

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile**

*Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio*

**TESI DI LAUREA**

in

Costruzione di strade, ferrovie ed aeroporti LS

**STUDIO SPERIMENTALE PER LA CARATTERIZZAZIONE  
REOLOGICA DI CONGLOMERATI BITUMINOSI TRAMITE  
PROVE DI FLESSIONE SU QUATTRO PUNTI**

**LAUREANDA:**

Sara Ghiraldini

**RELATORE:**

Chiar.mo Prof. Giulio Dondi

**CORRELATORI:**

Dott. Ing. Cesare Sangiorgi

Dott. Ing. Fabio Picariello

Dott. Ing. Andrea Cocurullo

Anno Accademico 2007/2008

---

**Sessione Estiva**

# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>6</b>
<b>CAPITOLO 1 LA PROVA DI FLESSIONE SU QUATTRO PUNTI: ASPETTI TEORICI</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Introduzione</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2 I moduli dinamici del conglomerato bituminoso</b> .....	<b>13</b>
1.2.1 Gli stati tensionali all'interno di una pavimentazione .....	13
1.2.2 I test di laboratorio per la determinazione dei moduli dinamici.....	15
1.2.3 Il Modulo complesso.....	16
1.2.4 Il Modulo di rigidezza.....	19
1.2.5 Il Modulo resiliente.....	20
1.2.6 Metodo empirico per la determinazione del Modulo di rigidezza.....	24
<b>1.3 Richiami di Teoria della trave</b> .....	<b>28</b>
1.3.1 Lo schema statico riprodotto dalla prova 4PB .....	28
1.3.2 Calcolo dell'equazione della linea elastica.....	35
<b>CAPITOLO 2 LA FASE SPERIMENTALE: ESECUZIONE DELLE PROVE PER LA CARATTERIZZAZIONE FISICA E MECCANICA DEL MATERIALE</b> .....	<b>41</b>
<b>2.1 Introduzione</b> .....	<b>41</b>
<b>2.2 Programma sperimentale</b> .....	<b>42</b>
<b>2.3 La caratterizzazione fisica e geometrica del materiale</b> .....	<b>46</b>
2.3.1 Determinazione della massa volumica massima.....	46
2.3.2 Determinazione della massa volumica apparente.....	48
2.3.3 Calcolo della percentuale dei vuoti .....	52
2.3.4 Granulometria.....	53
<b>2.4 La caratterizzazione meccanica del materiale</b> .....	<b>55</b>
2.4.1 La normativa UNI EN 12697-26 .....	55
2.4.2 Descrizione dell'apparecchiatura e del software.....	61
2.4.3 Procedura di esecuzione della prova .....	77
<b>CAPITOLO 3 ELABORAZIONE DEI DATI E ANALISI DEI RISULTATI</b> .....	<b>81</b>
<b>3.1 Introduzione</b> .....	<b>81</b>
<b>3.2 Selezione dei dati di output</b> .....	<b>81</b>
3.2.1 Il Modulo di rigidezza.....	83
3.2.2 L'angolo di fase .....	86
<b>3.3 Costruzione delle isoterme del Modulo di rigidezza e dell'angolo di fase</b> .....	<b>89</b>
<b>3.4 Le isoterme tracciate con e senza "fitting" dei dati</b> .....	<b>94</b>
<b>3.5 Calcolo delle medie e delle deviazioni standard dei moduli e degli angoli di fase</b> .....	<b>101</b>
<b>3.6 La costruzione delle Curve Maestre</b> .....	<b>107</b>
3.6.1 Il metodo geometrico .....	110
3.6.2 Il modello sigmoidale di Medani e Huurman .....	113
3.6.3 Il modello sigmoidale della normativa AASHTO TP-62 .....	116

<b>CAPITOLO 4 CONFRONTO DELLE DUE APPARECCHIATURE DI PROVA .....</b>	<b>120</b>
<b>4.1 Introduzione .....</b>	<b>120</b>
<b>4.2 Differenze strutturali e di software delle due apparecchiature .....</b>	<b>120</b>
<b>4.3 Confronto dei risultati ottenuti .....</b>	<b>125</b>
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>133</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>138</b>
<b>RINGRAZIAMENTI .....</b>	<b>140</b>

## INTRODUZIONE

Le pavimentazioni stradali sono costituite da più strati sovrapposti di materiali differenti, composti da miscele di aggregati lapidei e leganti, a formare una vera e propria struttura, frapposta tra i carichi ed il terreno; tale struttura prende il nome di sovrastruttura stradale. La serie di strati costituenti ha in genere una ossatura litica con dimensione degli elementi decrescente dal basso verso l'alto, a fronte di una qualità crescente delle caratteristiche meccaniche degli inerti stessi e della miscela che li comprende.

