POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Effetti di non linearità e sovrapposizione tempo – temperatura nell'autoriparazione dei leganti bituminosi

Relatori:
Prof. Lucia TSANTILIS
Prof. Orazio BAGLIERI
Prof. Ezio SANTAGATA
Ing. Fabrizio MIGLIETTA

Candidata:
Annarita DE LEONARDIS

Dicembre 2022

SOMMARIO

INTRODUZIONE……3

1 STATO DELL'ARTE 8

1.1 Autoriparazione e Fatica 8

1.2 Caratterizzazione dell'autoriparazione 10

2 STRUMENTI PER LA VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO VISCOELASTICO 16

2.1 Caratterizzazione viscoelastica lineare 16

2.2 Caratterizzazione viscoelastica non lineare 24

3 PROGRAMMA SPERIMENTALE 26

3.1 Materiali 26

3.2 Strumentazione 28

3.3 Preparazione dei campioni 30

3.4 Approccio metodologico 33

3.4.1 Prove in scansione di frequenza 34

3.4.2 Prove in scansione di deformazione 36

3.4.3 Prove di fatica 39

3.4.4 Prove di autoriparazione 41

3.4.5 Prove di Indurimento sterico 43

4 ANALISI DATI 47

4.1 Caratterizzazione viscoelastica lineare 47

4.2 Caratterizzazione non lineare 55

4.3 Resistenza a fatica 67

4.4 Autoriparazione 72

4.5 Indurimento sterico 76

4.6 Modello Semplificato di Danno Continuo Viscoelastico 77

4.6.1 Sovrapposizione tempo - temperatura nel modello S-VECD 86

4.6.2 La non linearità nel modello S-VECD 92

5 CONCLUSIONI 101

INTRODUZIONE

Le pavimentazioni flessibili sono un tipo di sovrastruttura stradale in cui gli strati in conglomerato bituminoso sono caratterizzati da diverse tipologie di miscele di aggregati e leganti bituminosi.

I requisiti che la pavimentazione deve essere in grado di soddisfare sono di tipo funzionale, ovvero, la regolarità e l'aderenza del manto stradale devono garantire il confort e la sicurezza degli utenti; strutturale, vale a dire, avere la capacità di trasmettere i carichi al sottofondo e resistere a fenomeni di degrado strutturale.

Le principali forme di deterioramento nelle pavimentazioni flessibili sono, l'accumulo di deformazioni permanenti, le fessurazioni di origine termica e la rottura per fatica.

La formazione delle micro-cricche, dovute ai continui cicli di carico e scarico, si trasformano nelle tipiche fessurazioni da fatica, determinando una riduzione della resistenza e della rigidezza del materiale, fino a rottura. Ciò, porta la pavimentazione, inevitabilmente, alla perdita delle sue prestazioni e alla riduzione della sua vita utile.

L'elemento considerato debole nella miscela di conglomerato è il legante bituminoso, perché più sensibile al fenomeno di fatica determinato dall'azione ciclica del traffico veicolare e dalle condizioni ambientali che generano l'innesco e la propagazione delle fessure.

Il processo di danneggiamento è ritardato dalla capacità del legante di recuperare, durante i periodi di riposo, parte delle sue caratteristiche meccaniche quali, rigidezza e resistenza. Questo fenomeno è chiamato autoriparazione (*self-healing* in inglese) ed è di fondamentale importanza

nella progettazione delle pavimentazioni stradali, in quanto porta ad un aumento della vita utile della pavimentazione, altrimenti sottostimata.

A tal proposito, numerosi sono stati gli studi sperimentali e i rispettivi metodi sviluppati per valutare la capacità di autoriparazione dei leganti bituminosi, tra i quali, maggiori sono state le sperimentazioni eseguite con il Reometro Rotazionale a taglio (DSR).

I dati ottenuti con tali prove sono analizzati attraverso diversi approcci, quello utilizzato nel presente studio sperimentale, si basa sull'utilizzo del modello Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD). Tale modello può essere applicato per analizzare i dati ottenuti da prove di fatica e di autoriparazione, condotte in regime oscillatorio. Le prime utilizzate per valutare la resistenza del materiale al danneggiamento, le seconde caratterizzate da due fasi di carico, interrotte da un periodo di riposo. Il modello S-VECD prevede inoltre, l'applicazione del principio di sovrapposizione tempo-temperatura in modo da poter tenere in conto degli effetti della temperatura, essendo uno dei principali fattori ad influenzare le prestazioni del bitume e il potenziale di autoriparazione. Negli ultimi anni, si è cercato inoltre, sempre nel modello S-VECD, di individuare gli effetti indotti della non linearità nella perdita d'integrità del materiale, quando il materiale è sottoposto ad elevati livelli deformativi, cercando quindi, di superare l'ipotesi semplificata su cui si basa l'analisi con tale modello ovvero, quella di attribuire tutta la perdita d'integrità del bitume al danno.

In tale contesto si inserisce il presente elaborato, affrontando il tema della non linearità e la sovrapposizione tempo-temperatura nell'autoriparazione di due leganti bituminosi, di cui un bitume tradizionale e un bitume modificato con l'elastomero SBS. Dapprima, è stato necessario caratterizzare la risposta in campo viscoelastico lineare mediante l'elaborazione dei dati ottenuti da prove in scansione di frequenza, applicando il principio di sovrapposizione

tempo-temperatura e il modello di *Christensen - Anderson – Marasteanu* (CAM), al fine di determinare le curve maestre in termini di modulo complesso e angolo di fase. Applicando il modello di Maxwell Generalizzato con la discretizzazione in serie di *Prony*, è stata modellata la risposta viscoelastica lineare. In seguito, per determinare la risposta viscoelastica non lineare, inizialmente sono state svolte delle prove in scansione di deformazione, con l'obiettivo di isolare la componente non lineare da altri meccanismi imputabili al danno. Successivamente, l'elaborazione dei dati, mediante opportune procedure di analisi, ha permesso la costruzione di curve maestre in campo non lineare e la determinazione di fattori di spostamento non lineari, dipendenti dal livello di deformazione e che consentono di ricondurre la risposta non lineare a quella lineare.

Terminata tale fase preliminare, dall'elaborazione delle prove a fatica, svolte a diverse temperature, sono state determinate le deformazioni alle tensioni di picco, necessarie per eseguire le prove di autoriparazione. Per valutare i soli effetti indotti dal processo di autoriparazione, si sono eseguite prove di indurimento sterico, in modo da rimuovere l'incremento indotto da tale fenomeno nel recupero complessivo di rigidità che viene raggiunto nelle prove di autoriparazione.

Il modello S-VECD è stato applicato ai risultati di tali prove, condotte a diverse temperature, successivamente rappresentate mediante curve caratteristiche di danno (DCC), in cui l'integrità del materiale è espressa in funzione del danno.

Infine, mediante l'introduzione del modulo complesso non lineare, ottenuto dall'analisi delle prove in scansione di deformazione, nel modello S-VECD, sono stati considerati gli effetti prodotti dalla non linearità nella perdita d'integrità del bitume, quando sottoposto ad elevate ampiezze di deformazione.

Di seguito, viene riportata una breve descrizione del lavoro svolto.

Il primo capitolo è dedicato allo stato dell'arte, in cui nella prima parte viene definito il potenziale di autoriparazione dei leganti bituminosi, i motivi per i quali tale fenomeno risulta essere così importante, soprattutto nella progettazione delle pavimentazioni. Viene descritto brevemente il fenomeno della rottura per fatica, essendo l'autoriparazione un processo che va a contrastare tale evento. Nella seconda parte vengono riportati i fattori che influenzano il processo di autoriparazione e in breve i protocolli sviluppati, con riferimento a quello utilizzato nell'abito di questa ricerca.

Nel secondo capitolo, anch'esso suddiviso in due parti, vengono introdotti gli strumenti di base, ovvero, i modelli fischi e matematici atti a descrivere il comportamento viscoelastico dei leganti bituminosi, sia in campo viscoelastico lineare che non lineare, in quest'ultimo caso utilizzando degli opportuni fattori di spostamento non lineari.

Nel terzo capitolo viene descritto interamente il programma sperimentale, dunque, i materiali, la strumentazione utilizzata, la procedura di preparazione dei campioni ed infine l'approccio metodologico adottato.

Il quarto capitolo è dedicato all'analisi dei dati ottenuti dalle diverse prove condotte. Vengono riportate le grandezze reologiche che descrivono il comportamento viscoelastico lineare. La procedura di analisi che ci ha portato a definire le curve maestre non lineari e a valutare dei fattori di spostamento non lineari, consentendo di ridurre la risposta non lineare a quella lineare. La valutazione della resistenza a fatica e della capacità di autoriparazione dei leganti, mediante l'elaborazione dei dati sperimentali ottenuti rispettivamente, da prove LAS e LASH. Comprende, inoltre una panoramica del modello S-VECD, l'applicazione del principio di sovrapposizione tempo-temperatura, la valutazione dell'effetto dell'indurimento sterico e la valutazione degli effetti prodotti dalla non-

linearità. Infine, la valutazione di due indici di autoriparazione in termini di integrità e di danno, considerando e non tenendo in conto della non-linearità.

Nell'ultimo capitolo, il quinto, vengono esposte le conclusioni, basate sull'elaborazione ed il confronto dei risultati ottenuti.

1 STATO DELL'ARTE

1.1 Autoriparazione e Fatica

I leganti bituminosi possiedo la capacità di recuperare in parte, i danni da fatica indotti dai carichi ripetuti del traffico veicolare e dalle azioni ambientali. Tale proprietà è chiamata autoriparazione o più comunemente *Self-Healing.*

Dal momento che, ad oggi i meccanismi che inducono tale fenomeno sono ancora poco chiari, non vi è una definizione univoca. Allo stesso modo, è possibile definire il processo di autoriparazione, come l'abilità del bitume a ridurre le micro-fessure create all'interno della matrice bituminosa o all'interfaccia aggregato-legante, quindi a seguito di un danneggiamento e un periodo di riposo, portando ad un parziale recupero delle proprie caratteristiche meccaniche, quali rigidezza e resistenza [1].

La capacità, attraverso tale processo, di riparare piccole crepe risulta di fondamentale importanza in quanto, prolunga la vita a fatica delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso che altrimenti verrebbe sottostimata durante la progettazione, si abbattono i costi legati alla manutenzione ed inoltre si limita l'impatto che ha la produzione del bitume sull'ambiente, andando a ridurre le emissioni di sostanze nocive [2].

Le pavimentazioni flessibili, durante la loro vita utile sono soggette a diverse forme di degrado, tra cui le fessurazioni di origine termica, l'accumulo di deformazioni permanenti e la rottura per fatica, quest'ultima rappresenta la principale forma di deterioramento in parte ostacolato dal fenomeno dell'autoriparazione. Tale fenomeno si esplica dunque, quando vi è un danneggiamento e un periodo di riposo e l'entità del recupero dipende da fattori esterni e dalle caratteristiche chimico-fisiche del legante bituminoso.

Il collasso per fatica si manifesta inizialmente sotto forma di micro-fessure in direzione parallela a quella del traffico veicolare, nel tempo la loro propagazione conferisce alla pavimentazione il tipico aspetto a pelle di coccodrillo (Figura 1).

Figura 1: Rottura a pelle di coccodrillo

Il susseguirsi nel tempo dei carichi, intervallati da periodi di riposo, produce all'interno degli strati legati alcuni stati tensionali. Semplificando la pavimentazione ad un bistrato, in sommità si ha uno strato in conglomerato bituminoso che poggia su uno strato che funge da supporto, la parte legata per effetto del carico si inflette. Questo produce delle tensioni, di compressione appena al di sotto del punto di applicazione dell'asse e di trazione alla base dello strato legato. Le zone adiacenti al punto di contatto dello pneumatico, quindi quelle che lo precedo e lo seguono, saranno soggette ad un stato tensionale inverso al precedente, le fibre tese saranno in superficie, mentre quelle compresse in profondità. Al passaggio dei veicoli dunque, lo strato legato sarà soggetto a delle sollecitazioni cicliche e di segno opposto (Figura 2), per le quali la pavimentazione giunge alla condizione di rottura definita di fatica, anche per livelli tensionali inferiori a quella che risulta essere la reale resistenza del materiale.

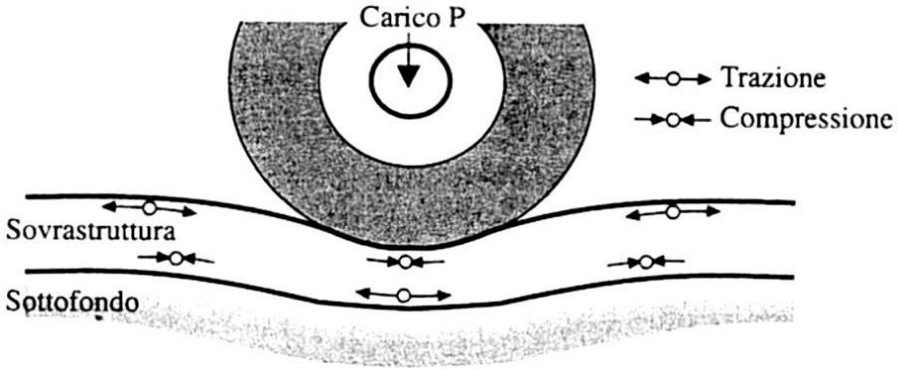

Figura 2: Stati di sollecitazione nella sovrastruttura (Riviera2019-2020)

Tale processo di deterioramento non può essere evitato, pertanto è necessario che durante la progettazione delle pavimentazioni flessibili vengano utilizzati dei materiali che abbiano un'adeguata resistenza a fatica, in modo che la rottura avvenga solo dopo un determinato numero di cicli di carico.

1.2 Caratterizzazione dell'autoriparazione

Il recupero delle proprietà meccaniche indotto dal solo processo di autoriparazione è influenzato da numerosi fattori. Esistono però, altri fenomeni come la tixotropia e l'indurimento sterico, che portano ad un recupero di tali proprietà.

Soffermandosi sull'indurimento sterico, questo può risultare significativo nel momento in cui si concede un prolungato periodo di riposo tra un carico e il successivo. L'indurimento sterico è un fenomeno termicamente reversibile che determina un riarrangiamento della configurazione molecolare. L'incremento di rigidezza, durante i periodi di riposo, dovuto a tale fenomeno, può portare ad una sovrastima del reale potenziale di guarigione del legante, pertanto risulta necessario nelle analisi considerare anche tale aspetto [3].

L'autoriparazione è un processo complesso in quanto è influenzato da vari fenomeni che si sviluppano all'interno del legante e da numerosi fattori esterni.

Per quanto concerne i fenomeni fisico-chimici, tale fenomeno è descritto mediante un processo a più fasi. Nella prima fase si ha un avvicinamento delle superfici micro-fessurate dovuto al flusso del bitume, segue poi la fase di adesione e infine si assiste alla diffusione e alla randomizzazione casuale delle molecole con un recupero della proprietà meccaniche [4].

La capacità di autoriparazione dei materiali bituminosi è influenzata anche dalle caratteristiche del bitume, in quanto questa è direttamente correlata alla composizione e alla morfologia del bitume. Inoltre, l'aggiunta di modificatori polimerici alla matrice bituminosa porta ad un cambiamento della capacità di autoriparazione del prodotto finale. In particolar modo, gli effetti prodotti dall'aggiunta dell'elastomero Stirene-Butadiene-Stirene (SBS) sono ancora inceri e contrastanti [5].

I fattori esterni più rilevanti che influenzano la capacità di autoriparazione del bitume sono la temperatura, la durata dei periodi di riposo, le condizioni di carico e l'umidità.

La temperatura influenza il processo di autoriparazione in quanto influisce sulla viscosità e sulla mobilità molecolare del bitume. Una riduzione della temperatura comporta un incremento della viscosità, con una conseguente riduzione sia della capacità del legante a fluire che dell'interdiffusione delle superfici fessurate [6]. Un incremento della temperatura dunque, si riflette in un aumento della capacità di recupero del bitume. L'autoriparazione può verificarsi anche in tempi molto brevi, ma se le temperature sono sufficientemente elevate. A temperatura ambiente, il fenomeno si presenta, ma i tempi necessari sono maggiori. Numerose sono state le ricerche per determinare la temperatura ottimale di guarigione dei leganti bituminosi. Alcuni ricercatori sostengono che la temperatura di guarigione ottimale sia quella di rammollimento del bitume, mentre altri ne definiscono un intervallo associato alla temperatura di transizione di fase [7].

L'influenza nel fenomeno dell'autoriparazione del periodo di riposo è dovuta alla dipendenza dal tempo dei fenomeni di bagnatura e di inter diffusione molecolare, il prolungamento di tali tempi comporta il manifestarsi di questi fenomeni in misura maggiore, portando dunque ad un incremento della rigidezza e della resistenza del bitume. Inoltre, un tempo di riposo paria a dieci volte il tempo di caricamento è ritenuto sufficiente per un pieno recupero delle proprietà del materiale [5].

Tra i vari studi sperimentali sulla valutazione della resistenza a fatica dei bitumi si evince una certa differenza tra i risultati ottenuti da prove in laboratorio e quelli ottenuti da prove eseguite in campo. Mediante le prove in laboratorio si sottostima l'effetto positivo dovuto al reale tempo di riposo che intercorre tra il passaggio di un asse e il successivo, in quanto questo dipenderà dalla velocità del veicolo e dalla configurazione degli assi [2].

Il carico e quindi il livello di tensione o deformazione applicato se elevato induce degli effetti negativi sulla capacità di autoriparazione [8]. Infatti, l'autoriparazione è elevata quando il danno non è eccessivo, ovvero quando si è in presenza di micro-fessure [9].

Altri due fattori che influenzano negativamente il processo di autoriparazione sono l'invecchiamento e l'umidità, in quanto quest'ultima presenta una maggiore affinità con gli aggregati che costituiscono il conglomerato bituminoso piuttosto che con il bitume, dunque questo potrebbe impedire il verificarsi del processo di autoriparazione [10].

Nonostante le numerose ricerche e sviluppi sulla capacità di autoriparazione dei leganti, la complessità di tale fenomeno, dovuto a fattori anch'essi per natura complessi, fa sì che ancora oggi non vi sia un unico parametro con il quale quantificarla. Uno dei più importanti gruppi di ricerca che si adopera su tale fronte è il RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux)*, il quale si occupa della ricerca e dello sviluppo di

materiali da costruzione. In particolar modo, la commissione tecnica CHA *Crack Healing of Asphalt pavement materials*), che fa parte di tale associazione, ha come obiettivo quello di definire un unico protocollo relativo allo studio della capacitò di autoriparazione dei leganti bituminosi [11].

La gran parte degli studi sulla valutazione del potenziale di autoriparazione dei leganti bituminosi vengono eseguiti attraverso prove svolte utilizzando il Reometro Rotazionale (DSR). Numerosi sono stati i modelli e gli indici proposti per poter conoscere e comprendere tutti gli aspetti che caratterizzano il fenomeno [3].

In particolar modo il protocollo sviluppato presso il Politecnico di Torino si basa su prove di *Time Sweep (TS)*, le quali sono prove di fatica in cui i provini sono sottoposti a cicli ripetuti di sollecitazione o carichi di deformazione ad una determinata temperatura e frequenza di carico. In tale protocollo sono presenti due prove, la prima in cui le due fasi in scansione temporale (TS) in controllo di deformazione sono intervallate da un periodo di riposo, in questo modo si tiene in conto sia dell'autoriparazione che dell'indurimento sterico. La seconda invece, uguale alla precedente, ma senza eseguire la prima fase di carico, dunque in assenza di pre-danneggiamento, in modo da epurare i risultati dall'effetto dell'indurimento sterico [12]. Durante la sperimentazione sono stati fatti variare la durata e la temperatura del periodo di riposo e sono stati introdotti due indici, uno relativo al recupero della rigidità e l'altro legato all'aumento della resistenza alla fatica per misurare il potenziale di autoriparazione di diversi leganti bituminosi [5].

Ricercatori dell'Università Politecnica delle Marche hanno modificato il protocollo standard basato sulle prove di *Time Sweep*, inserendo periodi di riposo multipli a un livello di danno specifico. L'analisi dei risultati ha portato i ricercatori di tale università a definire uno strumento atto a

indentificare il potenziale di autoriparazione tenendo conto anche della tixotropia [13].

In un ulteriore protocollo viene adottato il modello Semplificato di Danno Continuo Viscoelastico (S-VECD) per analizzare i risultati ottenuti da prove di fatica (LAS) e di autoriparazione (LASH) [14].

La procedura LAS viene utilizzata per la valutazione della resistenza a fatica dei leganti bituminosi ed è eseguita in regime oscillatorio. Inizialmente tale prova era considerata una procedura di fatica accelerata se comparata con le prove di *Time Sweep.* Nella procedura di prova iniziale proposta da Johnson [15] la deformazione era applicata al provino linearmente e variava dallo 0,1 % al 20 %. Successivamente, affinché venissero causati danni da fatica anche in alcuni bitumi modificati il massimo livello di deformazione fu portato al 30% da Hintz et al.

La procedura LASH consiste in due fasi di carico, in cui la deformazione varia linearmente, interrotte da un periodo di riposo. Viene definito un livello di danno critico Sf, ovvero quello a cui si verifica la rottura e le prove vengono eseguite analizzando diversi livelli di danno (25% Sf, 50 %Sf, 75 %Sf e il 125% Sf) e diversi periodi di riposo (1, 5, 50,15, 30 minuti) [16].

I risultati ottenuti da queste procedure vengono poi analizzati mediante il modello S-VECD da cui si ottengono le Curve Caratteristiche di Danno (DCC) che consentono di prevedere le prestazioni del legante in qualsiasi condizione di prova e in cui viene rappresentata la perdita di integrità (C) del materiale man mano che viene accumulato il danno (S).

Nel presente lavoro di tesi al protocollo precedentemente descritto sono state apportate delle modifiche, in quanto nella procedura LASH è stato utilizzato un unico livello di danno, ottenuto dalle prove LAS, e un solo periodo di riposo. Nel modello S-VECD è stato introdotto il principio di

sovrapposizione tempo-temperatura in modo da poter tenere in conto degli effetti della temperatura, essendo uno dei principali fattori che influenzano le prestazioni del bitume.

Inoltre, si è cercato di individuare gli effetti della non linearità sulle prestazioni di vita a fatica del legante bituminoso. In passato, tutta la perdita di integrità del materiale veniva attribuita al danno da fatica, per motivi di semplicità, portando così ad una sopravvalutazione del danno stesso. Inoltre, molti studi hanno riscontrato che il livello di deformazione nelle pavimentazioni flessibili è compreso tra 70-200 *micro-strain*, ciò indica che nella fase legante il livello deformativo può essere maggiore del 10 % [17]. Valutare gli effetti della non linearità è dunque importante per prevedere e valutare le prestazioni della pavimentazione.

Pertanto, si è cercato di scindere gli effetti della non linearità dal danno, analizzando i dati di prove in scansione di deformazione (MSS) e introducendo il modulo complesso non lineare ottenuto, valutandolo alle deformazioni delle prove LAS e LASH, nel modello S-VECD.

2 STRUMENTI PER LA VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO VISCOELASTICO

Nel presente capitolo vengono introdotti i modelli fischi e matematici atti a descrivere il comportamento viscoelastico dei leganti bituminosi. Difatti, la valutazione degli effetti prodotti dalla non linearità e della sovrapposizione tempo-temperatura nell' autoriparazione dei leganti bituminosi, presuppone la conoscenza di parametri reologici, quali il modulo complesso e l'anglo di fase, sia in campo viscoelastico lineare sia superando tale limite, dunque ricadendo in campo viscoelastico non lineare. Pertanto, l'obiettivo è quello di introdurre strumenti di base per lo studio delle successive indagini.

2.1 Caratterizzazione viscoelastica lineare

I leganti bituminosi sono materiali le cui proprietà dipendono dal tempo e dalla temperatura. Per tempi di carico piccoli (elevate frequenze) o basse temperature presentano il comportamento tipico di un solido elastico, mentre ad elevate temperature o per tempi di carico elevati (piccole frequenze), il comportamento è quello di un fluido Newtoniano. Tali materiali esibiscono, invece, un comportamento viscoelastico a temperature intermedie [18] .

Inoltre, studi sperimentali dimostrano che i bitumi modificati esibiscono un comportamento viscoelastico in un intervallo di temperature più ampio rispetto a quelli tradizionali quindi, la transizione a fluido Newtoniano avviene a temperature maggiori.

La caratterizzazione del materiale in campo viscoelastico lineare, in termini di modulo complesso $|G^*|$ e angolo di fase δ, avviene attraverso la modellazione dei risultati ottenuti dalle prove in scansione di frequenza (FS), dapprima mediante l'applicazione del modello di *Christensen-Anderson-Marasteanu* e successivamente attraverso il modello di *Maxwell generalizzato* utilizzando una discretizzazione della serie di *Prony*.

L'attuazione dei due modelli è preceduta dall'applicazione del principio di sovrapposizione tempo-temperatura. Tale principio afferma che una riduzione della frequenza di oscillazione produca degli effetti sulla risposta del materiale viscoelastico del tutto uguali e dunque sovrapponibili a quelli di un incremento della temperatura di prova. Vale dunque anche il contrario, pertanto gli effetti prodotti dal tempo (quindi dalla frequenza) e dalla temperatura sono sovrapponibili e interscambiabili [19].

Il principio di sovrapposizione tempo-temperatura si attua nello sviluppo delle curve maestre, che consentono di esprimere il modulo complesso in funzione delle frequenze ridotte in un piano bi-logaritmico, in un intervallo di frequenze di carico più ampio rispetto a quelle applicabili con lo strumento.

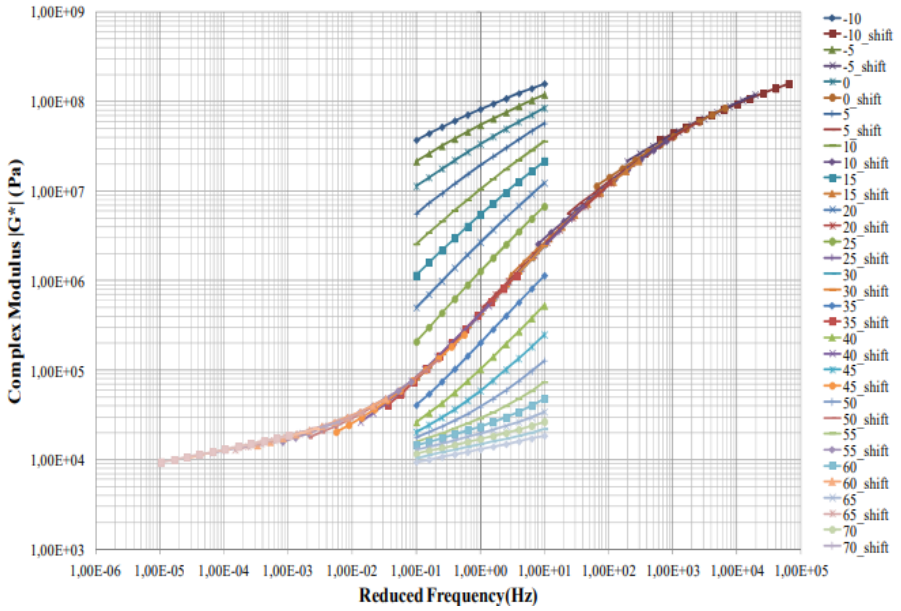

Figura 3: Costruzione curva maestra (G.Parla, C. Celauro, A. Bevilacqua 2014)

In particolare, mediante le prove in scansione di frequenza si ottengono delle curve alle temperature di 34 °C - 28 °C - 22 °C - 16 °C - 10 °C e 4 °C, nell'intervallo di frequenza che varia da 1 rad/s a 100 rad/s, facendo variare anche la deformazione. La costruzione della curva maestra (Figura 3) si ottiene scegliendo una temperatura di riferimento T_0 rispetto alla quale, le

curve a temperature maggiori si posizionano nel piano bi-logaritmico più in basso, a significare che il materiale a parità di frequenza è meno rigido, mentre le curve a temperature più basse saranno più alte di quella di riferimento, dunque il materiale a parità di frequenza è più rigido. La traslazione orizzontale di tali curve rispetto alla temperatura di riferimento avviene mediante fattori di traslazione a(T). Considerando la frequenza ridotta, ottenuta moltiplicando la frequenza misurata con lo *shift factor*:

$$\omega_r = \omega_s * a(T) \qquad (1)$$

riscrivendola in termini logaritmici:

$$log\omega_r = log\omega_s * loga(T) \qquad (2)$$

si può utilizzare l'equazione empirica di Williams-Landel-Ferry (WLF) per ottenere la quantità di cui le curve traslano, ovvero la quantità $loga(T)$

$$loga_T = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0)} \qquad (3)$$

Dove C_1 e C_2 sono parametri che dipendono dal materiale, T è la temperatura di prova e T_0 è la temperatura di riferimento.

