POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Indagine sperimentale sul comportamento dei leganti bituminosi in campo viscoelastico non lineare

Relatore

Prof. Ezio Santagata

Correlatori

Prof. Orazio Baglieri

Ing. Lucia Tsantilis

Ing. Fabrizio Miglietta

Candidata

Federica Fornara

A.A. 2020/2021

Sommario

Indice delle figure **4**
Indice delle tabelle **7**
INTRODUZIONE **8**
1. STATO DELL'ARTE **11**
2. REOLOGIA **15**
2.1 Caratterizzazione in campo viscoelastico lineare 16
2.1.1 Principio di sovrapposizione tempo – temperatura (TTSP) *16*
2.1.2 Modello Christensen – Anderson – Marasteanu *17*
2.1.3 Curva Maestre *18*
2.1.4 Modelli meccanici analogici *21*
2.1.4.1 Modello di Maxwell *22*
2.1.4.2 Modello generalizzato di Maxwell *23*
2.1 Caratterizzazione in campo viscoelastico non lineare 25
2.2 Strumentazione reologica 26
2.2.1 Dynamic Shear Rheometer (DSR) *26*
3. PROGRAMMA SPERIMENTALE **29**
3.1 Leganti bituminosi 29
3.1.4 Materiali *29*
3.1.5 Origini e caratteristiche chimiche *29*
3.2 Protocollo di prova 32
3.3 Descrizione dei test 36
3.3.4 Campo viscoelastico lineare: Frequency Sweep Test *36*
3.3.5 Campo viscoelastico non lineare: Multiple Strain Sweep Test *36*
4. ANALISI SPERIMENTALE **38**
4.1 Caratterizzazione lineare 38
4.2 Caratterizzazione non lineare 44
5. MATLAB **60**
5.1 Origine e storia del softwar 60
5.2 Strutturazione del programma 61
5.3 Strutturazione dei file Excel 71
5.3.1 FS.xlsx *72*
5.3.2 data.xlsx* *73*
5.3.3 collocationmethod.xlsx *75*
5.3.4 lve_data.xlsx *76*

5.4 Funzionamento del programma 77
5.5 Main.m 79
5.6 Interfaccia.m 79
5.7 Plot.m 86
5.8 Modellocam.m 89
5.9 Analisimat.m 91
5.10 Gnormalized.m 97
5.11 Mastercurvenlve.m 102
6. CONCLUSIONI 107
BIBLIOGRAFIA 108
SITOGRAFIA 110

Indice delle figure

Figura 2.1 - Costruzione di una curva maestra secondo il principio di sovrapposizione tempo - temperatura TTSP (Yusoff, Shaw e Airey, 2011) 17

Figura 2.2 Modello CAM (Yusoff, Shaw, Airey, 2011) 18

Figura 2.3 Curva Maestra (Yusoff, Shaw, Airey 2011) 19

Figura 2.4 Prove in regime oscillatorio (Santagata, Materiale didattico) 20

Figura 2.5 Modello di Maxwell (Epaarachchi,2017) 22

Figura 2.6 geometria sistema piatto - piatto (Strade, Santagata F.A. Materiale didattico) 27

Figura 2.7 geometria sistema piatto - cono (Strade, Santagata F.A, Materiale Didattico) 27

Figura 3.1 Schema colloidale di Nellensteyn (Santagata A.F., Materiale didattico) 30

Figura 3.2 Rappresentazione di un sistema Sol (A - sinistra) e di un sistema Gel (B - destra) (Ayer et al,2016) 31

Figura 3.3 Strumento DSR(a sinistra) e sistema di misurazione piatto – piatto(destra) 33

Figura 3.4 Fase 1: pulizia del casserino 34

Figura 3.5 Fase 2: Pre inserimento nel forno 34

Figura 3.6 Fase 3:Post trattamento termico 34

Figura 3.7 Campione estratto dal freezer 35

Figura 3.8 Provino in configurazione di prova a seguito della rasatura 35

Figura 3.9 Schema di prova a scansione di deformazione (Underwood, 2015) 36

Figura 4.1 Curva maestra della norma del modulo complesso dei 4 campioni analizzati 40

Figura 4.2 Curva maestra dell'angolo di fase dei 4 campioni analizzati 40

Figura 4.3 Curva maestra della norma del modulo complesso con il modello di Maxwell generalizzato dei 4 campioni 44

Figura 4.4 Curva maestra della norma del modulo complesso con il modello di Maxwell generalizzato dei 4 campioni 44

Figura 4.5 Multiple Strain Sweep Test 45

Figura 4.6 Bitume N1 - Dati sperimentali ottenuti con Multiple Strain Sweep Test 47

Figura 4.7 Bitume N1 - Shitfed Curve alla temperatura di 10°C, seconda ripetizione ... 48

Figura 4.8 Bitume N1 - Modulo complesso non lineare in funzione della deformazione 49

Figura 4.9 Bitume N2 -Modulo complesso non lineare in funzione della deformazione 49

Figura 4.10 Bitume S1 - Modulo complesso non lineare in funzione della deformazione 50

Figura 4.11 Bitume S2 -Modulo complesso non lineare in funzione della deformazione 50

Figura 4.12 Curva maestra NL - materiale N1 53

Figura 4.13 Curva maestra NL - Materiale N2 54

Figura 4.14 Curva maestra NL -Materiale S1 54

Figura 4.15 Curva maestra NL - Materiale S2 55

Figura 4.16 Shift factor NL orizzontale a 58

Figura 4.17 Shift factor h vertical 59

Figura 5.1 Finestra di creazione d'interfaccia GUI (Matlab) 62

Figura 5.2 Finestra di creazione GUI - Matlab 62

Figura 5.3 Radio Button selezionato a sinistra e deselezionato a destra 63

Figura 5.4 Pop-Up Menu: a sinistra si seleziona il materiale e a destra la temperatura 63

Figura 5.5 Push Button: a sinistra il Run e a destra il tasto di Exit 63

Figura 5.6 Push Button: elimina le figure 64

Figura 5.7 Logo del Politecnico di Torino 64

Figura 5.8 Apertura della finestra di interfaccia all'esecuzione del programma 64

Figura 5.9 Esempio di output della funzione Plot.m 65

Figura 5.10 Messaggio di errore se il materiale dovesse subire rottura 66

Figura 5.11 Dialog Box per l'utente durante l'esecuzione della funzione Modellocam.m 67

Figura 5.12 Curva maestra del materiale N1 modellata con il modello CAM 67

Figura 5.13 Risultati dell'analisi del file Analisimat.m del materiale N1 alla temperatura di prova 22°C 68

Figura 5.14 Risultati dell'analisi del file Analisimat.m del materiale N1 alla temperatura di prova 22°C 68

Figura 5.15 Risposta all'analisi Gnormalized.m del materiale N1 alle varie temperature 69

Figura 5.16 Risposta del materiale N1 alla prima parte di elaborazione dei dati utilizzando il modello generalizzato di Maxwell 70

Figura 5.17 Curva maestra del materiale N1 elaborata dal codice Mastercurvenlve.m 71

Figura 5.18 Menu Editor di Matlab 77

Figura 5.19 Opzioni di debugging in Matlab 77

Figura 5.20 Inserire il Breakpoint nel codice sorgente 78

Figura 5.21 Tasto Run per avviare il programma 78

Figura 5.22 Workspace con i dati inerenti all'analisi 78

Figura 5.23 Fine esecuzione di Debugging 79

Indice delle tabelle

Tabella 4.1 Modellazione dei dati in campo LVE con il modello CAM..... 39

Tabella 4.2 Termini di Prony per il materiale N1..... 41

Tabella 4.3 Termini di Prony per il materiale N2..... 42

Tabella 4.4 Termini di Prony per il materiale S1 42

Tabella 4.5 Termini di Prony per il materiale S2 43

Tabella 4.6 Parametri CAM per il materiale N1 in campo NL 52

Tabella 4.7 Parametri CAM per il materiale N2 in campo NL 52

Tabella 4.8 Parametri CAM per il materiale S1 in campo NL 52

Tabella 4.9 Parametri CAM per il materiale S2 in campo NL 53

Tabella 4.10 Coefficienti delle funzioni polinomiali dei due shift factor NL 56

Tabella 4.11 Shift factor NL per i bitumi tradizionali N1 e N2..... 57

Tabella 4.12 Shift factor NL per i bitumi modificati S1 e S2..... 57

Tabella 5.1 Struttura del file FS.xlsx..... 72

Tabella 5.2 Strutturazione del file data1.xlsx per il materiale N1 75

Tabella 5.3 Valori arbitrati per il tempo di rilassamento adottato nel collocation Method 76

Tabella 5.4 Tabella lve_data.xlsx 76

INTRODUZIONE

I leganti bituminosi sono materiali viscoelastici, il cui comportamento dipende dal tempo e dalla temperatura. Tali materiali esibiscono un comportamento non lineare nei casi in cui l'ampiezza dell'input applicato ecceda valori caratteristici di soglia, che determinano il superamento del campo di linearità. L'approccio sperimentale comunemente condotto dai ricercatori si focalizza sul comportamento viscoelastico lineare e laddove gli effetti non lineari influenzano la risposta del materiale, si è soliti assumere per semplicità concettuale e analitica un comportamento lineare che trascuri gli effetti non lineari. Negli ultimi anni, la ricerca sperimentale si è però concentrata sul tema della non linearità, con l'obiettivo di poter comprendere la risposta del materiale una volta superata la frontiera viscoelastica lineare. La caratterizzazione non lineare può essere sviluppata secondo i differenti protocolli di prova e metodi di analisi, che nello specifico del presente elaborato, prevedono lo studio preliminare della risposta in campo lineare ed estendono l'analisi al campo non lineare.

Il presente lavoro di tesi affronta il tema della non linearità di quattro leganti bituminosi, di cui due materiali tradizionali e due leganti modificati attraverso prove di laboratorio effettuate con il reometro rotazionale a taglio (*Dynamic Shear Rheometer*) in regime oscillatorio.

Dapprima è stato necessario caratterizzare la risposta in campo viscoelastico lineare attraverso prove in scansione di frequenza, i cui dati sono stati simultaneamente traslati e modellati con il principio di sovrapposizione tempo – temperatura e il modello Christensen – Anderson -Marasteanu (CAM), al fine di costruire le curve maestre della norma del modulo complesso e dell'angolo di fase. La risposta viscoelastica lineare è stata modellata attraverso il modello generalizzato di Maxwell con discretizzazione in serie di Prony.

Successivamente, la caratterizzazione in campo viscoelastico non lineare è stata determinata eseguendo prove in scansione di deformazione con lo scopo di discriminare la componente non lineare da meccanismi associati al danneggiamento. La modellazione dei dati ha infine permesso la costruzione delle curve maestre in campo

non lineare e la definizione di opportuni fattori traslazionali dipendenti dall'ampiezza di deformazione, per ridurre la risposta non lineare a quella lineare. I dati grezzi sono stati analizzati dapprima con l'applicativo Excel e successivamente integrati all'interno del programma di calcolo Matlab, al fine di verificare i risultati ottenuti e validare il modello di analisi non lineare adottato.

Il presente lavoro di tesi è stato strutturo in diversi capitoli, trattando differenti tematiche. La seguente suddivisione viene riportata di seguito.

Il capitolo 1 tratta la storia dell'arte, descrivendo come i ricercatori sono passati dalla caratterizzazione dei leganti bituminosi dal campo viscoelastico lineare al campo non lineare, soffermandosi sugli effetti di non linearità.

Il capitolo 2 riporta le basi delle applicazioni analitiche utilizzate in questo lavoro di tesi per modellare i dati sperimentali sia in campo viscoelastico lineare sia non lineare. In campo viscoelastico lineare, la prima trattazione dei dati viene eseguita con il principio di sovrapposizione tempo – temperatura, vista la natura viscoelastica dei leganti bituminosi che possiedono un comportamento reologicamente semplice. Attraverso l'uso dell'equazione di William – Landel – Ferry (WLF) permette di definire la traslazione necessaria dei rami valutati a differenti temperature rispetto alla temperatura di riferimento. Successivamente, per completare l'operazione di fitting viene adottata l'equazione del modello di Christensen – Anderson – Marasteanu (CAM). Infine, per descrivere la risposta in campo viscoelastica lineare si introduce il Modello Generalizzato di Maxwell con discretizzazione delle Serie di Prony, per ottenere i valori della norma del modulo complesso e angolo di fase nel dominio viscoelastico lineare.

Invece, in campo viscoelastico non lineare prevede l'introduzione di due shift factor non lineari che consentono la costruzione delle curve maestre non lineari.

Il capitolo 3 affronta l'intero processo sperimentale, descrivendo lo strumento reologico impiegato e le metodologie utilizzate nella preparazione dei campioni sperimentali.

Il capitolo 4 discute l'analisi sperimentale a partire dai risultati ottenuti dalle prove sperimentali.

Il capitolo 5 introduce una nuova metodologia di software impiegata nell'analisi, ovvero Matlab. Non solo si descrive la storia di come è nato questo programma di linguaggio,

ma anche come è stato strutturato l'intero programma di calcolo per svolgere l'analisi sperimentale e il suo relativo codice.

Infine, il capitolo 6 che discute delle conclusioni tratte da questo presente lavoro di tesi e dei confronti tra i vari materiali analizzati.

1. STATO DELL'ARTE

Le pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso sono giornalmente sottoposte a cicli di carico non continui dovuti alla natura intermittente del traffico stradale e a fattori esterni, quali il tempo e la temperatura. Questi tre fattori influiscono negativamente sulle prestazioni funzionali e sulla vita delle pavimentazioni stesse, determinando la formazione delle prime micro-cricche che pian piano si trasformano nelle tipiche fessurazioni da fatica. La fatica è la principale causa di deterioramento. La resistenza a fatica può essere valutata osservando la variazione di rigidità del materiale che costituisce le pavimentazioni e inoltre, la si può quantificare come il numero massimo di cicli di carico che una pavimentazione è in grado di resistere, fino al raggiungimento della rottura.

Fin dagli esordi sulle prime ricerche sperimentali sui leganti bituminosi, i ricercatori si sono soffermati sulle peculiarità di questi materiali: la viscoelasticità. I bitumi si distinguono per il loro comportamento dipendenti dal tempo e dalla temperatura e per questo motivo, anche per semplicità concettuale, si sono adottati dei modelli tali che potessero equipararli a semplici materiali elastici permettendo di stimare il danneggiamento dovuto alla fatica nel campo delle piccole deformazioni. In questa maniera, si ignora qualsiasi effetto su scala microscopica, quali il tempo, gli effetti viscoelastici e di non linearità, focalizzandosi esclusivamente sullo studio della linearità.

Le analisi sperimentali di caratterizzazione dei materiali si è così soffermata sullo studio del comportamento in campo viscoelastico lineare in cui è valido il seguente principio: se un bitume venisse sottoposto a un carico oscillatorio continuo, si registrerebbe un valore di modulo di taglio dinamico direttamente proporzionale allo sforzo applicato. Qualora si dovessero superare i limiti del campo LVE, il bitume entra nel campo viscoelastico non lineare cambiando il suo comportamento.

Lo strumento reologico più comunemente affiancato a queste ricerche sperimentali è il reometro rotazionale a taglio dinamico DSR, in grado di conferire la perdita di integrità del materiale al danneggiamento per fatica con una sovrastima del danno stesso sui campioni testati. Secondo il Superpave Perfomance Grading (PG), per piccole

applicazioni di livelli di carico e restando nel campo viscoelastico lineare, il miglior parametro per quantificare la fatica sia $|G^*|sin\delta$. Lo svantaggio che ne deriva utilizzando questa quantità è che, per via di come vengono raccolti i dati sperimentali, non è realmente in grado di definire la resistenza del danneggiamento a fatica che è a sua volta funzione del traffico stradale e dei fenomeni ambientali.

Safei et al. (Safei et al. 2017) si concentrò su un tema che fino ad ora in campo scientifico non era mai stato discusso, ma sempre trascurato: la non linearità. Attraverso alcune ricerche sperimentali, cercò di capire come gli effetti di non linearità potessero essere inglobati nei modelli viscoelastici lineari già esistenti con lo scopo di dare una chiara definizione di quei fenomeni, per i quali non è più lecita l'assunzione di linearità se i materiali fossero sottoposti a elevati cicli di carico. La quantificazione della norma del modulo complesso in campo viscoelastico non lineare non può essere sviluppata secondo le metodologie adottate in campo lineare, quali la temperatura e i test a scansione di frequenza, ma sono richieste apposite procedure sperimentali avvalendosi dell'ausilio di un reometro rotazionale DSR. Si eseguirono due tipologie differenti per la caratterizzazione non lineare: Multiple Strain Sweep Test (MSS) e la prova di Incremental Stress or Strain Sweep Test. La prima è una prova in scansione di deformazione, eseguita a una prefissata frequenza che viene mantenuta costante a differenza dell'ampiezza di deformazione che viene incrementata da un gruppo a un altro. La peculiarità di questo test è il fatto di essere costituita da blocchi, scansioni di deformazioni, e da gruppi composti da una serie di blocchi ripetuti. La modalità con cui vengono registrati i valori della norma del modulo complesso, permette di isolare la componente reversibile della non linearità dalla componente irreversibile, attribuita ad altri meccanismi assunti dal danno.

Underwood e Kim (Underwood et al. 2015) introdussero un apposito fattore di correzione denominato CF, in grado di determinare il reale valore della norma del modulo complesso isolando il danno definito come:

$$CF = \frac{|G^*|_{MSS}}{|G^*|_{NLVE}} \quad (1)$$

Dove $|G^*|_{MSS}$ è la norma del modulo complesso misurato dalla prova di Multiple Strain Sweep, mentre $|G^*|_{NLVE}$ è la norma del modulo complesso non lineare. Generalmente,

tale coefficiente assume valori compresi tra lo zero e l'unità, mantenendosi costante all'interno di un blocco e cambiando valore solamente al passaggio tra un gruppo e l'altro. Un valore unitario del coefficiente determina che il materiale non si danneggia.

La seconda, la prova di Incremental Stress or Strain Sweep Test permette di valutare se il campione accumula del danno, ma si differenzia dalla precedente, perché in questo caso applicando dei carichi ciclici ripetuti crescenti si aumentata l'ampiezza di sollecitazione, ma mantiene sempre costante la frequenza. Se la risposta monitorata si mantiene costante, il provino è esente dal danneggiamento, invece se la risposta aumenta con l'aumentare del numero di cicli di carico, il campione comincia ad accumulare dei danni incrementali. Si assume, per convenzione, che un campione si stia danneggiando se la variazione della deformazione misurata tra l'inizio e la fine del blocco di sollecitazione sia maggiore del 5%.

Mettendo a confronto le due tipologie di analisi, si può giungere alla conclusione che la prova di Incremental Strain or Sweep Test registra valori della norma del modulo complesso decisamente inferiori. Questa conclusione deriva dall'ipotesi che se la norma del modulo rimane costante con l'aumentare del numero di cicli di carico, il danno non si stia accumulando. Di conseguenza, è fortemente consigliata per la caratterizzazione della norma del modulo complesso non lineare il test a scansione di deformazione, poiché più corretto e preciso nella valutazione degli effetti di non linearità.

Tsantilis et al. (Tsantilis et al 2021) cercarono di validare il metodo sperimentale precedentemente proposto per indagare sugli effetti della non linearità, sia su campioni vergini sia invecchiati. Per poter caratterizzare i comportamenti dei leganti bituminosi oggetto di studio in campo non lineare, era prima necessario determinare le risposte di ciascun provino con i protocolli di prova e indagini sperimentali normalmente assunti in campo viscoelastico lineare. Partendo da un'analisi che potesse consentire il frazionamento di ciascun campione per poterlo analizzare da un punto di vista della sua struttura chimica, si è passato alle misurazioni reologiche con l'ausilio del DSR. La prima tipologia di prova effettuata è una prova di Amplitude Sweep che risulta essere fondamentale per definire il limite inferiore e superiore del campo viscoelastico lineare, per poi passare al test in scansione di frequenza. I dati sperimentali sono stati, in un primo momento, traslati e modellati con il principio di sovrapposizione tempo –

temperatura e con il modello Christensen – Anderson – Marastean (CAM), per ottenere i valori della norma del modulo complesso e angolo di fase. Una volta noti questi termini, si è introdotto il Modello Generalizzato di Maxwell con la discretizzazione delle serie di Prony, per descrivere la risposta viscoelastica lineare tramite la norma del modulo complesso LVE e angolo di fase LVE, valori fondamentali per la costruzione delle curve maestre lineari. La caratterizzazione non lineare, invece è stata misurata con delle prove in scansione di deformazione con lo scopo di isolare le componenti non lineari da altri meccanismi associati al danneggiamento. Basandosi sull'assunzione che gli shift factor adottati in campo viscoelastico lineari siano dipendenti dall'ampiezza di deformazione, è possibile estenderli in campo non lineari e la novità, per quanto riguarda la trattazione della non linearità è l'introduzione di un altro fattore traslazionale rispetto a quello già esistente. I coefficienti di non linearità a_γ e h agiscono su due direzioni differenti: il primo in direzione orizzontale sulla frequenza ridotta e il secondo in verticale, sulla norma del modulo complesso.

In questo lavoro di tesi si ripropone di svolgere l'indagine sperimentale effettuata da Tsantilis et al. focalizzandosi sul tema della non linearità: partendo dalla risposta viscoelastica lineare dei materiali analizzati a un prefissato intervallo di temperature e di deformazione, si estende la caratterizzazione in campo non lineare tramite l'introduzione di due shift factor che determineranno i termini della norma del modulo complesso e angolo di fase non lineare: fondamentali per la costruzione delle curve maestre non lineari. Lo scopo di questa tesi è la trattazione degli shift factor non lineari, analizzarli in funzione dell'ampiezza di deformazione per poi valutare ciascun comportamento dei leganti bituminosi attraverso le curve maestre non lineari.

Le trattazioni analitiche sia in campo viscoelastico lineare sia in campo viscoelastico non lineare verranno meglio approfondite nel capitolo 2.

2. REOLOGIA

Per poter caratterizzare le proprietà dei leganti bituminosi si ricorre alla reologia e agli strumenti propri della reologia.

La parola “reologia” si ispira all’aforisma di Simplicio Panta Rei, il cui significato deriva dalla combinazione di due parole greche: "ρεω" che viene tradotto come “tutto scorre” e “λογοο" che significa "parola, scienza". Tale espressione apparve per la prima volta nei primi decenni del XX secolo, in ambito scientifico per definire “lo studio del flusso”.

La reologia è una branca della fisica che studia e valuta le proprietà di flusso dei materiali. In particolare, analizza gli effetti di scorrimento e di deformazione di materiali dipendenti dal tempo e dalla temperatura, a seguito di un’applicazione di una forza. L’applicazione di tale forza viene studiata in relazione della velocità, dell’intensità e della durata.

I leganti bituminosi sono materiali dipendenti dal tempo e dalla temperatura. Per tempi di carico relativamente piccoli o basse temperature assumono un comportamento tipico di un solido elastico, mentre ad alte temperature prevale un comportamento di un fluido Newtoniano. A temperature intermedie, i leganti bituminosi sono caratterizzati da proprietà meccaniche intermedie di tipo viscoelastico.

Per quanto riguarda la strumentazione reologica, in questa tesi si è adoperato il reometro rotazionale effettuando delle prove in regime oscillatorio. I dati grezzi ottenuti dall’analisi sperimentale richiedono la comprensione e la conoscenza dei concetti che stanno alla base della teoria della viscoelasticità.

2.1 Caratterizzazione in campo viscoelastico lineare

In questa tesi si è utilizzato ai fini della ricerca sperimentale un reometro rotazionale, strumento reologico, che ha permesso di collezionare i dati del modulo complesso sia all'interno della risposta del campo viscoelastico lineare LVE sia superando il limite di tale frontiera e ricadendo così in campo viscoelastico non lineare NL. I dati grezzi ottenuti sono stati manipolati con modelli matematici, i quali consentono di descrivere i dati reologici dei leganti bituminosi tradizionali i e modificati con polimeri.

Numerose ricerche sperimentali hanno riscontrato l'esistenza di una relazione fra frequenza e temperatura. Ciò significa che è possibile valutare quantitativamente il comportamento del modulo di qualsiasi legante bituminoso rispetto alla frequenza (o al tempo di caricamento), a qualsiasi temperatura.

2.1.1 Principio di sovrapposizione tempo – temperatura (TTSP)

Il principio di sovrapposizione tempo - temperatura è uno strumento di fondamentale importanza per la valutazione dei dati reologici. Consente di determinare una curva maestra, sia in termini analitici sia grafici, in quanto sfrutta l'equivalenza esistente tra le temperature e le frequenze per ottenere i moduli dei leganti bituminosi. Il campo di applicazione è valido solo per il dominio viscoelastico lineare (LVE).

Secondo questo principio un materiale viene analizzato per un determinato intervallo di frequenze a varie temperature, si seleziona una temperatura di riferimento standard T_0 tra tutte le temperature analizzate e si spostano le curve parallelamente sull'asse delle frequenze ridotte. In questo modo, è possibile costruire una curva continua. Il risultato ottenuto è una curva maestra, definita per un intervallo di frequenze, in grado di rappresentare le proprietà reologiche del materiale. A titolo di esempio, per dare una maggiore comprensione al lettore, si riporta in Fig.2.1 la costruzione della curva maestra applicando i fattori traslazionali.

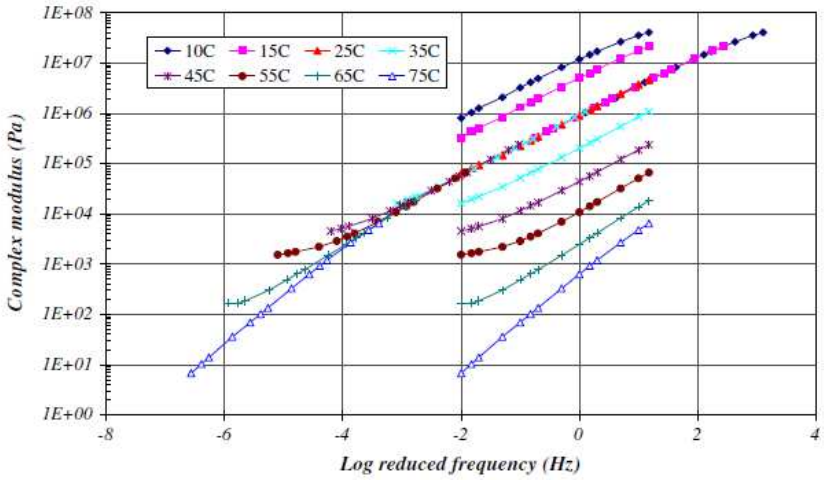

Figura 2.1 - Costruzione di una curva maestra secondo il principio di sovrapposizione tempo - temperatura TTSP (Yusoff, Shaw e Airey, 2011)

Williams et al. (1955) determinarono una relazione empirica tra gli spostamenti orizzontali necessari che ciascuna temperatura deve effettuare per sovrapporre le diverse curve alle diverse temperature, rispetto a una temperatura di riferimento, per ottenere una curva maestra. La quantità richiesta dello spostamento orizzontale si chiama *shift factor* $a(T)$.

L'equazione da cui si ricava il fattore traslazionale orizzontale è di Williams – Landel – Ferry (WLF) e la sua trattazione analitica è la seguente:

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+T-T_0} \qquad (2)$$

Dove C_1 e C_2 sono parametri che dipendono dal materiale analizzato.

2.1.2 Modello Christensen – Anderson – Marasteanu

Il modello Christensen, Anderson e Marasteanu (CAM) è costituito dai seguenti parametri principali:

- Modulo vetroso G_g: assunto pari a 10^9 Pa, rappresenta l'asintoto orizzontale vetroso per cui il materiale ad alte frequenze e/o basse temperature assume un comportamento tipico di un solido elastico;

- Frequenza di crossover ω_c: punto di intersezione tra l'asintoto orizzontale vetroso e l'asintoto obliquo viscoso e consente di determinare la posizione orizzontale della curva maestra nel piano;
- Indice reologico *R*: consente di individuare la forma della curva e definisce la suscettività della risposta del materiale alla frequenza. Si assume $R = \log\left(\frac{|G^*|}{G_g}\right)$;
- Parametro di modello *m*;

questi quattro parametri appena citati consentono di descrivere completamente qualsiasi legante bituminoso analizzato, tramite il valore della norma del modulo complesso e dell'angolo di fase. In Fig. 2.2 vengono rappresentati i quattro parametri appena descritti del modello CAM.

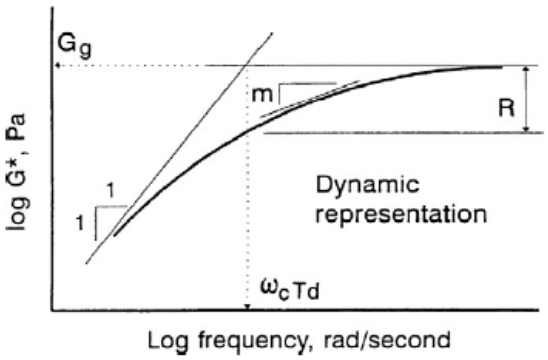

Figura 2.2 Modello CAM (Yusoff, Shaw, Airey, 2011)

Di seguito si riportano le formulazioni matematiche per determinare la norma del modulo complesso e dell'angolo di fase:

$$|G^*(\omega_r)| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega_r}\right)^{\frac{log2}{R}}\right]^{-\frac{mR}{log2}} \quad (3)$$

$$\delta(\omega_r) = \frac{90\ m}{\left[1+\left(\frac{\omega_r}{\omega_c}\right)^{\frac{log2}{R}}\right]} \quad (4)$$

2.1.3 Curva Maestre

In campo viscoelastico lineare, la costruzione di una curva maestra LVE avviene attraverso la manipolazione dei dati sperimentali, eseguendo una prova a scansione di

frequenza, denominata *Frequency Sweep,* con il reometro rotazionale. I dati ottenuti vengono successivamente modellati con formulazioni analitiche, per descrivere le caratteristiche reologiche dei leganti bituminosi.

