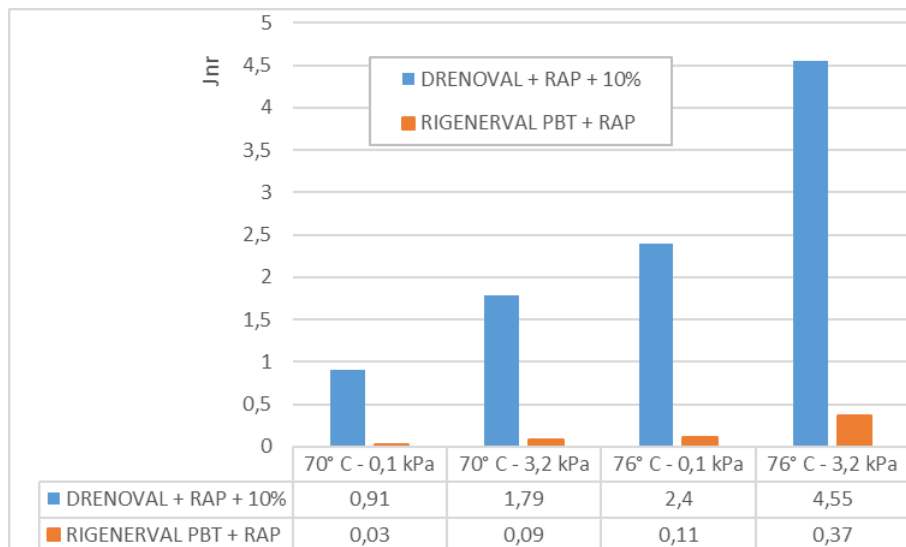


Figura 3.43, R (%)

LAS

Dalle prove LAS possiamo osservare che:

Il Drenoval + 50%RAP + 10% additivo ha il classico picco a seguito del quale i valori tendono a decrescere anche se con una discreta aliquota di resistenza post picco.

- Il Rigenerval PBT + 50%RAP ha un comportamento migliore dopo la rottura ha un grande riserva di energia questa legata alla grandissima elasticità del materiale.

La differenza tra Rigenerval PBT e Drenoval + 50%RAP+ 10% additivo si vede anche dal numero di cicli a fatica. In tutti i campioni i cicli di PBT sono sempre maggiori rispetto al Drenoval + 50%RAP+ 10% additivo.

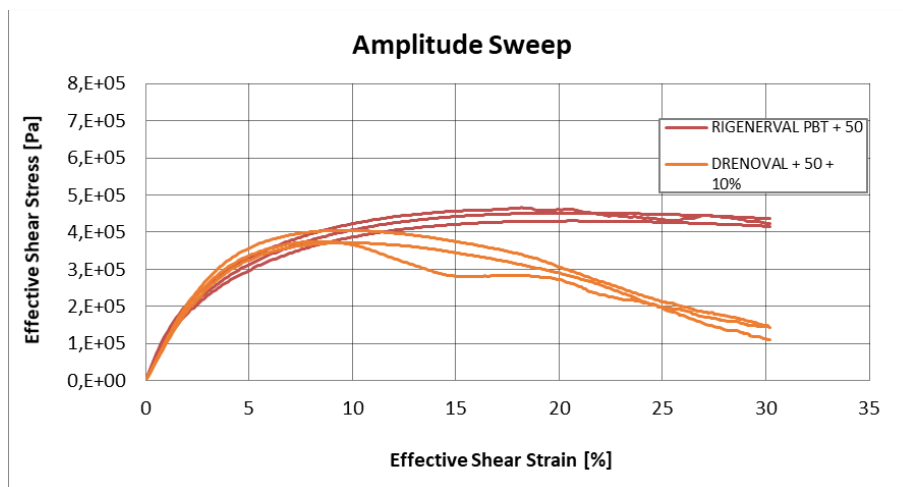


Figura 3.44- Amplitude Sweep.

	2,5%			5,0%		
	1	2	3	1	2	3
RIGENERVAL PBT + 50	74836	26487	70545	955	412	942
DRENOVAL + 50 + 10%	129	389	354	9	29	25

Figura 3.45

Prove di Fatica

Dalle prove di fatica, normalizzando il modulo rispetto a quella iniziale, possiamo concludere che:

Rigenerval PBT + RAP è quello che si comporta meglio, dopo un calo iniziale i valori si assestano sui 0.6 rispetto al modulo iniziale.

- Nel Drenoval + RAP + 10% additivo c'è il calo iniziale, per poi continuare a calare fino a valori di 0.5 del modulo iniziale.