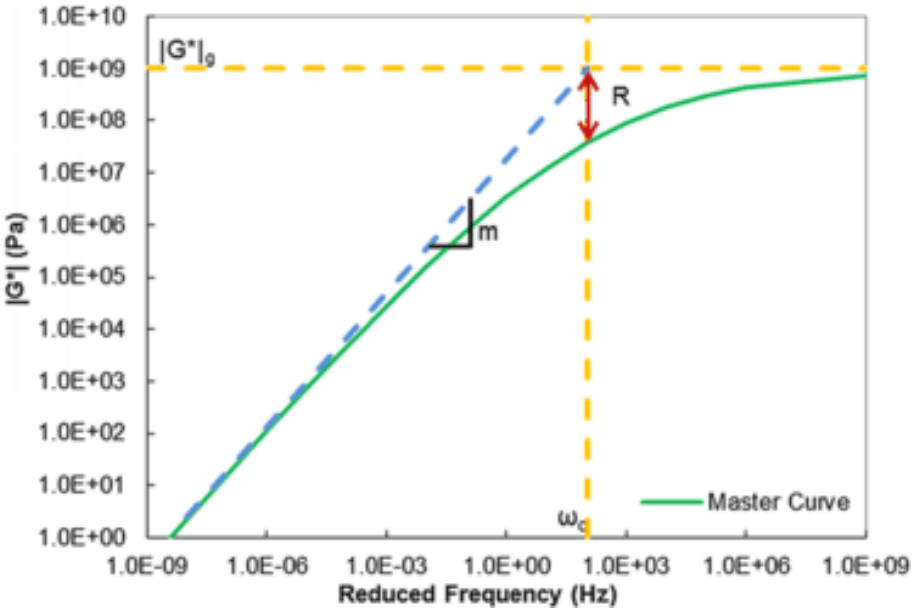

Figura 4: Curva maestra tipica del legante Bituminoso

La curva maestra viene definita mediante dei parametri di forma e di posizione (Figura 4):

- Il modulo vetroso G_g: valore del modulo complesso in corrispondenza dell'asintoto vetroso, il quale definisce il comportamento limite del materiale a basse T e alte frequenze, ovvero in corrispondenza del quale il comportamento è quello di un solido elastico. Tale valore è assunto paria a 1 GPa;
- Asintoto viscoso: definisce il comportamento del materiale a basse frequenze e alte T;
- Frequenza di cross-over ω_c: frequenza alla quale l'asintoto vetroso e quello viscoso si intersecano;
- Indice reologico R: differenza tra il modulo vetroso e quello viscoso alla frequenza di cross-over;
- Parametro di modello m: al variare del quale cambia la pendenza del della curva maestra. Tale parametro viene utilizzato per il calcolo del coefficiente α=1+1/m nel modello *Simplified Viscoelastic Continuum Damage,* dove nel confronto tra le diverse prove alle diverse

temperature viene applicato il principio di sovrapposizione tempo-temperatura.

In campo viscoelastico lineare (LVE) la norma del modulo complesso è proporzionale alla massima tensione misurata e inversamente proporzionale alla massima deformazione applicata in quel ciclo di carico:

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \tag{4}$$

L'angolo di fase δ che rappresenta lo sfasamento tra l'oscillazione armonica delle tensioni e quella delle deformazioni può assumere valori pari a π/2 e in tal caso il comportamento del legante è puramente viscoso, oppure valore paria zero, quando il comportamento del bitume è puramente elastico.

Tali parametri, quali modulo complesso G* e angolo di fase δ, sono legati attraverso le seguenti espressioni matematiche:

$$G^* = G' + iG'' \tag{5}$$

$$G' = G^* \cos\delta \tag{6}$$

$$G'' = G^* \sin\delta \tag{7}$$

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \tag{8}$$

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{G''}{G'}\right) \tag{9}$$

dove: G' e G'' sono rispettivamente, lo *storage modulus* ovvero, il modulo di restituzione elastica e il *loss modulus* che rappresenta il modulo di dissipazione viscosa.

Il modello di Christensen-Anderson-*Marasteanu (CAM)* utilizza i parametri G_g, ω_c, R e m, per descrivere la curva maestra e quindi il comportamento di qualsiasi legante in campo lineare, attraverso la norma del modulo complesso

|G*| e dell'angolo di fase δ. La stima dei parametri G_g, ω_0, R *ed* m avviene mediante un processo di ottimizzazione tra i dati misurati e quelli modellati con il modello CAM, utilizzando le seguenti formule:

$$|G_{LVE}{}^*(\omega_r)| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega_r}\right)^{\frac{\log 2}{R}}\right]^{-\frac{m\,R}{\log 2}} \tag{10}$$

$$\delta_{LVE}(\omega_r) = \frac{90\,m}{\left[1 + \left(\frac{\omega_r}{\omega_c}\right)^{\frac{\log 2}{R}}\right]} \tag{11}$$

dove: G_g, è il modulo vetroso, ω_c è la frequenza di crossover, ω_r è la frequenza ridotta, R l'indice reologico e m è il parametro del modello.

Nell'ambito della teoria della viscoelasticità lineare le relazioni fra sforzo e deformazione sono lineari e dipendenti dal tempo. I materiali come i bitumi, che manifestano contemporaneamente la natura di solidi elastici e di liquidi viscosi, possono essere descritti mediante dei modelli di comportamento generalizzati. Tali modelli sono ottenuti mediante la combinazione dei modelli analogici semplici, come il modello di Maxwell, di Kelvin- Voigt e di Burger, nei quali i materiali vengono schematizzati e modellati con la molla di *Hooke* e lo smorzatore *Newtoniano*.

Il modello generalizzato di *Maxwell*, quello utilizzato in questa tesi, è costituito da N elementi di *Maxwell* (molla di *Hooke* e dissipatore disposti in serie) disposti come in Figura 5, ciascuno con i propri parametri caratteristici: G_i .i-esimo termine di rigidità e η_i i-esima costante viscosa del dissipatore.

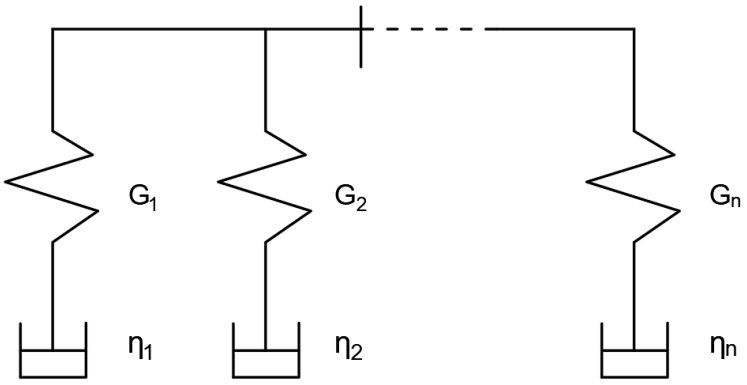

Figura 5: Schema del modello generalizzato di Maxwell

Tale approccio consente di passare facilmente dalle funzioni nel dominio della frequenza a quelle del tempo e semplifica la formula analitica della funzione di rilassamento. Per valutare tale funzione risulta necessario utilizzare le serie di *Prony,* che vengono determinate derivando i coefficienti di *Prony* mediante il *Collocation Method.*

La funzione di rilassamento in funzione del tempo G(t) è determinata per un numero n di elementi della serie di *Prony*:

$$G(t) = \sum_{i=1}^{n} G_i e^{-\frac{t}{\rho_i}} \qquad (12)$$

dove, ρ_i è i-esimo tempo di rilassamento che è dato dal rapporto tra η_i e G_i .

Vengono scelti dei valori arbitrari del tempo di rilassamento ρ_i, assunti uguali per le frequenze angolari ω_i, con l'obiettivo di coprire 32 decadi temporali.

$$\{G_i\} = [A]^{-1}\{G'\} \qquad (13)$$

Il vettore dei termini *Prony* G_i, è determinato mediante il prodotto tra l'inversa della matrice di *Kernel*, nella quale i termini i-esimo e k-esimo sono calcolati in funzione dei tempi di rilassamento ρ_i e della frequenza angolare ω_i, e il vettore dei moduli di restituzione elastica $G_i{}'$, calcolati come segue:

$$G_i{}' = G_i{}^* \cos \delta_i \qquad (14)$$

Dove, $G_i{}^*$e δ_i sono determinati mediante l'applicazione delle Formule (10) e (11), in cui i parametri utilizzati sono quelli ottenuti dal modello CAM alla temperatura di riferimento mediante il processo di ottimizzazione e le frequenze angolari ω_i.

La matrice di *Kernel* invece è determinata secondo la seguente espressione:

$$A_{ik} = \frac{\rho_i^2 \omega_i^2}{1 + \rho_i^2 \omega_i^2} \qquad (15)$$

Una volta valutata la funzione di rilassamento nel dominio del tempo in campo viscoelastico lineare, utilizzando i termini di *Prony* è possibile calcolare il modulo complesso $|G_{LVE}{}^*|$ e l'angolodi fase δ_{LVE} nel dominio delle frequenze:

$$G' = \sum_{i=1}^{n} \frac{G_i \omega_r^2 \rho_i^2}{\omega_r^2 \rho_i^2 + 1} \qquad (16)$$

$$G'' = \sum_{i=1}^{n} \frac{G_i \omega_r \rho_i}{\omega_r^2 \rho_i^2 + 1} \qquad (17)$$

$$|G^*{}_{LVE}| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \qquad (18)$$

$$\delta_{LVE} = \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{G_i \omega_r \rho_i}{\omega_r^2 \rho_i^2 + 1}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{G_i \omega_r^2 \rho_i^2}{\omega_r^2 \rho_i^2 + 1}} \right) \qquad (19)$$

I valori della norma del modulo complesso $|G*|_{LVE}$ e dell'angolo di fase δ_{LVE} calcolati attraverso i termini di *Prony,* devono essere confrontati con i valori ottenuti applicando il modello CAM, ovvero modellando i dati sperimentali delle prove in scansione di frequenza.

2.2 Caratterizzazione viscoelastica non lineare

Nelle pavimentazioni flessibili, sottoposte al carico veicolare, il bitume potrebbe subire delle sollecitazioni e delle deformazioni che ricadono all'interno del regime non lineare [17].

Il limite viscoelastico lineare (LVE) è definito andando a valutare il valore di deformazione alla quale il modulo complesso |G*| presenta una riduzione del 5% rispetto al valore del modulo iniziale in campo viscoelastico lineare.

La riduzione del modulo complesso al di fuori di tale limite può essere causata sia da fenomeni irreversibili come il danno, sia da effetti dovuti alla non linearità e dunque reversibili.

Per comprendere dunque, quali sono gli effetti della non linearità, sulla resistenza a fatica e di conseguenza sul potenziale di autoriparazione del legante, l'approccio utilizzato nel presente lavoro di tesi si basa sull'analisi della risposta viscoelastica mediante prove a deformazione incrementale o anche dette *Multiple Strain Sweep* (MSS).

Mediante l'analisi dei dati ottenuti da tali prove è possibile separare gli effetti della non linearità dal danno ottenendo il valore del modulo complesso non lineare $|G^*|_{NL}(T, f, \gamma)$ in funzione della temperatura, della frequenza e della deformazione. Individuati dei livelli di deformazione nel dominio non lineare, per ciascuno di essi, alle varie temperature, si individua il valore del modulo complesso non lineare misurato.

Bassandosi sul presupposto che i fattori di spostamento tempo-temperatura sono indipendenti dalla deformazione [20], è possibile utilizzare gli *shift factors* calcolati utilizzando i parametri ottenuti attraverso il processo di ottimizzazione nel modello CAM, per costruire le curve del modulo complesso non lineare $|G^*|_{NL}$ per diversi livelli di deformazione,

semplicemente spostando i dati sperimentali misurati nelle prove di MSS alle diverse temperature.

Successivamente, il comportamento non lineare viene modellato sulla base delle soluzioni ottenute in campo lineare, eseguendo dei processi di ottimizzazione tra le curve maestre non lineari e le curve maestre lineari, tramite l'introduzione di due fattori di spostamento correlati alla non linearità.

Tali fattori di spostamento sono:

- α_γ: rappresenta uno spostamento orizzontale, ovvero determina una variazione della pendenza logaritmica della curva maestra agendo direttamente sulla frequenza ridotta. Viene ricavato dalla seguente formula matematica:

$$\omega'_r = \omega_r a_\gamma = (\omega_r a_T) a_\gamma \qquad (20)$$

- h: rappresenta uno spostamento verticale e modifica direttamente il modulo complesso, secondo la seguente espressione matematica:

$$|G^*{}_{NLVE}|(\omega_r) = \frac{1}{h}|G^*{}_{LVE}|(\omega'{}_r) \qquad (21)$$

dove, ω'_r è la frequenza angolare ridotta che dipende dalla deformazione, mentre ω_r è la frequenza angolare ridotta.

Combinando l'equazione (18) con la (21) si ottiene la norma del modulo complesso non lineare $|G^*{}_{NLVE}|$ tramite i coefficienti di *Prony:*

$$|G^*{}_{NLVE}| = \frac{1}{h}\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{G_i\omega'^2_r\rho_i^2}{\omega'^2_r\rho_i^2+1}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n}\frac{G_i\omega'{}_r\rho_i}{\omega'^2_r\rho_i^2+1}\right)^2} \qquad (22)$$

I fattori di spostamento α_γ e h ci indicano qual è l'impatto della non linearità sul comportamento reologico dei bitumi.

3 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Nel presente capitolo viene delineato l'intero programma sperimentale, in particolar modo vengono presentati i materiali, la strumentazione adottata, la procedura di preparazione dei campioni e l'approccio metodologico, ovvero l'insieme delle procedure di prova eseguite. L'intero programma sperimentale è stato svolto nel laboratorio di materiali stradali del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino, nella sala di reologia, utilizzando il Reometro Rotazionale a taglio (DSR).

3.1 Materiali

Il bitume è una miscela di idrocarburi paraffinici ed aromatici ad alto peso molecolare che può essere reperito in natura, ma oggi ottenuto in special modo dalla distillazione frazionata del greggio del petrolio [21].

Le sue proprietà fisiche e meccaniche sono legate alla sua composizione chimica, fisica e strutturale. Il bitume è un sistema multifase costituito da una componente oleosa, caratterizzata da oli saturi e aromatici, all'interno della quale sono disperse sostanze insolubili dette asfalteni. L'insieme degli oli saturi e aromatici e delle resine costituiscono gli oli maltenici.

Gli asfalteni determinano il comportamento del bitume al variare della temperatura: elastico, viscoso, plastico. Le resine sono composti solubili, viscosi a temperatura ambiente e con elevate proprietà adesive, tendono a disperdere gli asfalteni, conferendo flessibilità e duttilità al bitume quando sottoposto a sollecitazioni meccaniche. I saturi e aromatici sono sostanze chimiche che rappresentano la parte fluida del sistema e che vanno ad influenzarne il comportamento ad elevate temperature, in tal moto sono in grado di ricoprire grandi superfici di altro materiale.

Il comportamento reologico del bitume, detto tradizionale, dipende dallo stato di aggregazione delle miscele e dunque dal rapporto tra asfalteni, malteni e resine. L'aggiunta ai bitumi vergini di un polimero ne altera la struttura chimica, le proprietà fisiche e reologiche: quest'ultimi sono detti bitumi modificati

I principali agenti chimici usati come modificanti sono gli elastomeri termoplastici e i plastomeri termoplastici. I primi consentono un aumento della rigidezza e del grado di elasticità alle alte temperature e una riduzione delle stesse alle basse temperature, mentre i secondi portano ad un irrigidimento del bitume senza incremento del grado di elasticità.

I materiali utilizzati durante la sperimentazione sono due:

- Bitume vergine fornito dall'azienda Italia-Petroli e denominato in funzione del suo grado di penetrazione, bitume 50/70;
- Bitume modificato con l'elastomero Styrene-Butadiene-Styrene (SBS).

3.2 Strumentazione

Lo strumento impiegato durante la sperimentazione è il reometro rotazionale a taglio dinamico (*Dynamic Shear Rheometer*). In particolare lo strumento utilizzato, prodotto dall'azienda *Anton Paar*, è stato il MCR 302 (Figura 6).

Figura 6: Reometro Physica MCR 302

Il reometro rotazionale consente la misura delle proprietà reologiche dei leganti bituminosi e dunque la caratterizzazione dello stesso, mediante prove specifiche, in campo viscoelastico lineare (LVE) e non lineare (NLVE), in un determinato intervallo di frequenze e temperature.

Il campione è sottoposto, mediante l'applicazione di un momento torcente, a sollecitazioni di taglio e consente di eseguire le prove in regime continuo o oscillatorio, in controllo di tensione o in controllo di deformazione.

Il momento torcente viene applicato dalla parte superiore dello strumento, caratterizzata da un braccio meccanico mobile, al quale viene montata una delle parti del sistema di misura. Inoltre, nella parte superiore dello strumento

è presente una cappa che consente di creare un ambiente a temperatura uniforme in cui il campione è sottoposto alla prova.

La parte inferiore è fissa ed è costituita da un corpo metallico circolare che condiziona termicamente il campione e al centro del quale viene inserita la seconda parte del sistema di misura, la quale durante la prova combacia con la parte superiore.

Inoltre, lo strumento è collegato ad un criostato esterno, un sistema di circolazione dell'acqua che permette il raffreddamento dello strumento e ad un manometro la cui pressione misurata deve essere tra i 4-5 bar.

Il sistema di misura varia al variare del materiale e della temperatura a cui testare il campione, maggiore è la temperatura di prova, maggiore sarà il diametro dei piatti. La geometria dei piatti, maggiormente utilizzati, può essere piatto – piatto o piatto – cono.

Nello specifico, durante la presente sperimentazione, è stato utilizzato il sistema piatto – piatto, costituito da due piatti di diametro 8 mm disposti in modo parallelo (Figura 7).

Figura 7: Sistema di misura Piatto- Piatto da 8 mm

Il software *Rheoplus* consente da computer di definire i diversi *templates* di prova e l'impostazione del gap, distanza tra i due piatti, nel caso in esame pari a 2 mm, ovvero l'altezza del campione h, che lo strumento dovrà mantenere durante tutta la durata del test.

La geometria del provino è influenzata da sistema di misura, dunque, nota l'altezza h e il raggio R, il momento torcente M applicato genera una tensione tangenziale media τ, a cui corrisponde una deformazione massima γ. Tali grandezze possono essere determinate mediante le seguenti espressioni:

$$\tau = \frac{2M}{\pi R^3}$$

$$\gamma = \frac{\varphi R}{h}$$

Lo strumento è in grado di restituire i valori di tali parametri, dove φ è l'angolo di deflessione.

3.3 Preparazione dei campioni

La sperimentazione ha inizio con la formazione di travetti di bitume, ovvero, i due diversi materiali precedentemente riscaldati e resi omogenei vengono versati in dei casseri in silicone di forma rettangolare (Figura 8), posti in una cella frigorifera, prelevati dai casseri e posti in contenitori di alluminio, per poi essere nuovamente stoccati nella cella frigo.

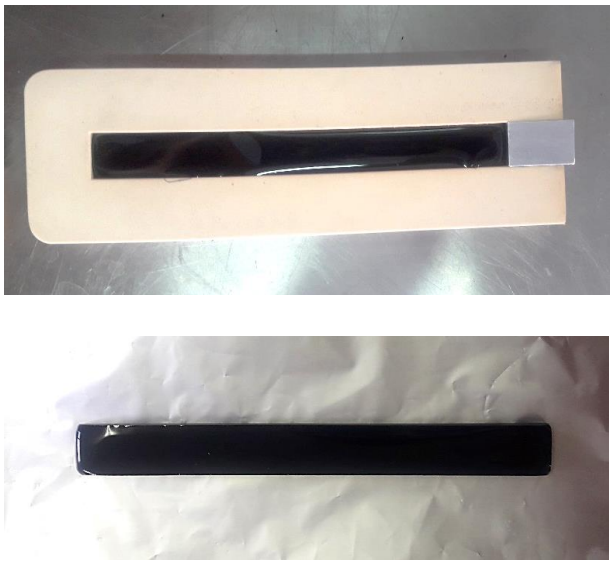

Figura 8: Preparazione travetti di bitume

La quantità di materiale che deve essere prelevata dal singolo travetto per ciascuna prova è pari a 0,230 g - 0,250 g. Il campione viene posizionato in uno stampo in silicone, precedentemente pulito, avente lo stesso diametro del piatto con cui viene eseguito il test, successivamente scaldato in forno per un tempo e ad una temperatura che varia in funzione del materiale:

- Bitume 50/70: temperatura forno 130° C per una durata di 5';
- Bitume modificato con SBS: temperatura forno 150° C per una durata di 10'.

Prelevato dal forno il campione permane a temperatura ambiente per 5', dopodiché viene inserito nella cella frigo per altri 5' (Figure 9-10 e 11).

Figura 9: Cassero in silicone e campione

Figura 10: Cassero e campione dopo il riscaldamento in forno

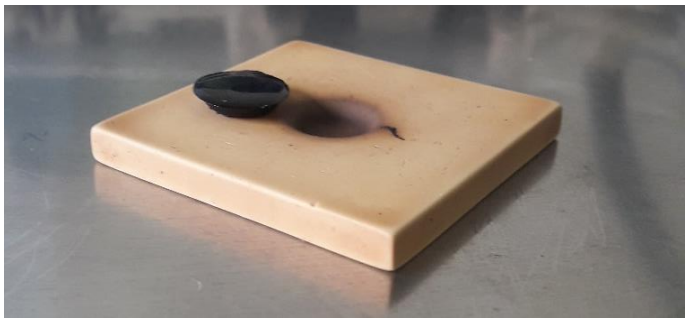

Figura 11: Campione dopo 5' nella cella frigo

Nel contempo, si prepara lo strumento, impostando il modello di prova, il *gap* e la temperatura a cui verrà eseguita la prova (Figura 12).

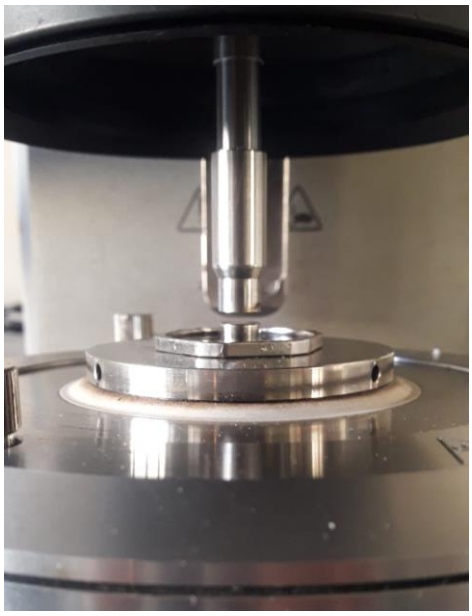

Figura 12: Gap tra piatto superiore e inferiore

Il braccio superiore dello strumento viene così abbassato, come anche la cappa, nella posizione di misura. La temperatura che consente il riscaldamento omogeneo dei due piatti varia al variare del materiale:

- Bitume 50/70: temperatura adesione 46° C;
- Bitume modificato con SBS: temperatura adesione 55° C.

Lo scopo di tale procedura è quello di creare una completa adesione tra il sistema di misura e il campione, evitando che avvenga la rottura di quest'ultimo durante la prova.

Una volta indurito, il campione viene estratto dallo stampo e posizionato sul piatto inferiore preriscaldato. Il braccio superiore dello strumento viene fatto abbassare raggiungendo un *gap* di 2,1 mm. A tal punto la quantità di bitume che eccede le dimensioni dei due piatti viene rimossa mediante rasatura con una paletta metallica rovente (Figura 13).

Infine, si abbassa la cappa, il gap viene automaticamente ridotto a 2 mm e si dà il via alla prova.

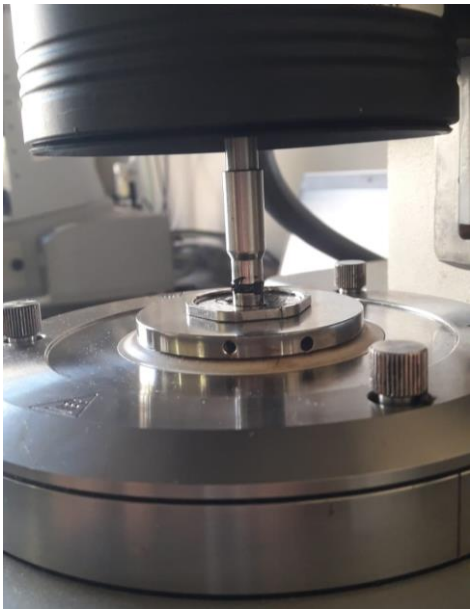

Figura 13: Campione dopo la rasatura con spatolina preriscaldata

3.4 Approccio metodologico

Le prove sperimentali svolte allo scopo di contraddistinguere l'effettiva capacità di autoriparazione dei leganti bituminosi sono state eseguite in regime oscillatorio e in controllo di deformazione.

Dapprima, al fine di studiare il comportamento del legante in condizioni di taglio oscillatorio di piccola e grande ampiezza, sono state svolte prove di

Frequency Sweep (FS) che consentono la caratterizzazione in campo viscoelastico lineare alle piccole deformazioni. Inoltre, dai test in scansione di frequenza sono state determinate le temperature di iso-rigidità utilizzate nelle prove di fatica e di autoriparazione. In seguito, sono state condotte prove di *Multiple Strain Sweep(MSS)* per comprendere il comportamento in campo viscoelastico. Dall'analisi dei dati ottenuti vengono determinati due fattori di spostamento che consentono la valutazione della norma del modulo complesso e l'angolo di fase non lineare.

Il comportamento del bitume al danneggiamento, e quindi la sua resistenza a fatica, è stata determinata attraverso prove di *Linear Amplitude Sweep (LAS).* I risultati ottenuti sono stati usati come riferimento nelle prove di autoriparazione, denominate *Linear Amplitude Sweep based Healing (LASH).*

Per evitare la sovrastima della capacità di autoriparazione del legante bituminoso, in concomitanza a prove di fatica e di autoriparazione, sono state eseguite prove di *Steric Hardening (LAS-SH),* quantificando l'effetto dell'indurimento sterico.

In ciascuna prova è prevista una fase di condizionamento, in cui il campione in 35 minuti raggiunge l'equilibrio con la temperatura a cui verrà eseguito il test specifico. Inoltre, per avere maggiore affidabilità dei risultati per ogni prova e per ciascun bitume sono state eseguite almeno due ripetizioni. Di seguito viene riportata la descrizione di ciascuna prova precedentemente menzionata.

3.4.1 Prove in scansione di frequenza

Tutti i leganti sono stati preliminarmente caratterizzati mediante test a scansione di frequenza e temperatura allo scopo di determinare la risposta del

materiale non danneggiato in campo viscoelastico lineare e determinare la temperatura di iso-rigidità da utilizzare nei successivi test.

I test a scansione di frequenza (FS) sono stati eseguiti tra 4 °C e 34 °C con incrementi di temperatura regolari pari a 6 °C, facendo variare la frequenza angolare tra 1 rad/s e 100 rad/s e la deformazione tra l'1 % e 0,01 % registrando 19 punti a ciascuna temperatura.

