



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 mastici bituminosi per il riciclaggio a freddo

Rheological analysis of bituminous mastics for cold recycling

Relatore:

Prof. Ing. Maurizio Bocci

Correlatore:

Ing. Carlo Carpani

Tesi di Laurea:

Anisa Sema

Anno Accademico 2021 – 2022

Sommario

| | |
|--|----|
| Capitolo 1 – Introduzione | 1 |
| Capitolo 2- Stato dell'arte | 3 |
| 2.1 La pavimentazione stradale | 3 |
| 2.1.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso | 3 |
| 2.1.2 Dissesti nelle pavimentazioni: | 5 |
| 2.2 Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali | 8 |
| 2.2.1 Tecniche di riciclaggio | 9 |
| 2.3 Riciclaggio a freddo | 10 |
| 2.3.1 In impianto e in situ | 12 |
| 2.3.1.1 Treno di riciclaggio..... | 14 |
| 2.4 Mastice bituminoso..... | 15 |
| Capitolo3- Materiali impiegati | 17 |
| 3.1 I filler..... | 17 |
| 3.1.1 Filler calcareo | 17 |
| 3.1.2 Filler di recupero | 19 |
| 3.2 Emulsioni bituminose..... | 20 |
| 3.2.1 Emulsione Tradizionale (RIGEVAL MC)..... | 22 |
| 3.2.2 Emulsione Modificata con Polimeri SBS (RIGEVAL CM) | 23 |
| 3.2.3Emulsione Modificata con Lattice (RIGEVAL LX) | 25 |
| 3.3 Acqua..... | 26 |
| Capitolo 4- Programma Sperimentale | 27 |
| 4.1 Obiettivo..... | 27 |
| 4.2 Preparazione dei provini | 27 |
| 4.3 Test Metod | 33 |

| | |
|---|----|
| 4.3.1 Dynamic Shear Rheometer (DSR)..... | 33 |
| 4.3.2 Prova Strain sweep e Frequency sweep..... | 38 |
| 4.3.2.1 Strain sweep | 38 |
| 4.3.2.2 Frequency sweep..... | 39 |
| 4.3.3 Prova M.S.C.R (Multiple Stress Creep Recovery) | 46 |
| 4.3.4 Prova LAS (Linear Amplitude Sweep) | 48 |
| 4.4 Nomenclatura..... | 49 |
| Capitolo 5- Analisi dei risultati | 51 |
| 5.1 Comportamento visco-elastico lineare | 51 |
| 5.1.1 Determinazione della curva maestra..... | 51 |
| 5.1.1.1 Principio di sovrapposizione tempo temperatura..... | 51 |
| 5.1.1.2 Modello generale 2S2P1D | 52 |
| 5.1.1.3 Rappresentazione grafica della curva maestra | 54 |
| 5.1.2 Risultati strain sweep (SS) e frequency sweep (FS)..... | 56 |
| 5.1.2.1 Elaborazione strain sweep..... | 56 |
| 5.1.2.2 Elaborazione frequency sweep..... | 60 |
| 5.1.2.2.1 Mastici bituminosi realizzati con filler omya..... | 61 |
| 5.1.2.2.2 Mastici bituminosi realizzati con il filler di recupero | 67 |
| 5.1.2.2.3 Confronto dei mastici bituminosi con omya | 73 |
| 5.1.2.2.4 Confronti dei mastici bituminosi con filler di recupero..... | 74 |
| 5.1.2.2.5 Confronto dei mastici bituminosi | 75 |
| 5.2 M.S.C.R (Multiple Stress Creep Recovery) | 78 |
| 5.2.1 Elaborazione MSCR (Multiple Stress Creep Recovery)..... | 78 |
| 5.2.1.1 Mastici bituminosi realizzati con filler omya..... | 79 |
| 5.2.1.2 Mastici bituminosi realizzati con filler di recupero | 80 |
| 5.2.1.3 Confronto dei mastici bituminosi con omya | 82 |
| 5.2.1.4 Confronti dei mastici bituminosi con filler di recupero | 83 |
| 5.2.1.5 Confronto dei mastici bituminosi..... | 85 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 5.3 | Prova LAS (Linear Amplitude Sweep)..... | 87 |
| 5.3.1 | Elaborazione LAS (Linear Amplitude Sweep)..... | 87 |
| 5.3.1.1 | Mastici bituminosi realizzati con filler omya..... | 88 |
| 5.3.1.2 | Mastici bituminosi realizzati con il filler di recupero | 89 |
| 5.3.1.3 | Confronto dei mastici bituminosi con omya | 91 |
| 5.3.1.4 | Confronto dei mastici bituminosi con filler di recupero | 91 |
| 5.3.1.4 | Confronto dei mastici bituminosi..... | 92 |
| Capitolo 6- | Conclusioni | 93 |
| Capitolo7- | Bibliografia e Sitografia | 95 |
| Sitografia | 96 | |

Capitolo 1 – Introduzione

Nel corso degli ultimi decenni le infrastrutture hanno avuto uno sviluppo notevole, il trasporto su strada è aumentato, la tipologia dei veicoli è cambiata, il deterioramento già presente nelle nostre strade sono venute così ad accentuarsi rendendo inevitabili gli interventi di manutenzione. Tenendo conto che questa tipologia di intervento con il conglomerato bituminoso comporta notevoli consumi di risorse pregiate, quali aggregati lapidei e bitume, emissione di inquinanti e consumo energetico, si rende ancora più necessaria la ricerca di una soluzione alternativa al problema. Questa soluzione arriva infatti con il riciclaggio; riciclare vuol dire un minor utilizzo di materie prime e una diminuzione dei costi ambientali derivanti dallo stoccaggio delle macerie da demolizione. Negli ultimi anni, oltre alla tecnica del riciclaggio a caldo, ha riscosso un successo crescente la tecnica del riciclaggio a freddo; In particolare, quella in sito. Questa tecnica presenta caratteristiche di affidabilità e grande efficacia dal punto di vista economico e ambientale. Lo studio e la ricerca delle miscele per riciclare a freddo sono di fondamentale importanza; tra i vari studi che si possono fare per valutare l'efficacia di questo tipo di materiale, può essere molto significativo valutare il comportamento del mastice bituminoso che si viene a formare nella miscela (emulsione bituminosa e filler).

L'obiettivo di questa sperimentazione è quello di valutare, tramite lavoro di laboratorio, il comportamento reologico di mastici bituminosi prodotti a freddo. I sei mastici realizzati sono composti, alternativamente, da tre tipologie di emulsione bituminosa (Normale, Modifica con Polimeri SBS e Modificata con Lattice) e due tipologie di filler ("Omya" e "Filler di Recupero"). Lo studio è volto alla determinazione delle proprietà reologiche, meccaniche dei materiali ed a un confronto fra gli stessi attraverso test di laboratorio. La sperimentazione è stata condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile ed Architettura – sezione Infrastrutture – area Strade" dell'Università Politecnica delle Marche.

La caratterizzazione meccanica è avvenuta utilizzando il Dynamic Shear Rheometer (DSR), che ha permesso l'esecuzione di quattro tipologie di prova:

- Frequency Sweep, indicata come FS;
- Strain Sweep, indicata come SS;
- Multiple Stress Creep Recovery, indicata MSCR;

- Linear Amplitude Sweep, indicata come LAS.

I risultati ottenuti da ogni prova sono poi stati successivamente elaborati e commentati.

La presente tesi è suddivisa in sette capitoli:

I. Capitolo 1 – Introduzione

II. Capitolo 2 – Stato dell'arte:

Viene descritto il riciclaggio delle pavimentazioni, con particolare attenzione al riciclaggio a freddo ed al mastice bituminoso.

III. Capitolo 3 – Materiali:

Vengono illustrati i materiali utilizzati e le loro caratteristiche.

IV. Capitolo 4 – Programma Sperimentale:

Vengono elencate tutte le procedure di prova eseguite, il confezionamento dei mastici e viene

illustrato il programma sperimentale.

V. Capitolo 5 – Analisi dei risultati:

Si riportano i risultati ottenuti dalle varie prove eseguite, i confronti, grafici e tabelle, debitamente commentate.

VI. Capitolo 6 – Conclusioni

VII. Capitolo 7 – Bibliografia e Sitografia.

Capitolo 2- Stato dell'arte

2.1 La pavimentazione stradale

La pavimentazione stradale è per definizione quella struttura sovrastante un rilevato o il terreno in sito nelle trincee ed atta a garantire la transitabilità del traffico veicolare, con lo scopo di assolvere a diverse funzioni: conferire caratteristiche superficiali di planarità e aderenza, assicurando una circolazione confortevole e sicura; dissipare in profondità gli sforzi e le pressioni trasmesse dalle ruote veicolari; proteggere la pavimentazione stessa ed il terreno sottostante da agenti atmosferici pericolosi per la stabilità del piano viabile. La pavimentazione è costituita da vari strati, gli elementi principali che la compongono partendo dalla superficie sono: il manto, la struttura ed il sottofondo. Gli strati superficiali sono a diretto contatto con il carico impresso dalle ruote dei veicoli, perciò, devono avere caratteristiche prestazionali elevate. Vengono utilizzati per questi strati materiali di elevata qualità, che permettono inoltre, prestazioni costanti nel tempo e resistenza all'effetto abrasivo generato dagli pneumatici. Gli strati inferiori della pavimentazione hanno caratteristiche inferiori agli strati superficiali, il carico è diffuso in profondità su un'area sempre maggiore.

2.1.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso

Sulla base delle qualità e delle caratteristiche dei materiali costituenti e dello spessore degli strati, si possono distinguere generalmente tre tipologie costruttive di pavimentazioni stradali:

- Rigide
- Flessibile
- Semirigide

La pavimentazione rigida è costituita da piastre di calcestruzzo che possono essere collocate direttamente sul terreno del sottofondo opportunamente trattato, o su uno o più strati di

materiale granulare non legato o stabilizzato con leganti. Le pavimentazioni flessibili sono costituite da più strati sovrapposti di miscele, alcune non legate, altre legate in cui il legante è quasi sempre il bitume. Storicamente tali pavimentazioni erano costituite da una stesa di pietrisco, i cui elementi venivano legati da detriti di rocce calcaree, che appoggiavano su una fondazione in pietrame. Le moderne pavimentazioni flessibili sono caratterizzate da: strato di usura, strato di collegamento, strato di base, strato di fondazione.

Quando in una pavimentazione flessibile uno degli strati portanti viene sostituito, in tutto o in parte, con una miscela di inerti e leganti idraulici, si realizza una pavimentazione semirigida. Possiamo avere due tipi di pavimentazioni semirigide in cui o strato rigido è realizzato in misto cementato e caratterizza o lo strato di base o lo strato di fondazione.

Una pavimentazione semirigida è composta da cinque strati:

- 1.** *Strato d'usura o tappeto di spessore da 3-6 cm:* è lo strato più superficiale della pavimentazione. Agiscono su di esso i carichi veicolari, oltre al compito strutturale questo strato deve garantire sicurezza e confort di marcia. È realizzato in conglomerato bituminoso, che può essere aperto, semichiuso o chiuso in funzione della percentuale di vuoti dello strato. Gli aggregati utilizzati solitamente sono di natura silicea o basalti.
- 2.** *Strato di collegamento o binder di spessore da 6-8 cm:* questo strato ha funzione di collegamento tra manto di usura e base, di trasferimento delle sollecitazioni dalla superficie agli strati profondi. Inoltre, ad ha compito di assorbire parte delle azioni indotte dai carichi. Tale strato è realizzato in conglomerato bituminoso che può essere semichiuso o chiuso, in funzione dei vuoti.
- 3.** *Strato di Base di spessore da 8-30 cm:* questo strato ha un compito di tipo strutturale, cioè di assorbire le sollecitazioni dovute al traffico veicolare. Realizzato in misto cementato, conglomerato bituminoso a caldo oppure in conglomerato bituminoso riciclato a freddo in cui la presenza di fresato è almeno del 70%. Nel caso in cui la resistenza a trazione richiesta è bassa, questo strato è realizzato senza legante, ossia in misto granulare. Nel caso di riciclaggio a freddo viene usata emulsione bituminosa modificata e cemento; il ruolo del

cemento è quello di non fungere da legante, ma rappresenta un elemento per la formazione del mastice che lega gli aggregati lapidei e regola la velocità di rottura dell'emulsione.

4. *Strato di Fondazione di spessore da 15-35 cm:* il ruolo di questo strato è quello di trasferire le sollecitazioni al sottofondo. Può essere uno strato non legato, quindi in misto granulare, o legato, in misto cementato, per le pavimentazioni semirigide. Per adempiere alle richieste in termini di sostenibilità ambientali, si può realizzare questo strato anche in conglomerato riciclato a freddo in cui il legante bituminoso è introdotto per mezzo dell'emulsione, senza avere eccessive perdite prestazionali.

5. *Sottofondo di spessore da 50-100 cm:* è il piano di posa della fondazione, ha il ruolo di garantire portanza. Il terreno di sottofondo deve rispettare le caratteristiche prestazionali riportate nella norma CNR-UNI 10006, secondo la quale, la portanza di un sottofondo è buona se è pari a 15 kN/cm^2 ; media se è pari a 9 kN/cm^2 o scarsa se è pari a 3 kN/cm^2 . Per valori inferiori il terreno dovrà essere bonificato o sostituito.

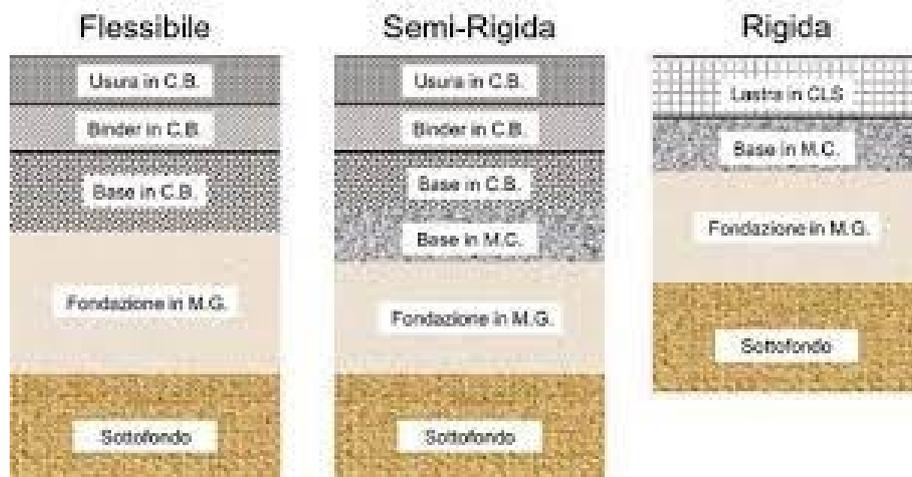


Figura 0.1 - Stratigrafia di un pacchetto strutturale di una pavimentazione stradale

2.1.2 Dissesti nelle pavimentazioni:

Le pavimentazioni stradali si deteriorano principalmente a causa dei fattori ambientali e del carico del traffico: i raggi ultravioletti del sole nel corso del tempo induriscono il bitume, diminuendone l'elasticità e favorendo la formazione di fessure durante le escursioni termiche stagionali.

Attraverso poi fessure poi penetra l'acqua, che deteriora a ritmo sempre crescente la pavimentazione. Il carico del traffico veicolare causa lo sviluppo di solchi e incrinature all'interno della struttura, che si propagano a sviluppo verticale fino a raggiungere i livelli sottostanti della pavimentazione, provocando la separazione del bitume dall'aggregato di asfalto.

Due dissesti relativi alla sperimentazione svolta, sono i seguenti:

- Ormaiamento: le ormai si presentano come depressioni sulle superficie stradale e pregiudicano la regolarità della stessa, a discapito della sicurezza di guida. All'interno delle ormai si può accumulare acqua, questo può far avvenire fenomeni di acquaplaning. Queste depressioni si sviluppano in senso parallelo all'asse stradale e sui punti di passaggio delle ruote. Sono dovute all'accumulo di deformazioni anelastiche. Queste deformazioni possono avvenire in qualsiasi strato della pavimentazione stradale e può dipendere da consolidazione, nel caso in cui ci sia una cattiva messa in opera del materiale, o da rifluimento laterale dovuto al traffico veicolare (fig.2.2). In particolare, questa ultima tipologia si verifica soprattutto a causa delle alte temperature ambientali, specialmente se non si adotta una miscela bituminosa capace di resistere alle alte temperature.

Questa tipologia di degrado è da evitare, e per farlo è prima di tutto necessario impiegare un bitume con un Performance Grade (PG) coerente con il sito di costruzione.



Figura 0.2 – Ormaiamento

- Fessurazioni da fatica: le fessurazioni da fatica (Crocodile Cracking), si manifestano con delle fessurazioni diffuse e ramificate sulla superficie della pavimentazione stradale. Questo è un fenomeno di tipo graduale nel tempo, avviene in presenza di carichi ripetuti di intensità inferiore rispetto alla resistenza ultima del materiale. I veicoli, con il loro passaggio, inducono una deformazione elastica della superficie della pavimentazione che comporta la generazione di sforzi di trazione alla base dello strato legato, questo processo causa delle lesioni. Nella fase iniziale il fenomeno è circoscritto nella zona di passaggio dello pneumatico, successivamente coinvolge tutta la pavimentazione. Questo fenomeno è direttamente proporzionale al livello di deformazione alla base degli strati legati (fig. 2.3).



Figura 0.3 – Fessurazioni a fatica

- Fessurazione termica: la fessurazione termica è un fenomeno che può manifestarsi nelle pavimentazioni stradali come conseguenza di una brusca diminuzione della temperatura fino a valori estremamente bassi, oppure a causa della fatica termica indotta dalle escursioni termiche giornaliere ripetute nel tempo.

Il tipico ammaloramento rilevabile sul manto stradale è costituito da una serie di fessure ortogonali alla direzione di sviluppo del nastro stradale, disposte a intervalli regolari. La fessurazione per basse temperature è dovuta alla tensione termica che si crea nel manto di usura quando, raffreddato, tende a contrarsi. Tale contrazione è ostacolata dall'aderenza con lo strato bituminoso sottostante, spesso favorita dalla interposizione di una mano di

attacco che precede la stessa del tappeto di superficie.



Figura 0.4 – Fessurazione termica

2.2 Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali

Nel settore dell'ingegneria civile, in particolare in quello delle infrastrutture stradali, la scarsa disponibilità di materiali, unita ad una crescente preoccupazione di natura ambientale e, non ultimo, ragioni di natura economica, hanno suscitato l'attenzione verso tecniche di riciclaggio più innovative.

Di fatto la maggior parte delle risorse finanziarie future verrà impiegata nella corretta manutenzione delle strade già esistenti, tale manutenzione viene eseguita attraverso la rimozione completa degli strati presenti e la disposizione di una nuova pavimentazione sovrapposta alla struttura sottostante, ne consegue perciò una sempre più forte disponibilità di conglomerato riciclato proveniente dalle vecchie pavimentazioni. In ambito stradale per riciclaggio si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale proveniente dalla fresatura, fino ad una certa profondità, del conglomerato bituminoso ammalorato nella produzione di nuovi strati di pavimentazione, oltre che materiali "di scarto" provenienti da lavorazioni industriali, per la produzione di un nuovo prodotto.

Dalla demolizione degli strati legati a bitume si ottiene il conglomerato bituminoso di recupero (aggregato fresato di riciclo), che prende il nome di RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).

Questo approccio permette:

- Riduzione delle discariche
- Diminuzione dell'impiego di nuovi materiali
- Diminuzione dell'inquinamento
- Minor utilizzo di energia
- Risparmio economico
- Vantaggi operativi

Le prime operazioni di riciclaggio a freddo risalgono agli anni Settanta, per poi essere evolute negli anni Ottanta con i primi lavori di riciclaggio in situ con impianti mobili e con riutilizzo di tutto il materiale fresato.

Alla fine degli anni Ottanta si hanno i primi tentativi di riciclaggio a freddo, utilizzando emulsioni bituminose con appositi macchinari di riciclaggio. Nel corso degli anni il processo di riciclaggio si è affinato, permettendo la riapertura al traffico della strada in poche ore. La situazione attuale italiana presenta carenze dal punto di vista normativo, legislativo e di comune convincimento. Si pensa che i macchinari e le tecniche di riciclaggio siano più costose di quelle tradizionali. Per questi motivi solamente il 15% del conglomerato bituminoso demolito viene riciclato. La migliore soluzione è quella di riciclare in situ, quando è possibile, perché riduce i costi e l'inquinamento derivante dal trasporto del materiale dal cantiere all'impianto. Considerando anche, che questi trasporti impattano sul flusso veicolare in termini di efficienza. Mentre, in caso di riciclaggio a caldo, la procedura in impianto è meno inquinante.

2.2.1 Tecniche di riciclaggio

Le tecniche di riciclaggio possono essere macroscopicamente divise in:

- Riciclaggio in impianto fisso
- Riciclaggio in situ

, ciascuna di esse possono avere dei vantaggi e svantaggi.

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

- Riciclaggio a caldo
- Riciclaggio a freddo

Ulteriormente, in impianti fissi si possono utilizzare tecniche con miscele bituminose tiepide, questa metodologia non è presente per impianti mobili. Per le altre tipologie è possibile riciclare a caldo e a freddo sia in impianti fisso che mobili. Verrà trattato nello specifico il riciclaggio a freddo, che è l'ambito di questa sperimentazione.

2.3 Riciclaggio a freddo

Per riciclaggio a freddo intendiamo qualsiasi tecnica che permette il riutilizzo del conglomerato bituminoso, in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento, non è preventivamente riscaldato, ma aggiunto a temperatura ambiente.

Il RAP ottenuto dalla fresatura della vecchia pavimentazione viene miscelato con emulsioni bituminose o bitume schiumato, agenti rigeneranti ed eventualmente con inerti vergini, per l'eventuale correzione della curva granulometrica.



Figura 0.5 - Fresatura a freddo

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 0.6 – 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 coinvolte 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.

2.3.1 In impianto e in situ

In impianto

Il riciclaggio a freddo in impianto fisso può essere effettuato sia con macchine ed attrezzature specifiche installate in modo permanente, sia con particolari impianti semoventi posti nei cantieri; possono anche essere utilizzati impianti per la produzione di misto cementato opportunamente modificati. Negli impianti fissi, nati esplicitamente per questa tipologia di riciclaggio, i dosaggi del RAP, del bitume nuovo e degli aggregati, possono essere effettuati con maggior precisione, ed anche in base alle caratteristiche del fresato, possono essere variate le componenti della miscela; un vantaggio del riciclaggio in impianto consiste nella facilità di smobilitazione, che ne permette il posizionamento vicino alla zona di intervento, riducendo i costi ed il dispendio energetico derivanti dai trasporti.

Esistono due tipologie di impianto:

- 1.Continuo
- 2.Discontinuo

La differenza fondamentale è rappresentata dalla modalità di dosaggio degli inerti e del legante; nel primo caso il ciclo sarà discontinuo, poiché il materiale verrà pesato e raggiunto un determinato quantitativo, verrà poi inviato nel ciclo produttivo: la produzione oraria risulterà nettamente inferiore, ma a vantaggio della precisione del dosaggio stesso. Nel secondo caso invece, l'alimentazione dell'impianto avviene in maniera continua, tramite l'immissione su nastri trasportatori degli inerti, in base a volumi prestabiliti: in questo caso la produzione oraria sarà sicuramente maggiore, ma con una minor precisione del dosaggio dei materiali. Dopo una

preventiva frantumazione e selezionatura del fresato, quest'ultimo e gli aggregati vergini d'apporto necessari per la correzione della curva granulometrica, vengono convogliati al mescolatore per mezzo di nastri trasportatori; qui avviene la miscelazione, assieme al legante che può essere sotto forma di emulsione bituminosa o bitume schiumato, in percentuali che vanno dal 3 al 6%, assieme all'acqua d'aggiunta, utile per migliorare la lavorabilità della miscela, e assieme al filler; i possibili additivi possono essere calcarei o silicei.

Di solito non è presente il silo di stoccaggio del prodotto finito in quanto il conglomerato riciclato a freddo, viene direttamente scaricato sugli automezzi di trasporto. Una volta pronta la miscela, il conglomerato bituminoso viene caricato sui mezzi e portato in cantiere per essere successivamente posto in opera e compattato, ricostituendo così la pavimentazione originaria.



Figura 0.7 - Produzione di conglomerato a freddo

In situ

Questa tipologia, sviluppata in situ, rappresenta la tecnologia che favorisce il maggior vantaggio economico ed ambientale in assoluto, garantendo anche l'affidabilità tecnica del risultato finale, e che per tali motivi risulta sempre più diffusa. Il riciclaggio a freddo viene realizzato in situ mediante l'utilizzo, anche in questo caso, di apposite apparecchiature, che permettono la miscelazione in continuo del fresato/materiale in situ, con emulsione bituminosa o bitume schiumato, sostanze stabilizzanti cementizie (calce, cemento, e sostanze simili, considerando però che la più utilizzata è proprio il cemento), acqua e aggregati vergini di integrazione per la correzione del fuso

granulometrico, in caso di necessità. Le possibili miscele utilizzate sono: emulsione e cemento, bitume schiumato e cemento, solo emulsione, solo bitume schiumato o solo cemento.

I vantaggi di questa tipologia di riciclaggio sono:

- Facile reperibilità delle emulsioni;
- Facilità di applicazione;
- Possibilità di applicazione del legante con inerti freddi e umidi;
- Ridotte fessurazioni;
- Conglomerato resistente all'aggressione dell'umidità;

2.3.1.1 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 0.8 - 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.

2.4 Mastice bituminoso

L'utilizzo di impasti bituminosi a freddo prodotti con emulsione bituminosa (CBEM) rappresenta oggi una delle alternative più interessanti rispetto ai tradizionali conglomerati bituminosi a caldo. In particolare, l'uso dei CBEM è in aumento poiché combinano efficienza economica e ambientale. I CBEM possono essere schematizzati come composti di aggregati grossolani ricoperti e legati da un mastice bituminoso (bitume e filler), incorporante anche parte degli aggregati fini. Pertanto, il comportamento meccanico dell'intero CBEM è strettamente connesso al comportamento del suo mastice bituminoso associato. Quindi, lo studio del solo mastice bituminoso, composto da bitume e filler, è utile per comprendere la risposta meccanica di un conglomerato bituminoso affine.

Il mastice viene realizzato facendo evaporare nel tempo l'acqua nell'impasto. Nella miscela si verificherà la rottura dell'emulsione portando alla creazione di un film di bitume capace di inglobare il filler presente.

Esistono due tipologie principali di filler:

- Filler inerte (minerale): svolge la funzione di riempitivo, contribuendo alle caratteristiche meccaniche della miscela finale;
- Filler attivo (calce, cemento): reagisce con la miscela sviluppando legami chimici.

Costituendo un mastice con filler emulsione bituminosa e cemento, all'aumentare della concentrazione volumetrica del cemento si avrà un aumento di $|G^*|$ (modulo complesso) e una riduzione di δ (angolo di fase), probabilmente correlata al contributo di irrigidimento della struttura, dato dalla pasta cementizia sviluppata. Mentre, realizzando un mastice con un filler di tipo minerale, il comportamento sarà più tendente a quello viscoso.

Il mastice bituminoso può prevedere anche l'impiego di materiali di diversa provenienza e generalmente non presenti nei CB. Come evidenziato da uno studio dell'università di Parma, che utilizza nel suo programma sperimentale del vetro in sfere, l'inserimento di microsfele di vetro permettono al mastice di avere: proprietà isotropiche, bassa concentrazione di sollecitazioni intorno alle particelle, contrazione uniforme in tutte le direzioni ed elevata lavorabilità. Le sfere di vetro non assorbono acqua ed emulsione bituminosa e non variano la "rottura" della stessa.

L'aspetto fondamentale da evidenziare è il comportamento della struttura di un mastice bituminoso, nello specifico l'interfaccia mastice-filler o aggregato. L'interfaccia in presenza di cemento ha caratteristiche di maggiore durezza rispetto a un filler calcareo. All'aumento di cemento e minerali, la finezza del filler rende le particelle di grano più uniformi e struttura dei mastici molto più densa. La litologia del filler minerale ha una maggiore influenza sulle caratteristiche dell'interfaccia rispetto a quella dell'aggregato

Capitolo3- Materiali impiegati

In questo capitolo viene descritta nel dettaglio la ricerca eseguita nel Laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura (DICEA) dell'Università Politecnica delle Marche. In primo luogo, saranno descritte le principali caratteristiche dei materiali utilizzati per la preparazione dei vari mastici bituminosi: due tipi di filler ("omya", "filler di recupero") e tre emulsioni bituminose (Normale, Modificata e con Lattice). Sono riportate, inoltre, le specifiche tecniche, ed in seguito, viene descritta la procedura di preparazione dei mastici bituminosi, i metodi di prova, gli strumenti utilizzati, ed infine le grandezze reometriche ricavate.

3.1 I filler

Il filler può provenire da diversi materiali, le sue dimensioni sono stabilite dalla norma CNR 139 e dalla normativa UNI EN 933-1. Secondo la prima si parla di filler per dimensioni minori di 0,075 mm, mentre per la seconda la dimensione massima è di 0,063 mm. Può essere utilizzato per materiali non legati e legati per l'impiego in opere di ingegneria. Come aggregato è impiegato nella produzione di calcestruzzo, miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade.

3.1.1 Filler calcareo

Uno dei due filler utilizzati è un filler calcareo (industriale), denominato "omya" (fig. 3.8), dosato secondo una specifica "ricetta" descritta in seguito; considerando il fatto che: incrementando in maniera significativa la quantità di filler si ha un conseguentemente aumento di superficie specifica totale, andando ad aumentare la velocità di rottura dell'emulsione. Di seguito viene riportata la curva granulometrica del filler calcareo utilizzato nella presente sperimentazione (tab. 3.2 e fig. 3.1-3.3).