Ciascuno strato ha specifiche caratteristiche dimensionali, in termini di spessore, e una composizione fisica, in termini di volumi dei materiali, che ne assicurano l'adempimento della funzione a loro attribuita dal punto di vista meccanico, cioè nei confronti delle sollecitazioni in esercizio.

Le moderne sovrastrutture stradali sono classificate, nei confronti della deformabilità, in tre categorie: flessibili, semirigide e rigide.

Le pavimentazioni flessibili sono costituite da tre strati di materiale inerte legato con bitume a percentuale decrescente con la profondità all'interno del pacchetto stradale (usura, binder, base) e da uno strato di materiale sciolto poggiante sul terreno di posa (fondazione). Le pavimentazioni semirigide differiscono da quelle flessibili per l'interposizione di uno strato di materiale litico misto miscelato con cemento che prende il nome di misto cementato. Le pavimentazioni rigide, sono costituite da lastre di calcestruzzo poggianti su uno strato di fondazione in materiale lapideo non legato o di misto cementato.

La tipologia flessibile è quella comunemente impiegata per la costruzione della maggior parte delle strade; quella semirigida è una tipologia di pavimentazione di più recente utilizzo, introdotta dall'esigenza di ritardare il deterioramento delle strade a causa dell'aumento del traffico pesante [1], viene utilizzata sulle autostrade e sulle strade con traffico intenso; le pavimentazioni rigide, invece, sono usualmente adottate in Italia per la costruzione di piazzali di sosta aeroportuali o di sosta dei mezzi pesanti.

Le funzioni fondamentali che una pavimentazione stradale deve assolvere sono essenzialmente due: il trasferimento delle sollecitazioni indotte dai carichi mobili o statici al sottofondo naturale (sostentamento del veicolo) e la realizzazione di un piano

viabile regolare e sicuro, ossia tale da garantire sia l'aderenza e quindi il moto, sia il comfort di marcia (sicurezza e regolarità del moto) per i veicoli che la percorrono [2].

Se l'importanza del sostentamento e dell'aderenza era già conosciuta fin dalla costruzione delle strade consolari dell'Impero romano, la richiesta di comfort segue, ad oggi, lo sviluppo dei veicoli su gomma, sempre più performanti e tecnologicamente avanzati. Le modalità con le quali la pavimentazione svolge i compiti teste descritti sono dipendenti da molteplici fattori legati essenzialmente alla progettazione della sovrastruttura stradale stessa. In particolare, si evidenzia l'importanza dei materiali utilizzati e della loro configurazione di esercizio in opera, ovvero l'insieme degli strati secondo i quali il pacchetto è organizzato ed i relativi spessori [2].

La scelta dei materiali da impiegare nella costruzione e degli spessori da adottare viene fatta dal progettista sulla base dei volumi di traffico previsti, delle condizioni climatiche del luogo, della vita utile richiesta alla sovrastruttura e delle proprietà meccaniche dei materiali stessi.

Il comportamento meccanico delle miscele bituminose è influenzato dalle proprietà dell'aggregato, dal tenore di legante e dalle tecniche di modifica adottate per il bitume. La risposta della miscela alle sollecitazioni dipende quindi dall'interazione fisico-chimica tra le fasi costituenti ma anche dalla temperatura, dalla frequenza e dal numero di applicazioni delle sollecitazioni.

Al fine di studiare lo stato tenso-deformativo sviluppato nella miscela da forze statiche e dinamiche, è quindi necessario definire in termini prestazionali i materiali costituenti le diverse fasi ed il conglomerato bituminoso [3].

Negli ultimi 20 anni le pavimentazioni sono state maggiormente sollecitate dal traffico veicolare a causa dell'incremento dei carichi per asse e del numero di mezzi circolanti lungo la rete viaria. Una presa di coscienza, da parte della società, nei confronti di temi quali la sicurezza stradale, il comfort di guida, l'inquinamento e la rumorosità prodotti dal traffico, hanno quindi orientato i progettisti alla ricerca di soluzioni finalizzate all'aumento della resistenza e della vita utile delle sovrastrutture.