Vengono riportate di seguito le fasi dettagliate che costituiscono il test a scansione di frequenza:

1. Condizionamento del campione a T=34 °C, f=10 Hz e γ=0,01 % per 30 minuti;
2. Prove in scansione di frequenza, in cui la frequenza angolare varia da 1 rad/s a 100 rad/s a T=34 °C e γ=1 %;
3. Condizionamento a T= 28 °C, f=10 Hz e γ=0,01 % per 15 minuti;
4. Prove in scansione di frequenza, in cui la frequenza angolare varia da 1 rad/s a 100 rad/s a T=28 °C e γ=0,1 %;
5. Condizionamento a T= 22 °C, f=10 Hz e γ=0,01 % per 15 minuti;
6. Prove in scansione di frequenza, in cui la frequenza angolare varia da 1 rad/s a 100 rad/s a T=22 °C e γ=0,1 %;
7. Condizionamento a T= 16 °C, f=10 Hz e γ=0,01 % per 15 minuti;
8. Prove in scansione di frequenza, in cui la frequenza angolare varia da 1 rad/s a 100 rad/s a T=16 °C e γ=0,1 %;
9. Condizionamento a T= 10 °C, f=10 Hz e γ=0,01 % per 15 minuti;
10. Prove in scansione di frequenza, in cui la frequenza angolare varia da 1 rad/s a 100 rad/s a T=10 °C e γ=0,01 %;
11. Condizionamento a T= 4 °C, f=10 Hz e γ=0,01 % per 15 minuti;
12. Prove in scansione di frequenza, in cui la frequenza angolare varia da 1 rad/s a 100 rad/s a T=4 °C e γ=0,01 %;

3.4.2 Prove in scansione di deformazione

Le prove a scansione di deformazione (MSS) consentono di indagare le caratteristiche del legante in campo viscoelastico. L'obiettivo nell'eseguire tali prove è quello di poter separare gli effetti indotti dalla componente reversibile, quale la non linearità, da quelli imputabili alla componente irreversibile, ovvero al danneggiamento.

Tali test consentono dunque, di analizzare il comportamento in termini di modulo complesso |G*| al variare della deformazione, quest'ultima ottenuta applicando un'oscillazione crescente.

Ciascuna delle prove MSS è composta da almeno due gruppi e ognuno di questi è diviso in tre blocchi (Figura 14).

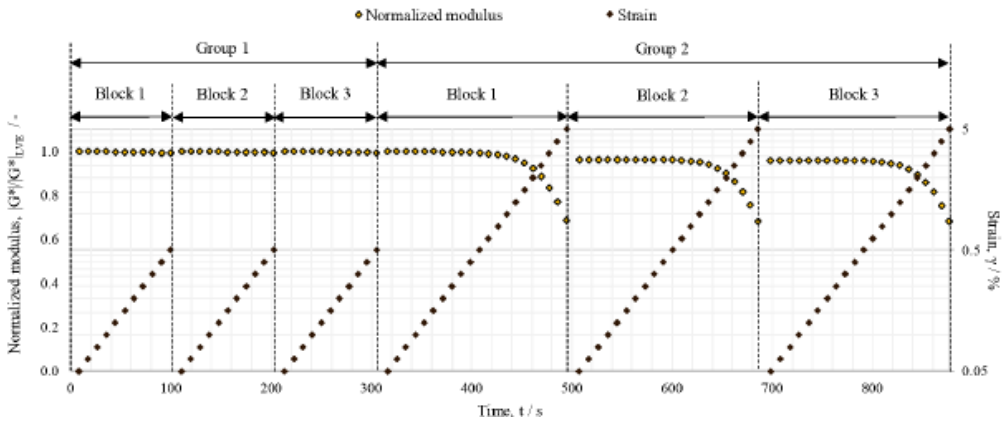

Figura 14: Rappresentazione schematica di prove MSS

Ciò che distingue un gruppo dal successivo è la deformazione ultima alla quale viene sollecitato il provino, mentre ciò che gli accomuna è il valore di deformazione che viene applicato all'inizio di ciascun gruppo. L'ampiezza di deformazione raggiunta al termine di ciascun gruppo viene incrementata passando al gruppo successivo.

In particolare, nel primo gruppo il valore limite di deformazione viene scelto affinché il comportamento del materiale possa essere ancora descritto in

campo viscoelastico lineare e dunque in modo che non si verifichi danneggiamento. Nei successivi gruppi viene incrementato il valore ultimo di deformazione al quale il provino è sottoposto, in modo da poter indagare gli effetti della non linearità e il danno. Quest'ultimo, in particolare, secondo l'ipotesi fondamentale alla base di tale procedura, si verifica solo nel primo blocco di ciascun gruppo, dal secondo gruppo in poi, ovvero quando viene superato per la prima volta un valore di deformazione mai raggiunto prima.

Nella presente sperimentazione, entrambi i materiali sono stati sottoposti a prove di MSS. Le temperature di prova sono diverse da quelle alle quali sono state condotte le prove in scansione di frequenza e il numero di gruppi varia in funzione della temperatura considerata.

In particolare, le prove sono state eseguite per il bitume 50/70 alla temperatura di equi-rigidità 9 °C, definita dall'analisi delle prove in scansione di frequenza. A tale temperatura sono stati definiti tre gruppi e ciascun gruppo suddiviso come segue (Figura 15):

- Gruppo1, costituito da tre blocchi in cui la deformazione viene fatta variare con andamento logaritmico da 0,07 % a 0,7 %;
- Gruppo 2, costituito da tre blocchi in cui la deformazione viene fatta variare con andamento logaritmico da 0,07 % a 7 %;
- Gruppo 3, costituito da tre blocchi in cui la deformazione viene fatta variare con andamento logaritmico da 0,07 % a 10 %.

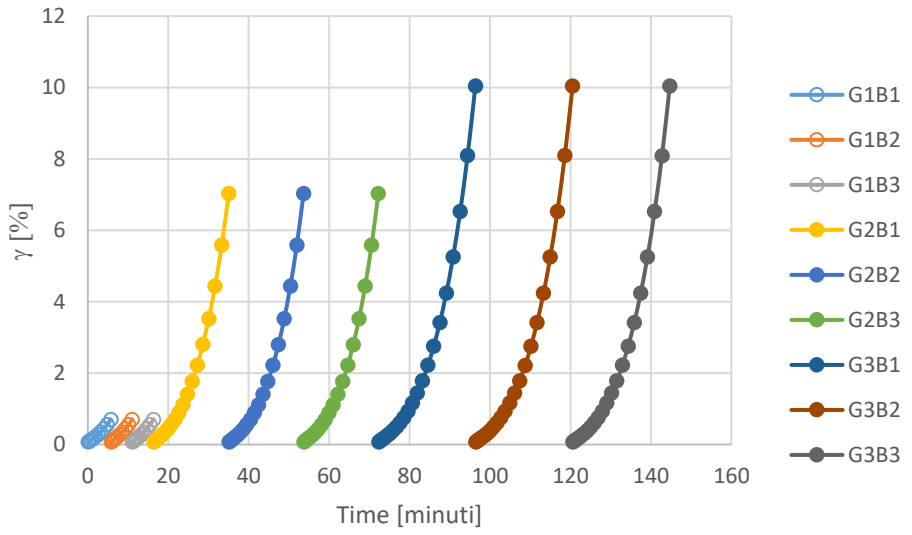

Figura 15: Intervalli di deformazione nei blocchi alla temperatura di 9 °C

Alle temperature di 15 °C, 20 °C e 25 °C sono stati usati due gruppi, definiti nel seguente modo:

- Gruppo1, costituito da tre blocchi in cui la deformazione viene fatta variare con andamento logaritmico da 0,01 % a 0,1 %;
- Gruppo 2, costituito da tre blocchi in cui la deformazione viene fatta variare con andamento logaritmico da 0,01 % a 10 %.

Per il bitume modificato con SBS, alla temperatura di equi-rigidità 14 °C e alle temperature di 20 °C e 25°C i gruppi sono suddivisi e caratterizzati come segue:

- Gruppo1, costituito da tre blocchi in cui la deformazione viene fatta variare con andamento logaritmico da 0,01 % a 0,1 %;
- Gruppo 2, costituito da tre blocchi in cui la deformazione viene fatta variare con andamento logaritmico da 0,01 % a 10 %.

Mentre, alla temperatura di 11 °C la suddivisone dei gruppi e la variazione delle deformazioni è la medesima eseguita per il bitume tradizionale alla temperatura di 9 °C.

Durante tali test la frequenza è costante e pari a 10 Hz.

Inoltre, i valori massimi di deformazione, raggiungibili nell'ultimo gruppo di ciascuna prova, sono stati scelti sulla base del valore di deformazione alla tensione di picco $\gamma_{at_\tau_peak}$ ottenuta nelle prove LAS.

3.4.3 Prove di fatica

La determinazione della vita a fatica dei leganti bituminosi avviene mediante prove denominate *Linear Amplitude Sweep* per le quali si fa riferimento alla normativa *AASTO TP 101*.

La prova LAS comprende (Figura 16) una fase preliminare in cui il campione viene condizionato alla temperatura di prova, seguita da una prova iniziale in scansione di frequenza (FS), in cui si ottiene l'impronta digitale della risposta del materiale non danneggiato *FringerPrint (FP)*. Infine, nell'ultimo stadio il provino viene sottoposto ad una prova di *Amplitude Sweep*, in cui si fa variare linearmente la deformazione in modo da indurre danni da fatica a velocità accelerata (LOAD).

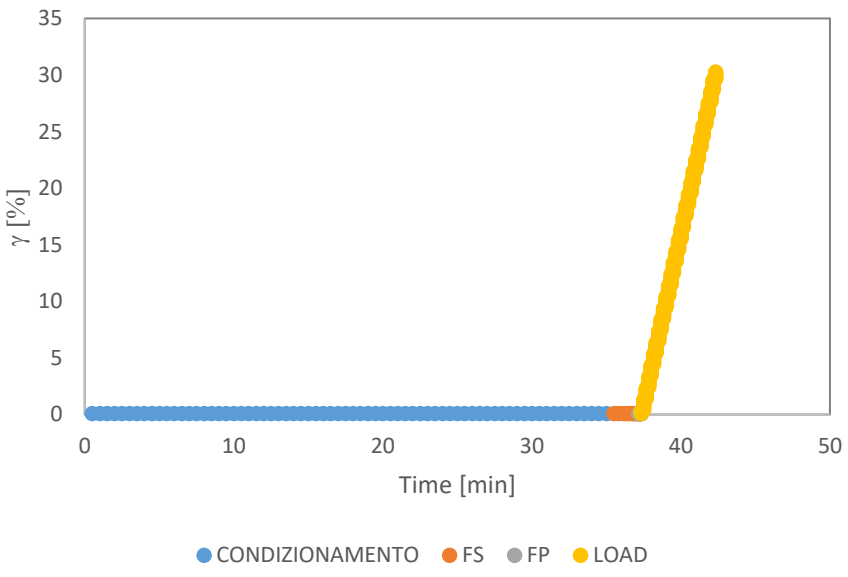

Figura 16: Grafico schematizzazione prova LAS

In particolare la procedura di prova si compone delle seguenti fasi:

1. Condizionamento del campione per 35 minuti alla temperatura di prova. Per entrambi i materiali analizzati 20 °C rappresenta una delle temperature scelte per eseguire la prova, essendo questa una tipica temperatura intermedia usata negli studi di fatica [14]. La stessa prova è stata poi, eseguita alle temperature di equi-rigidità, le quali consentono di confrontare la resistenza alla fatica di diversi leganti in condizioni di uguale rigidità. Tali temperature sono: 9 °C per il bitume 50/70 e 14 °C per il bitume modificato;
2. *Frequency Sweep* alla temperatura di prova, con ampiezza di deformazione γ=0.1%, in cui vengono registrati 12 punti:
   - Acquisizione di 5 punti alle frequenze di 0,2-0,4-0,6-0,8-1Hz;
   - Acquisizione di 5 punti alle frequenze di 2-4-6-8-10Hz;
   - Acquisizione di 2 punti alle frequenze di 20 e 30Hz;
3. *FingerPrint,* alla temperature di prova con ampiezza di deformazione γ=0.1% e frequenza di 10 Hz. La durata di tale fase è 10 secondi, in cui viene registrato un punto al secondo, ovvero 10 punti;
4. *Load,* condotta alla temperatura di prova, mantenendo costante la frequenza a 10 Hz e facendo variare la deformazione, con incrementi di 0,1 %, da 0,1 % a 30 % in 5 minuti, registrando un punto per ogni incremento.

Da normativa, dunque, si devono applicare al campione 3100 cicli di carico, 100 dei quali alla deformazione costante di 0,1 %, quindi quando vengono acquisiti 10 punti e 3000 cicli di carico quando la deformazione varia da 0,1 % a 30 %, ovvero quando vengono acquisiti 300 punti.

Da tali prove si determina il valore di deformazione alla tensione di picco $\gamma_{at_\tau_peak}$, il quale viene utilizzato nei successivi test atti ad indagare la capacità di autoriparazione dei bitumi.

3.4.4 Prove di autoriparazione

Il potenziale di autoriparazione dei leganti bituminosi viene valutato mediante delle prove basate sui test LAS e denominate *Linear Amplitude Sweep based Healing (LASH)*. Per poter eseguire tali prove è necessario definire dapprima il livello di danno, una volta definito il danno critico Sf, al quale introdurre il periodo di riposo e poi la durata di tale periodo di riposo [16].

Mediante tali prove il provino è sottoposto ad una prima fase di carico oscillatorio continuo in cui il campione viene pre-danneggiato, seguita da un periodo di riposo e in fine una seconda fase di carico in cui il provino viene portato a rottura.

A differenza della procedura standardizzata in cui vengono utilizzati dei livelli di danno pari al 25 %Sf, 50 %Sf, 75 %Sf e 125 %Sf, e dei periodi di riposo interposti tra le due fasi di carico paria a 60,300,900 e 1800 secondi, in questo lavoro di tesi, il livello di danno scelto è pari al valore di deformazione al picco di tensione $\gamma_{at_\tau_peak}$ ottenuto dalle prove LAS e il periodo di riposo pari a 1800 secondi, per entrambi i materiali analizzati. Inoltre, sono state eseguite delle prove LASH in assenza di periodo di riposo. Le temperature di prova sono le medesime utilizzate nelle prove LAS.

Vengono riportate di seguito le fasi della prova LASH:

1. Condizionamento del campione per 35 minuti alla temperatura di prova. Le temperature utilizzate per eseguire le prove sono: 20 °C, per entrambi i materiali, 9 °C per il bitume 50/70 e 14 °C per il bitume modificato;
2. *Frequency Sweep* alla temperatura di prova, con ampiezza di deformazione γ=0.1%, in cui vengono registrati 12 punti:
   - Acquisizione di 5 punti alle frequenze di 0,2-0,4-0,6-0,8-1Hz;

- Acquisizione di 5 punti alle frequenze di 2-4-6-8-10Hz;
- Acquisizione di 2 punti alle frequenze di 20 e 30Hz;

3. *FingerPrint,* alla temperature di prova con ampiezza di deformazione γ=0.1% e frequenza di 10 Hz. La durata di tale fase è 10 secondi, in cui viene registrato un punto al secondo, ovvero 10 punti;
4. *I Load,* condotta alla temperatura di prova, mantenendo costante la frequenza a 10 Hz e facendo variare la deformazione linearmente, con incrementi di 0,1 %, da 0,1 % al valore di $\gamma_{at_\tau_peak}$ % , registrando un punto per ogni incremento;
5. Periodo di riposo di 1800 secondi, condotto alla temperatura di prova ad un'ampiezza di deformazione costante γ=0.1% e frequenza di 10 Hz. Viene registrato un punto ogni 30 secondo, per un totale di 60 punti;
6. *II Load,* condotta alla temperatura di prova, mantenendo costante la frequenza a 10 Hz e facendo variare la deformazione linearmente, con incrementi di 0,1 %, da 0,1 % al 30 % , registrando un punto per ogni incremento, ovvero 300 punti.

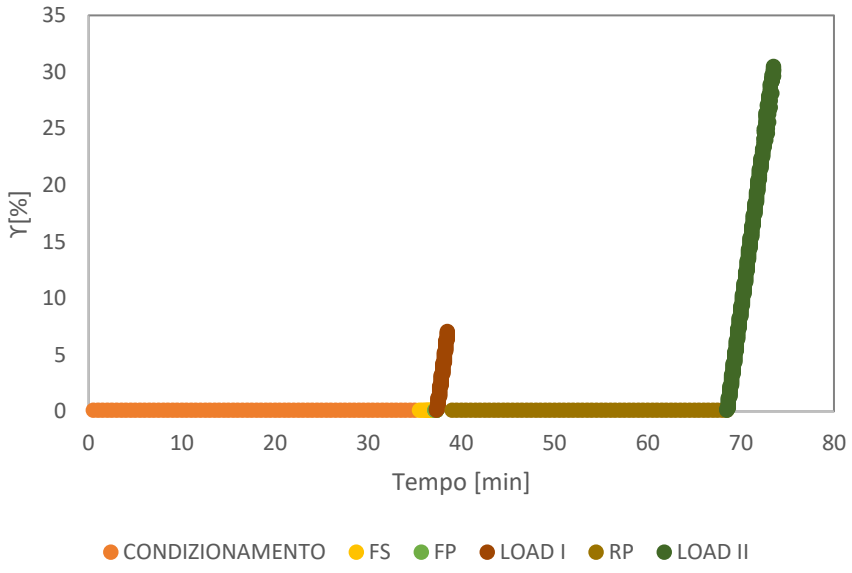

Figura 17: Grafico schematizzazione prova LASH

3.4.5 Prove di Indurimento sterico

Le prove *Linear Amplitude Sweep with Steric Hardening* (LAS-SH) consentono di determinare l'incremento di rigidità del legante, alla fine del periodo di riposo, dovuto al fenomeno reversibile dell'indurimento sterico [3]. Lo scopo di tali prove è, dunque, quello di sottrarre tale incremento al recupero complessivo di rigidità raggiunto nelle prove di autoguarigione, in tal modo è possibile considerare il solo incremento delle proprietà meccaniche dovuto alla capacità curativa del legante.

Nelle prove LAS-SH sussiste una sola fase di carico, preceduta dal periodo di riposo, per tale ragione tali prove sono condotte in assenza di pre-danneggiamento.

Le temperature di prova adottate durante i test sono uguali a quelle considerate nei test LAS e il periodo di riposo pari a 1800 secondi.

Le fasi che costituiscono la prova in esame sono:

1. Condizionamento del campione per 35 minuti alla temperatura di prova;
2. *Frequency Sweep* alla temperatura di prova, con ampiezza di deformazione γ=0.1%, in cui vengono registrati 12 punti:
   - Acquisizione di 5 punti alle frequenze di 0,2-0,4-0,6-0,8-1Hz;
   - Acquisizione di 5 punti alle frequenze di 2-4-6-8-10Hz;
   - Acquisizione di 2 punti alle frequenze di 20 e 30Hz;
3. Periodo di riposo di 1800 secondi, condotto alla temperatura di prova ad un'ampiezza di deformazione costante γ=0.1% e frequenza di 10 Hz. Viene registrato un punto ogni 30 secondo, per un totale di 60 punti;

4. *FingerPrint,* alla temperature di prova con ampiezza di deformazione γ=0.1% e frequenza di 10 Hz. La durata di tale fase è 10 secondi, in cui viene registrato un punto al secondo, ovvero 10 punti;
5. *I Load,* condotta alla temperatura di prova, mantenendo costante la frequenza a 10 Hz e facendo variare la deformazione linearmente, con incrementi di 0,1 %, da 0,1 % al 30 % , registrando un punto per ogni incremento, ovvero 300 punti.

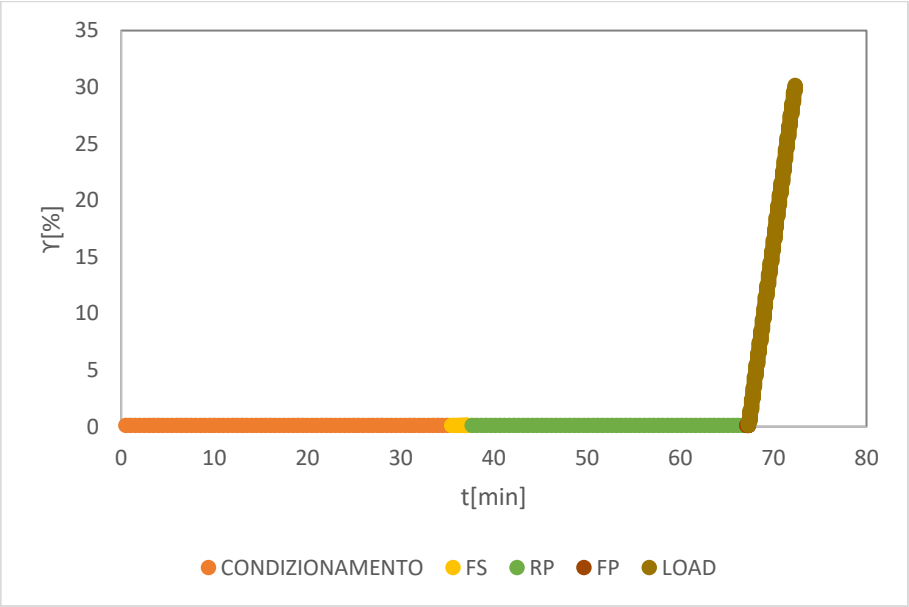

Figura 18:Grafico schematizzazione prova LAS-SH

Di seguito vengono riportate le Tabelle 1 e 2 che riassumono le prove effettuate su entrambi i materiali analizzati.

MATERIALE	PROVA	TEMPERATURA DI PROVA	γ e τ	TEMPO DI RIPOSO	RIPETIZIONI
BITUME 50/70 ITALIA-PETROLI	Frequency Sweep Test (FS)	4-6-10-16-22-28-34°C	-	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
					ripetizione 3
	Linear Amplitude Sweep (LAS) Resistenza a fatica	T=9°C	τpeak= 1,24 MPa γ_at_peak = 7 %	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
					ripetizione 3
		T=20°C	τpeak= 0,35 MPa γ_at_peak = 10 %	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
	Linear Amplitude Sweep based Healing (LASH)	T=9°C	τ_{peak}= 1,24 MPa γ_{at_peak} = 7 %	0 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
				30 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
					ripetizione 3
		T=20°C	τ_{peak}= 0,35 MPa γ_{at_peak} = 10 %	0 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
				30 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
					ripetizione 3
	Linear Amplitude Sweep with Steric Hardening (LAS-SH)	T=9°C	γ da 0,1 a 30 %	30 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
					ripetizione 3
		T=20°C		30 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
	Multiple Strain Sweep Test(MSS)	T=9°C	-	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
		T=15°C	-	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
		T=20°C	-	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
		T=25°C	-	-	ripetizione 1
					ripetizione 2

Tabella 1: Prove eseguite sul bitume 50/70

MATERIALE	PROVA	TEMPERATURA DI PROVA	γ e τ_peak	TEMPO DI RIPOSO	RIPETIZIONI
BITUME SBS	Frequency Sweep Test (FS)	4-6-10-16-22-28-34 °C	-	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
					ripetizione 3
	Linear Amplitude Sweep (LAS) Resistenza a fatica	T=14 °C	τpeak= 1,20 MPa γ_at_peak = 7 %	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
					ripetizione 3
		T=20 °C	τpeak= 0,7 MPa γ_at_peak = 10 %	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
					ripetizione 3
	Linear Amplitude Sweep based Healing (LASH)	T=14 °C	τ_{peak}= 1,20 MPa γ_{at_peak} = 7 %	0 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
				30 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
		T=20 °C	τ_{peak}= 0,7 MPa γ_{at_peak} = 10 %	0 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
				30 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
	Linear Amplitude Sweep with Steric Hardening (LAS-SH)	T=14 °C	γ da 0,1 a 30 %	30 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
		T=20 °C		30 min	ripetizione 1
					ripetizione 2
	Multiple Strain Sweep Test(MSS)	T=11 °C	-	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
		T=14 °C	-	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
		T=20 °C	-	-	ripetizione 1
					ripetizione 2
		T=25 °C	-	-	ripetizione 1
					ripetizione 2

Tabella 2: Prove eseguite sul bitume modificato con SBS

4 ANALISI DATI

Il presente capitolo è dedicato all'analisi e al confronto dei dati ottenuti dalle diverse prove sperimentali condotte. Nella prima parte vengono elaborati i dati ottenuti dalle prove in scansione di frequenza, introducendo dei fattori di spostamento e applicando dapprima il modello CAM e successivamente il modello di Maxwell Generalizzato e la discretizzazione in serie di Prony. In tal modo è stata analizzata la risposta dei bitumi in campo viscoelastico lineare. In seguito, per isolare la componente non lineare da altri meccanismi imputabili al danneggiamento, si è svolta l'elaborazione delle prove a scansione di deformazione e mediante opportune procedure di analisi, sono stati definite le curve maestre non lineari e valutati dei fattori di spostamento non lineari, con i quali è stato possibile riportare la risposta non lineare a quella lineare. Successivamente, con l'elaborazione delle prove LAS, LASH e LAS-SH è stato possibile determinare la resistenza a fatica e la capacità di autoriparazione dei leganti, in quest'ultimo caso andando a scomputare l'effetto dell'indurimento sterico. Inoltre, il capitolo comprende una panoramica sul modello S-VECD, con le successive analisi e l'applicazione nel modello del principio di sovrapposizione tempo-temperatura e la valutazione degli indici di autoriparazione, ottenuti in campo viscoelastico lineare. Infine, sono stati investigati gli effetti della non linearità nella perdita d'integrità del materiale, dunque nel modello S-VECD.

4.1 Caratterizzazione viscoelastica lineare

Al fine di determinare le proprietà viscoelastiche lineari, i leganti bituminosi selezionati sono stati sottoposti a prove in scansione di frequenza, denominate *Frequency Sweep* (FS). Dai dati misurati si sono ottenute delle curve alle temperature comprese tra i 4 °C e i 34 °C, con incrementi di 6 °C, definite in una finestra di frequenze compresa tra 1 rad/s e 100 rad/sec. Tali

curve sono state poi ridotte ad un'unica curva alla temperatura di riferimento T_0 mediante il principio di sovrapposizione tempo-temperatura, basato sulla funzione di *William-Landel–Ferry* (WLF), Formula (3) del capitolo 2, ovvero sulla valutazione dei fattori di spostamento orizzontali a_T, i quali dipendono dalle caratteristiche dei materiali mediante i parametri C_1 e C_2 .

Tale principio si concretizza nella determinazione della curva maestra, in cui il modulo complesso |G*| viene espresso in funzione della frequenza ridotta f_R, in un piano bi-logaritmico.

La curva maestra è definita attraverso il modulo vetroso G_g,la frequenza di crossover ω_c, l'indice reologico R *e* il parametro di modello m. La stima di tali parametri, assieme ai valori di C_1 e C_2, avviene mediante un processo di ottimizzazione tra i dati misurati e quelli modellati con il modello *Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM),* utilizzando le Formule (10) e (11) del capitolo 2, con le quali viene valutato il modulo complesso |G*| e l'angolo di fase δ in funzione della frequenza ridotta.

Vengono riportati di seguito i risultati ottenuti. In particolare, nella Tabella 3 si riportano i parametri delle curve maestre, ottenuti dal processo di ottimizzazione, considerando due temperature di riferimento per entrambi i materiali. La prima temperatura è 20 °C, uguale per entrambi i bitumi, essendo questa una tipica temperatura intermedia utilizzata nelle analisi dei bitumi. La seconda è invece la temperatura di equi-rigidità, attraverso la quale è possibile confrontare la resistenza a fatica di diversi leganti in condizioni di uguale rigidità. Tale temperatura è definita come la temperatura corrispondente ad un valore iniziale della norma del modulo complesso pari a 34 MPa ad una frequenza di 10 Hz. Pertanto, per il bitume 50/70 la temperatura di equi-rigidità è 9 °C, mentre per il bitume modificato è 14 °C.