La tecnica per determinare una curva maestra si basa sul principio di equivalenza tempo – temperatura (TTSP), per poi adottare un processo di ottimizzazione di *"fitting"* con il modello di Williams – Landel – Ferry (WLF)(Ferry,1980) e infine utilizzare un modello analitico CAM, proposto da Christensen – Anderson – Marasteanu (CAM).

Una curva maestra non è altro che una rappresentazione grafica che permette di raffigurare il comportamento di un legante in un piano bi – logaritmico, a una data temperatura e per una vasta gamma di frequenze. Una rappresentazione della curva maestra viene raffigurata in Fig. 2.3.

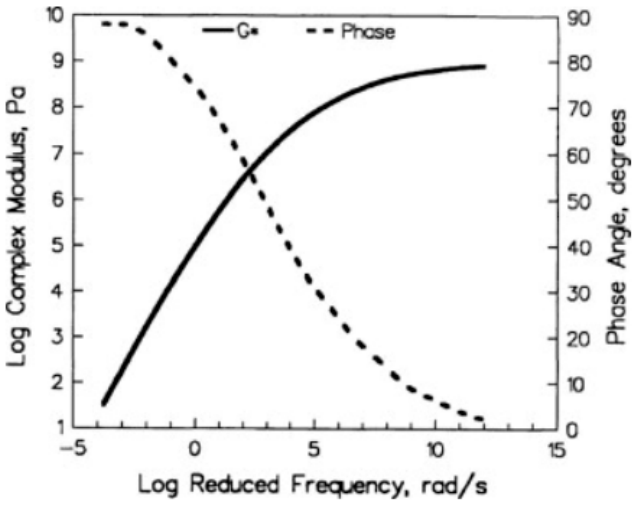

Figura 2.3 Curva Maestra (Yusoff, Shaw, Airey 2011)

Sulle ascisse viene rappresentata la scala delle frequenze e viene indicata come scala di frequenza ridotta (ω_r), mentre sulle ordinate può essere rappresentato, a seconda di ciò che si vuole ottenere, la scala della norma del modulo complesso (Pa) o dell'angolo di fase (°).

Il comportamento reologico qualitativo di una curva maestra è costituto da due principali transizioni. Per basse frequenze e/o alte temperature, il materiale si comporta

come fluido newtoniano viscoso e la curva maestra presenta un asintoto viscoso (obliquo inclinato di 45°). Invece, per alte frequenze e/o basse temperature, il materiale ha un comportamento tipico di un materiale elastico, con una risposta indipendente dal tempo e il modulo elastico si avvicina a un valore limite, un asintoto vetroso (orizzontale) chiamato modulo vetroso G_g.

Le proprietà reologiche dei leganti bituminosi in campo viscoelastico lineare LVE vengono espresse tramite due valori della curva maestra: la norma del modulo complesso G^* e l'angolo di fase δ. La norma del modulo complesso G^* si definisce come il rapporto tra il massimo taglio alla massima deformazione:

$$G^* = \frac{\tau_o}{\gamma_o} \tag{5}$$

in cui:

τ_o, γ_o rappresentano le ampiezze armoniche della tensione e della deformazione, in valore assoluto.

L'angolo di fase δ rappresenta la differenza di fase tra stress e deformazione di un'oscillazione armonica. Si possono fare delle importanti osservazioni:

- Se $\delta = 90°$, il comportamento del bitume è puramente viscoso;
- Se $\delta = 0°$, il comportamento del bitume è puramente elastico;

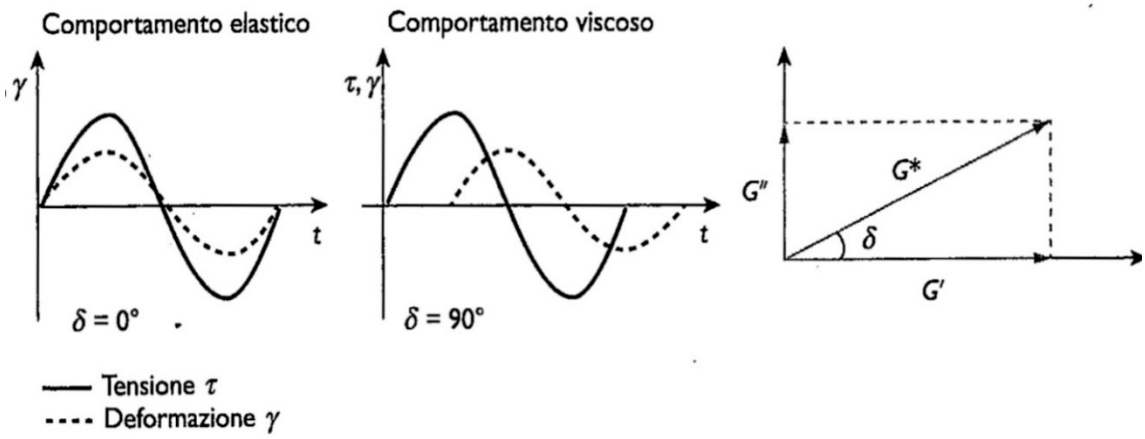

Figura 2.4 Prove in regime oscillatorio (Santagata, Materiale didattico)

I parametri della norma del modulo complesso G^* e l'angolo di fase δ sono legati dalle seguenti relazioni:

$$G^* = G' + iG'' \tag{6}$$

$$G' = G^* \cos(\delta) \tag{7}$$

$$G'' = G^* sen(\delta) \tag{8}$$

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \tag{9}$$

dove, da un punto di vista reologico G' si chiama *storage modulus* e rappresenta il modulo di restituzione elastica, mentre G'' chiamato *loss modulus* è il modulo di dissipazione viscosa.

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{G''}{G'}\right) \tag{10}$$

L'angolo di fase si definisce come l'arcotangente del rapporto tra il *loss modulus* e lo *storage modulus*.

2.1.4 Modelli meccanici analogici

I materiali viscoelastici presentano una relazione sforzo – deformazione dipendente dal tempo. Per questo motivo, esibiscono in contemporanea un comportamento con caratteristiche elastiche e viscose.

Per determinare la risposta di un materiale in campo viscoelastico lineare (LVE) si ricorre ai modelli meccanici, i quali attraverso una semplice idealizzazione di una molla di Hooke e di uno smorzatore Newtoniano consentono di rappresentare le caratteristiche meccaniche.

2.1.4.1 Modello di Maxwell

Uno dei modelli più semplici è il modello di Maxwell che prevede la disposizione in serie di una molla di Hooke e di uno smorzatore newtoniano, come schematizzato in Fig. 2.5. Se tale modello venisse sottoposto a una prova di trazione uniassiale, lo sforzo applicato sarebbe:

Figura 2.5 Modello di Maxwell (Epaarachchi,2017)

- nella molla, $\sigma_m = E_m \varepsilon_m$ (11)
- nello smorzatore, $\sigma_s = \dot{\varepsilon_s} \eta$ (12)

Poiché la molla e lo smorzatore risultano essere disposte in serie, la deformazione totale del sistema può essere determinata attraverso la somma della deformazione della molla e della deformazione dello smorzatore:

$$\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_s \quad (13)$$

Alla rimozione dello sforzo, istantaneamente il materiale presenterà una deformazione residua che tenderà a diminuire nel tempo. Questo fenomeno è di fondamentale importanza, perché:

- se lo sforzo venisse mantenuto costante, la deformazione tenderebbe ad aumentare nel tempo e genererebbe *Creep;*
- se la deformazione venisse mantenuta costante, lo sforzo diminuirebbe nel tempo e genererebbe Rilassamento*;*

Il Modello di Maxwell ha degli svantaggi: non è in grado di descrivere il comportamento di un materiale reale viscoelastico né sottoposto a un livello di stress pari a zero né tanto meno se sottoposto a un livello di stress costante, poiché all'aumentare del tempo si avrebbe una deformazione illimitata che nella realtà non avverrebbe. Inoltre se lo stress

applicato venisse rimosso, la molla si contrarrebbe per recuperare lo sforzo elastico, non ci sarebbe la forza disponibile per ritrarre lo smorzatore e poter recuperare uno sforzo tempo – dipendente.

Per i motivi sopracitati, siccome modellare i materiali viscoelastici con sistemi composti da uno o pochi elementi meccanici elementari non abbiano un significato fisico ben preciso, si ricorre al modello generalizzato di Maxwell.

2.1.4.2 Modello generalizzato di Maxwell

Il modello generalizzato di Maxwell è costituito da N unità di Maxwell disposti in parallelo, ciascuno con diversi parametri caratteristici. L'importanza del modello generalizzato è che consente di ridurre la complessità delle formulazioni analitiche della funzione di rilassamento. Ai fini dell'analisi viscoelastica in questa tesi oggetto di studio, il modulo di rilassamento si determina applicando uno sviluppo in Serie di Prony.

Secondo la definizione matematica, si esprime la funzione di rilassamento in funzione del tempo come sommatoria di un generico *m* termine in serie di Prony, G_i, i-esimo elemento del termine di Prony e di ρ_i, i-esimo tempo di rilassamento.

$$G(t) = \sum_{i=1}^{m} G_i e^{-\frac{t}{\rho_i}} \tag{14}$$

Dove l'i-esimo termine di rilassamento ρ_i è direttamente proporzionale alla viscosità dello smorzatore newtoniano e inversamente proporzionale al modulo di taglio del materiale

$$\rho_i = \frac{\mu}{G} \tag{15}$$

Si applica il *Collocation Method* per determinare i coefficienti di Prony.

Si scelgono dei valori arbitrari per il tempo di rilassamento ρ_i e si assumono pari per la frequenza angolare ω_k, cercando di coprire 32 decadi temporali.

Il termine di Prony G_i risulta essere pari al prodotto del vettore dello *storage modulus* {G'} e l'inversa della matrice di kernel [A]

$$\{G_i\} = [A]^{-1}\{G'\} \tag{16}$$

In cui [A] è l'i-esimo e k-esimo termine calcolato in funzione del tempo di rilassamento ρ_i e della frequenza angolare ω_k

$$Aik = \frac{\omega_k^2 \rho i^2}{\omega_k^2 \rho i^2 + 1} \tag{17}$$

Una volta ricavati i termini di Prony, si può rappresentare la risposta del materiale nel dominio del tempo in campo viscoelastica lineare e nel dominio delle frequenze attraverso la norma del modulo complesso e angolo di fase come:

$$G' = \sum_{i=1}^{m} \frac{Gi\omega_R^2 \rho i^2}{\omega_R^2 \rho i^2 + 1} \tag{18}$$

$$G'' = \sum_{i=1}^{m} \frac{Gi\rho_i \omega_R}{\omega_R^2 \rho i^2 + 1} \tag{19}$$

$$|G^*|_{LVE} = \sqrt{G'^2 + G''^2} \tag{20}$$

$$\delta_{LVE} = \tan^{-1}\left(\frac{\sum_{i=1}^{m} \frac{Gi\rho_i \omega_R}{\omega_R^2 \rho i^2 + 1}}{\sum_{i=1}^{m} \frac{Gi\omega_R^2 \rho i^2}{\omega_R^2 \rho i^2 + 1}}\right) \tag{21}$$

Dove G' rappresenta lo *storage modulus (*componente reale*),* mentre G'' rappresenta il *loss modulus* (componente immaginaria)*.*

Ai fini di verifica, è necessario controllare la correttezza del modello di Maxwell generalizzato: i valori dei moduli ottenuti si devono confrontare con i dati ricavati sperimentalmente e modellati tramite il modello CAM.

2.1 Caratterizzazione in campo viscoelastico non lineare

La caratterizzazione non lineare si contraddistingue dalla presenza non di uno, ma ben di due fattori traslazionali. Ricordando che i time-temperature shift factor sono dipendenti dall'ampiezza di deformazione, possono essere applicati anche nel dominio non lineare proprio per tenere conto degli effetti di non linearità. Difatti, si distinguono a_γ *e h.* Il primo rappresenta uno spostamento orizzontale che agisce direttamente sulla frequenza ridotta per cambiare la pendenza logaritmica della curva maestra, mentre il secondo è un fattore traslazionale verticale che interviene direttamente sulla norma del modulo complesso. Il fattore traslazionale che agisce in direzione orizzontale è stato ricavato dalla seguente espressione matematica:

$$\omega'_r = \omega_r a_\gamma = (a_T \omega_r) a_\gamma \tag{22}$$

Dove ω'_r è la frequenza angolare ridotta dipendente dalla deformazione, mentre ω_r è la frequenza angolare ridotta.

Il secondo fattore traslazionale *h*, come precedentemente menzionato, si inserisce nella formulazione matematica per ottenere il valore della norma del modulo complesso non lineare, come espresso nella formula seguente:

$$|G^*_{NLVE}|(\omega_r) = \frac{1}{h}|G^*_{LVE}|(\omega'_r) \tag{23}$$

Combinando le equazioni (20) e (22) nell'equazione (23) si può ottenere la norma del modulo NLVE attraverso le serie di Prony:

$$|G^*_{NLVE}| = \frac{1}{h}\sqrt{\left(\sum \frac{G_m \omega'^2_r \rho_m^2}{\rho_m^2 \omega'^2_r + 1}\right)^2 + \left(\sum \frac{G_m \omega_r' \rho_m}{\rho_m^2 \omega'^2_r + 1}\right)^2} \tag{24}$$

È importante aggiungere una precisazione: gli shift factor non lineari descrivono sinteticamente l'impatto della non linearità sul comportamento reologico dei bitumi. Tendenzialmente, all'aumentare dell'ampiezza di deformazione, si può osservare che a_γ aumenta mentre *h* diminuisce.

Siccome l'argomento principale di questa tesi riguarda la caratterizzazione di quattro leganti bituminosi nel dominio viscoelastico non lineare, l'obiettivo è quello di ottenere la costruzione grafica e analitica delle curve maestre non lineari. Per far ciò è stato necessario scegliere opportuni intervalli di deformazione ricadenti in campo non lineare per ricavare la corrispettiva risposta in termini di valore della norma del modulo complesso non lineare.

2.2 Strumentazione reologica

2.2.1 Dynamic Shear Rheometer (DSR)

Il reometro rotazionale a taglio dinamico (DSR) è uno dei principali strumenti adottati nelle indagini sperimentali per caratterizzare le proprietà elastiche, viscoelastiche e viscose dei leganti bituminosi, per un determinato intervallo di frequenze e temperature.

Lo strumento applica un carico di taglio dinamico e può operare in due maniere differenti: in controllo di tensione o in controllo di deformazione.

Per poter dare una miglior comprensione di come lo strumento lavori in campo sperimentale si può effettuare una suddivisione dello strumento stesso, in termini di componentistiche: una parte superiore, una parte inferiore e la geometria del sistema di misura.

La parte superiore dello strumento è mobile e gestisce il carico di un momento torcente applicato che varia secondo legge armonica, generando di conseguenza una rotazione che oscilla con legge armonica. È dotata di un azionamento sincrono a magneti permanenti e di un encoder incrementale ottico che consente di misurare la rotazione angolare. Per consentire una completa misurazione, il sistema oltre a montare il piatto superiore, che può essere piatto o cono, presenta una cappa che permette di condizionare il campione e raggiungere una temperatura uniforme durante la prova.

La parte inferiore è fissa ed è dotata di un sistema in grado di controllare e gestire la temperatura, permettendo così di raffreddare o riscaldare in maniera uniforme.

La geometria del sistema di misura può essere piatto – piatto o piatto – cono. La principale differenza che sussiste tra i due sistemi sopra citati deriva dal comportamento

in campo deformativo del campione analizzato: uniforme nel caso del sistema piatto – piatto, ovvero risulta essere dipendente dalla distanza dall'asse di rotazione, o non uniforme nel caso del sistema piatto – cono, indipendente dalla distanza dell'asse di rotazione. In Fig.2.6 e in Fig. 2.7 vengono rappresentate le distinzioni geometriche caratterizzanti le varie geometrie.

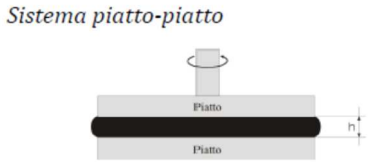

Figura 2.6 geometria sistema piatto - piatto (Strade, Santagata F.A. Materiale didattico)

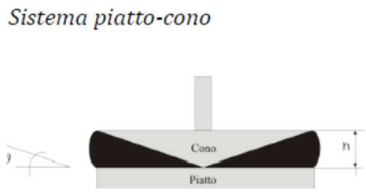

Figura 2.7 geometria sistema piatto - cono (Strade, Santagata F.A, Materiale Didattico)

Per quanto riguarda la geometria, intesa in termine dimensionale, è costituita dai paramenti *h*, altezza del provino, e *R,* raggio del provino*.* Difatti, noto il momento torcente M applicato e l'angolo di deformazione φ è possibile ricavare i valori di tensione e deformazione (ciò è valido se e solo se si sta analizzando un provino cilindrico, il cui comportamento ricade nell'ipotesi di un fluido Newtoniano):

$$\tau = \frac{2M}{\pi R^3} \tag{25}$$

$$\gamma = \frac{\varphi R}{h} \tag{26}$$

Che vengono restituite dallo strumento come output.

Le formule (25) e (26) sono valide per il sistema piatto – piatto.

La scelta e la dimensione del sistema di misura dipendono dalla scelta di prova che si vuole effettuare (quindi dalla temperatura) e dalla natura del campione. Infatti, le dimensioni del sistema di misura sono inversamente proporzionali alla rigidezza del materiale. Ciò significa che a basse temperature si usano piatti di piccolo diametro, mentre ad alte temperature si utilizzano piatti i cui diametri sono maggiori.

3. PROGRAMMA SPERIMENTALE

Il presente capitolo pone l'obiettivo di spiegare come è stato eseguito l'intero programma sperimentale. Si illustrano quali tipologie di leganti bituminosi sono stati scelti e analizzati, quale strumento reologico è stato adottato e di conseguenza il protocollo di prova ad esso associato. Infine, quali test sono stati scelti per caratterizzare i materiali in campo viscoelastico lineare LVE e non lineare NL.

3.1 Leganti bituminosi

3.1.4 Materiali

Si sono analizzati quattro campioni di leganti bituminosi, di cui due tradizionali e due modificati con polimero Stirene – Butadiene – Stirene (SBS). Per facilitare la distinzione dei vari materiali trattati, quelli tradizionali sono stati chiamati corrispettivamente N1 e N2, derivanti dall'abbreviazione in inglese del termine "*neat"*, mentre i bitumi che sono stati addizionati con polimero SBS sono stati nominati S1 e S2.

I quattro materiali si distinguono anche per il loro differente grado di penetrazione:

- N1 pen 70/100;
- N2 pen 40/60;
- S1 pen 25/55;
- S2 pen 45/80;

3.1.5 Origini e caratteristiche chimiche

Il bitume è una miscela chimica di natura organica ottenuta dai processi di distillazione del greggio di petrolio. È possibile effettuare una classificazione dei bitumi in tradizionali e modificati. I primi sono prodotti ottenuti dalle comuni lavorazioni in raffineria e vengono comunemente chiamati tradizionali, mentre i bitumi modificati con polimeri si ottengono con processi tecnologici che consentono di unire bitumi tradizionali a specifici materiali polimerici. Lo scopo di questa lavorazione è quello di avere un prodotto diverso da quello di origine, con un miglioramento delle sue caratteristiche prestazionali.

La configurazione della struttura interna di un bitume dipende esclusivamente dalle specie molecolari che la costituiscono. Il bitume è un sistema multi-fase composto da miscele chimiche complesse quali idrocarburi paraffinici, aromatici e gruppi funzionali contenenti atomi di zolfo, azoto e ossigeno. Questi ultimi, chiamati eteroatomi possono anche presentarsi isolatamente e sono in grado di influenzare le proprietà fisico – chimiche dei leganti bituminosi, tramite la creazione di interazioni secondarie. Il bitume può contenere anche tracce di materiali metallici quali Calcio, Ferro, Magnesio, Nichel e Vanadio sottoforma di sali inorganici e ossidi.

La composizione chimica di un bitume è estremamente complessa e laboriosa, in quanto è soggetta a variabilità aleatorie dipendenti dalla fonte del greggio di petrolio e dalla sua lavorazione nei sistemi di produzione. In generale, un'analisi elementare di un legante bituminoso presenta le seguenti percentuali:

- Carbonio 82-88%;
- Idrogeno 8-11%;
- Solfuro 0-6%;

Attraverso numerosi studi scientifici è stato possibile dimostrare che il bitume possiede un sistema colloidale e per poter descrivere le sue proprietà reologiche si ricorre al modello di Nellensteyn, riprodotto nella tipica rappresentazione in Fig. 3.1.

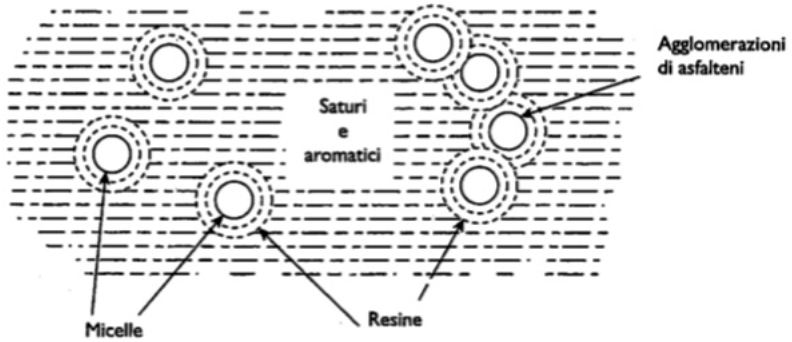

Figura 3.1 Schema colloidale di Nellensteyn (Santagata A.F., Materiale didattico)

Secondo tale modello la matrice maltenica è una base oleosa a basso peso molecolare, in cui si presentano in maniera dispersa le micelle di asfalteni, i quali si differenziano per

avere un elevato peso molecolare. I malteni, a loro volta, possono essere suddivisi in saturi, aromatici e resine.

È proprio la struttura colloidale che definisce le proprietà reologiche del bitume che possono essere distinte in:

- Sol, in cui prevale un comportamento di un fluido Newtoniano. In questa situazione, le resine mantengono gli asfalteni in uno stato disperso nella fase oleosa. Da un punto di vista rappresentativo, si possono schematizzare come delle sfere indeformabili disperse in un liquido viscoso. Generalmente, questo sistema descrive il materiale in campo lineare per tutte le temperature.
- Gel, in cui prevale un comportamento di un fluido non Newtoniano a carattere tissotropico e pseudoplastico. In questo caso invece, si ha una separazione delle fasi in disperdente e dispersa tra resine e asfalteni. Da un punto di vista grafico, si tende a rappresentarlo come un insieme di sfere indeformabili unite con delle molle.

Una tipica schematizzazione della struttura colloidale del sistema in Sol o Gel viene rappresentata in Fig. 3.2.

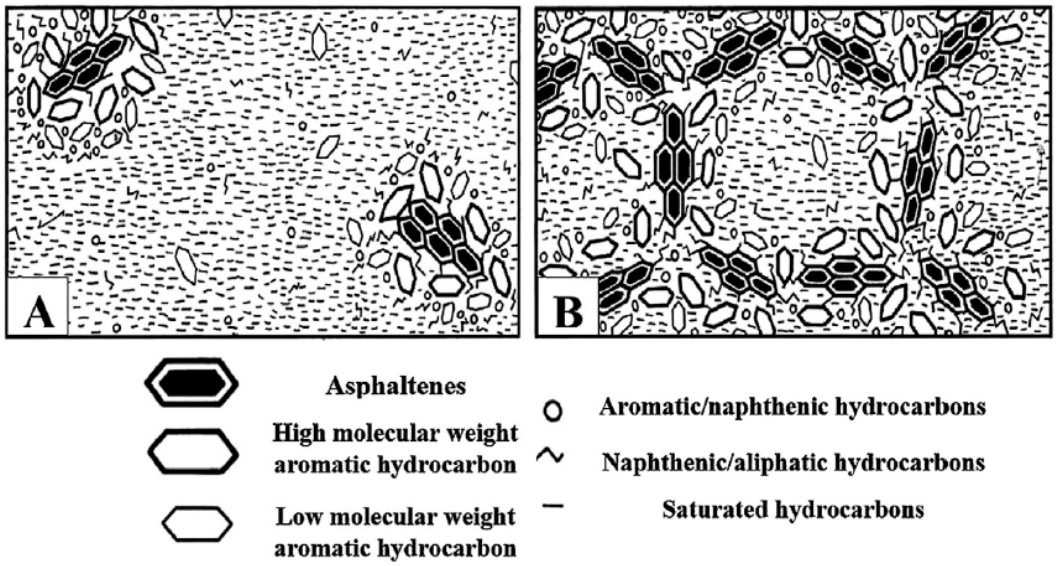

Figura 3.2 Rappresentazione di un sistema Sol (A - sinistra) e di un sistema Gel (B - destra) (Ayer et al,2016)

Per poter determinare quale dei due sistemi prevalga in un bitume, si può adottare come metodo valutativo l'indice di instabilità colloidale, proposto da Gaestel come:

$$I_c = \frac{A_S+S}{R+A_R} \quad (27)$$

Dove $A_S, A_R, R\ e\ S$ sono corrispettivamente gli asfalteni, aromatici, saturi e resine. Minore è l'indice di stabilità I_c e più il bitume assume un comportamento di tipo sol, maggiore è l'indice di stabilità I_c e più il bitume assume un comportamento di tipo gel. L'indice colloidale per i bitumi stradali varia tra 0.5 e 2.7.

Le tecniche disponibili per compiere un'analisi della composizione di un bitume si basa sulla separazione dello stesso adottando opportune tecniche di frazionamento.

Gli asfalteni sono solidi amorfi, si presentano di un colore scuro e sono molecole che presentano più di un eteroatomo in quanto contengono carbonio, idrogeno, zolfo, azoto e ossigeno. Costituiscono il 5-25% di bitume. Il contenuto di asfaltene posseduto da un bitume conferisce notevoli miglioramenti sulle caratteristiche reologiche: difatti, aumentando il contenuto di asfaltene si ottiene un bitume più duro, viscoso, con un minor grado di penetrazione e un punto di rammollimento elevato.

Le resine sono composti chimici di colore scuro, solidi o semisolidi, molto simili agli asfalteni ma con la caratteristica di possedere, grazie alla loro natura polare, proprietà adesive. Avendo una discreta reattività chimica, sono gli unici composti maltenici polari che svolgono l'azione di disperdere gli asfalteni.

Gli aromatici sono composti aromatici naftenici a basso peso molecolare, costituendo il 40 e 65% del bitume totale, presentandosi sottoforma di liquidi viscosi e di colore scuro.

I saturi sono oli viscosi non polari di colore paglierino e sono composti da idrocarburi alifatici.

3.2 Protocollo di prova

Per valutare il danneggiamento a fatica dei materiali si è utilizzato un *Physica MCR 301 DSR Anton Paar Inc*, raffigurato in Fig.3.3, reometro rotazionale che ha consentito di effettuare le misurazioni di quattro campioni di leganti bituminosi. I vari test sono stati condotti con una configurazione del sistema di misura piatto – piatto con diametro 8.00 mm e gap 2.00 mm. Il sistema di misurazione viene rappresentato in Fig. 3.3.

Con lo scopo di evitare errori dovuti alla sensibilità dello strumento, si è imposto come valore limite della coppia massima applica durante il momento torcente non superasse $M_z = 190\ \mu$Nm.

Figura 3.3 Strumento DSR(a sinistra) e sistema di misurazione piatto – piatto(destra)

Prima di effettuare le misurazioni dei vari materiali è stato necessario seguire un preciso iter di preparazione, per ciascun campione. I vari leganti bituminosi sottoforma di travetti, precedentemente preformati da casseri in silicone, sono stati prelevati da specifici contenitori in alluminio, stoccati in celle frigorifere e lasciati a temperatura ambiente per circa una decina di minuti. Questa operazione è fondamentale per evitare che il materiale possa contenere residui di acqua provocati dall'umidità. Successivamente, da ogni singolo travetto è stato prelevato una quantità di materiale pari a 0,250 – 0,300 g. Prima di posizionare il campione nel cassero di silicone è necessario pulirlo da eventuali residui di polvere, carta o bitume. Il cassero è uno stampo cilindrico in gomma siliconica dalle dimensioni di 8 mm di diametro. Una volta creato il campione, lo si deve inserire nel forno e a seconda del materiale scelto sussistono diverse tempistiche e temperature:

- N1 e N2: temperatura forno 130° C, per una durata di 5';
- S1 e S2: temperatura forno 150°C, per una durata di 10';

Dopodiché, il campione viene prelevato dal forno e lasciato a temperatura ambiente per 5’ nel caso dei materiali N1 e N2, mentre 10’ per i bitumi S1 e S2. Infine, viene messo in freezer per 3’. Le seguenti raffigurazioni di Fig.3.4, Fig. 3.5 e Fig. 3.6 rappresentano il processo di preparazione del campione: dalla pulizia del casserino di silicone, alla fase di pre-inserimento del provino nel forno e infine il post trattamento termico.