Figura 3.1 - Filler calcareo

| Campione: | Filler calcareo |
|-----------|-----------------|
| d [mm] | % passante |
| 31,5 | 100 |
| 20 | 100 |
| 16 | 100 |
| 10 | 100 |
| 8 | 100 |
| 4 | 100 |
| 2 | 100 |
| 1 | 100 |
| 0,5 | 100 |
| 0,25 | 98,6 |
| 0,125 | 90,2 |
| 0,063 | 77,6 |
| FONDO | |

Tabella 3.2 - Analisi granulometrica filler calcareo

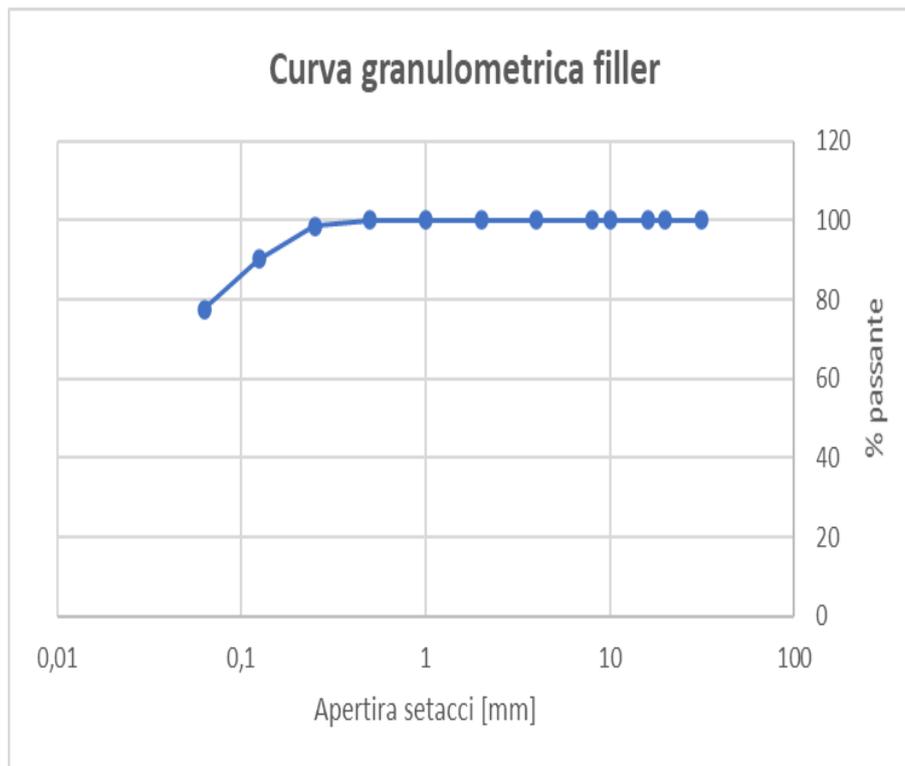


Figura 3.3 - Curva granulometrica filler calcareo

3.1.2 Filler di recupero

Oltre il filler calcareo, l'altro filler che ho utilizzato è il filler di recupero che è stato prodotto da impianti di produzione di conglomerato bituminoso a caldo. Per produrre il conglomerato bituminoso a caldo mettiamo gli aggregati di diverse dimensioni dentro il cilindro essiccatore che sta a una temperatura alta appunto per scaldare gli aggregati. Una volta scaldati, gli aggregati tendono a formare delle polveri. Queste polveri si mischiano con il calore e l'aria che viene emessa dentro il cilindro per scaldare gli aggregati. Il cilindro essiccatore tramite un sistema aspira l'aria con le polveri e le porta in un'altra zona dove ci sono dei filtri i quali mi trattengono il filler e buttano fuori aria pulita. Il filler è fondamentale per creare dei conglomerati che abbiano un effetto finale molto compatto, non poroso e superficialmente molto regolare. Il silo di stoccaggio dei filler è dotato di filtro a maniche per l'abbattimento delle polveri e quindi non sono presenti emissioni in atmosfera.



Figura 3.4 - Filler di recupero

3.2 Emulsioni bituminose

Un'emulsione bituminosa è un materiale costituito da due fasi: la prima, e cioè l'acqua, che ha la funzione disperdente, e la seconda, il bitume, che è dispersa sotto forma di goccioline. Rispetto al bitume preso singolarmente, che per essere impiegato e lavorato richiede un riscaldamento, l'emulsione garantisce lavorabilità in fase di preparazione dell'impasto in condizioni di temperatura ambiente, grazie alla presenza di acqua.

Nell'emulsione bituminosa possono essere presenti additivi chiamati emulsionanti, che hanno la funzione di impedire la separazione delle due fasi, cioè acqua e bitume. La composizione generica di una emulsione è: 60% di bitume e 40% di acqua. L'acqua presente nell'emulsione, successivamente alla miscelazione, tende ad essere eliminata completamente. Il bitume residuo, quindi, riveste le particelle di aggregato (nel caso in oggetto il filler); questo fenomeno è definito "rottura".

Le fasi in cui avviene la rottura sono tre:

- Decantazione: le goccioline di bitume si sedimentano
- Flocculazione: le particelle di bitume si avvicinano
- Coagulazione: le particelle di bitume si legano tra loro

La velocità di rottura dipende da:

- Temperatura ambientale
- Temperatura dell'emulsione
- Dimensione delle particelle di bitume disperse
- Dimensione e natura degli inerti o filler
- Modalità di miscelazione e compattazione

Si hanno cinque categorie diverse di emulsioni in funzione alla velocità di rottura:

- Rottura super rapida (RR)
- Rottura rapida (ER)
- Rottura media (EM)
- Rottura lenta (EL)
- Rottura sovra-stabilizzata (LL)

Oltre all' evaporazione ed assorbimento di acqua da parte di aggregati e/o filler, la perdita di acqua sia anche per coagulazione chimica tra emulsione e aggregato, per la miscelazione e a causa della composizione chimica dell'emulsione bituminosa. Il fenomeno della coagulazione chimica sarà funzione dall' acidità o basicità dell'emulsione: si definiscono infatti le emulsioni anioniche (basiche) e quelle cationiche (acide). In un'emulsione anionica gli ioni della particella di bitume assumono carica polare negativa in una fase alcalina, mentre in un'emulsione cationica assumono carica positiva in una fase acida.

Un' emulsione basica provoca rottura solo chimicamente e quindi sono necessari catalizzatori per fare avvenire la separazione tra acqua e bitume. Tali emulsioni sono maggiormente utilizzate perché richiedono minore costo di produzione, ma non possono essere impiegate con aggregati acidi, come basalto e silice.

La Normativa CEN identifica i vari tipi di emulsione tramite una nomenclatura, il quale identifica: il tipo C (cationica) o A (anionica), il contenuto percentuale di legante, la presenza di bitume, quella eventuale di Polimero e Flussante, la classe di velocità di rottura (dove il valore minimo 2 indica una rottura veloce e il valore massimo 6 ne indica una molto lenta) ed infine viene indicato se sia o meno stabilizzata.

Le emulsioni considerate in questa sperimentazione sono di tre tipologie (fig.3.5):

- Emulsione tradizionale
- Emulsione modificata con polimeri SBS
- Emulsione modificata con Lattice



Figura 3.5 - Emulsioni utilizzate durante la sperimentazione

3.2.1 Emulsione Tradizionale (RIGEVAL MC)

Questa emulsione è ricavata dal bitume distillato e utilizzata principalmente per misti granulari legati a calce e cemento. La produzione prevede l'utilizzo di un mulino che miscela una soluzione composta da acqua ed emulsionanti con il bitume (fig. 3.6).

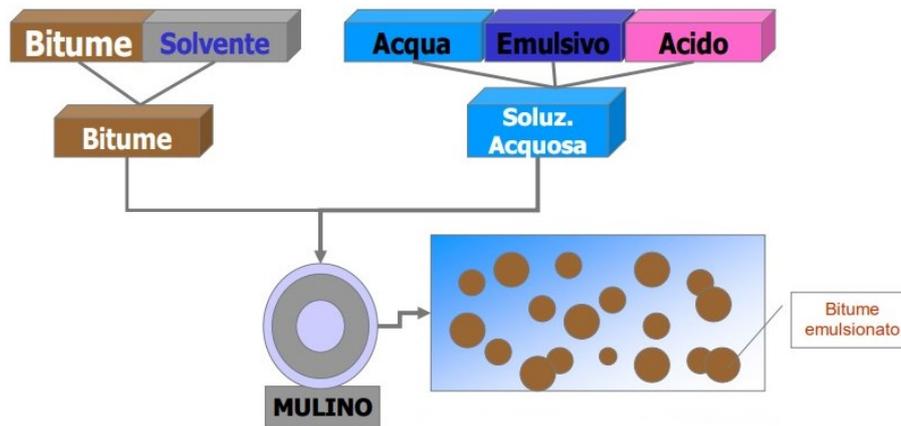


Figura 3.6 - Schema produttivo emulsioni di bitume distillato

L'emulsione è denominata RIGEVAL MC ed è prodotta e fornita dalla ditta Valli Zabban. Il prodotto è identificato con la sigla C60B10 e cioè è una emulsione sovra stabilizzata contenente il 60% di bitume ed avente una classe di rottura pari a 10.

Qui di seguito è riportata la scheda tecnica fornita dal produttore (fig. 3.7):

| | | |
|---------------------------------|--|--|
| Sito produttivo | Stabilimento di Bologna Stabilimento di Perugia | Via del Traghetto, 42 – 40100 Bologna Via della Valtiera, 101 – 06135 Collestrada |
| Designazione | C60B10 | |
| Descrizione del prodotto | Emulsione di bitume distillato per conglomerati bituminosi riciclati a freddo. | |

| Caratteristiche dell'emulsione | Metodo | U.d.M. | min | Prestazione max | Classe |
|--|--------------|--------|-----------|-----------------|--------|
| Contenuto di legante | UNI EN 1428 | % | 58 | 62 | 6 |
| Stabilità alla miscelazione con il cemento | UNI EN 12848 | % | | 2 | 10 |
| Viscosità a 40°C (tempo di efflusso tazza 2 mm) | UNI EN 12846 | sec | 15 | 70 | 3 |
| Adesività | UNI EN 13614 | % | 90 | | 3 |

| Caratteristiche del legante recuperato tramite evaporazione (UNI EN 13074) | | | | | |
|--|-------------|-----|-----------|------------|---|
| Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C | UNI EN 1426 | dmm | | 100 | 3 |
| Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di rammolimento P.A. | UNI EN 1427 | °C | 43 | | 6 |

Figura 3.7 - Scheda tecnica emulsione tradizionale RIGEVAL MC

3.2.2 Emulsione Modificata con Polimeri SBS (RIGEVAL CM)

Tale emulsione è utilizzata per realizzare conglomerati bituminosi con la tecnica del riciclaggio a freddo. Il bitume viene modificato utilizzando polimeri elastomerici SBS, ovvero stirene-butadiene-

stirene. La miscela risultante ottiene un miglioramento nel comportamento elastico e dal punto di vista della duttilità, con un aumento di resistenza alle sollecitazioni statiche e cicliche.

Vengono utilizzati miscelatori ad elevato gradiente di taglio che permettono la dispersione del polimero e quindi la modifica del bitume; successivamente verrà aggiunta la soluzione acquosa per ottenere l'emulsione bituminosa. Si ha un'unica fase dispersa di bitume modificato e per questo viene definita monofase (fig. 3.8).

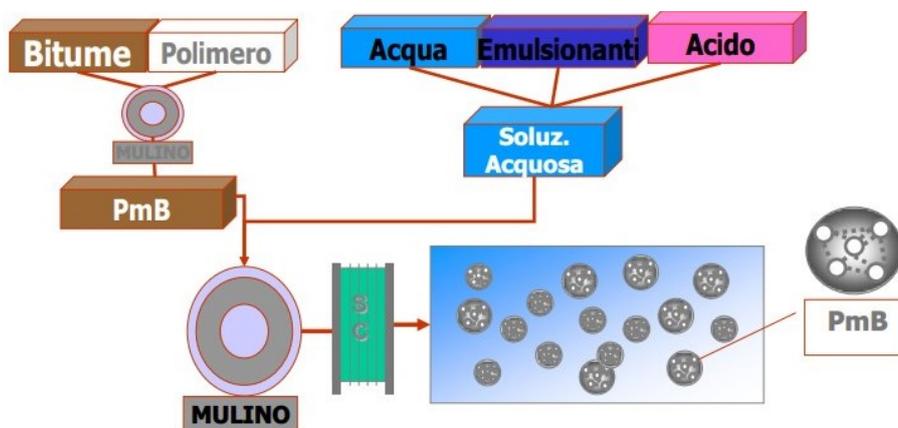


Figura 3.8 - Schema produttivo emulsioni di bitume modificato

L'emulsione è denominata RIGEVAL CM ed è prodotta e fornita dalla ditta Valli Zabban. Il prodotto è identificato con la sigla C60BP10, è una miscela sovra stabilizzata, contiene il 60 % di bitume residuo e polimeri. Scheda tecnica fornita dal produttore (fig. 3.9):

| | | | | | | |
|---|--|---------------------------------------|------------|------------------------|---------------|--|
| Sito produttivo | Stabilimento di Bologna | Via del Traghetto, 42 – 40100 Bologna | | | | |
| Designazione | C60BP10 | | | | | |
| Descrizione del prodotto | Polymer Modified Bitumen in emulsione acquosa per conglomerati bituminosi riciclati a freddo prodotti in impianto. | | | | | |
| Caratteristiche dell'emulsione | | | | | | |
| | Metodo | U.d.M. | min | Prestazione max | Classe | |
| Contenuto di legante | UNI EN 1428 | % | 58 | 62 | 6 | |
| Stabilità alla miscelazione con il cemento | UNI EN 12848 | % | | 2 | 10 | |
| Viscosità a 40°C (tempo di efflusso tazza 2 mm) | UNI EN 12846 | sec | 15 | 70 | 3 | |
| Adesività | UNI EN 13614 | % | 90 | | 3 | |
| Caratteristiche del legante recuperato tramite evaporazione (UNI EN 13074) | | | | | | |
| Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C | UNI EN 1426 | dmm | | 70 | 3 | |
| Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di rammollimento P.A. | UNI EN 1427 | °C | 65 | | 2 | |
| Coesione Forse ductility test a 10°C | UNI EN 13589 UNI EN 13703 | J/cm ² | 2 | | 6 | |
| Recupero di deformazione Ritorno elastico a 25°C | UNI EN 13398 | % | 75 | | 4 | |

Figura 3.9 - Scheda tecnica emulsione modificata RIGEVAL CM

3.2.3 Emulsione Modificata con Lattice (RIGEVAL LX)

L'emulsione modificata con lattice è prodotta utilizzando lattice di gomma naturale o sintetico, che viene inserito nella soluzione acquosa costituita da acqua ed emulsionanti. Si avranno quindi due fasi distinte composte da goccioline di bitume e lattice. Il lattice sarà costituito dal 65% di gomma e dal 35% d'acqua. Questo sarà considerato nei rapporti stechiometrici all'interno della miscela (fig.3.10).

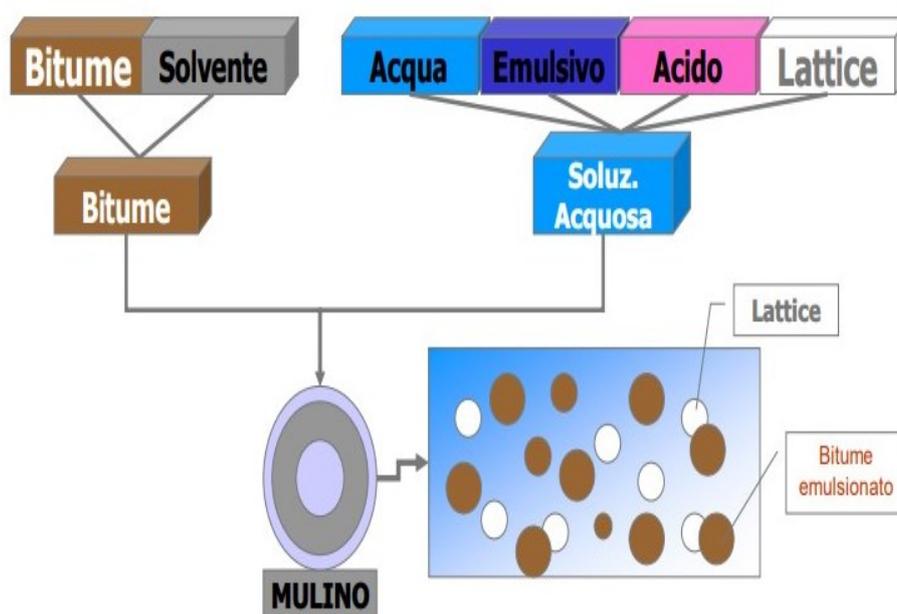


Figura 3.10 - Emulsioni utilizzate durante la sperimentazione

L'emulsione è denominata RIGEVAL LX ed è prodotta e fornita dalla ditta Valli Zabban. Il prodotto è identificato con la sigla C60BP10 è una miscela sovra stabilizzata, contiene il 60% di bitume residuo e lattice SBR.

Scheda tecnica fornita dal produttore (fig. 3.11):

| | | |
|---------------------------------|---|--|
| Sito produttivo | Stabilimento di Bologna Stabilimento di Perugia | Via del Traghetto, 42 – 40100 Bologna Via della Valtiera, 101 – 06135 Collestrada |
| Designazione | C60BP10 | |
| Descrizione del prodotto | Emulsione di bitume distillato e lattice SBR per conglomerati bituminosi riciclati a freddo | |

| Caratteristiche dell'emulsione | Metodo | U.d.M. | Prestazione | | Classe |
|---|--------------|--------|-------------|------------|--------|
| | | | min | max | |
| Contenuto di legante | UNI EN 1428 | % | 60 | | 6 |
| Contenuto di acqua | UNI EN 1428 | % | | 40 | 6 |
| Grado di acidità pH | UNI EN 12850 | | 2,0 | 4,0 | |
| Stabilità alla miscelazione con il cemento | UNI EN 12848 | % | | 2 | 10 |
| Sedimentazione a 7 giorni | UNI EN 12847 | % | | 10 | 3 |
| Viscosità a 40°C (tempo di efflusso tazza 2 mm) | UNI EN 12846 | sec | 15 | 70 | 3 |

| Caratteristiche del legante recuperato tramite evaporazione (UNI EN 13074) | | | | | |
|---|--------------|-----|------------|-----------|---|
| Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C | UNI EN 1426 | dmm | 50 | 70 | 3 |
| Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di rammollimento P.A. | UNI EN 1427 | °C | 55 | | 2 |
| Fragilità alle basse temperature Punto di rottura Fraass | UNI EN 12593 | °C | -10 | | 5 |
| Recupero di deformazione Ritorno elastico a 25°C | UNI EN 13398 | % | 55 | | 5 |

Figura 3.11 - Scheda tecnica emulsione con lattice RIGIVAL LX

3.3 Acqua

L'acqua utilizzata nella preparazione del mastice bituminoso e più in generale nel conglomerato bituminoso deve essere priva di impurità, sia in soluzione che in sospensione, come: oli, acidi e sostanze organiche. Gli ioni disciolti in essa possono modificare le proprietà dell'emulsione bituminosa. L'acqua svolge un ruolo fondamentale e cioè, regola il meccanismo di "rottura" dell'emulsione. L'aggiunta di quest'ultima è volta a garantire adeguata lavorabilità dell'impasto.

L'acqua svolge un ruolo fondamentale e cioè regola il meccanismo di "rottura" dell'emulsione; la presenza di sola emulsione non è sufficiente a fornire un'adeguata lavorabilità all'impasto, l'incremento di quest'ultima e una penalizzazione di acqua nell' impasto porterebbe maggiormente al decremento della lavorazione.

Capitolo 4- Programma Sperimentale

In questo capitolo verrà descritto il programma sperimentale eseguito, le apparecchiature utilizzate, le metodologie di prova e la nomenclatura dei provini.

4.1 Obiettivo

L'obiettivo della sperimentazione è volto al confronto prestazionale di sei mastici bituminosi, realizzati mediante l'utilizzo di tre emulsioni (normale, modificata e con lattice) e due diverse tipologie di filler, "omya" e "filler di recupero". Le prove eseguite per caratterizzare i materiali sono state eseguite con il macchinario Dynamic Shear Rheometer (DSR) e sono:

- Frequency Sweep
- Strain Sweep
- MSCR (Creep Recovery Test)
- LAS (Linear Amplitude Sweep)

4.2 Preparazione dei provini

La preparazione dei provini consiste in tre fasi operative principali:

- Composizione della "ricetta" dosando i tre componenti (emulsione bituminosa, filler e acqua) in un recipiente cilindrico.
- Miscelazione tramite un miscelatore automatico per 45 minuti.
- Evaporazione, in un contenitore siliconico rettangolare, tramite condizionamento in forno, 12 ore a temperatura di 20 °C e 36 ore a temperatura di 50 °C con miscelazione manuale eseguita ogni 20 minuti al fine di evitare la sedimentazione del filler sul fondo del contenitore. Tutto questo è fatto cercando di avvicinarsi il più possibile al protocollo imposto dalla normativa europea per i bitumi residui di un'emulsione bituminosa. Nel caso dei mastici

però, il filler tende a sedimentare e quindi è necessario modificare leggermente la procedura.

La composizione della miscela seguita prevede:

- 128,6 grammi di filler
- 214,1 grammi di emulsione bituminosa
- 32,3 grammi di acqua

La scelta di tale “ricetta” è stata fatta per ottenere un mastice con rapporto filler/bitume residuo (in peso) pari a 1.

La presenza di acqua è di ausilio per prevenire la formazione di grumi durante la fase di preparazione. Il quantitativo di acqua da introdurre è pari al 25% del peso del filler. Il procedimento vero e proprio per la realizzazione del mastice bituminoso prevede l’utilizzo dell’emulsione bituminosa stoccata in una camera climatica a 40 °C (fig. 4.1).



Figura 4.1 - Emulsioni utilizzate durante la sperimentazione

Aperto il recipiente si verifica, con un utensile metallico, la corretta consistenza della stessa e l’assenza di addensamenti che implicherebbero l’alterazione della composizione percentuale. All’interno del contenitore cilindrico viene per prima cosa inserito il corretto quantitativo di filler, ovvero 128,6 grammi (fig.4.2).



Figura 4.2 – Contenitore con filler

Si procede quindi a versare, tramite una buretta, 32,3 grammi di acqua eliminando con una bacchetta metallica i grumi formati dal filler (fig. 4.3).



Figura 4.3 – Contenitore con filler e acqua

Infine, si inserisce nell'impasto 214,1 grammi di emulsione bituminosa mescolando manualmente l'impasto con un utensile di metallo per circa 5 minuti. Sono stati quindi prodotti 6 provini, impiegando i tre tipi di emulsione bituminosa (MC, CM, LX) per ognuna delle due tipologie di filler (omya, filler di recupero) (fig. 4.4).



Figura 4.4 – Contenitore con filler, acqua ed emulsione bituminosa

L'impasto così preparato è stato mescolato per 45 minuti utilizzando un miscelatore automatico impostato a velocità di 490 rpm (e cioè la velocità minima del macchinario) (fig 4.5).

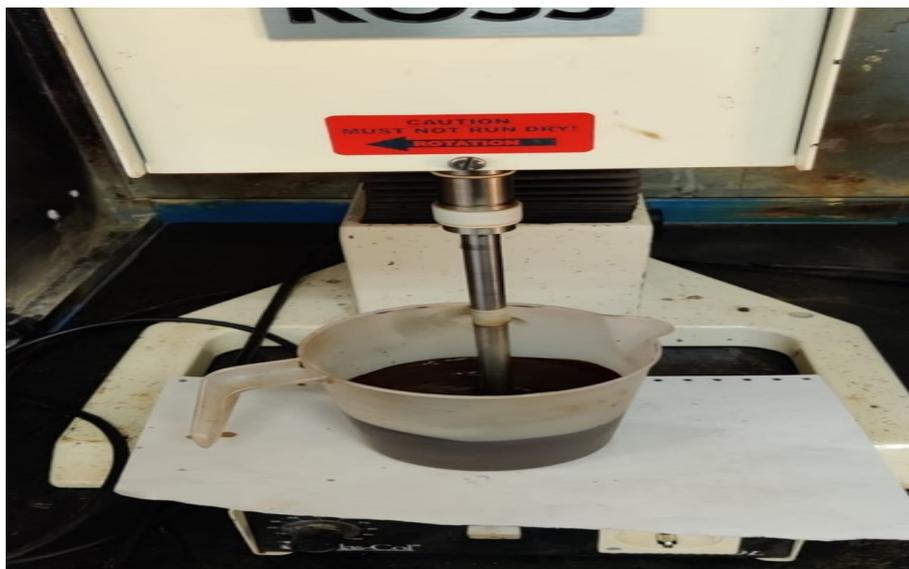


Figura 4.5 – Miscelazione automatica

Il contenuto risultante è stato poi colato in uno stampo silconico di forma quadrata (fig. 4.6); la scelta di questo contenitore è volta ad ottenere un provino finale di spessore 2 millimetri. Il materiale con cui lo stampo è realizzato, ovvero il silicone, permette una rapida separazione provino-stampo.



Figura 4.6 – Colatura nello stampo

Il materiale necessita di un condizionamento iniziale di 12 ore a 20 °C all'interno di una camera climatica. Allo scadere il provino sarà prelevato e riposto in un forno (fig. 4.7) a 50 °C per 36 ore per velocizzare l'eliminazione dell'acqua presente nell'emulsione, mescolando manualmente il contenuto dello stampo ogni 20 minuti (in modo da limitare la sedimentazione del filler).



Figura 4.7 – Forno

Al termine di questa procedura il provino viene riposto in camera climatica a 5 °C, al fine di irrigidire il materiale ed agevolare l'estrazione dello stesso dallo stampo (fig.4.8). Dopo l'estrazione è comunque, bene conservare il materiale, isolato all'interno di carta d'alluminio (per evitare irrigidimento dovuto all'esposizione all'aria), in camera climatica a 5 °C, per conservare più a lungo le proprietà iniziali del mastice ed evitare il suo invecchiamento.

Al fine di ottenere i campioni da testare, è stato impiegato un taglierino, avendo cura di estrarre dal mastice la giusta porzione di materiale (8x8 mm e 25x25 mm) (fig. 4.9).



Figura 4.8 – Mastice nello stampo a fine "cottura"



Figura 4.9 – Provini da inserire nel DSR

4.3 Test Method

4.3.1 Dynamic Shear Rheometer (DSR)

Il Dynamic Shear Rheometer (fig. 4.10) 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 4.10 - 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.4.11).



Figura 4.11 - 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.4.12).

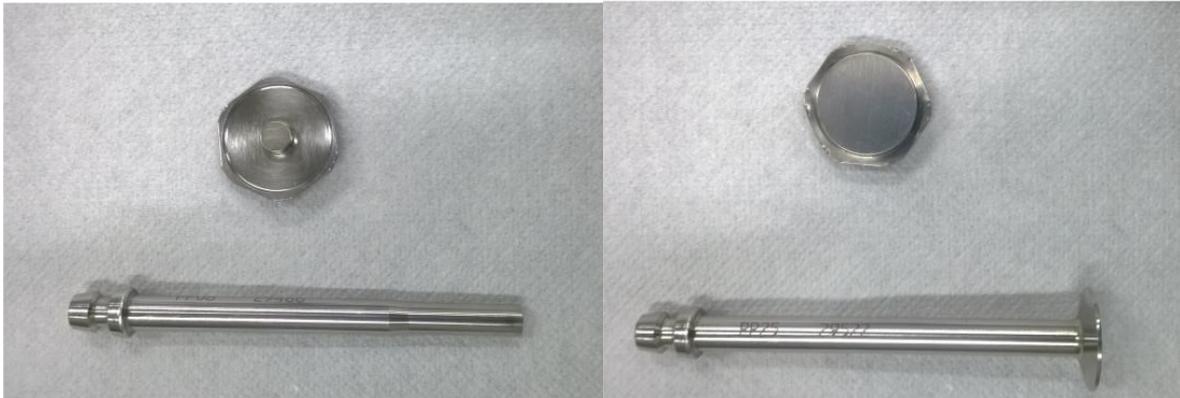


Figura 4.12 – piatti di misura 8mm a sinistra e 25mm a destra

Il software permette di impostare (fig. 4.13):

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

| MCR302 PPO8-SN29488 | | 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 $\gamma, \alpha, \phi, \psi$ | | | | | | |
| Rotation τ, M | | | | | | |
| Oscillation ϕ, γ | | γ 0,001...1 % f 1 Hz | | γ 0,001...1 % f 1 Hz | | |
| Oscillation τ, M | | | | | | |
| F_v | | | | | | |
| $d, v, d/d$ | | | | | | |
| P.PTD200-H-PTD200-SIW Accessory1 T | T 35 °C | | T 5 °C | | T 25 °C | |

Figura 4.13 – 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. 4.14).

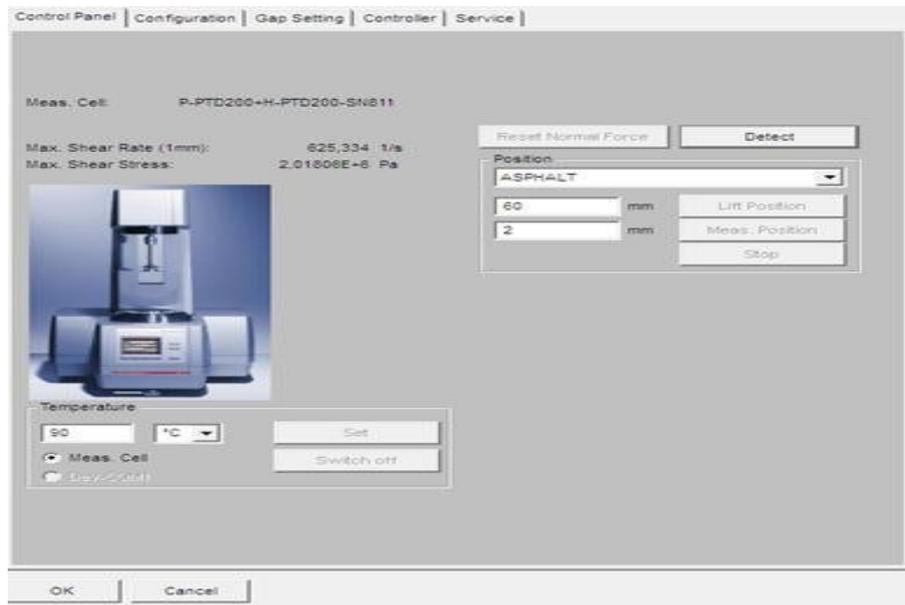


Figura 4.14 – schermata di gestione DSR

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. 4.15).