	Bitume 50/70	Bitume 50/70	Bitume con SBS	Bitume con SBS
T_0	20 °C	9 °C	20 °C	14 °C
C_1	18,57	20,05	18,68	19,41
C_2	149,35	138,35	145,93	139,32
log(Gg)	2,931	2,931	2,844	2,849
log(wc)	2,055	0,579	1,598	0,763
R	1,825	1,825	1,670	1,681
m	1,105	1,105	1,023	1,029

Tabella 3: Parametri delle curve maestre alle diverse temperature di riferimento

Al fine di un confronto, tra i due materiali, applicando i parametri ottenenti alle temperature di riferimento $T_0 = 20\ °C$ è possibile definire i grafici delle curve maestre in termini di modulo al variare della frequenza ridotta (Figura 19) e dell'angolo di fase in funzione della frequenza ridotta (Figura 20).

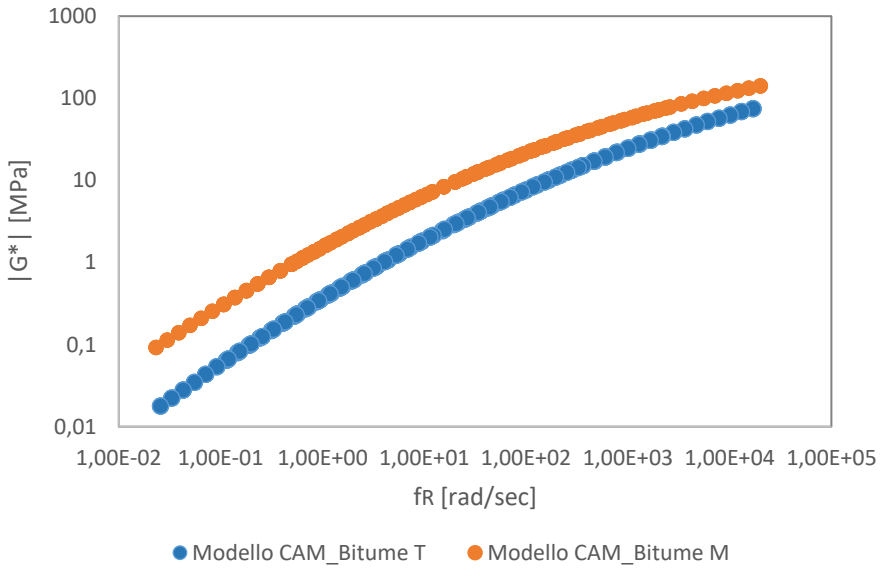

Figura 19: Curva maestra in termini di modulo complesso dei due bitumi analizzati

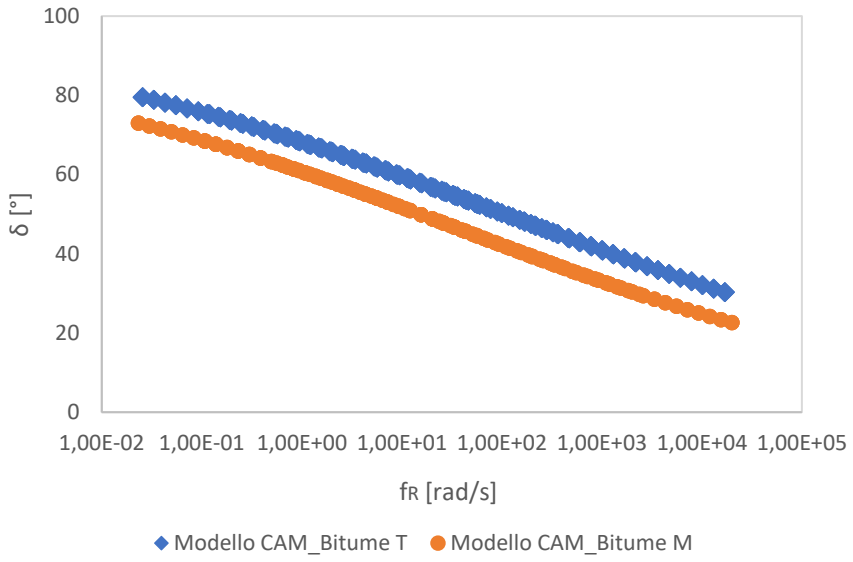

Figura 20: Curva maestra in termini di angolo di fase dei due bitumi analizzati

Considerando la prima rappresentazione (Figura 19) delle curve maestre in termini di modulo complesso |G*|, si nota che, a parità di frequenza ridotta, il bitume modificato con SBS, indicato con M, presenta moduli complessi maggiori rispetto al bitume 50/70, indicato con T. Tale differenza risulta maggiore alle basse frequenze e dunque alle alte temperature.

Considerando la seconda rappresentazione delle curve maestre (Figura 20) in termini di angolo di fase, si nota che, a parità di frequenza ridotta, il legante M presenta dei valori di angolo di fase δ minori, indice di un comportamento più elastico di tale materiale rispetto al bitume T.

I risultati ottenuti dall'analisi delle curve maestre rappresentano una base per successive analisi, assieme ai valori dei moduli complessi in campo viscoelastico lineare $|G^*|_{LVE}$, valutati alla frequenza di 10 Hz e alle quattro temperature di riferimento T_0 (Tabelle 4 e 5).

Bitume T					
T	f	f	$\log(a_T)$	f_R	$\lvert G^* \rvert_{LVE}$
[°C]	[Hz]	[rad/s]	[-]	[rad/s]	[MPa]
20	10	62,8	1	62,83	5,9

Bitume T					
T	f	f	$\log(a_T)$	f_R	$\lvert G^* \rvert_{LVE}$
[°C]	[Hz]	[rad/s]	[-]	[rad/s]	[MPa]
9	10	62,8	1	62,83	32,4

Tabella 4: Modulo complesso in campo viscoelastico lineare – Bitume T

Bitume M					
T	f	f	log(aT)	fR	|G*|LVE
[°C]	[Hz]	[rad/s]	[-]	[rad/s]	[MPa]
20	10	62,8	1	62,83	17,27

Bitume M					
T	f	f	log(aT)	fR	|G*|LVE
[°C]	[Hz]	[rad/s]	[-]	[rad/s]	[MPa]
14	10	62,8	1	62,83	39,430

Tabella 5: Modulo complesso in campo viscoelastico lineare – Bitume M

Dalle tabelle, si nota quanto esposto dall'osservazione delle curve mastre, ovvero che il bitume modificato è più rigido del bitume tradizionale alla T=20 °C, mentre alle temperature di equi-rigidità la differenza nel modulo complesso è influenzata dall' approssimazione con la quale è stata determinata la temperatura stessa.

Per descrivere la risposta viscoelastica lineare dei due materiali, i parametri in Tabella 3 sono stati utilizzati in prima battuta per ottenere, attraverso il modello di Maxwell generalizzato e lo sviluppo in serie di *Prony*, il modulo di rilassamento. In questo modo, tramite la serie numerica, si riduce la complessità analitica e si facilita il passaggio dal dominio delle frequenze a quello del tempo.

Per determinare le serie di Prony è necessario valutare i coefficienti di Prony, mediante l'utilizzo del *Collocation Method*. Pertanto, cercando di coprire 32 decadi temporali, sono stati scelti dei valori arbitrari del tempo di rilassamento ρ_i e le frequenze ω_i sono state assunte uguali a tali valori di tempo. A tal punto, utilizzando come dati di ingresso i parametri ottenuti dal modello CAM alla temperatura di riferimento, si sono calcolate le frequenze ridotte, lo *storage modulus*, la matrice di Kernel e dunque i termini di *Prony*, attraverso le Formule (14) e (15) proposte nel capitolo 2.

Vengo di seguito riportati in Tabella 6 e 7 i risultati relativi ai termini di Prony per i due materiali analizzati.

Bitume Tradizionale T					
i	ρi	Gi	i	ρi	Gi
[-]	[s]	[Mpa]	[-]	[s]	[Mpa]
1	2,00E-08	6,62E+01	17	2,00E+00	5,70E-02
2	6,00E-08	6,07E+01	18	6,00E+00	1,83E-02
3	2,00E-07	5,19E+01	19	2,00E+01	5,54E-03
4	6,00E-07	5,92E+01	20	6,00E+01	1,44E-03
5	2,00E-06	4,60E+01	21	2,00E+02	3,74E-04
6	6,00E-06	4,64E+01	22	6,00E+02	6,85E-05
7	2,00E-05	3,34E+01	23	2,00E+03	1,58E-05
8	6,00E-05	2,87E+01	24	6,00E+03	-4,01E-06
9	2,00E-04	1,86E+01	25	2,00E+04	1,19E-07
10	6,00E-04	1,33E+01	26	6,00E+04	-7,61E-09
11	2,00E-03	7,50E+00	27	2,00E+05	8,19E-10
12	6,00E-03	4,42E+00	28	6,00E+05	-1,27E-10
13	2,00E-02	2,13E+00	29	2,00E+06	1,66E-11
14	6,00E-02	1,02E+00	30	6,00E+06	-2,62E-12
15	2,00E-01	4,16E-01	31	2,00E+07	3,35E-13
16	6,00E-01	1,63E-01	32	6,00E+07	-4,27E-14

Tabella 6: Termini di Prony - Bitume T

Bitume modificato M					
i	ρi	Gi	i	ρi	Gi
[-]	[s]	[Mpa]	[-]	[s]	[Mpa]
1	2,00E-08	4,57E+01	17	2,00E+00	3,26E-01
2	6,00E-08	4,85E+01	18	6,00E+00	1,26E-01
3	2,00E-07	4,24E+01	19	2,00E+01	4,43E-02
4	6,00E-07	5,59E+01	20	6,00E+01	1,47E-02
5	2,00E-06	4,60E+01	21	2,00E+02	4,67E-03
6	6,00E-06	5,41E+01	22	6,00E+02	1,36E-03
7	2,00E-05	4,25E+01	23	2,00E+03	4,02E-04
8	6,00E-05	4,32E+01	24	6,00E+03	1,05E-04
9	2,00E-04	3,12E+01	25	2,00E+04	2,91E-05
10	6,00E-04	2,67E+01	26	6,00E+04	6,85E-06
11	2,00E-03	1,70E+01	27	2,00E+05	1,77E-06
12	6,00E-03	1,20E+01	28	6,00E+05	3,60E-07
13	2,00E-02	6,58E+00	29	2,00E+06	8,10E-08
14	6,00E-02	3,75E+00	30	6,00E+06	1,21E-08
15	2,00E-01	1,75E+00	31	2,00E+07	-1,30E-10
16	6,00E-01	8,13E-01	32	6,00E+07	-6,45E-10

Tabella 7: Termini di Prony - Bitume M

Una volta noti i termini di *Prony* è possibile calcolare il modulo complesso $|G_{LVE}{}^{*}|$ e l'angolodi fase δ_{LVE} nel dominio delle frequenze attraverso le Formule (18) e (19) riportate nel capitolo 2.

Tali valori vengono successivamente confrontati con i valori ottenuti applicando il modello CAM, ovvero modellando i dati sperimentali delle prove in scansione di frequenza.

Vengono dunque riportati i grafici di confronto, tra il modello CAM e il modello di Maxwell generalizzato, in termini della norma del modulo complesso e dell'angolo di fase, per entrambi i materiali (Figure 21-22).

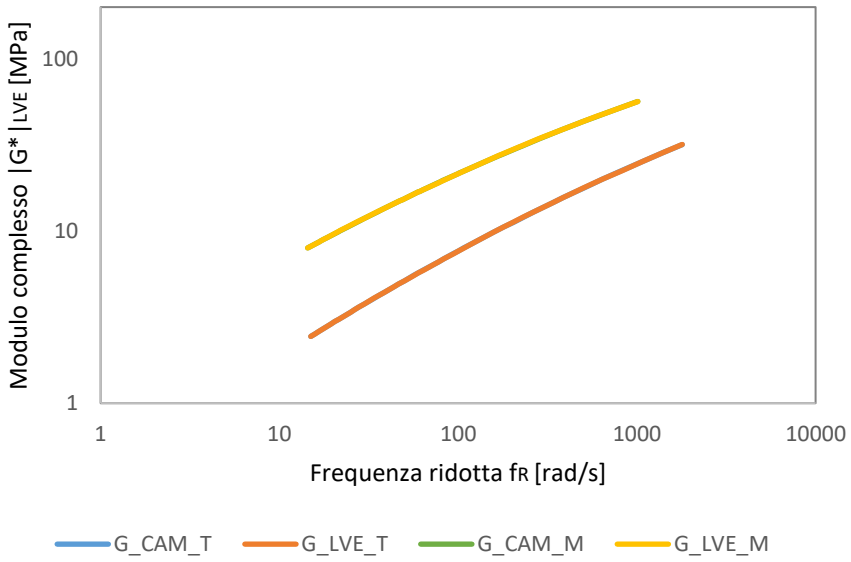

Figura 21: Curve maestre in termini di modulo complesso: confronto tra CAM e Modello di Maxwell

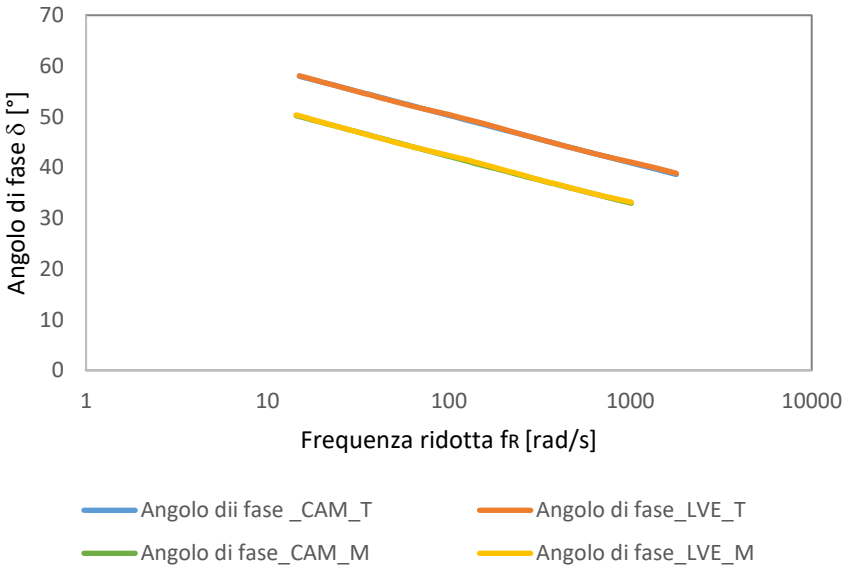

Figura 22: Curve maestre in termini di angolo di fase: confronto tra CAM e Modello di Maxwell

Dal confronto si denota che i dati ottenuti dai due modelli in termini di norma del modulo complesso e dell'angolo di fase per il medesimo materiale si sovrappongono. Inoltre, dal confronto tra i due materiali si evince quanto già espresso nel confronto delle curve maestre nel modello CAM. Infatti, a parità di frequenza ridotta, il bitume M presenta moduli complessi maggiori rispetto al bitume T (Figura 21) mentre, in termini di angolo di fase, a parità di

frequenza ridotta, il legante M presenta dei valori di δ minori rispetto al bitume T, e dunque ha un comportamento più elastico (Figura 22).

4.2 Caratterizzazione non lineare

L'analisi delle proprietà viscoelastiche dei leganti bituminosi viene estesa oltre il limite viscoelastico lineare, in modo da poter comprendere la risposta di tali materiali nel momento in cui sono sottoposti a grandi livelli deformativi. In tali condizioni, la risposta viscoelastica del bitume viene influenzata dagli effetti prodotti dalla non linearità e da altri fenomeni come il danno.

L'approccio utilizzato nella presente sperimentazione, per valutare la viscoelasticità non-lineare si basa sull'esecuzione di prove a deformazione incrementale (MSS), con le quali è possibile definire dapprima la risposta viscoelastica e successivamente, dai risultati ottenuti, ricavare mediante opportuni metodi di analisi dei fattori di spostamento non lineari, dipendenti dalla deformazione.

Le prove MSS sono caratterizzate da una serie di gruppi e blocchi, nello specifico, alle temperature di 25 °C, 20 °C, 15 °C (per il bitume tal quale) e 14 °C (temperatura di equi-rigidità per il bitume modificato) si è scelto di analizzare due gruppi, ciascuno composto da tre blocchi. Nel primo gruppo la deformazione è stata fatta variare da $\gamma_{inf} = 0{,}1\ \%$ a $\gamma_{sup} = 1\%$, scegliendo tale limite superiore in modo da rimanere all'interno della frontiera viscoelastica lineare. Nel secondo gruppo, il valore inferiore di deformazione è stato posto paria a $\gamma_{inf} = 0{,}1\ \%$, mentre il limite superiore uguale al valore di deformazione alla tensione di picco raggiunta nelle prove di fatica alla temperatura di 20 °C ovvero, $\gamma_{sup} = 10\%$. Sono state svolte due ripetizioni per ciascun materiale, per ciascuna temperatura e in tutti e quattro i casi i campioni hanno raggiunto la deformazione del 10 % senza rompersi.

Nelle prove di MSS eseguite alle temperature di 9 °C (temperatura di equi-rigidità per il bitume tradizionale) e 10 °C (per il bitume modificato) sono stati definiti tre gruppi e ciascun gruppo suddiviso in tre blocchi. Nel primo gruppo la deformazione è stata fatta variare da 0,07 % a 0,7 %, in modo da rientrare nel LVE. Nel secondo gruppo da 0,07 % al 7 %, mentre nel terzo gruppo la deformazione è stata fatta variare da 0,07 % al valore massimo di deformazione raggiunto dai due materiali nelle prove di fatica, ovvero pari a al 10 %. In questo caso, i campioni di bitume tradizionale hanno raggiunto la massima deformazione senza manifestare una rottura, mentre i campioni di bitume modificato hanno mostrato una rottura ad ampiezze di deformazione inferiori al 7 %. Per tale ragione, per il bitume modificato, si è deciso di eseguire ulteriori prove mantenendo gli stessi intervalli di deformazione ma, impostando la temperatura ad 11 °C. In tali condizioni di prova la rottura si è verificata solo dopo il completamento del secondo gruppo, una volta raggiunto il valore di deformazione pari al 7 %.

Riportando in un grafico i dati misurati del modulo complesso in funzione della deformazione, in tutte le prove si osserva che:

- I valori del modulo complesso, in tutti i blocchi appartenenti al gruppo 1, presentano lo stesso andamento fino al valore di deformazione limite, che delinea il campo viscoelastico lineare LVE. Inoltre, sono presenti delle piccole fluttuazioni iniziali a causa del rumore strumentale.
- Nel primo blocco del secondo gruppo, indicato per semplicità B1G2, i valori del modulo seguono lo stesso andamento e all'incirca gli stessi valori del gruppo 1, fino al LVE. Superata la frontiera viscoelastica lineare si assiste ad una riduzione del modulo fino al raggiungimento della deformazione limite preposta per quel gruppo. Tale riduzione del modulo è in parte dovuta al

danneggiamento subito dal campione e in parte al fenomeno reversibile della non linearità. Nel B2G2, il modulo iniziale risulta nettamente inferiore a quello del precedente blocco, ecco che viene verificata l'ipotesi fondamentale su cui si basano tali prove: il danneggiamento si verifica sempre nel primo blocco di ciascun gruppo, una volta superato un valore di deformazione mai raggiunto prima. Infatti, la curva del B3G2 segue lo stesso andamento della precedente, con un valore iniziale del modulo prossimo a quello del B2G2.

- Si assiste al medesimo comportamento anche per le curve del gruppo 3.

Vengono di seguito riportati, nelle Figure 23 e 24, due esempi dell'andamento del modulo complesso in funzione della deformazione, ottenuti dalla prova di MSS eseguita su di un campione di bitume tradizionale alla temperatura di 9 °C e su un campione di bitume modificato alla temperatura di 14 °C.

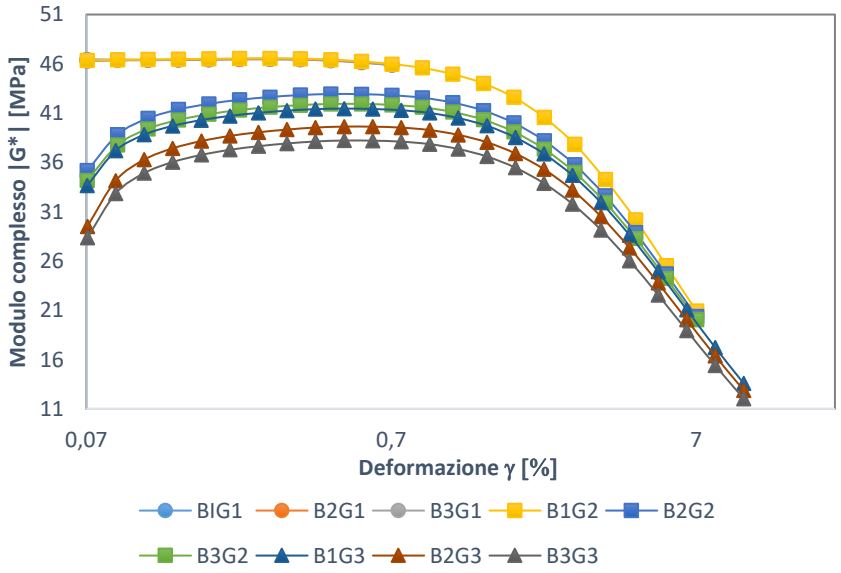

Figura 23: Dati sperimentali ottenuti da prove di MSS alla temperatura di 9 °C per il bitume T

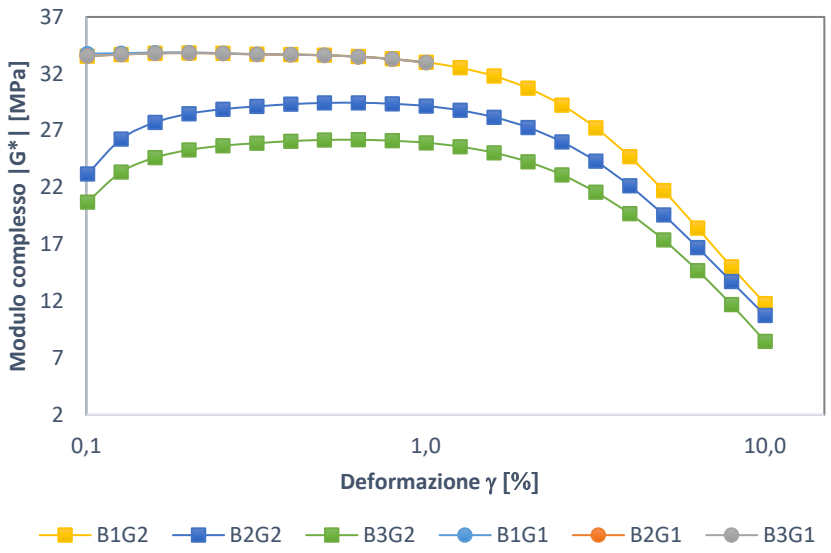

Figura 24: Dati sperimentali ottenuti da prove di MSS alla temperatura di 14 °C per il bitume M

Noti i dati sperimentali, l'analisi è stata condotta considerando il primo gruppo e il gruppo in cui si è raggiunta la massima ampiezza di deformazione. Considerando i precedenti esempi, alla temperatura di 9 °C l'analisi è stata condotta tra il primo gruppo e il terzo, mentre a 14 °C tra il primo e il secondo gruppo.

L'elaborazione dei dati sperimentali ha inizio andando ad individuare il limite viscoelastico lineare LVE, ovvero il valore di deformazione alla quale il modulo complesso |G*| presenta una riduzione del 5% rispetto al valore del modulo iniziale in campo viscoelastico lineare. Considerando 4/5 valori del modulo complesso appartenenti al B1G2, per i quali l'andamento risulta pressoché rettilineo, si esegue la media. Individuato l'intervallo di valori in cui ricade tale media, sempre nel primo blocco, attraverso un'interpolazione, si determina il valore di deformazione che rappresenta la frontiera viscoelastica lineare.

Successivamente, si esegue una media tra i valori delle deformazioni del B2G2 e il B3G2. Negli stessi blocchi si individuano i valori dei moduli altre i quali questo inizia a decrescere e se ne fa una media, individuandone la

deformazione corrispondente prima mediata. Dunque, il modulo rimane costante e pari al valore mediato dalla deformazione $\gamma_{\text{inf_}mediata}$ fino alla deformazione individuata. Superato tale livello deformativo, si fa la media dei moduli complessi tra il B2G2 e il B3G2. Ciò che si ottiene è la curva mediata dopo che il campione ha subito il danneggiamento. Tale operazione viene effettuata in quanto, analizzando la curva del B3G2, la riduzione del modulo rispetto alla curva del B2G2 è minima, ovvero l'ammontare del danno rimane all'incirca costante per uno specifico livello di deformazione, pertanto è possibile trascurare i danni che si verificano dopo il primo blocco del gruppo 2(quando i gruppi sono due). La differenza in modulo tra le curve appartenenti al primo gruppo e le curve appartenenti al secondo rappresenta il danno D. Pertanto, per poter attribuire la riduzione del modulo ai soli effetti non lineari, la curva media viene traslata rigidamente verso l'alto della quantità D.

Viene eseguita la normalizzazione della curva traslata rispetto al valore del modulo complesso viscoelastico lineare del campione, ottenendo in tal modo dei valori uguali ad uno nel LVE e minori dell'unità una volta superato tale limite.

Infine, questi valori sono stati moltiplicati per il modulo complesso $|G^*|_{LVE,}$ valutato utilizzando i parametri ottenuti dal CAM, alle temperature delle prove MSS, in modo tale da avere dei valori di modulo complesso confrontabili tra loro, facendo quindi riferimento al materiale e non più al singolo campione. Tale procedura di analisi è stata applicata ad entrambi i materiali analizzati ad ogni temperatura.

Vengono riportate di seguito le curve ottenute dall'elaborazione dei dati sperimentali, per gli stessi esempi precedentemente riportati.

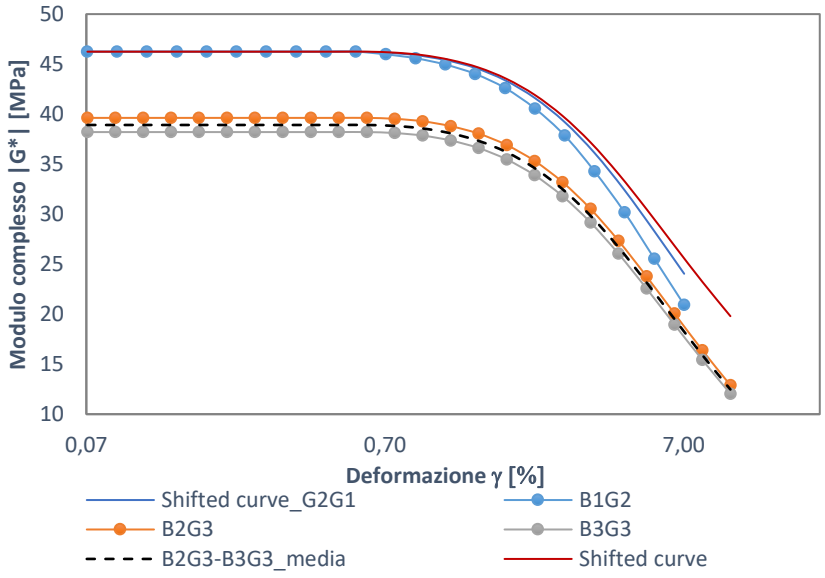

Figura 25: Curva traslata alla temperatura di 9 °C per il bitume T

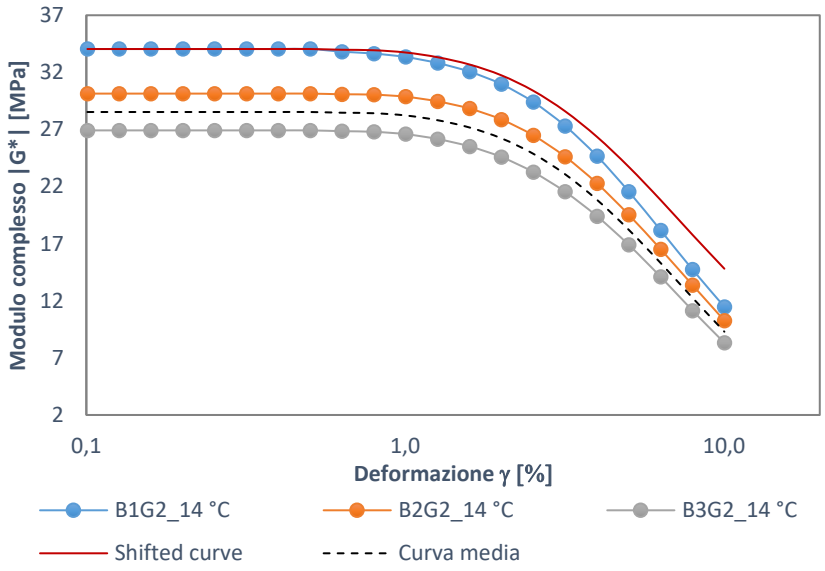

Figura 26:Curva traslata alla temperatura di 14 °C per il bitume M

I valori normalizzati del modulo complesso sono stati in seguito riportati in un grafico in funzione della deformazione e per ogni temperatura (Figure 25-24). In tali grafici viene, inoltre, riportata la retta orizzontale corrispondente al 95% del modulo normalizzato viscoelastico lineare, mediante la quale si

può individuare graficamente il valore di deformazione che identifica il LVE, per le diverse temperature. La riduzione del modulo normalizzato, superato tale limite, è dovuta agli effetti reversibili della non-linearità, pertanto rappresenta il rapporto tra $|G^*|_{NL}/|G^*|_{LVE}$.