In questo contesto, grande attenzione è stata data alla qualificazione prestazionale delle miscele bituminose, largamente utilizzate nelle pavimentazioni flessibili e semirigide, mediante l'adozione di prove di laboratorio più attendibili nella previsione delle prestazioni attese in sito.

Le prove che sono state studiate negli anni erano, da una parte, volte alla valutazione delle caratteristiche delle miscele, per arrivare a formulare diversi metodi di

progettazione della miscela, o mix design, idonee a risolvere specifici problemi, in base alle proprietà dei componenti ed agli spessori degli strati.

Le diverse fasi della progettazione di una miscela si articolano in procedure e prove finalizzate alla selezione degli aggregati, della loro granulometria, del tipo di bitume, dell'eventuale polimero modificante.

Lo scopo del mix-design è quindi quello di ottenere una ricetta bitume-aggregato, la più economica possibile, in relazione ai requisiti di durabilità, di resistenza meccanica, di lavorabilità della miscela per permetterne la stesa e la compattazione degli strati, di riduzione del degrado imputabile all'azione dell'aria e dell'acqua.

La progettazione moderna del conglomerato bituminoso si basa sul concetto secondo il quale il rapporto tra i diversi componenti della miscela viene stabilito al fine di ottenere l'optimum prestazionale in base alla tipologia ed all'entità del traffico, alle condizioni ambientali ed ai fattori strutturali, caratterizzanti la sovrastruttura durante la vita utile; le prestazioni della miscela vengono quindi valutate anche in base all'adempimento, nella futura pavimentazione, delle funzioni previste ed all'osservanza delle richieste attese.

Le specifiche basate sulle caratteristiche prestazionali di una pavimentazione necessitano di una conoscenza approfondita delle relazioni di base che intercorrono tra una determinata prestazione della sovrastruttura, come ad esempio la resistenza all'ormaiamento, e quelle proprietà meccaniche della miscela, come ad esempio la resistenza alla fatica ed il Modulo di rigidità, che sono all'origine dell'inesco e dello sviluppo del corrispondente fenomeno di deterioramento.

I metodi di ottimizzazione della ricetta basati su tali specifiche, permettono quindi di confezionare conglomerati che rappresentano un punto di equilibrio tra i costi di realizzazione della sovrastruttura e la qualità richiesta in sito per il materiale.

Le principali proprietà meccaniche delle miscele bituminose utilizzate nei moderni metodi di mix design sono le seguenti: il Modulo di rigidità, la resistenza alle deformazioni permanenti e la resistenza a fatica. Queste si determinano tramite prove dinamiche di laboratorio tra le quali: trazione indiretta, trazione-compressione diretta, creep, ormaiamento, flessione su 2, 3 e 4 punti.

Tali prove consistono nell'applicazione di sollecitazioni cicliche di varia natura (compressione, taglio e flessione) su provini cilindrici, trapezoidali o prismatici e nell'analisi della conseguente risposta, in termini di deformazione, per valutarne la rigidità, la resistenza a fatica e alle deformazioni permanenti.

In Italia le proprietà dei conglomerati bituminosi contenute nelle relazioni di base per la previsione delle caratteristiche prestazionali della pavimentazione, sono prescritte nella norma UNI-EN 13108-20 *“Miscele bituminose - Specifiche del materiale - Parte 20: Prove di tipo”*; la quale viene utilizzata per la procedura di Marcatura CE del materiale.

La Marcatura CE (“Conformità Europea”) è l’indicazione di conformità del prodotto ai requisiti essenziali di sicurezza previsti da una o più Direttive comunitarie applicabili al prodotto stesso.

Il marchio CE non è un marchio d’origine o di qualità, tuttavia rappresenta la garanzia visibile che il prodotto è stato realizzato in conformità con tutti i requisiti di qualità, verificati da un ente terzo, al di sopra delle parti, che non si limita ad effettuare sul prodotto tutte le prove previste dalla normativa di riferimento, ma sottopone la produzione ad una periodica e costante sorveglianza. Esso è correlato, quindi, ad elementi del sistema qualità, quali il controllo della attività produttiva nei suoi vari aspetti, dal controllo dei materiali all’ingresso all’intero processo produttivo [4].

La Marcatura CE, dopo un periodo di transizione, iniziato il 1 marzo 2007, in cui era possibile continuare a commercializzare prodotti conformi a norme e regolamentazioni in contrasto con essa, è diventata definitivamente obbligatoria dal 1 Marzo 2008.