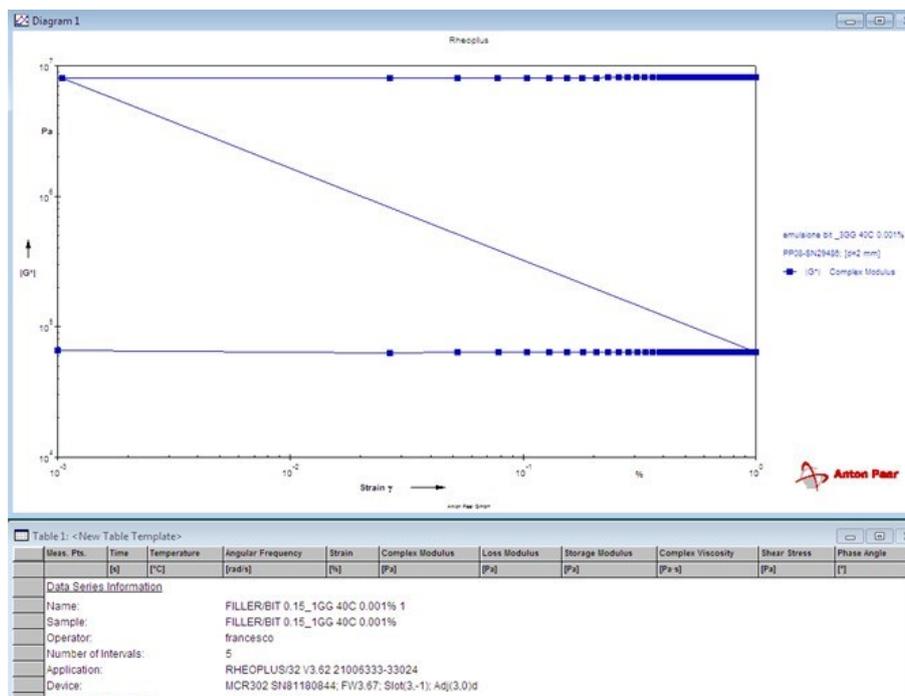


Figura 4.15 – grafico per punti e tabella

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. 4.16):

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

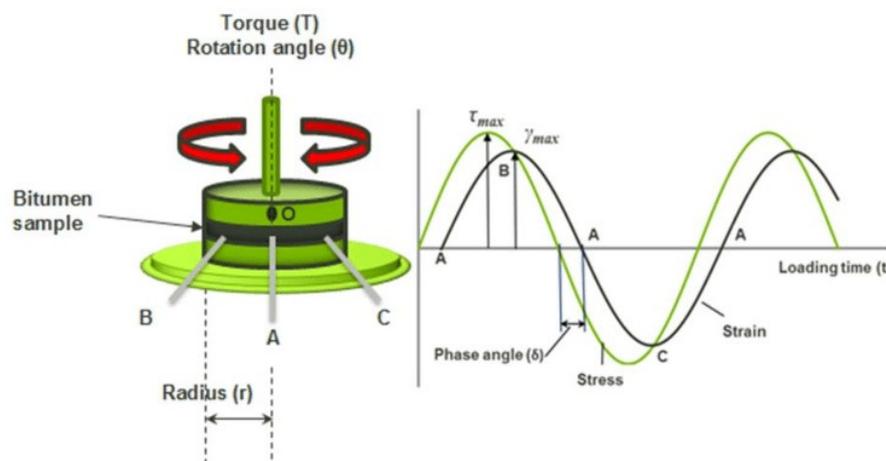


Figura 4.16 – parametri caratteristici

4.3.2 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.

4.3.2.1 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 10 Hz; al campione viene impressa una deformazione che va dallo 0,001% al 10%. Le temperature di prova sono 5 °C, 15 °C e 30°C (fig. 4.17).

| | | 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 $\dot{\gamma}, n, \phi, \gamma$ | | | | | | | |
| 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 | | | | | | | |
| $d, v, \dot{d}d$ | | | | | | | |
| P-PTD200+H-PTD200-SN | Accessory1 T | T 5 °C | | T 15 °C | | T 30 °C | |

Figura 4.17 – 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.

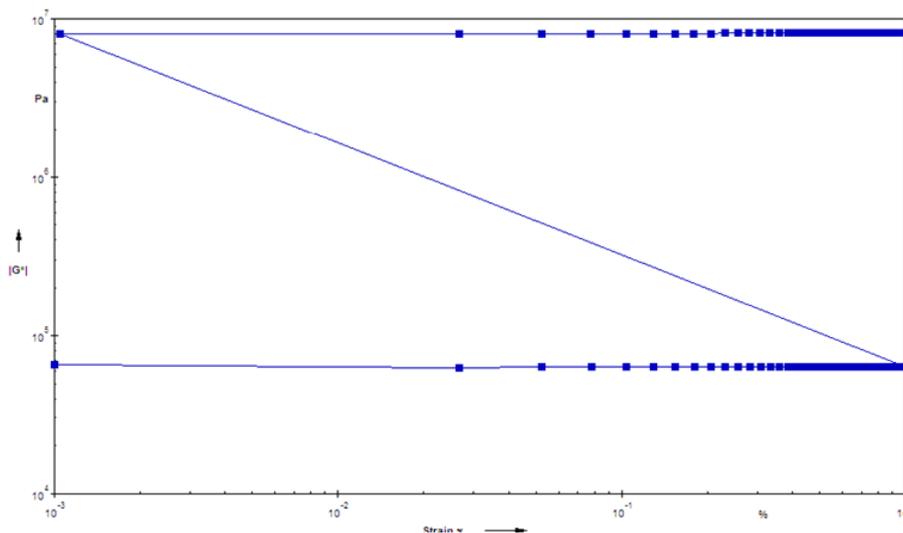


Figura 4.18 – Rappresentazione prova SS

4.3.2.2 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 28 °C a 58 °C, il piatto da 25 mm è quello scelto.

Sono state eseguite due ripetizione per ogni singolo piattino. Nel caso di risultati distanti più del 10% tra loro, è stata effettuata una terza ripetizione di prova (fig.4.19). 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

| Parameter | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|---|---------|
| Rotation γ , n, φ , γ | | | | | | | | | | |
| 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, θ | | | | | | | | | | |
| Accessory T | T 40 °C | | | | T 94 °C | | | | | T 28 °C |

Figura 4.19 – 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.4.20-4.21).

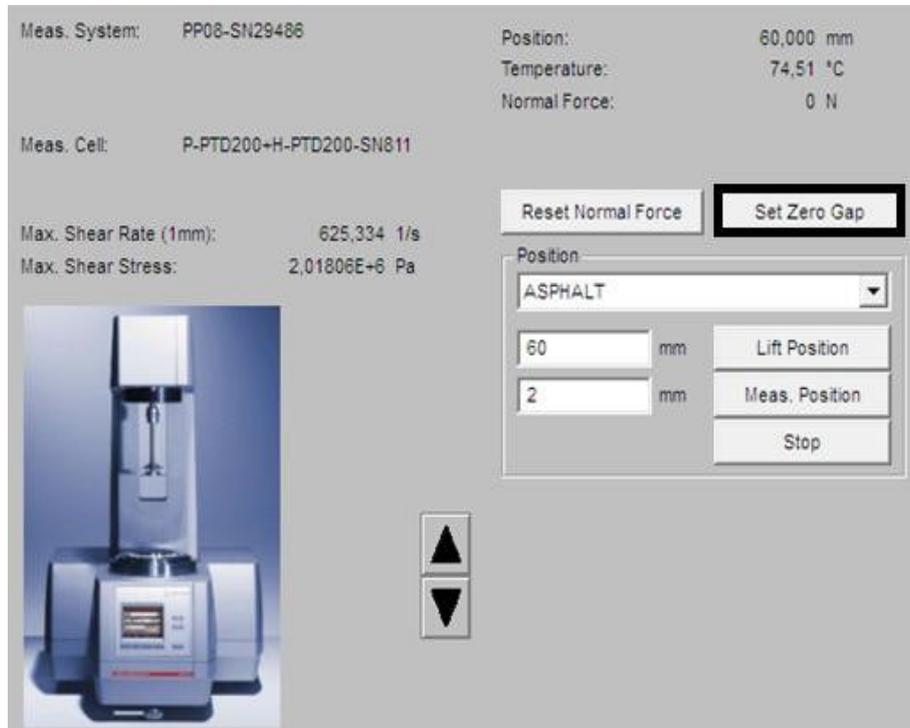


Figura 4.20 – settaggio DSR



Figura 4.21 – 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. 4.22).



Figura 4.22 – 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. 4.23).



Figura 4.23 – 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. 4.24-4.25). In questa fase viene monitorato, attraverso il display del macchinario, il valore dello sforzo normale al fine di limitarne l’entità.

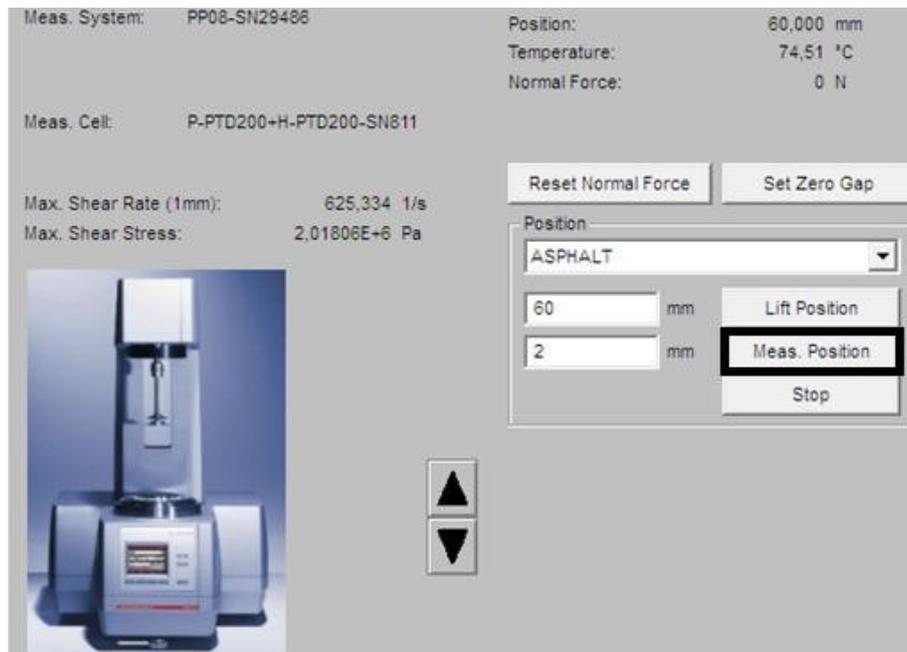


Figura 4.24– Schermata comando “Meas. Position”



Figura 4.25 – Posizione di misura

L'ultima procedura è denominata "trimming", dove il materiale laterale al provino viene rimosso tramite una spatola metallica debitamente riscaldata per agevolare l'operazione medesima (fig.4.26-4.27).

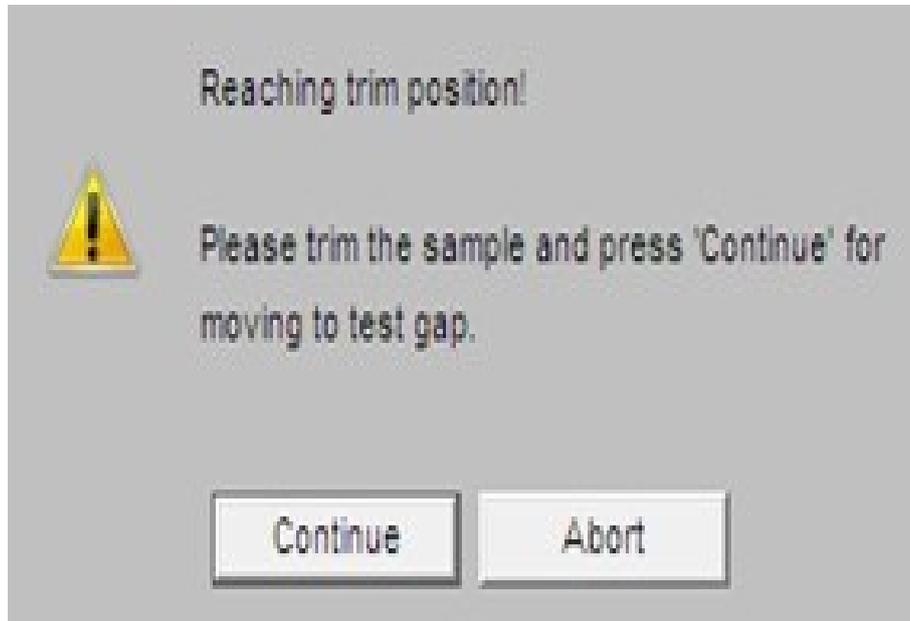


Figura 4.26 – Finestra trimming



Figura 4.27 – Campione dopo trimming

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.4.28).

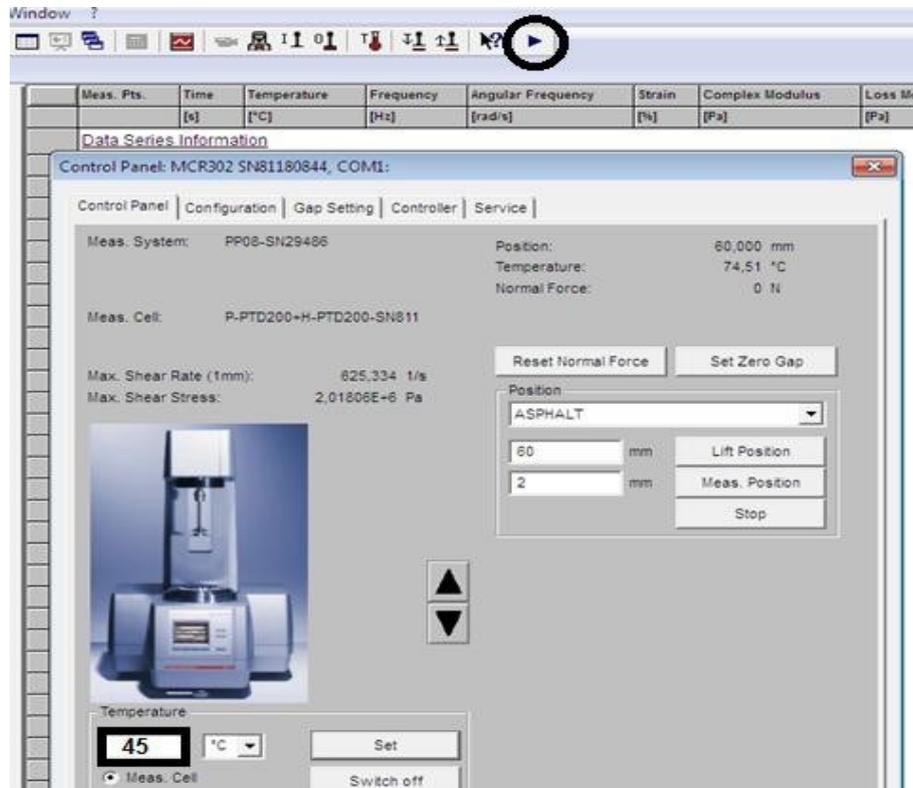


Figura 4.28 – Finestra "play"

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. 4.29):

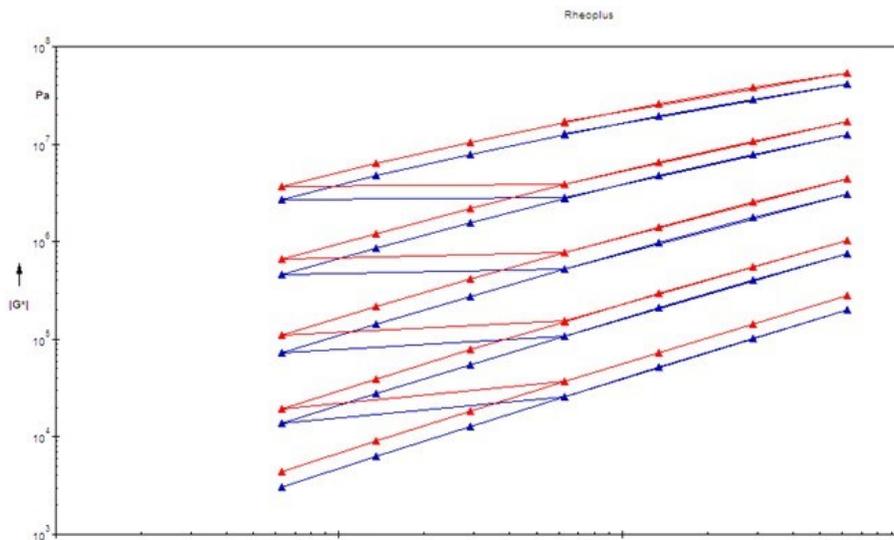


Figura 4.29 – Rappresentazione prova FS

4.3.3 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 28 °C, 34 °C e 40 °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.4.30). Questo iter sarà ripetuto per ogni temperatura di prova.

| | | 1 Pts | 1 Pts | 10 Pts | 15 Pts | 1 Pts | 10 Pts | 15 Pts | 1 Pts | 10 Pts | 15 Pts | 1 Pts | 10 Pts | 15 Pts | 1 Pts | 10 Pts | 15 Pts |
|----------------------|---------------------|-------|-------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| MICRON2 | PP25-SN2922 | 10 mm | 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 _h | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | d, v, d/d | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P-PTD200-H-PTD200-SM | Accessories T | | | | | | | | | | | | | | | | 20 °C |

Figura 4.30 – 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 (fig4.31):

| | | 1 Pts | 10 Pts | 15 Pts | 1 Pts | 10 Pts | 15 Pts | 1 Pts | 10 Pts | 15 Pts | 1 Pts | 10 Pts | 15 Pts | 1 Pts | 10 Pts | 15 Pts | 1 Pts |
|----------------------|---------------------|-------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|---------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| MICRON2 | PP25-SN2922 | 10 mm | 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 _h | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | d, v, d/d | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P-PTD200-H-PTD200-SM | Accessories T | | | | | | | | | | | | | | | | 20 °C |

Figura 4.31 – Impostazione parametri di prova

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

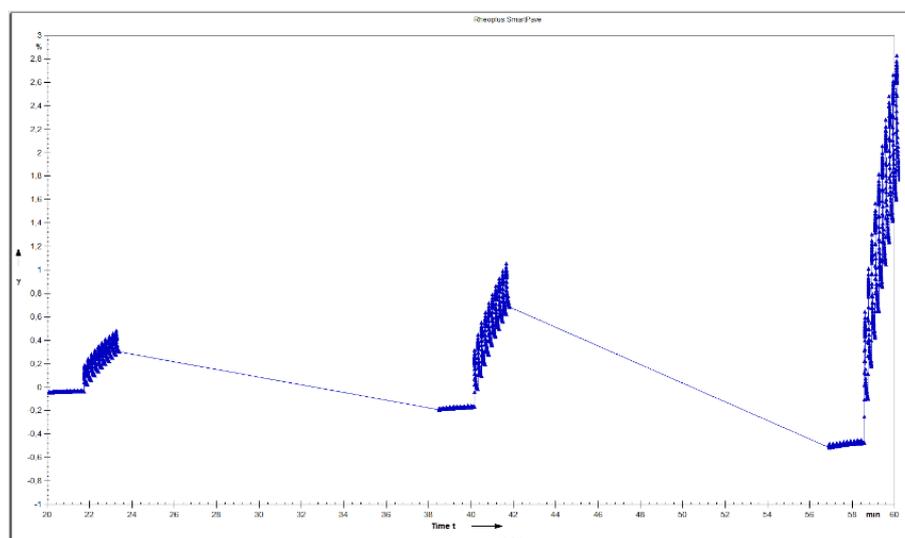


Figura 4.32 – Rappresentazione prova MSCR

4.3.4 Prova LAS (Linear Amplitude Sweep)

La prova Linear Amplitude Sweep (LAS) è utilizzata per studiare il comportamento a fatica dei bitumi. 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 temperatura adottata nella prova LAS è quella di 20 °C, prevedendo preliminarmente un condizionamento di 20 minuti alla temperatura di prova (fig. 4.33). La fase di preparazione macchina-campione è la medesima delle prove SS, FS e MSCR.

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 10 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. 4.33):

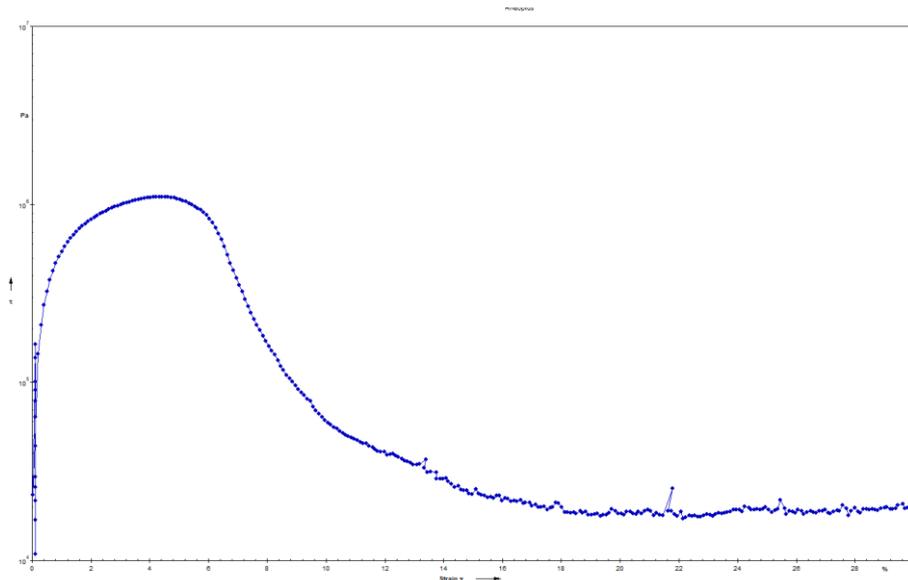


Figura 4.33 – Rappresentazione prova LAS

4.4 Nomenclatura

Sono stati realizzati sei mastici con tre emulsioni bituminose, che sono:

- Emulsione bituminosa tradizionale indicata con la lettera N;
- Emulsione bituminosa modificata con polimeri SBS indicata con la lettera P;
- Emulsione bituminosa modificata con lattice SBR indicata con la lettera L.

E due tipi di filler:

- Filler calcareo (CaCO_3) indicato con la sigla “omya”.
- Filler di recupero

Ne risulta la nomenclatura dei sei provini come segue:

- | | |
|------------|--------------------------|
| [1] N_omya | [4] N_filler di recupero |
| [2] P_omya | [5] P_filler di recupero |
| [3] L_omya | [6] L_filler di recupero |

Da questi sei mastici sono stati ricavati i singoli provini inseriti nel macchinario di prova Dynamic Shear Rheometer (DSR).

È stata quindi adottata la seguente codifica per ogni provino: X_Y_Z_N

dove:

- X = tipo di emulsione bituminosa;
- Y = tipo di filler;
- Z = tipo di prova eseguita;
- N = numero ripetizione.

Le prove eseguite vengono definite come segue:

- Frequency Sweep, indicata come FS;
- Strain Sweep, indicata come SS;
- Multiple Stress Creep Recovery, indicata MSCR;
- Linear Amplitude Sweep, indicata come LAS.

Capitolo 5- Analisi dei risultati

5.1 Comportamento visco-elastico lineare

La prestazione dei bitumi, dei mastici bituminosi e dei conglomerati bituminosi dipendono dalle loro proprietà meccaniche. Quindi è indispensabile caratterizzare tali proprietà in funzione delle tensioni e delle temperature di impiego. Il bitume ha un comportamento visco-elastico termo dipendente, inoltre, il suo comportamento è influenzato dal periodo di carico, dalla modalità e dall'invecchiamento. Per studiare il comportamento del mastice bituminoso oggetto di questa sperimentazione, come dispositivo è stato scelto il DSR; questo strumento permette il controllo della temperatura e condizioni tenso-deformative.

5.1.1 Determinazione della curva maestra

La *Curva Maestra* o *Master Curve* è una rappresentazione grafica del comportamento di un materiale bituminoso al variare della frequenza di carico o della temperatura. Essa può essere determinata mediante il principio di sovrapposizione tempo-temperatura. Esiste una temperatura detta temperatura di riferimento T_{rif} , la quale è usata come base di rappresentazione della curva maestra. Tale curva riporta l'andamento del modulo dinamico $|E^*|$ o dell'angolo di fase φ , in funzione della frequenza di carico ridotta f_r .

5.1.1.1 Principio di sovrapposizione tempo temperatura

Questo principio afferma che gli effetti ottenuti dall'applicazione di un carico ad una determinata frequenza e ad una determinata temperatura sono identici a quelli ottenibili applicando, sullo stesso materiale, un carico con una frequenza diversa ad una temperatura diversa. Gli effetti prodotti da

temperatura e dal tempo di applicazione del carico sono sovrapponibili, in particolare una riduzione della frequenza di carico produce gli stessi effetti di un aumento di temperatura. I materiali che rispettano tale principio sono definiti *termoreologicamente semplici* [9].

Esiste un fattore di traslazione denominato “shift factor”, il quale permette la traslazione di tutti i tempi di rilassamento con variazione di temperatura.

Considerando un sistema con diversi tempi di rilassamento τ , espressi in funzione alla temperatura di riferimento T_{rif} o T_0 , cioè: $\tau_1(T_0), \tau_2(T_0), \tau_3(T_0)$. Andando a modificare la temperatura ad un diverso valore T , si modificheranno anche tutti i tempi di rilassamento del sistema e cioè: $\tau_1(a_T), \tau_2(a_T), \tau_3(a_T)$. Dove, con a_T si indica il fattore di traslazione orizzontale o horizontal shift factor, il quale dipenderà esclusivamente dalla temperatura T .

I dati sperimentali ottenuti dalle prove dinamiche, fatte a differenti temperature, saranno traslati, con i fattori di traslazione orizzontale tramite l’equazione empirica di Williams-Landel-Ferry o indicata con l’acronimo WLF. Questa equazione permette di determinare α_T tramite la seguente

relazione:

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

Dove: C_1 e C_2 sono due costanti che dipendono dalla temperatura e dal materiale; T_{rif} è la temperatura di riferimento. Nella sperimentazione eseguita, gli horizontal shift- factors α_T sono relativi alle seguenti temperature di prova T : 0 °C, 4 °C, 10°C, 16 °C, 22 °C, 28 °C, 34 °C, 40 °C, 46 °C, 52 °C, 58 °C.

5.1.1.2 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. 5.1)

- 2S corrisponde a 2 springs (2 molle), E_∞ - E_0 e E_0
- 2P corrisponde a 2 parabolic elements (2 elementi parabolici), k e h
- 1D corrisponde a 1 dashpot (1 smorzatore viscoso lineare), β

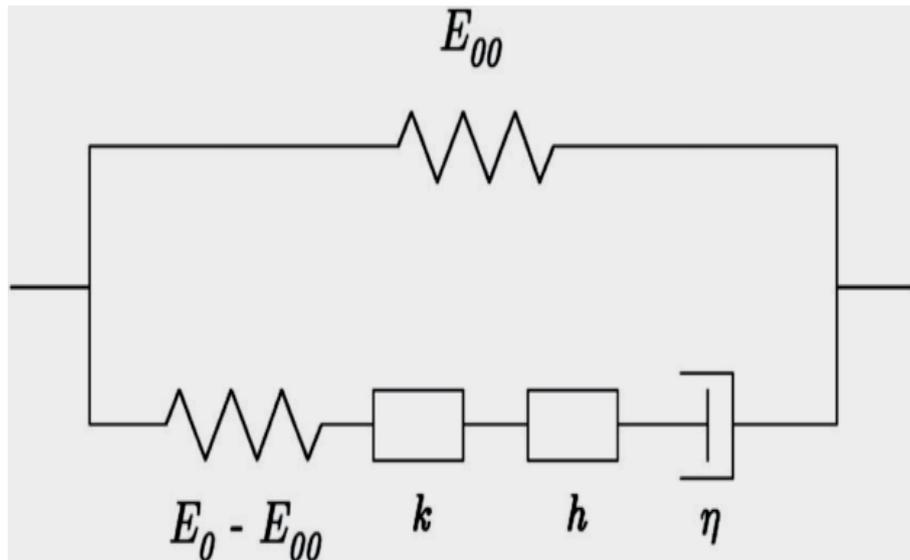


Figura 5.1 - Rappresentazione modello 2S2P1D

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 [11]
- τ_0 è il tempo caratteristico alla temperatura di riferimento
- $T_{rif} = T_0 = 34 \text{ °C}$.

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.

5.1.1.3 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 5.2)

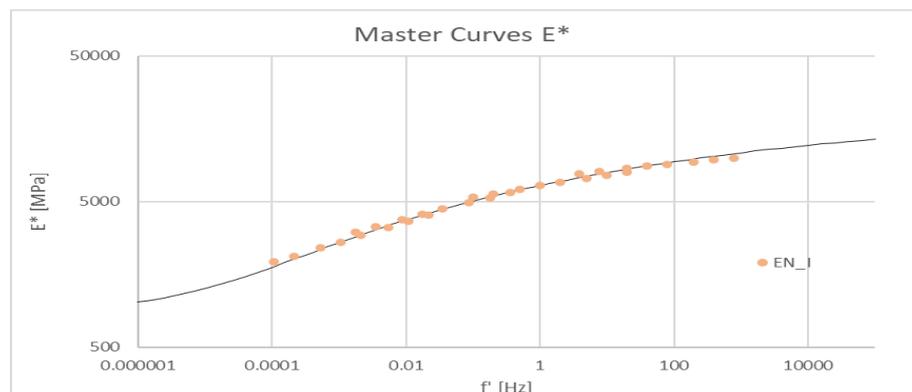


Figura 5.2 - Esempio di curva maestra

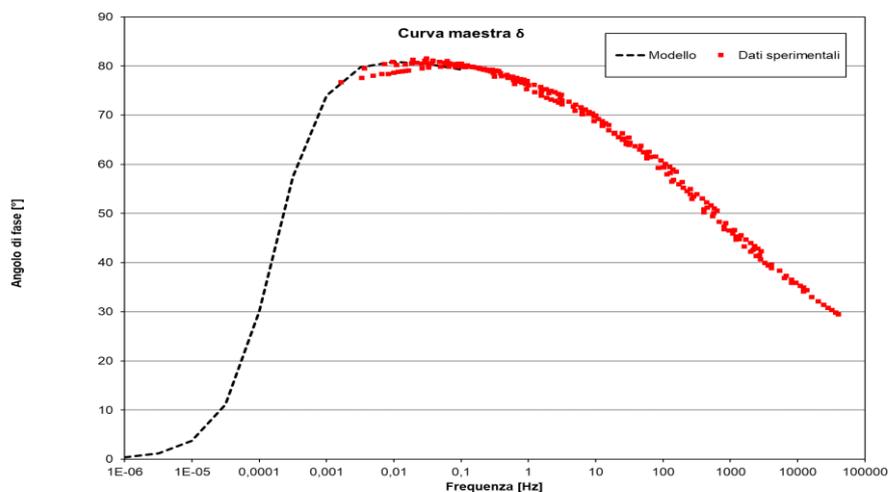


Figura 5.2 - Esempio di curva maestra

- **Piano di Black:** in questo piano si riporta l'andamento del modulo dinamico $|G^*|$ in funzione dell'angolo di fase ϕ (fig. 5.3).