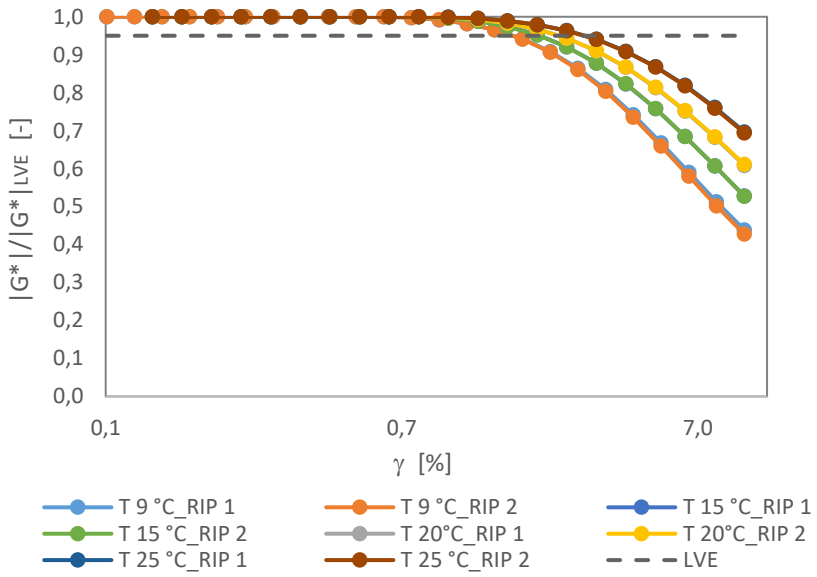

Figura 27: Bitume T- Norma del modulo complesso in funzione della deformazione

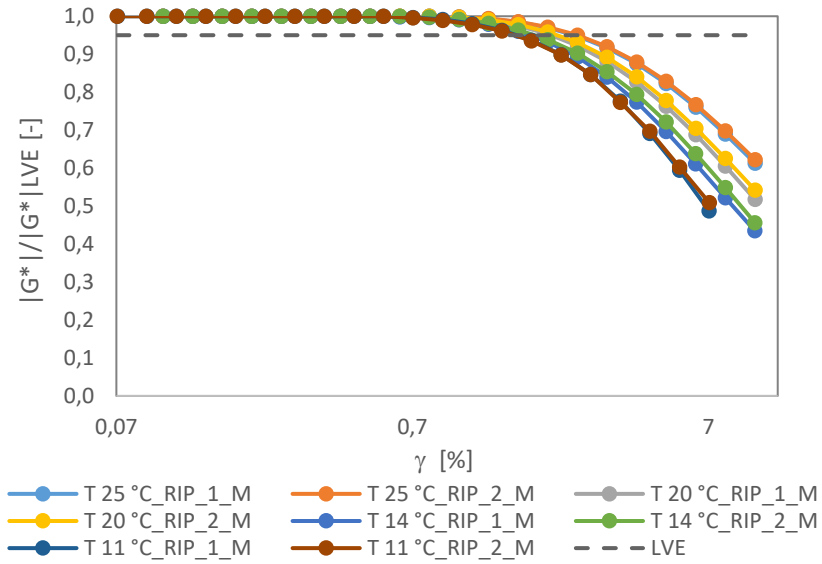

Figura 28: Bitume M - Norma del modulo complesso in funzione della deformazione

Come si può notare della Figura 28, alla temperatura di 11 °C per il bitume M non è stato possibile raggiungere la massima ampiezza di deformazione investigata, come invece lo è stato a tutte le altre temperature e per entrambi i materiali (Figura 27-28). Questo perché, a tale temperatura il valore del modulo risulta molto elevato e l'applicazione di un livello di deformazione pari al 7% porta il campione alla rottura, prima che si possa raggiungere il massimo livello deformativo.

Basandosi sul presupposto che i fattori di spostamento tempo-temperatura siano indipendenti dal livello di deformazione è possibile definire le curve maestre del modulo complesso non lineare $|G^*|_{NL}$ a determinati livelli deformativi.

In particolar modo, sono stati scelti 12 valori di deformazione, il primo all'interno del LVE e i successivi una volta superato tale limite. Per ciascuno di tali livelli sono stati individuati i valori del modulo complesso $|G^*|_{NL}(T, f, \gamma)$, per le due ripetizioni, alle diverse temperature. Utilizzando i parametri ottenuti dai modelli CAM dei due materiale, per ciascun livello deformativo si è mantenuto costante il modulo vetroso G_g , mentre utilizzando il risolutore di Excel, si sono fatti variare la frequenza di crossover ω_c , l'indice reologico R e il parametro m, in modo da minimizzare la sommatoria dei quadrati delle differenze tra i valori della norma del modulo determinati con i parametri CAM e quelli sperimentali. Ripetendo tale processo a ciascun livello deformativo, i parametri così ottenuti, sono stati utilizzati per determinare il modulo complesso $|G^*|_{NL}$ fittizio in funzione della frequenza ridotta, quest'ultime selezionate in modo da individuare una finestra di frequenze, attua a definire in modo opportuno le condizioni testate.

Vengono riportate di seguito (Figure 29 - 30) le curve maestre non lineari, per soli tre livelli deformati, per motivi di chiarezza grafica, in modo da

facilitare la comprensione del comportamento dei leganti all'aumentare del livello deformativo e dunque per effetto della non linearità.

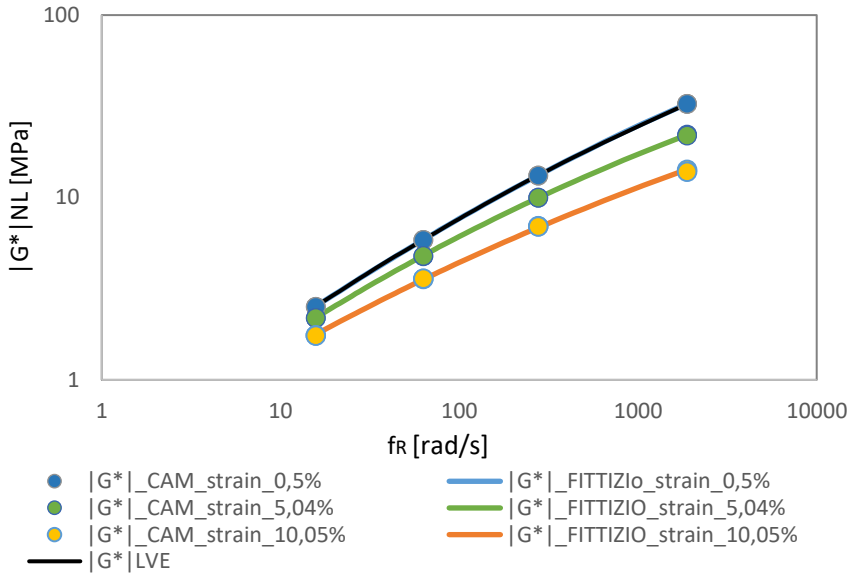

Figura 29: Curve maestre NL - Bitume T

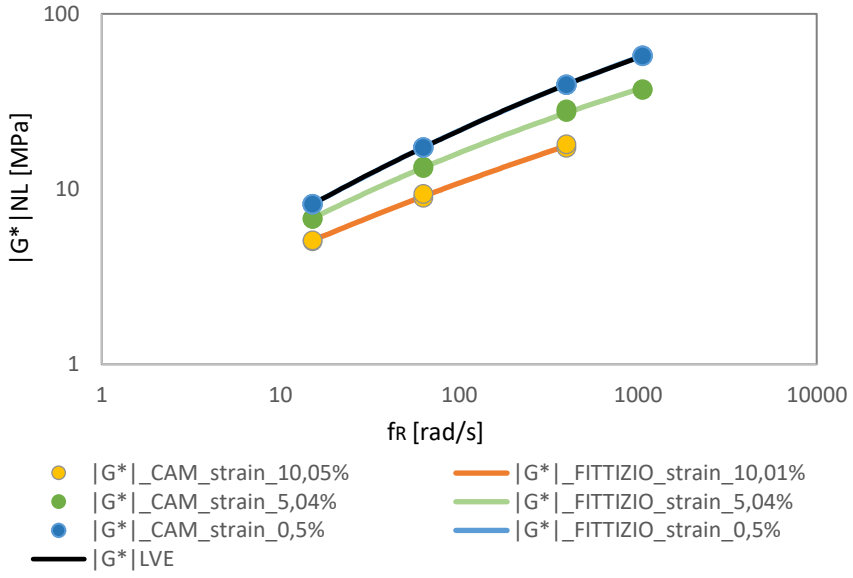

Figura 30: Curve maestre NL - Bitume M

Nelle due Figure 29 e 30 si nota come le curve relative al modulo complesso non lineare ricadano al di sotto della curva maestra definita in campo viscoelastico lineare. Inoltre, in Figura 30 si può constatare che per il bitume

modificato non è stato possibile rappresentare il modulo complesso per l'ultima deformazione analizzata.

Successivamente, si è eseguito un processo di ottimizzazione tra i valori del modulo complesso $|G^*{}_{LVE}|$ valutati mediante il modello generalizzato di *Maxwell* con lo sviluppo in serie di *Prony* e i valori del modulo complesso non lineare $|G^*{}_{NLVE}|$ valutato con la Formula (22). In tal modo, dalla soluzione viscoelastica lineare è stato determinato il comportamento viscoelastico non-lineare, mediante due fattori di spostamento correlati alla non linearità, α_γ e h.

Il processo di ottimizzazione, per la determinazione dei fattori di spostamento a ciascun livello di deformazione, è stato svolto in due differenti modi. Nel primo caso per ciascun livello deformativo, utilizzando il risolutore di Excel si è cercato di minimizzare la somma del quadrato delle differenze dei logaritmi del modulo complesso lineare $|G^*{}_{LVE}|$ e del modulo complesso non lineare $|G^*{}_{NLVE}|$. Nel secondo caso, invece, si sono valutati tali *shift factors* non lineari definendo il loro andamento mediante un polinomio di quarto grado e utilizzando il risolutore di Excel andando a minimizzare la somma dei quadrati delle differenze dei moduli, di tutti i livelli deformativi contemporaneamente.

$$y = a\gamma(\%)^4 + b\gamma(\%)^3 + c\gamma(\%)^2 + d\gamma(\%) + e$$

Il primo modo, affetto da meno incertezze, è stato considerato quello più adatto. Pertanto, una volta determinati i valori di α_γ e h per ciascun livello deformativo, l'andamento di tali fattori è stato descritto mediante due polinomi di quarto grado, per entrambi i materiali.

$$y = a\gamma(\%)^4 + b\gamma(\%)^3 + c\gamma(\%)^2 + d\gamma(\%) + 1$$

Vengono riportati di seguito (Tabelle 8 - 9) i valori dei fattori di spostamento dei due materiai, ottenuti ai diversi livelli deformativi.

Bitume tradizionali			
γ	a_γ	h	1/h
0,50	1,0	1,0	1,04
0,63	1,0	1,0	1,04
0,80	1,01	0,96	1,04
1,01	1,04	0,96	1,05
1,27	1,09	0,95	1,05
1,59	1,17	0,94	1,06
2,01	1,30	0,93	1,08
2,52	1,51	0,91	1,10
3,18	1,86	0,86	1,16
4,00	2,39	0,78	1,28
5,04	3,22	0,65	1,53
6,34	4,49	0,47	2,11
7,98	6,47	0,31	3,25
10,05	9,70	0,21	4,75

Tabella 8: Fattori di spostamento NL - Bitume T

Bitume modificato			
γ	a_γ	h	1/h
0,50	0,9	1,0	1,03
0,63	0,9	1,0	1,03
0,80	0,93	0,97	1,03
1,01	0,96	0,96	1,04
1,27	1,02	0,96	1,04
1,59	1,14	0,95	1,06
2,01	1,33	0,93	1,08
2,52	1,63	0,89	1,12
3,18	2,10	0,83	1,21
4,00	2,75	0,73	1,38
5,04	3,66	0,59	1,70
6,34	4,88	0,43	2,32
7,98	6,62	0,31	3,28
10,05	9,74	0,22	4,64

Tabella 9: Fattori di spostamento NL - Bitume M

Riportando in un grafico tali valori, si può fornire una descrizione dell'impatto della non linearità sul comportamento reologico dei due bitumi analizzati.

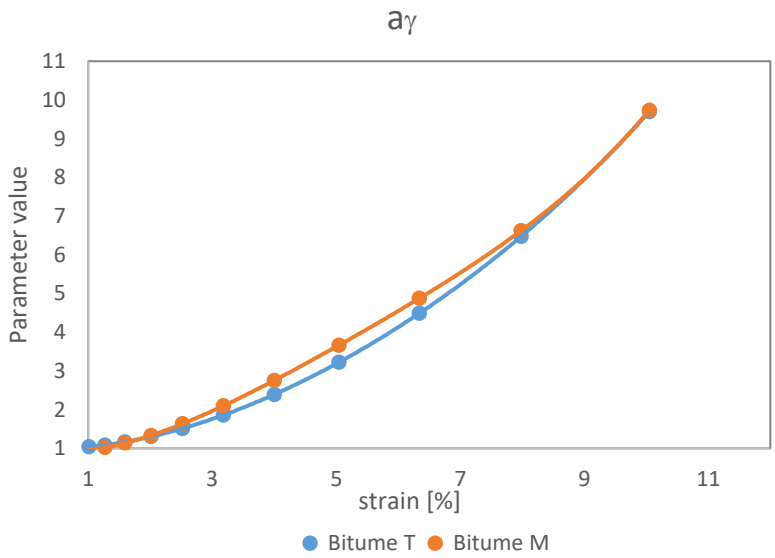

Figura 31: Fattore di spostamento orizzontale NL

In Figura 31 vengono riportati i fattori di spostamento orizzontale α_γ di entrambi i bitumi, i quali riducono la frequenza angolare e determinano una variazione nella pendenza della curva maestra. Entrambi i materiali presentano dei valori molto simili di α_γ. Si osserva che il valore iniziale è paria ad uno, indice di un comportamento viscoelastico lineare. All'aumentare del livello deformativo il valore aumenta, in quanto intervengono gli effetti di non linearità. Si evince che il comportamento di entrambi i bitumi, una volta superato il LVE è fortemente influenzato dalla non linearità.

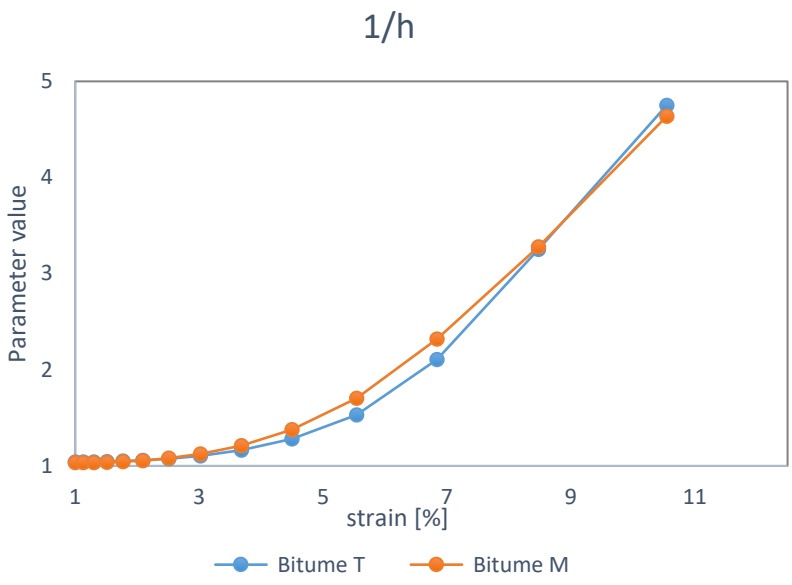

Figura 32: Fattore di spostamento verticale NL

In Figura 32 vengono riportati i fattori di spostamento verticale h di entrambi i materiali, i quali agiscono direttamente sul valore della norma del modulo complesso. Si osserva che il valore iniziale è paria ad uno, indice di un comportamento viscoelastico lineare. All'aumentare del livello deformativo, dunque allontanandosi dal campo viscoelastico lineare, il valore di h si riduce, quindi 1/h cresce. Entrambi i materiali sembrano essere affetti allo stesso modo dai fenomeni di non linearità, che risultano per l'appunto non trascurabili.

4.3 Resistenza a fatica

La determinazione del comportamento del bitume a fatica avviene mediante prove denominate *Linear Amplitude Sweep* per le quali si fa riferimento alla normativa *AASTO TP 101*. In tali prove si ha un'oscillazione delle ampiezze di deformazione in modo da poter indurre danni da fatica a velocità accelerata [22]. Le prove LAS sono caratterizzate da una prima fase in scansione di frequenza in moda da ottenere un'impronta digitale del campione non

danneggiato, questa poi è seguita dalla fase in scansione di ampiezza, in cui la deformazione viene fatta variare da 0,1 % a 30%.

La vita a fatica dei leganti bituminosi a causa della loro natura viscoelastica varia al variare di numerosi fattori tra cui la temperatura. Per comprendere gli effetti della temperatura sulla resistenza a fatica dei bitumi, nella presente sperimentazione sono state svolte prove LAS a diverse temperature. Per il bitume 50/70 le temperature di prova sono state 20 °C, scelta in quanto rappresenta una tipica temperatura intermedia a cui sono svolte le prove di fatica e 9 °C, temperatura di equi-rigidità con la quale è possibile confrontare la resistenza a fatica di diversi materiali alle stesse condizioni di rigidità. Allo stesso modo, per il bitume modificato con SBS, le temperature scelte sono state 14 °C temperatura di equi-rigidità e 20 °C.

Nelle Figure 33-34-35-36 vengono riportate le curve ottenute dalle prove LAS alle diverse temperature al fine di comprendere l'evoluzione del danneggiamento e individuare il punto di rottura in ciascun materiale analizzato.

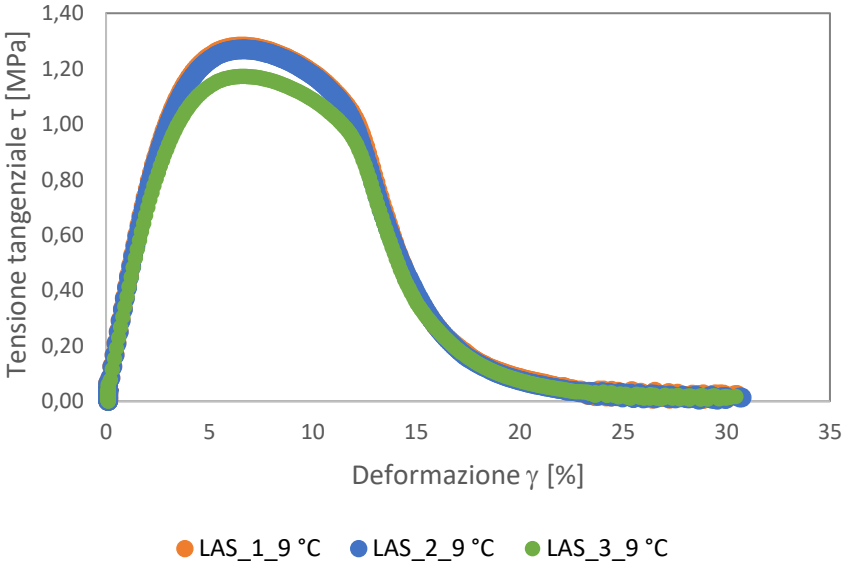

Figura 33: LAS a 9°C - Bitume T

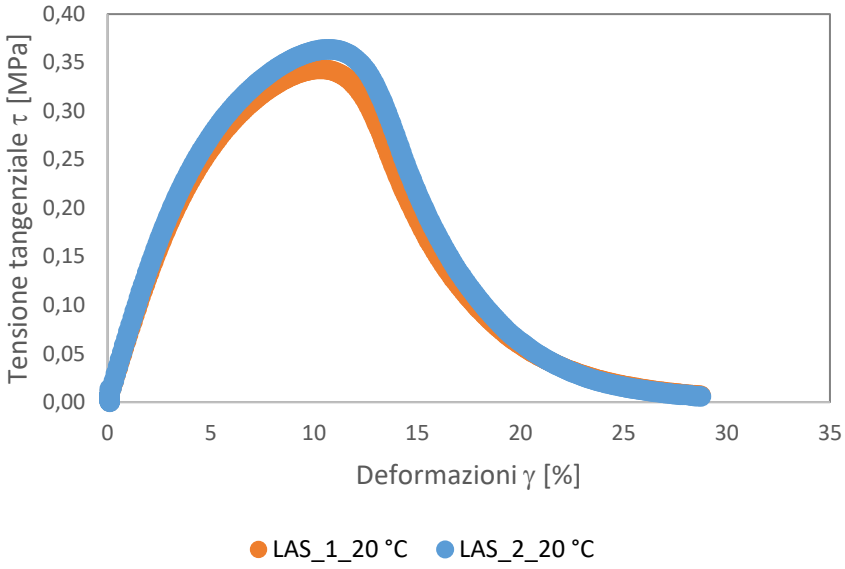

Figura 34: LAS 20 °C -Bitume T

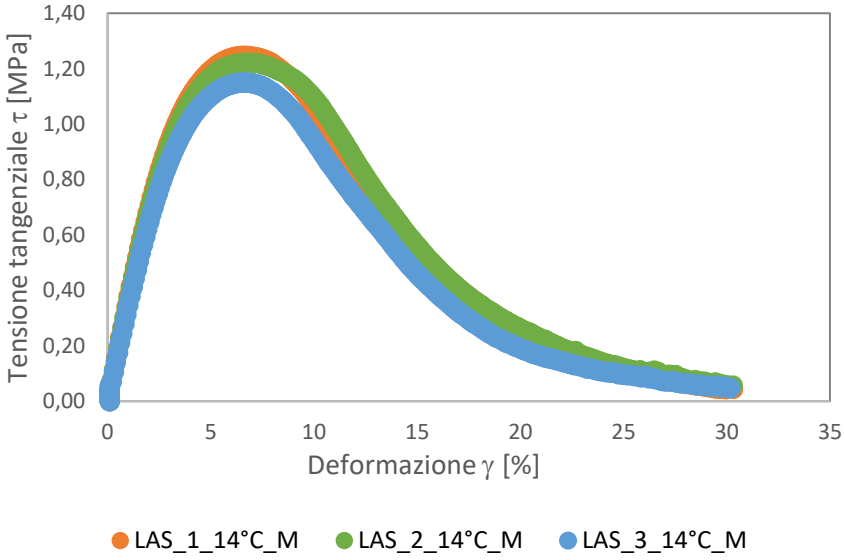

Figura 35: LAS 14 °C - Bitume M

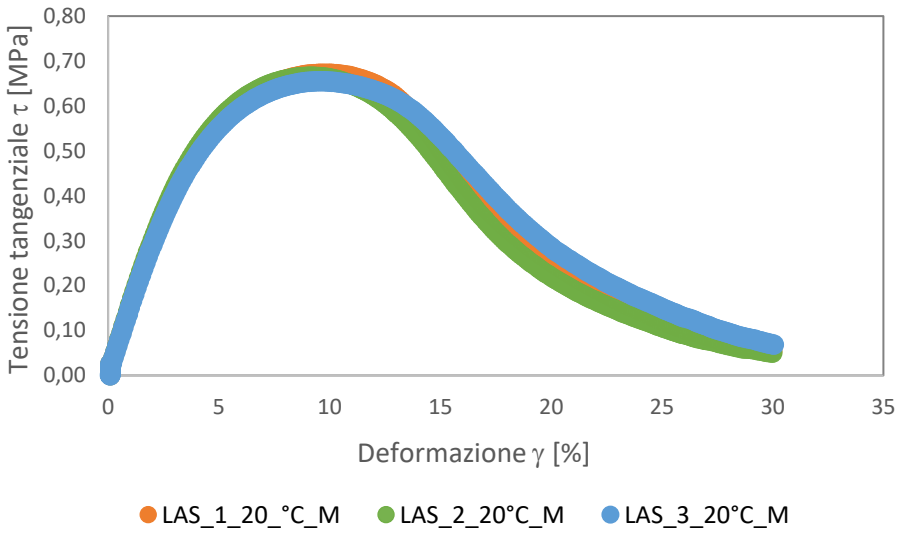

Figura 36: LAS 20 °C - Bitume M

Dalle Figure 33 e 35 si può notare che il livello di sollecitazione al picco dei due bitumi è circa uguale, questo comportamento è imputabile alla scelta delle due temperature 9 °C e 14 °, essendo queste le temperature di equi-rigidità, nelle quali i bitumi presentano le stesse condizioni di rigidità. Dalle Figure 34 e 36 è possibile notare che il livello di sollecitazione al picco del bitume modificato con SBS alla temperatura di 20 °C è maggiore rispetto a quello del bitume tradizionale, questo comportamento è correlato alla maggiore rigidità del bitume M a tale temperatura, come visto nella valutazione del modulo viscoelastico lineare $|G^*|_{LVE}$ di tale materiale nel modello CAM.

Ad ogni ripetizione della prova è stata individuata la deformazione in corrispondenza dalla massima tensione tangenziale. Successivamente, queste sono state mediate in modo da determinare a ciascuna temperatura la deformazione media in corrispondenza della tensione di picco.

In Tabella 10 si riportano i valori medi individuati:

Bitume T			
9 °C		20 °C	
VALORI MEDI		VALORI MEDI	
τ_{peak} [MPa]	1,24	τ_{peak} [MPa]	0,35
$\gamma(\tau_{peak})$ [%]	6,6	$\gamma(\tau_{peak})$ [%]	10,5

Bitume M			
14 °C		20 °C	
VALORI MEDI		VALORI MEDI	
τ_{peak} [MPa]	1,21	τ_{peak} [MPa]	0,70
$\gamma(\tau_{peak})$ [%]	6,6	$\gamma(\tau_{peak})$ [%]	9,5

Tabella 10: LAS - Valori sperimentali medi di tensione e deformazione al picco

La determinazione dei valori $di\ \gamma(\tau_{peak})$ è stata necessaria per eseguire i test di autoriparazione LASH, nei quali è necessario definire un valore di deformazione massimo, raggiunto il quale è possibile introdurre il periodo di riposo, prima dell'applicazione del secondo ciclo di carico.