All’interno della UNI-EN 13108-20, viene prescritta la determinazione della rigidità del conglomerato bituminoso, ai fini della marcatura CE, la quale si può eseguire per esempio tramite la prova di flessione su quattro punti.

Alla luce di tali considerazioni attorno all’importanza della caratterizzazione meccanica di un conglomerato bituminoso, con la presente tesi sono stati analizzati gli aspetti teorici e pratici di una particolare prova di laboratorio tra quelle utilizzabili per la caratterizzazione reologica del conglomerato bituminoso, cioè la prova di flessione su quattro punti.

Lo scopo dello studio sperimentale elaborato è quello di indagare il comportamento deformativo del materiale a seguito dell’applicazione di determinate sollecitazioni, al variare delle condizioni ambientali e di carico di prova, parametri che giocano un ruolo fondamentale nella risposta tenso-deformativa di un materiale a comportamento viscoelastico. Quest’analisi è stata messa in atto tramite l’esecuzione di una serie di test di laboratorio utilizzando l’apparecchiatura per la prova di flessione su quattro punti e variando le condizioni di prova.

Inoltre, data la singolare opportunità di avere a disposizione due versioni successive dell'apparecchiatura di prova, una parte dello studio è stata finalizzata al confronto dei due macchinari per verificare, tramite i risultati da loro forniti, se le modifiche apportate determinino un diverso comportamento meccanico nel materiale.

Si passerà ora ad una breve descrizione del contenuto dei capitoli.

Nel Capitolo 1 verranno analizzati gli aspetti teorici coinvolti nel meccanismo di funzionamento della prova di flessione su quattro punti.

Si descriveranno gli stati tensionali che si instaurano all'interno di una pavimentazione stradale a causa del traffico veicolare e lo stato tenso-deformativo indotto sul provino dalla prova in esame, a partire dallo schema statico che essa riproduce.

Successivamente si descriveranno i moduli dinamici del conglomerato bituminoso che possono essere determinati tramite prove di laboratorio, cioè il Modulo complesso, il Modulo di rigidità e il Modulo resiliente, evidenziando le differenze e le somiglianze che tra essi intercorrono e descrivendo brevemente con quali tipi di prove possano essere determinati. Infine verrà presentato un metodo empirico per la determinazione del Modulo di rigidità senza l'esecuzione di prove di laboratorio.

In seguito verranno fatti alcuni richiami a concetti fondamentali della Scienza delle Costruzioni, a partire dalla teoria di de Saint-Venant per arrivare alla determinazione dei diagrammi di sollecitazione dello schema statico in esame. Verrà poi eseguito il calcolo dell'equazione della linea elastica della trave, che rappresenta la posizione del provino in configurazione deformata successiva all'applicazione del carico, per dedurre la derivazione dell'espressione della sua deformazione tabulata in letteratura.

Il Capitolo 2 è dedicato alla completa caratterizzazione del materiale, dal punto di vista fisico e meccanico.

Inizialmente verranno presentati gli obiettivi dello studio sperimentale condotto ai fini della redazione della presente tesi e le modalità secondo le quali esso è stato svolto, descritte nel paragrafo del Programma sperimentale.

Seguiranno le prove di caratterizzazione fisica del conglomerato bituminoso, in particolare la determinazione della massa volumica massima, della massa volumica apparente e il calcolo della percentuale dei vuoti, e di caratterizzazione geometrica, quali la procedura di ottimizzazione della curva granulometrica degli aggregati inerti a disposizione.

La caratterizzazione meccanica del materiale parte dalla descrizione della normativa di riferimento per l'esecuzione della prova di flessione su quattro punti e al calcolo tramite il quale si perviene alle formule del Modulo complesso indicate in normativa.

Verranno poi illustrati approfonditamente l'apparecchiatura di prova e il software di gestione dei dati, per finire con la descrizione della procedura di prova.

Il Capitolo 3 contiene l'elaborazione dei dati registrati durante le prove eseguite e l'analisi dei risultati ottenuti.

Tale analisi si concentra sui due parametri fondamentali atti a descrivere il comportamento reologico del materiale: il Modulo di rigidità e l'angolo di fase.

I dati relativi a questi due parametri verranno elaborati in una serie di grafici per evidenziare la risposta del materiale al variare della frequenza di carico e della temperatura di prova; essi verranno inoltre paragonati tra loro nei confronti delle due modalità di calcolo dei parametri rese disponibili dal software di gestione dell'apparecchiatura.