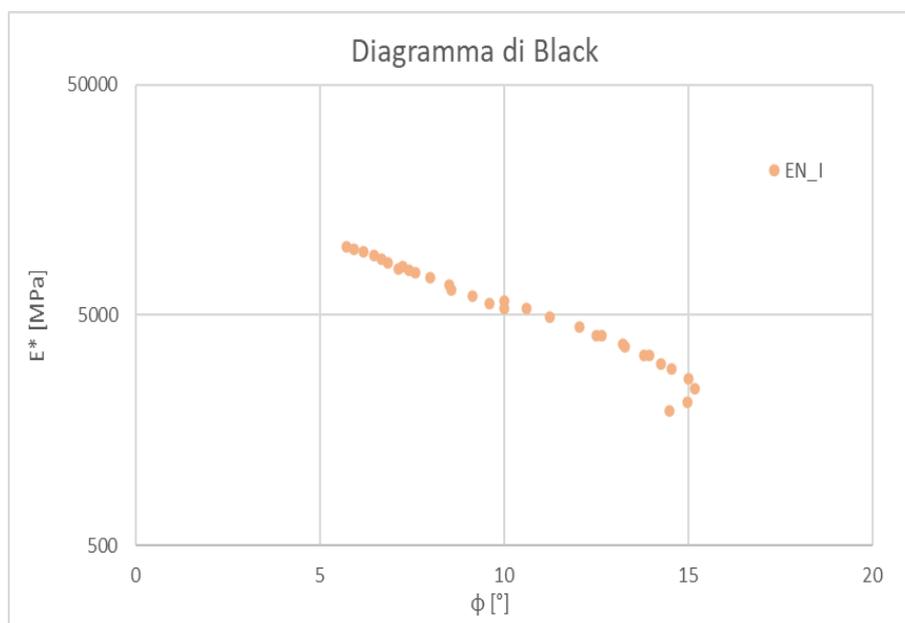


Figura 5.3 - Esempio di diagramma di Black

- **Piano di Cole-Cole:** Il piano è rappresentato dalle componenti del modulo complesso G^* . L'asse delle ascisse riporta la componente elastica G_1 , modulo di restituzione elastica, indica il lavoro reversibile. L'asse delle ordinate rappresenta la componente viscosa G_2 , modulo di dissipazione viscosa, a cui compete il lavoro irreversibile (fig. 5.4).

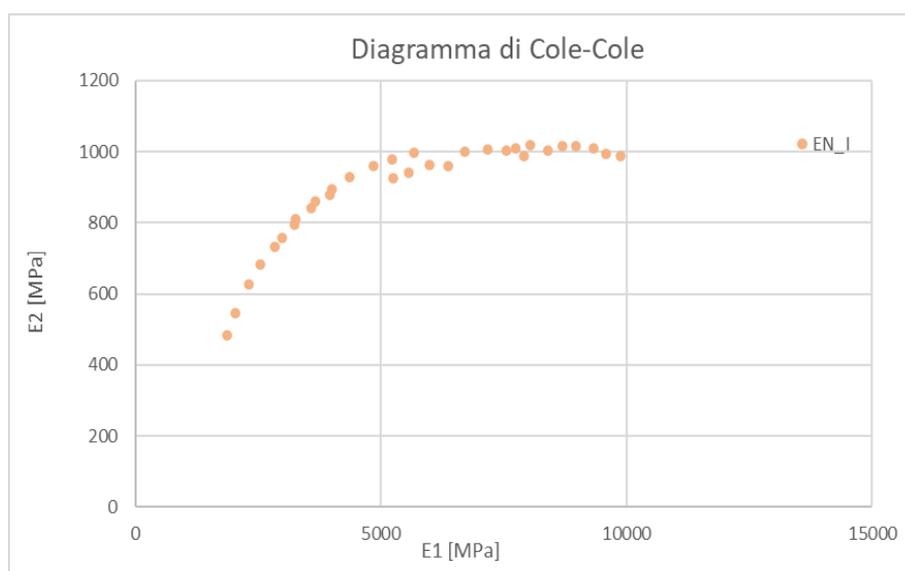


Figura 5.4 - Esempio di diagramma di Cole-Cole

5.1.2 Risultati strain sweep (SS) e frequency sweep (FS)

5.1.2.1 Elaborazione strain sweep

Nel presente paragrafo sarà determinato il campo di linearità dei materiali, attraverso i dati ottenuti dalla prova Strain sweep. Verranno riportate le tabelle, che indicano il comportamento del materiale, di ognuno dei mastici prodotti. Il grafico del primo materiale sarà usato a titolo esemplificativo per mostrare graficamente il valore di deformazione a cui corrisponde un decadimento del modulo iniziale $|G^*|$ pari al 5%. Per ogni mastice sono state eseguite 2/3 ripetizioni, di queste, sarà scelta la ripetizione più vincolante per la determinazione del campo di linearità.

-**Provino N_omya**: la deformazione limite trovata, sia graficamente (fig. 5.5) che analiticamente (tab. 5.6), corrisponde a $\gamma = 0,0469\%$ per una temperatura $T = 5\text{ }^\circ\text{C}$. Alle temperature di $15\text{ }^\circ\text{C}$ e $30\text{ }^\circ\text{C}$ la deformazione limite, corrispondente alla diminuzione del 5% di $|G^*|$, risulta essere rispettivamente di $0,0777\%$ e $0,127\%$, e quindi superiore.

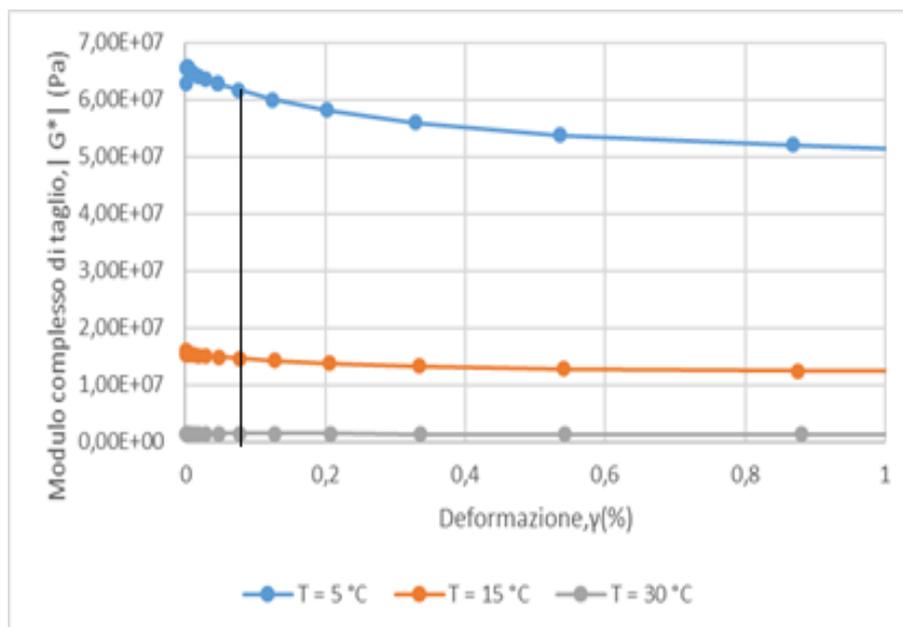


Figura 5.5 – SS provino N_omya

| Temperature [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Temperature [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Temperature [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] |
|---------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| 5 | 0,00125 | 6,29E+07 | 15 | 0,00102 | 1,60E+07 | 30 | 0,00101 | 1,46E+06 |
| 5 | 0,00157 | 6,56E+07 | 15 | 0,00161 | 1,53E+07 | 30 | 0,00162 | 1,46E+06 |
| 5 | 0,00255 | 6,57E+07 | 15 | 0,00262 | 1,53E+07 | 30 | 0,00263 | 1,46E+06 |
| 5 | 0,00415 | 6,54E+07 | 15 | 0,00424 | 1,54E+07 | 30 | 0,00426 | 1,47E+06 |
| 5 | 0,00674 | 6,51E+07 | 15 | 0,0069 | 1,53E+07 | 30 | 0,00693 | 1,46E+06 |
| 5 | 0,011 | 6,46E+07 | 15 | 0,0112 | 1,52E+07 | 30 | 0,0113 | 1,45E+06 |
| 5 | 0,0178 | 6,41E+07 | 15 | 0,0182 | 1,51E+07 | 30 | 0,0183 | 1,44E+06 |
| 5 | 0,0289 | 6,35E+07 | 15 | 0,0296 | 1,50E+07 | 30 | 0,0297 | 1,43E+06 |
| 5 | 0,0469 | 6,28E+07 | 15 | 0,0479 | 1,48E+07 | 30 | 0,0481 | 1,42E+06 |
| 5 | 0,0763 | 6,17E+07 | 15 | 0,0777 | 1,46E+07 | 30 | 0,0781 | 1,41E+06 |
| 5 | 0,125 | 6,00E+07 | 15 | 0,127 | 1,42E+07 | 30 | 0,127 | 1,39E+06 |
| 5 | 0,203 | 5,81E+07 | 15 | 0,206 | 1,37E+07 | 30 | 0,207 | 1,36E+06 |
| 5 | 0,329 | 5,60E+07 | 15 | 0,334 | 1,32E+07 | 30 | 0,336 | 1,33E+06 |
| 5 | 0,535 | 5,38E+07 | 15 | 0,541 | 1,28E+07 | 30 | 0,543 | 1,30E+06 |
| 5 | 0,868 | 5,20E+07 | 15 | 0,875 | 1,24E+07 | 30 | 0,88 | 1,26E+06 |
| 5 | 1,42 | 4,96E+07 | 15 | 1,43 | 1,21E+07 | 30 | 1,43 | 1,22E+06 |
| 5 | 2,32 | 4,63E+07 | 15 | 2,32 | 1,18E+07 | 30 | 2,34 | 1,18E+06 |
| 5 | 3,79 | 4,14E+07 | 15 | 3,78 | 1,14E+07 | 30 | 3,79 | 1,15E+06 |
| 5 | 6,69 | 3,42E+07 | 15 | 6,12 | 1,05E+07 | 30 | 6,14 | 1,13E+06 |
| 5 | 9,05 | 2,71E+07 | 15 | 9,87 | 9,24E+06 | 30 | 9,94 | 1,11E+06 |

Tabella 5.6 – Tabella SS provino N_omya

-Provino N_filler di recupero: la deformazione limite trovata analiticamente (tab. 5.7), corrisponde a $\gamma = 0,023\%$ per una temperatura $T = 5\text{ }^\circ\text{C}$, approssimando si è visto che la deformazione limita corrisponde a $\gamma = 0,022\%$ per $T = 15\text{ }^\circ\text{C}$. Alle temperature di $30\text{ }^\circ\text{C}$ la deformazione limite, corrispondente alla diminuzione del 5% di $|G^*|$, risulta essere rispettivamente di 0,0304%.

| Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] |
|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|
| 0,00104 | 5,57E+07 | 0,00109 | 9,37E+06 | 0,00102 | 1,33E+06 |
| 0,00167 | 5,62E+07 | 0,00164 | 9,43E+06 | 0,00165 | 1,34E+06 |
| 0,00266 | 5,60E+07 | 0,00268 | 9,43E+06 | 0,00268 | 1,34E+06 |
| 0,00434 | 5,58E+07 | 0,00434 | 9,34E+06 | 0,00435 | 1,33E+06 |
| 0,00706 | 5,54E+07 | 0,00708 | 9,36E+06 | 0,00708 | 1,33E+06 |
| 0,0201 | 5,44E+07 | 0,0114 | 9,24E+06 | 0,0114 | 1,32E+06 |
| 0,024 | 5,31E+07 | 0,0186 | 9,04E+06 | 0,0187 | 1,30E+06 |
| 0,0303 | 5,17E+07 | 0,0304 | 8,74E+06 | 0,0304 | 1,27E+06 |
| 0,0487 | 5,03E+07 | 0,0491 | 8,34E+06 | 0,0492 | 1,22E+06 |
| 0,0801 | 4,89E+07 | 0,0799 | 7,89E+06 | 0,08 | 1,16E+06 |
| 0,128 | 4,73E+07 | 0,129 | 7,40E+06 | 0,13 | 1,09E+06 |
| 0,208 | 4,54E+07 | 0,21 | 6,92E+06 | 0,21 | 1,01E+06 |
| 0,345 | 4,35E+07 | 0,343 | 6,48E+06 | 0,344 | 937.000 |
| 0,552 | 4,11E+07 | 0,556 | 5,90E+06 | 0,556 | 870.000 |
| 0,899 | 3,86E+07 | 0,901 | 5,26E+06 | 0,902 | 810.000 |
| 1,46 | 3,57E+07 | 1,46 | 4,42E+06 | 1,47 | 766.000 |
| 2,33 | 3,18E+07 | 2,37 | 3,68E+06 | 2,37 | 725.000 |
| 3,81 | 2,65E+07 | 3,86 | 3,24E+06 | 3,87 | 694.000 |
| 6,17 | 1,61E+07 | 6,29 | 2,84E+06 | 6,29 | 674.000 |
| 10,1 | 7,02E+06 | 10,2 | 2,36E+06 | 10,2 | 653.000 |

Tabella 5.7 – Tabella SS provino N_filler di recupero

-Provino L_omya: la deformazione limite trovata analiticamente (tab. 5.8), corrisponde a $\gamma = 0,0293\%$ per una temperatura $T = 5\text{ }^\circ\text{C}$. Alle temperature di $15\text{ }^\circ\text{C}$ e $30\text{ }^\circ\text{C}$ la deformazione limite risulta essere rispettivamente di 0,0479% e 0,0781%.

| Temperature [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Temperature [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Temperature [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] |
|---------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| 5 | 0,000909 | 3,60E+07 | 15 | 0,00106 | 9,02E+06 | 30 | 0,00101 | 969.000 |
| 5 | 0,0016 | 3,58E+07 | 15 | 0,00162 | 8,85E+06 | 30 | 0,00162 | 964.000 |
| 5 | 0,00259 | 3,57E+07 | 15 | 0,00262 | 8,85E+06 | 30 | 0,00263 | 967.000 |
| 5 | 0,0042 | 3,57E+07 | 15 | 0,00425 | 8,89E+06 | 30 | 0,00426 | 970.000 |
| 5 | 0,00684 | 3,54E+07 | 15 | 0,00691 | 8,86E+06 | 30 | 0,00693 | 965.000 |
| 5 | 0,0112 | 3,51E+07 | 15 | 0,0113 | 8,79E+06 | 30 | 0,0113 | 956.000 |
| 5 | 0,0181 | 3,46E+07 | 15 | 0,0183 | 8,72E+06 | 30 | 0,0183 | 950.000 |
| 5 | 0,0293 | 3,40E+07 | 15 | 0,0296 | 8,63E+06 | 30 | 0,0297 | 943.000 |
| 5 | 0,0475 | 3,33E+07 | 15 | 0,0479 | 8,53E+06 | 30 | 0,0481 | 937.000 |
| 5 | 0,0772 | 3,24E+07 | 15 | 0,0779 | 8,37E+06 | 30 | 0,0781 | 928.000 |
| 5 | 0,126 | 3,14E+07 | 15 | 0,127 | 8,14E+06 | 30 | 0,127 | 913.000 |
| 5 | 0,204 | 3,07E+07 | 15 | 0,206 | 7,90E+06 | 30 | 0,207 | 896.000 |
| 5 | 0,331 | 3,02E+07 | 15 | 0,335 | 7,66E+06 | 30 | 0,336 | 878.000 |
| 5 | 0,537 | 2,97E+07 | 15 | 0,542 | 7,48E+06 | 30 | 0,543 | 857.000 |
| 5 | 0,869 | 2,96E+07 | 15 | 0,878 | 7,41E+06 | 30 | 0,881 | 836.000 |
| 5 | 1,42 | 2,90E+07 | 15 | 1,43 | 7,34E+06 | 30 | 1,43 | 811.000 |
| 5 | 2,32 | 2,79E+07 | 15 | 2,33 | 7,26E+06 | 30 | 2,34 | 791.000 |
| 5 | 3,77 | 2,58E+07 | 15 | 3,78 | 7,12E+06 | 30 | 3,79 | 779.000 |
| 5 | 6,1 | 2,21E+07 | 15 | 6,13 | 6,75E+06 | 30 | 6,14 | 768.000 |
| 5 | 9,79 | 1,71E+07 | 15 | 9,9 | 6,13E+06 | 30 | 9,94 | 759.000 |

Tabella 5.8 – Tabella SS provino L_omya

-Provino L_filler di recupero: la deformazione limite trovata analiticamente (tab. 5.9), corrisponde a $\gamma = 0,0799$ % per una temperatura $T = 15$ °C. Alle temperature di 5 °C e 30 °C la deformazione limite risulta essere rispettivamente di 0,0801 % e 0,0800 %.

| Temperat [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Temperat [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Temperat [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] |
|------------------|---------------|-------------------------|------------------|---------------|-------------------------|------------------|---------------|-------------------------|
| 5 | 0,0011 | 5,44E+07 | 15 | 0,0011 | 1,29E+07 | 30 | 0,0010 | 1,24E+06 |
| 5 | 0,0017 | 5,49E+07 | 15 | 0,0016 | 1,29E+07 | 30 | 0,0017 | 1,29E+06 |
| 5 | 0,0027 | 5,47E+07 | 15 | 0,0027 | 1,28E+07 | 30 | 0,0027 | 1,30E+06 |
| 5 | 0,0044 | 5,47E+07 | 15 | 0,0043 | 1,29E+07 | 30 | 0,0044 | 1,30E+06 |
| 5 | 0,0071 | 5,46E+07 | 15 | 0,0071 | 1,28E+07 | 30 | 0,0071 | 1,29E+06 |
| 5 | 0,0113 | 5,43E+07 | 15 | 0,0114 | 1,28E+07 | 30 | 0,0114 | 1,29E+06 |
| 5 | 0,0187 | 5,39E+07 | 15 | 0,0186 | 1,27E+07 | 30 | 0,0187 | 1,28E+06 |
| 5 | 0,0302 | 5,35E+07 | 15 | 0,0304 | 1,26E+07 | 30 | 0,0304 | 1,27E+06 |
| 5 | 0,0488 | 5,30E+07 | 15 | 0,0490 | 1,24E+07 | 30 | 0,0492 | 1,26E+06 |
| 5 | 0,0801 | 5,24E+07 | 15 | 0,0799 | 1,23E+07 | 30 | 0,0800 | 1,24E+06 |
| 5 | 0,1280 | 5,14E+07 | 15 | 0,1290 | 1,20E+07 | 30 | 0,1300 | 1,21E+06 |
| 5 | 0,2090 | 4,98E+07 | 15 | 0,2090 | 1,17E+07 | 30 | 0,2100 | 1,19E+06 |
| 5 | 0,3440 | 4,78E+07 | 15 | 0,3430 | 1,13E+07 | 30 | 0,3440 | 1,16E+06 |
| 5 | 0,5510 | 4,51E+07 | 15 | 0,5550 | 1,09E+07 | 30 | 0,5560 | 1,13E+06 |
| 5 | 0,8990 | 4,19E+07 | 15 | 0,8990 | 1,03E+07 | 30 | 0,9020 | 1,10E+06 |
| 5 | 1,4600 | 3,81E+07 | 15 | 1,4600 | 9,80E+06 | 30 | 1,4700 | 1,06E+06 |
| 5 | 2,3200 | 3,27E+07 | 15 | 2,3600 | 9,18E+06 | 30 | 2,3700 | 1,03E+06 |
| 5 | 3,8000 | 2,05E+07 | 15 | 3,8500 | 8,57E+06 | 30 | 3,8600 | 994.000 |
| 5 | 6,3600 | 1,59E+07 | 15 | 6,2700 | 7,86E+06 | 30 | 6,2900 | 968.000 |
| 5 | 10,3000 | 1,56E+07 | 15 | 10,1000 | 6,90E+06 | 30 | 10,2000 | 943.000 |

Tabella 5.9 – Tabella SS provino L_filler di recupero

-Provino P_omya: la deformazione limite trovata analiticamente (tab. 5.10), corrisponde a $\gamma = 0,0304$ % per una temperatura $T = 15$ °C. Alle temperature di 5 °C e 30 °C la deformazione limite risulta essere di 0,08 %.

| Temperature [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Temperature [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Temperature [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] |
|---------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------|-------------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| 4,99 | 0,00106 | 4,49E+07 | 15 | 0,00111 | 1,37E+07 | 30 | 0,00102 | 1,72E+06 |
| 4,99 | 0,00165 | 4,55E+07 | 15 | 0,00164 | 1,36E+07 | 30 | 0,00165 | 1,75E+06 |
| 4,99 | 0,00266 | 4,53E+07 | 15 | 0,00267 | 1,36E+07 | 30 | 0,00268 | 1,72E+06 |
| 4,99 | 0,00435 | 4,50E+07 | 15 | 0,00434 | 1,36E+07 | 30 | 0,00435 | 1,73E+06 |
| 4,99 | 0,00704 | 4,49E+07 | 15 | 0,00708 | 1,35E+07 | 30 | 0,00709 | 1,72E+06 |
| 4,99 | 0,0113 | 4,46E+07 | 15 | 0,0114 | 1,34E+07 | 30 | 0,0114 | 1,71E+06 |
| 4,99 | 0,0187 | 4,42E+07 | 15 | 0,0186 | 1,32E+07 | 30 | 0,0187 | 1,71E+06 |
| 4,99 | 0,0302 | 4,38E+07 | 15 | 0,0304 | 1,30E+07 | 30 | 0,0304 | 1,70E+06 |
| 4,99 | 0,0489 | 4,34E+07 | 15 | 0,0491 | 1,27E+07 | 30 | 0,0491 | 1,68E+06 |
| 4,99 | 0,08 | 4,32E+07 | 15 | 0,0799 | 1,24E+07 | 30 | 0,08 | 1,65E+06 |
| 4,99 | 0,128 | 4,31E+07 | 15 | 0,129 | 1,20E+07 | 30 | 0,13 | 1,61E+06 |
| 4,99 | 0,209 | 4,26E+07 | 15 | 0,209 | 1,15E+07 | 30 | 0,21 | 1,57E+06 |
| 4,99 | 0,343 | 4,14E+07 | 15 | 0,343 | 1,11E+07 | 30 | 0,343 | 1,54E+06 |
| 4,99 | 0,551 | 3,97E+07 | 15 | 0,555 | 1,07E+07 | 30 | 0,556 | 1,49E+06 |
| 4,99 | 0,901 | 3,78E+07 | 15 | 0,899 | 1,03E+07 | 30 | 0,901 | 1,45E+06 |
| 4,99 | 1,45 | 3,53E+07 | 15 | 1,46 | 9,90E+06 | 30 | 1,46 | 1,42E+06 |
| 4,99 | 2,33 | 3,16E+07 | 15 | 2,36 | 9,28E+06 | 30 | 2,37 | 1,37E+06 |
| 4,99 | 3,83 | 2,72E+07 | 15 | 3,85 | 8,44E+06 | 30 | 3,86 | 1,33E+06 |
| 4,99 | 6,19 | 2,12E+07 | 15 | 6,28 | 7,25E+06 | 30 | 6,29 | 1,27E+06 |
| 4,99 | 10,1 | 1,38E+07 | 15 | 10,1 | 5,81E+06 | 30 | 10,2 | 1,18E+06 |

Tabella 5.10 – Tabella SS provino P_omya

-Provino P_filler di recupero: la deformazione limite trovata analiticamente (tab. 5.11), corrisponde a $\gamma = 0,0114$ % per una temperatura $T = 15$ °C. Alle temperature di 5 °C e 30 °C la deformazione limite risulta essere rispettivamente di 0,1280 % e 0,0492 %.

| Temperat [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Temperat [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] | Temperat [°C] | Strain [%] | Complex Modulus [Pa] |
|------------------|---------------|-------------------------|------------------|---------------|-------------------------|------------------|---------------|-------------------------|
| 5 | 0,0009 | 6,92E+07 | 15 | 0,0011 | 7,25E+06 | 30 | 0,0010 | 1,72E+06 |
| 5 | 0,0017 | 6,95E+07 | 15 | 0,0016 | 7,25E+06 | 30 | 0,0017 | 1,71E+06 |
| 5 | 0,0027 | 6,96E+07 | 15 | 0,0027 | 7,24E+06 | 30 | 0,0027 | 1,71E+06 |
| 5 | 0,0044 | 6,93E+07 | 15 | 0,0044 | 7,16E+06 | 30 | 0,0044 | 1,71E+06 |
| 5 | 0,0070 | 6,93E+07 | 15 | 0,0071 | 7,02E+06 | 30 | 0,0071 | 1,70E+06 |
| 5 | 0,0113 | 6,90E+07 | 15 | 0,0197 | 6,97E+06 | 30 | 0,0114 | 1,69E+06 |
| 5 | 0,0187 | 6,87E+07 | 15 | 0,0247 | 6,79E+06 | 30 | 0,0187 | 1,67E+06 |
| 5 | 0,0302 | 6,83E+07 | 15 | 0,0304 | 6,58E+06 | 30 | 0,0304 | 1,65E+06 |
| 5 | 0,0488 | 6,79E+07 | 15 | 0,0491 | 6,34E+06 | 30 | 0,0492 | 1,63E+06 |
| 5 | 0,0800 | 6,75E+07 | 15 | 0,0800 | 6,04E+06 | 30 | 0,0800 | 1,61E+06 |
| 5 | 0,1280 | 6,67E+07 | 15 | 0,1290 | 5,66E+06 | 30 | 0,1300 | 1,59E+06 |
| 5 | 0,2090 | 6,52E+07 | 15 | 0,2100 | 5,17E+06 | 30 | 0,2100 | 1,56E+06 |
| 5 | 0,3440 | 6,25E+07 | 15 | 0,3440 | 4,74E+06 | 30 | 0,3440 | 1,52E+06 |
| 5 | 0,5500 | 5,86E+07 | 15 | 0,5560 | 4,33E+06 | 30 | 0,5560 | 1,47E+06 |
| 5 | 0,9010 | 5,39E+07 | 15 | 0,9010 | 3,88E+06 | 30 | 0,9010 | 1,41E+06 |
| 5 | 1,4600 | 4,80E+07 | 15 | 1,4700 | 3,43E+06 | 30 | 1,4700 | 1,36E+06 |
| 5 | 2,3200 | 3,84E+07 | 15 | 2,3700 | 2,97E+06 | 30 | 2,3700 | 1,30E+06 |
| 5 | 3,7400 | 2,47E+07 | 15 | 3,8600 | 2,56E+06 | 30 | 3,8600 | 1,25E+06 |
| 5 | 6,1700 | 1,35E+07 | 15 | 6,2900 | 2,18E+06 | 30 | 6,2900 | 1,19E+06 |
| 5 | 10,2000 | 4,22E+06 | 15 | 10,2000 | 1,80E+06 | 30 | 10,2000 | 1,10E+06 |

Tabella 5.11 – Tabella SS provino P_filler di recupero

Di seguito si confrontano le deformazioni limite in relazione ad ogni materiale (tab. 5.12):

| Mastice bituminoso | Strain γ |
|----------------------|-----------------|
| N_omya | 0,0469% |
| N_filler di recupero | 0,0186% |
| L_omya | 0,0293% |
| L_filler di recupero | 0,0799% |
| P_omya | 0,0304% |
| P_filler di recupero | 0,0114% |

Tabella 5.12 – Tabella SS per il filler di recupero dell'emulsione N e per il filler di recupero dell'emulsione P

Dai dati elaborati dalle SS si assume un valore di deformazione pari a $\gamma = 0,02\%$ per effettuare la FS.

5.1.2.2 Elaborazione frequency sweep

Nel presente paragrafo verranno riportati i risultati ottenuti dalle prove di frequency sweep utilizzando il sistema di misura piatto-piatto da 8 mm (PP08) che da 25 mm (PP25). La trattazione dei sei mastici bituminosi realizzati sarà divisa in funzione del filler (omya o filler di recupero).

Per ogni materiale testato, si costruiscono le master curve del modulo complesso di taglio $|G^*|$ e dell'angolo di fase δ , scegliendo come temperatura di riferimento 34 °C e considerando il modello 2S2P1D. Inoltre, saranno riportate le seguenti rappresentazioni grafiche:

- piano di Black: nel quale troviamo il modulo complesso in funzione dell'angolo di fase e il rispettivo master curve;
- piano di Cole-Cole: in cui sono riportate le due componenti del modulo complesso, ovvero quella elastica (G1) e quella viscosa (G2);

Successivamente si provvederà al confronto fra tutti i mastici bituminosi.