Figura 3.4 Fase 1: pulizia del casserino

Figura 3.5 Fase 2: Pre inserimento nel forno

Figura 3.6 Fase 3:Post trattamento termico

Nello stesso tempo in cui si esegue la procedura di preparazione del campione è necessario impostare lo strumento alla temperatura di prova desiderata e la temperatura di adesione, temperatura che si avvicina alla temperatura di rammollimento dei materiali. Lo scopo di tale operazione sussiste affinché ci sia una perfetta adesione del campione con il piatto inferiore, per evitare una rottura durante l’esecuzione del test. Il piatto inferiore è stato preriscaldato alle diverse temperature di adesione:

- Materiale N1: $T_{adesione} = 46°C$;
- Materiale N2: $T_{adesione} = 50°C$;
- Materiale S1: $T_{adesione} = 55°C$;
- Materiale S2: $T_{adesione} = 50°C$;

Una volta impostato il reometro e prelevato il campione dal freezer, quest’ultimo viene posto sul piatto inferiore e si riscalda manualmente con un riscaldatore professionale la testa del piatto superiore, per garantire sia la temperatura di prova sia una perfetta adesione del materiale. Il materiale una volta pronto si presenta come in Fig. 3.7.

Figura 3.7 Campione estratto dal freezer

In seguito, il piatto superiore viene abbassato fino al raggiungimento di un gap pari a 2.1 mm. In questa fase, essendo il materiale compresso tende ad eccedere rispetto alla geometria di prova. È necessario attuare la rasatura con una spatola, precedentemente riscaldata, per rimuovere il materiale in eccesso e dare una sorta di continuità tra campione e sistema di misurazione. La configurazione finale, prima di far eseguire la prova è rappresentata in Fig. 3.8.

Figura 3.8 Provino in configurazione di prova a seguito della rasatura

Una volta concluse le operazioni, il gap viene ulteriormente ridotto e portato al valore prefissato di 2.00 mm e si può procedere con l'esecuzione del test.

3.3 Descrizione dei test

Le prove sono state realizzate in regime oscillatorio, in controllo di deformazione.

3.3.4 Campo viscoelastico lineare: Frequency Sweep Test

Per caratterizzare i materiali in campo viscoelastico lineare LVE sono stati effettuati dei test a scansione di frequenza e temperatura, con l'obiettivo di determinare i valori della norma del modulo complesso e angolo di fase per la costruzione delle curve mastre LVE.

I test sono stati eseguiti tra le temperature di 4° e 34°C, a intervalli di 6°C. Per ciascuna temperatura, si è analizzato un intervallo di frequenza angolare che è stato fatto variare tra 1 rad/s a 100 rad/s, registrando 10 punti per ogni decade.

3.3.5 Campo viscoelastico non lineare: Multiple Strain Sweep Test

Sono state condotte delle prove a scansione di deformazione, *Multiple Strain Sweet Tests* (MSS), con lo scopo di discriminare gli effetti di una componente reversibile, quali la non linearità $|G^*_{NL}|$, da un componente irreversibile imputabile al danneggiamento.

La prova MSS è una tipologia di procedura costituita da una serie di blocchi e gruppi, a cui ogni gruppo è costituito da una serie di blocchi come si può vedere in Fig. 3.9. Ciascun gruppo ha in comune uno stesso valore di partenza di deformazione, mentre si differenziano per diversi valori di ampiezza di deformazione raggiunti. Quest'ultima infatti, aumenta il proprio valore da un gruppo al successivo.

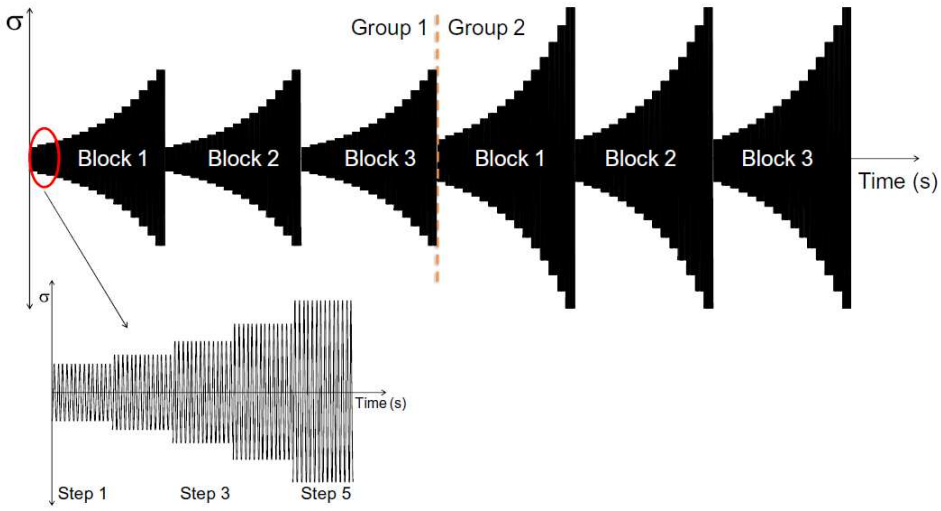

Figura 3.9 Schema di prova a scansione di deformazione (Underwood, 2015)

In questa tesi si è scelto di impostare le varie prove imponendo tre gruppi.

Il primo gruppo si è imposto un valore limite superiore di deformazione affinché il comportamento del materiale potesse essere descritto nel campo viscoelastico lineare, in modo tale che qualsiasi fenomeno di danno potesse essere trascurabile, mentre per gli altri due gruppi due diversi valori di deformazione che caratterizzassero i materiali in campo viscoelastico non lineare. In tale maniera, è stato possibile osservare i fenomeni di non linearità e di danneggiamento.

Una delle principali ipotesi che sta alla base di questa procedura è che il danneggiamento si verifica solamente al primo blocco di ciascun gruppo, ovvero quando si raggiunge per la prima volta un valore di deformazione mai raggiunto prima.

Nella fase sperimentale, si è analizzato un range di temperatura dai 4°C ai 34°C, con un aumento di temperatura ogni 6°C, effettuando sempre due ripetizioni per prova. Le prove sono state realizzate a una frequenza di caricamento costante di 10 Hz.

4. ANALISI SPERIMENTALE

Nel seguente Capitolo si procede con l'analisi sperimentale, all'elaborazione e discussione dei risultati ottenuti.

Si procede dapprima analizzando i quattro leganti bituminosi eseguendo una Frequency Sweep Test per esplorare la risposta in campo viscoelastico lineare. I dati ottenuti sono stati modellati con il principio di sovrapposizione tempo – temperatura e con il Modello Generalizzato di Maxwell, basato sulla discretizzazione delle serie di Prony, per descrivere i materiali in campo viscoelastico lineare, in termini di norma del modulo complesso e angolo di fase, parametri fondamentali per ottenere la curva maestra LVE. Siccome lo scopo di questa tesi è ottenere una caratterizzazione dei materiali in campo viscoelastico non lineare, tale risposta è stata raggiunta introducendo appositi *shift factor NL,* fattori traslazionali di spostamento fondamentali per la costruzione delle curve maestre non lineari.

In questa tesi, l'analisi è stata condotta in primo luogo usando con software Excel e successivamente Matlab, ambiente di programmazione per l'elaborazione delle analisi sperimentali. In Matlab si è realizzato un programma che potesse effettuare l'analisi come si è svolto in Excel, indipendentemente dalla dimensione dei dati grezzi ottenuti. Avendo a disposizione due software è stato possibile confrontare i dati e definire la accuratezza dei risultati ottenuti.

4.1 Caratterizzazione lineare

La caratterizzazione lineare consente di esplorare la risposta dei quattro materiali oggetti di studio N1, N2, S1 e S2 nel dominio viscoelastico lineare, adottando come strumento reologico il reometro rotazionale e scegliendo una tipologia di prova a scansione di frequenza, denominata *Frequency Sweep.*

Indagando su una finestra di frequenza mantenuta costante così come l'ampiezza di deformazione e facendo variare il range di temperatura selezionato tra i 4° e 34°C, si sono ottenuti i risultati di ciascun materiale. Si è applicato il principio di equivalenza tempo – temperatura attraverso la legge proposta da *Williams – Landel – Ferrry (WLF)*

proposta nell'equazione (2), dove T_0 rappresenta la temperatura di riferimento e nell'analisi si è adottato un valore pari di 10°C. T indica la temperatura, C_1 *e* C_2 costanti empiriche che variano in funzione del materiale. Questi due ultimi valori si ricavano attraverso un risolutore, componente aggiuntivo sia di Excel e di Matlab per eseguire le analisi di simulazione.

Successivamente, avendo noti gli *shift factor*, si sono manipolati ulteriormente i dati applicando il modello *Christensen -Anderson – Marasteanu CAM,* con il quale è stato possibile ricavare sei parametri che consentono di descrivere i comportamenti dei quattro materiali.

Si riportano i parametri di modelli di ogni materiale nella Tab. 4.1 e le corrispettive curve maestre della norma del modulo complesso in Fig. 4.1 e dell'angolo di fase in Fig. 4.2, dove vengono raffigurati tutti i quattro campioni e messi a confronto.

	$\boldsymbol{T_0}$	$\boldsymbol{C_1}$	$\boldsymbol{C_2}$	$\boldsymbol{\log(G_g)}$	$\boldsymbol{\log(\omega_c)}$	$\boldsymbol{R}$	$\boldsymbol{m}$
	[°C]	$[-]$	$[-]$	$[Pa]$	$[\frac{rad}{s}]$	$[Pa]$	$[-]$
N1	10	15.25	120.57	8.87	2.15	1.30	0.98
N2	10	21.84	161.75	8.94	1.11	1.81	0.96
S1	10	19.66	136.00	8.78	0.40	1.61	1.02
S2	10	19.29	142.74	8.73	1.85	1.41	0.90

Tabella 4.1 Modellazione dei dati in campo LVE con il modello CAM

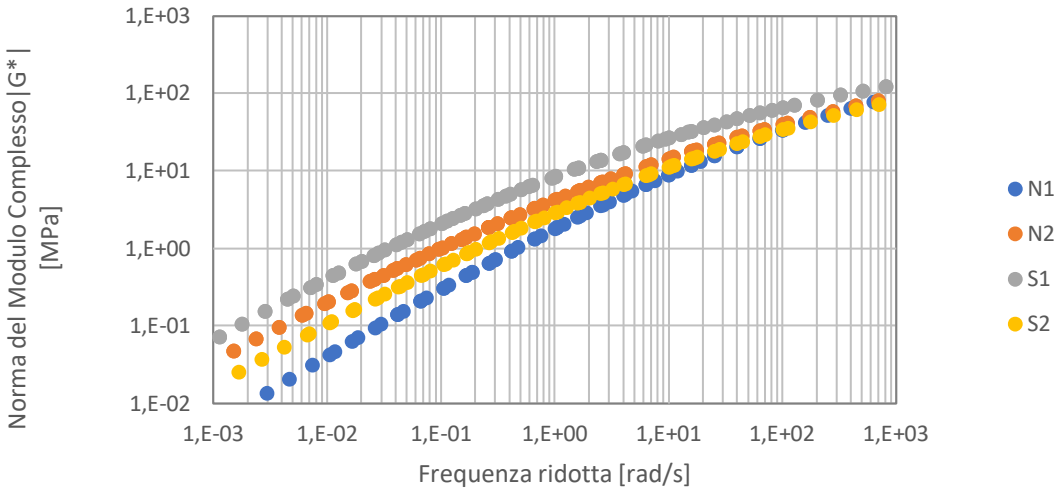

Figura 4.1 Curva maestra della norma del modulo complesso dei 4 campioni analizzati

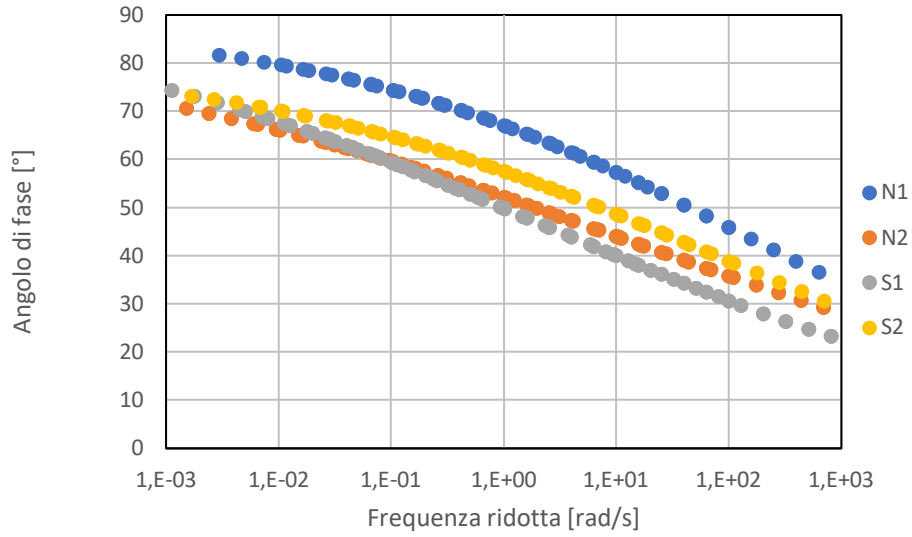

Figura 4.2 Curva maestra dell'angolo di fase dei 4 campioni analizzati

Dai grafici si può constatare che l'accuratezza del metodo analitico: i dati modellati con il principio di equivalenza tempo-temperatura e con il modello CAM sono prossimi ai dati sperimentali.

A partire dai risultati ottenuti, siccome si è interessati a descrivere la risposta di ciascun materiale in campo viscoelastico lineare si possono manipolare i dati con il Modello generalizzato di Maxwell, usando lo sviluppo in serie di *Prony*. Lo scopo di adottare questo metodo di analisi consente di ricavare il modulo di rilassamento, riducendo la

complessità analitica tramite le serie numeriche che facilitano il passaggio tra i domini della frequenza e del tempo.

Per applicare le serie di *Prony* è necessario prima derivare i coefficienti di *Prony* tramite il *Collocation Method.* Per coprire 32 decadi temporali, si sono scelti dei valori per il tempo di rilassamento ρ_i e frequenza ω_i e per arbitrarietà, si è imposto che i valori fossero uguali. A partire dai parametri calibrati con il modello CAM, si determina la frequenza ridotta per ciascun materiale. Si applicano le formule proposte nel paragrafo § 2.1.4.2 per ricavare lo *storage modulus (16),* la matrice Kernel (17) per ottenere i termini di Prony.

Si riportano nella Tab. 4.2, Tab. 4.3, Tab. 4.4 e Tab. 4.5 i termini di Prony per i quattro bitumi analizzati.

Termini di Prony – N1											
i	$\boldsymbol{\rho_i}$	$\boldsymbol{G_i}$	i	$\boldsymbol{\rho_i}$	$\boldsymbol{G_i}$	i	$\boldsymbol{\rho_i}$	$\boldsymbol{G_i}$	**i**	$\boldsymbol{\rho_i}$	$\boldsymbol{G_i}$
[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]
1	2E-08	3,59E+07	9	2E-04	5,36E+07	17	2E+00	2,96E+05	25	2E+04	1,78E+01
2	6E-08	4,66E+07	10	6E-04	4,70E+07	18	6E+00	9,74E+04	26	6E+04	4,84E+00
3	2E-07	4,15E+07	11	2E-03	3,00E+07	19	2E+01	3,09E+04	27	2E+05	1,46E+00
4	6E-07	6,47E+07	12	6E-03	2,00E+07	20	6E+01	9,05E+03	28	6E+05	4,09E-01
5	2E-06	5,63E+07	13	2E-02	1,03E+07	21	2E+02	2,72E+03	29	2E+06	1,24E-01
6	6E-06	7,57E+07	14	6E-02	5,16E+06	22	6E+02	7,50E+02	30	6E+06	3,80E-02
7	2E-05	6,36E+07	15	2E-01	2,14E+06	23	2E+03	2,22E+02	31	2E+07	8,82E-03
8	6E-05	7,07E+07	16	6E-01	8,42E+05	24	6E+03	5,99E+01	32	6E+07	6,45E-03

Tabella 4.2 Termini di Prony per il materiale N1

Termini di Prony – N2											
i	ρ_i	G_i	i	ρ_i	G_i	i	ρ_i	G_i	i	ρ_i	G_i
[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]
1	2E-08	5,36E+07	9	2E-04	4,00E+07	17	2E+00	1,10E+06	25	2E+04	5,18E+02
2	6E-08	5,62E+07	10	6E-04	3,71E+07	18	6E+00	5,23E+05	26	6E+04	1,69E+02
3	2E-07	4,87E+07	11	2E-03	2,52E+07	19	2E+01	2,17E+05	27	2E+05	5,56E+01
4	6E-07	6,46E+07	12	6E-03	1,99E+07	20	6E+01	8,98E+04	28	6E+05	1,76E+01
5	2E-06	5,29E+07	13	2E-02	1,20E+07	21	2E+02	3,40E+04	29	2E+06	5,65E+00
6	6E-06	6,37E+07	14	6E-02	7,97E+06	22	6E+02	1,26E+04	30	6E+06	1,88E+00
7	2E-05	5,04E+07	15	2E-01	4,24E+06	23	2E+03	4,46E+03	31	2E+07	4,39E-01
8	6E-05	5,38E+07	16	6E-01	2,36E+06	24	6E+03	1,53E+03	32	6E+07	3,49E-01

Tabella 4.3 Termini di Prony per il materiale N2

Termini di Prony – S1											
i	ρ_i	G_i	i	ρ_i	G_i	i	ρ_i	G_i	i	ρ_i	G_i
[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]
1	2E-08	2,53E+07	9	2E-04	4,03E+07	17	2E+00	2,37E+06	25	2E+04	5,93E+02
2	6E-08	3,08E+07	10	6E-04	4,34E+07	18	6E+00	1,14E+06	26	6E+04	1,55E+02
3	2E-07	2,65E+07	11	2E-03	3,25E+07	19	2E+01	4,64E+05	27	2E+05	4,28E+01
4	6E-07	4,08E+07	12	6E-03	2,94E+07	20	6E+01	1,83E+05	28	6E+05	1,01E+01
5	2E-06	3,43E+07	13	2E-02	1,96E+07	21	2E+02	6,48E+04	29	2E+06	2,60E+00
6	6E-06	4,81E+07	14	6E-02	1,45E+07	22	6E+02	2,16E+04	30	6E+06	5,32E-01
7	2E-05	4,02E+07	15	2E-01	8,28E+06	23	2E+03	6,90E+03	31	2E+07	1,22E-01
8	6E-05	5,00E+07	16	6E-01	4,93E+06	24	6E+03	2,01E+03	32	6E+07	1,84E-02

Tabella 4.4 Termini di Prony per il materiale S1

Termini di Prony – S2

i	ρ_i	G_i	i	ρ_i	G_i	i	ρ_i	G_i	i	ρ_i	G_i
[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]	[-]	[s]	[Pa]
1	2E-08	2,60E+07	9	2E-04	3,73E+07	17	2E+00	6,62E+05	25	2E+04	2,27E+02
2	6E-08	3,23E+07	10	6E-04	3,54E+07	18	6E+00	2,79E+05	26	6E+04	7,90E+01
3	2E-07	2,85E+07	11	2E-03	2,42E+07	19	2E+01	1,07E+05	27	2E+05	2,76E+01
4	6E-07	4,35E+07	12	6E-03	1,84E+07	20	6E+01	4,05E+04	28	6E+05	9,69E+00
5	2E-06	3,73E+07	13	2E-02	1,07E+07	21	2E+02	1,47E+04	29	2E+06	3,32E+00
6	6E-06	5,02E+07	14	6E-02	6,48E+06	22	6E+02	5,26E+03	30	6E+06	1,28E+00
7	2E-05	4,19E+07	15	2E-01	3,17E+06	23	2E+03	1,85E+03	31	2E+07	2,86E-01
8	6E-05	4,81E+07	16	6E-01	1,56E+06	24	6E+03	6,49E+02	32	6E+07	3,08E-01

Tabella 4.5 Termini di Prony per il materiale S2

Avendo noti i termini di Prony per ogni bitume analizzato, è possibile determinare effettuando un passaggio nel dominio delle frequenze il valore della norma del modulo complesso $|G^*|_{LVE}$ e dell'angolo di fase δ_{LVE}, applicando corrispettivamente le formule (18),(19),(20) e (21).

Ai fini di verifica, è necessario controllare la correttezza del modello di Maxwell generalizzato: i valori dei moduli ottenuti si devono confrontare con i dati ricavati sperimentalmente e modellati tramite il modello CAM.

A titolo rappresentativo, si riportano i dati confrontati tra il modello CAM e modello di Maxwell in Fig. 4.3, per i valori della norma del modulo complesso lineare e in Fig. 4.4, per i valori dell'angolo di fase.

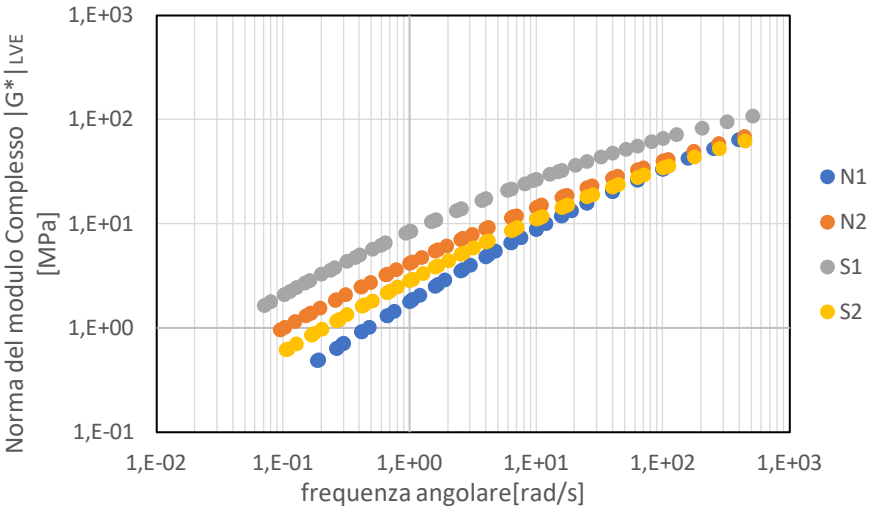

Figura 4.3 Curva maestra della norma del modulo complesso con il modello di Maxwell generalizzato dei 4 campioni

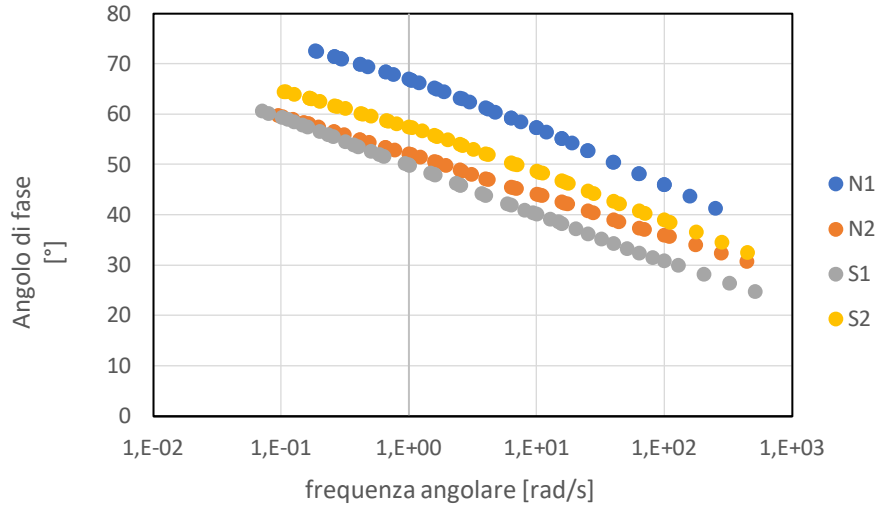

Figura 4.4 Curva maestra della norma del modulo complesso con il modello di Maxwell generalizzato dei 4 campioni

4.2 Caratterizzazione non lineare

La caratterizzazione non lineare dei leganti bituminosi permette di dare una migliore descrizione sulle proprietà viscoelastiche, ampliando il campo di indagine al dominio non lineare. La risposta viscoelastica è stata studiata eseguendo delle prove di *Multiple Strain Sweep Test.* Siccome il test prevede una ripetizione di una serie di blocchi e gruppi a discapito dell'operatore, si sono scelti di analizzare tre gruppi con le seguenti caratteristiche come rappresentato in Fig. 4.5:

- Gruppo 1: valore iniziale di deformazione $\gamma_{INF} = 0.05\%$ e valore limite superiore $\gamma_{SUP} = 0.5\%$ con assunzione di ipotesi che l'estremo superiore fosse il limite della frontiera viscoelastica lineare;
- Gruppo 2: valore iniziale di deformazione $\gamma_{INF} = 0.05\%$ e valore limite superiore $\gamma_{SUP} = 5\%$;
- Gruppo 3: valore iniziale di deformazione $\gamma_{INF} = 0.05\%$ e valore limite superiore $\gamma_{SUP} = 7\%$;

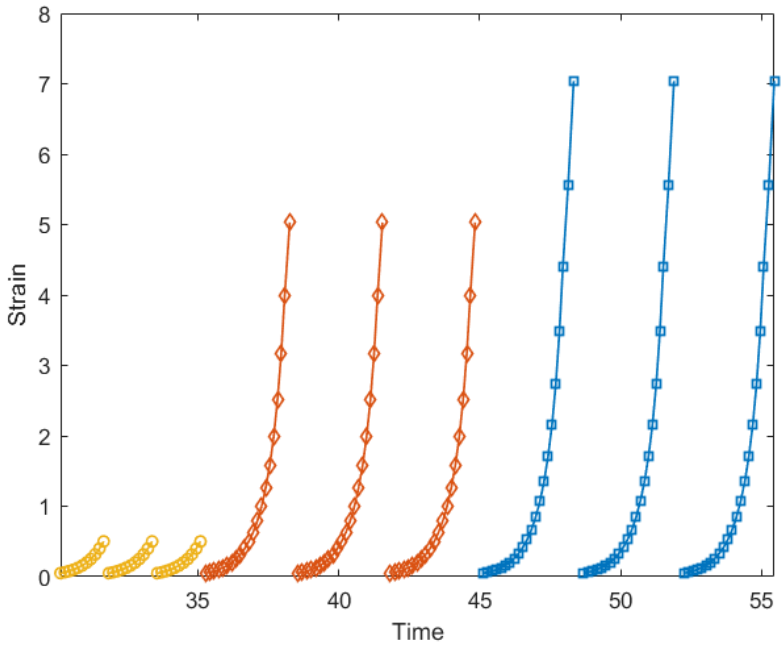

Figura 4.5 Multiple Strain Sweep Test

In una prima analisi, si era scelto di spingere la prova sperimentale fino a un'ampiezza di deformazione del 10%, ma fin da subito il primo materiale testato (N1) ha mostrato una rottura del campione ad ampiezze superiori al 7%. Per questo motivo, si è imposto come valore limite di analisi del terzo gruppo pari a $\gamma_{SUP} = 7\%$ e si sono eseguite le prove secondo quanto descritto nel paragrafo § 3.3.5. Queste condizioni sono state applicate per tutti i leganti alle temperature di 10,16,22,28 e 34°C. A 4°C, invece si è dovuto ridurre l'ampiezza di deformazione a 4%, valore limite massimo per cui i materiali non subissero rottura (presentano tutti valori della norma del modulo complesso LVE molto elevati e di conseguenza possiedono un comportamento rigido) e solamente a questa temperatura si sono aumentati i gruppi di analisi da tre a quattro.

Una volta ottenuti i dati sperimentali, sempre in una prima analisi si era deciso di distinguere le analisi tra gruppi 1 – gruppo 2 e gruppo 1 – gruppo 3, ma in un secondo momento si è deciso di focalizzarsi sulla massima ampiezza di deformazione raggiunta: quindi gruppo 1 – gruppo 3.

Da una prima osservazione dei dati grezzi, riportando sull'asse delle ascisse la deformazione e sulle ordinate il valore della norma del modulo complesso, si può percepire il comportamento dei materiali. Nel gruppo 1 tutti i blocchi presentano lo stesso andamento, i primi valori fluttuano a causa dei rumori strumentali fino a raggiungere il valore massimo di deformazione prefissato e posto come soglia limite della frontiera viscoelastica lineare. Nel gruppo 2, il primo blocco chiamato per semplicità B2G1 segue lo stesso andamento del gruppo 1 e una volta superata la frontiera LVE, subisce una riduzione del modulo fino a raggiungere il valore di massimo di deformazione preposta per questo gruppo. A questo punto si può capire quanto sia veritiera l'ipotesi fatta a monte del *Multiple Strain Sweep Test, cioè* il danneggiamento si manifesta nel primo blocco di ciascun gruppo, una volta superato il campo LVE. Si presuppone che parte di questa riduzione del modulo sia attribuito alla non linearità, componente considerata reversibile.

Le restanti curve del blocco due, chiamate corrispettivamente B2G2 e B3G2, partono da un valore iniziale di modulo che sono sempre minori rispetto alla curva B1G2. Lo stesso comportamento è stato osservato per le curve del gruppo 3, per cui avviene danneggiamento nella curva B1G3.

A titolo di esempio si riporta in Fig. 4.6 i dati sperimentali del bitume N1.