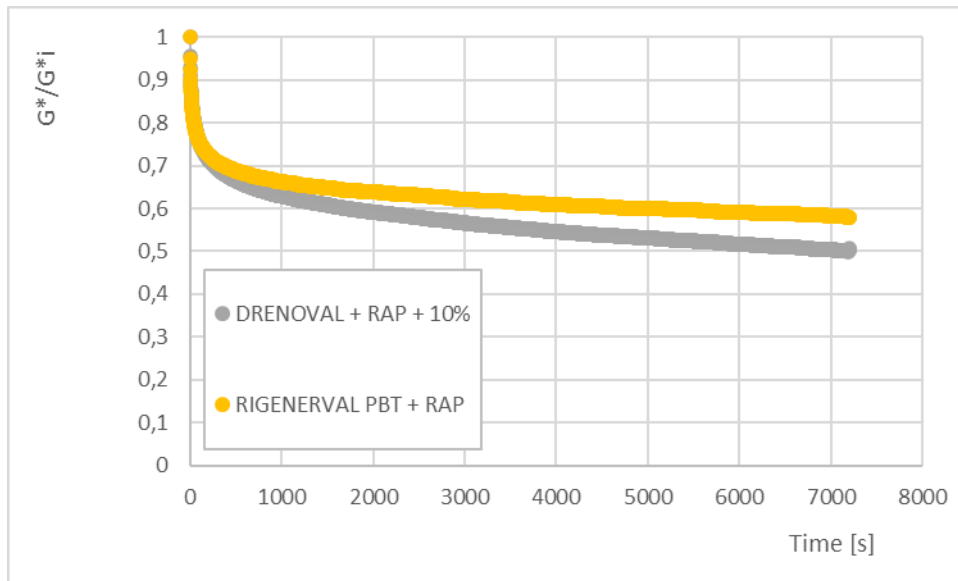


Figura 3.46, G^/G^*_i*

Conclusioni

L'intera campagna sperimentale si è svolta nel Laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Ancona.

Al fine di ottenere gli obiettivi prefissati sono stati prodotti e testati i seguenti materiali.

- Drenoal
- Drenoal PBT
- Rig + 50% RAP
- Dren+50% RAP+5%A
- Dren+50% RAP+10%A
- Dren+50% RAP+15%A

In questa tesi ricordiamo che gli obiettivi erano quelli di vedere quelli di valutare l'effetto di un aumento della % di modifica sul bitume modificato hard confrontando i bitumi Drenoal e Drenoal PBT, e valutare il comportamento del bitume modificato hard e superhard quando miscelato con bitume invecchiato proveniente dal fresato, confrontando Rigenerval + 50% RAP con Drenoal + 50% RAP e la percentuale di additivi tale da ottenere caratteristiche confrontabili con il Drenoal hard.

In particolare, attraverso tutte le prove effettuate in questa sperimentazione possiamo concludere che:

Nella miscela di Drenoal +50%RAP aggiungendo 10% di additivo si arriva meglio alle caratteristiche di Drenoal.

Il Drenoal è meno rigido alle basse temperature e più rigido alle alte temperature, nel grafico dell'angolo di fase si vede che Drenoal PBT alle alte temperature soprattutto garantisce elasticità.

Inoltre, il recupero del Drenoal PBT è sempre maggiore di quello del Drenoal tradizionale, cioè il bitume contenente un maggior quantitativo di bitume recupera ad ogni condizione di temperatura e carico sempre più rispetto al tradizionale.

La differenza dell'aumento della percentuale di polimero si nota anche dal numero di cicli a fatica. In tutti i campioni i cicli di PBT sono sempre maggiori rispetto al Drenoal tradizionale.

Il drenoval + 10% di additivo non ha proprio il plateau, si osserva quindi che il bitume del fresato (nonostante provenga da una pavimentazione realizzata con conglomerato bituminoso modificato, ha perso il plateau (tipico del bitume modificato) in quanto il polimero si è degradato e, anche aggiungendo bitume con modificato hard, il plateau non si riesce a ripristinare. La modifica hard non è in grado di ripristinare la degradazione avuta dal bitume modificato del bitume del RAP, mentre se vado a mettere un bitume con RAP dal punto di vista di elasticità e viscosità del materiale ho di nuovo il plateau e ho di nuovo il comportamento ottimo di bitumi modificati.

Ulteriori prove da realizzarsi a maggiore scala quale scala dei conglomerati bituminosi sono necessarie per avere una compressione più esaustiva di tali problematiche.

Bibliografia

- Foschi R. - “Breve storia del riciclaggio delle pavimentazioni”, Le strade, n. 11, 2000.
- Castagnetta V. - “Il riciclaggio delle pavimentazioni bituminose stradali invecchiate”, 1985.
- Vivar E., Haddock J. – “HMA Pavement Performance and Durability”, 2006.
- Sangiorgi C., Tataranni P., Simone A., Vignali V., Lantieri C., Dondi G. – “A laboratory and field evaluation of Cold Recycled Mixture for base layer entirely made with Reclaimed Asphalt Pavement”, 2017.
- Rosa L. – “Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali”, 2010.
- Merusi F. – “Metodi reologici avanzati per l’analisi del comportamento dei bitumi stradali negli stati critici di esercizio”, 2009
- Olard F., Di Benedetto H. - General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes, Road Mater. Pavement Des. 4(2) (2003) 185-224.
- Carpani C., Bocci E., Bocci M. – “Rheological and performance characterisation of the bitumen recovered from different emulsions for cold mixtures”, 2021.
- Dickinson, E., & Wilt, H. (1974). The dynamic shear modulus of paving asphalts as a function of frequency. In Transactions of the society of rheology Vol. 18 (pp. 591-606).
- Erika Garilli, Federico Autelitano, Felice Giuliani - Use of bending beam rheometer test for rheological analysis of asphalt emulsion-cement mastics in cold in-place recycling, 2019
- Francesco Petretto (2012). La reologia dei leganti bituminosi stradali: studio delle proprietà meccaniche a seguito di processi di “aging” in laboratorio – Università degli studi di Bologna.
- Mazzotta, F. (2011). Università degli studi di Bologna, tesi di laurea. Studio reologico avanzato di bitumi modificati ed additivati: Proposta di una nuova procedura di aging.
- Stimilli, A. (2015). Doctoral dissertation, Marche Polytechnic University. Advanced Experimental Study on Rheological and Mechanical Properties of Hot Recycled Bituminous Materials with High RAP Content
- Valli Zabban, <https://vallizabban.com/tecnologie-stradali/bitumi-modificati-drenoval/>