Nella Tabella 11 vengono riportati i valori di $\gamma(\tau_{peak})$ utilizzati.

Bitume T			
9 °C		20 °C	
VALORI MEDI		VALORI MEDI	
$\gamma(\tau_{peak})$ [%]	7,0	$\gamma_{at\ \tau_peak}$ [%]	10,0

Bitume M			
14 °C		20 °C	
VALORI MEDI		VALORI MEDI	
$\gamma(\tau_{peak})$ [%]	7,0	$\gamma_{at\ \tau_peak}$ [%]	10,0

Tabella 11: Valori medi di deformazione al picco utilizzati nelle LASH

Si denota che, allo scopo di eseguire un confronto tra le diverse ripetizioni è stato introdotto il *Dynamic Modulus Ratio* (DMR), ovvero, un parametro che consente di eliminare la variabilità tra le diverse prove eseguite alla stessa temperatura e sullo stesso materiale. Il DMR è definito come il rapporto tra il modulo complesso $|G^*|_{fringerprint}$, che rappresenta il modulo del campione prima che venga danneggiato ed è diverso per ciascuna prova e il modulo complesso in campo viscoelastico lineare $|G^*|_{LVE}$ del materiale, definito dall'analisi con il modello CAM.

$$DMR = \frac{|G^*|_{fingerprint}}{|G^*|_{LVE}}$$

4.4 Autoriparazione

Le prove LASH sono state eseguite una volta nota la deformazione alla tensione di picco nelle prove LAS, alle diverse temperature e per entrambi i bitumi analizzati. Dai valori riportati in Tabella 11, nei test LASH, sono stati definiti i limiti a cui interrompere la prima fase di carico, quindi a tale valore di deformazione è stato introdotto il periodo di riposo pari a 30', seguito dalla seconda fase di carico. In aggiunta, sono state effettuate anche prove in assenza di periodo di riposo, in modo da poter eseguire un confronto, valutando dunque, anche la condizione in cui non vi è autoriparazione.

Di seguito vengono riportati, a titolo di esempio, i grafici di confronto di prove LASH, in presenza e in assenza di periodo di riposo, alle specifiche temperature di prova.

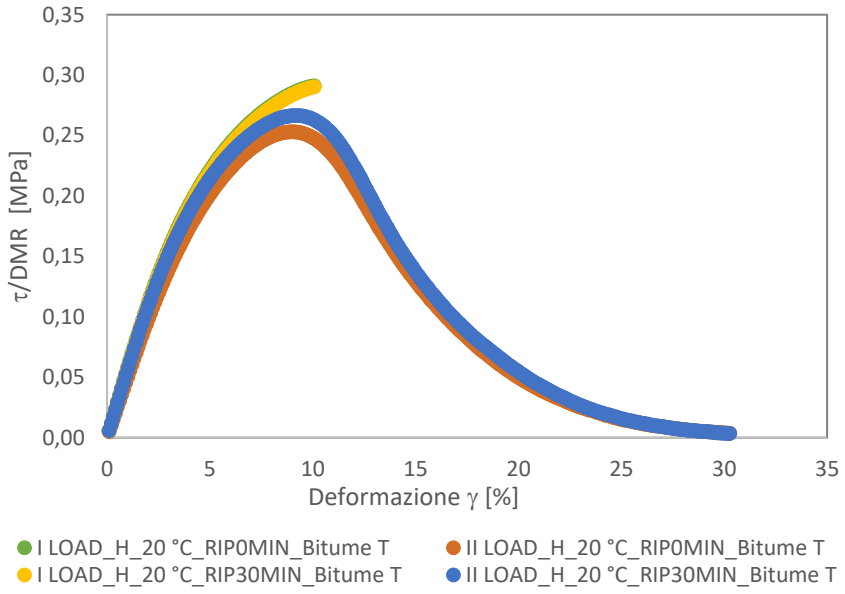

Figura 37: Confronto prove LASH - Bitume T- Temperatura 20 °C

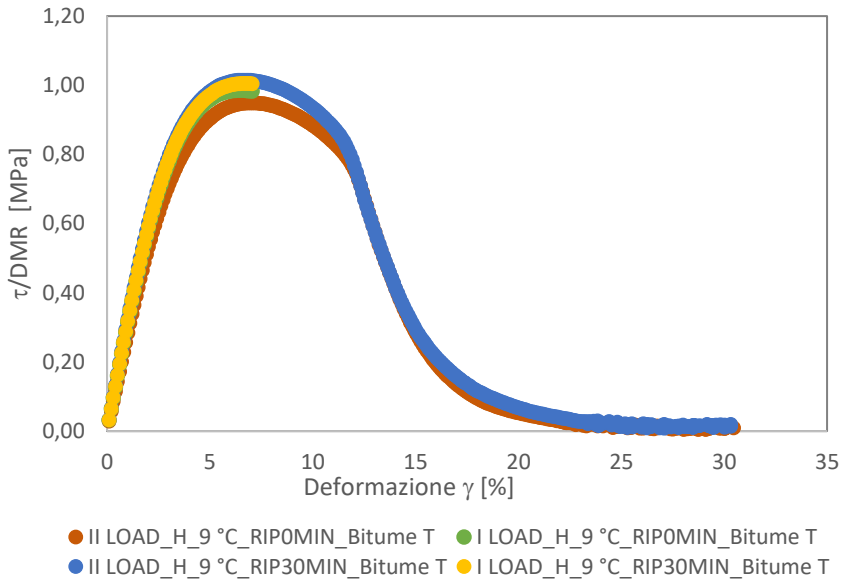

Figura 38: Confronto prove LASH - Bitume T- Temperatura 9 °C

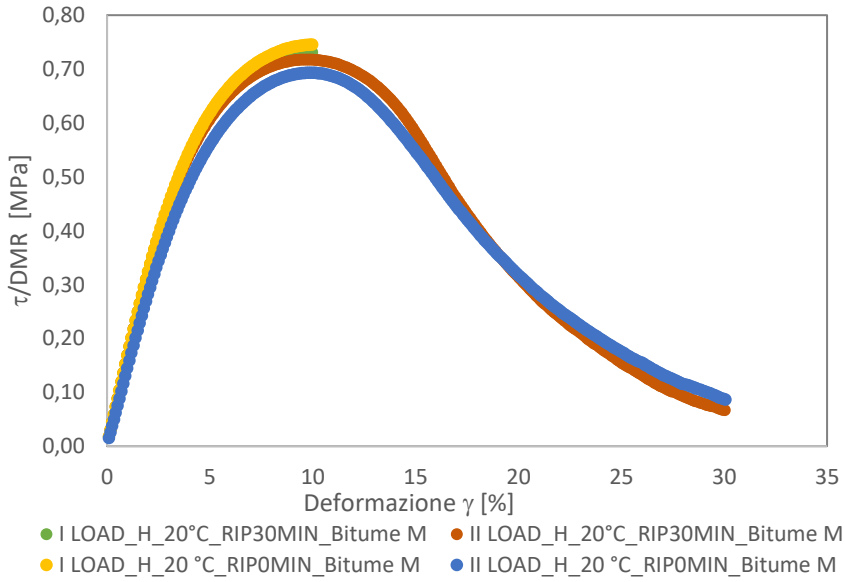

Figura 39: Confronto prove LASH - Bitume M- Temperatura 20 °C

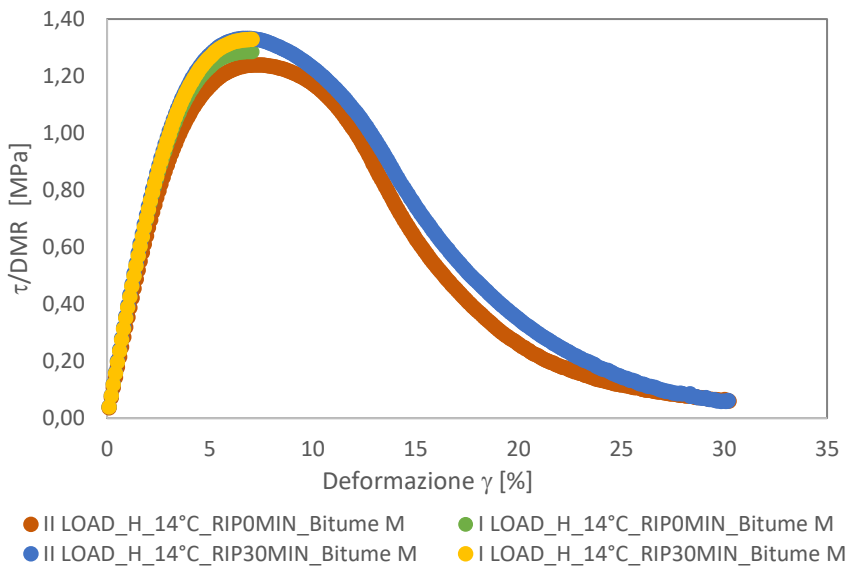

Figura 40: Confronto prove LASH - Bitume M- Temperatura 14 °C

Dalle Figure 37 e 39, a T=20 °C per entrambi i bitumi, si osserva che la prima fase di carico si interrompe a $\gamma(\tau_{peak}) = 10\%$, mentre nelle Figure 38 e 40, alle due temperature di equi-rigidità, la prima fase di carico si interrompe a $\gamma(\tau_{peak}) = 7\%$. Tale fase di carico non dipende dal periodo di riposo, infatti ciò che si osserva è che queste si sovrappongono nei due casi considerati, ovvero in assenza e in presenza del periodo di riposo.

Osservando invece, la seconda fase di carico, che dipende dal periodo di riposo, si nota che per entrambi i bitumi alla T =20 °C, applicando un periodo di riposo di 30 minuti, a basse deformazioni, la curva relativa al secondo carico si sovrappone alla curva relativa al primo carico, mentre al crescere della deformazione si ha uno scostamento tra le due, con una visibile riduzione delle tensioni tangenziali. Questo è dovuto al danneggiamento che il materiale ha subito in seguito al livello di deformazione raggiunto nella prima fase di carico.

Dai grafici relativi alle temperature di 9°C e 14 °C si può osservare che, applicando un periodo di riposo di 30 minuti, la curva relativa al secondo

periodo di carico, si sovrappone completamente alla prima. In tal caso, il materiale sembra aver recuperato il danneggiamento subito durante il periodo di riposo.

In entrambi i casi il recupero è determinato da due fenomeni che si verificano in concomitanza, ovvero, l'indurimento sterico e l'autoriparazione, in quanto si ha danneggiamento e un periodo di riposo. Inoltre, si osserva che non applicando un periodo di riposo, e dunque non essendoci autoriparazione, già per bassi livelli deformativi è presente una netta distinzione dei valori di tensione tangenziale tra il primo e il secondo carico.

Di seguito in Figura 41 viene eseguito un confronto tra i dati ottenuti dalle prove LASH e LAS per il solo bitume tradizionale, alla sola temperatura di 20 °C in quanto gli andamenti qualitativi delle curve per gli altri casi sono simili.

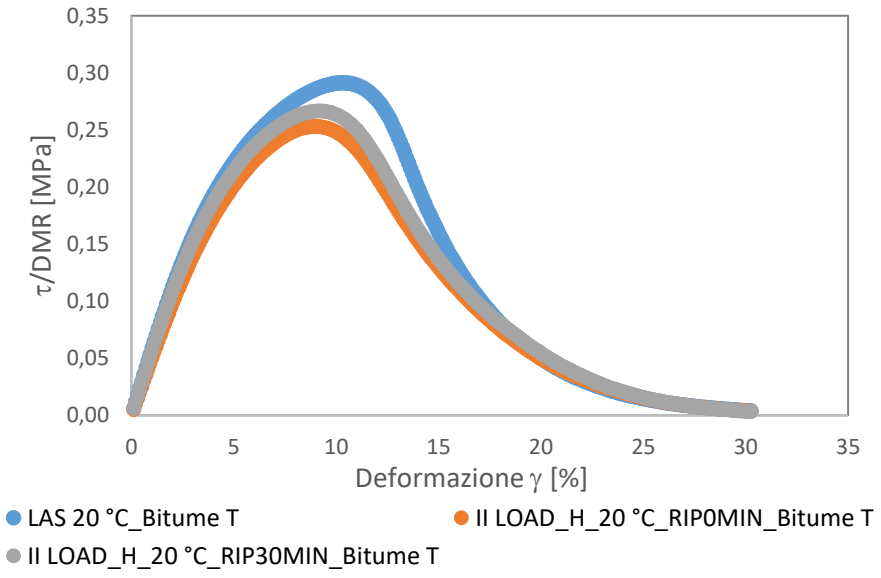

Figura 41: Confronto prove LASH con prove LAS

Vengono considerate solo le curve relative alla seconda fase di carico delle prove LASH e si osserva che entrambe sono al sotto della curva di rifermento LAS, ciò indica che c'è stato un danneggiamento. Il danneggiamento è maggiore quando non si applica un periodo di riposo, in quanto non si verifica

l'autoriparazione, come invece accade quando viene applicato un periodo di riposo di 30 minuti, in questo caso il materiale riesce, in parte, a recuperare le proprie proprietà meccaniche, grazie anche all'indurimento sterico.

4.5 Indurimento sterico

L'indurimento sterico si verifica durante il periodo di riposo, simultaneamente all'autoriparazione e porta ad un recupero della rigidità. Volendo determinare i soli effetti indotti dal processo di autoriparazione, appare chiara l'importanza di rimuovere l'incremento indotto da tale fenomeno nel recupero complessivo di rigidità che viene raggiunto nelle prove di autoguarigione.

Vengono di seguito riportate le curve ottenute attraverso l'elaborazione dei dati delle prove LAS-SH (Figure 42 e 43) dei due materiali. Vengono riportate solo le curve relative alla temperatura di 9 °C per il bitume tradizionale e 14 °C per il bitume modificato, in quanto il risultato è il medesimo a T=20 °C. Per il confronto viene inserita la curva di riferimento LAS.

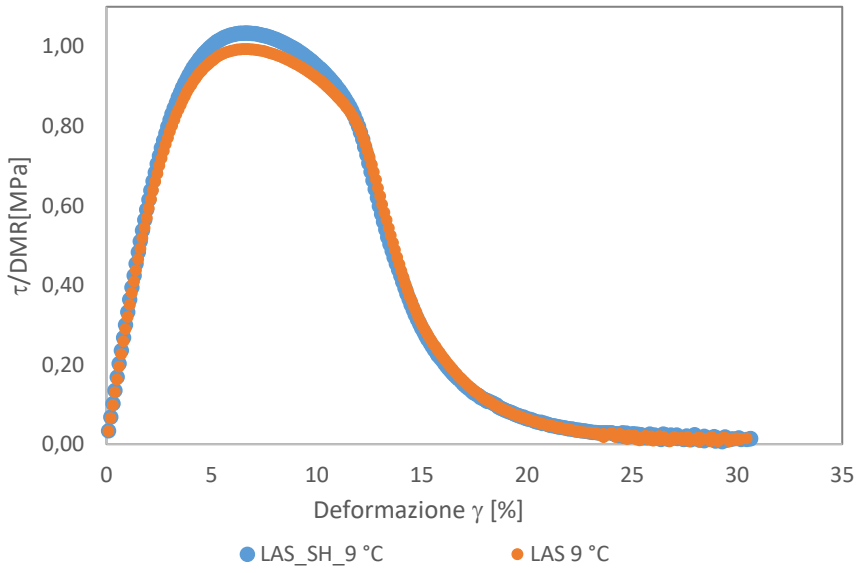

Figura 42: Curva prova LAS-SH con curva di riferimento LAS - Bitume T – Temperatura 9 °C

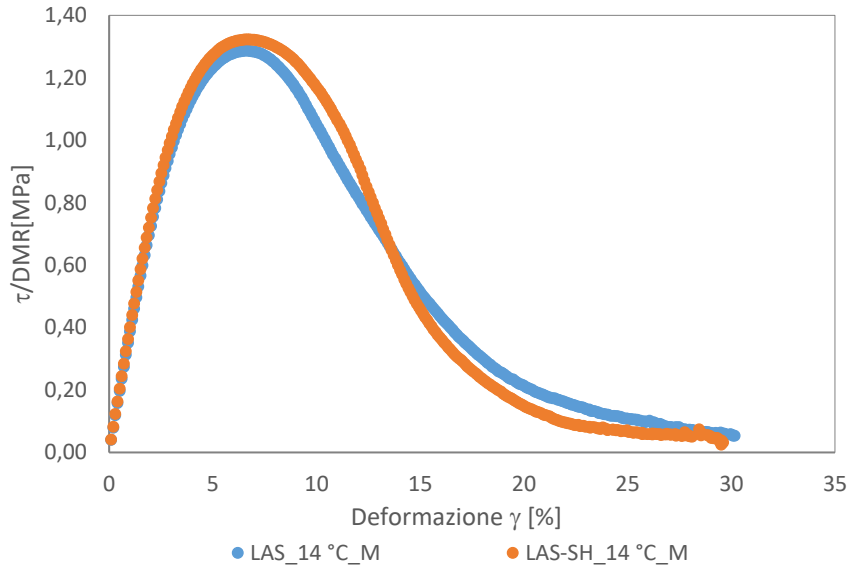

Figura 43: Curva prova LAS-SH con la curva di riferimento LAS - Bitume M- Temperatura 14 °C

Dalle Figure 42 e 43 in cui vengono riportate le curve LAS-SH e le curve LAS di riferimento, si nota come in entrambi i materiali, sia presente l'effetto indotto dall'indurimento sterico a seguito di un periodo di riposo di soli 30 minuti.

4.6 Modello Semplificato di Danno Continuo Viscoelastico

L'approccio utilizzato per la valutazione del potenziale di autoriparazione dei leganti bituminosi si basa sull'utilizzo di una versione semplificata del modello *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD). Il modello VECD è un potente strumento mediante il quale è possibile determinare il comportamento sotto carico dei materiali viscoelastici, quando è presente un danno [14]. Tale modello è stato dapprima ampiamente utilizzato per prevedere l'evoluzione del danno di miscele bituminose soggette a prove di fatica uniassiale e solo recente è stato esteso, nella versione semplificata, ai leganti bituminosi soggetti all'applicazione di carichi ciclici, mediante l'utilizzo del reometro rotazionale a taglio (DSR), come nelle prove LAS [23]. L'applicabilità del modello *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* S-VECD ai risultati dei test LAS consente di prevedere la vita a fatica dei

leganti bituminosi a qualsiasi ampiezza di deformazione d'interesse. Recentemente, il modello S-VECD è stato anche utilizzato per analizzare i dati dei test di autoriparazione LASH.

I dati modellati mediante il modello S-VECD si basano sulla relazione che sussiste tra l'integrità del materiale e una variabile di stato interna, che rappresenta il danno (S), la quale deriva dalla teoria del potenziale di lavoro di *Schapery*. L'integrità del materiale viene quantificata utilizzando la pseudo-rigidezza C(S), che viene determinata come:

$$C^*(S) = \frac{\tau_p}{\gamma_p^R \cdot DMR}$$

e dipende dalla tensione tangenziale di picco registrata durante la prova ad un determinato ciclo, dal DMR definito in precedenza e dalla pseudo-deformazione γ_p^R con la quale il principio di corrispondenza elastico-viscoelastico di *Schapery* permette di separare gli effetti del danno dalla viscoelasticità, riducendo il problema viscoelastico ad uno elastico. La pseudo-deformazione è definita come:

$$\gamma_p^R = \frac{1}{G_R}\left(\gamma_p \cdot |G^*|_{LVE}(\omega_r)\right)$$

dove: G_R è il modulo di riferimento, γ_p è la deformazione di taglio misurata ad ogni ciclo di carico della prova considerata, $|G^*|_{LVE}$ è il modulo in campo viscoelastico lineare, ottenuto mediante l'applicazione del CAM, i cui valori sono riportati nelle Tabella 4 e 5.

Per quantificare il danno a seguito di modifiche microstrutturali che inducono una riduzione della rigidezza, il modello S-VECD di basa sulla teoria del lavoro potenziale di *Schapery*, nella quale il lavoro potenziale dei materiali viscoelastici viene definito come:

$$\frac{dS}{dt} = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial S}\right)^{\alpha}$$

Dove: W^R è l'energia di pseudo deformazione immagazzinata, S è il danno cumulato, t è il tempo e α è un parametro legato all'evoluzione del danno.

Nel caso di carichi applicati in modo oscillatorio, come nel nostro caso, l'energia di pseudo-deformazione è definita come:

$$W^R = \frac{1}{2} C^*(S) \left(\gamma_p^R\right)^2$$

Combinando ed integrando le precedenti equazioni è possibile definire il danno S accumulato come segue:

$$S = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{DMR}{2} \left(\gamma_p^R\right)^2 (C_{i-1} - C_i)\right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot \left[t_i - t_{i-1}\right]^{\frac{1}{1+\alpha}}$$

dove: t è il tempo effettivo, ovvero quello misurato durate la prova.

Per quanto concerne il parametro α la formulazione adottata nel presente lavoro di tesi è la seguente:

$$\alpha = 1 + \frac{1}{m}$$

in cui *m* è il parametro ottenuto dal processo di ottimizzazione, alla temperatura di riferimento, tra i dati misurati durante le *Frequency Sweep*, in termini di modulo complesso e angolo di fase e i valori ottenuti dalle formulazioni proposte nel modello CAM. Valori riportati nella Tabella 3 alla $T_0 = 20$ °C.

L'applicazione del modello S-VECD alle diverse prove ci consente di ottenere delle curve monotone decrescenti, mediante le quali si descrive l'andamento dell'integrità in funzione del danno cumulato. Tali curve sono chiamate Curve Caratteristiche di Danno (DCC).

Viene riportata a titolo d'esempio una DCC ottenuta dall'applicazione del modello ai dati di una prova LAS interrotta al valore della tensione al picco, eseguita sul bitume modificato alla temperatura di 14 °C (Figura 44).

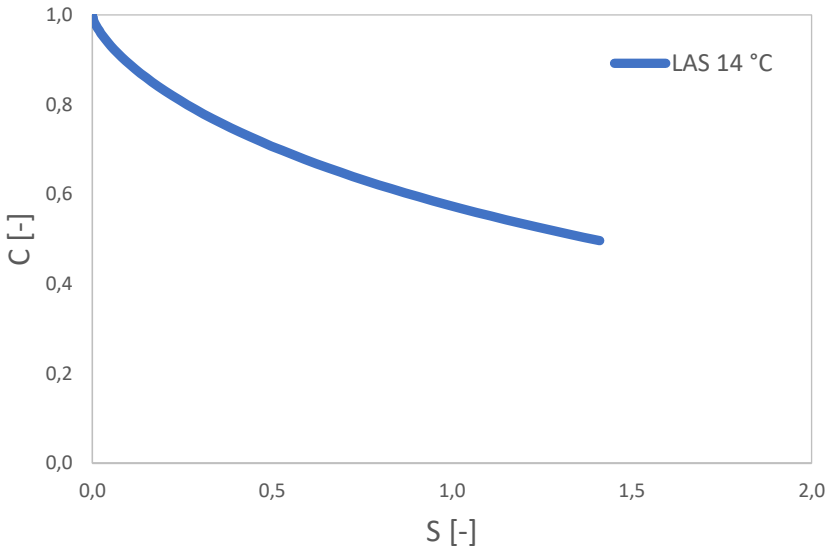

Figura 44: DCC di una prova LAS - Bitume M - Temperatura 14 °C

Si osserva che l'integrità (C) è uguale ad uno quando il campione non si è ancora danneggiato ed il comportamento è quello viscoelastico lineare. Al verificarsi del danno, il comportamento devia da quello viscoelastico lineare, di conseguenza il valore di C si riduce, con l'accumularsi del danno.

Vengono riportate di seguito le DCC delle prove LAS, alle quattro temperature, due per ciascun materiale analizzato.

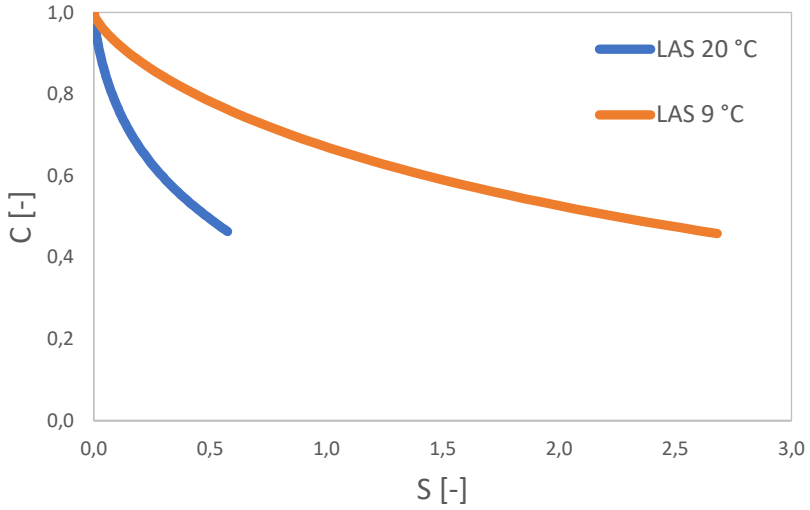

Figura 45: Confronto delle DCC di prove LAS alle due temperature di prova per il bitume T prima di applicare la sovrapposizione tempo-temperatura

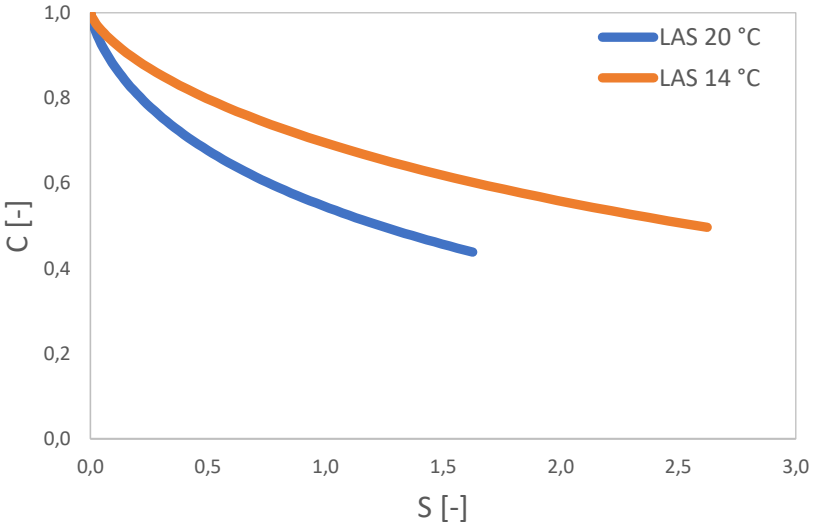

Figura 46: Confronto delle DCC di prove LAS alle due temperature di prova per il bitume M prima di applicare la sovrapposizione tempo-temperatura

Osservando le Figure 45 e 46, si nota che per entrambi i bitumi analizzati vi è una dipendenza significativa dalla temperatura delle curve caratteristiche di danno, maggiore per il bitume T. Inoltre, a parità di S si nota un'integrità

maggiore a temperature minori, indice di un comportamento a fatica migliore dei due materiali a tali temperature, 9 °C e 14 °C.

In quanto al fenomeno tempo-dipendente, ovvero, l'indurimento sterico, si osserva nella Figura 47 che la l'inserimento di un periodo di riposo, prima di una prova di fatica, produca un incremento dell'integrità.