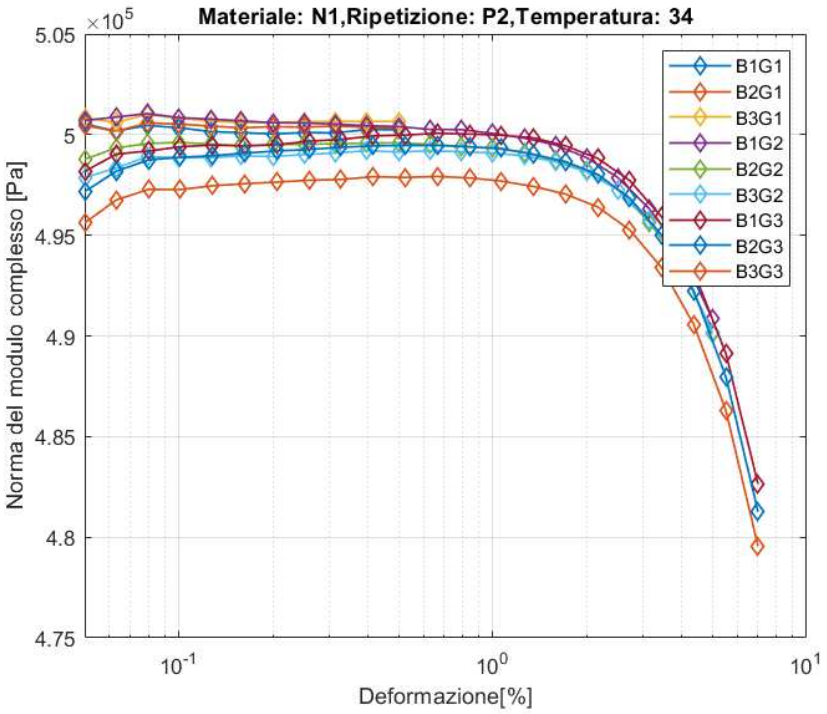

Figura 4.6 Bitume N1 - Dati sperimentali ottenuti con Multiple Strain Sweep Test

L'elaborazione dei dati sperimentali parte proprio dall'ipotesi di danneggiamento, precedentemente citata. Da un punto di vista pratico, siccome la teoria si discosta dalla realtà, è molto difficile che le curve che subiscono danneggiamento si sovrappongano e per questo motivo si effettua una media tra le ultime due curve del blocco 3: B2G3-B3G3. La media viene calcolata sia per le deformazioni sia per i moduli complessi. Dopodiché, guardando le curve in campo LVE del gruppo 1 si cerca di individuare un andamento pressoché lineare, facendo una media mobile tra almeno quattro punti. Individuato il miglior andamento rettilineo dei punti quattro sperimentali con regressione lineare, si adotta l'intervallo di deformazioni in cui si determina la retta per fare un'ulteriore media dei valori della norma di modulo complesso tra i valori appena mediati delle curve B2G3-B3G3. Si procede dividendo ciascun termine della curva mediata B2G3-B3G3 con il valore precedentemente calcolato. per ottenere valori prossimi all'unità. Non sono altro che valori normalizzati che vengono successivamente moltiplicati per la norma del modulo complesso analizzato con il modello CAM nelle *Frequency Sweep.* In questa maniera, i termini normalizzati moltiplicati per un G_{CAM} sono stati riportati al valore della norma di modulo complesso di ciascun materiale

e proprio questa curva ottenuta, è la curva traslata di quella quantità D sopracitata che rappresenta il danno accumulato complessivo durante il blocco 1 gruppo 2, B1G2. In Fig. 4.7 viene rappresentato quanto appena descritto.

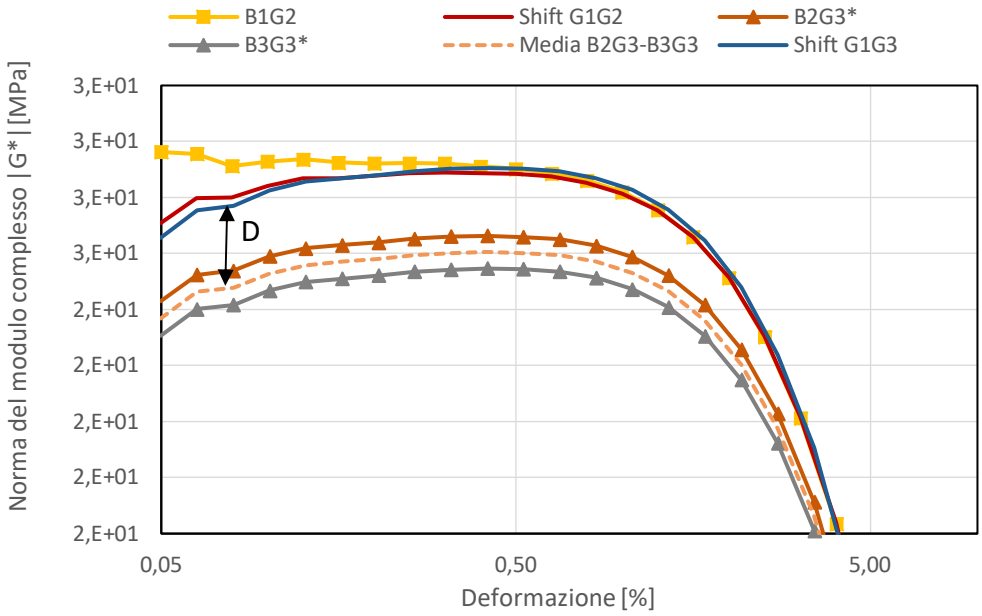

Figura 4.7 Bitume N1 - Shitfed Curve alla temperatura di 10°C, seconda ripetizione

Questo "Modus Operandi" è stato applicato per ogni materiale ad ogni temperatura e le curve traslate sono state rappresentate in un grafico, dove i valori della norma del modulo complesso non lineare normalizzati sono in funzione delle deformazioni.

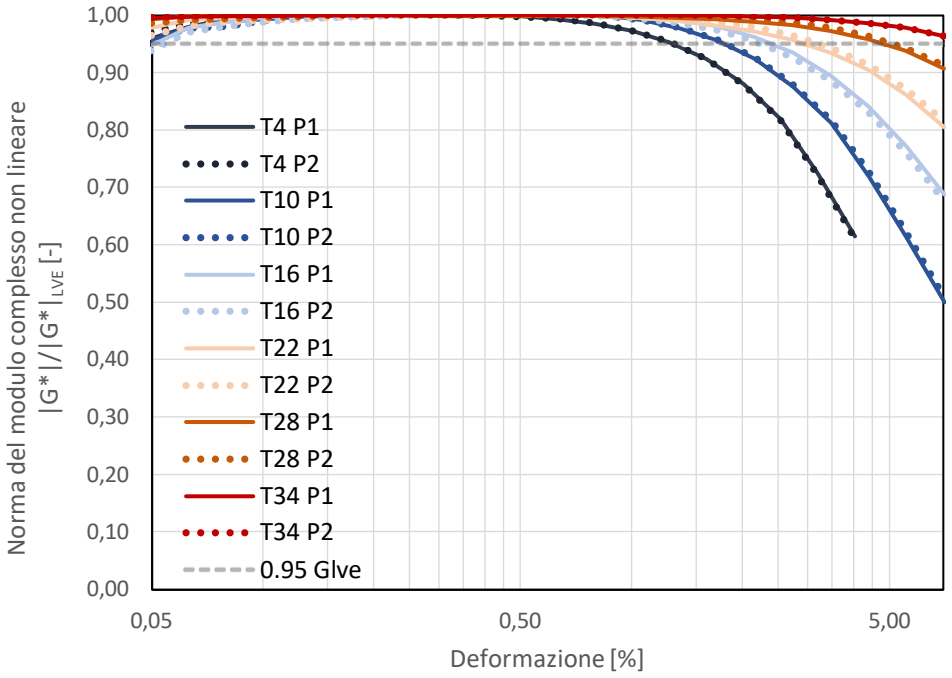

Figura 4.8 Bitume N1 – Norma del modulo complesso non lineare in funzione della deformazione

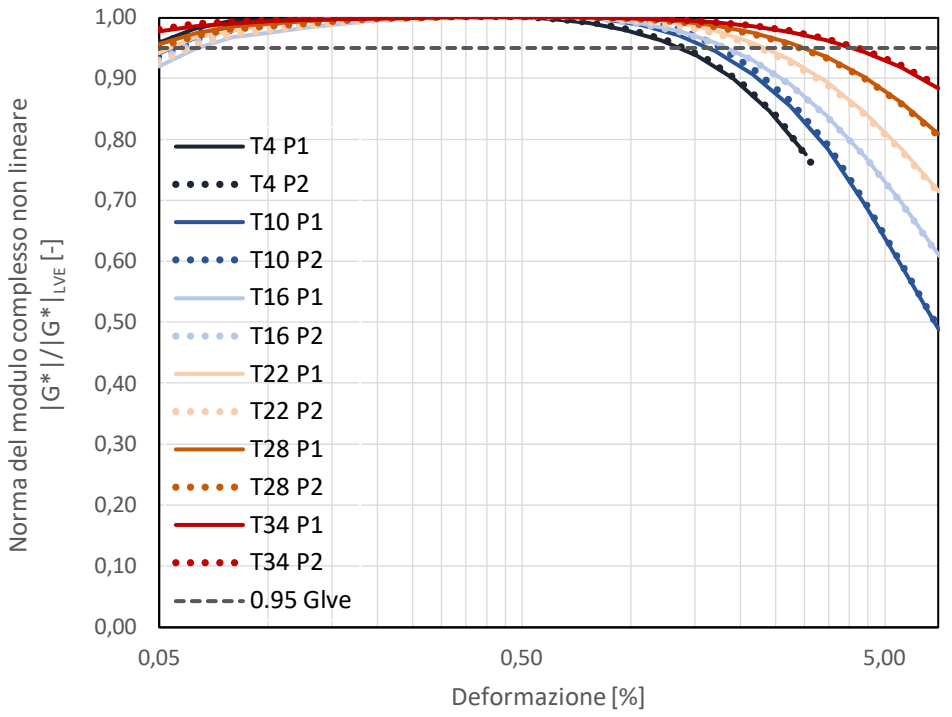

Figura 4.9 Bitume N2 -Norma del modulo complesso non lineare in funzione della deformazione

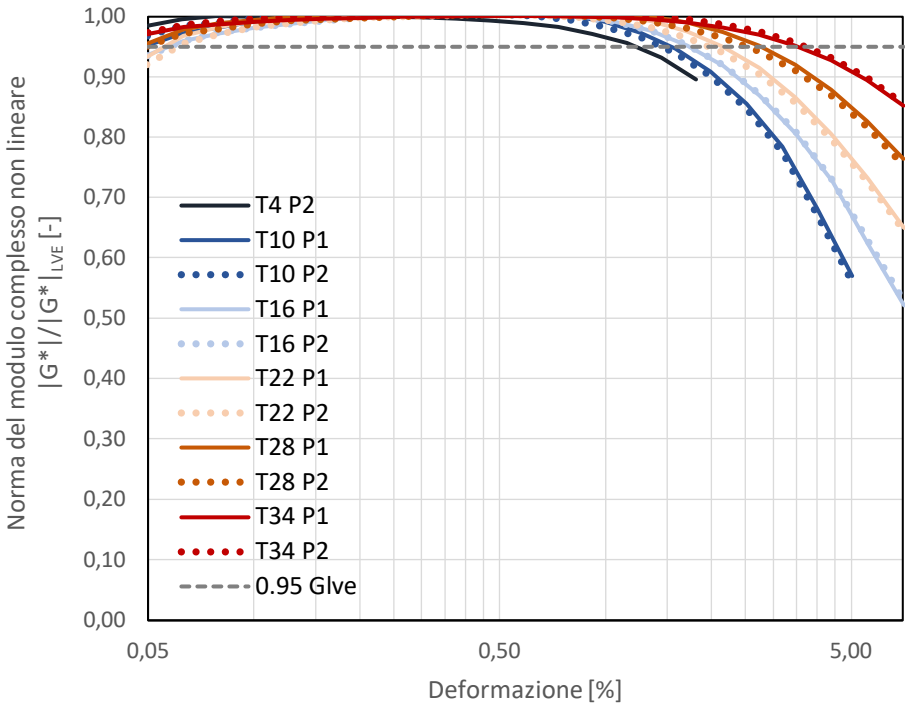

Figura 4.10 Bitume S1 – Norma del modulo complesso non lineare in funzione della deformazione

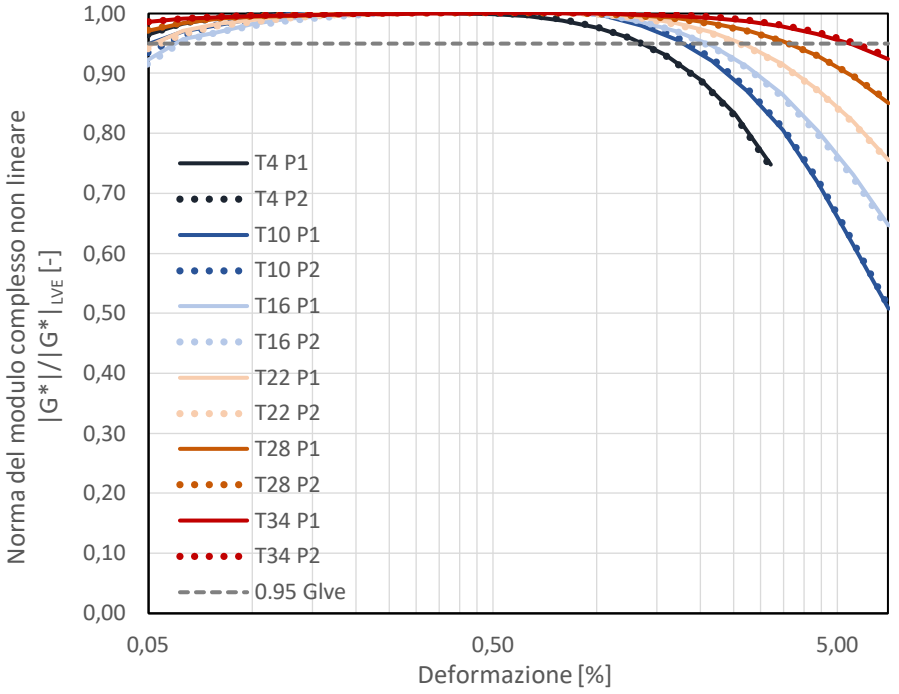

Figura 4.11 Bitume S2 – Norma del modulo complesso non lineare in funzione della deformazione

Si possono fare le seguenti osservazioni: per ogni materiale è stato rappresentato il dominio viscoelastico lineare, corrispondente a meno del 5% del valore della norma del modulo iniziale. Quando il materiale continua ad assumere valori unitari o prossimi a 0.95 possiede un comportamento lineare, ma all'aumentare dell'ampiezza di deformazione si ha una riduzione della norma del modulo e il materiale supera la frontiera, esibendo un comportamento non lineare.

Alla temperatura di 4°C di ciascun materiale non è stato possibile raggiungere la massima ampiezza di deformazione investigata a differenza di tutte le altre temperature, perché avendo dei moduli di partenza elevati durante la fase sperimentale, le prove si sono interrotte ai corrispettivi valori di deformazioni per aver raggiunto valori prossimi al valore massimo imposto al momento torcente. Facendo una comparazione tra tutti i materiali alla temperatura di 4°C, il materiale più rigido risulta essere il bitume S1 e infatti possedendo un valore di modulo di 109 Mpa, l'analisi si è arrestata al più basso valore di deformazione. Infine, da un punto di vista delle temperature si può notare come all'aumentare della stessa si estende il campo LVE: in particolare, sulla base della finestra da noi indagata, l'unico materiale ad assumere un comportamento lineare fino al 7% risulti il bitume N1 alla temperatura di 34°C.

Basandosi sull'assunzione che gli *shift factor* ricavati dal principio di sovrapposizione tempo-temperatura sono dipendenti dalla deformazione applicata, è stato possibile estendere la loro applicazione anche in campo non lineare.

Il processo di analisi adottato e valido per ciascun materiale oggetto di indagine è il seguente. Si sono analizzati dodici intervalli di deformazione, a partire dal valore limite della frontiera viscoelastica lineare 0.5 fino alla massima deformazione raggiunta pari al 7%. Partendo dai parametri CAM di ciascun materiale, ricavati precedentemente nel paragrafo § 4.1, ad ogni deformazione si è mantenuto costante il valore del modulo vetroso G_g mentre si sono fatti variare i valori della frequenza di crossover ω_c , l'indice reologico R e il parametro m. Con l'ausilio del risolutore, si è cercato di minimizzare la sommatoria dei quadrati delle differenze tra i valori della norma di modulo determinati con il modello CAM e quelli ottenuti con i dati sperimentali. Questo processo iterativo si è ripetuto per ogni livello di deformazione. Ciò che si osserva è che, all'aumentare dell'ampiezza di deformazione la frequenza di crossover ω_c si riduce. Invece, i parametri

m e indice reologico R hanno un comportamento opposto rispetto alla frequenza di cross over e tendono ad incrementare.

strain	**0,53**	**0,67**	**0,84**	**1,07**	**1,35**	**1,71**	**2,16**	**2,74**	**3,48**	**4,40**	**5,56**	**7,04**
LogG_g	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87
Logω_c	2,11	2,07	2,02	1,95	1,85	1,67	1,31	0,54	-1,55	-1,60	-12,02	-16,46
R	1,30	1,32	1,33	1,35	1,38	1,44	1,53	1,70	2,01	2,07	2,62	2,84
m	0,99	1,00	1,01	1,02	1,04	1,07	1,14	1,32	1,96	1,91	17,20	36,81
SQD	8,59E-05	1,24E-04	1,85E-04	2,65E-04	3,90E-04	5,81E-04	9,70E-04	2,15E-03	5,76E-03	9,20E-04	2,21E-03	1,18E-02

Tabella 4.6 Parametri CAM per il materiale N1 in campo NL

strain	**0,53**	**0,67**	**0,84**	**1,07**	**1,35**	**1,71**	**2,16**	**2,74**	**3,48**	**4,40**	**5,56**	**7,04**
LogG_g	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94	8,94
Logω_c	1,05	0,99	0,93	0,84	0,68	0,42	0,01	-0,83	-1,37	-5,75	-15,92	-18,98
R	1,81	1,83	1,84	1,87	1,91	1,97	2,06	2,22	2,34	2,79	3,22	3,47
m	0,97	0,98	0,99	1,00	1,03	1,06	1,13	1,28	1,37	2,75	16,29	22,03
SQD	2,38E-04	2,45E-04	2,62E-04	2,64E-04	2,61E-04	2,64E-04	2,70E-04	3,26E-04	5,88E-05	1,51E-04	1,18E-03	7,81E-03

Tabella 4.7 Parametri CAM per il materiale N2 in campo NL

strain	**0,53**	**0,67**	**0,84**	**1,07**	**1,35**	**1,71**	**2,16**	**2,74**	**3,48**	**4,40**	**5,56**	**7,04**
LogG_g	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78	8,78
Logω_c	0,21	0,13	0,05	-0,05	-0,19	-0,45	-0,59	-1,37	-3,66	-12,76	-13,55	-22,76
R	1,63	1,65	1,66	1,69	1,72	1,78	1,83	1,97	2,25	2,68	2,83	3,11
m	1,06	1,08	1,09	1,11	1,14	1,19	1,21	1,38	2,10	13,88	13,59	72,99
SQD	2,46E-04	2,24E-04	2,31E-04	2,33E-04	2,48E-04	2,76E-04	1,70E-04	2,21E-04	4,78E-04	1,70E-03	5,75E-04	3,37E-03

Tabella 4.8 Parametri CAM per il materiale S1 in campo NL

strain	**0,53**	**0,67**	**0,84**	**1,07**	**1,35**	**1,71**	**2,16**	**2,74**	**3,48**	**4,40**	**5,56**	**7,04**
LogG_g	8,73	8,73	8,73	8,73	8,73	8,73	8,73	8,73	8,73	8,73	8,73	8,73
Logω_c	1,78	1,74	1,70	1,63	1,53	1,36	1,07	0,49	-0,90	-0,94	-5,78	-21,42
R	1,42	1,43	1,44	1,46	1,50	1,55	1,63	1,77	2,02	2,08	2,58	3,00
m	0,91	0,92	0,92	0,93	0,95	0,98	1,03	1,13	1,44	1,40	3,29	77,53
SQD	1,90E-04	2,37E-04	2,81E-04	3,45E-04	3,96E-04	4,98E-04	6,89E-04	1,24E-03	3,00E-03	2,22E-04	9,26E-04	3,30E-03

Tabella 4.9 Parametri CAM per il materiale S2 in campo NL

Avendo noti tutti i parametri, è possibile determinare il valore della norma del modulo complesso fittizio G^*_{NL} con la formula (24).

Si rappresentano così le curve maestre che caratterizzano il materiale e si eliminano tutti i valori che stanno al di fuori di questa finestra di frequenze d'indagine. Si è inoltre deciso di riportare in Fig. 4.12, Fig. 4.13, Fig. 4.14 e Fig. 4.15 solo tre deformazioni, per dare una migliore comprensione dei comportamenti dei bitumi all'aumentare della deformazione e degli effetti di non linearità.

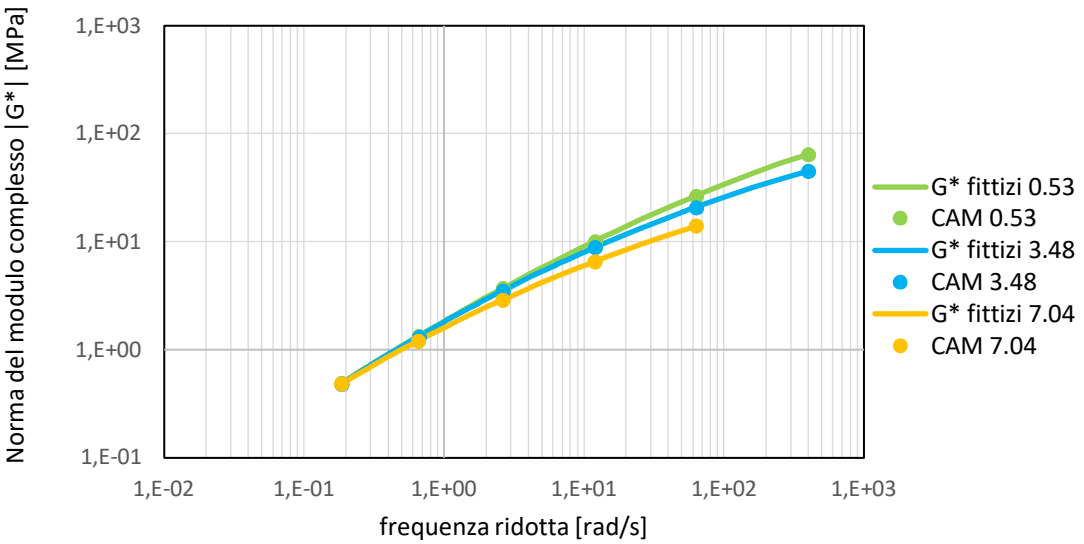

Figura 4.12 Curva maestra NL - materiale N1

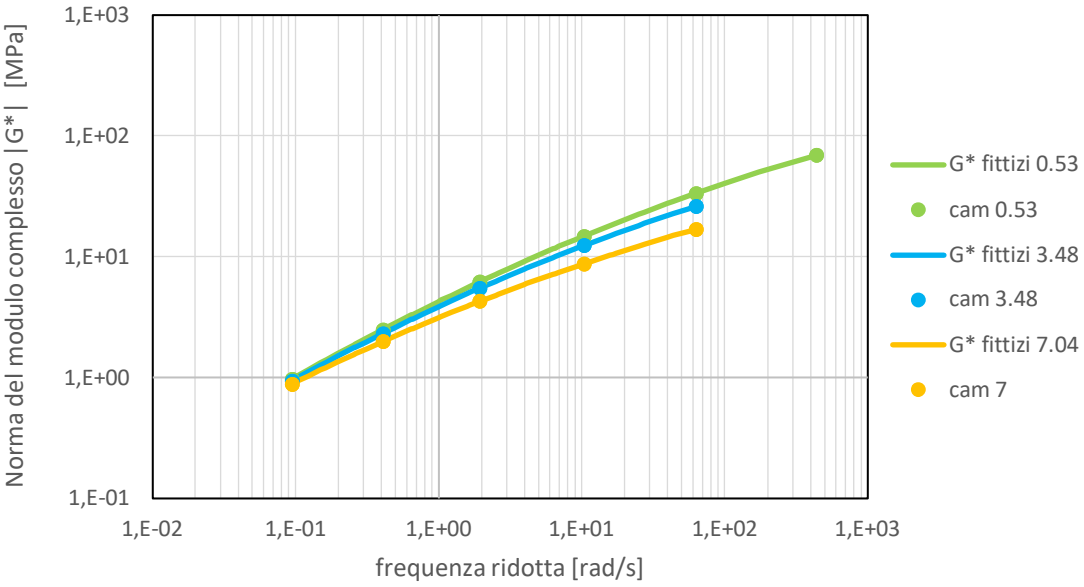

Figura 4.13 Curva maestra NL - Materiale N2

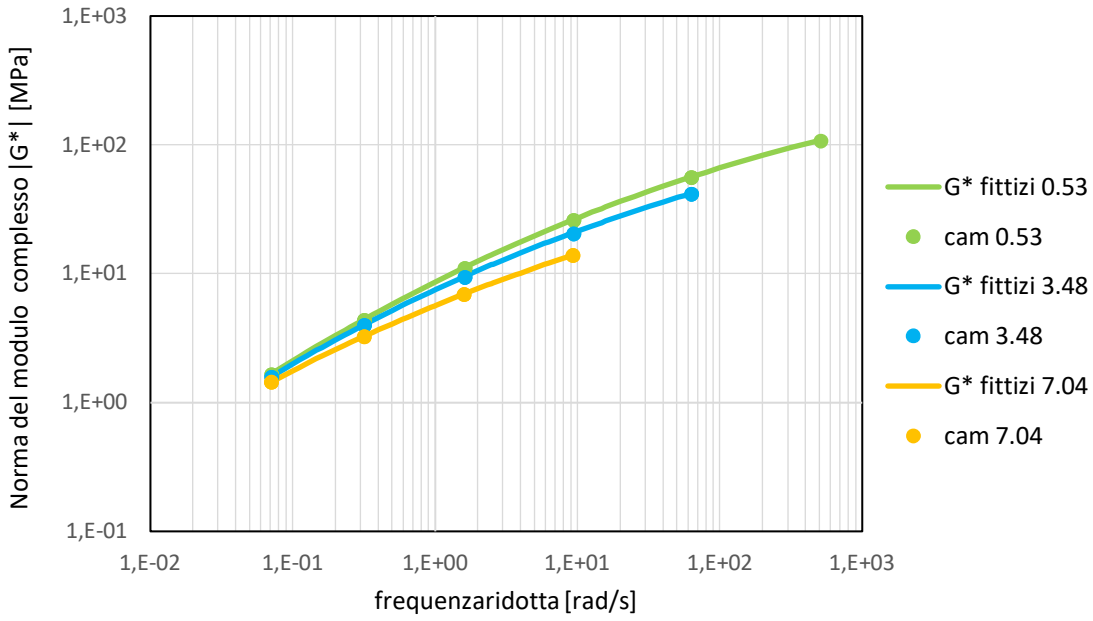

Figura 4.14 Curva maestra NL -Materiale S1

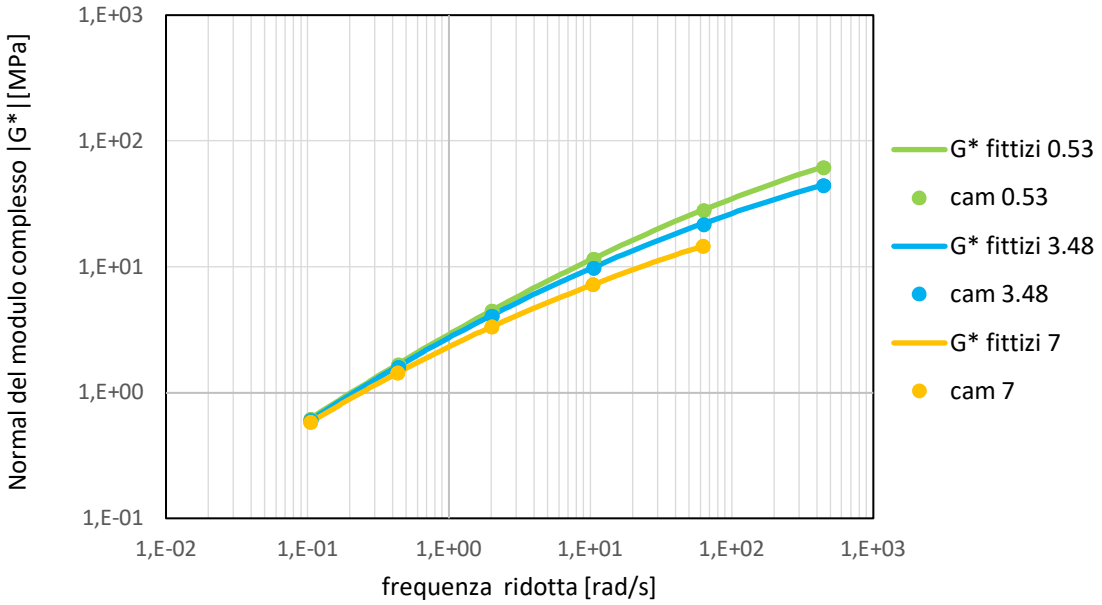

Figura 4.15 Curva maestra NL - Materiale S2

Esaminando le Fig. 4.12, Fig 4.13, Fig.4.14 e Fig.4.15 si può constatare che all'ultima deformazione analizzata pari al 7% non è stato possibile rappresentare i valori del modulo complesso alla temperatura di 4°C per tutti i materiali. Il materiale S1 si distingue dagli altri in quanto già alla deformazione di 3.48% non è stato possibile rappresentare il punto corrispondente a 4°C, mentre alla deformazione del 7% sono mancanti ben due punti corrispettivamente a 4° e 10°C per descrivere la curva maestra.

In un secondo tempo, si sono ripresi i valori della norma del modulo complesso G^*_{LVE} e angolo di fase δ_{LVE} ,ricavati con il Modello generalizzato di Maxwell sviluppato con le serie di *Prony,* e si è effettuato un processo di ottimizzazione tra le curve maestre LVE e curve maestre NL per modellare la risposta viscoelastica non lineare, nel quale si sono introdotti e determinati altri due *shift factor* non lineari a_γ e *h*.