5.1.2.2.1 Mastici bituminosi realizzati con filler omya

-Provino N_omya:

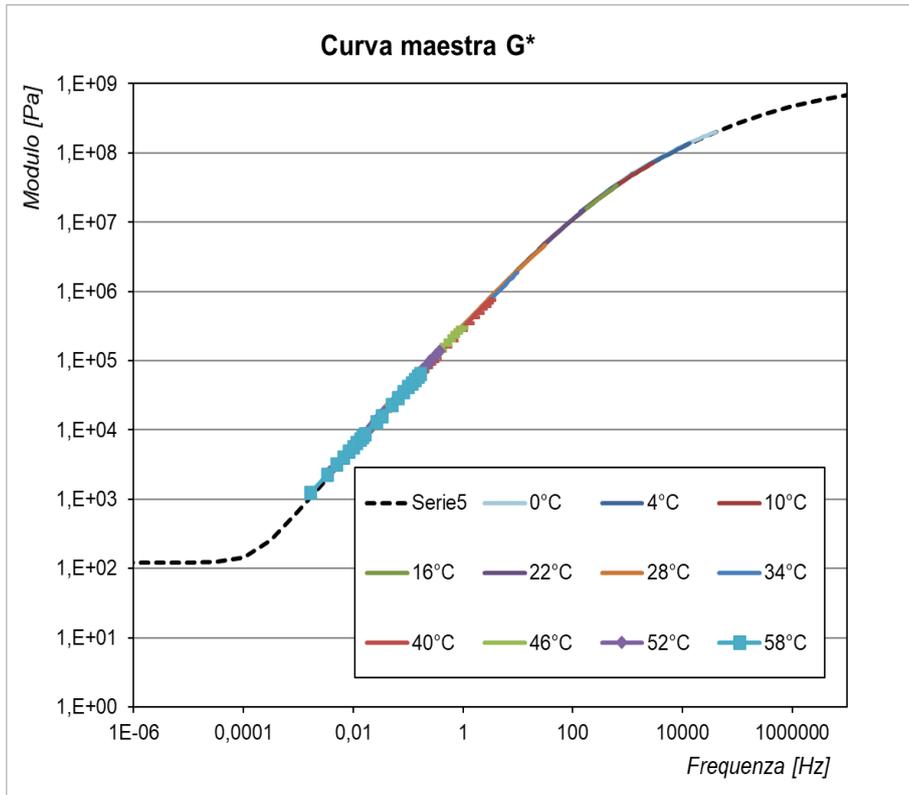


Figura 5.13 – Curva maestra G*, N_omya

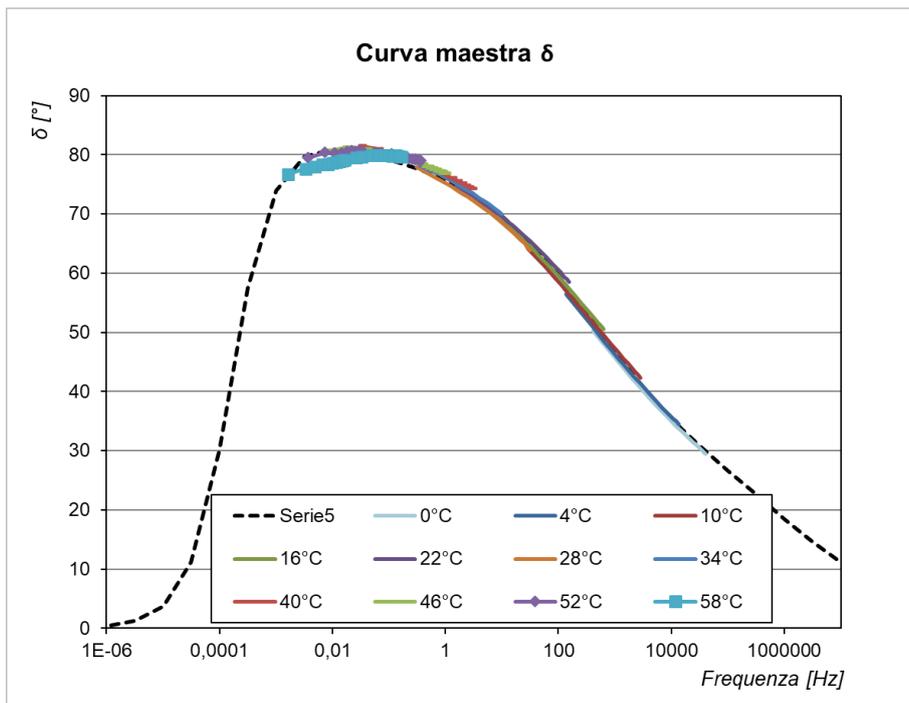


Figura 5.14 – Curva maestra delta, N_omya

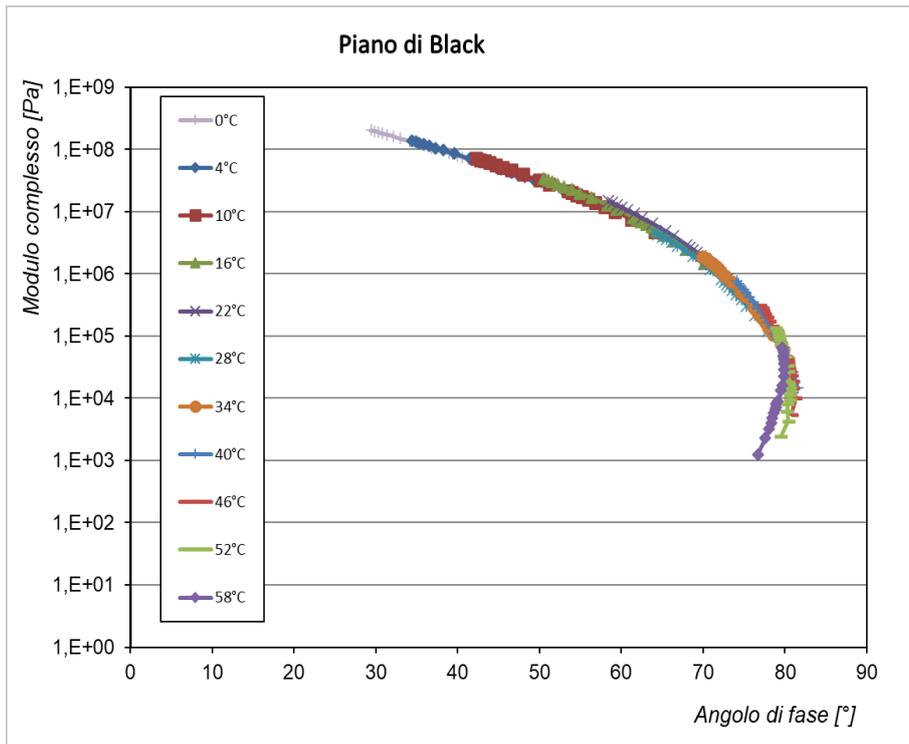


Figura 5.15 – Piano di Black, N_{omya}

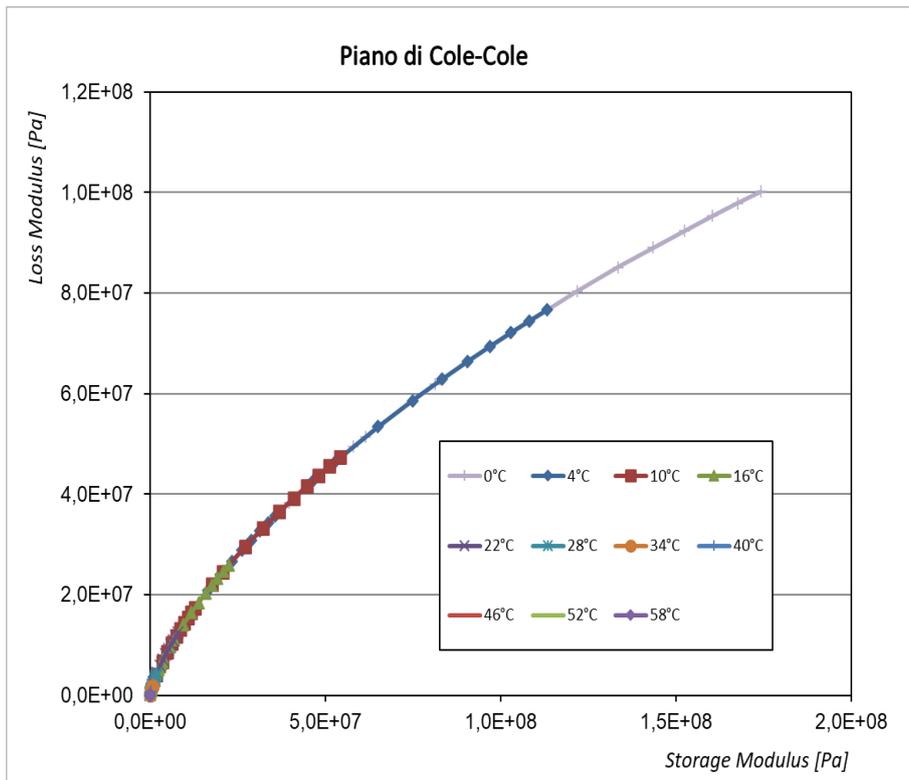


Figura 5.16 – Piano di Cole-Cole, N_{omya}

-Provino L_{omya} :

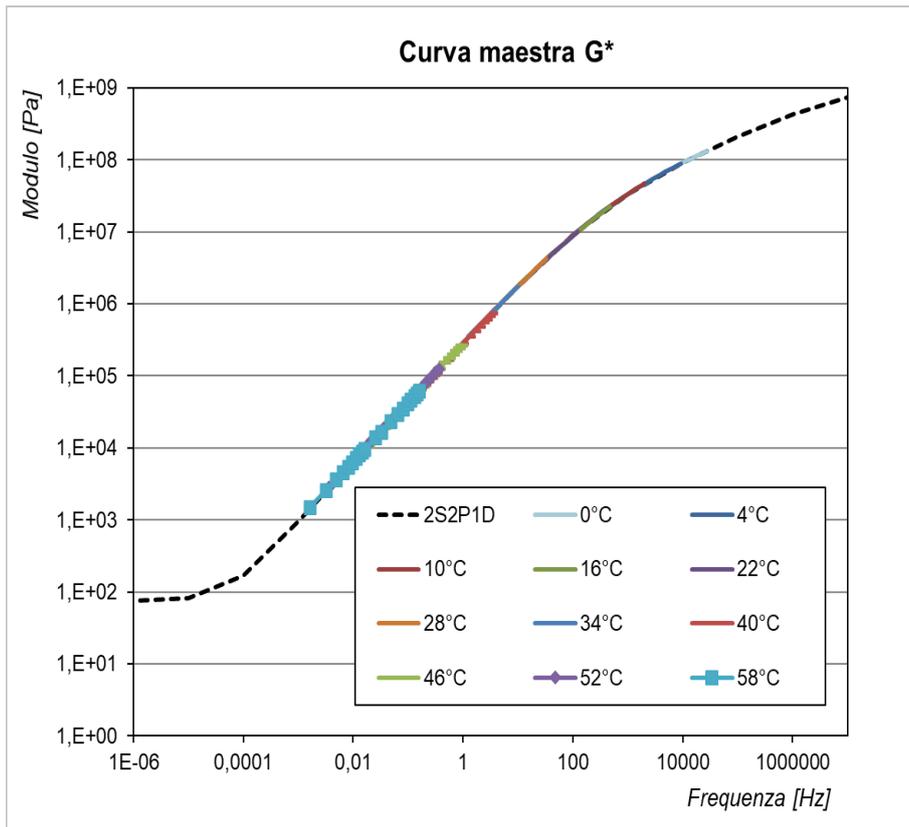


Figura 5.17 – Curva maestra G^* , L_omya

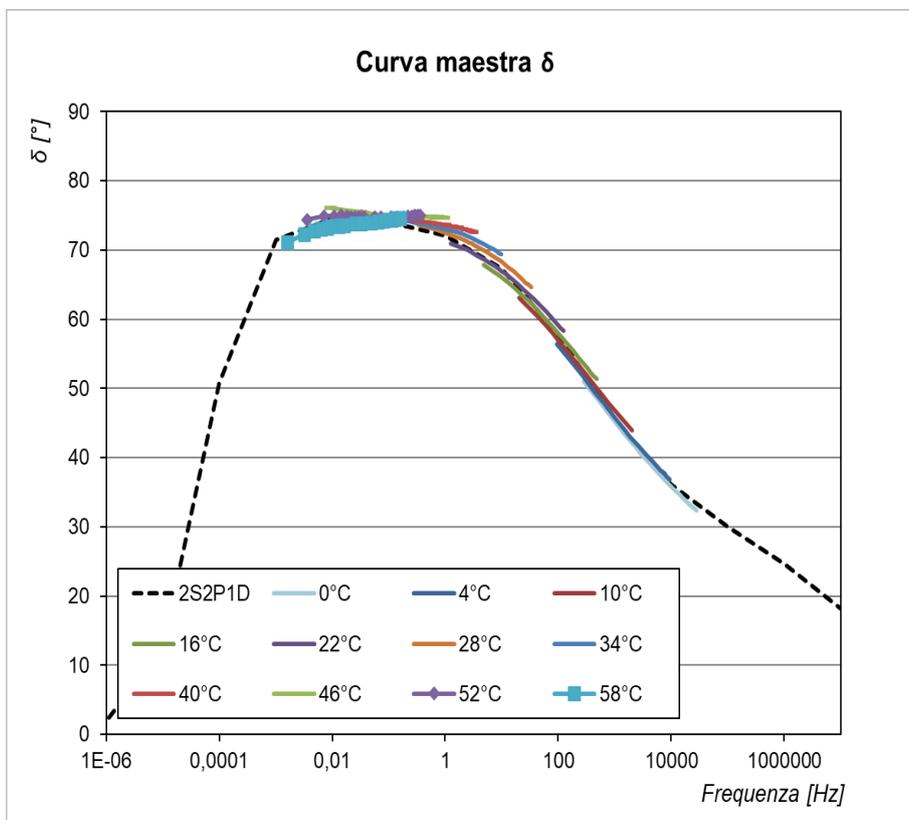


Figura 5.18 – Curva maestra δ , L_omya

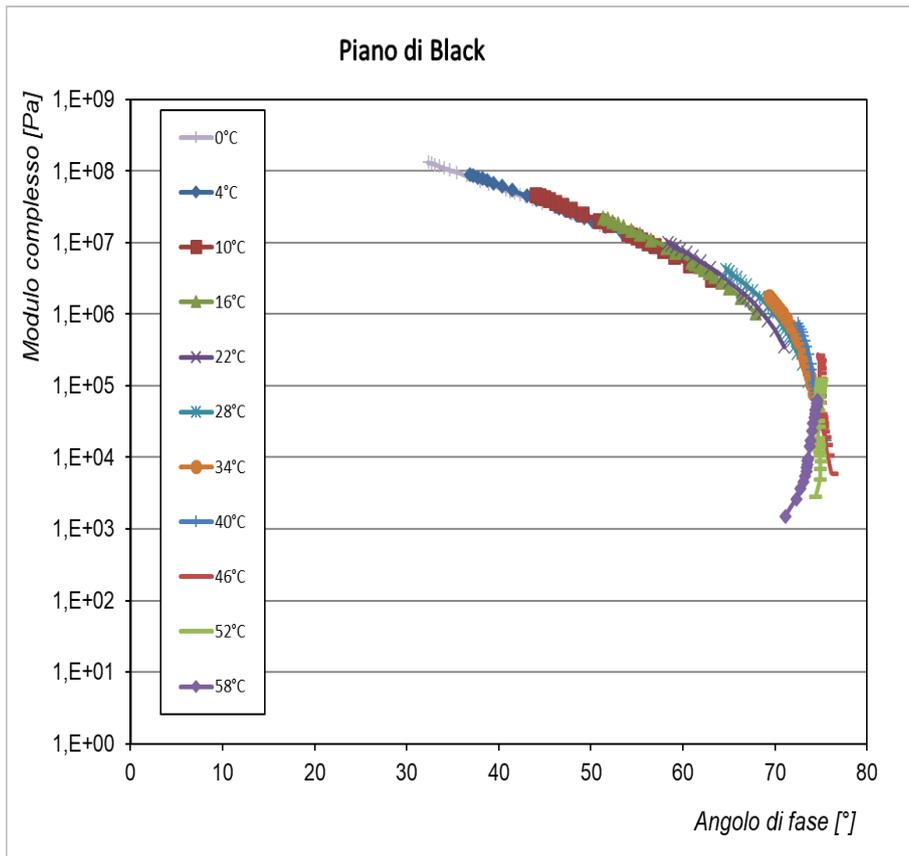


Figura 5.19 – Piano di Black, L_{omya}

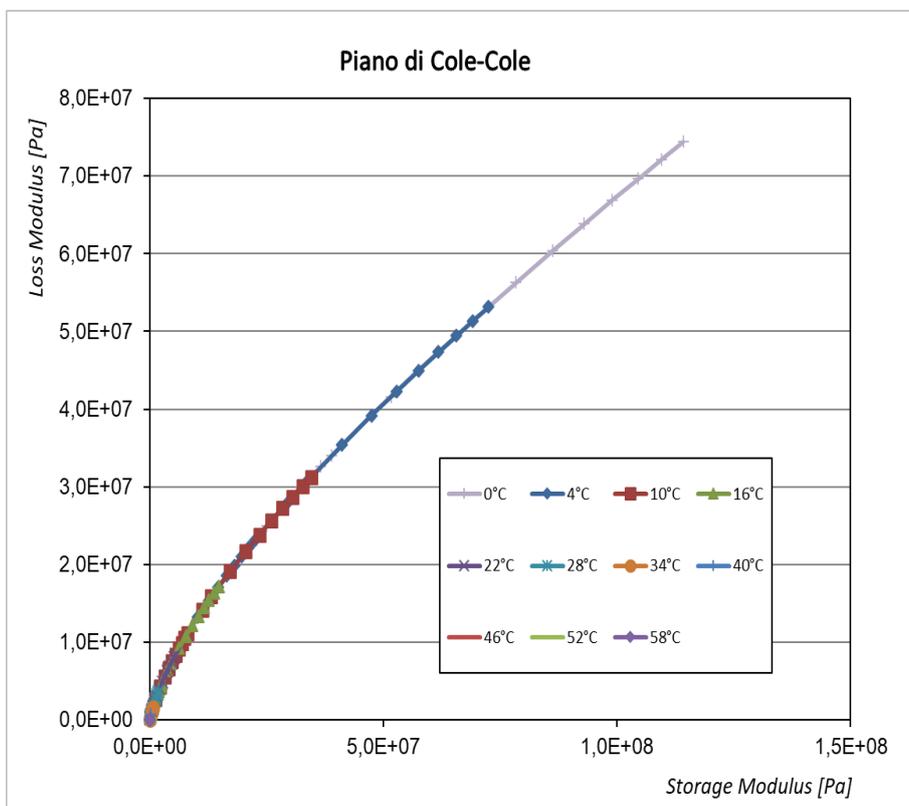


Figura 5.20 – Piano di Cole-Cole, L_{omya}

-Provino P_omya:

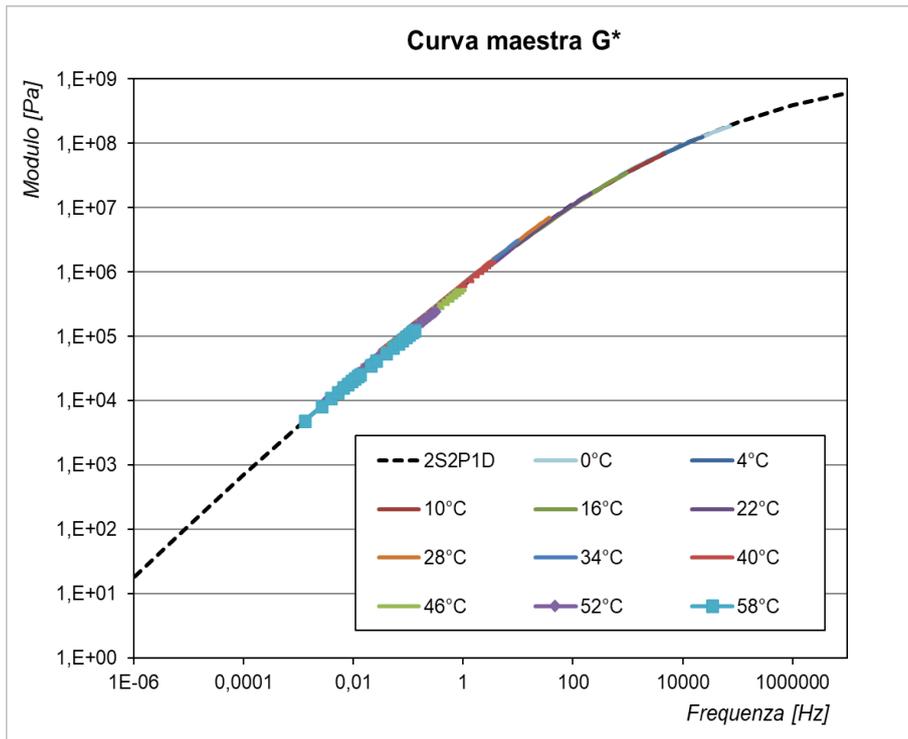


Figura 5.21 – Curva maestra G*, P_omya

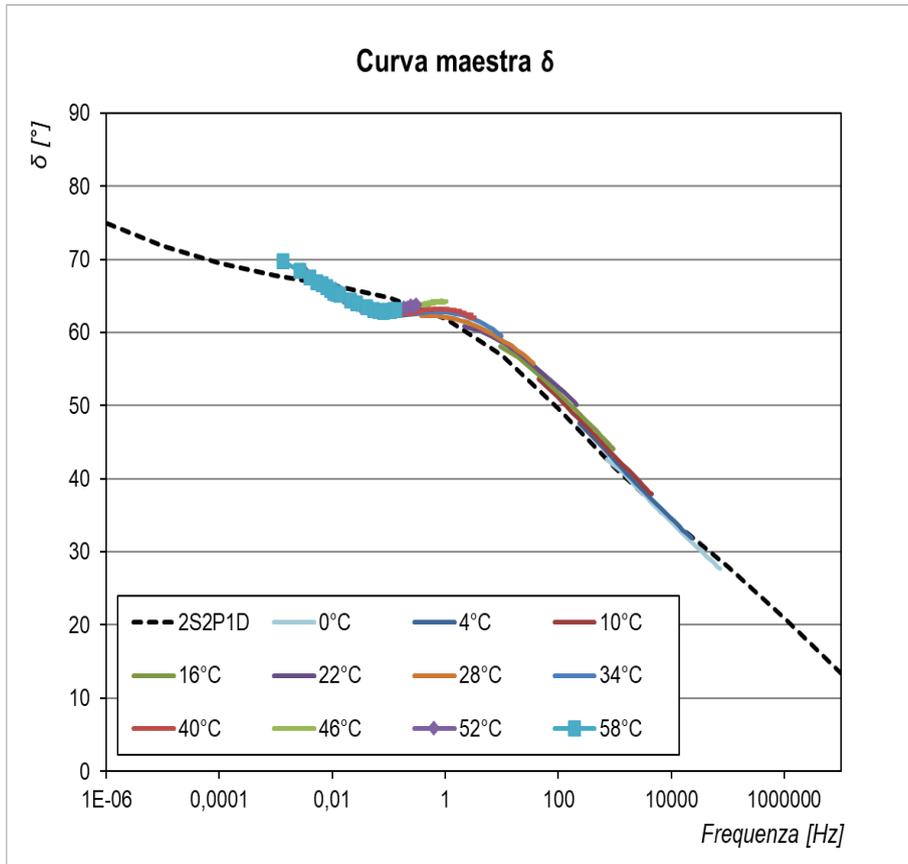


Figura 5.22 – Curva maestra δ , P_omya

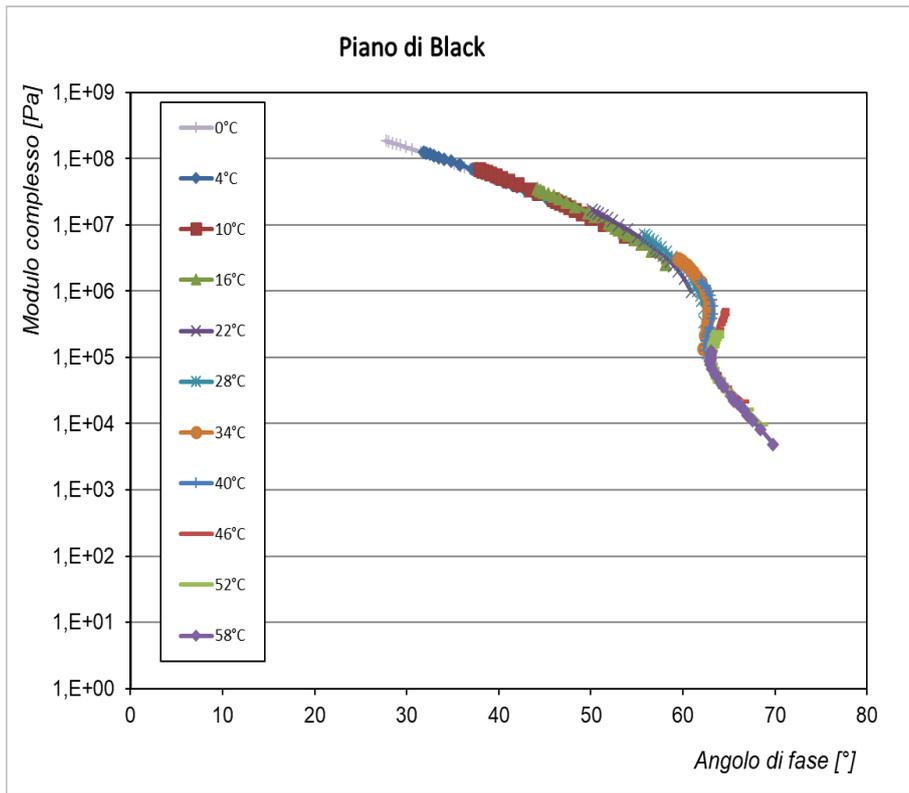


Figura 5.23 – Piano di Black, P_omya

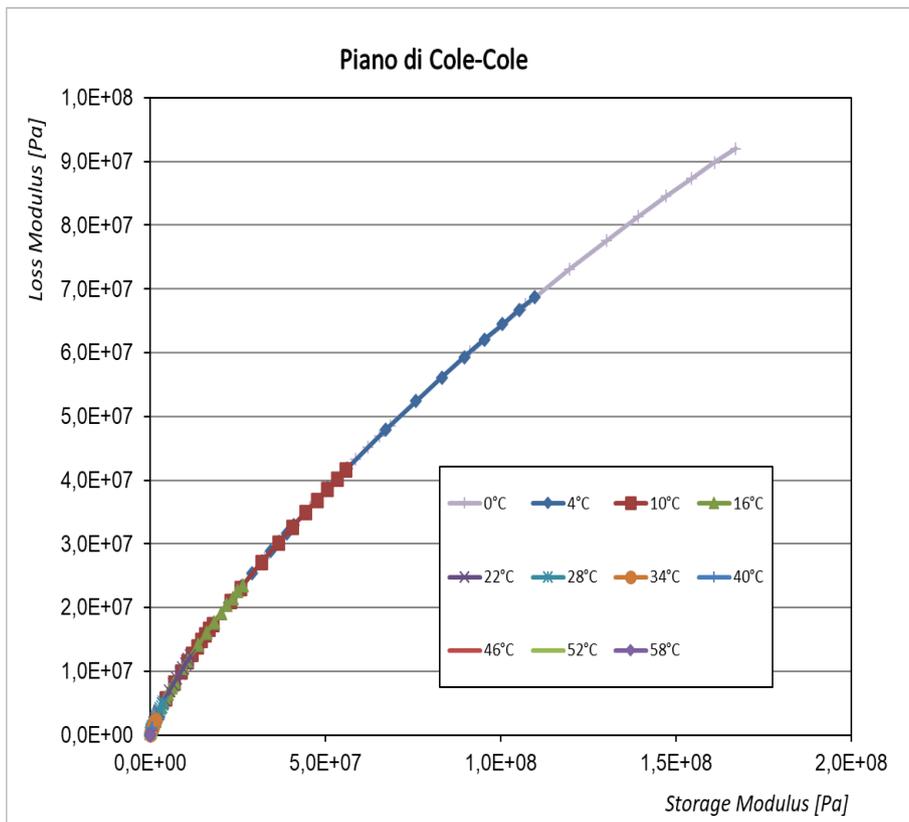


Figura 5.24 – Piano di Cole-Cole, P_omya

5.1.2.2 Mastici bituminosi realizzati con il filler di recupero

-Provino N_ filler di recupero:

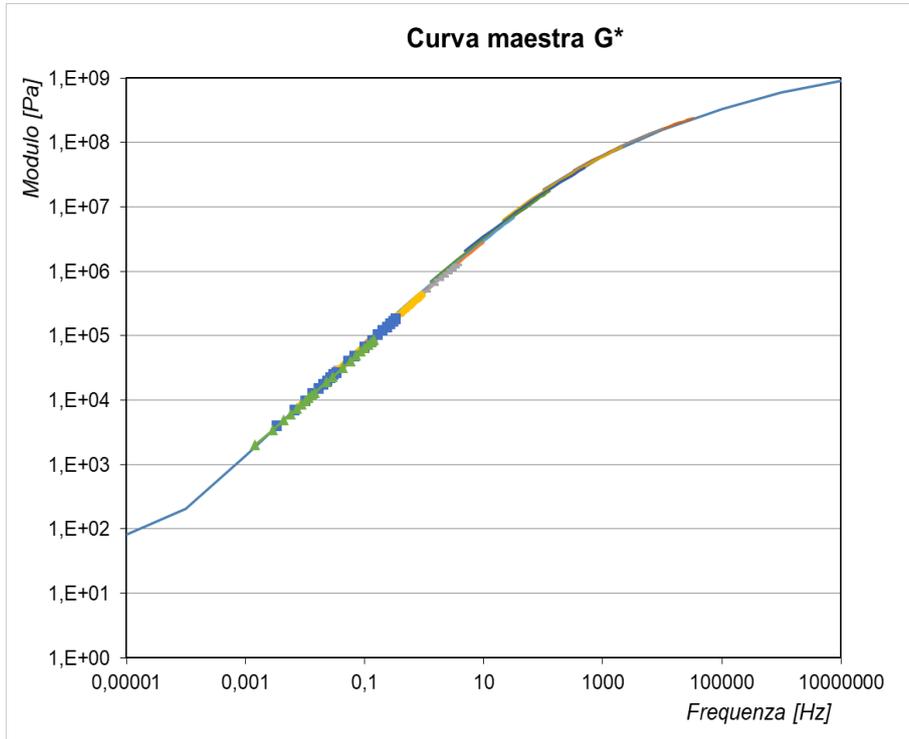


Figura 5.25 – Curva maestra G^* , N_ filler di recupero

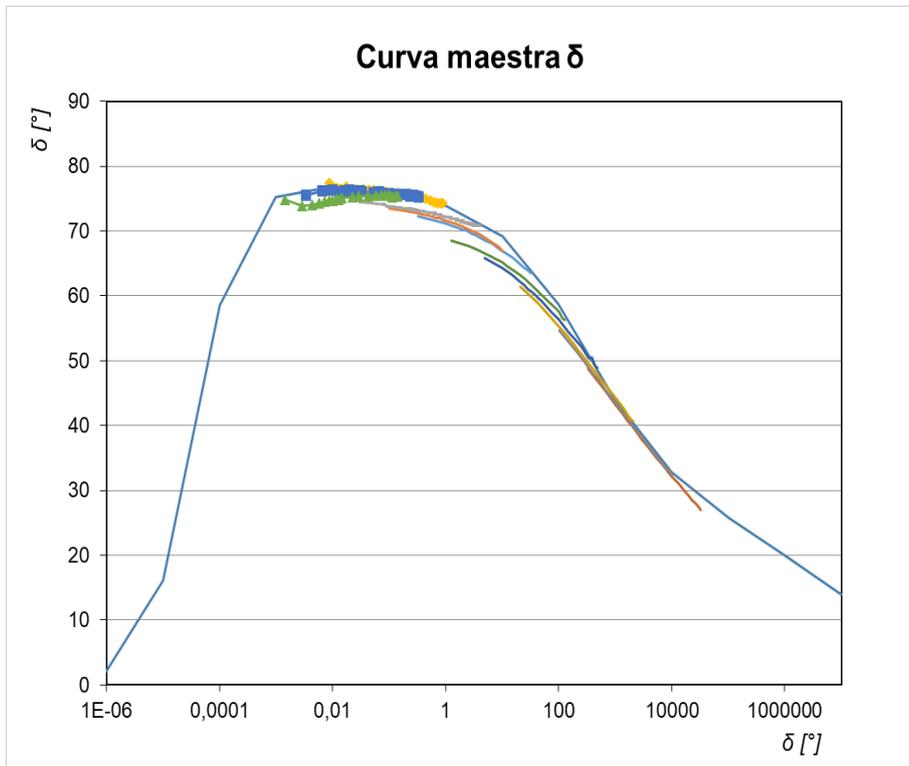


Figura 5.26 – Curva maestra δ , N_ filler di recupero

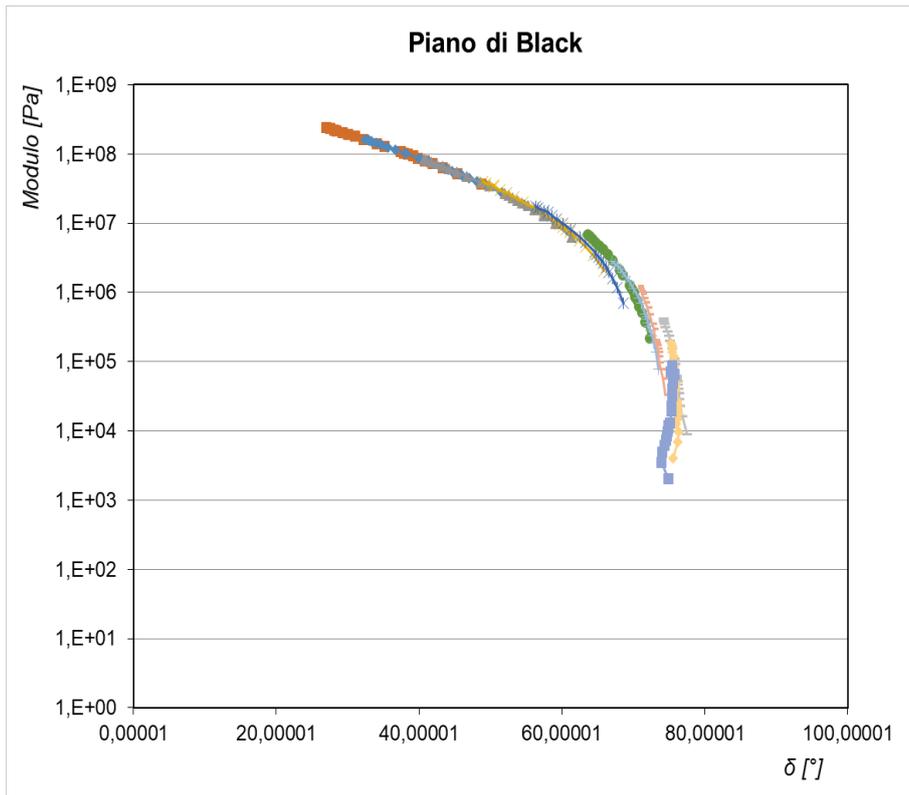


Figura 5.27 – Piano di Black, N_{filler} di recupero

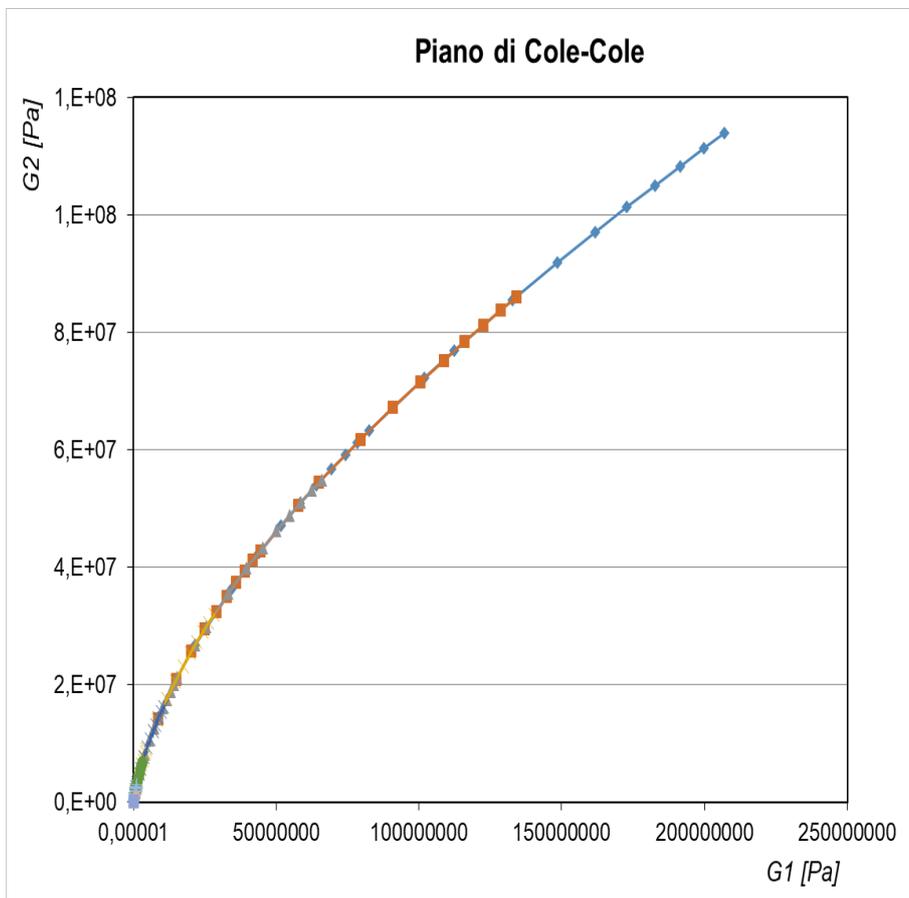


Figura 5.28 – Piano di Cole-Cole, N_{filler} di recupero

-Provino L_filler di recupero:

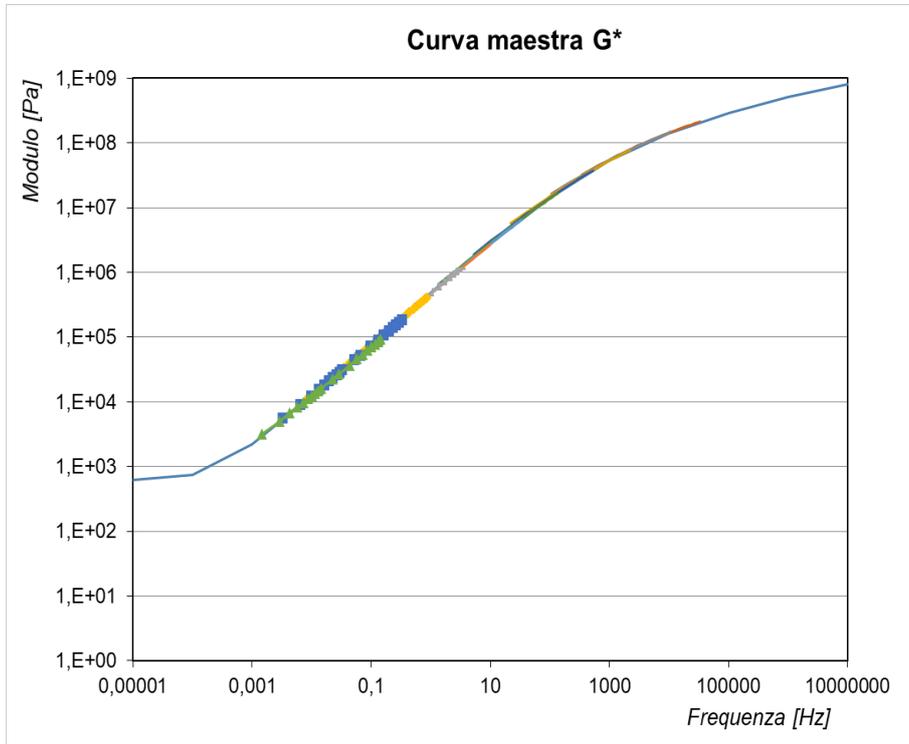


Figura 5.29 – Curva maestra G^* , L_filler di recupero

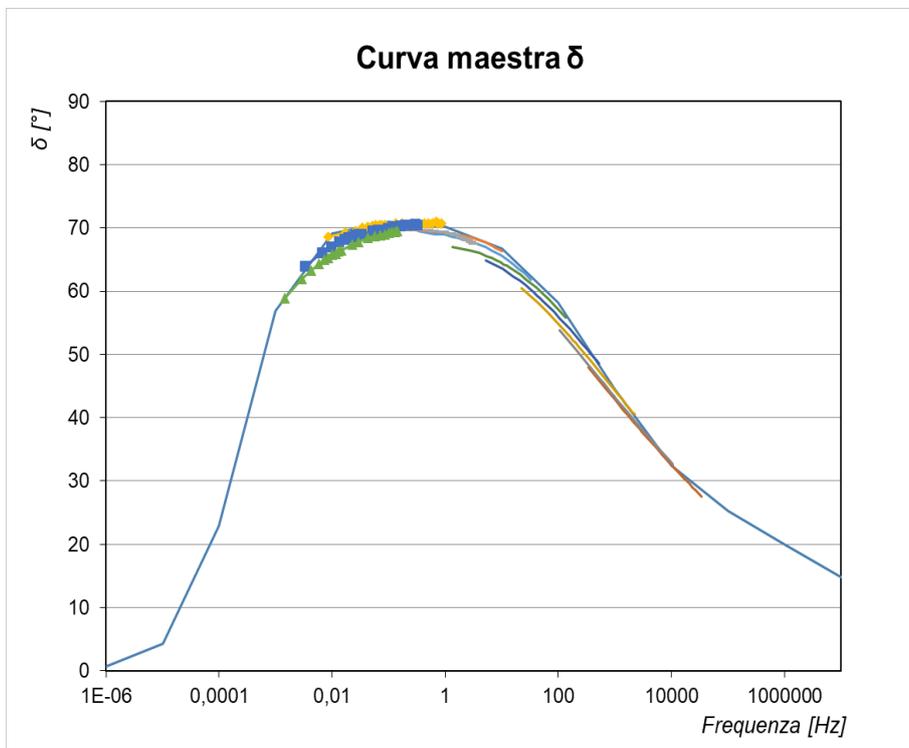


Figura 5.30 – Curva maestra δ , L_filler di recupero

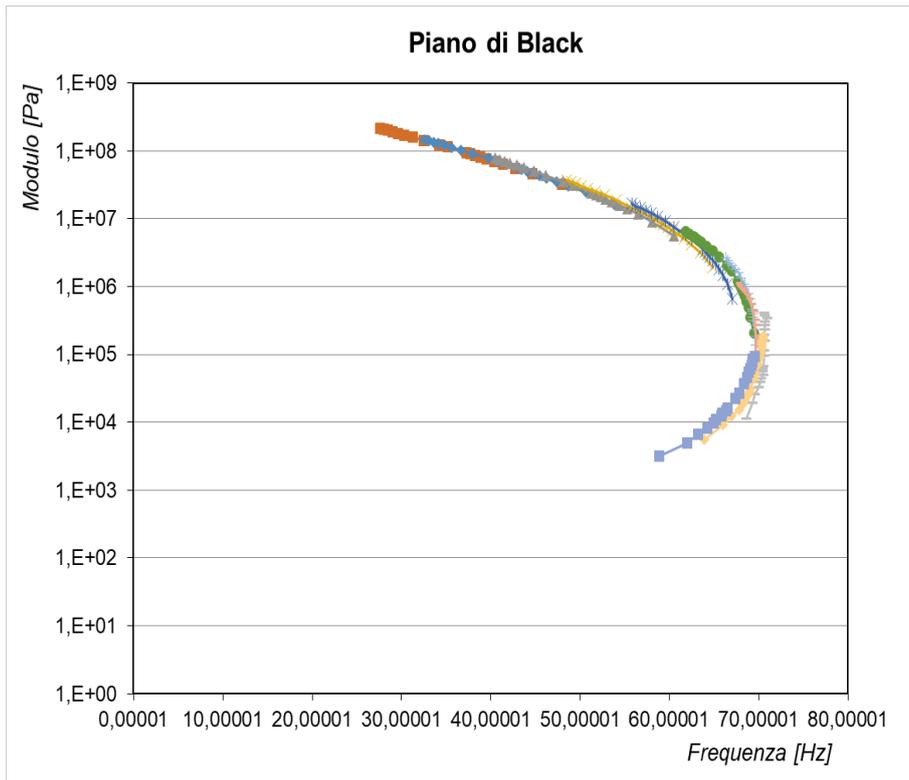


Figura 5.31 – Piano di Black, L_filler di recupero

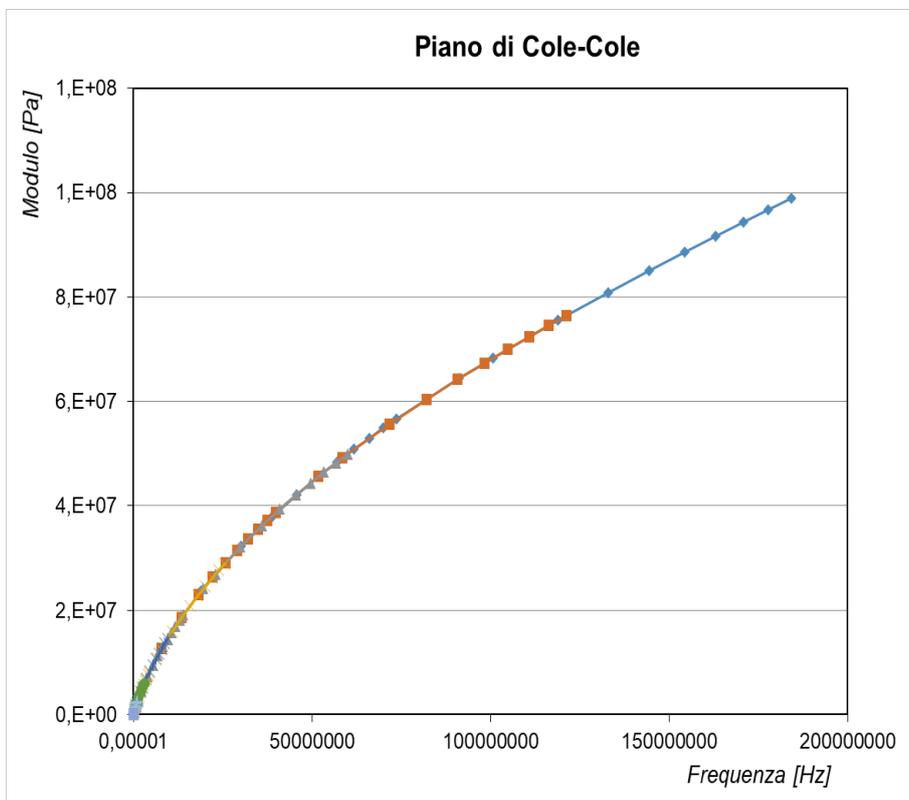


Figura 5.32 – Piano di Cole-Cole, L_filler di recupero

-Provino P_filler di recupero:

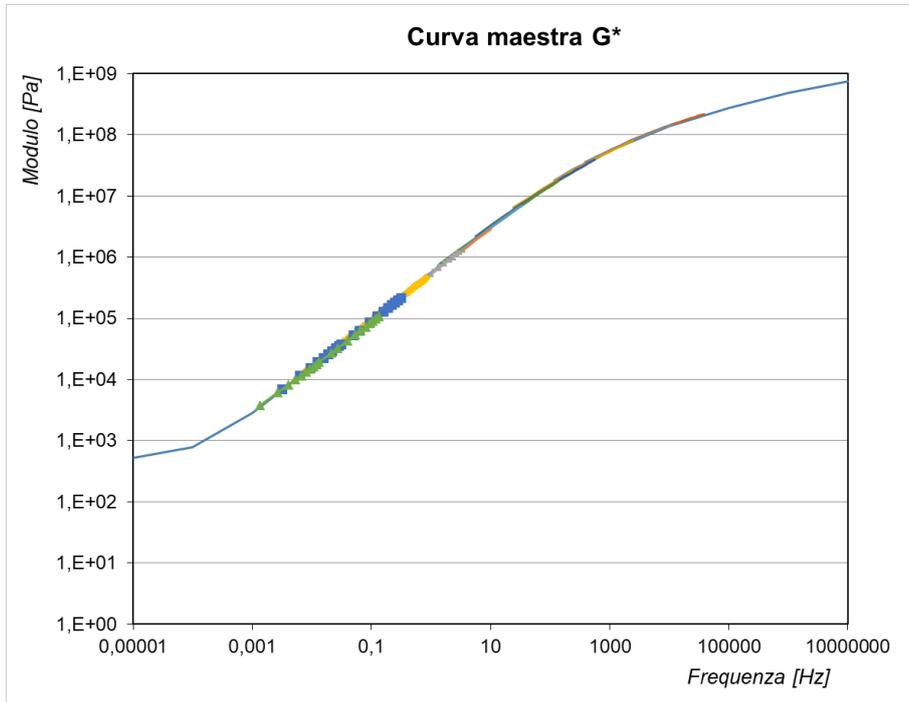


Figura 5.33 – Curva maestra G^* , P_filler di recupero

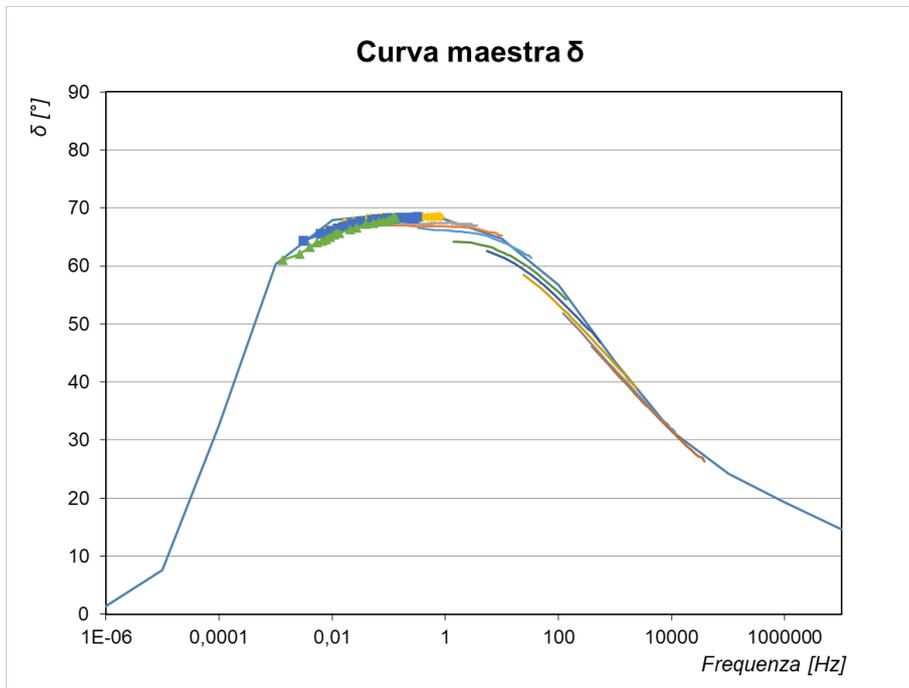


Figura 5.34 – Curva maestra δ , P_filler di recupero

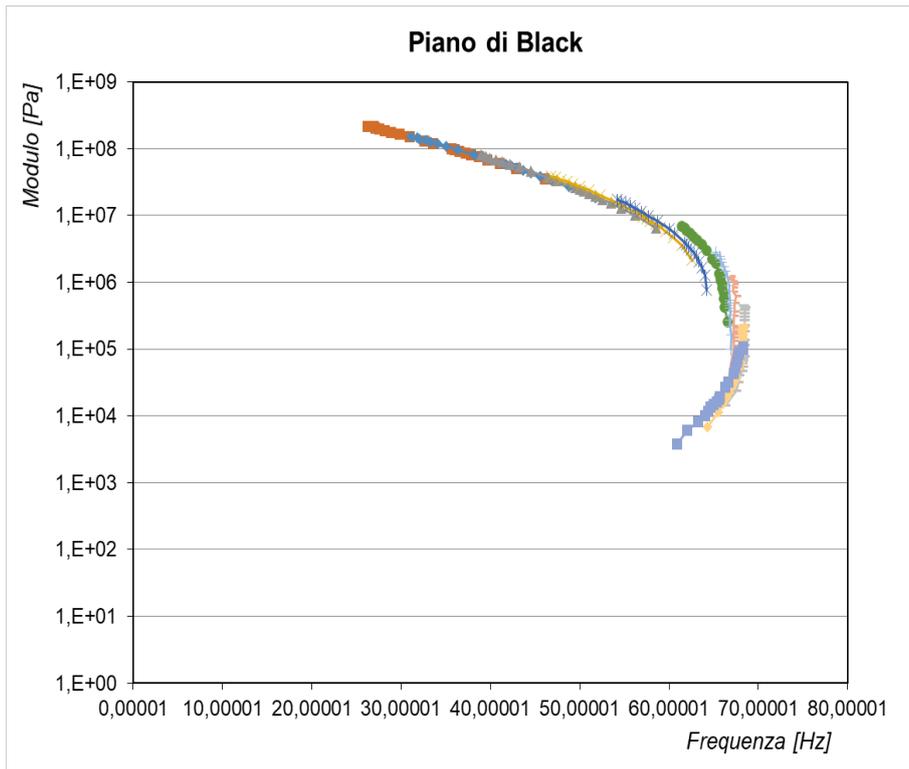


Figura 5.35 – Piano di Black, P_filler di recupero

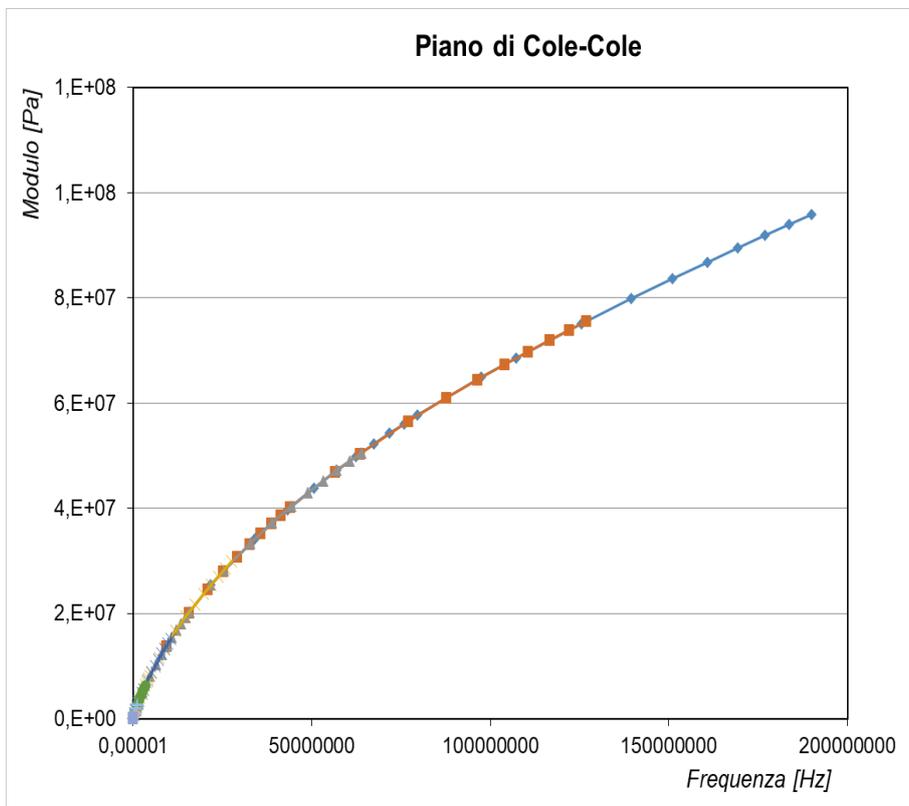


Figura 5.36 – Piano di Cole-Cole, P_filler di recupero

5.1.2.2.3 Confronto dei mastici bituminosi con omya

-Curva Maestra (G^*):

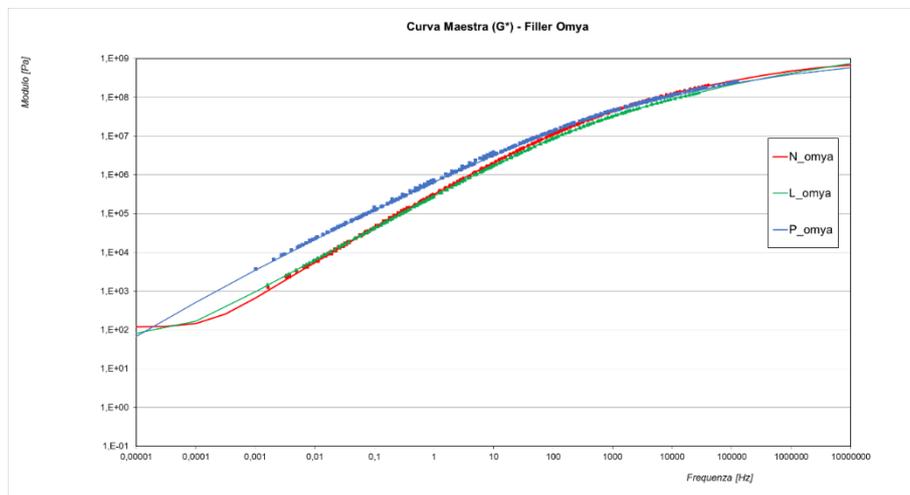


Figura 5.37 –Curva maestra (G^*), mastici con filler omya

-Curva Maestra (δ):

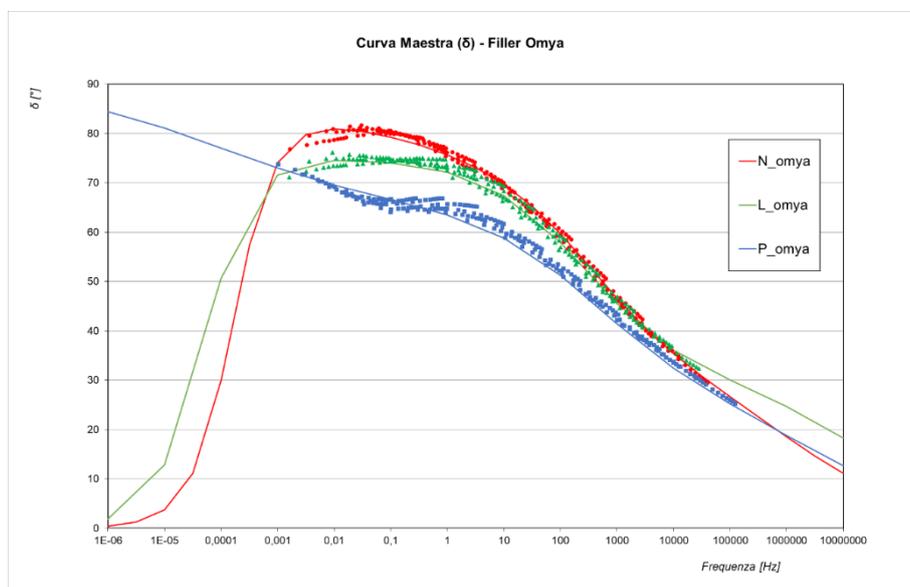


Figura 5.38 –Curva maestra (δ), mastici con filler omya

Come viene evidenziato dal grafico (fig. 5.37) i mastici costituiti con filler omya hanno comportamento sovrapponibile per alte frequenze e quindi basse temperature, mentre alle alte temperature e basse frequenze (parte sinistra del grafico) il mastice costituito da emulsione modificata con polimeri ha prestazioni migliori degli altri due. Questo indica che l'emulsione

modificata garantisce migliori prestazioni alle alte temperature dove è necessario avere rigidzze maggiori. D'altra parte, osservando il grafico (fig. 5.38) si note come alle alte frequenze i 3 materiali sono pressoché identici, mentre alle basse frequenze il mastice con emulsione N raggiunge valori più alti di angolo di fase e questa indica che il suo comportamento è maggiormente viscoso rispetto agli altri 2 materiali. Mentre invece il materiale P è quello con comportamento più elastico, poiché i suoi valori di angolo di fase sono più bassi.

5.1.2.2.4 Confronti dei mastici bituminosi con filler di recupero

-Curva Maestra (G^*):

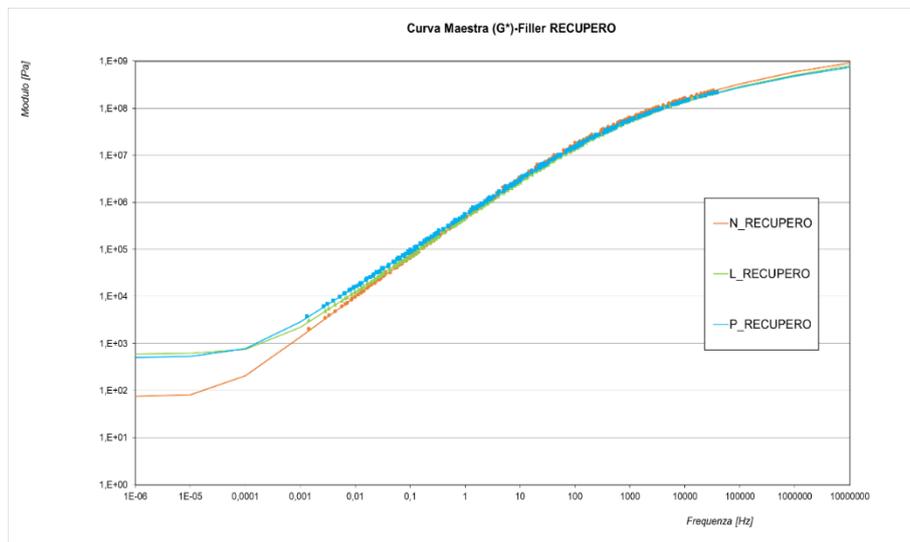


Figura 5.39 –Curva maestra (G^*), mastici con filler di recupero

-Curva Maestra (δ):

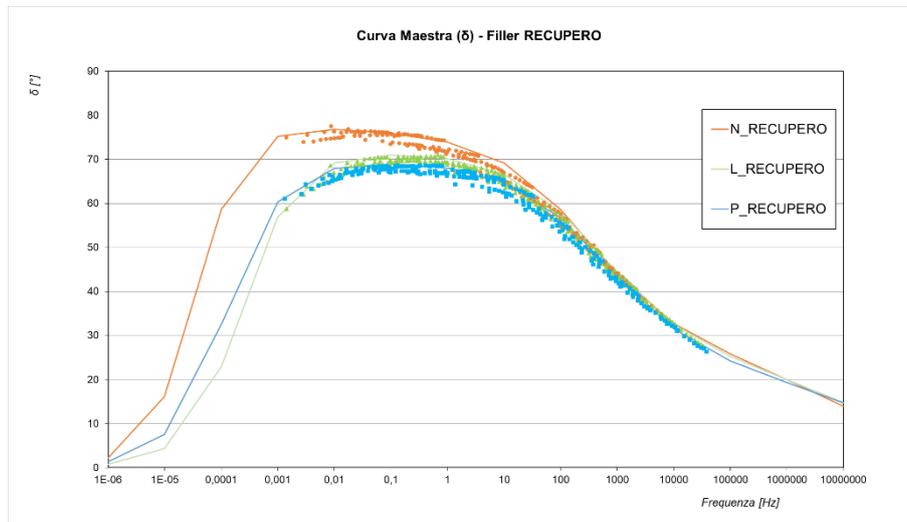


Figura 5.40 –Curva maestra (δ), mastici con filler di recupero

Per quanto riguarda i mastici costituito da filler di recupero (fig. 5.39); andando a considerare quindi solo la presenza delle differenti emulsioni bituminose, esse mostrano un comportamento sovrapponibile per le alte frequenze o basse temperature, mentre alle alte temperature o basse frequenze le emulsioni L e P sono quelle che si comportano meglio. La emulsione N ha una rigidezza molto inferiore alle basse frequenze o basse temperature. I mastici bituminosi costituiti dalle emulsioni L e P avendo un minore angolo di fase, sono più elastici del mastice costituito con emulsione N.