Per maggiore completezza d'analisi si eseguirà anche il calcolo statistico delle medie e delle deviazioni standard delle grandezze, per poter addurre osservazioni sulla dispersione dei dati, in relazione alle condizioni di prova.

Infine, verrà esaminata la procedura con la quale si usa rappresentare graficamente il comportamento reologico di un conglomerato bituminoso, tramite l'unificazione dei dati ottenuti da prove eseguite a diverse temperature, in un'unica curva, che prende il nome di Curva Maestra o "Master Curve".

Essa verrà calcolata prendendo in esame tre diversi metodi disponibili in letteratura, che verranno messi a confronto.

Il Capitolo 4 è dedicato alle prove eseguite per il confronto delle due versioni dell'apparecchiatura. Verranno paragonati i risultati del Modulo di rigidità e dell'angolo di fase ottenuti alle stesse condizioni di prova ed evidenziate le differenze riscontrate.

Infine nelle Conclusioni vengono riassunte tutte le riflessioni formulate all'interno della tesi e proposti alcuni spunti e suggerimenti per il lavoro futuro, nati dalle osservazioni fatte durante il lavoro e dalle difficoltà riscontrate.

# **CAPITOLO 1 LA PROVA DI FLESSIONE SU QUATTRO PUNTI: ASPETTI TEORICI**

## **1.1 INTRODUZIONE**

Nel presente capitolo verranno esaminati alcuni aspetti teorici che stanno alla base della prova di flessione su quattro punti.

Prima di passare alla fase pratica dello studio sperimentale, cioè alla caratterizzazione meccanica e fisica del materiale testato e alla descrizione del macchinario e della procedura di esecuzione della prova, che si trovano nel Capitolo 2, si ritiene necessario richiamare alcuni concetti fondamentali della Scienza delle costruzioni.

Per prima cosa, verranno descritti gli stati tensionali che si verificano all'interno di una pavimentazione stradale a causa del traffico veicolare che su di essa transita, per capire quali siano gli effetti tenso-deformativi che la prova di flessione su quattro punti deve indurre su un provino di conglomerato bituminoso. Essa, infatti, ha lo scopo di cercare di riprodurre il più fedelmente possibile le sollecitazioni a cui è realmente sottoposto il materiale in opera.

Nel sottoparagrafo 1.2.3, si passerà alla trattazione del parametro meccanico più importante, nonché oggetto di questa tesi, cioè il Modulo complesso, che viene utilizzato nell'analisi del comportamento reologico tramite la sua norma, il Modulo di rigidità. Esso è, infatti, il parametro dinamico che stabilisce la relazione tra sollecitazione e deformazione di un conglomerato bituminoso in un prova di flessione su quattro punti.

Insieme ad esso si parlerà anche di un altro Modulo di rigidità dinamico, il Modulo resiliente, che può essere determinato con la prova di trazione indiretta o con la prova triassiale. Infine, per una maggiore completezza di trattazione, verrà descritto anche un metodo empirico per la determinazione del Modulo di rigidità, senza la necessità di eseguire prove di laboratorio, quello basato sui nomogrammi di Van der Poel.

Una volta presentato uno dei parametri che verranno indagati a seguito delle prove di laboratorio eseguite, si richiameranno alcuni concetti della Scienza delle costruzioni

che stanno alla base dei principi di funzionamento dell'apparecchiatura per la prova di flessione su quattro punti, nel paragrafo 1.3.

Si descriverà, infatti, lo schema statico riprodotto dalla prova sul campione di conglomerato bituminoso, non prima di aver richiamato l'origine del calcolo delle sollecitazioni all'interno di un solido, secondo la teoria di uno dei padri della moderna Scienza delle costruzioni, de Saint-Venant, che ha posto i fondamentali che stanno alla base di ogni calcolo strutturale.

Per ultimo, si passerà al calcolo eseguito per la determinazione dell'equazione della linea elastica di una trave inflessa secondo lo schema statico in esame. Questa equazione fornisce l'espressione dello spostamento dell'asse del provino in funzione della sua ascissa, a seguito della deformazione apportata dal carico a cui è sottoposto durante la prova. Essa verrà successivamente posta in relazione alle formule del Modulo complesso fornite dalla normativa di riferimento, per evidenziarne e verificarne l'origine.