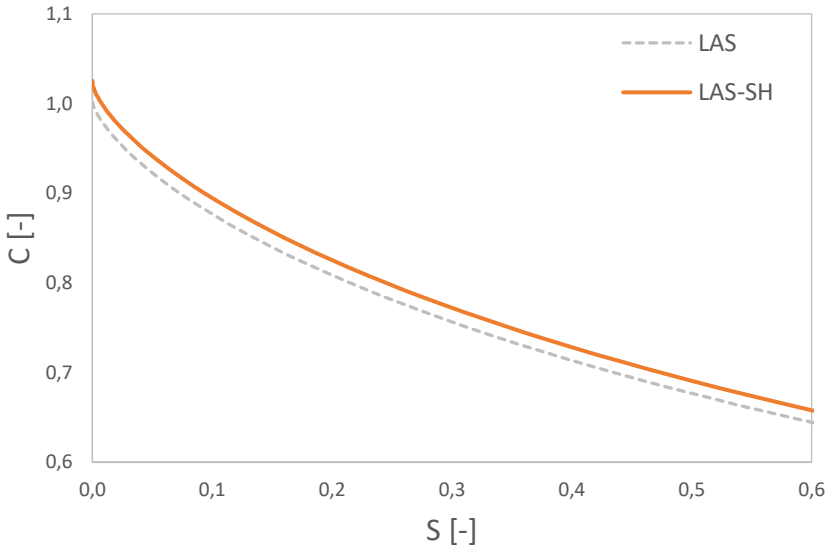

Figura 47: Prova LAS-SH posta a confronto con la curva di riferimento LAS

Pertanto, la presenza di tale fenomeno simultaneamente all'autoriparazione porta ad una sopravvalutazione dell'effettiva capacità curativa del legante.

Per tale motivo, risulta necessario sottrarre tale incremento al recupero complessivo di rigidità che viene raggiunto nelle prove di autoriparazione. Per far questo è stato inserito un accorgimento al modello S-VECD, ovvero, nella seconda fase di carico delle prove di autoriparazione è stato considerato un nuovo parametro a_{SH} . Tale parametro è ottenuto una volta analizzate le prove LAS-SH ed è definito come:

$$a_{SH} = \frac{|G^*|_{RP}}{|G^*|_{fingerprint}}$$

dove, $|G^*|_{RP}$ è il modulo complesso valutato dopo il periodo di riposo, mentre $|G^*|_{fingerprint}$ è quello di *fingerprint*.

Nella Tabella 12 vengono riportati i valori considerati nei due materiali, alle diverse temperature indagate.

Bitume	Tradizionale		Modificato	
Temperatura	T= 9 °C	T= 20 °C	T= 14 °C	T= 20 °C
a_{SH}	1,03	1,02	1,03	1,03

Tabella 12: Valori del parametro di indurimento sterico

I parametri a_{SH} sono stati inseriti nel modello S-VECD, nell'espressione della pseudo-rigidezza e del danno, per la seconda fase di carico delle prove di autoriparazione, ottenendo le seguenti espressioni:

$$C^*(S) = \frac{\tau_p}{\gamma_p^R \cdot DMR \cdot a_{SH}}$$

$$S = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{DMR \cdot a_{SH}}{2} \left(\gamma_p^R\right)^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot [t_i - t_{i-1}]^{\frac{1}{1+\alpha}}$$

Considerando i risultati ottenuti delle prove di autoriparazione, analogamente a ciò che è stato fatto per la prova LAS, vengono riportate le DCC di prove LASH, considerando i due casi analizzati, ovvero con periodo di riposo e in assenza di quest'ultimo, tra le due fasi di carico. Nell'analisi si assume che il danneggiamento nella seconda fase di carico riparta da zero.

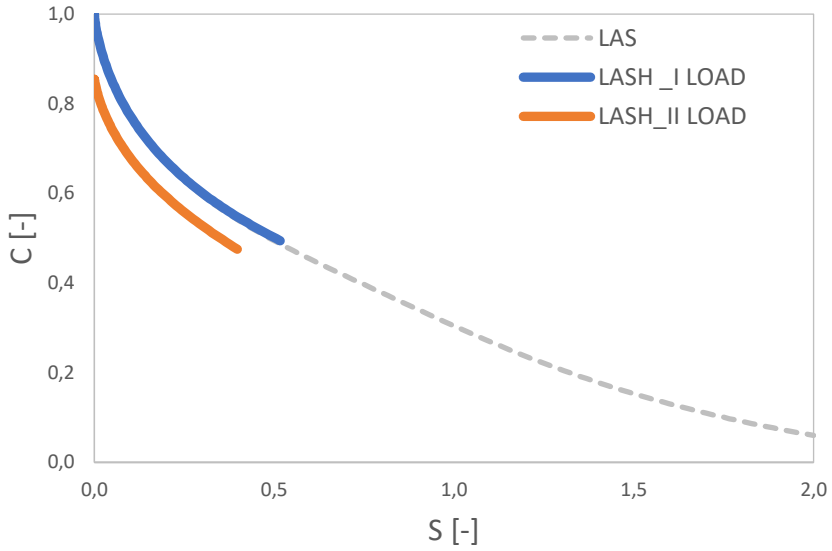

Figura 48: DCC di una prova LASH in assenza di periodo di riposo - Bitume T- T =20 °C

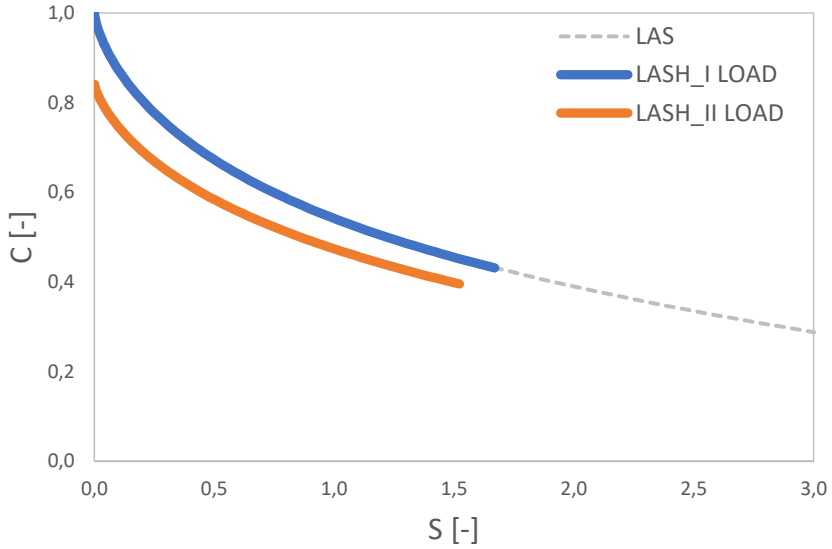

Figura 49: DCC di una prova LASH in assenza di periodo di riposo - Bitume M - T=20 °C

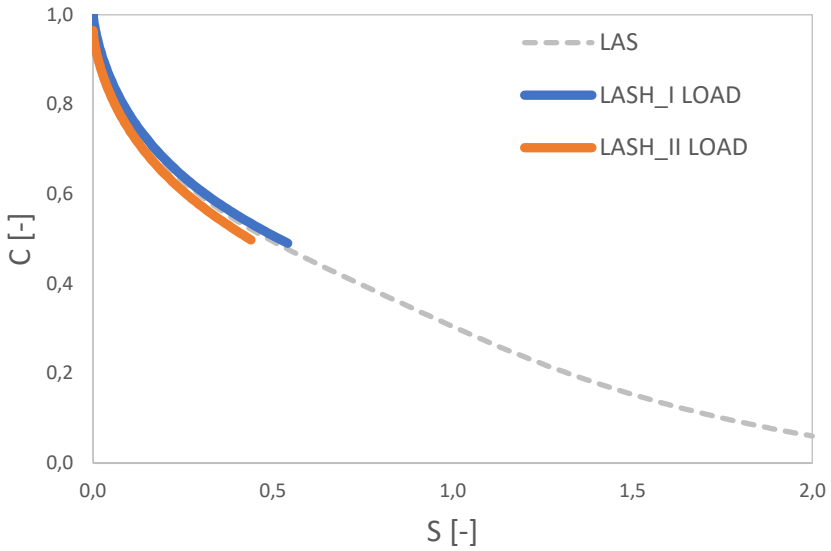

Figura 50: DCC di una prova LASH con periodo di riposo pari a 30' - Bitume T- T = 20 °C

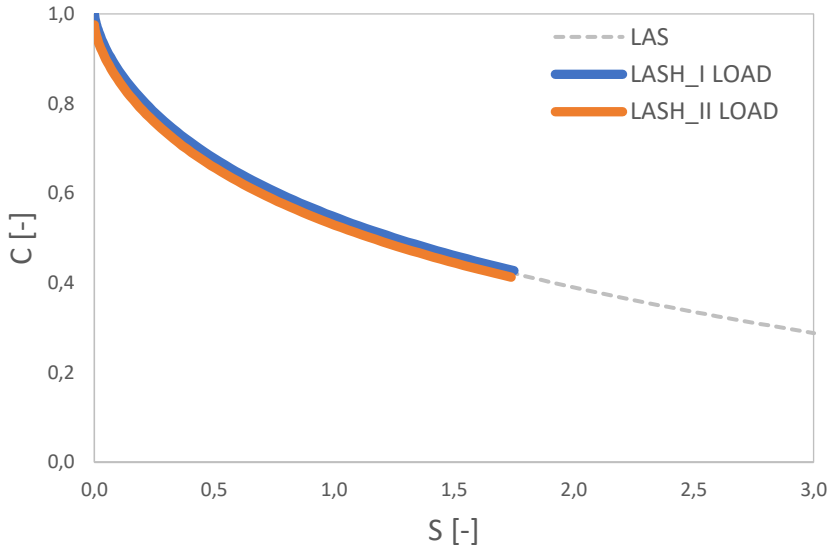

Figura 51: DCC di una prova LASH con periodo di riposo pari a 30' - Bitume M- 20 °C

Nelle Figure 48 - 49 - 50 e 51, la curva relativa alla prima fase di carico presenta inizialmente un valore unitario d'integrità, poi decrescere all'aumentare del danno, quest'ultimo valutato fino alla tensione di picco, valore a cui è interrotta tale fase. Si osserva inoltre che questa prima curva si sovrappone perfettamente alla curva di riferimento LAS, in quanto non influenzata dal periodo di riposo.

La curva relativa alla seconda fase di carico è stata interrotta al volore del danno valutato alla tensione di picco. Nelle Figure 48 e 49, osservando tale curva, non essendoci autoriparazione, si evidenzia per entrambi i bitumi analizzati alla temperatura di 20 °C, il danneggiamento subito dal campione. Nelle Figure 50 e 51, invece, si osserva la completa sovrapposizione delle due curve, ciò indica che la presenza di un periodo di riposo di trenta minuti consente una completa autoriparazione del campione. Tale incremento di integrità è imputabile al solo processo di autoriparazione, in quanto nella seconda fase di carico si è tenuto in conto dell'effetto dell'indurimento sterico mediante il parametro a_{SH} .

Per quanto concerne le prove LASH valutate alle due temperature di equi-rigidità, nelle curve, si sono osservati i medesimi andamenti.

4.6.1 Sovrapposizione tempo - temperatura nel modello S-VECD

Gli effetti della temperatura vengono incorporati nel modello S-VECD mediante la sovrapposizione tempo-temperatura, ovvero, andando a sostituire il tempo con il tempo ridotto t_R nella formula del danno.

$$t_R = \frac{T}{\alpha_T}$$

$$S = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{DMR}{2} \left(\gamma_p^R\right)^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot \left[t_{Ri} - t_{Ri-1}\right]^{\frac{1}{1+\alpha}}$$

dove T e la temperatura a cui sono eseguite le prove e α_T è il fattore di spostamento viscoelastico lineare tempo-temperatura, valutato considerando per entrambi i materiali una temperatura di riferimento pari a 20 °C.

Il tempo ridotto è utilizzato per spostare le curve caratteristiche del danno (DCC) alla temperatura assunta di riferimento, utilizzando i fattori di

spostamento tempo-temperatura ottenuti applicando la Formula 3 del capitolo 2, di WLF, nella caratterizzazione viscoelastica lineare.

Di seguito vengono riportate le curve caratteristiche del danno ottenute dall'analisi dei dati registrati da prove LAS.

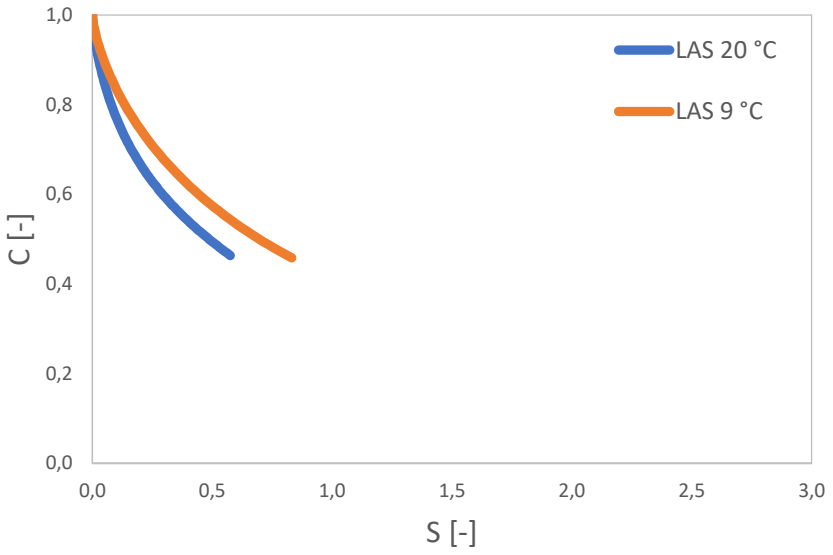

Figura 52: Confronto delle DCC di prove LAS dopo l'applicazione della sovrapposizione tempo - temperatura per il bitume T

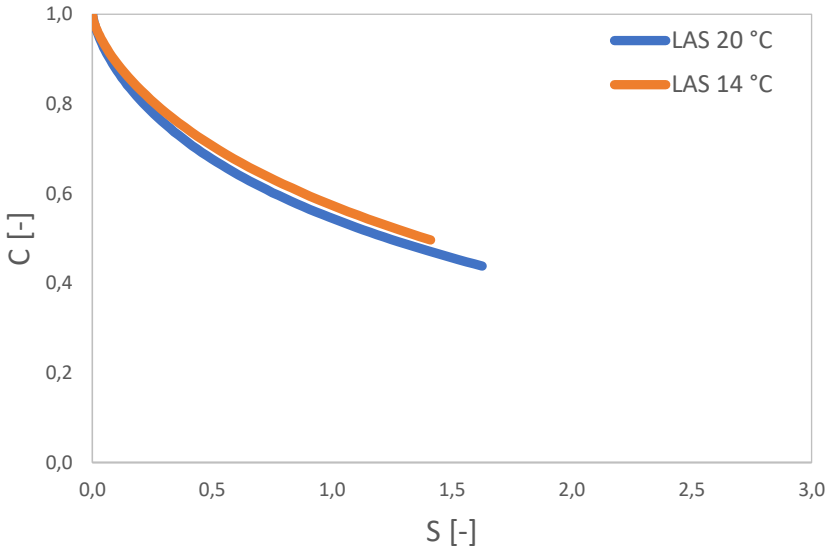

Figura 53: Confronto delle DCC di prove LAS dopo l'applicazione della sovrapposizione tempo - temperatura per il bitume M

Osservando la Figura 53, relativa alle curve caratteristiche del danno del bitume modificato, alle due temperature di prova, si nota che dopo l'applicazione della sovrapposizione tempo-temperatura le DCC collassano in un'unica curva alla temperatura di riferimento. Tuttavia, va notato che il divario tra le temperature di prova per questo legante è di soli 6 °C. Dalla Figura 52, per il bitume tradizionale, si osserva una sovrapposizione per bassi livelli di danno e un avvicinamento delle DCC ma, non una completa sovrapposizione, anche dopo l'applicazione della sovrapposizione tempo-temperatura. Va notato che in tal caso l'intervallo tra le temperature di prova è più ampio, pari 11 °C. I risultati ottenuti suggeriscono che è possibile utilizzare il modello S-VECD per caratterizzare il danno da fatica da una sola prova LAS, eseguita ad una determinata temperatura, e poi mediante i fattori di spostamento t-T viscoelastici lineari, caratterizzare il danno a temperature diverse.

Al fine di valutare l'effetto dell'autoriparazione, sui due bitumi analizzati, sono stati considerati i seguenti intervalli, in termini di integrità e danno.

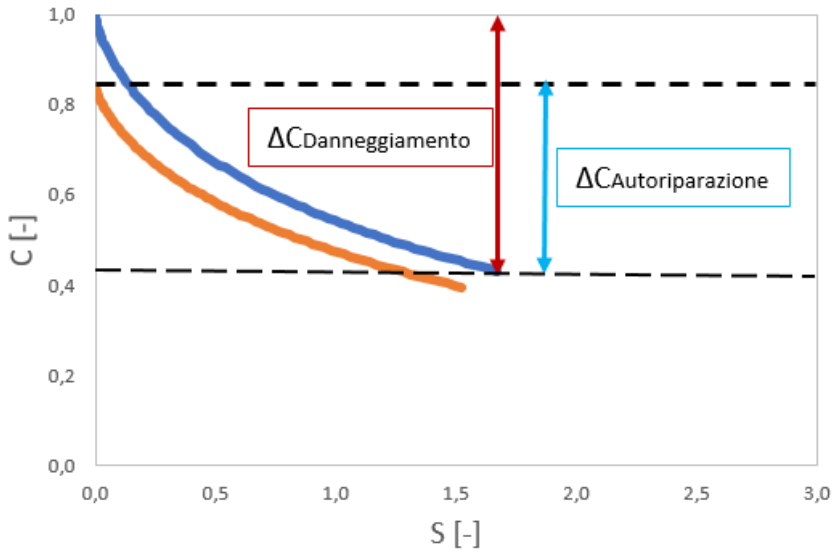

Figura 54:Rappresentazione grafica delle variazioni di ΔC considerate sulle DCC per valutare gli indici di autoriparazione in termini di integrità

Il parametro $\Delta C_{Danneggiamento}$ rappresenta la riduzione d'integrità a seguito del danneggiamento subito nella prima fase di carico, mentre il termine $\Delta C_{Autoriparazione}$ è l'incremento d'integrità che si ha all'inizio della seconda fase di carico, dopo il periodo di riposo. Dall'individuazione di tali parametri è stato possibile valutare un indice di autoriparazione, sulla base dell'integrità del materiale, il quale rappresenta la quantità in termini relativi di integrità persa, che viene recuperata durante il periodo di riposo ed è definito come [14]:

$$HI_C = \frac{\Delta C_{Autoriparazione}}{\Delta C_{Danneggiamento}} \cdot 100$$

Di seguito viene riportato l'istogramma, con i valori ottenuti di tale indice, per i due materiali, alle due temperature. I valori di HI_C riportati sono quelli ottenuti dalle curve DCC di prove LASH con riposo di 30 minuti, mediando le ripetizioni.

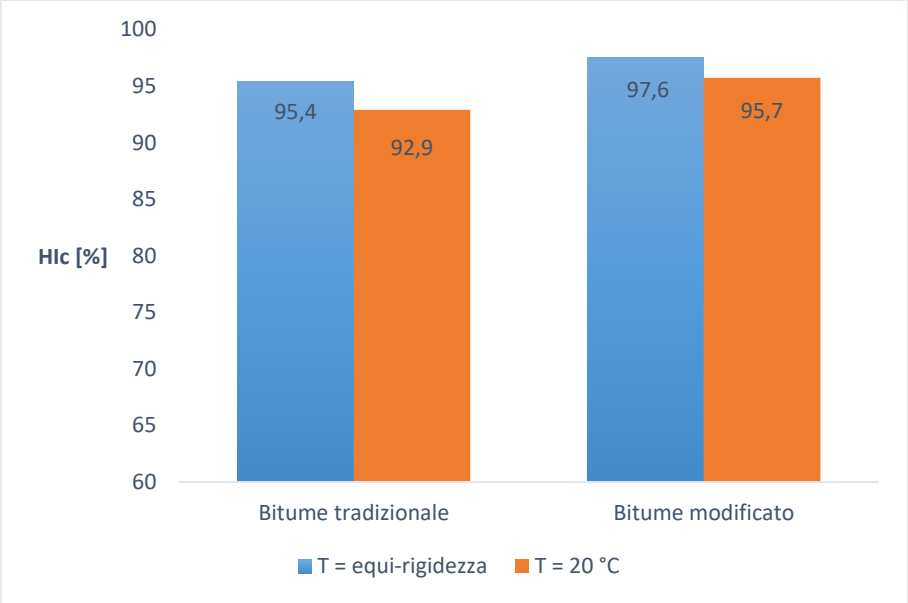

Figura 55: Istogramma dei valori di HI_C

Osservando la Figura 55, si nota che l'indice di autoriparazione HI_C è di poco maggiore, per entrambi i bitumi analizzati, alla temperatura di

equi-rigidezza, rispetto al suo valore a T=20 °C. Dunque, alla temperatura di equi-rigidezza, dopo il periodo di riposo, i due materiali riescono a recuperare una quantità maggiore di integrità andata persa nella prima fase di carico. Confrontando invece, i due materiali, si può notare che il bitume modificato presenta dei valori di HI_C maggiori del bitume tradizionale.

Essendo i valori di HI_C, molto simili tra i due materiali, per avere una più chiara comprensione del comportamento dei due bitumi, in termini di capacità di autoriparazione, è stato utilizzato un secondo indice HI_S, basato sul danno cumulato S.

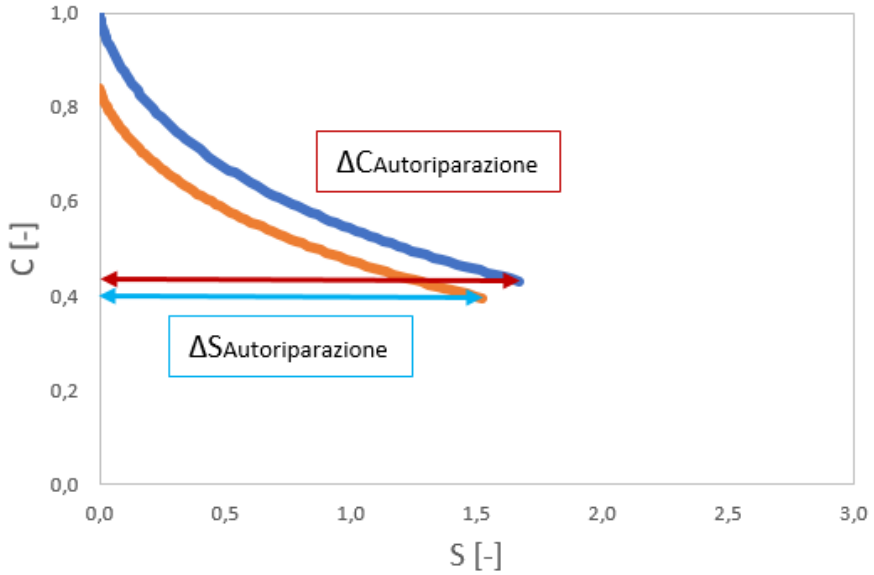

Figura 56: Rappresentazione grafica delle variazioni di ΔS considerate sulle DCC per valutare gli indici di autoriparazione in termini di danno cumulato

Come riportato in Figura 56 sono stati individuati due parametri, $\Delta S_{Danneggiamento}$ che rappresenta la quantità di danno accumulato nella prima fase di carico a seguito del danneggiamento e $\Delta S_{Autoriparazione}$, invece, indica la quantità di danno accumulato dopo il periodo di riposo, per effetto dell'autoriparazione.

Tale indice è definito come segue:

$$HI_s = \frac{\Delta S_{Autoriparazione}}{\Delta S_{Danneggiamento}} \cdot 100$$

Di seguito viene riportato l'istogramma, con i valori ottenuti di tale indice, per i due materiali, alle due temperature. I valori di HI_s riportati sono quelli ottenuti dalle curve DCC di prove LASH con riposo di 30 minuti, mediando le ripetizioni.

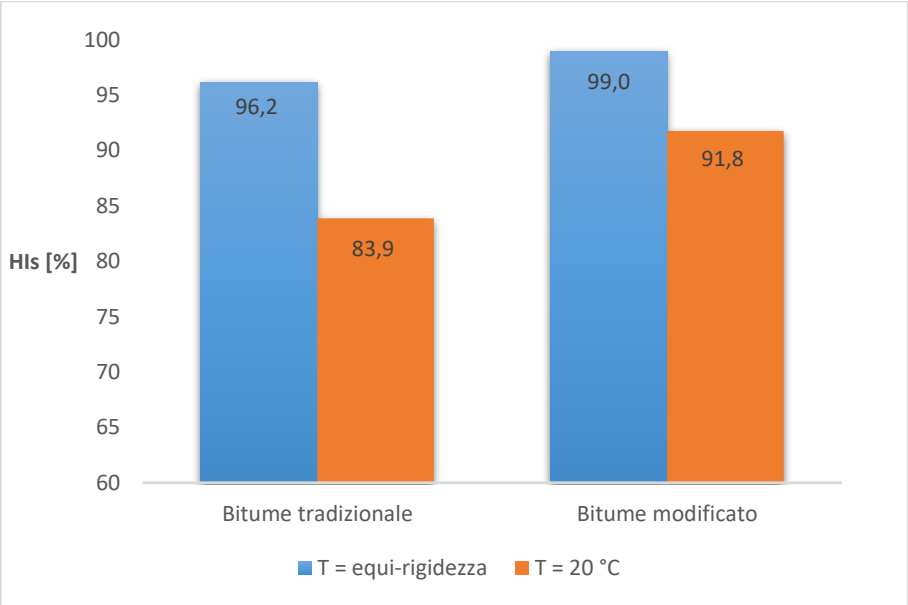

Figura 57: Istogramma valori HIs

Osservando l'istogramma in Figura 57 si può notare che utilizzando tale indice, la distinzione sul potenziale di autoriparazione dei due materiali, alle due temperature è decisamente più netta. I due bitumi riescono ad accumulare una quantità di danno maggiore, dopo il periodo di riposo, alle temperature di equi-rigidità, mentre facendo una distinzione tra i due materiali, si osserva che il bitume modificato sviluppa una maggiore autoriparazione, rispetto al bitume tradizionale, coerentemente con quanto ottenuto mediante l'utilizzo del precedente indice.

4.6.2 La non linearità nel modello S-VECD

Nel paragrafo precedente mediante l'utilizzo del modello S-VECD, che prevede l'applicazione del principio di sovrapposizione tempo-temperatura, è stato possibile ottenere delle curve caratteristiche di danno indipendenti dalla temperatura e dalla storia di carico. Inoltre, è stato possibile scomputare, dall'incremento complessivo d'integrità che si verifica a seguito del periodo di riposo, la componente derivante dall'indurimento sterico, ottenendo così solo l'incremento di rigidità indotto dall'autoriparazione.

Numerosi studi hanno dimostrato inoltre che sottoponendo i campioni di legante bituminoso a livelli deformativi elevati, il loro comportamento devia da quello viscoelastico lineare. Pertanto, avendo sottoposto i campioni a prove LAS e LASH, applicando dunque grandi deformazioni a velocità accelerata, oltre il limite di linearità del materiale, si sono generati effetti non-lineari potenzialmente rilevanti.

L'applicazione del modello S-VECD a tali prove fa si dunque, che non tutta la perdita d'integrità sia imputabile al danneggiamento, ma una parte di tale riduzione è dovuta al fenomeno reversibile della non-linearità.

Per isolare gli effetti prodotti dal danno, in termini di riduzione della rigidità, da quelli invece causati dalla non-linearità, è stato necessario valutare un modulo complesso non lineare, da introdurre nel modello S-VECD.

Per la valutazione di tale modulo complesso non lineare, ci si è bastati sui risultati ottenuti dall'analisi delle prove in scansione di deformazione, secondo quanto già descritto nel paragrafo 4.2. I campioni mediante tali prove sono stati sottoposti a grandi livelli deformativi, e per separare la non-linearità dal danneggiamento, i valori della curva mediata sono stati prima normalizzati rispetto al modulo complesso lineare del campione, poi moltiplicati per il modulo complesso $|G^*|_{LVE}$ relativo al materiale, ottenendo

così la curva traslata della quantità pari al danno subito. In questo modo la curva ottenuta definisce l'andamento del modulo complesso lineare entro il LVE e una volta superato tale limite, la riduzione del modulo complesso non lineare in funzione della deformazione $|G^*|_{NLVE}(\gamma)$, per effetto della sola non-linearità.