5.1.2.2.5 Confronto dei mastici bituminosi

-Curva Maestra (G^*):

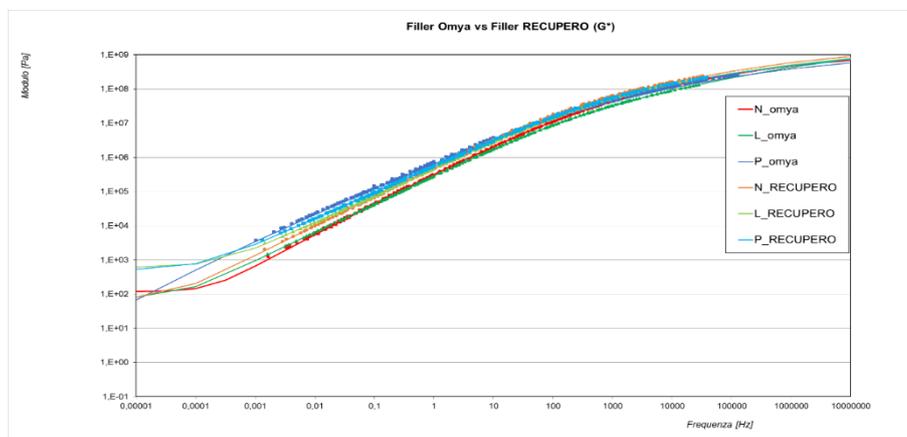


Figura 5.41 –Curva maestra (G^*), mastici

-Curva Maestra (δ):

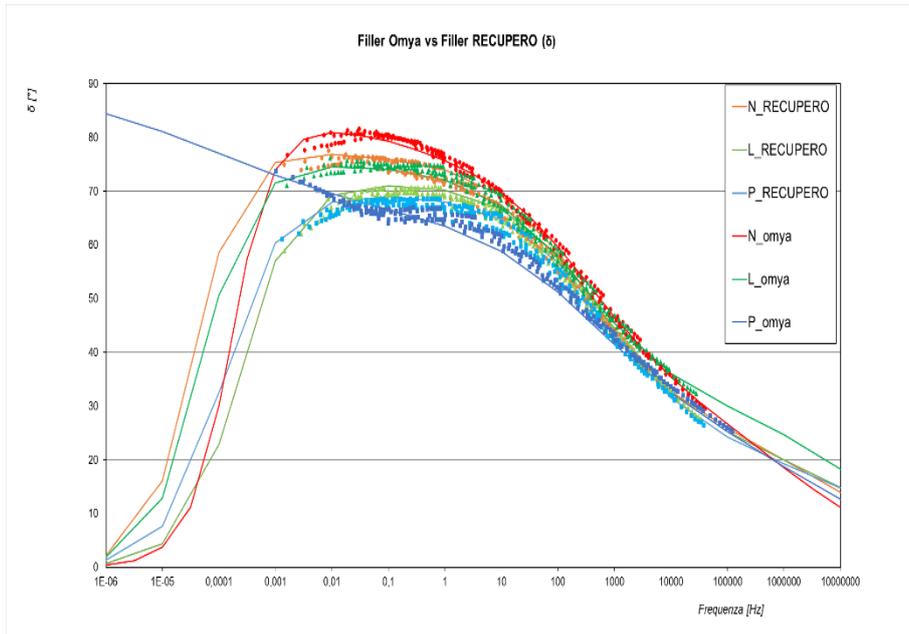


Figura 5.42 –Curva maestra (δ), mastici

-Piano di Black:

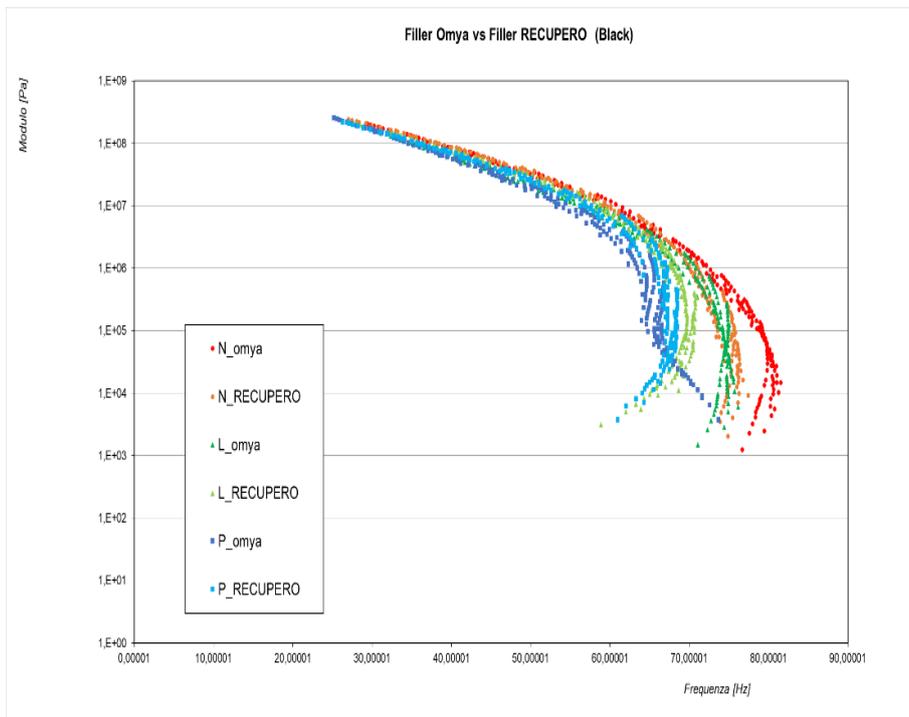


Figura 5.43 – Piano di Black, mastici

-Piano di Cole-Cole:

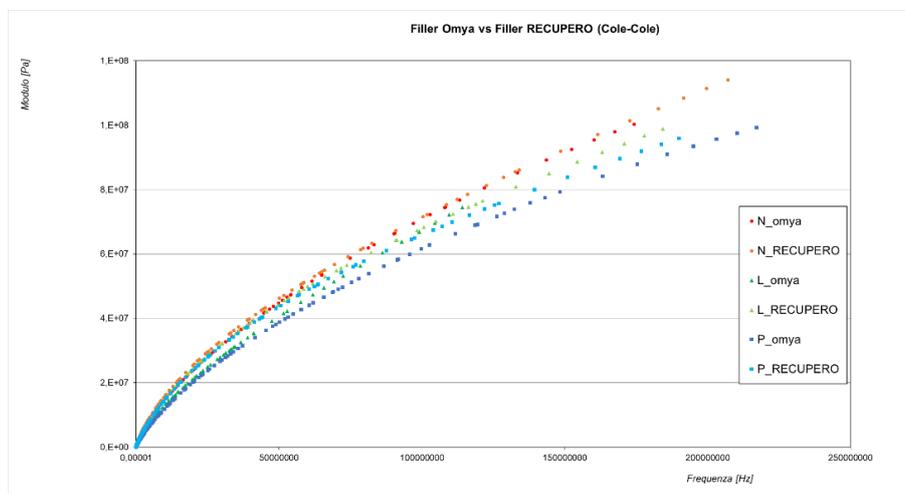


Figura 5.44 – Piano di Cole-Cole, mastici

Osservando le curve maestre del modulo complesso (fig. 5.41) si evince che alle basse frequenze il filler di recupero da maggiore rigidità al mastice, indipendentemente dalla tipologia di emulsione considerata. Viceversa, alle alte frequenze, il comportamento è simile.

Dalle curve maestre dell'angolo di fase (fig. 5.42) si può osservare come l'emulsione modificata con polimero tenda ad inibire il comportamento viscoso a vantaggio di quello elastico. Il Polimero presente nell'emulsione dona elasticità a parità di filler (alte frequenze o basse temperature). In particolare, il mastice comprendente omya ed emulsione modificata con polimeri ha un comportamento tendente a quello di un fluido (angolo di fase di circa 90° per basse frequenze) (fig. 5.42). Questo comportamento è anomalo, confrontato con gli altri risultati, ed in futuro andrò indagato il perché.

Confrontando le due tipologie di filler si nota come il filler di recupero da maggiore rigidità ed elasticità a tutte le frequenze, tutte le temperature e per tutte le emulsioni utilizzate. Sul piano di Cole-cole (fig. 5.44) è possibile evincere come l'emulsione Normale nel mastice permetta di raggiungere valori di viscosità più elevati rispetto le altre due emulsioni (curva rossa e arancione). Mentre i mastici realizzati con emulsione modificata con Lattice o Polimeri hanno maggiore elasticità

alle basse temperature (curve inferiori nel grafico). Dal grafico sul piano di Black (fig.5.43) il comportamento che si mostra è il medesimo evidenziato precedentemente nel confronto utilizzando le curve maestra G^* e δ .

5.2 M.S.C.R (Multiple Stress Creep Recovery)

Per l'analisi dei dati sarà considerato il parametro J_{nr} , cioè il creep non recuperabile, definito nella seguente maniera:

$$J_{nr}: \text{“compliance” non recuperabile} = \frac{\text{deformazione non recuperabile}}{\text{tensione di taglio applicata}}$$

Si considererà anche il parametro R%, cioè la percentuale di recupero della deformazione del materiale quando esso non è sotto carico. Nella trattazione dei risultati può essere rappresentata la correlazione tra parametri J_{nr} e la deformazione recuperata.

La prova risulta utile in termini di confronto tra mastici bituminosi costituiti da emulsioni differenti, per caratterizzare le loro differenti prestazioni nei confronti dell'accumulo di deformazioni permanenti e quindi la resistenza al fenomeno dell'ormaiamento.

5.2.1 Elaborazione MSCR (Multiple Stress Creep Recovery)

La finalità dell'elaborazione dei dati delle prove MSCR è quello di calcolare i parametri R e J_{nr} descritti precedentemente. In particolare, vengono riportati i dati per ogni temperatura e per ogni livello tensionale, considerando i sei mastici bituminosi realizzati. La trattazione sarà divisa in funzione del filler (omya o filler di recupero). Successivamente si provvederà al confronto fra i mastici aventi stesso filler e al confronto tra tutti i mastici bituminosi; tutto questo considerando i parametri J_{nr} e R in relazione alla sollecitazione costante applicata ($\tau=0,1$ kPa e $\tau=3,2$ kPa) e alle temperature di prova (28 °C, 34°C e 40 °C).

5.2.1.1 Mastici bituminosi realizzati con filler omya

-Provino N_omya:

| N_omya | | | |
|---------|----------|----------|----------|
| R 0.1 | 36,36 | | |
| Jnr0.1 | 0,0037 | | |
| R 3,2 | 32,27 | T [°C] | 28 |
| Jnr 3,2 | 0,0039 | Jnr diff | 6,21 |
| R 0.1 | 27,81 | | |
| Jnr0.1 | 0,0122 | | |
| R 3,2 | 23,23404 | T [°C] | 34 |
| Jnr 3,2 | 0,012919 | Jnr diff | 5,891393 |
| R 0.1 | 23,10029 | | |
| Jnr0.1 | 0,03765 | | |
| R 3,2 | 13,64382 | T [°C] | 40 |
| Jnr 3,2 | 0,040472 | Jnr diff | 7,49502 |

Tabella 5.45 –valori prova MSCR, N_omya

-Provino L_omya:

| L_omya | | | |
|---------|----------|----------|----------|
| R 0.1 | 52,14286 | | |
| Jnr0.1 | 0,00345 | | |
| R 3,2 | 50,46946 | T [°C] | 28 |
| Jnr 3,2 | 0,00362 | Jnr diff | 4,936594 |
| R 0.1 | 54,9386 | | |
| Jnr0.1 | 0,00875 | | |
| R 3,2 | 46,36412 | T [°C] | 34 |
| Jnr 3,2 | 0,010759 | Jnr diff | 22,96429 |
| R 0.1 | 57,38838 | | |
| Jnr0.1 | 0,02195 | | |
| R 3,2 | 42,48881 | T [°C] | 40 |
| Jnr 3,2 | 0,030603 | Jnr diff | 39,42198 |

Tabella 5.46 –valori prova MSCR, L_omya

-Provino P_omya:

| P_omya | | | |
|---------|----------|----------|----------|
| R 0.1 | 78 | | |
| Jnr0.1 | 0,00065 | | |
| R 3,2 | 74,27556 | T [°C] | 28 |
| Jnr 3,2 | 0,000723 | Jnr diff | 11,29808 |
| R 0.1 | 76,65759 | | |
| Jnr0.1 | 0,00165 | | |
| R 3,2 | 70,81006 | T [°C] | 34 |
| Jnr 3,2 | 0,002084 | Jnr diff | 26,32576 |
| R 0.1 | 71,34135 | | |
| Jnr0.1 | 0,00475 | | |
| R 3,2 | 64,98089 | T [°C] | 40 |
| Jnr 3,2 | 0,006223 | Jnr diff | 31,01974 |

Tabella 5.47 –valori prova MSCR, P_omya

5.2.1.2 Mastici bituminosi realizzati con filler di recupero

-Provino N_ filler di recupero:

| N_Filler di recupero | | | |
|----------------------|----------|----------|----------|
| R 0.1 | 88,88889 | | |
| Jnr0.1 | 0,0002 | | |
| R 3,2 | 71,52707 | T [°C] | 28 |
| Jnr 3,2 | 0,000226 | Jnr diff | 1,5625 |
| R 0.1 | 85,83333 | | |
| Jnr0.1 | 0,00025 | | |
| R 3,2 | 57,72918 | T [°C] | 34 |
| Jnr 3,2 | 0,000881 | Jnr diff | 252,5 |
| R 0.1 | 72,71717 | | |
| Jnr0.1 | 0,00135 | | |
| R 3,2 | 46,09111 | T [°C] | 40 |
| Jnr 3,2 | 0,002991 | Jnr diff | 121,5278 |

Tabella 5.48 –valori prova MSCR, N_ filler di recupero

-Provino L_ filler di recupero:

| L_Filler di recupero | | | |
|----------------------|----------|----------|----------|
| R 0.1 | 70,33333 | | |
| Jnr0.1 | 0,00075 | | |
| R 3,2 | 67,02667 | T [°C] | 28 |
| Jnr 3,2 | 0,000861 | Jnr diff | 14,79167 |
| R 0.1 | 70,96737 | | |
| Jnr0.1 | 0,0018 | | |
| R 3,2 | 62,66853 | T [°C] | 34 |
| Jnr 3,2 | 0,002578 | Jnr diff | 43,22917 |
| R 0.1 | 69,83902 | | |
| Jnr0.1 | 0,00495 | | |
| R 3,2 | 57,9615 | T [°C] | 40 |
| Jnr 3,2 | 0,007559 | Jnr diff | 52,71465 |

Tabella 5.49 –valori prova MSCR, L_ filler di recupero

-Provino P_ filler di recupero:

| P_Filler di recupero | | | |
|----------------------|----------|----------|---------|
| R 0.1 | 90 | | |
| Jnr0.1 | 0,00005 | | |
| R 3,2 | 84,86642 | T [°C] | 28 |
| Jnr 3,2 | 0,0001 | Jnr diff | 100 |
| R 0.1 | 87,5 | | |
| Jnr0.1 | 0,0002 | | |
| R 3,2 | 81,55387 | T [°C] | 34 |
| Jnr 3,2 | 0,000263 | Jnr diff | 31,25 |
| R 0.1 | 86 | | |
| Jnr0.1 | 0,0004 | | |
| R 3,2 | 80,60013 | T [°C] | 40 |
| Jnr 3,2 | 0,000719 | Jnr diff | 79,6875 |

Tabella 5.50 –valori prova MSCR, P_ filler di recupero

5.2.1.3 Confronto dei mastici bituminosi con omya

- *R* (percentuale di recupero della deformazione):

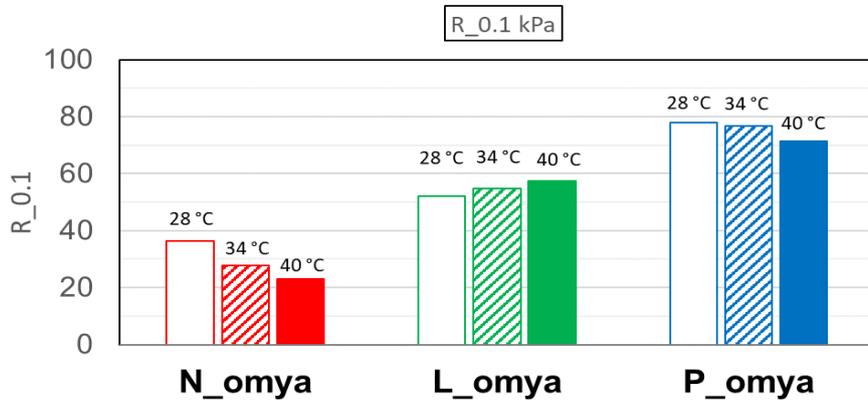


Figura 5.51 – *R* per $\tau=0,1$ kPa, mastici con filler omya

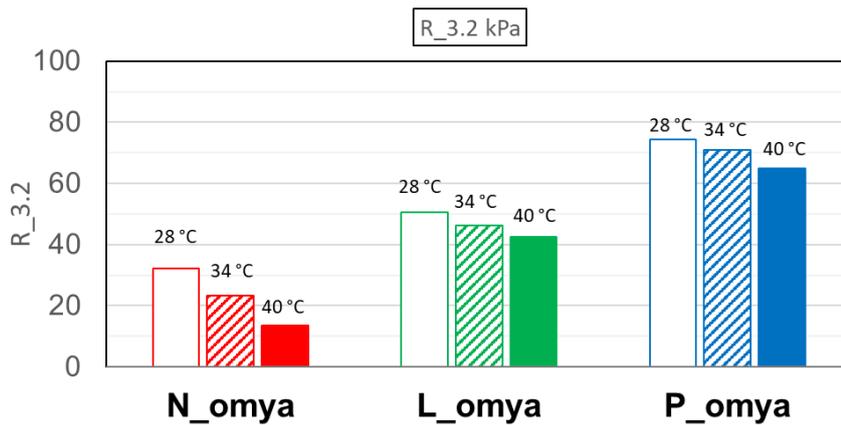


Figura 5.52 – *R* per $\tau=3,2$ kPa, mastice con filler omya

- *J_{nr}* (creep non recuperabile):

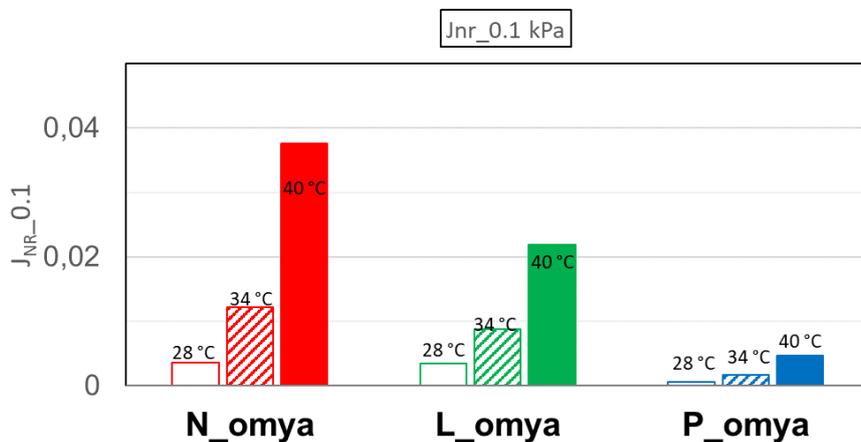


Figura 5.53 – *J_{nr}* per $\tau=0,1$ kPa, mastice con filler omya

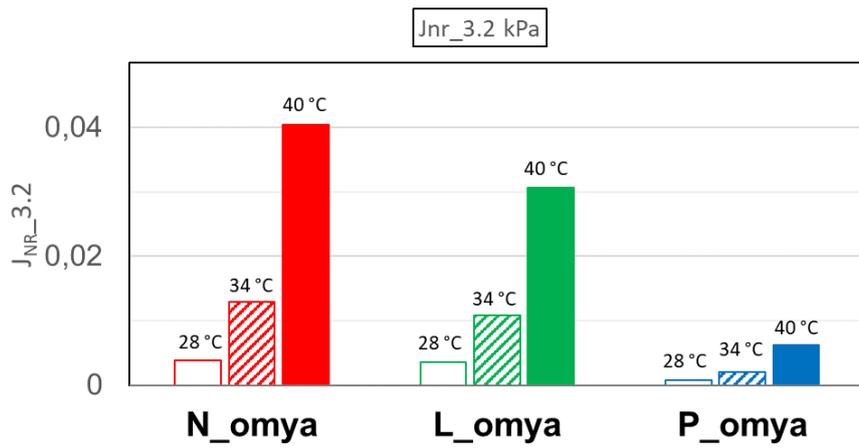


Figura 5.54 – J_{nr} per $\tau=3,2$ kPa, mastice con filler omya

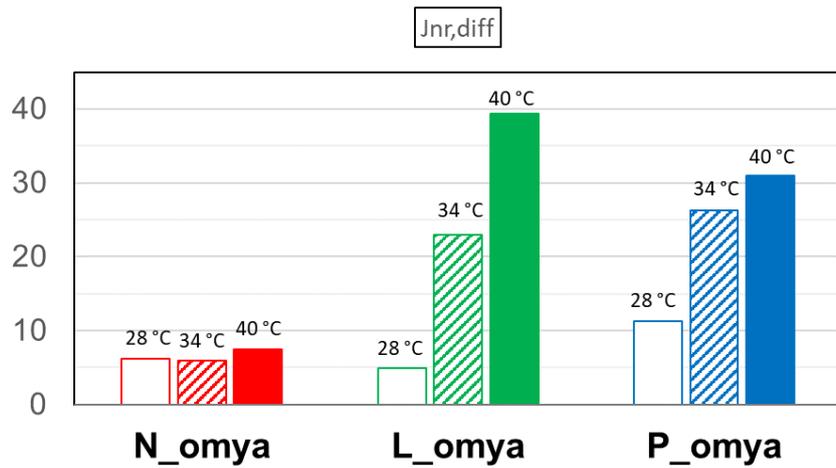


Figura 5.55 – J_{nr} differenziale, mastice con filler omya

5.2.1.4 Confronti dei mastici bituminosi con filler di recupero

- R (percentuale di recupero della deformazione):

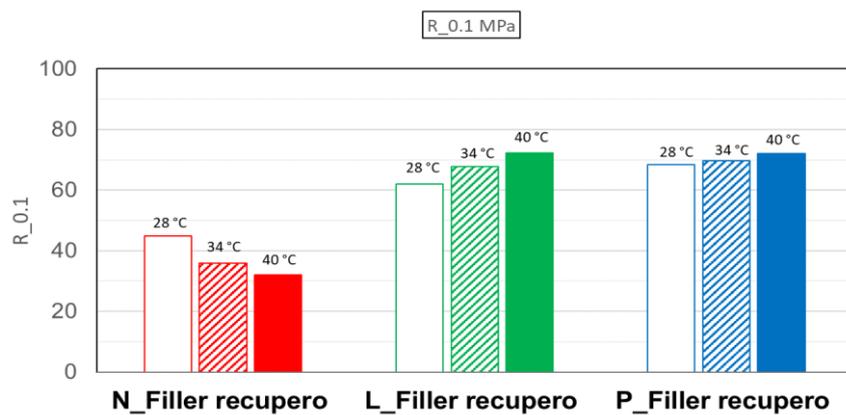


Figura 5.56 – R per $\tau=0,1$ kPa, mastice con filler di recupero

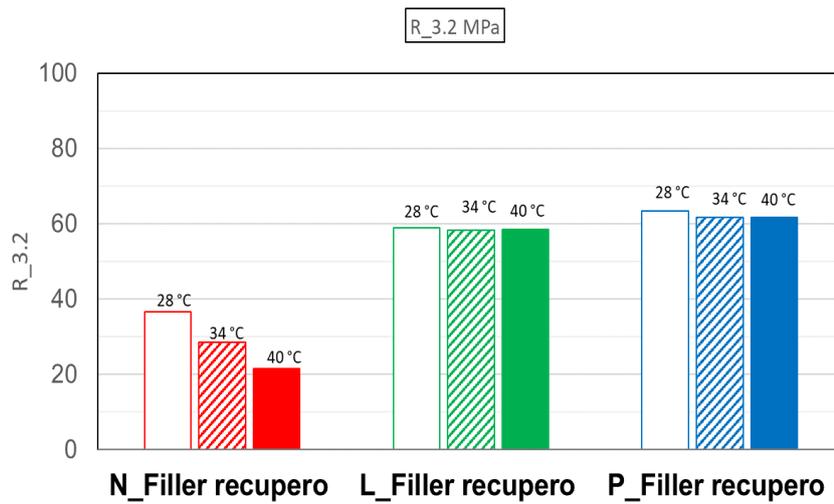


Figura 5.57 – R per $\tau=3,2$ kPa, mastice con filler di recupero

- J_{nr} (creep non recuperabile):

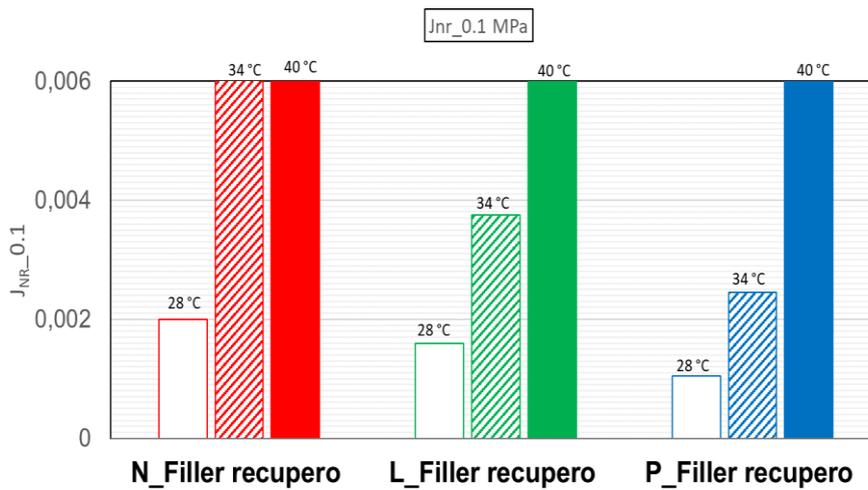


Figura 5.58 – J_{nr} per $\tau=0,1$ kPa, mastice con filler di recupero

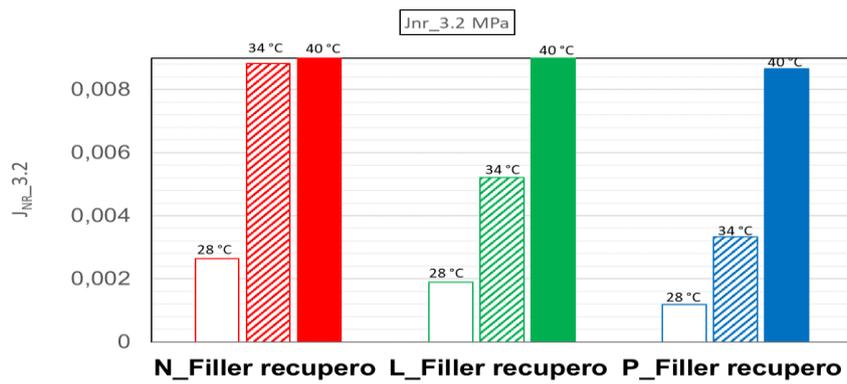


Figura 5.59 – J_{nr} per $\tau=3,2$ kPa, mastice con filler di recupero

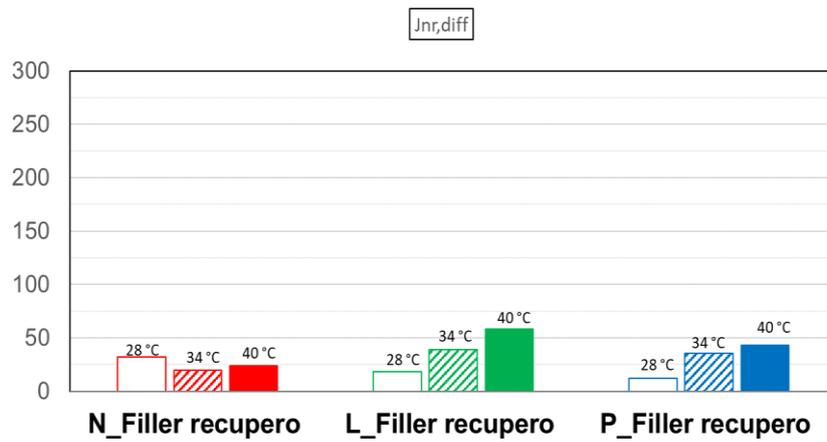


Figura 5.60 – J_{nr} differenziale, mastice con filler di recupero

5.2.1.5 Confronto dei mastici bituminosi

- R (percentuale di recupero della deformazione):