## **1.2 I MODULI DINAMICI DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO**

### **1.2.1 Gli stati tensionali all'interno di una pavimentazione**

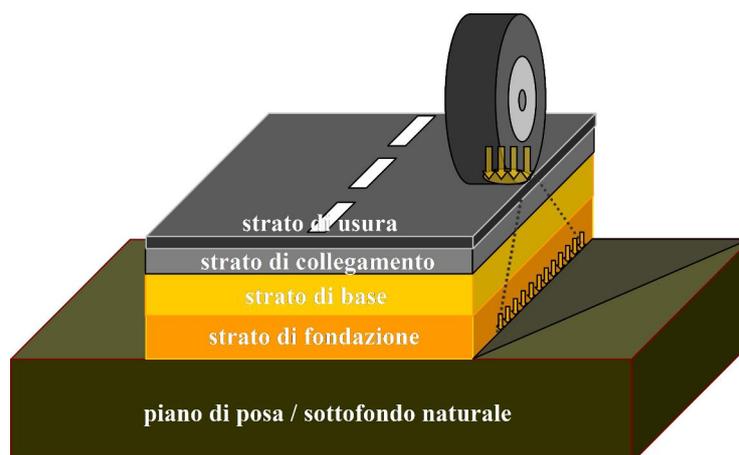
La caratterizzazione meccanica del conglomerato bituminoso parte dalla conoscenza degli stati tensionali che si manifestano all'interno della pavimentazione a seguito dei carichi del traffico veicolare.

La sovrastruttura stradale viene schematizzata come una serie di strati orizzontali sovrapposti, indefiniti in pianta e di spessore costante. Quelli bituminosi, quando presenti, prendono il nome di usura, binder e base.

Essi sono sollecitati in modo differente a seconda della loro posizione nel pacchetto. In particolare, gli strati superficiali (usura e binder) e sono sottoposti ad azioni verticali e orizzontali. Gli sforzi verticali sono quelli dovuti alla frazione di peso del mezzo applicato alla ruota, mentre quelli orizzontali sono sforzi tangenziali che si manifestano sulla superficie della pavimentazione nelle fasi di accelerazione, frenatura, sterzata, a causa dell'aderenza tra pneumatico e strato d'usura durante il rotolamento. Gli strati inferiori (base e fondazione) sono soggetti a sforzi prevalentemente verticali.

L'intera sovrastruttura stradale ha il compito di distribuire sul piano di posa gli sforzi, convenientemente ripartiti, dovuti ai carichi del traffico; per tale motivo essa

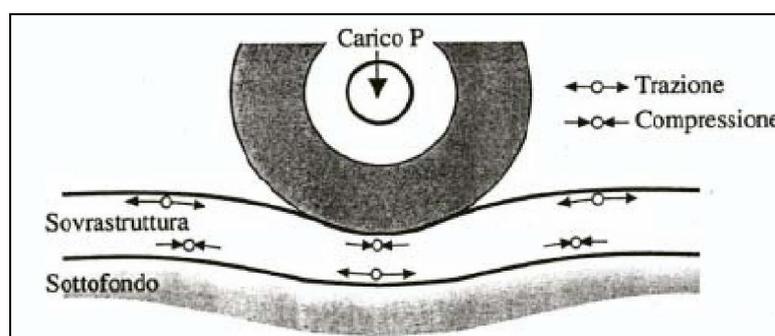
deve avere uno spessore tale per cui le azioni trasmesse al suolo siano sufficientemente ridotte e non superino quelle critiche del terreno [2](si veda Figura 1.1).



*Figura 1.1 – Schema di pavimentazione stradale flessibile*

Il carico applicato ad un pacchetto bituminoso da un pneumatico può essere schematizzato con una forza concentrata che provoca l'instaurarsi di una zona di compressione, immediatamente al di sotto, e di due zone di trazione nelle parti adiacenti a questo punto.

Inoltre, per la connessione all'interfaccia tra gli strati, le tensioni tangenziali che si creano all'estradosso dello strato superficiale, sono contrarie a quelle che si verificano all'intradosso, come si vede in Figura 1.2.