Si è proceduto a determinare per ciascuna deformazione, per ciascun materiale i due *shift factor* non lineari. Il loro comportamento varia, in quanto a_γ e *h* risultano essere proprio in funzione della deformazione e modellati secondo un polinomio di terzo grado per i bitumi N2, S1 e S2

$$y = a\gamma(\%)^3 + b\gamma(\%)^2 + c\gamma(\%) + d \quad (38)$$

e di quarto grado per S1.

$$y = a\gamma(\%)^4 + b\gamma(\%)^3 + c\gamma(\%)^2 + d\gamma(\%) + e \quad (39)$$

Si riportano i valori dei coefficienti per calcolare le funzioni polinomiali di a_γ e *h nella* Tab. 4.10

		N1	**N2**	**S1**	**S2**
$\boldsymbol{a_\gamma}$	a	0,000071	0,014571	-0,00581	0,016074
	b	0,013046	0,083144	0,188673	0,016666
	c	0,052992	-0,06238	-0,23821	0,151371
	d	0,084139	1,026597	1,128347	0,898316
	e	0,953645	-	-	-
h	a	-0,00130	0,002713	0,003147	0,002118
	b	0,02138	-0,02131	-0,0263	-0,01418
	c	-0,10463	-0,10642	-0,08352	-0,12799
	d	0,01465	1,080508	1,053058	1,093116
	e	1,00920	-	-	-

Tabella 4.10 Coefficienti delle funzioni polinomiali dei due shift factor NL

Si riportano i valori degli *shift factor* al variare della deformazione per ogni materiale e si rappresentano i dati ottenuti in un grafico in Tab. 4.11 e Tab. 4.12.

	N1			N2		
γ	a_γ	h	1/h	a_γ	h	1/h
0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,53	1,04	0,98	1,02	1,01	0,99	1,01
0,67	1,06	0,97	1,03	1,01	0,98	1,02
0,84	1,09	0,95	1,05	1,02	0,97	1,03
1,07	1,12	0,93	1,08	1,04	0,95	1,05
1,35	1,18	0,89	1,13	1,08	0,93	1,08
1,71	1,29	0,83	1,20	1,14	0,89	1,12
2,16	1,46	0,75	1,33	1,26	0,83	1,20
2,74	1,77	0,65	1,54	1,49	0,75	1,33
3,48	2,34	0,52	1,91	1,95	0,63	1,58
4,40	3,40	0,39	2,54	2,84	0,49	2,04
5,56	5,40	0,28	3,59	4,56	0,34	2,98
7,04	9,31	0,18	5,42	7,99	0,24	4,16

Tabella 4.11 Shift factor NL per i bitumi tradizionali N1 e N2

	S1			S2		
γ	a_γ	h	1/h	a_γ	h	1/h
0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,53	1,02	0,97	1,03	1,10	0,94	1,06
0,67	1,04	0,96	1,05	1,13	0,93	1,08
0,84	1,06	0,94	1,06	1,17	0,91	1,10
1,07	1,10	0,92	1,09	1,22	0,88	1,13
1,35	1,16	0,89	1,12	1,29	0,85	1,18
1,71	1,26	0,85	1,18	1,40	0,80	1,25
2,16	1,41	0,79	1,26	1,56	0,74	1,35
2,74	1,67	0,71	1,40	1,83	0,66	1,50
3,48	2,08	0,61	1,64	2,29	0,57	1,77
4,40	2,72	0,49	2,06	3,11	0,45	2,22
5,56	3,75	0,36	2,81	4,63	0,33	3,04
7,04	5,41	0,28	3,56	7,56	0,24	4,23

Tabella 4.12 Shift factor NL per i bitumi modificati S1 e S2

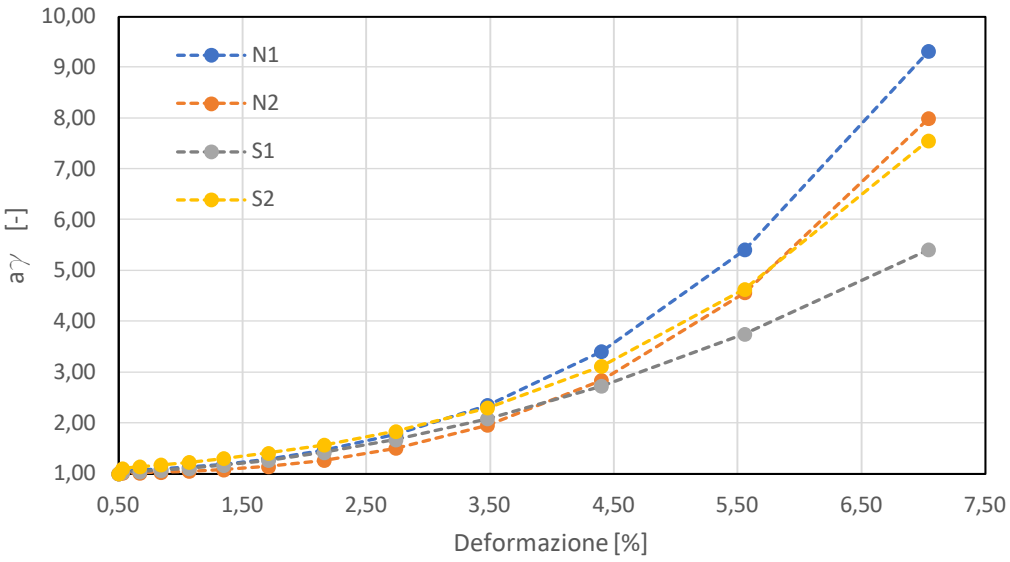

Figura 4.16 Shift factor NL orizzontale

Lo *shift factor* a_γ è un fattore traslazionale orizzontale che riduce la frequenza angolare e determina un cambio di pendenza della curva maestra. Dalla Fig. 4.16 e dalla Tab. 4.11, Tab.4.12 si può constatare che il suo valore parte da un valore unitario, comportamento assimilabile al comportamento in campo viscoelastico lineare, per aumentare all'aumentare della deformazione esplorata. Più ci si allontana dal valore unitario, più intervengono gli effetti di dissipazione di energia dovuti alla non linearità. I bitumi N2 e S2 sembrano avere lo stesso andamento, mentre i bitumi N1 e S1 hanno comportamenti opposti. S1 presenta valori inferiori di non linearità a differenza di N1 che assume i più alti valori di non linearità. Si può affermare che il materiale che si discosta maggiormente dal campo viscoelastico lineare, con elevati valori di dissipazione di energia dovuti agli effetti di non linearità sia N1.

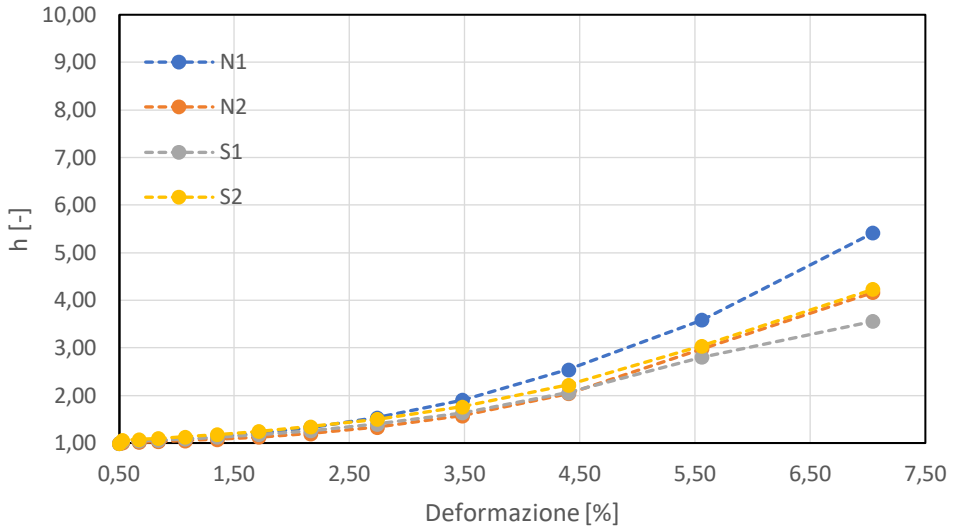

Figura 4.17 Shift factor h verticale

Lo *shift factor h* è un fattore traslazionale verticale che agisce direttamente sulla norma del modulo complesso. Dalla Figura 4.17 e dalle Tab. 4.11 e Tab. 4.12 si può notare che il suo valore parte da un valore unitario, corrispondente a un comportamento in campo LVE, per diminuire all'aumentare dell'ampiezza di deformazione. Per assunzione si è deciso di rappresentare nella fig.4.17 il reciproco di *h*. Anche in questo caso, si parte da un comportamento viscoelastico lineare coincidente all'unità per poi allontanarsi sempre più addentrandosi nel dominio non lineare. Il bitume N1 sembra essere affetto da maggior fenomeni di non linearità, mentre i bitumi S2 e N2 assumono lo stesso comportamento a tutti i livelli di deformazione. Invece, S1 in un primo momento tende a seguire e a manifestare la stessa tendenza di N2, ma più le deformazioni diventano maggiori e più si discosta, assumendo valori inferiori. Quindi è l'unico materiale che ad alte deformazioni presenta minore dissipazione di energia.

5. MATLAB

In una prima fase sperimentale, i dati grezzi sono stati analizzati con il programma di calcolo Excel. In una fase successiva, si è deciso di integrare e di rendere oggetto fondamentale di questa tesi sperimentale Matlab, ambiente di programmazione che consente l'elaborazione dei dati. Si è così sviluppato con un linguaggio di programmazione un codice che potesse consentire, indipendentemente dalla dimensione dei dati di input, la lettura dei dati di ingresso e la successiva elaborazione così come si è fatto precedentemente in Excel.

Il programma è costituito da una parte principale, denominata *interfaccia.m*, e da una serie di funzioni che si appoggiano al file principale.

Il file *interfaccia.m* è il programma di interfaccia con l'utente, nel quale si caricano i dati in formato "*.xlsx"* che si vogliono elaborare e se ne esegue una lettura.

Le funzioni sono programmi a sé stanti, ma che si appoggiano al file principale mediante un richiamo di variabili di ingresso e di uscita. Tramite queste funzioni esterne, è stato possibile scrivere il codice relativo al trattamento dei dati e alla loro analisi. Sempre tenendo conto se i bitumi subissero rottura o meno, perché qualora dovesse capitare che un bitume si rompa appare un messaggio in un box con l'avvenuta rottura. Nello stesso ambiente di codice, si sono disegnati i grafici d'interesse.

5.1 Origine e storia del softwar

Tra gli anni 70 e 80 del XX secolo, un professore di Algebra Lineare e Analisi Numerica dell'Università del New Mexico di nome Cleve Corner sviluppò una semplice calcolatrice interattiva, per dare un abile supporto di studio ai suoi studenti. Il suo prodotto lo chiamò Matlab, un acronimo di *Matrix Laboratory*. Il suo intento era quello di creare un ambiente computazionale che si potesse svincolare dalla conoscenza del linguaggio Fortran e di conseguenza che non richiedesse la sua conoscenza dei linguaggi di programmazione.

Furono Jack Little e Steve Bangert che successivamente implementarono e scrissero una nuova versione di Matlab. Essi introdussero funzioni, toolbox e grafica, grazie anche

all'avvento del primo PC IBM che ne consentì l'elaborazione. Nel 1984, PC-Maltab fece il suo primo debutto alla IEEE *Conference on Decision and Control* a Las Vegas. L'anno successivo uscì la versione Pro-Matlab.

Nel corso degli anni, Matlab ha continuato ad evolversi e a stare al passo dell'evoluzione tecnologica per soddisfare le esigenze sia a livello universitario sia lavorativo e sperimentale. Al giorno d'oggi, Matlab è un ambiente di programmazione che consente l'analisi di dati, sviluppi di programmi e sistemi complessi. Si basa su un linguaggio di programmazione di alto livello che permette di lavorare direttamente su matrici, vettori, table, structur e celle. Include al suo interno numerosi toolbox e ambienti di simulazione, deep learning e molto altro.

5.2 Strutturazione del programma

Il programma è stato sviluppato su diversi file, in maniera tale che ciascuno di essi potessero svolgere parti ben definite e strutturate dell'analisi. L'intento di questo paragrafo è di far capire al lettore come ogni singolo file lavori, quali componenti esterni necessita per funzionare senza addentrarci troppo nel linguaggio di programmazione che verrà trattato nei paragrafi successivi.

Il programma è costituito da:

- Main.m;
- Interfaccia.m;
- Modellocam.m
- Plot.m;
- Analisimat.m;
- Gnormalized.m;
- Mastercurvenlve.m;

Main.m è un programma su cui si appoggia un altro file, denominato *Inferfaccia.m*.

Interfaccia.m è un file realizzato con il *Guide (GUI)* di Matlab, ambiente di interfaccia grafica che consente di creare una finestra di interazione multi-opzionale, con il quale l'utente esterno possa interfacciarsi. L'interfaccia grafica è stata realizzata partendo dal

richiamo del *GUI* dalla *Command Window,* con il comando *"guide"* e subito appare questa finestra rappresentata in Fig.5.1:

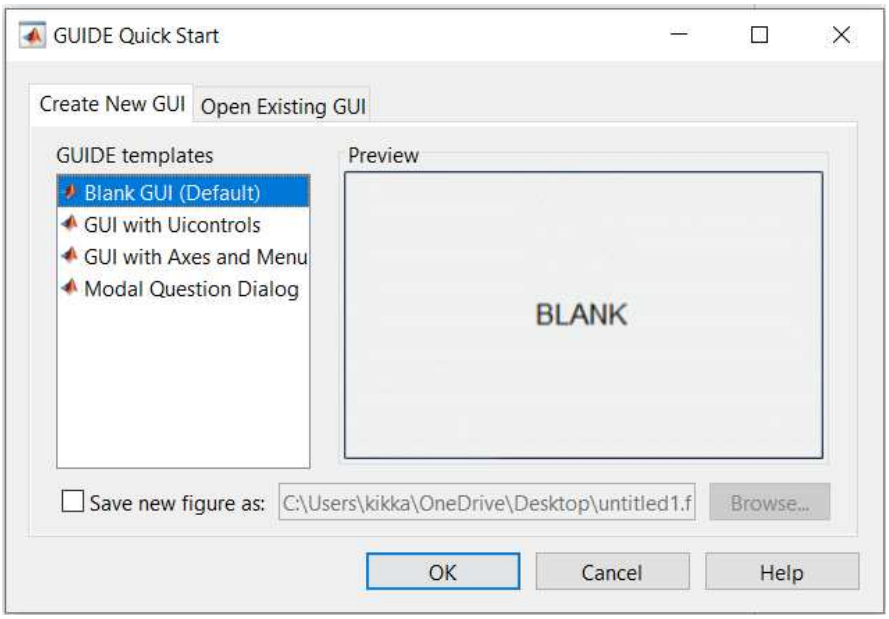

Figura 5.1 Finestra di creazione d'interfaccia GUI (Matlab)

Selezionando la prima voce, si aprirà una nuova finestra come in Fig. 5.2 che permette di partire con un'interfaccia vergine e modellarla a proprio piacimento.

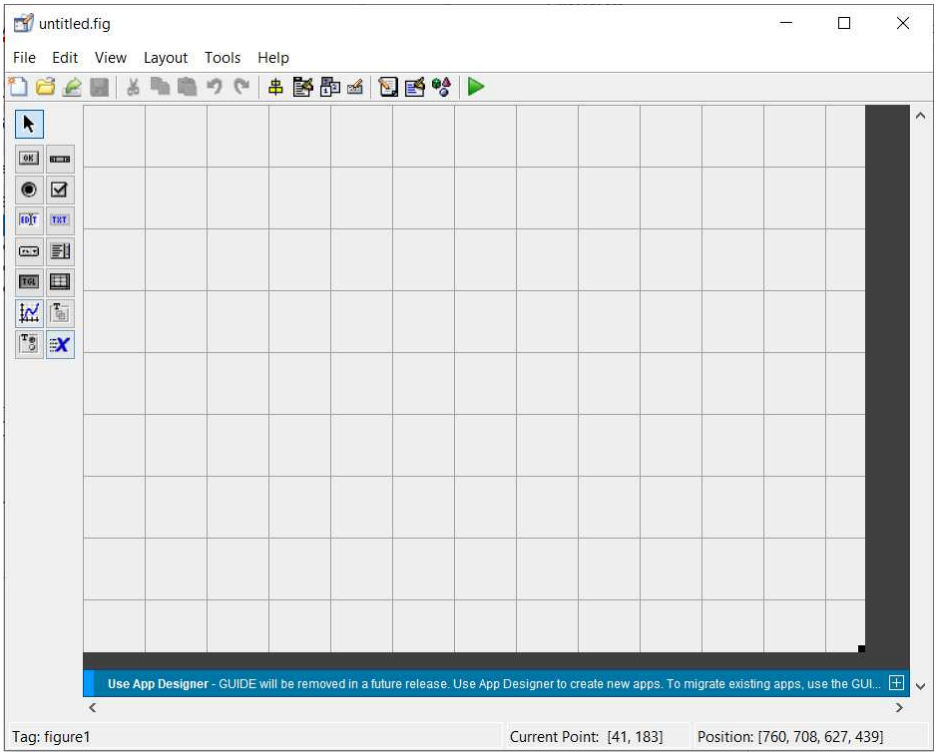

Figura 5.2 Finestra di creazione GUI - Matlab

Questa è stata la procedura adottata per creare l'interfaccia, nella quale sono state inserite i seguenti moduli oggetto:

- Due *Radio Button*, per selezionare quale tipologia di analisi effettuare. Non possono funzionare contemporaneamente;

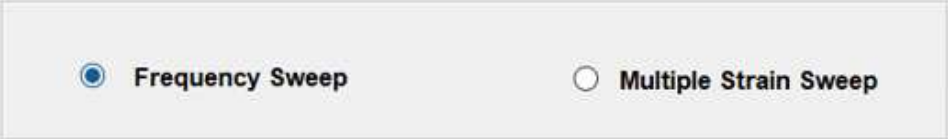

Figura 5.3 Radio Button selezionato a sinistra e deselezionato a destra

- Un *Pop – Up Menu,* menu a tendina di Fig. 5.4 che si apre verso il basso per permettere di selezionare una sola scelta tra le possibili presenti della lista, suddivisa in materiale e temperatura. Popupmenu si attiva solo dopo aver scelto l'analisi di *Multiple Strain Sweep*, perché in caso di selezione di *Frequency Sweep* il menu a tendina rimane disattivato;

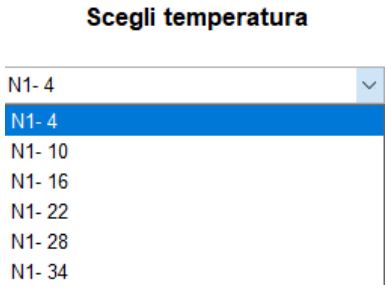

Figura 5.4 Pop-Up Menu: a sinistra si seleziona il materiale e a destra la temperatura

- Tre *Push Button*, distinti in *Run*, *Exit e Clear windows.* In Fig. 5.5 si può distinguere il pulsante *Run* con lo scopo di far eseguire il programma, mentre il pulsante *Exit* per uscire dalla finestra di interazione grafica e terminare l'esecuzione del programma. Invece, in Fig. 5.6 si trova la terza e ultima opzione per chiudere tutte le finestre ai grafici realizzati dall'analisi.

Figura 5.5 Push Button: a sinistra il Run e a destra il tasto di Exit

Figura 5.6 Push Button: elimina le figure

- Axis, nel quale è stato inserito il logo del Politecnico di Torino in formato *.png;*

Figura 5.7 Logo del Politecnico di Torino

L'esito finale viene riportato qui sotto in Fig. 5.8.

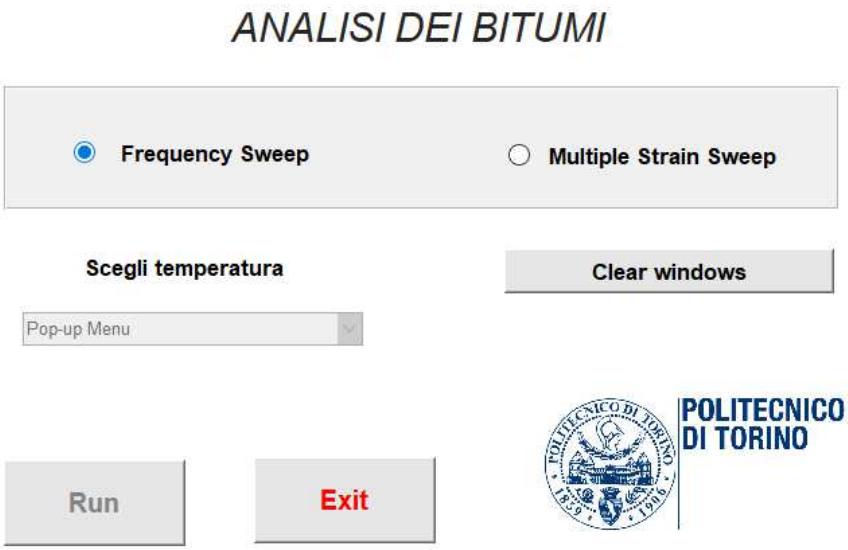

Figura 5.8 Apertura della finestra di interfaccia all'esecuzione del programma

Il *GUI* di Matlab, in base ai moduli oggetto inseriti nella finestra di interfaccia necessitano di essere programmati attraverso delle funzioni con codice sorgente denominati *Callback* (funzione risposta). Matlab restituisce dall'oggetto grafico GUI un codice sorgente che deve essere implementato. La parte grafica viene salvata in un *.fig* file, mentre il codice contiente le chiamate a funzioni in un *.m* file.

Nella funzione del *Push Button* relativo al *Run* si concentra la parte di analisi dell'intero programma e si sono inserite le funzioni di *Plot.m, Modellocam.m, Analisimat.m, Gnormalized.m e Mastercurvenlve.m.*

Il file *Plot.m* legge i dati grezzi passati dal file denominato *data.xlsx* e sulla base della scelta del materiale selezionato nell'interfaccia grafica, permette di rappresentare con delle serie di diagrammi il comportamento del materiale, quante sono le temperature investigate nella fase sperimentale in Fig. 5.9.

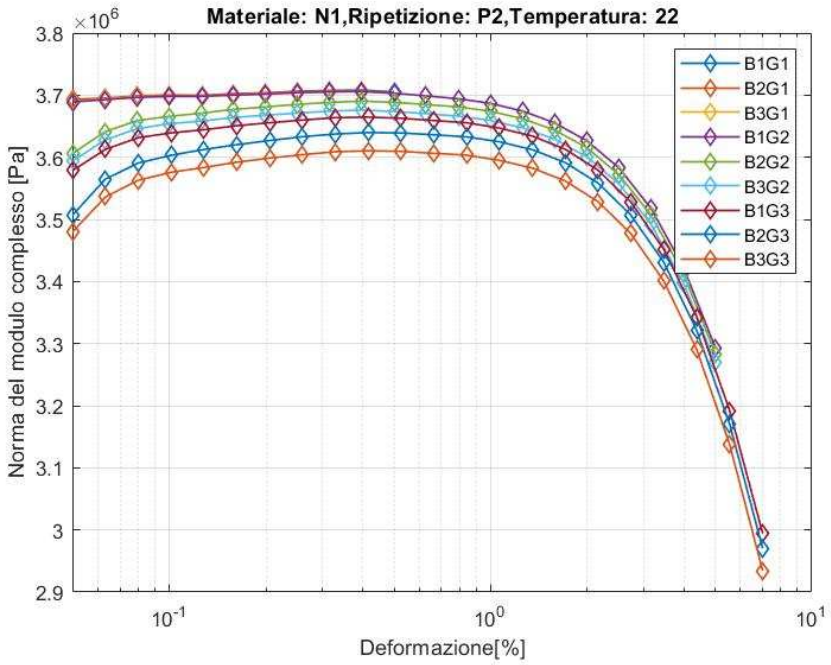

Figura 5.9 Esempio di output della funzione Plot.m

I grafici vengono disegnati in maniera dinamica, sulla base dei dati passati. Inoltre, questa parte di codice è gia in grado di avvertire l'utente, con un apposito messaggio di errore, se il materiale analizzato si fosse rotto durante la prova sperimentale.

Il messaggio di errore avvisa l'utente informandolo a quale prova, a quale temperatura e intervallo si sia verificata la rottura del campione. Un esempio può essere il seguente come in Fig. 5.10:

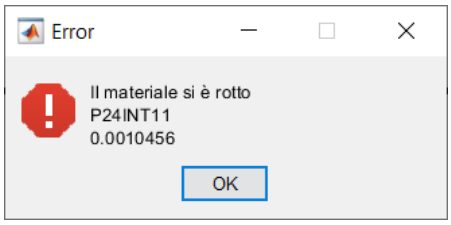

Figura 5.10 Messaggio di errore se il materiale dovesse subire rottura

Dove la sigla P24INT11 significherebbe:

- P2: prova di esecuzione. In questo caso si è verificata la rottura alla seconda prova di un materiale analizzato;
- 4: temperatura di analisi;
- INT11: la rottura ha interessato l'undicesimo intervallo di *Multiple Strain Sweep Test,* ovvero tolti i primi tre intervalli che esplorano il comportamento in campo viscoelastico lineare, sarebbe l'ottavo intervallo in cui il materiale avrebbe un comportamento in campo viscoelastico non lineare*;*

Più avanti verrà trattato l'argomento di come si deve impostare il file *data.xlsx* per poter essere letto dal file *Plot.m*.

Modellocam.m è una funzione che permette l'elaborazione dei dati grezzi ottenuti dalla prova di Frequency Sweep, applicando sia il Principio di sovrapposizione tempo-temperatura sia il modello di *Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM)* con lo scopo di ottenere le curve maestre in campo viscoelasticolineare. Questa funzione è in grado di processare i dati indistintamente dalla scelta effettuata dall'operatore nell'interfaccia grafica.

Durante l'esecuzione del programma, all'utente apparirà una finestra come in Fig. 5.11 e verrà richiesto di digitare in una determinata *dialog box* i valori dei parametri C1, C2 (fino alla quarta cifra significativa) e della temperatura di riferimento (in gradi centigradi °C) a cui si vuole svolgere l'analisi.

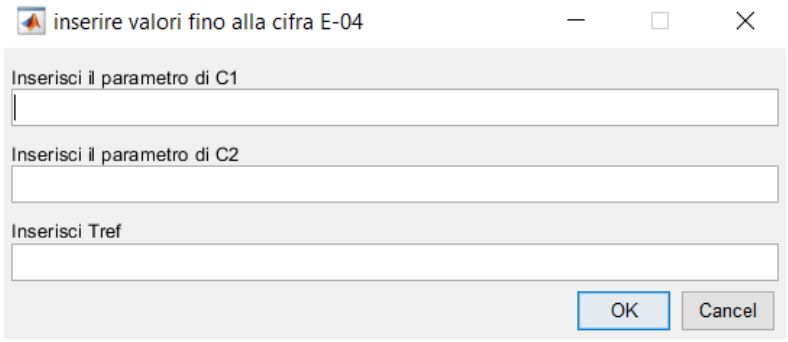

Figura 5.11 Dialog Box per l'utente durante l'esecuzione della funzione Modellocam.m

Una volta inseriti i dati che caratterizzano il materiale scelto per l'analisi e la temperatura di riferimento, la funzione restituisce la risposta del materiale con la rappresentazione grafica della curva maestra distinta in norma del modulo complesso e angolo di fase. A titolo rappresentativo, viene riportata la curva maestra del materiale N1 in Fig. 5.12.

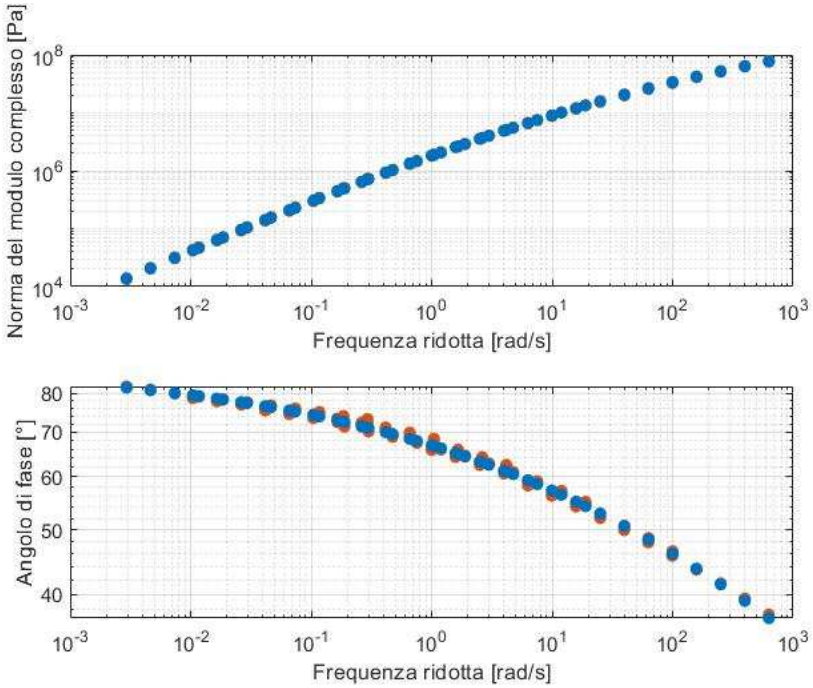

Figura 5.12 Curva maestra del materiale N1 modellata con il modello CAM

Analisimat.m è la parte di analisi e manipolazione dei dati grezzi che consente di isolare le componenti di non linearità dal danno, in campo viscoelastico non lineare. In questo file, dove legge sempre i dati passati da *data.xlsx,* si analizza solamente il materiale alla temperatura selezionata nell'interfaccia e restituisce le risposte in base al numero delle prove sperimentali effettuate.