Per introdurre la non-linearità nel modello S-VECD è stato necessario valutare il modulo complesso non lineare ai valori di deformazione delle prove LAS, LASH e LAS-SH. Dunque, determinate le curve precedentemente descritte alle temperature delle prove LAS (coincidenti tali temperature a quelle delle prove MSS a cui si è valutata la curva), si è cercato un polinomio che potesse al meglio approssimarle.

Viene riporta di seguito, a titolo d'esempio, una delle curve ottenute.

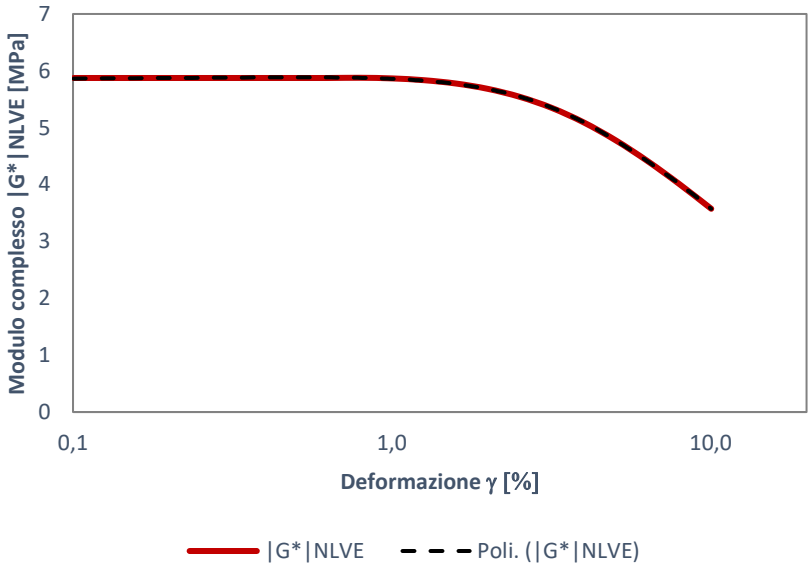

Figura 58: Curva traslata ottenuta da prove MSS, che definisce il |G|NLVE in funzione della deformazione- Bitume T- Temperatura 20 °C*

In tutti i casi analizzati per approssimare le curve si è utilizzato un polinomio di quinto grado, del tipo:

$$y = a\gamma(\%)^5 + b\gamma(\%)^4 + c\gamma(\%)^3 + d\gamma(\%)^2 + e\gamma(\%) + f$$

Mediante tale polinomio è stato valutato il modulo complesso non lineare alle deformazioni delle prove LAS, LASH e LAS-SH. Tale valore è stato poi inserito nel modello S-VECD, sostituendo nella formula della pseudo-deformazione il modulo complesso viscoelastico lineare con quello non-lineare.

$$\gamma_{p,NLVE}^{R} = \frac{1}{G_R}\left(\gamma_p \cdot |G^*|_{NLVE}(\gamma)\right)$$

In cui l'integrità viene valutata:

$$C^*(S) = \frac{\tau_p}{\gamma_{p,NLVE}^{R} \cdot DMR}$$

e la variabile interna S come:

$$S = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{DMR}{2}\left(\gamma_{p,NLVE}^{R}\right)^2 (C_{i-1} - C_i)\right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot \left[t_{Ri} - t_{Ri-1}\right]^{\frac{1}{1+\alpha}}$$

Di seguito viene riportato un confrontando tra le curve caratteristiche di danno ottenute in campo viscoelastico lineare con quelle ottenute in campo non lineare, per prove LAS alla temperatura di 20 °C per entrambi i bitumi.

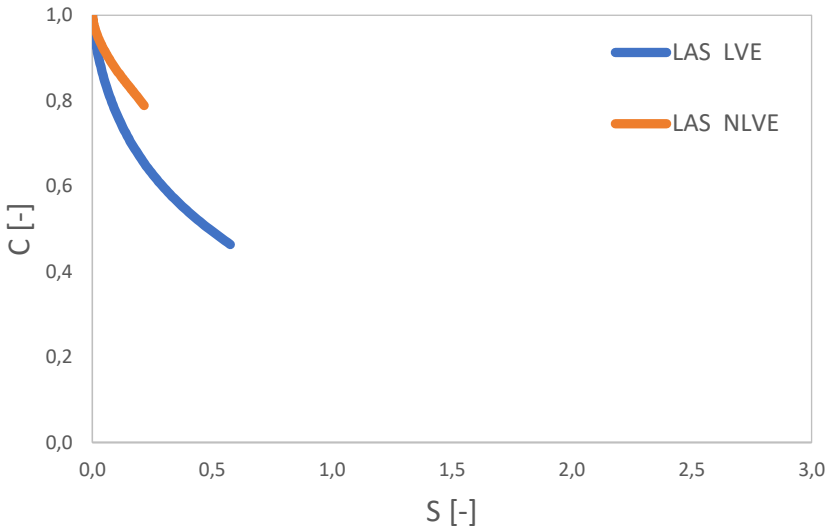

Figura 59: Confronto DCC di prove LAS prima e dopo aver considerato la non-linearità – Bitume T - T=20 °C

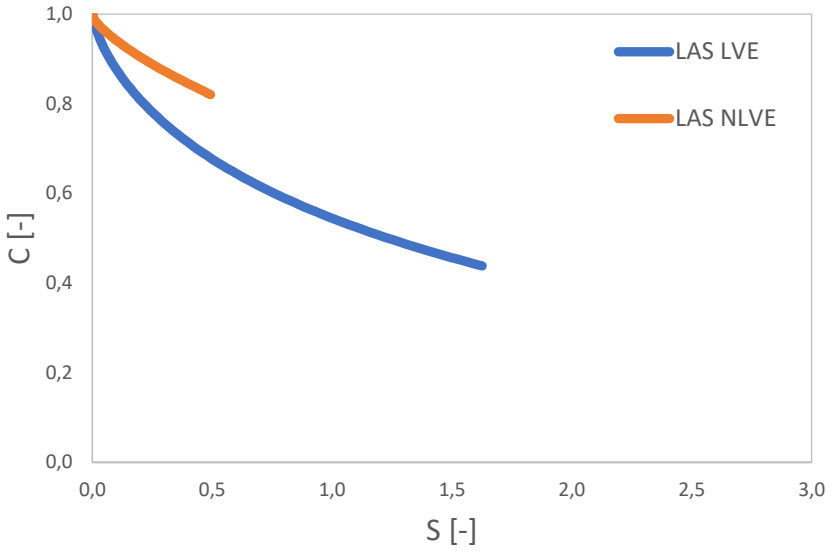

Figura 60: Confronto DCC di prove LAS prima e dopo aver considerato la non-linearità – Bitume M - T=20 °C

Osservando le Figure 59 e 60, si nota che eliminando la non-linearità, l'integrità aumenta e il danno cumulato si riduce. Dunque, la curva che si ottiene descrive la perdita d'integrità dovuta esclusivamente al danneggiamento che il materiale ha subito. Nell'analisi precedente dunque, tale perdita era sopravvalutata.

Considerando l'effetto della non-linearità sulle curve caratteristiche di danno di prove LASH, una volta sottratto l'effetto dell'indurimento sterico, si osserva anche in questo caso un incremento dell'integrità e una riduzione del danno cumulato, in entrambe le fasi di carico, sia con riposo di trenta minuti che in assenza di quest'ultimo.

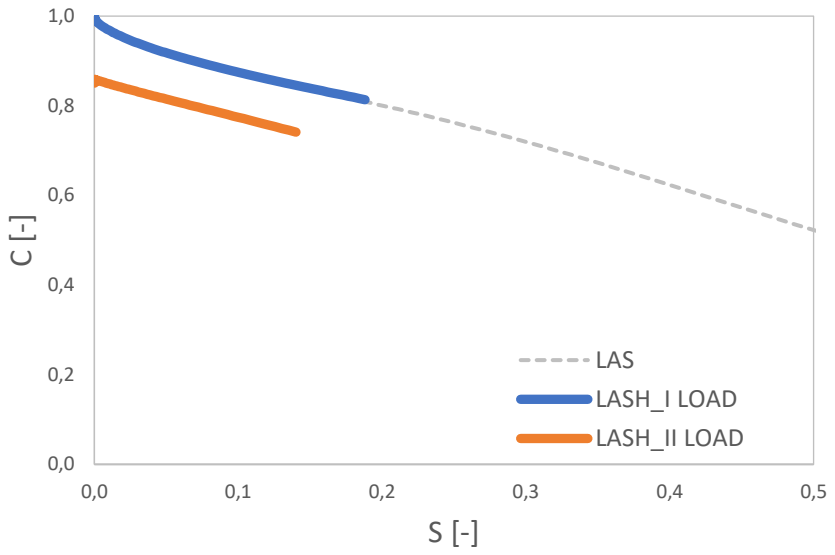

Figura 61: DCC di una prova LASH in assenza di periodo di riposo e considerando la non-linearità - Bitume T-T =20 °C

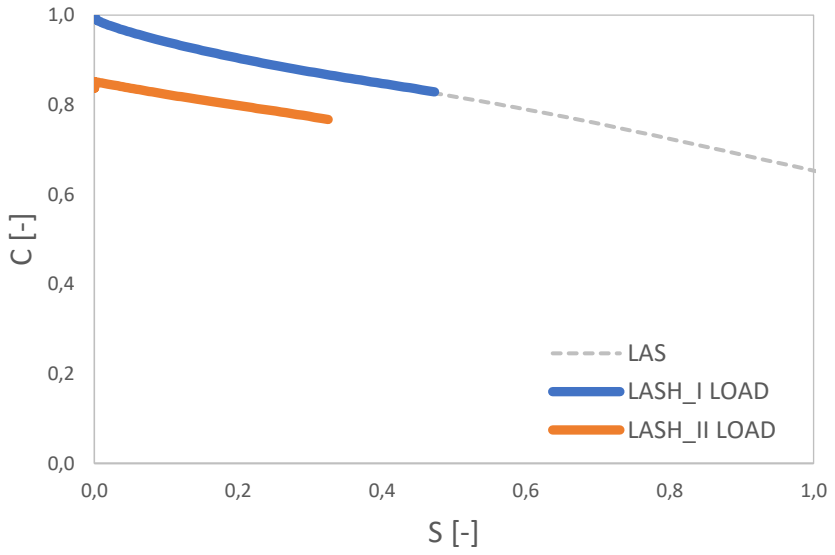

Figura 62: DCC di una prova LASH in assenza di periodo di riposo e considerando la non-linearità - Bitume M-T= 20 °C

Nelle Figure 61 e 62, come in campo viscoelastico lineare, anche una volta depurata la perdita d'integrità dalla non-linearità, si osserva il

danneggiamento del campione, nella seconda fase di carico, quando il periodo di riposo è nullo.

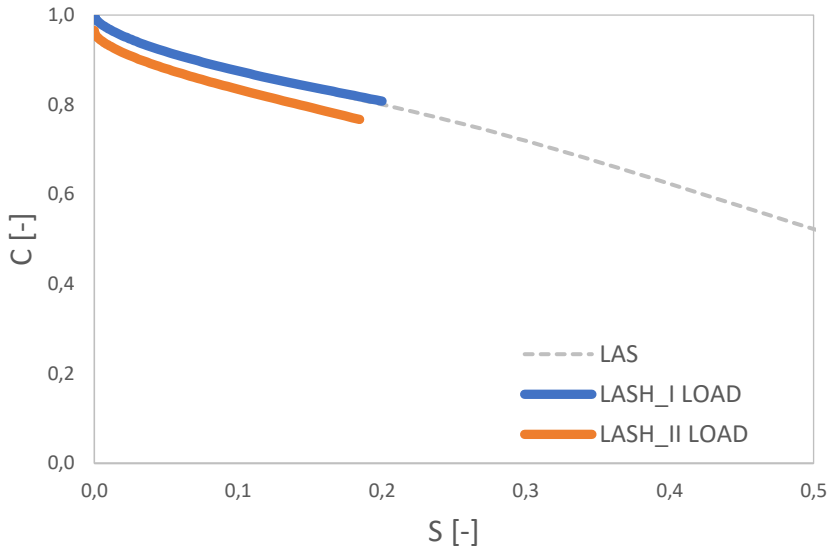

Figura 63: DCC di una prova LASH con periodo di riposo di 30 minuti e considerando la non-linearità – Bitume T- T=20 °C

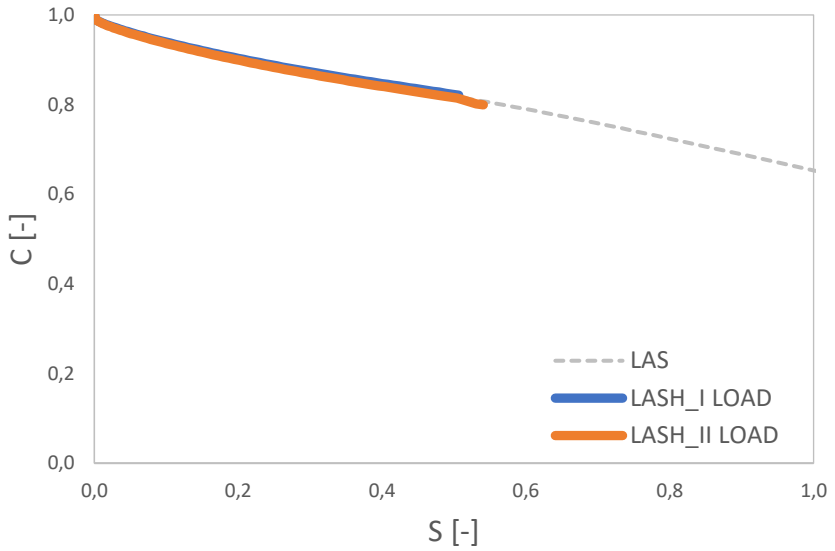

Figura 64: DCC di una prova LASH con periodo di riposo di 30 minuti e considerando la non-linearità – Bitume M- T=20 °C

Nella Figura 63, relativa alla DCC della prova LASH con riposo di trenta minuti, per il bitume tradizionale, alla temperatura di 20 °C, depurando

l'effetto della non linearità si osserva che la seconda curva di carico non si sovrappone più alla prima. Nella Figura 64, per il bitume modificato si ha la completa sovrapposizione delle due curve, una volta depurando i dati dal contributo della non linearità, come nel caso viscoelastico lineare.

Come fatto in precedenza, sono stati valutati i valori dell'indice di autoriparazione sia in termini di integrità del materiale HI_C che di danno HI_S. Le formule sono le medesime a quelle viste nel paragrafo 4.6.1.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti di tali indici, una volta depurata l'analisi anche dal contributo della non linearità.

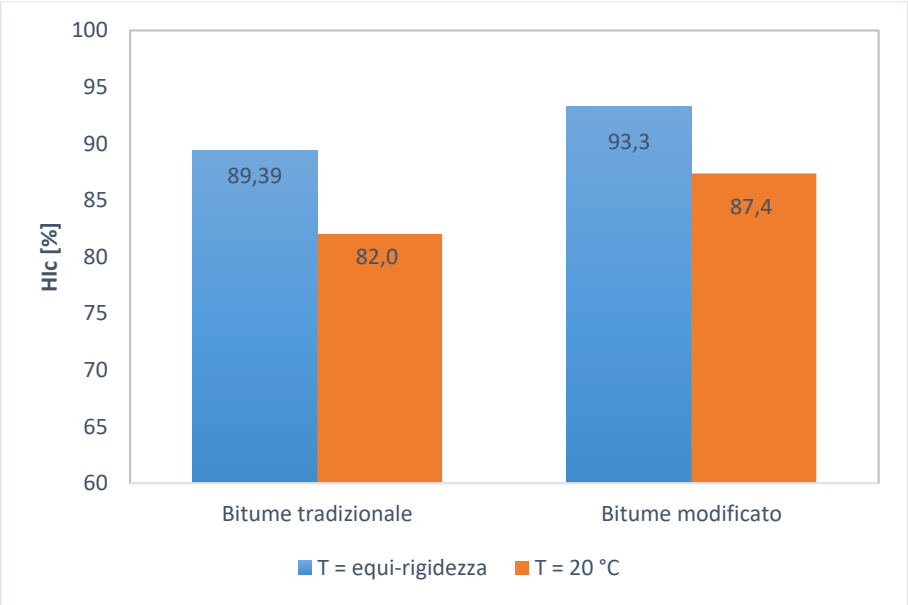

Figura 65: Istogramma valori HIc depurati dalla non-linearità

Osservando la Figura 65, si nota che depurando l'analisi anche dalla non linearità l'indice di autoriparazione HI_C è di poco maggiore, per entrambi i bitumi analizzati, alla temperatura di equi-rigidezza. Dunque, alla temperatura di equi-rigidezza, a seguito di un periodo di riposo di trenta minuti, i due materiali riescono a recuperare una quantità maggiore di integrità andata persa nella prima fase di carico. Confrontando invece, i due materiali, si può notare che il bitume modificato presenta dei

valori di HI_C maggiori del bitume tradizionale. In analogia a quanto visto nel paragrafo 4.6.1.

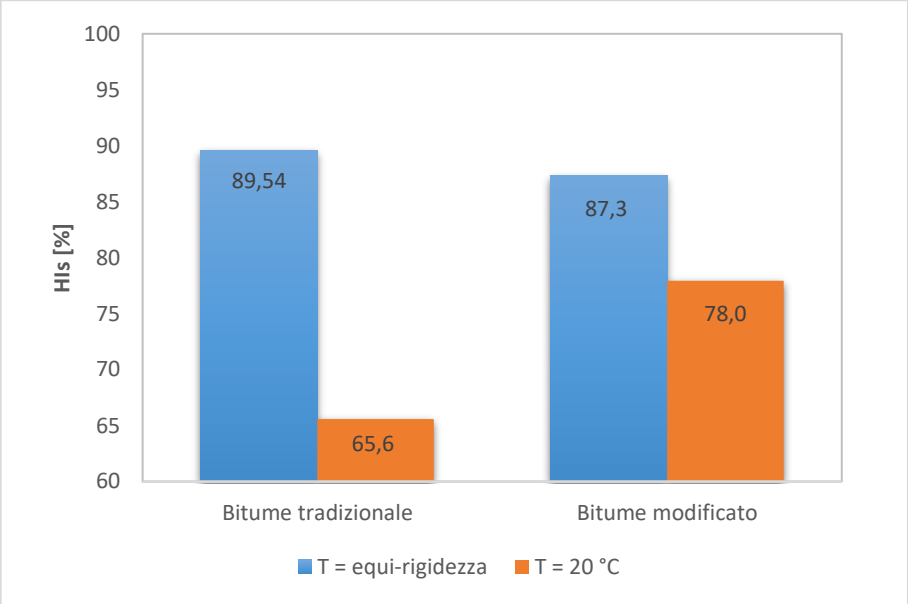

Figura 66:Istogramma valori HIs depurati dalla non-linearità

Osservando l'istogramma in Figura 67 si può notare che considerando l'indice HI_S, una volta sottratto il contributo della non linearità, la distinzione sul potenziale di autoriparazione dei due materiali, alle due temperature è decisamente più marcata. I due bitumi riescono ad accumulare una quantità di danno maggiore, dopo il periodo di riposo, alle temperature di equi-rigidità, mentre facendo una distinzione tra i due materiali, si osserva che il bitume modificato sviluppa una maggiore autoriparazione, rispetto al bitume tradizionale, coerentemente con quanto ottenuto mediante l'utilizzo del precedente indice e quanto visto nel paragrafo 4.6.1.

Confrontando i valori degli indici di autoriparazione ottenuti nel paragrafo 4.6.1, con tali indici, si denota l'importanza degli effetti prodotti della non-linearità. Infatti, si osserva che assumendo un comportamento viscoelastico lineare, anche quando i livelli deformativi sono elevati, ciò porti ad una sovrastima dell'effetto prodotto dall'autoriparazione, in quanto, si sviluppa

una maggiore perdita d'integrità nella prima fase di carico e un recupero anch'esso maggiore dell'integrità nella seconda fase di carico. Allo stesso modo, in termini di danno, in campo viscoelastico lineare, il materiale riesce nella seconda fase ad accumulare una quantità maggiore di danneggiamento. Questo porta ad ottenere dei valori di indici di autoriparazione maggiori. Tali incrementi, una volta introdotta la non linearità, risultano fittizi, infatti si osservano dei valori degli indici di autoriparazione minori. Quanto osservato, sottolinea l'importanza nel dover considerare, nella valutazione del potenziale di autoriparazione, gli effetti prodotti dalla non linearità.

5 CONCLUSIONI

Nello studio sperimentale descritto nel presente elaborato di tesi, basato sull'utilizzo del modello Semplificato del Danno Continuo Viscoelastico applicato a prove di fatica, indurimento sterico e autoriparazione, i risultati ottenuti sottolineano l'importanza degli effetti prodotti dalla sovrapposizione tempo-temperatura, dell'indurimento sterico e della non-linearità nella valutazione della capacità di autoriparazione dei leganti bituminosi. La peculiarità dell'analisi risiede nell'aver considerato tutti questi aspetti, riuscendo a cogliere i soli effetti prodotti dal processo di autoriparazione.

In particolare:

- l'applicazione del principio di sovrapposizione tempo-temperatura nel modello S-VECD, su prove LAS, ha portato alla sovrapposizione delle curve caratteristiche di danno, valutate a diverse temperature, alla curva valutata alla temperatura di riferimento. Questo ci ha permesso di discriminare la dipendenza non solo dalle condizioni di carico, ma anche della temperatura, nella perdita d'integrità del materiale durante il danneggiamento, anche in campo non-lineare;
- le prove LAS-SH hanno evidenziato l'importanza del fenomeno tempo-dipendente, quale l'indurimento sterico, nell'incremento di rigidità del legante, applicando un periodo di riposo prima della prova LAS. Ricavando il parametro a_{SH} da tali prove e applicandolo al modello S-VECD, per la valutazione della DCC relativa alla seconda fase di carico di prove LASH, è stato possibile sottrarre tale contributo al recupero complessivo di rigidità raggiunto nelle prove di autoguarigione, potendo così ricavare l'incremento delle proprietà meccaniche dovuto alla sola capacità curativa del legante;
- l'applicazione, mediante le prove svolte, ad elevati livelli deformativi, fa sì che non tutta la perdita d'integrità, valutata con il modello

S-VECD, sia imputabile al danneggiamento, in quanto, in tali condizioni si sviluppano processi reversibili dovuti alla non linearità. I risultati ottenuti dall'analisi hanno evidenziato l'importante contributo della non linearità. Isolando il danno infatti, si è osservata una riduzione della perdita d'integrità e del danno accumulato sia nelle prove LAS, che nelle prove LASH, in quest'ultimo caso, in entrambe le fasi di carico.

La valutazione dei due indici di autoriparazione HI_C in termini di integrità e HI_S in termini di danno, dapprima valutati considerando solo gli effetti prodotti dalla sovrapposizione tempo-temperatura e dell'indurimento sterico, e solo dopo tenendo in conto anche della non-linearità, ha permesso di sviluppare un confronto tra le capacità di autoriparazione dei due materiali analizzati durante la sperimentazione, alle diverse temperature considerate.

In particolar modo:

- entrambi i materiali mostrano dei valori di HI_C e HI_S maggiori a temperature più basse;
- il bitume modificato esibisce una capacità di autoriparazione prevalente a quella del bitume tradizionale;
- isolando il danno anche dagli effetti di non-linearità, si assiste ad una riduzione della capacità di autoriparazione di entrambi i materiali, a tutte le temperature. In particolare, risulta più accentuato l'abbattimento dell'indice di autoriparazione in termini di danno accumulato.

La validazione del modello richiede l'applicazione del protocollo di prova e dei metodi d'analisi adottati a un set di materiali più ampio. Inoltre, l'approccio proposto potrebbe essere applicato, in studi futuri, alle miscele e ai mastici.

BIBLIOGRAFIA

[1] L. T. O. B. &. E. S. Fabrizio Miglietta, «Investigating the effect of temperature on self-healing properties of neat and polymer-modified bituminous binders,» *Road Materials and Pavement Design,* pp. 1-2 , 2021.

[2] «The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review,» *Journal of Cleaner Production,* vol. 113, pp. 28-40, 2016.

[3] O. B. L. T. D. D. Ezio Santagata, «Evaluation of self healing properties of bituminous binders taking into account steric hardening effects,» *Construction and Building Materials,* vol. 41, pp. 60-67, 2013.

[4] M. Ashouri, «Modeling Microdamage Healing in Asphalt Pavements Using Continuum Damage Theory,» North Carolina, 2014.

[5] L. T. O. B. E. S. Fabrizio Miglietta, «new approach for the evaluation of time–temperature superposition effects on the self-healing of bituminous binders,» *Construction and Building Materials,* 2021.

[6] D. S. A. G. M. F. C. E. G. Guoqiang Sun, «Low temperature self-healing character of asphalt mixtures under different fatigue damage degrees,» *Construction and Building Materials,* vol. 223, pp. 870-882, 2019.

[7] X. Z. F. Y. J. X. Daquan Sun. Guoqiang Sun, «Intrinsic temperature sensitive self-healing character of asphalt binders based on molecular dynamics simulations,» *Fuel,* vol. 211, pp. 609-620, 2018.

[8] M. C. a. J. A. Sánchez, «Fatigue and Healing of Asphalt Mixtures:Discriminate Analysis of Fatigue Curves,» *Journal of Transportation Engineering,* vol. 136, pp. 105-182, 2006.

[9] Z. ZHANG, «identification of suitable crack growth law for asphalt mixtures using the superpave indirect tensile test (idt),» university of florida, 2000.

[10] A. H. e. D. Little, «adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond,» Aggregates Foundation for Technology, Research and Education, Texas, 2005.

[11] S. G. GEMELLI, «Indagine sperimentale sulle proprietà di autoriparazione di leganti bituminosi attraverso prove in scansione lineare di deformazione,» Torino, 2021.

[12] v. aramini, «autoriparazione di leganti bituminosi:influenza della temperatura e del tempo di riposo,» torino, 2018-2019.

[13] A. V. A. G. A. S. Francesco Canestrari, «Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders,» *International Journal of Fatigue,* vol. 70, pp. 351-360, 2015.

[14] L. T. E. S. Orazio Baglieri, «Evaluation of healing potential of bituminous binders using a viscoelastic continuum damage approach,» *Construction and Building Materials,* vol. 184, pp. 344-350, 2018.

[15] J. P. B. C. I. S. B. K. L. V. a. L. L. B. B. André K. Kuchiishi, «Effect of temperature on the fatigue behavior of asphalt binder,» *De Gruyter,* pp. 1-11, 2019.

[16] C. C. W. R. K. Wei Xie, «A framework to characterize the healing potential of asphalt binder using the linear amplitude sweep test,» *Construction and Building Materials,* vol. 154, pp. 771-779, 2017.

[17] C. C. Farinaz Safaei, «Material nonlinearity in asphalt binder fatigue testing and analysis,» *Materials and Design,* vol. 133, pp. 376-389, 2017.

[18] F. Fornara, «Indagine sperimentale sul comportamento dei leganti bituminosi in campo viscoelastico non lineare,» Torino, 2020/2021.

[19] C. C. A. B. G. Parla, «una procedura automatizzata per la determinazione delle curve maestre di bitumi per uso stradale,» *meccanica dei materiali e delle strutture,* vol. 4, pp. 46-60, 2014.

[20] S. B. U. F. M. P. P. R. O. B. e. E. S. Lucia Tsantilis, «Ageing effects on the linear and nonlinear viscoelasticity of bituminous binders,» *Road Materials and Pavement Design,* vol. 22, 2021.

[21] P. P. Riviera, Materiale didattico, Costruzioni di Strade, Ferrovie ed Aereporti, 2019/2020.

[22] F. Safaei, «Semplification of Linear Amplitude Sweep Test Temperature and Modeling Temperature Effects on Asphalt Binder Fatigue,» *Transport Research Record Jurnal ,* 2016.

[23] F. S. ·. C. C. ·. Y. R. Kim, «Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling,» *Springer,* 2016.