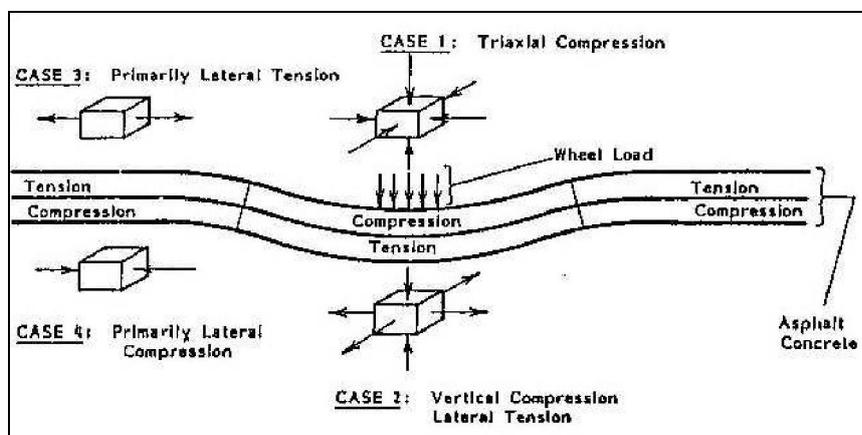


*Figura 1.2 – Sforzi negli strati superficiali nel contatto tra pneumatico e pavimentazione*

Schematizzando tridimensionalmente una porzione di pavimentazione tramite elementi infinitesimi di volume dello strato bituminoso, gli stati tensionali che si verificano su di essi sono quelli rappresentati in Figura 1.3.

Lo schema statico a cui si fa riferimento è quello di una trave doppiamente incastrata a cui è applicato un carico concentrato, anche se in realtà il quadro di sollecitazioni che si sviluppano nella sovrastruttura è molto più complesso. Si possono identificare tre settori che manifestano diversi stati tensionali in risposta al carico.

Nella zona immediatamente sottostante alla ruota si verifica una compressione triassiale per lo strato bituminoso e una compressione verticale combinata ad una tensione orizzontale di trazione per lo strato inferiore. Di conseguenza, nelle due zone adiacenti, gli elementi infinitesimi saranno sottoposti a sola trazione laterale nello strato comprendente i materiali legati con bitume e sola compressione laterale nell'insieme degli strati inferiori.



*Figura 1.3 - Stati tensionali all'interno della pavimentazione stradale per l'applicazione di un carico concentrato*

La distribuzione degli stati tensionali all'interno di una pavimentazione, è ulteriormente complicata dalla ciclicità di carico, variabile con le velocità dei veicoli, a cui essa è sottoposta, dal fatto che il traffico transita sempre nella stessa zona del manto superficiale e che non sempre è omogeneo, dal fatto che i sottofondi sono costruiti con materiali diversi e anche la temperatura varia nel tempo.

Per questi motivi è facile intuire la difficoltà di riprodurre il reale comportamento del conglomerato bituminoso tramite un singolo test di laboratorio. Allora si sceglie di sottoporre il materiale da studiare dal punto di vista meccanico a diverse prove di laboratorio, che simulino le diverse condizioni di carico a cui è sottoposto il materiale nella realtà.

### **1.2.2 I test di laboratorio per la determinazione dei moduli dinamici**

I test di laboratorio hanno il compito di riprodurre gli stati tenso-deformativi ai quali il conglomerato bituminoso è sottoposto a seguito dell'azione ciclica dei carichi del traffico veicolare, per poter dedurre le leggi di comportamento necessarie al calcolo di una pavimentazione.

Come già detto, è estremamente difficile realizzare un unico test che induca nel provino la molteplicità di stati tensionali che si verificano nella realtà. Infatti, oltre alla variabilità dei carichi e delle loro velocità di applicazione, bisogna tenere conto anche delle diverse condizioni ambientali.

Ciononostante, grazie alle ricerche effettuate negli ultimi anni e alla progettazione di apparecchiature innovative, è ora possibile analizzare gli stati tenso-deformativi del materiale in condizioni di prova che riproducano sempre più fedelmente le condizioni reali che si verificano all'interno delle pavimentazioni a causa del traffico veicolare.

La legge costitutiva di un materiale, che pone in correlazione tensione e deformazione, è caratterizzata da un indice, detto Modulo.

Nei materiali elastici si tratta del Modulo elastico, o Modulo di Young, mentre nei materiali viscoelastici, come il conglomerato bituminoso, la relazione tra stato tensionale e deformativo è regolata da un Modulo definito come complesso.

I materiali viscoelastici non hanno una legge costitutiva univoca, essa infatti dipende dalle condizioni a cui si trova il materiale, in particolare dalla temperatura, dalla velocità di carico e dalla modalità di applicazione del carico [5].