La trattazione analitica e le procedure adottate sono riportate nel paragrafo §4.2.

I grafici che restituisce il codice sono i seguenti: a titolo di esempio si riportano i grafici del materiale N1 in Fig. 5.13 e Fig. 5.14, alla temperatura di 22°C, alla prima e seconda ripetizione.

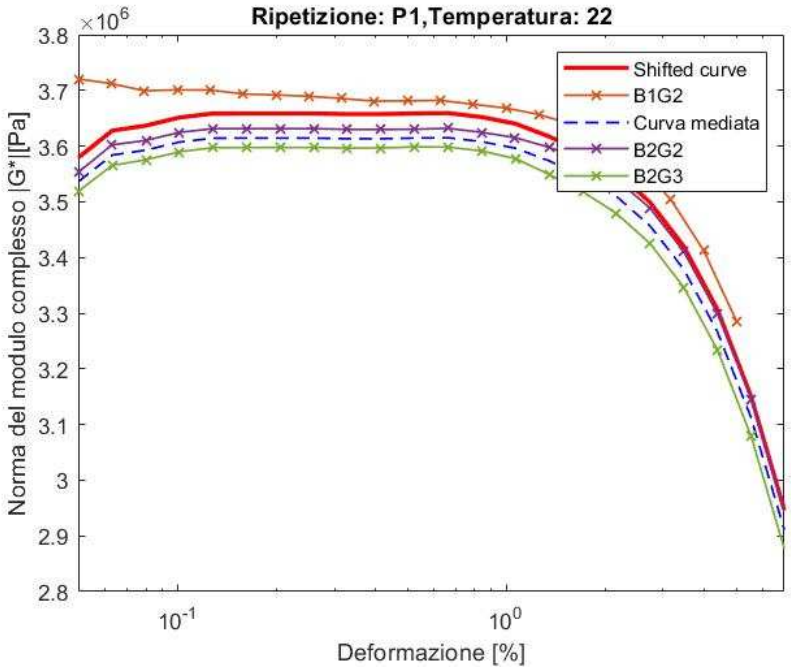

Figura 5.13 Risultati dell'analisi del file Analisimat.m del materiale N1 alla temperatura di prova 22°C

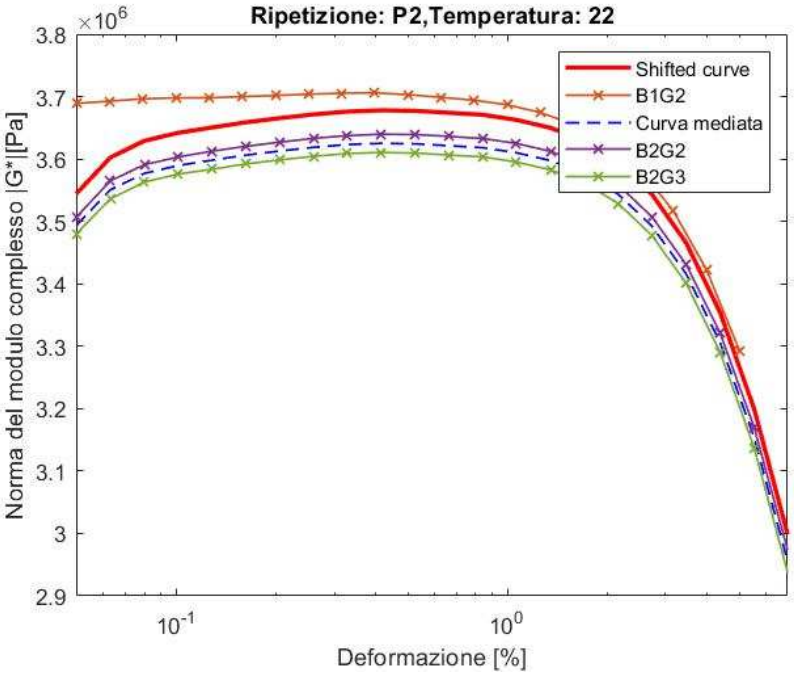

Figura 5.14 Risultati dell'analisi del file Analisimat.m del materiale N1 alla temperatura di prova 22°C

Gnormalized.m è analogo al file precedente, ma si differenza dal fatto che analizza tutto il materiale selezionato, indipendentemente dalla temperatura scelta. Il risultato finale di questa analisi permette di riportare in un grafico il valore della norma del modulo complesso non lineare normalizzato rispetto alla norma del modulo complesso in campo LVE, al variare della deformazione e della temperatura.

La trattazione analitica e le procedure adottate sono riportate nel paragrafo §4.2.

A titolo di esempio, si riporta in Fig. 5.15 la risposta elaborata del materiale N1.

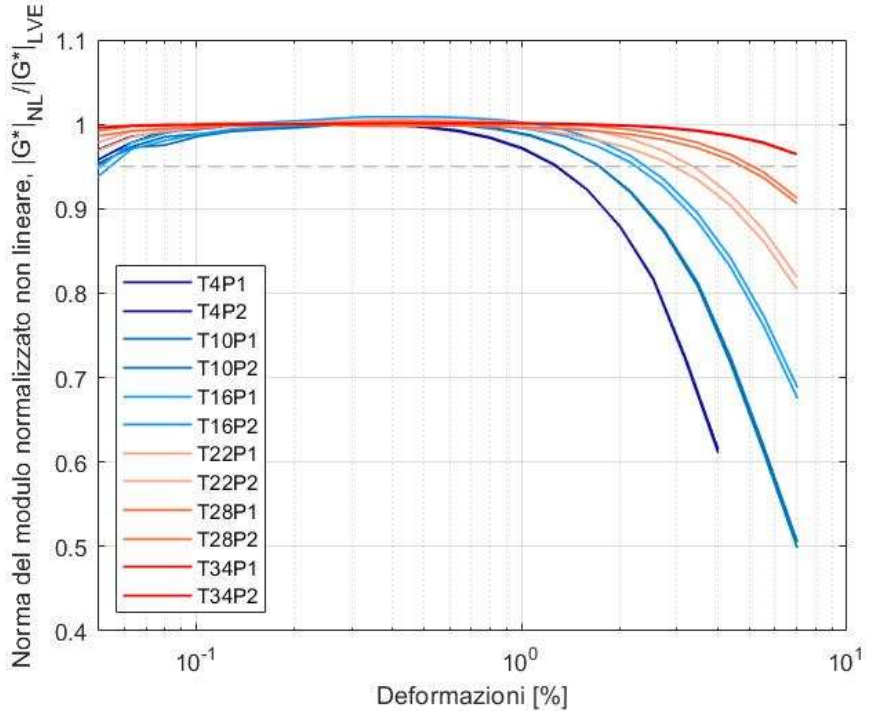

Figura 5.15 Risposta all'analisi Gnormalized.m del materiale N1 alle varie temperature

Mastercurvenlve.m è strutturato in due fasi. In un primo momento, permette di manipolare i dati grezzi con il Modello Generalizzato di Maxwell per restituire le risposte del materiale selezionato, in termini di valore delle norme del modulo complesso e angolo di fase in campo viscoelastico lineare. I parametri del modello CAM ottenuti dalla funzione *Modellocam.m* vengono passati alla funzione *Mastercurvenlve.*m, per sfruttare il Modello Generalizzato di Maxwell e il codice, per poter essere eseguito, necessita di leggere due file di *Excel*: *Collocationmethod.xlsx* e *lve_data.xlsx.*

Collocationmethod.xlsx è un file di Excel che contiene dei valori arbitrati del tempo di rilassamento, mentre *lve_data.xlsx* presenta al suo interno i dati ricavati dal reometro dalla prova di *Frequency Sweep*, quali temperatura e frequenza misurata.

La trattazione analitica e le procedure adottate sono riportate nel paragrafo §2.1.4.5.

Sempre a titolo di esempio in Fig. 5.16, si riporta la risposta del materiale N1 elaborata da questa prima parte di codice.

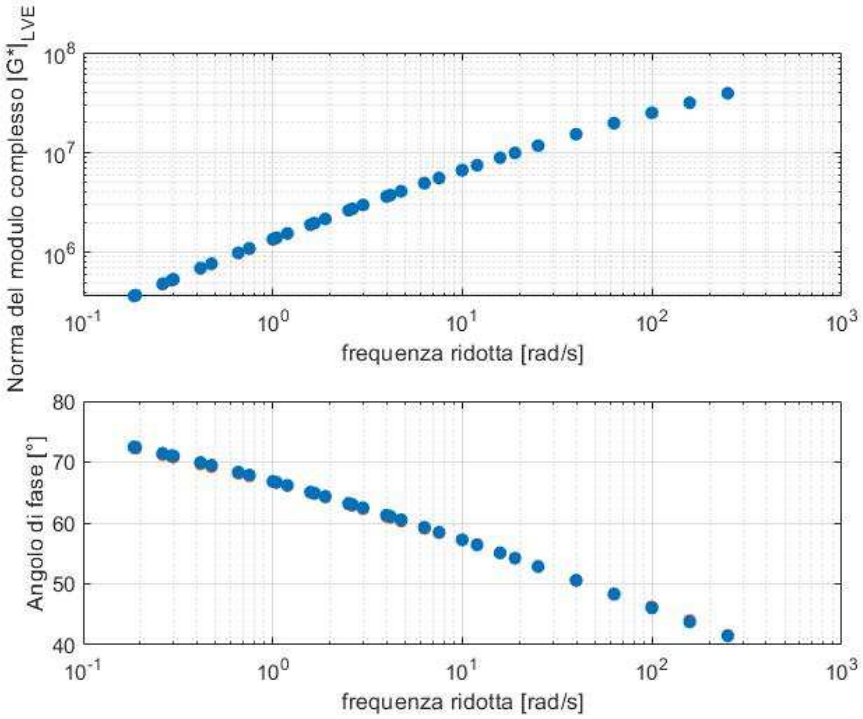

Figura 5.16 Risposta del materiale N1 alla prima parte di elaborazione dei dati utilizzando il modello generalizzato di Maxwell

In un secondo momento, l'analisi viene condotta in campo non lineare: l'obiettivo è quello di determinare i parametri delle curve maestre non lineari, per quelle deformazioni che hanno superato il limite della frontiera viscoelastica lineare.

La trattazione analitica e le procedure adottate sono riportate nel paragrafo §4.2.

Si riporta la risposta della curva maestra non lineare in Fig. 5.17 elaborata dal codice *Mastercurvenlve.m* per il materiale N1.

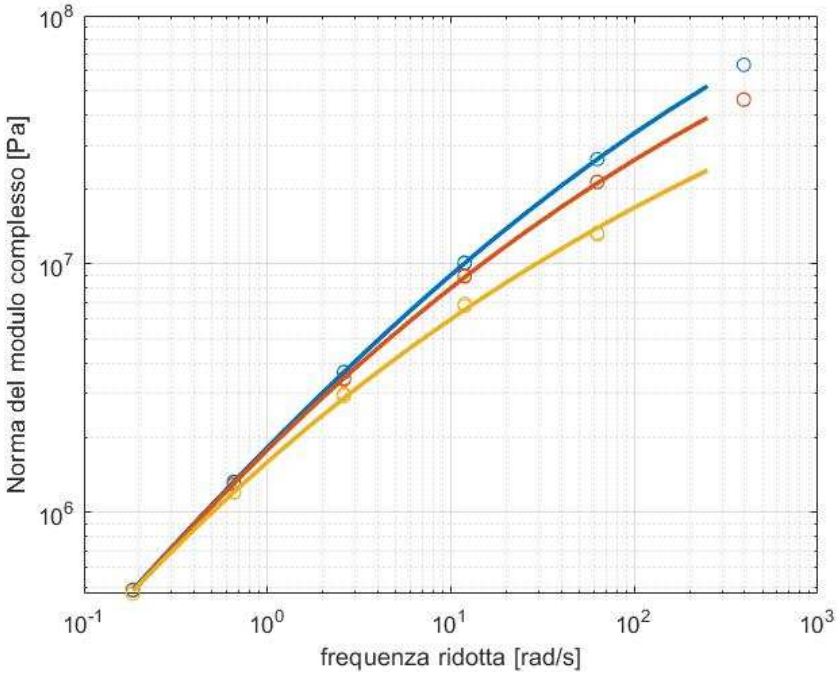

Figura 5.17 Curva maestra del materiale N1 elaborata dal codice Mastercurvenlve.m

5.3 Strutturazione dei file Excel

Matlab richiede l'importazione dei dati sperimentali per poter svolgere le analisi e quest'ultimi vengono acquisti, per mia scelta, da dei file Excel con una determinata impostazione. Se l'utente non seguisse alla lettera la formattazione dei dati, il programma non sarebbe in grado di funzionare.

I file Excel in formato .xlsx forniti a Matlab sono i seguenti:

- FS*.xlsx:
- Data*.xlsx;
- Collocationmethod.xlsx;
- Lve_data.xlsx;

N.B. L'asterisco utilizzato in FS.*xlsx e data*.xlsx rappresenterebbe un numero che si può incrementare in base al numero di materiali che si vogliono analizzare. Quindi, la regola generale sarebbe di creare *n file* quanti sono i materiali che si vogliono testare e incrementare il numero di volta in volta. In questa tesi sono stati realizzati quattro file per FS* e quattro file per data*: FS1.xlsx, FS2.xlsx, FS3.xlsx, FS4.xlsx, data1.xlsx, data2.xlsx, data3.xlsx e data4.xlsx.

5.3.1 FS.xlsx

A titolo rappresentativo, si riporta solo una piccola parte del file con lo scopo di far intendere al lettore come è stato strutturato. Dal file generato dal reometro tramite la prova di *Frequency Sweep,* si è fatta una scrematura dei dati e si sono selezionati solamente quattro voci quali temperatura [°C], frequenza [rad/s], norma del modulo complesso [Pa] e angolo di fase [°] come rappresentato in Tab. 5.1.

temperatura	frequenza	Modulo	fase
34,00	1,00	13948,10	81,70
34,00	1,58	21132,20	80,81
34,00	2,51	31875,80	79,91
34,00	3,98	47869,70	79,04
34,00	6,31	71554,80	78,20
34,00	10,00	106513,00	77,37
34,00	15,80	157983,00	76,54
34,00	25,10	233312,00	75,68
34,00	39,80	343079,00	74,78
34,00	63,10	502513,00	73,72
34,00	100,00	732476,00	72,75
28,00	1,00	43218,80	78,66
28,00	1,58	64495,80	77,80
28,00	2,51	95855,10	76,91
28,00	3,98	141883,00	76,02
28,00	6,31	209142,00	75,12
28,00	10,00	306764,00	74,18
28,00	15,80	447816,00	73,16
28,00	25,10	650316,00	72,06
28,00	39,80	939286,00	70,87
28,00	63,10	1348150,00	69,59
28,00	100,00	1922630,00	68,19

Tabella 5.1 Struttura del file FS.xlsx

Questa struttura è stata adottata per tutti i materiali coinvolti nell'analisi. Viene utilizzato dal codice qualora l'utente scelga sia l'opzione di analisi *Frequency Sweep* sia di *Multiple Strain Sweep* dall'interfaccia grafica*,* perché sono dati che stanno alla base per ricavare le curve maestre lineari con il modello CAM nella funzione denominata *Modellocam.m.*

5.3.2 data.xlsx*

Questo è il file più complesso e articolato fra tutti. Nasce da una serie di tentativi di elaborazione del codice che ha portato a suddividere le informazioni in più voci, in maniera tale che quest'ultime possano essere utilizzate dal compilatore come appositi filtri. Si sono distinte otto colonne affinché ciascuna di essa potesse essere gestita e passata da Matlab come una variabile di struttura:

- Temperatura: Contiene le informazioni del materiale e della temperatura analizzata;
- Prova_Intervallo: Contiene la voce P1 o P2, relativa al numero di prove eseguite, e gli intervalli che possono andare da 1 a *n.*
    - I primi tre intervalli equivalgono alle letture eseguite dal reometro nel gruppo 1, presupponendo che il comportamento ricadi in campo LVE quindi:
        - INT1 = GRUPPO 1 BLOCCO 1
        - INT2 = GRUPPO 1 BLOCCO 2
        - INT3 = GRUPPO 1 BLOCCO 3
    - Gli altri intervalli corrispondo invece al gruppo 2, gruppo 3 etc e dipendono esclusivamente dalla scelta dell'operatore come ha strutturato la suddivisione delle ampiezze di deformazione nell'impostazione del reometro. Di conseguenza:
        - INT4 = GRUPPO 2 BLOCCO 1
        - INT5 = GRUPPO 2 BLOCCO 2
        - INT6 = GRUPPO 2 BLOCCO 3
        - INT7 = GRUPPO 3 BLOCCO 1
        - INT8 = GRUPPO 3 BLOCCO 2
        - INT9 = GRUPPO 3 BLOCCO 3
        - INT10 = GRUPPO 4 BLOCCO 1
        - INT11 = GRUPPO 4 BLOCCO 2
        - INT12 = GRUPPO 4 BLOCCO 3
- G: è il valore del modulo complesso in [Pa];
- Strain: è la deformazione;

- Materiale: la sigla del materiale analizzato;
- Temp: è la scorporazione di prova_intervallo, perché serviva solo l'informazione della temperatura;
- Prova: Numero della ripetizione della prova;
- Int: il numero di intervallo progressivo che corrisponderebbe al valore di gruppo e blocco analizzato;

A titolo di esempio, per via dell'elevata numerosità di dati sperimentali, si riporta solo un piccolo estratto di esso.

temperatura	prova_Intervallo	G	strain	materiale	temp	prova	int
N1- 4	P1-INT1	67362670	0,050	N1	4	P1	INT1
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT1	67024180	0,500	N1	4	P1	INT1
N1- 4	P1-INT2	67166690	0,050	N1	4	P1	INT2
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT2	66817980	0,500	N1	4	P1	INT2
N1- 4	P1-INT3	66952420	0,050	N1	4	P1	INT3
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT3	66827450	0,500	N1	4	P1	INT3
N1- 4	P1-INT4	66953750	0,050	N1	4	P1	INT4
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT4	59020620	2,010	N1	4	P1	INT4
N1- 4	P1-INT5	65525260	0,050	N1	4	P1	INT5
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT5	58980990	2,010	N1	4	P1	INT5
N1- 4	P1-INT6	65488290	0,050	N1	4	P1	INT6
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT6	59148840	2,010	N1	4	P1	INT6
N1- 4	P1-INT7	65737950	0,050	N1	4	P1	INT7
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT7	50627210	3,020	N1	4	P1	INT7
N1- 4	P1-INT8	64854500	0,050	N1	4	P1	INT8
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT8	50710070	3,020	N1	4	P1	INT8
N1- 4	P1-INT9	64994870	0,050	N1	4	P1	INT9
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT9	50809100	3,020	N1	4	P1	INT9
N1- 4	P1-INT10	65192150	0,050	N1	4	P1	INT10
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT10	41844070	4,020	N1	4	P1	INT10
N1- 4	P1-INT11	64335600	0,050	N1	4	P1	INT11
-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT11	41165450	4,020	N1	4	P1	INT11
N1- 4	P1-INT12	63151650	0,050	N1	4	P1	INT12

-	-	-	-	-	-	-	-
N1- 4	P1-INT12	40659760	4,020	N1	4	P1	INT12

Tabella 5.2 Strutturazione del file data1.xlsx per il materiale N1

La struttura di Tab. 5.2 è stata adottata per tutti e quattro i materiali N1, N2, S1 e S2 e viene elaborata sia dalla funzione *Plot.m* sia da *Analisimat.m.*

5.3.3 collocationmethod.xlsx

Questo file, come riporta il nome stesso, viene utilizzato per svolgere la parte iniziale del Modello Generalizzato di Maxwell. Sono dati input che devono essere caricati nella funzione *Mastercurvenlve.m*. In questa tesi si sono scelte 32 decadi temporale e analogamente dei valori arbitrari per il tempo di rilassamento.

rho_m
2,00E-08
6,00E-08
2,00E-07
6,00E-07
2,00E-06
6,00E-06
2,00E-05
6,00E-05
2,00E-04
6,00E-04
2,00E-03
6,00E-03
2,00E-02
6,00E-02
2,00E-01
6,00E-01
2,00E+00
6,00E+00
2,00E+01
6,00E+01
2,00E+02
6,00E+02
2,00E+03
6,00E+03
2,00E+04
6,00E+04
2,00E+05
6,00E+05

2,00E+06
6,00E+06
2,00E+07
6,00E+07

Tabella 5.3 Valori arbitrati per il tempo di rilassamento adottato nel collocation Method

5.3.4 lve_data.xlsx

Questo file nasce come estrapolazione del file FS.xlsx, in quanto era necessario ottenere solo determinate informazioni quali la temperatura e la frequenza misurata dal reometro rotazionale dalla prova di *Frequency Sweep*.

Lve_data.xslx deve essere caricato nel file Matlab *Mastercurvelve.m* per poter eseguire sia l'analisi con le Serie di Prony sia l'analisi in campo non lineare.

Temperatura	frequenza_angolare
34,00	1
34,00	1,58
34,00	2,51
34,00	3,98
34,00	6,31
34,00	10
34,00	15,8
34,00	25,1
34,00	39,8
34,00	63,1
34,00	100
28,00	1
28,00	1,58
28,00	2,51
28,00	3,98
28,00	6,31
28,00	10
28,00	15,8
28,00	25,1
28,00	39,8
28,00	63,1
28,00	100

Tabella 5.4 Tabella lve_data.xlsx

5.4 Funzionamento del programma

Il programma è stato strutturato per lavorare a iterazioni con chiamate di funzioni.

Purtroppo il limite di Matlab è che al ritorno di ogni funzione, tutte le variabili utilizzate nelle funzioni vengono cancellate dal Workspace e per questo motivo, se si è interessati a vedere il valore corrispondente di ciascuna variabile è necessario utilizzare il *Debugger* di Matlab.

Il *Debugging* è un importante strumento che permette all'utente di analizzare una porzione del codice sorgente e generalmente il suo scopo è quello di individuare potenziali errori o *bug,* per poterli correggere. In questo caso specifico, il *Debugging* viene adottato per arrestare il programma in una specifica linea di codice inserendo appositi *breakpoints,* per poter estrapolare i dati interessati.

Il *Debugger* di Matlab è collocato nell'editor, sotto la dicitura di *Breakpoints.*

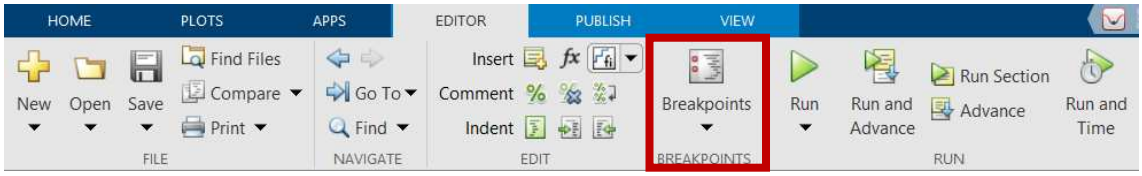

Figura 5.18 Menu Editor di Matlab

Selezionando il comando nell'apposito editor, si apre un menu a tendina dove si possono selezionare diverse opzioni e in questo caso specifico siamo interessati solamente a due comandi: il primo è il *Set/Clear,* il quale consente di inserire o rimuovere un *breakpoint* a una specifica linea di comando, il secondo è il *Clear All* che permette di rimuovere qualsiasi *breakpoints* presenti all'interno del codice sorgente.

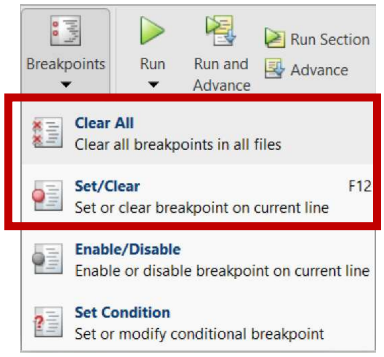

Figura 5.19 Opzioni di debugging in Matlab

Altrimenti, la versione più semplificata è quella di selezionare con il tasto a sinistra del mouse la stanghetta alla 257esima linea di comando e posizionare il *breakpoint*: apparirà una pallina rossa.

```
252    % ----------------------- FREQUENCY SWEEP TEST --------------------------
253    % Applicazione del Modello CAM
254    % Radiobutton 4
255 -  if get(handles.radiobutton4,'Value')==1
256 -  [C1,C2,vv,m,logwc,logGg,Gt_cam,Trif]=modellocam();
257 ●  end
```

Figura 5.20 Inserire il Breakpoint nel codice sorgente

Una volta posizionato, si deve selezionare la voce *Run* presente nell'editor per avviare il programma.

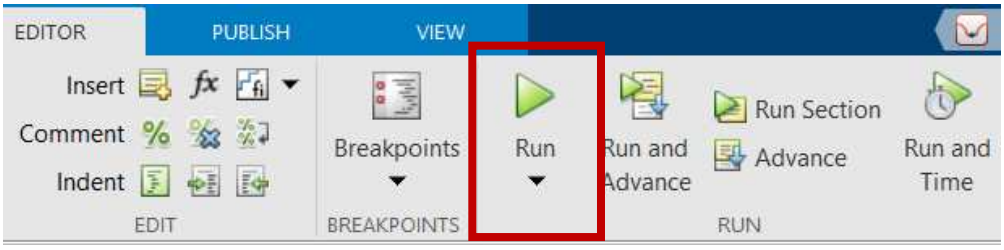

Figura 5.21 Tasto Run per avviare il programma

Si arresterà al posto prefissato e sul lato a destra del Workspace compariranno tutte le voci delle variabili di interesse. In Fig.5.22 viene evidenziato dove si possono trovare le risposte dell'analisi.

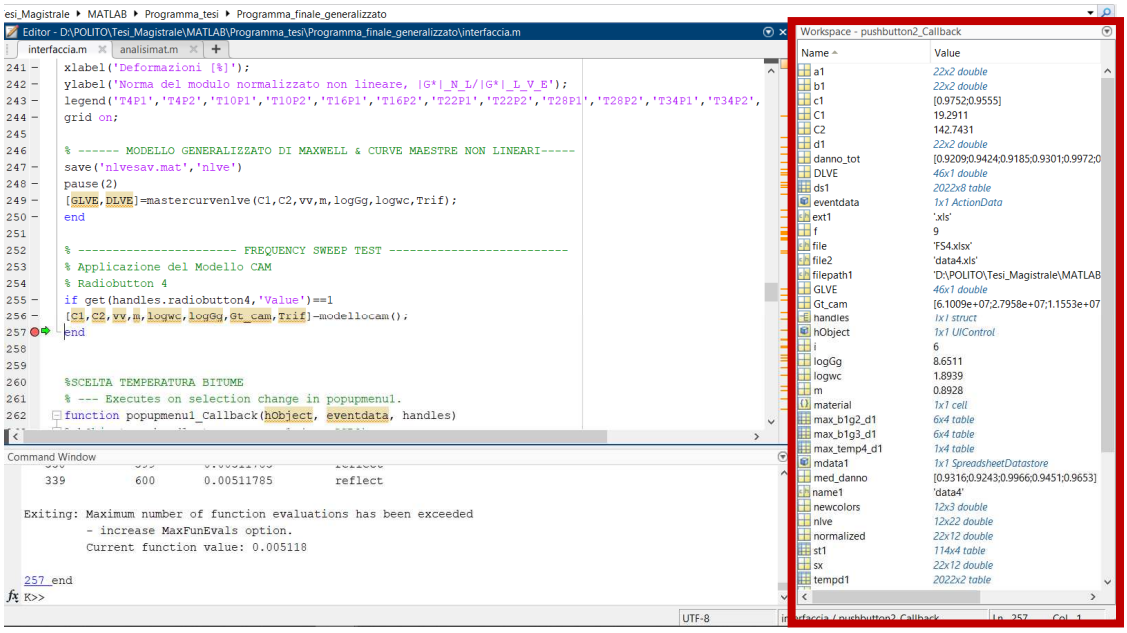

Figura 5.22 Workspace con i dati inerenti all'analisi

Basta selezionare una delle voci presenti all'interno del Workspace per estrapolare le informazioni che si vogliono ottenere.

Per arrestare l'analisi e se si volesse iniziare una nuova interazione, si dovrebbe uscire dal *Debugger* selezionando la voce in alto nell'editor chiamato *Quit Debug,* come in Fig. 5.23.