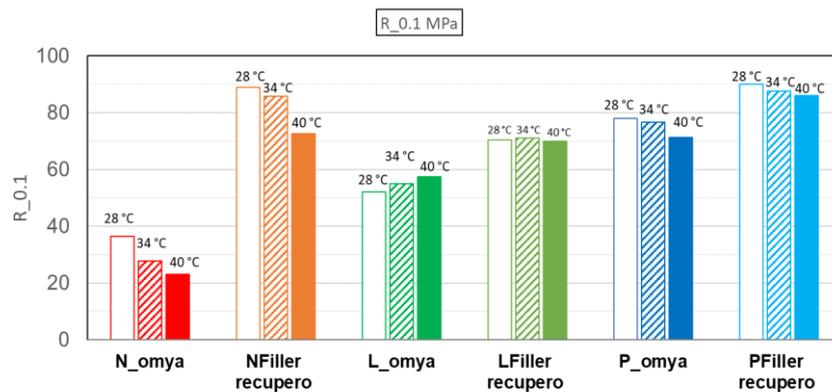


Figura 5.61 – R per $\tau=0,1$ kPa

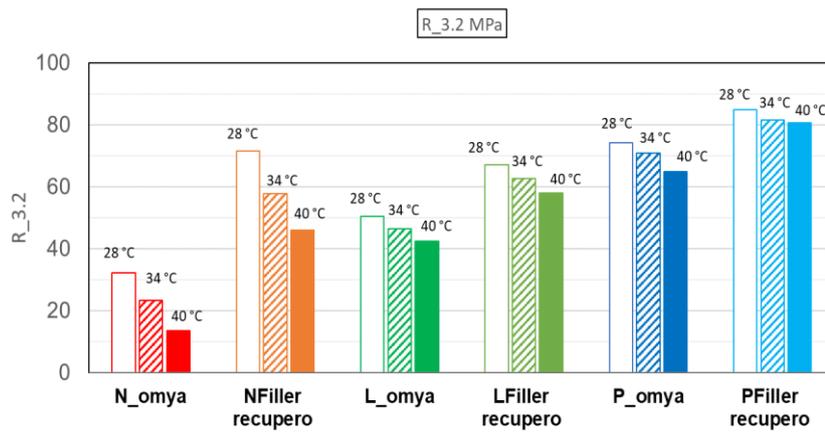


Figura 5.62 – R per $\tau=3,2$ kPa

- J_{nr} (creep non recuperabile):

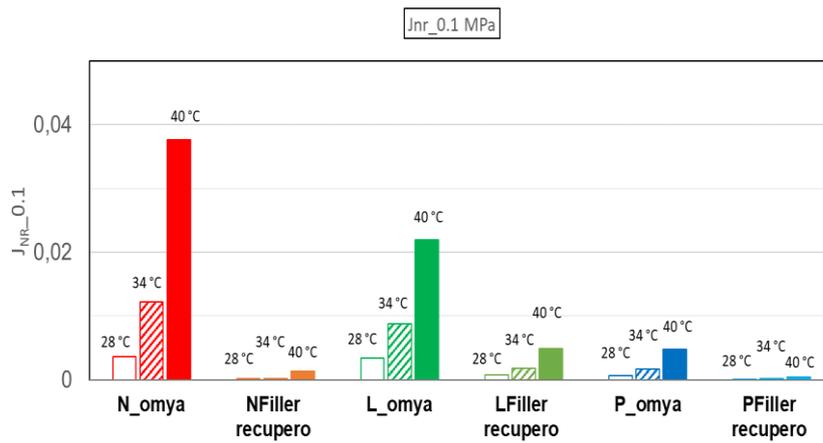


Figura 5.63 – J_{nr} per $\tau=0,1$ kPa

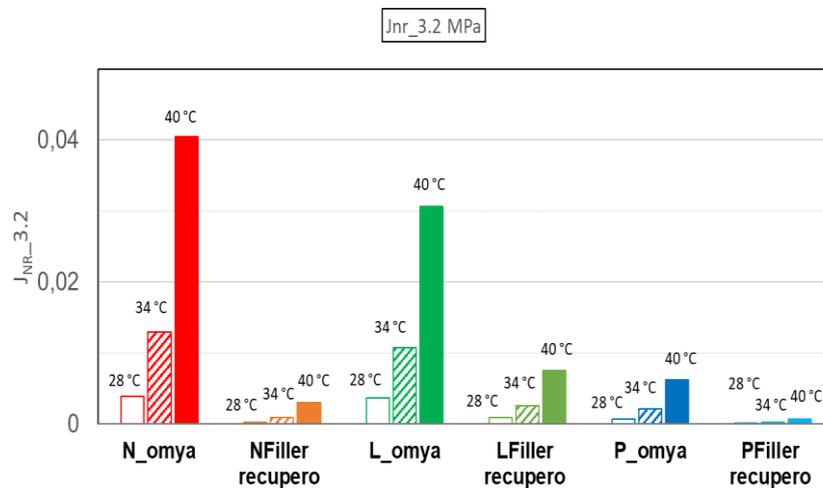


Figura 5.64 – J_{nr} per $\tau=3,2$ kPa

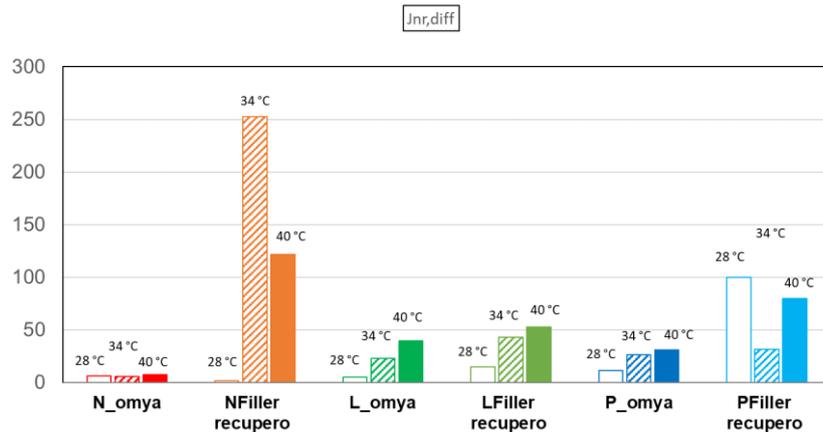


Figura 5.65 – J_{nr} differenziale

Come si evince dai grafici riportanti precedentemente (da fig. 5.61 a fig. 5.65), confrontando i mastici bituminosi, in funzione del filler presente, si nota come il filler di recupero garantisca una minore deformabilità generale. Questa osservazione è possibile esaminando il parametro R ed il parametro J_{nr} , che sono indicatori che mostrano come il filler di recupero rispetto all'omya abbia un maggiore recupero di deformazione e minore deformazione non recuperata ($R \uparrow$, $J_{nr} \downarrow$). A parità di filler, concentrandosi solo nel confronto delle varie emulsioni bituminose, si evidenzia come l'emulsione bituminosa Normale abbia un comportamento di gran lunga peggiore rispetto alle altre due emulsioni (da fig. 5.51 a fig.5.60). L'emulsione bituminosa modificata con Polimeri recupera maggiormente la deformazione avuta, rispetto a quella modificata con Lattice e soprattutto all'emulsione bituminosa Normale.

5.3 Prova LAS (Linear Amplitude Sweep)

5.3.1 Elaborazione LAS (Linear Amplitude Sweep)

La prova Linear Amplitude Sweep (LAS) è utilizzata per studiare il comportamento dei bitumi all'aumentare del danno (comportamento a fatica). Tale test è normato (AASHTO TP101). La trattazione sarà divisa in funzione del filler (omya o filler di recupero), riportando il comportamento di ogni singolo mastice, con all'interno dei grafici con le singole ripetizioni effettuate.

Successivamente si provvederà al confronto fra tutti i mastici bituminosi aventi lo stesso filler. Infine, il confronto fra tutti i mastici bituminosi realizzati.

5.3.1.1 Mastici bituminosi realizzati con filler omya

-Provino N_omya:

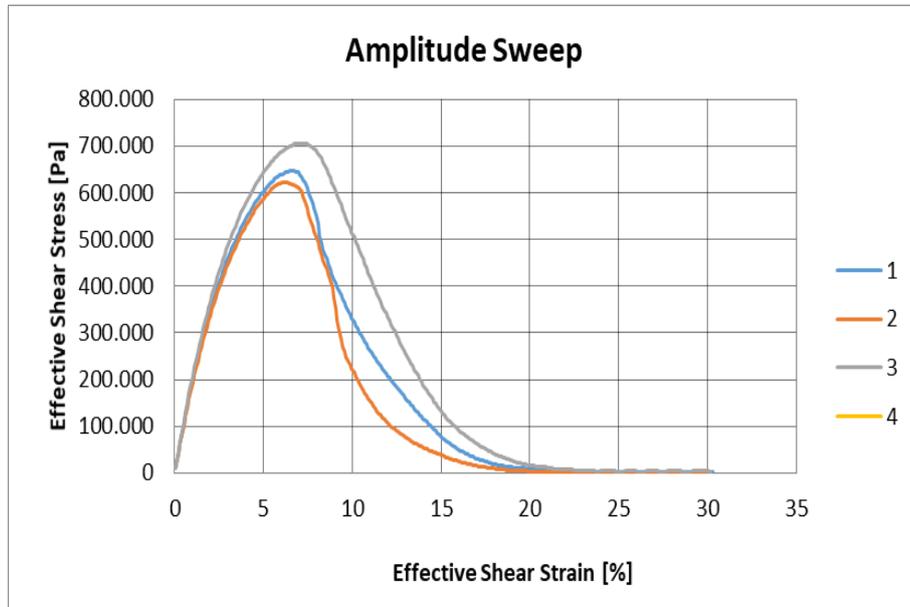


Figura 5.66 – Amplitude Sweep, N_omya

-Provino L_omya:

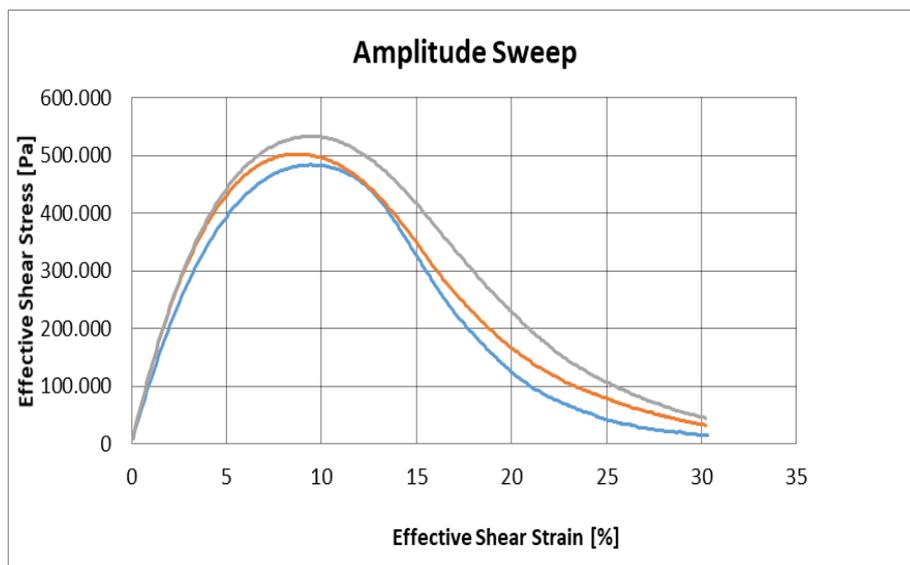


Figura 5.67 – Amplitude Sweep, L_omya

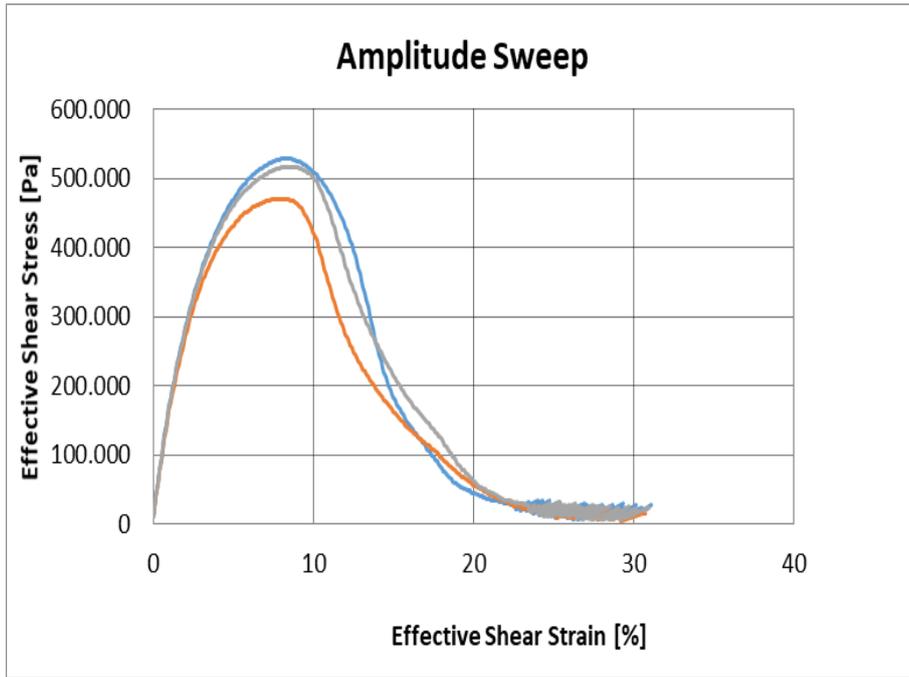


Figura 5.68 – Amplitude Sweep, P_omya

5.3.1.2 Mastici bituminosi realizzati con il filler di recupero

-Provino N_ filler di recupero:

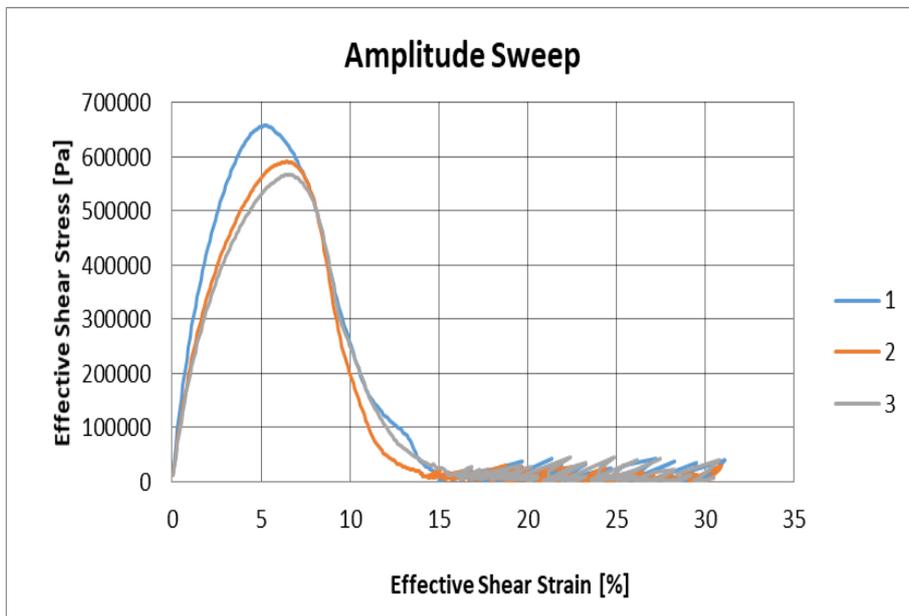


Figura 5.69 – Amplitude Sweep, N_ filler di recupero

-Provino L_ filler di recupero:

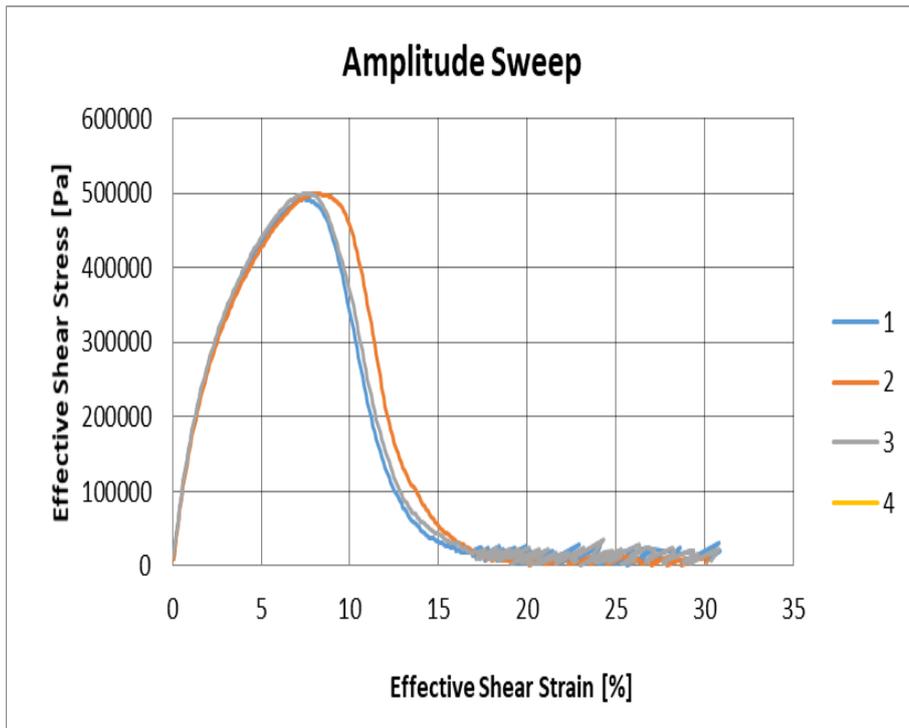


Figura 5.70 – Amplitude Sweep, *L_calfill*

-Provino *P_filler di recupero*:

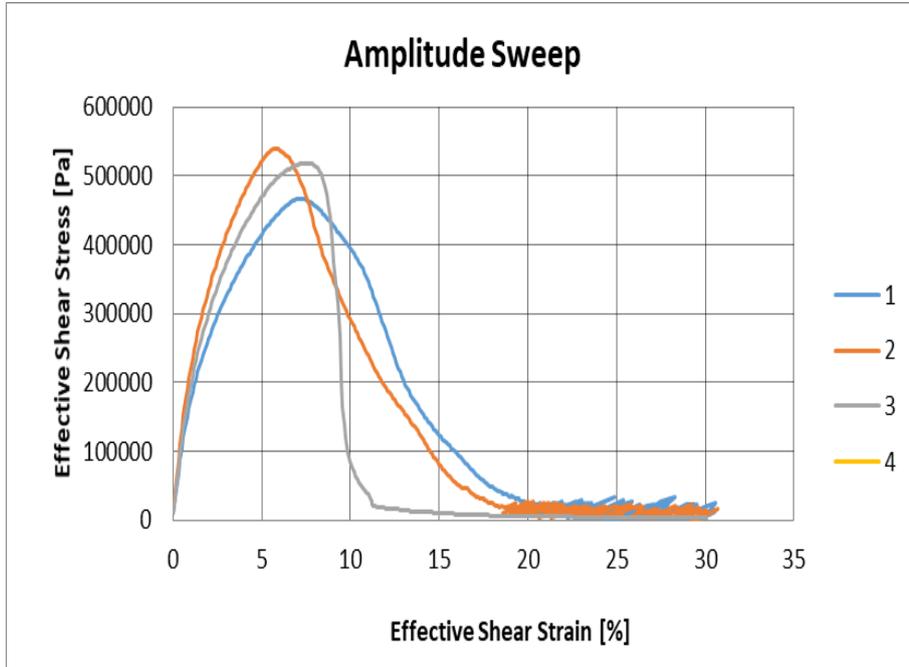


Figura 5.71 – Amplitude Sweep, *P_filler di recupero*

5.3.1.3 Confronto dei mastici bituminosi con omya

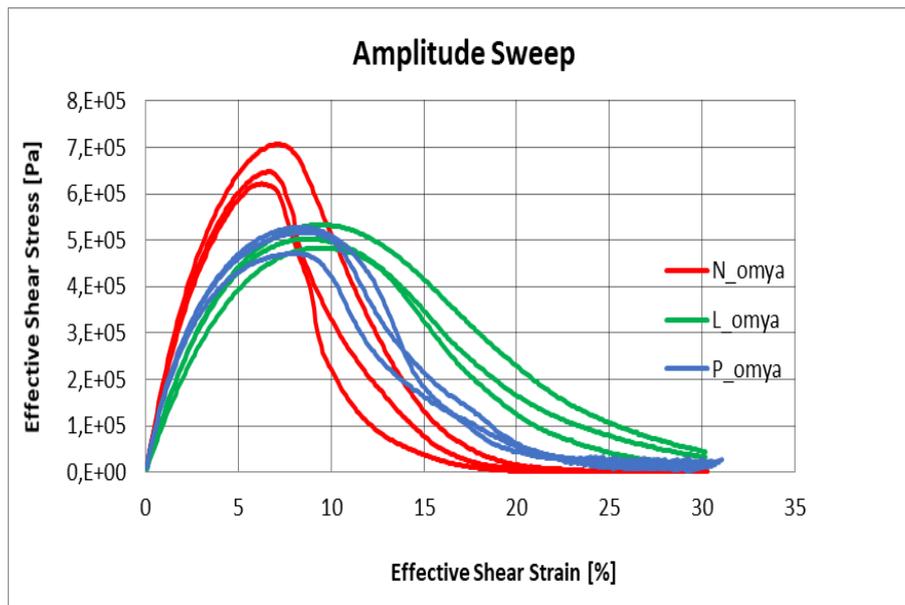


Figura 5.72 – Amplitude Sweep, Mastici bituminosi con omya

5.3.1.4 Confronto dei mastici bituminosi con filler di recupero

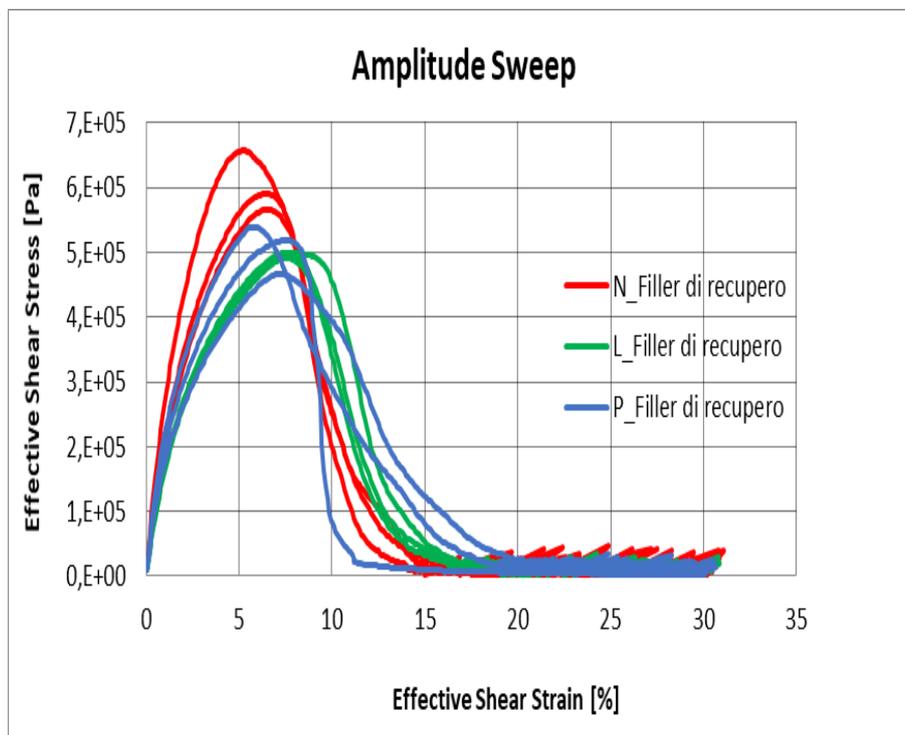


Figura 5.73 – Amplitude Sweep, Mastici bituminosi con filler di recupero

5.3.1.4 Confronto dei mastici bituminosi

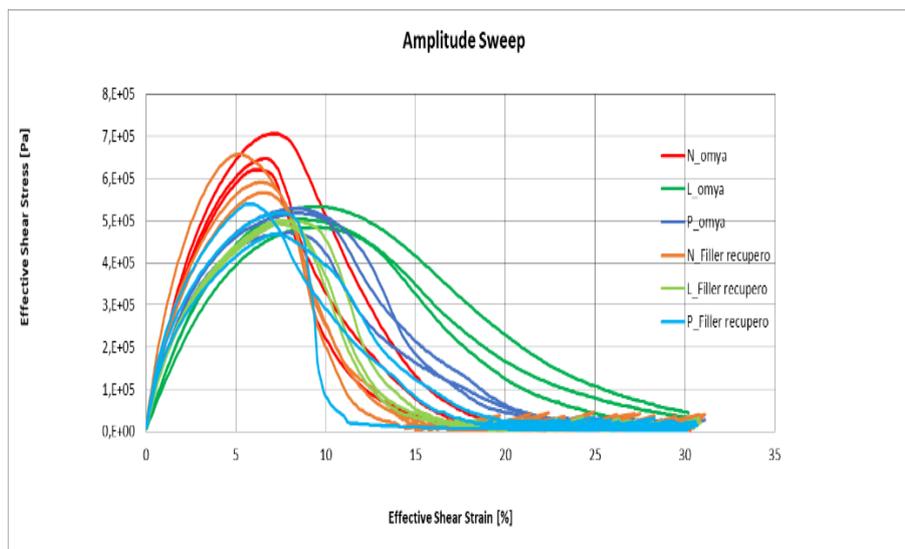


Figura 5.74 – Amplitude Sweep, Mastici bituminosi

Come viene evidenziato dai grafici di Amplitude sweep, relativi alla prova LAS, confrontando il mastice bituminoso indipendentemente dalla tipologia di filler (omya o filler di recupero), si evidenzia come il filler di recupero, a parità di emulsione bituminosa, abbia prestazioni superiori all'omya (fig. 5.74). Infatti, il mastice bituminoso con filler omya ha resistenza maggiore (altezza del picco nel grafico (5.74), sia in termini di deformazione a rottura, che post rottura. Confrontando le tre diverse emulsioni, quindi a parità di filler (fig.5.72-5.73), l'emulsione Normale ha valori di resistenza maggiori ottenuti per valori di deformazioni minori; post rottura presenta un decadimento delle prestazioni molto più rapido rispetto agli altri due materiali. Le due emulsioni L e P hanno un comportamento simile e si comportano meglio dell'emulsione N, nonostante un picco più basso alle basse deformazioni (fig. 5.74). Dopo la rottura post picco, il mastice con emulsione modificata con Lattice o Polimero, ha un decadimento della resistenza meno marcato rispetto all'emulsione Normale, ne consegue un migliore immagazzinamento di energia e migliore comportamento sottoposto a carico da traffico veicolare.

Capitolo 6- Conclusioni

La sperimentazione eseguita, svolta presso il Laboratorio del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile ed Architettura – sezione Infrastrutture – area Strade” dell’Università Politecnica delle Marche, è stata eseguita al fine di analizzare le prestazioni meccaniche e reologiche dei mastici bituminosi a freddo al variare del tipo di filler presente e dell’emulsione bituminosa scelta.

Sono stati realizzati e valutati sei mastici bituminosi composti come segue:

- Emulsione bituminosa Normale + filler omya
- Emulsione bituminosa modifica con Lattice + filler omya
- Emulsione bituminosa modificata con Polimeri + filler omya
- Emulsione bituminosa Normale + filler di recupero
- Emulsione bituminosa modifica con Lattice + filler di recupero
- Emulsione bituminosa modificata con Polimeri + filler di recupero

Attraverso l’utilizzo del macchinario Dynamic Shear Rheometer (DSR) si sono eseguite quattro tipologie di prova:

- Frequency Sweep;
- Strain Sweep;
- MSCR (Creep Recovery Test);
- LAS (Linear Amplitude Sweep).

Dall’analisi dei dati ricavati dalla sperimentazione si possono ricavare le seguenti considerazioni:

- Confrontando le curve maestre del modulo complesso dei mastici bituminosi, a parità della tipologia di filler, si evince come i mastici realizzati con emulsione bituminosa modificata con Polimeri siano quelli con migliore comportamento. Questo perché essi hanno una rigidità maggiore alle alte temperature (basse frequenze), necessaria per prevenire le deformazioni permanenti, ed hanno una rigidità confrontabile rispetto alle altre ad alte frequenze; questo è necessario per avere meno problemi di fessurazione termica;

- Confrontando i mastici, in termini di curve maestre (δ), è importante sottolineare che i mastici con emulsione P ed L hanno un comportamento maggiormente elastico (minore angolo di fase) rispetto all'emulsione N; questo probabilmente è dovuto al fatto che il polimero di modifica inibisce il comportamento viscoso dei materiali;
- I mastici realizzati con filler di recupero hanno tutti una maggiore rigidità e minore angolo di fase rispetto a quelli omya a tutte le temperature/frequenze. Questo denota una maggiore elasticità dei mastici con filler di recupero rispetto a quelli con il filler omya.
- Dal punto di vista delle prove MSCR effettuate sul mastice con omya si osserva come i materiali realizzati con emulsione P manifestino migliori prestazioni nei confronti delle deformazioni permanenti, poiché hanno un recupero (R %) maggiore ed una deformazione permanente (J_{nr}) minore rispetto alle altre due emulsioni; successivamente abbiamo L e poi P. Nel caso del filler di recupero, P è sempre il migliore, mentre L è quello che stavolta ha un comportamento peggiore;
- Sempre osservando i risultati dei test MSCR, ma confrontando i due diversi filler, si evince come i materiali realizzati con filler di recupero abbiano sempre un recupero (R %) maggiore ed una deformazione minore (J_{nr}). Questo vale indipendentemente dalle tipologie di emulsione;
- Infine, osservando i risultati delle prove LAS, è evidente come l'emulsione N abbia dei valori di resistenza maggiori ottenuti per basse deformazioni rispetto alle emulsioni modificate P ed L, che invece hanno un miglior comportamento post picco, e quindi una caduta di resistenza meno importante. Questo comportamento è osservabile sia nel caso dell'omya, che del filler di recupero;
- Il comportamento a fatica delle tre diverse emulsioni è sicuramente migliore nel caso di impiego di filler omya.
- Quindi, in conclusione, è possibile affermare che le emulsioni L e P sono quelle che si comportano meglio nei confronti dei principali meccanismi di danno. Mentre invece, a parità di emulsione, è possibile affermare che il filler di recupero dona maggiore rigidità al mastice e quindi ne migliora il comportamento in termini di accumulo di deformazioni permanenti, ma allo stesso tempo (questa sua maggiore rigidità) peggiora le sue prestazioni nei confronti della fatica.

Capitolo 7- Bibliografia e Sitografia

- Carpenter – “*Perpetual Pavement: Laboratory Validation*”. Presentation at the 57th Annual Ohio Transportation Engineering, 2003.
- Foschi R. - “Breve storia del riciclaggio delle pavimentazioni”, *Le strade*, n. 11, 2000.
- Castagnetta V. - “Il riciclaggio delle pavimentazioni bituminose stradali invecchiate”, 1985.
- Anas – “Quaderni Tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture, Volume V”, 2019.
- 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.
- Ravaioli S. - “Emulsioni bituminose”, Siteb, Prima edizione, Settembre 2004.
- 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.
- C. Godenzoni, M. Bocci and A. Graziani - Rheological characterization of cold bituminous mastics produced with different mineral additions, 2017.
- 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
- Zhenjun Wang, Aimin Sha - Micro hardness of interface between cement asphalt emulsion mastics and aggregates, 2009.

- 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.

Sitografia

- https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-DSR-operation_fig2_30540009.