Figura 5.23 Fine esecuzione di Debugging

Una volta usciti, prima di iniziare una nuova analisi sarebbe conveniente effettuare una pulizia del *Command Window e Workspace*: dal *Command Window* digitare entrambi i comandi di

- Clear: pulisce la memoria del *Workspace;*
- Clc: pulisce la memoria del *Command Window;*

5.5 Main.m

```
close all;
clear;
clc;

% ----------LETTURA ------------
%Programma di interfaccia grafica
uiwait(interfaccia);
```

5.6 Interfaccia.m

```
function varargout = interfaccia(varargin)
% INTERFACCIA MATLAB code for interfaccia.fig
%      INTERFACCIA, by itself, creates a new INTERFACCIA or raises the
existing
%      singleton*.
%
%      H = INTERFACCIA returns the handle to a new INTERFACCIA or the
handle to
%      the existing singleton*.
%
%      INTERFACCIA('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the
local
%      function named CALLBACK in INTERFACCIA.M with the given input
arguments.
```

```
%
%      INTERFACCIA('Property','Value',...) creates a new INTERFACCIA
or raises the
%      existing singleton*.  Starting from the left, property value
pairs are
%      applied to the GUI before interfaccia_OpeningFcn gets called.
An
%      unrecognized property name or invalid value makes property
application
%      stop.  All inputs are passed to interfaccia_OpeningFcn via
varargin.
%
%      *See GUI Options on GUIDE's Tools menu.  Choose "GUI allows
only one
%      instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help interfaccia

% Last Modified by GUIDE v2.5 13-Feb-2021 22:07:49

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                   'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                   'gui_OpeningFcn', @interfaccia_OpeningFcn, ...
                   'gui_OutputFcn',  @interfaccia_OutputFcn, ...
                   'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                   'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT


% --- Executes just before interfaccia is made visible.
function interfaccia_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to interfaccia (see VARARGIN)

% Choose default command line output for interfaccia
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
    set(handles.radiobutton4,'Enable','on');
    %Vettore che carica i dati
%     handles.popupmenu2.String = tmpd1.temperatura;
```

```
% UIWAIT makes interfaccia wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);


% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = interfaccia_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

%BOTTONE EXIT
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
closereq()


% --- Executes on key press with focus on radiobutton1 and none of its
controls.
function radiobutton1_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to radiobutton1 (see GCBO)
% eventdata  structure with the following fields (see
MATLAB.UI.CONTROL.UICONTROL)
%   Key: name of the key that was pressed, in lower case
%   Character: character interpretation of the key(s) that was pressed
%   Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control, shift)
pressed
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%BOTTONE RUN
% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
%--------------------------LETTURA DEI FILE-------------------------
----
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%Permette di caricare i dati letti di input:
%quali data*.xlsx e FS*.xlsx
load('wmain.mat');

%Comando se si selezionasse la prova di Multiple Strain Sweep
if get(handles.radiobutton5,'Value')==1
mdata1 = spreadsheetDatastore(file2)
%Estrapolazione del percorso, del nome e dell'estezione dei file
[filepath1,name1,ext1]=fileparts(mdata1.File);

%Lettura dei file caricati
ds1 = readall(mdata1);
%Determinare i valori massimi di deformazione per il materiale data1
d1 = ds1(:,{'temperatura','prova_Intervallo','strain'});
```

```
st1 = grpstats(d1,{'temperatura','prova_Intervallo'},'max');
%filtro per il gruppo 2 del materiale data - (valido per le alte
%temperature, ad eccetto della temperatura 4)
max_b1g2_d1 = st1(categorical(st1.prova_Intervallo) == 'P1-INT4',:);
%filtro per il gruppo 3 del materiale data - (valido per le alte
%temperature, ad eccetto della temperatura 4)
max_b1g3_d1 = st1(categorical(st1.prova_Intervallo) =='P1-INT7',:);
%filtro per il gruppo 3 del materiale data1 valido SOLO per le basse
%temperature
max_temp4_d1 = st1(categorical(st1.prova_Intervallo) =='P1-INT10',:);
%Ricerca delle temperature presenti nel file
tempd1 = ds1(:,{'temperatura','strain'});
%Filtro delle temperature per il file
tmpd1 = grpstats(tempd1,{'temperatura'},'max');


%Indice materiale
material = ds1.materiale(1);

%Indice temperatura
tempx = get(handles.popupmenu2,'Value');
%Messaggio di avviso della temperatura selezionata
msgbox(strcat('Temperatura:',num2str(tempx)));
%Salvataggio di alcune variabili che serviranno
%nelle funzioni successive
save ('mdata1.mat','mdata1','ds1','tmp*');


%Si inizializza un vettore a zero
normalized=zeros();


%Messaggio di avviso a quale deformazione massima
msgbox(strcat('Stai analizzando la massima
deformazione:',num2str(tmpd1.max_strain(tempx))));

%----------------------------- GRAFICI DEL MSS-------------------------
---
%Funzione per il plot di MSS
[x,y] = plotmss(1);
pause(1)
% ------------------------ MODELLO CAM IN CAMPO LVE ------------------
---
% %Funzione per l'analizi delle Frequency Sweep
[C1,C2,vv,m,logwc,logGg,Gt_cam,Trif]=modellocam();
pause(1)
% ----------------------- ANALISI DI NON LINEARITA'--------------------
---
%Funzione per l'analisi tra gruppi
[x2,y2] = analisimat(tempx,Gt_cam);

%Filtro delle temperature
tflt = ds1(:,{'temp'});
ttflt = grpstats(tflt,{'temp'},'gname');

%Inizializzazione del vettore danno_tot a zero
danno_tot=zeros();

%Ciclo iterativo per poter analizzare la funzione Gnormalized.m
for i = 1 : height(ttflt)
    [a1,b1,c1,d1] = gnormalized(i,Gt_cam(i,1));
```

```
    danno_tot=[danno_tot;c1];
    for f = 1:height(b1)
        if i == 1
            normalized(f,i*2-1)=b1(f,1);
            normalized(f,i*2)=b1(f,2);
            sx(f,i*2-1)=a1(f,1);
            sx(f,i*2)=a1(f,2);
            nlve(f,i*2-1)=d1(f,1);
            nlve(f,i*2)=d1(f,2);
        else
            normalized(f,i*2-1)=b1(f,1);
            normalized(f,i*2)=b1(f,2);
            sx(f,i*2-1)=a1(f,1);
            sx(f,i*2)=a1(f,2);
            nlve(f,i*2-1)=d1(f,1);
            nlve(f,i*2)=d1(f,2);

        end
    end
end

nlve = nlve';
danno_tot(1:3,:)=[];
v=0;
%Calcolo del danneggiamento
for f = 1:2:length(danno_tot)
    v = v+1;
    if danno_tot(f,1) == 0 || danno_tot(f+1,1)==0
        med_danno(v,1) = danno_tot(f+1,1) + danno_tot(f,1);
    else
        med_danno(v,1)=(danno_tot(f,1)+danno_tot(f+1,1))/2;
    end
end


%Vettore della frontiera LVE
vec_lve = 0.95*ones(22,12);

% Grafico
figure
newcolors =  [ 0.06 0.06 0.64
    0.06 0.06 0.64
    0 0.45 0.74
    0 0.45 0.74
    0.07 0.62 1
    0.07 0.62 1
    1 0.64 0.51
    1 0.64 0.51
    0.99 0.42 0.22
    0.99 0.42 0.22
    1 0 0
    1 0 0];
colororder(newcolors)
semilogx(sx,normalized,'LineWidth',1)
hold on;
semilogx(sx,vec_lve,'--','color',[0.65 0.65 0.65]);
xlabel('Deformazioni [%]');
ylabel('Norma del modulo normalizzato non lineare,
|G*|_N_L/|G*|_L_V_E');
legend('T4P1','T4P2','T10P1','T10P2','T16P1','T16P2','T22P1','T22P2','
T28P1','T28P2','T34P1','T34P2','location','southwest');
```

```
grid on;

% ------ MODELLO GENERALIZZATO DI MAXWELL & CURVE MAESTRE NON LINEARI-
----
save('nlvesav.mat','nlve')
pause(2)
[GLVE,DLVE]=mastercurvenlve(C1,C2,vv,m,logGg,logwc,Trif);
end

% ----------------------- FREQUENCY SWEEP TEST ----------------------
---
% Applicazione del Modello CAM
% Radiobutton 4
if get(handles.radiobutton4,'Value')==1
[C1,C2,vv,m,logwc,logGg,Gt_cam,Trif]=modellocam();
end


%SCELTA TEMPERATURA BITUME
% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu1
contents as cell array
%        contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
popupmenu1
 material = get(handles.popupmenu1,'Value');
 if material == 1
    handles.popupmenu2.String = categorical(tmpd1.temperatura);
 end


% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu2
contents as cell array
%        contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
popupmenu2

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%TASTO MULTIPLE STRAIN SWEEP
```

```
% --- Executes on button press in radiobutton5.
function radiobutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to radiobutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton5
if get(hObject,'Value') == 1
    set(handles.popupmenu2,'Enable','on');
    %File Multiple Strain Sweep test
    if get(handles.radiobutton5,'Value') == 1
        [file,path] =uigetfile('FS*.xls*','Seleziona file FS');
        [file2,path2] = uigetfile('data*.xls*','Seleziona file MSS');
        %Abilitazione bottone RUN
        if file ~=0
            if file2 ~=0
                set(handles.pushbutton2,'Enable','on');
                % Caricare i file dei materiali da analizzare
                %Verifica file selezionati: Multiple Strain Sweep
                mdata1 = spreadsheetDatastore(file2)
                %Estrapolazione del percorso, del nome e
dell'estezione dei file
                [filepath1,name1,ext1]=fileparts(mdata1.File);

                %Lettura dei file caricati
                ds1 = readall(mdata1);
                %Determinare i valori massimi di deformazione per il
materiale data1
                d1 =
ds1(:,{'temperatura','prova_Intervallo','strain'});
                st1 =
grpstats(d1,{'temperatura','prova_Intervallo'},'max');
                %filtro per il gruppo 2 del materiale data1 - (valido
per le alte
                %temperature, ad eccetto della temperatura 4)
                max_b1g2_d1 = st1(categorical(st1.prova_Intervallo) ==
'P1-INT4',:);
                %filtro per il gruppo 3 del materiale data1 - (valido
per le alte
                %temperature, ad eccetto della temperatura 4)
                max_b1g3_d1 = st1(categorical(st1.prova_Intervallo)
=='P1-INT7',:);
                %filtro per il gruppo 3 del materiale data1 valido
SOLO per le basse
                %temperature
                max_temp4_d1 = st1(categorical(st1.prova_Intervallo)
=='P1-INT10',:);
                %Ricerca delle temperature presenti nel file1 - N1
                tempd1 = ds1(:,{'temperatura','strain'});
                %Filtro delle temperature per il file1 - N1
                tmpd1 = grpstats(tempd1,{'temperatura'},'max');
                handles.popupmenu2.String =
categorical(tmpd1.temperatura);

                %Verifica file selezionati: Frequency Sweep
                FS = readtable(file);
            end
        end
    end
    save('wmain.mat','file*');
end
```

```
%TASTO FREQUENCY SWEEP
% --- Executes on button press in radiobutton4.
function radiobutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to radiobutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton4
if get(hObject,'Value') == 1
    set(handles.popupmenu2,'Enable','off');

    %Selezione e apertura del file
    %File Frequency Sweep Test
    if get(handles.radiobutton4,'Value') == 1
        [file,path] =uigetfile('FS*.xls*','Seleziona file FS');
        %Abilitazione bottone RUN
        if file ~=0
            set(handles.pushbutton2,'Enable','on');
            %Verifica file selezionati: Frequency Sweep
            FS = readtable(file);
        end
    end
    save('wmain.mat','file*');
end


%CLEAR WINDOWS
% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Comando che permette di elimare tutte le finestre aperte
 tot_fig = findall(groot,'Type','figure');
 for i = 2:length(tot_fig)
    close(tot_fig(i));
 end

%LOGO
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes5
imshow('polito-logo.png')
```

5.7 Plot.m

```
function [z1,z2] = plotmss(datas)
%%----------------- LETTURA DEI DATI PER OTTENERE I GRAFICI ----------
--
load ('mdata1.mat','mdata1','ds1','tmp*')
%Definisco le variabili delle temperature e delle ripetizioni
%Grp è un vettore che definisce le temperature analizzati: valori che
```

```
%devono essere moditicati dall'utente
grp = [ 4 10 16 22 28 34];
%Rip vettore che contiene il numero di ripetizioni fatte: valore che
deve
%essere cambiato dall'utente
rip = ["P1","P2"];

%Lettura del file selezionato
dsx = strcat("dsx","=readall(mdata1",");");
eval(dsx)

%Estrazione delle colonne di interesse per l'analisi
d = strcat('dx','=dsx','(:,{',''''temp'',',''''int'',''prova'',});');
eval(d)

%Determinare i gruppi e i blocchi alle varie temperature per il
materiale
%data - funzione
gb = strcat('gb','=dsx','(:,{',''''temp'',',''''int'',''prova'',});');
eval(gb)

gbx =
strcat('gbx','=grpstats(dx',',{',''''temp'',',''''int'',''prova'',},','''
'max'');');
eval(gbx)

%Indice materiale rotto
idm = 1;

%Lettura della tabella gbx2
for i = 1:length(gbx.temp)
    %Estrazione delle variabili:
    %Intervallo
    xint = gbx.int(i)
    %Temperatura
    xtemp = gbx.temp(i)
    %Prova
    xprova = gbx.prova(i)

    %Estrapolazione della variabile temperatura e intervallo
    idx=regexprep(strcat(xprova,num2str(xtemp),xint) ," ","");
    idx = char(idx);
    %Variabile che genera una tabella in formato P#-#-INT#
    %P#: definisce la ripetizione P1 o P2
    %#: si riferisce alla temperatura analizzata
    %INT: definisce l'intervallo di lettura
    kk = strcat(idx,"=dsx(categorical(dsx.int)=='",xint,"' &
dsx.temp==",num2str(xtemp)," &
categorical(dsx.prova)=='",xprova,"',:)");
    eval(kk)
%-------------------------------------------------------------------
-----
    %Verifica che se il materiale dovesse rompersi
    for j = 1:height(eval(idx))
        vx(j,1) = eval(strcat(idx,'.G(',num2str(j),')'));
        if j > 1
            %Verifica cambio pendenza: controllo tra il valore
precedente e
            %successivo
            ris(j)= vx(j)/vx(j-1);
            if ris(j) > 0 & ris(j)< 0.002 %Valore riferimento rottura
```

```
                %Viene fuori il messaggio di evidenza rottura del
                %materiale, alla prova analizzata
                waitfor(msgbox({'Il materiale si è
rotto';idx;num2str(ris(j))},'Error','error'));
                %Memorizzo in un vettore il materiale, la posizione e
alla
                %temperatura in cui giunge a rottura
                mat_rotto(idm,1) = {idx};
                mat_rotto(idm,2) = num2cell(j);
                idm = idm +1;
            end
        end
    end

end

%Creazione dei grafici di tutte le prove del materiale letto
okfigure = 0;
for k = 1:length(rip)
    for z = 1:length(grp)
        okfigure = okfigure+1;
        for i = 1:length(gbx.temp)
            %Estrazione di variabili
            xint = gbx.int(i)
            %Estrazione di variabili
            xtemp = gbx.temp(i)
            %Estrazione di variabili
            xprova = gbx.prova(i)
            idx=regexprep(strcat(xprova,num2str(xtemp),xint) ," ","");
            idx = char(idx);
            % Grafici creati in maniera dinamica con il comando grf
            if categorical(xprova) ==rip(k) && xtemp == grp(z)
                figure(okfigure)
                grf=strcat("semilogx(",idx,".strain,",idx,".G,'d-
','LineWidth',1)");
                eval(grf)
                hold on;
                title('Materiale:  , Ripetizione:  , Temperatura:  ');
                ylabel('Norma del modulo complesso [Pa]');
                xlabel('Deformazione[%]');
                tlt=strcat("title('Materiale:
",dsx.materiale(1),",Ripetizione: ",xprova,",Temperatura:
",num2str(xtemp),"')");
                eval(tlt);
                grid on;
                if xtemp == 4
                    legend
('B1G1','B2G1','B3G1','B1G2','B2G2','B3G2','B1G3','B2G3','B3G3','B1G4'
,'B2G4','B3G4');
                else
                    legend
('B1G1','B2G1','B3G1','B1G2','B2G2','B3G2','B1G3','B2G3','B3G3');
                end
            end
        end
        autoArrangeFigures(0,0,1) %Dispone automaticamente le figure
nel videoschermo
    end
end
```

```
z1 = 0;
z2 = 0;
end
```

5.8 Modellocam.m

```
function [C1,C2,vv,m,logwc,logGg,Gt_cam,Trif]=modellocam()
% ---------------------- LETTURA DEL FILE -------------------------
---
%Caricare il file dei dati grezzi ottenuti con il Frequency Sweep
Test
load('wmain.mat');
%Lettura dei dati input dalla prova di Frequency Sweep
FS = readtable(file);

%L'utente deve inserire i parametri relativi a C1 e C2 alla cifra:
E-04
%L'utente deve inserire anche il valore della Temperatura di
riferimento in
%gradi Celsius
param = inputdlg({'Inserisci il parametro di C1','Inserisci il
parametro di C2','Inserisci Tref'},'inserire valori fino alla cifra
E-04',[1 75]);

%Assegnazione delle variabili da param
C1 = str2double(cell2mat(param(1)));
C2 = str2double(cell2mat(param(2)));
Trif = str2double(cell2mat(param(3)));

%Assegnazione delle variabili: semplificazione
freq =FS.frequenza;
T = FS.temperatura;


%Ricerca dell'angolo di fase prossimo a 45°
valore = 0;
for i = 1:height(FS.fase)
    if FS.fase(i)>=44 && FS.fase(i)<46
       pos = i;
       valore = FS.fase(i);
    end
    if valore < FS.fase(i)
       valore = FS.fase(i);
    end
end

%Variabili che verranno calcolate con il risolutore
%Valori di partenza
LogGg = 9;
Logwc = log10(FS.frequenza(pos,:));
m = 1;
R = LogGg - log10(FS.Modulo(pos,:));

%%
%Determinare gli shift factor
at = -(C1.*(T - Trif))./(C2+ T - Trif);
%Determinare la frequenza ridotta
wr =(FS.frequenza).*power(10,at);
%Determinare:
```

```
% Normal del modulo complesso
% Angolo di Fase
% G1*cos(delta)
v = log10(2)/R;
for a = 1:length(wr)
    Gdet(a,1) =
power(10,LogGg).*(1+(power(10,Logwc)./wr(a,1)).^v).^-(m/v);
    delta(a,1) = (90*m)./(1+(wr(a,1)./(power(10,Logwc))).^v);
    G1(a,1) = Gdet(a,1).*(cos(delta(a,1)).*pi/180);
end

%% RISOLUTORE
% MODELLO CHRISTENSEN ANDERSON MARASTEANU - CAM
%Si vogliono determinare i parametri del modello CAM

% Equazione della norma del modulo complesso
F1 = @(X,A,B,C,D) ((10.^A).*(1+((10.^B)./(wr)).^C).^-(D/C));
x01 = [LogGg;Logwc;v;m];
F1_error = @(X,A,B,C,D) sum(((((10.^A).*(1+((10.^B)./(wr)).^(C)).^-
(D/C))./(FS.Modulo))-((FS.Modulo)./(FS.Modulo))).^2);
options = optimset('Display','iter','TolX',1e-6);
x1 = fminsearch(@(Y)
F1_error(Gdet,Y(1),Y(2),Y(3),Y(4)),x01,options);


% Equazione dell'angolo di fase
F2 = @(x,A,B,C) ((90*A)./(1+((wr./(10.^B))).^C));
x02 = [m;Logwc;v];
F2_error = @(x,A,B,C)
sum((((((90*A)./(1+((wr./(10.^B))).^C))).^(FS.fase))-
((FS.fase)./(FS.fase))).^2);
options = optimset('Display','iter','TolX',1e-6);
x2  = fminsearch(@(Y) F2_error(delta,Y(1),Y(2),Y(3)),x02,options);


F3 =@(x,A,B,C,D) (((10.^A).*(1+((10.^B)./(wr)).^(C)).^-
(D/C))).*cos((((90*D)./(1+((wr./(10.^B))).^C))).*pi./180);
F3_error = @(x,A,B,C,D)
sum((((((10.^A).*(1+((10.^B)./(wr)).^(C)).^-
(D/C))).*cos((((90*D)./(1+((wr./(10.^B))).^C))).*pi./180)./((FS.Mod
ulo).*cos(((FS.fase).*pi./180))))-
(((FS.Modulo).*cos(((FS.fase).*pi./180))))./((FS.Modulo).*cos(((FS.f
ase).*pi./180))))).^2);
x03 = [LogGg;Logwc;v;m];
options = optimset('Display','iter','TolX',1e-6);
x3 = fminsearch(@(Y)
F3_error(Gdet.*cos(G1.*pi./180),Y(1),Y(2),Y(3),Y(4)),x03,options);

%% Nuovi valori
% Norma del modulo complesso: Gcam
% Angolo di fase: deltacam
for a = 1:length(wr)
    Gcam(a,1) =
power(10,x1(1)).*(1+(power(10,x1(2))./wr(a,1)).^x1(3)).^-
(x1(4)/x1(3));
    deltacam(a,1) =
(90*x2(1))./(1+(wr(a,1)./(power(10,x2(2)))).^x2(3));
end

%% Valori di Gcam al variare della temperatura
%Definire un vettore delle temperature da 6 elementi
```

```
temp = [4:6:34];
%Valore della frequenza in Hz
f = 10; % [Hz];
%Trasformazione della frequenza da Hz in rad/s
omega = f*2*pi;
%Definire le frequenze ridotte
omegarid = omega.*power(10,-(C1.*(temp-Trif))./(C2+temp-Trif));
%Moduli complessi al variare della temperatura
Gcamt = ((10^x1(1)).*(1+((10.^x1(2))./(omegarid)).^(x1(3))).^-
(x1(4)/x1(3)))';


%% GRAFICI
figure
subplot(2,1,1)
loglog(wr,FS.Modulo,'o','color',[0.8500 0.3250
0.0980],'MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',[0.8500 0.3250 0.0980]);
hold on;
loglog(wr,Gcam,'o','color',[0 0.4470
0.7410],'MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',[0 0.4470 0.7410]);
xlabel('Frequenza ridotta [rad/s]');
ylabel('Norma del modulo complesso [Pa]');
grid on;
subplot(2,1,2)
loglog(wr,FS.fase,'o','color',[0.8500 0.3250
0.0980],'MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',[0.8500 0.3250 0.0980]);
hold on;
loglog(wr,deltacam,'o','color',[0 0.4470
0.7410],'MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',[0 0.4470 0.7410]);
xlabel('Frequenza ridotta [rad/s]');
ylabel('Angolo di fase [°]');
grid on;

%Ritorni della funzione
C1 = C1;
C2 = C2;
vv = x2(3);
m = x2(1);
logwc = x2(2);
logGg = x1(1);
Gt_cam=  Gcamt;
Trif =Trif;
end
```

5.9 Analisimat.m

```
function [x2,y2] = analisimat(datatemp,igtcam)
%%------------------------ ANALISI TRA GRUPPI ------------------------
---
%NB: Il modus operandi è differente a seconda se il materiale
% si dovesse rompere o meno

%Carico le variabili principali del Main
load ('mdata1.mat','mdata1','ds1','tmp*')

%Filtra la temperatura scelta nel Main
f1 = ds1(categorical(ds1.temperatura) ==
tmpd1.temperatura(datatemp),:);
f1n = f1(:,{'temp','prova','int'});
gb1 = grpstats(f1n,{'temp','prova','int'},'gname');
```

```
%Filtri per determinare le massime strain agli ultimi e penultimi
%intervalli
max_strain = f1(:,{'prova','int','strain'});
mxx_strain = grpstats(max_strain,{'prova','int'},'max');

%Filtro per Gcam al variare della temperatura
f_gcam = igtcam(datatemp,1);

%Indice materiale rotto - flag
idm = 0;
%Lettura
for i = 1:height(gb1)
    %Estrapolazione delle variabili:
    %variabile intervallo
    xint = gb1.int(i);
    %variabile temperatura
    xtemp = gb1.temp(i);
    %variabile prova
    xprova = gb1.prova(i);
    %funzione che concatena prova-temperatura-int
    idx=regexprep(strcat(xprova,num2str(xtemp),xint) ," ","");
    idx = char(idx);
    %Creazione di un vettore formato P##INT##
    kk = strcat(idx,"=ds1(categorical(ds1.int)=='",xint,"' &
ds1.temp==",num2str(xtemp)," &
categorical(ds1.prova)=='",xprova,"',:)");
    eval(kk)

 %-------------------------------------------------------------------
------
    %VALUTAZIONE SE IL MATERIALE SI ROMPE
    %Lettura dei vettori formato P##INT##
    for j = 1:height(eval(idx))
        %Si isola la colonna del modulo complesso
        vx(j,1) = eval(strcat(idx,'.G(',num2str(j),')'));
        if j > 1
            %Verifica cambio pendenza: controllo tra il valore
precedente e
            %successivo
            ris(j)= vx(j)/vx(j-1);
            if ris(j) > 0 & ris(j)< 0.002 %Valore riferimento rottura
                %Viene fuori il messaggio di evidenza rottura del
                %materiale, alla prova analizzata
                waitfor(msgbox({'Il materiale si è
rotto';idx;num2str(ris(j))},'Error','error'));
                %Memorizzo in un vettore il materiale, la posizione e
alla
                %temperatura in cui giunge a rottura
                idm = idm +1;
                mat_rotto(idm,1) = {idx};
                %                 mat_rotto(idm,3) = cellstr('INT4');
                mat_rotto(idm,2) = num2cell(j);
                %Creo un vettore per memorizzare l'intervallo e il
                %materiale per cui si rompe
                x_matrotto=char(cellstr(mat_rotto(1,1)));
                vec_rotto=f1(categorical(f1.int)==x_matrotto(4:end) &
f1.temp==str2num(x_matrotto(3)) &
categorical(f1.prova)==x_matrotto(1:2),:);
                nr=cell2mat(mat_rotto(1,2))-1;
                vec_rotto(nr+1,:)=[];
```

```
            end
        end
    end
end

%%

%Lettura per analisi - elaborazione dei dati
for i = 1:height(gb1)
    %Estrapolazione delle variabili:
    %variabile intervallo
    xint = gb1.int(i);
    %variabile temperatura
    xtemp = gb1.temp(i);
    %variabile prova
    xprova = gb1.prova(i);
    %funzione che concatena prova-temperatura-int
    idx=regexprep(strcat(xprova,num2str(xtemp),xint) ," ","");
    idx = char(idx);
    %Creazione di un vettore formato P##INT##
    kk = strcat(idx,"=ds1(categorical(ds1.int)=='",xint,"' &
ds1.temp==",num2str(xtemp)," &
categorical(ds1.prova)=='",xprova,"',:)");
    eval(kk)

    %%-------------------------------------------------------------------
-----
    %Ricerca dei massimi intervalli analizzati
    %Prova 1
    pmaxx = mxx_strain(categorical(mxx_strain.prova)==
categorical(xprova),:);
    pmax = pmaxx.int(height(pmaxx));
    %Prova 2
    pmaxx2 = mxx_strain(categorical(mxx_strain.prova)==
categorical(xprova),:);
    pmax_2 = pmaxx2.int(height(pmaxx2)-1);
    %Sottoriceca dei massimi valori delle strain dei corrispettivi
    %intervalli massimi
    %Prova 1
    psmax = pmaxx.max_strain(height(pmaxx));
    %Prova 2
    psmax_2 = pmaxx.max_strain(height(pmaxx2)-1);
    filtro = f1(categorical(f1.prova) == categorical(xprova) &
(categorical(f1.int) ==cellstr(pmax) |
categorical(f1.int)==cellstr(pmax_2)),:);
    fpt1 = f1(categorical(f1.prova) == categorical(xprova) &
(categorical(f1.int) ==cellstr('INT8')),:);
    fpt2 = f1(categorical(f1.prova) == categorical(xprova) &
(categorical(f1.int) ==cellstr('INT9')),:);

    % Ricerca dell'esistenza di un andamento rettilineo con
regressione lineare
    % nel Blocco 1 Gruppo 2

    if categorical(xint)== 'INT4'
        %     Estrazione dei dati del B1G2 dello strain e del modulo
complesso
        %     RISOLVERE B1g2
        b1g2 = f1(categorical(f1.prova_Intervallo)==strcat(xprova,'-
',xint),:);
```

```
        %Media mobile di 4 punti
        %non si considerano i primi valori, perchè soggetti a
fluttuazioni strumentali .
        %e il limite superiore è il valore in campo LVE
        maxcount = 0;
        for l = 4:8
            %Creo un vettore Gcomplesso da 4 valori
            yg = eval(strcat(idx,'.G(l:l+3,:)'))
            %Creo un vettore strain da 4 valori
            xs = eval(strcat(idx,'.strain(l:l+3,:)'))
            % Usare polyfit per determinare la regressione lineare che
predice le y a partire dalle x
            p = polyfit(xs,yg,1);
            %p(1) è la pendenza e p(2) è l'intercetta della
regressione lineare
            % Chiamare polyval per usare p per predirre y:
            yfit = polyval(p,xs);
            % Usare i valori ottenuti da polyval
            yfit =  p(1) * xs + p(2);
            % Determinare i valori residui come vettori dei numeri
assegnati:
            yresid = yg - yfit;
            % Il quadrato del residuo e SS totale ottenuti dalla somma
dei residui dei quadrati:
            SSresid = sum(yresid.^2);
            % Determinare la somma totale dei quadrati di y
moltiplicando la varianza
            % dei numeri osservati - 1:
            SStotal = (length(yg)-1) * var(yg);
            % Calcolare  R2 usando la formula:
            rsq = 1 - SSresid/SStotal;
            disp(rsq)
            if rsq > maxcount
                maxcount = rsq;
                %Si definisce il range in cui si ha il miglior
                %andamento rettilineo
                xrange = xs;
                yrange = yg;
            end
        end
        disp(maxcount)

        newStr_1 = ".";
        newStr_2 = "";
        %Caso se il materiale si rompesse:
        if exist('mat_rotto')
            for mr = 1: height(mat_rotto)
                x_matrotto=char(cellstr(mat_rotto(mr,1)));
                str_matrotto = string(x_matrotto);
                str_idx = string(idx);
                newStr_1 = extractBetween(str_matrotto,"P","INT");
                newStr_2 = extractBetween(str_idx,"P","INT");
                if  newStr_1 == newStr_2
                    filtro = vec_rotto;
                end
            end
        end

        v1 = num2str(psmax);
        v2 = num2str(psmax_2);
```

```
        %Primo caso di analsi: Se il materiale non si rompe o non si
interrompe la
        %lettura
        if str2num(v1(1:3))== str2num(v2(1:3)) && newStr_1 ~= newStr_2
            %variabile grafico
            grf = 1;
            %Calcolo delle medie tra le strain e il modulo complesso G
            tt = height(filtro)*0.5;
            for z = 1:tt
                media(z,1) =
(filtro.strain(z)+filtro.strain(z+tt,1))./2;
                media(z,2) = (filtro.G(z)+filtro.G(z+tt,1))./2;
            end
            %Calcolo della media dei valori presenti dell'intervallo
in cui
            %si indivua un andamento rettilineo
            tmz = 0;
            xmz = 0;
            for z = 1:tt
                if round(media(z,1),3) >=round(min(xrange),3) &&
round(media(z,1),3)<= round(max(xrange),3)
                    tmz = tmz + media(z,2)
                    xmz = xmz + 1;
                end
            end
            %Valore medio
            media_tmz = tmz/xmz;

            %Calcolo della curva normalizzata
            for z = 1:tt
                curva_nz(z,1) = media(z,2)./media_tmz;
                shift_curve(z,1) = curva_nz(z,1).*(f_gcam);
            end
        else
            %Secondo metodo di analisi - alternativa: qualora il
materiale
            %dovesse rompersi o dovesse interrompere la lettura
            %variabile grafico 2
            grf = 2;

            %Si entra nel caso in cui il filtro è dispari e non si può
            %analizzare gli ultimi due blocchi
            %Filtro per ricerca intervallo
            fdx = filtro(:,{'strain','int'});
            fdxm = grpstats(fdx,{'int'},'max');
            mx = fdxm.int(height(fdxm));
            mxx = fdxm(categorical(fdxm.int) == mx,:);
            mmxx = mxx.max_strain;

            flt2 = filtro(categorical(filtro.int) ==cellstr(mx),:);

            media = zeros(height(flt2),2);
            media(:,1) = flt2.strain;
            media(:,2) = flt2.G;

            %Calcolo della media dei valori presenti dell'intervallo
in cui
            %si indivua un andamento rettilineo
            tmz = 0;
            xmz = 0;
            for z = 1:height(media)
```

```
                if round(media(z,1),3) >=round(min(xrange),3) &&
round(media(z,1),3)<= round(max(xrange),3)
                    tmz = tmz + media(z,2)
                    xmz = xmz + 1;
                end
            end
            media_tmz = tmz/xmz;

            shift_curve = zeros(height(media),1);
            %Calcolo della curva normalizzata
            for z = 1:height(media)
                curva_nz(z,1) = media(z,2)./media_tmz;
                shift_curve(z,1) = curva_nz(z,1).*(f_gcam);
            end

        end
        %----------------------- FINE ANALISI ----------------------
----
        %----------------------- GRAFICI -----------------------------
---
        if grf == 1
            %Creazione del grafico se non subisce rottura
            grg = media(:,1);
            mm = media(:,2);

            figure
            semilogx(grg,shift_curve,'r','LineWidth',2);
            hold on;
            semilogx(b1g2.strain,b1g2.G,'x-','LineWidth',1);
            semilogx(grg,mm,'b--','LineWidth',1);
            semilogx(fpt1.strain, fpt1.G,'x-','LineWidth',1);
            semilogx(fpt2.strain, fpt2.G,'x-','LineWidth',1);
            xlim([ 0 7]);
            ylabel('Norma del modulo complesso |G*|[Pa]');
            xlabel('Deformazione [%]');
            title('Materiale:  , Ripetizione:  , Temperatura:  ');
            legend('Shifted curve','B1G2','Curva
mediata','B2G2','B2G3');
            tlt=strcat("title('Ripetizione: ",xprova,",Temperatura:
",num2str(xtemp),"')");
            eval(tlt);

        else
            %Creazione del grafico se subisce rottura
            grg = media(:,1);


            figure
            semilogx(grg,shift_curve,'r','LineWidth',2);
            hold on;
            semilogx(b1g2.strain,b1g2.G,'x-','LineWidth',1);
            xlim([ 0 7]);
            ylabel('Norma del modulo complesso |G*| [Pa]');
            xlabel('Deformazione [%]');
            title('Materiale:  , Ripetizione:  , Temperatura:  ');
            legend('Shifted curve','B1G2');
            tlt=strcat("title('Ripetizione: ",xprova,",Temperatura:
",num2str(xtemp),"')");
            eval(tlt);
        end
    end
```

```
end

%%
x2 = 0;
y2 = 0;
end
```

5.10 Gnormalized.m

```
function [a1,b1,c1,d1] = gnormalized(datanorm,igtcam)
%%---------------------- ANALISI DI TUTTE LE TEMPERATURE------------
------
%NB: Il modus operandi è differente a seconda se il materiale
% si dovesse rompere o meno

%Carico le variabili principali del Main
load ('mdata1.mat','mdata1','ds1','tmp*')


%Filtra la temperatura scelta nel Main
f1 = ds1(categorical(ds1.temperatura) ==
tmpd1.temperatura(datanorm),:);
f1n = f1(:,{'temp','prova','int'});
gb1 = grpstats(f1n,{'temp','prova','int'},'gname');

%Filtri per determinare le massime strain agli ultimi e penultimi
%intervalli
max_strain = f1(:,{'prova','int','strain'});
mxx_strain = grpstats(max_strain,{'prova','int'},'max');

%Filtro per Gcam
% flt_gcam = cam(categorical(cam.materiale) == 'N1',:);
f_gcam = igtcam;


%Indice materiale rotto - flag
idm = 0;
%Lettura
for i = 1:height(gb1)
    %Estrapolazione delle variabili:
    %variabile intervallo
    xint = gb1.int(i);
    %variabile temperatura
    xtemp = gb1.temp(i);
    %variabile prova
    xprova = gb1.prova(i);
    %funzione che concatena prova-temperatura-int
    idx=regexprep(strcat(xprova,num2str(xtemp),xint) ," ","");
    idx = char(idx);
    %Creazione di un vettore formato P##INT##
    kk = strcat(idx,"=ds1(categorical(ds1.int)=='",xint,"' &
ds1.temp==",num2str(xtemp)," &
categorical(ds1.prova)=='",xprova,"',:)");
    eval(kk)
 %-------------------------------------------------------------------
-------

    %VALUTAZIONE SE IL MATERIALE SI ROMPE
    %Lettura dei vettori formato P##INT##
    for j = 1:height(eval(idx))
```

```
        %Si isola la colonna del modulo complesso
        vx(j,1) = eval(strcat(idx,'.G(',num2str(j),')'));
        if j > 1
            %Verifica cambio pendenza: controllo tra il valore
precedente e
            %successivo
            ris(j)= vx(j)/vx(j-1);
            if ris(j) > 0 & ris(j)< 0.002 %Valore riferimento
rottura
                %Viene fuori il messaggio di evidenza rottura del
                %materiale, alla prova analizzata
                msgbox({'Il materiale si è
rotto';idx;num2str(ris(j))},'Error','error');
                %Memorizzo in un vettore il materiale, la posizione
e alla
                %temperatura in cui giunge a rottura
                idm = idm +1;
                mat_rotto(idm,1) = {idx};
                %                 mat_rotto(idm,3) =
cellstr('INT4');
                mat_rotto(idm,2) = num2cell(j);
                %Creo un vettore per memorizzare l'intervallo e il
                %materiale per cui si rompe
                x_matrotto=char(cellstr(mat_rotto(1,1)));
                vec_rotto=f1(categorical(f1.int)==x_matrotto(4:end)
& f1.temp==str2num(x_matrotto(3)) &
categorical(f1.prova)==x_matrotto(1:2),:);
                nr=cell2mat(mat_rotto(1,2))-1;
                vec_rotto(nr+1,:)=[];

            end
        end
    end
end

%%

%Lettura per analisi - elaborazione dei dati
for i = 1:height(gb1)
    %Estrapolazione delle variabili:
    %variabile intervallo
    xint = gb1.int(i);
    %variabile temperatura
    xtemp = gb1.temp(i);
    %variabile prova
    xprova = gb1.prova(i);
    %funzione che concatena prova-temperatura-int
    idx=regexprep(strcat(xprova,num2str(xtemp),xint) ," ","");
    idx = char(idx);
    %Creazione di un vettore formato P##INT##
    kk = strcat(idx,"=ds1(categorical(ds1.int)=='",xint,"' &
ds1.temp==",num2str(xtemp)," &
categorical(ds1.prova)=='",xprova,"',:)");
    eval(kk)

    %%-----------------------------------------------------------------
--------
    %Ricerca dei massimi intervalli analizzati
    %PROVA 1
    pmaxx = mxx_strain(categorical(mxx_strain.prova)==
categorical(xprova),:);
```

```
    pmax = pmaxx.int(height(pmaxx));
    %PROVA 2
    pmaxx2 = mxx_strain(categorical(mxx_strain.prova)==
categorical(xprova),:);
    pmax_2 = pmaxx2.int(height(pmaxx2)-1);
    %Sottoriceca dei massimi valori delle strain delle
corrispettimi int
    %max
    %Prova 1
    psmax = pmaxx.max_strain(height(pmaxx));
    %Prova 2
    psmax_2 = pmaxx.max_strain(height(pmaxx2)-1);
    filtro = f1(categorical(f1.prova) == categorical(xprova) &
(categorical(f1.int) ==cellstr(pmax) |
categorical(f1.int)==cellstr(pmax_2)),:);
    fpt1 = f1(categorical(f1.prova) == categorical(xprova) &
(categorical(f1.int) ==cellstr('INT8')),:);
    fpt2 = f1(categorical(f1.prova) == categorical(xprova) &
(categorical(f1.int) ==cellstr('INT9')),:);

    % Ricerca dell'esistenza di un andamento rettilineo con
regressione lineare
    % nel Blocco 1 Gruppo 2

    if categorical(xint)== 'INT4'
        %     Estrazione dei dati del B1G2 dello strain e del
modulo complesso
        %     RISOLVERE B1g2
        b1g2 =
f1(categorical(f1.prova_Intervallo)==strcat(xprova,'-',xint),:);

        %Media mobile di 4 punti
        %non si considerano i primi valori, perchè soggetti a
fluttuazioni strumentali .
        %e il limite superiore è il valore in campo LVE
        maxcount = 0;
        for l = 4:8
            %Creo un vettore Gcomplesso da 4 valori
            yg = eval(strcat(idx,'.G(l:l+3,:)'))
            %Creo un vettore strain da 4 valori
            xs = eval(strcat(idx,'.strain(l:l+3,:)'))
            % Usare polyfit per determinare la regressione lineare
che predice le y a partire dalle x
            p = polyfit(xs,yg,1);
            %p(1) è la pendenza e p(2) è l'intercetta della
regressione lineare
            % Chiamare polyval per usare p per predirre y:
            yfit = polyval(p,xs);
            % Usare i valori ottenuti da polyval
            yfit =  p(1) * xs + p(2);
            % Determinare i valori residui come vettori dei numeri
assegnati:
            yresid = yg - yfit;
            % Il quadrato del residuo e SS totale ottenuti dalla
somma dei residui dei quadrati:
            SSresid = sum(yresid.^2);
            % Determinare la somma totale dei quadrati di y
moltiplicando la varianza
            % dei numeri osservati - 1:
            SStotal = (length(yg)-1) * var(yg);
            % Calcolare  R2 usando la formula:
```

```
            rsq = 1 - SSresid/SStotal;
            disp(rsq)
            if rsq > maxcount
                maxcount = rsq;
                %Si definisce il range in cui si ha il miglior
                %andamento rettilineo
                xrange = xs;
                yrange = yg;
            end
        end
        disp(maxcount)

        newStr_1 = ".";
        newStr_2 = "";
        if exist('mat_rotto')
            for mr = 1: height(mat_rotto)
                x_matrotto=char(cellstr(mat_rotto(mr,1)));
                str_matrotto = string(x_matrotto);
                str_idx = string(idx);
                newStr_1 = extractBetween(str_matrotto,"P","INT");
                newStr_2 = extractBetween(str_idx,"P","INT");
                if  newStr_1 == newStr_2
                    filtro = vec_rotto;
                end
            end
        end

        v1 = num2str(psmax);
        v2 = num2str(psmax_2);

        if str2num(v1(1:3))== str2num(v2(1:3)) && newStr_1 ~=
newStr_2
            %variabile grafico
            grf = 1;
            %Calcolo delle medie tra le strain e il modulo
complesso G
            tt = height(filtro)*0.5;
            for z = 1:tt
                media(z,1) =
(filtro.strain(z)+filtro.strain(z+tt,1))./2;
                media(z,2) = (filtro.G(z)+filtro.G(z+tt,1))./2;
            end
            tmz = 0;
            xmz = 0;
            for z = 1:tt
                if round(media(z,1),3) >=round(min(xrange),3) &&
round(media(z,1),3)<= round(max(xrange),3)
                    tmz = tmz + media(z,2)
                    xmz = xmz + 1;
                end
            end
            media_tmz = tmz/xmz;

            %Calcolo della curva normalizzata
            for z = 1:tt
                curva_nz(z,1) = media(z,2)./media_tmz;
                %Curva traslata
                shift_curve(z,1) = curva_nz(z,1).*(f_gcam);

            end
```

```
            r0 = cell2mat(xprova);
            ri = str2num(r0(2:end));
            for g = 1:length(curva_nz)
                ret_value_y(g,ri) = curva_nz(g);
                ret_value_z(g,ri) = shift_curve(g);
            end

            for d = 1:length(media)
                ret_value_x(d,ri) = media(d,1);
            end
        else
            %variabile grafico 2
            grf = 2;

            %Si entra nel caso in cui il filtro è dispari e non si
può
            %analizzare gli ultimi due blocchi
            %Filtro per ricerca intervallo
            fdx = filtro(:,{'strain','int'});
            fdxm = grpstats(fdx,{'int'},'max');
            mx = fdxm.int(height(fdxm));
            mxx = fdxm(categorical(fdxm.int) == mx,:);
            mmxx = mxx.max_strain;

            flt2 = filtro(categorical(filtro.int) ==cellstr(mx),:);

            media = zeros(height(flt2),2);
            media(:,1) = flt2.strain;
            media(:,2) = flt2.G;

            tmz = 0;
            xmz = 0;
            for z = 1:height(media)
                if round(media(z,1),3) >=round(min(xrange),3) &&
round(media(z,1),3)<= round(max(xrange),3)
                    tmz = tmz + media(z,2)
                    xmz = xmz + 1;
                end
            end
            media_tmz = tmz/xmz;

            shift_curve = zeros(height(media),1);
            %Calcolo della curva normalizzata
            for z = 1:height(media)
                curva_nz(z,1) = media(z,2)./media_tmz;
                %Curva traslata
                shift_curve(z,1) = curva_nz(z,1).*(f_gcam);
            end

            r0 = cell2mat(xprova);
            ri = str2num(r0(2:end));
            for g = 1:length(shift_curve)
                ret_value_y(g,ri) = curva_nz(g);
                ret_value_z(g,ri) = shift_curve(g);
            end

            for d = 1:length(media)
                ret_value_x(d,ri) = media(d,1);
            end

        end
```

```
            danno(ri,1) = media(4,2)/shift_curve(4,1);
        end
    end

    %%
    a1 = ret_value_x;
    b1 = ret_value_y;
    c1 = danno;
    d1 = ret_value_z;
    end
```

5.11 Mastercurvenlve.m

```
function [Gl,dl] = mastercurvenlve(C1,C2,vv,m,logGg,logwc,Trif)
load ('nlvesav.mat','nlve')
%----------------------- SERIE DI PRONY -----------------------------
%Lettura del file rho_m: tempo di rilassamento arbitrario con
assunzione di
%coprire 32 decadi temporali
rho_m = readmatrix('collocationmethod.xlsx') %Da definire dall'utente
%Si assume per ipotesi che rho_m = wk
w_k = rho_m;
disp(m);
pause(1)


%Determinazione del modulo complesso avendo noti i parametri CAM
for i = 1:length(w_k)
    g(i,1) = power(10,logGg)*(1+(power(10,logwc)./w_k(i,1))^(vv))^(-
m/vv);
end
%Determinazione dell'angolo di fase con i parametri CAM
for j = 1:length(w_k)
    delta(j,1)=(90*m)./(1 + (w_k(j,1)./10.^(logwc)).^(vv));
    if delta(j,1) > 90
        delta(j,1) = 90;
    else
        delta(j,1)=(90*m)./(1 + (w_k(j,1)./10.^(logwc)).^(vv));
    end
end
%Trasformare l'angolo di fase da gradi a radianti
for j = 1:length(w_k)
    delta_r(j,1) = delta(j,1).*(pi/180),
end
%Determinare lo Storage Modulus
for k = 1:length(g)
    gi (k,1) = g(k,1)*cos(delta_r(k,1));
end

wk=w_k';
%Determinare Aik:
for i = 1:length(wk)
    for j = 1:length(rho_m)
        Aik(j,i) =
(power(rho_m(j,1),2)*power(wk(1,i),2))./(1+power(rho_m(j,1),2)*power(w
k(1,i),2));
    end
end
A = inv(Aik);
```

```
%Calcolare il termine di Prony
Gi = (gi'*A)';


%Carica il file contententi le temperature e le frequenze angolari
dalla
%Frequency Sweep Test
file = readtable('lve_data.xlsx');
%Calcolo della frequenza ridotta
for i = 1:length(file.frequenza_angolare)
    fr(i,1) = file.frequenza_angolare(i).*power(10,-
(C1*(file.Temperatura(i)-Trif))./(C2+file.Temperatura(i)-Trif));
end
fr = sort(fr);

%Determinazione della norma del modulo e angolo di fase con il modello
CAM
for i = 1:length(fr)
    gcam(i,1) =
power(10,logGg)*(1+(power(10,logwc)./fr(i)).^(vv)).^((-m/vv));
    deltacam(i,1) = (90*m)./(1+(fr(i)./(power(10,logwc))).^(vv));
end

rho_m= rho_m';
Gi = Gi';

%Determinare lo Storage e Loss Modulus
for l = 1:size(file,1)
    for f = 1:length(rho_m)

G1(l,f)=(Gi(1,f).*power(fr(l,1),2).*power(rho_m(1,f),2))./(1+power(rho
_m(1,f),2).*power(fr(l,1),2));

G2(l,f)=(Gi(1,f).*power(fr(l,1),1).*power(rho_m(1,f),1))./(1+power(rho
_m(1,f),2).*power(fr(l,1),2));
    end
end
for l = 1:size(G1,1)
   G11(1,l)= sum(G1(l,:));
   G22(1,l) = sum(G2(l,:));
end

%Determinare il G*lve
for i = 1:length(G11)
    Glve(1,i) = sqrt(power(G11(1,i),2)+power(G22(1,i),2));
end
Glve = Glve';

%Determino l'angolo di fase lve
for i = 1:length(G11)
    dlve(1,i)=atan(G22(1,i)./G11(1,i))*(180/pi);
end
dlve = dlve';

%% CURVE MAESTRE NON LINEARI
% Vettore delle temperature
T = [34:-6:4];
%Determinare gli Shift factor e le frequenze ridotte
cntx = 1;
for sf = 1:length(T)
```

```
    at(cntx,1) = 10.^((-C1*(T(sf)-Trif))./(C2+T(sf)-Trif));
    freq(cntx,1) = at(cntx,1).*10.*2.*pi;
    at(cntx+1,1) = 10.^((-C1*(T(sf)-Trif))./(C2+T(sf)-Trif));
    freq(cntx+1,1) = at(cntx+1,1).*10.*2.*pi;
    cntx = cntx +2;
end

nlve(:,1:10)=[];

sfreq = freq;

%Calcolare i minimi e massimi delle frequenze ridotte
fmin = min(freq);
fmax = max(freq);
%Indici dove sono posizionati i max e min
imin = min(find(fr>=fmin &fr<fmax));
imax = max(find(fr>=fmin &fr<fmax));
%Filtro delle frequenze
omegar=fr(fr>=fmin & fr<fmax);

%% Risolutore
num_int=12;
res_freq = freq;
for gk = 1:num_int %Sono 12 gli intervalli

    Gfit = flipud(nlve(:,gk));

    xt = 0;
    ixzero=zeros();
    for fz = 1:size(nlve,1)
        if Gfit(fz,:)~=0
            xt = xt+1;
            ixzero(fz) = 0;
        else
            ixzero(fz)=fz;
        end
    end

    pos_iz = find(ixzero>0);
    Gcalc = zeros();
    for s = 1:size(nlve,1)
        if ixzero == 0
            Gcalc(s,1) =
power(10,logGg).*(1+(power(10,logwc)./freq(s,1)).^vv).^-(m/vv);
        else
            if ixzero(s)>0

            else
                Gcalc(s,1) =
power(10,logGg).*(1+(power(10,logwc)./freq(s,1)).^vv).^-(m/vv);
            end
        end
    end

    for i = length(pos_iz):-1:1
        freq(pos_iz(i),:)=[];
    end

    if xt ~= size(nlve,1)
        Gfit = Gfit(Gfit~=0);
    end
```

```
    options = optimset('Display','iter','TolX',1e-6);
    Fun = @(X,A,B,C) ((10.^(logGg)).*(1+((10.^A)./(freq)).^B).^-
(C/B));
    LSE = 0;

    Fun_error = @(X,A,B,C)
sum(((((10.^(logGg)).*(1+((10.^A)./(freq)).^B).^-(C/B))./Gfit)-
(Gfit./Gfit)).^2);
    LSE= fminsearch(@(Y)
Fun_error(Gcalc,Y(1),Y(2),Y(3)),[logwc;vv;m],options);
    ret_LSE(gk,1) = LSE(1);
    logwc = LSE(1);
    ret_LSE(gk,2) = LSE(2);
    vv = LSE(2);
    ret_LSE(gk,3) = LSE(3);
    m = LSE(3);

    if gk <num_int
        freq=res_freq;
    end
end

%Determinare i G* fittizi
for lx = 1:size(ret_LSE,1)
    for fx = 1:length(fr)
        Gfz(fx,lx) =
(power(10,logGg).*(1+(power(10,ret_LSE(lx,1))./fr(fx,1)).^ret_LSE(lx,2
)).^-(ret_LSE(lx,3)/ret_LSE(lx,2)));
    end
end
%%
%Nuovi valori filtrati
Glve(imax+1:end,:)=[];
Glve(1:imin-1,:)=[];
gcam(imax+1:end,:)=[];
gcam(1:imin-1,:)=[];
dlve(imax+1:end,:)=[];
dlve(1:imin-1,:)=[];
deltacam(imax+1:end,:)=[];
deltacam(1:imin-1,:)=[];

ygf1 = Gfz(:,1);
ygf1(imax+1:end,:)=[];
ygf1(1:imin-1,:)=[];

ygf2 = Gfz(:,9);
ygf2(imax+1:end,:)=[];
ygf2(1:imin-1,:)=[];

ygf3 = Gfz(:,12);
ygf3(imax+1:end,:)=[];
ygf3(1:imin-1,:)=[];

%% GRAFICI
%-------------------------------------------------------------------
-----
%GRAFICI CAMPO LVE - MAXWELL
figure
subplot(2,1,1)
```

```
loglog(omegar,Glve,'o','color',[0.8500 0.3250
0.0980],'MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',[0.8500 0.3250 0.0980])
hold on;
loglog(omegar,gcam,'o','color',[0 0.4470
0.7410],'MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',[0 0.4470 0.7410])
xlabel('frequenza ridotta [rad/s]');
ylabel('Norma del modulo complesso |G*|_L_V_E [Pa]');
grid on;
subplot(2,1,2)
semilogx(omegar,dlve,'o','color',[0.8500 0.3250
0.0980],'MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',[0.8500 0.3250 0.0980])
hold on
semilogx(omegar,deltacam,'o','color',[0 0.4470
0.7410],'MarkerSize',5,'MarkerFaceColor',[0 0.4470 0.7410])
xlabel('frequenza ridotta [rad/s]');
ylabel('Angolo di fase [°]');
grid on;

%GRAFICI CURVE MAESTRE NON LINEARI
nl1 = flipud(nlve(:,1))';
nl2 = flipud(nlve(:,9))';
nl3 = Gfit;

figure
loglog(sfreq,nl1,'o','color',[0 0.4470 0.7410]);
hold on;
loglog(sfreq,nl2,'o','color',[0.85 0.3250 0.0980]);
loglog(freq,nl3,'o','color',[0.9290 0.6940 0.1250]);
loglog(omegar,ygf1,'LineWidth',2,'color',[0 0.4470 0.7410]);
loglog(omegar,ygf2,'LineWidth',2,'color',[0.85 0.3250 0.0980]);
loglog(omegar,ygf3,'LineWidth',2,'color',[0.9290 0.6940 0.1250]);
xlabel('frequenza ridotta [rad/s]');
ylabel('Norma del modulo complesso |G*|_N_L_V_E [Pa]');
grid on;

Gl = Glve;
dl = dlve;
end
```

6. CONCLUSIONI

L'indagine sperimentale oggetto del presente elaborato di tesi è stata affrontata per caratterizzare e definire gli effetti di non linearità nei leganti bituminosi. A conclusione del lavoro sperimentale si possono desumere le seguenti considerazioni.

Dai risultati ottenuti si evince che l'approccio sperimentale utilizzato e la successiva modellazione matematica dei risultati è risultata essere una valida metodologia per discriminare gli effetti in campo viscoelastico non lineare da quelli osservati in condizioni di linearità. Questo è stato valutato sia nel caso di leganti bituminosi tradizionali che per materiali modificati. Nello specifico, le differenze osservate dall'analisi delle curve maestre della norma del modulo complesso, valutate in campo viscoelastico lineare e non lineare, fanno emergere la rilevante importanza del contributo di non linearità laddove gli input di carico applicati superino la soglia di linearità. In tali circostanze, l'errore che si commette nell'assumere come lineare, un comportamento che di fatto risulti essere non lineare, potrebbe condurre a confronti fuorvianti tra i materiali. In relazione all'approccio sperimentale adottato, si sono evidenziate difficoltà operative nel raggiungere alti valori di deformazione soprattutto in condizioni di basse temperature, laddove l'elevata rigidezza del materiale induce momenti torcenti applicati dal reometro prossimi ai limiti strumentali, e altresì può condurre a una perdita di adesione tra il campione e il macchinario.

L'approccio analitico è stato volto alla definizione di shift factor non lineari che riducono la risposta non lineare del materiale alla corrispondente condizione di linearità. Il confronto di tali fattori ottenuti per i vari materiali permette di discriminare comportamenti differenti tra i vari materiali. Tale approccio è stato affrontato con due programmi di calcolo differenti: con Excel, in un primo momento, e successivamente con Matlab. Ciò è stato stimolato dalla necessità di ridurre l'onere computazionale richiesto dalla combinazione dell'analisi lineare e non lineare. Infatti, l'utilizzo del programma Matlab, in seguito alla scrittura di un opportuno codice, ha permesso un'analisi più veloce e immediata.

Sviluppi futuri potrebbero riguardare l'applicazione di tale analisi allo studio della resistenza a fatica dei materiali unitamente alla loro capacità di autoripararsi.

BIBLIOGRAFIA

Baglieri O., Tsantilis L., Santagata E., 2018. *Evaluation of healing potential of bituminous binders using a viscoelastic continuum damage approach.* Construction and Building Materials, vol 184, 344-350.

Callister W.D, Rethwisch D.G. *Scienze e Ingegneria dei Materiali. EdiSes.* Materiale didattico.

Epaarachchi, J.A, 2017. *The effect of viscoelasticity on fatigue behaviour of polymer matrix composites. Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites.* Journal of Biomechanics, 2017

Litte D.N., Bhasin A., Darabi M.K., *Damage healing in asphalt pavements: theory, mechanisms, measurement, and modelling.*

Read, J., Whiteoak, D., 2003. *The Shell Bitumen Handbook*. Thomas Telford Ltd, London, UK.

Safei F., Castorena C., 2017. *Material nonlinearity in asphalt binder fatigue testing and analysis.* Material and Design, vol 133, 376 – 389.

Santagata E., Baglieri O., Tsantilis L., Chiappinelli G., 2015. *Fatigue and healing properties of nano-reinforced bituminous binders.* Construction and Building Materials, vol 80, 30-39.

Santagata E., Baglieri O., Dalmazzo D., Tsantilis L., 2017. *Investigating cohesive of asphalt binders by means of a dissipated energy approach.* International Journal of Pavement Research and Technology, vol 10, 403-409.

Santagata F.A.,2016. *Strade, teoria e tecnica delle costruzioni stradali. Volume 1 – progettazione.* Materiale didattico.

Tsantilis L., Underwood B.S, Miglietta F., Riviera P.P., Baglieri O., Santagata E.,2021. *Ageing effects on the linear and nonlinear viscoelasticity of bituminous binders.*

Underwood B.S., 2016. *A continuum damage model for asphalt cement and asphalt mastic fatigue.* International Journal of Fatigue, vol 82, 387-401.

U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2003. *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program.* Publication NO.FHWA-RD-03-31.

Yusoff, Nur Izzi Md., Montgomery T.Shaw, Gordon D.Airey, 2011. *Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders.* Construction and Building Materials, volume 25, 2171-2189

Yusoff Nur Izzi Md., Jakarin Faunzan Mohd, Nguyen Viet Hung, Hainin M.R, Gordon D.Airey. 2013. *Modelling the rheological properties of bituminous binders using mathematical equations*. Construction and Building Materials, volume 40,174-188

SITOGRAFIA

- https://it.mathworks.com/company/newsletters/articles/a-brief-history-of-matlab.html
- https://pico.polito.it/primo-explore/search?vid=39pto_v
- https://it.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48480-automatically-arrange-figure-windows