Le prove per la determinazione del Modulo complesso sottopongono provini prismatici, trapezoidali o cilindrici a carichi ciclici di compressione, trazione o flessione, variabili nel tempo, in genere con legge sinusoidale.

Per la natura viscoelastica del materiale, la deformazione conseguente all'applicazione dei carichi avviene con un certo ritardo nel tempo, dipendente dalla temperatura e dalla frequenza di carico. L'andamento della deformata segue la stessa legge di variazione del carico.

I moduli determinabili con prove cicliche e per questo detti dinamici sono: il Modulo complesso, il Modulo di rigidità e il Modulo resiliente.

### **1.2.3 Il Modulo complesso**

Il Modulo complesso è un parametro meccanico che descrive la relazione tra tensione e deformazione di un materiale viscoelastico, come è il caso del conglomerato bituminoso.

Esso è un numero complesso costituito da una parte reale, che riproduce la risposta elastica del materiale e fornisce quindi una misura del lavoro reversibile compiuto sotto l'azione di un carico, e da una parte immaginaria, che esprime la componente viscosa,

responsabile della frazione di lavoro irreversibile che viene dissipata durante la sollecitazione.

A causa della natura viscoelastica del materiale, il suo valore dipende dalla temperatura e dalla frequenza di carico, per questo motivo, le prove eseguite per la sua determinazione vengono ripetute variando questi due fattori.

Il Modulo complesso è un parametro che nasce dall'esigenza di studiare la risposta del c.b. sotto carichi ciclici, proprio quale è la natura dei carichi a cui è sottoposto il materiale nella realtà.

Il Modulo complesso è definito secondo la formula [6]:

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi} = |E^*| e^{i\varphi} \quad (1.1)$$

quindi

$$|E^*| e^{i\varphi} = |E^*| (\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

dove

$|E^*|$  = norma del Modulo complesso

$\sigma_0$  = massima tensione

$\varepsilon_0$  = massima deformazione

$\omega = 2\pi f$ , pulsazione di carico

$\varphi$  = frequenza di carico

$\varphi$  = angolo di fase tra la tensione e la conseguente deformazione generata

L'angolo di fase  $\varphi$  esprime il ritardo temporale che intercorre tra l'applicazione della sollecitazione e il manifestarsi della conseguente deformazione, fenomeno che si verifica a causa della natura viscoelastica del conglomerato bituminoso. Infatti, se si osserva l'espressione della deformazione nel tempo,  $\varepsilon(t)$ , si può notare che l'argomento della funzione seno non è semplicemente  $\omega t$ , come nell'espressione della tensione  $\sigma(t)$ , ma  $\omega t - \varphi$ , proprio perché la deformazione avviene in ritardo rispetto alla sollecitazione.

Le curve della tensione e della deformazione infatti hanno l'andamento rappresentato in Figura 1.4, in cui  $\varphi$  è proprio il ritardo di fase.

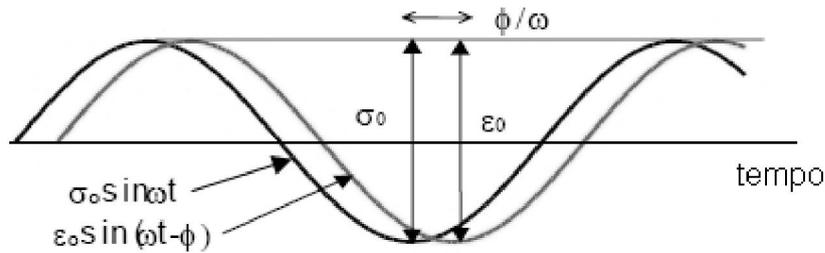


Figura 1.4 - Andamento delle curve di tensione e deformazione per un carico sinusoidale

La formula ( 1.1 ) del Modulo complesso si può riscrivere evidenziando le due componenti di cui esso è costituito, la parte reale  $E_1$  e la parte immaginaria  $E_2$ .

$$E^* = |E^*|(\cos \varphi + i \text{sen } \varphi) = E_1 + iE_2 \quad (1.2)$$

per cui

$$E_1 = |E^*| \cos$$

$$E_2 = |E^*| \text{sen}$$

Il Modulo complesso si può quindi rappresentare sul piano complesso come in Figura 1.5, tramite le due componenti  $E_1$  ed  $E_2$ , che prendono il nome rispettivamente di Modulo di restituzione e Modulo di dissipazione.

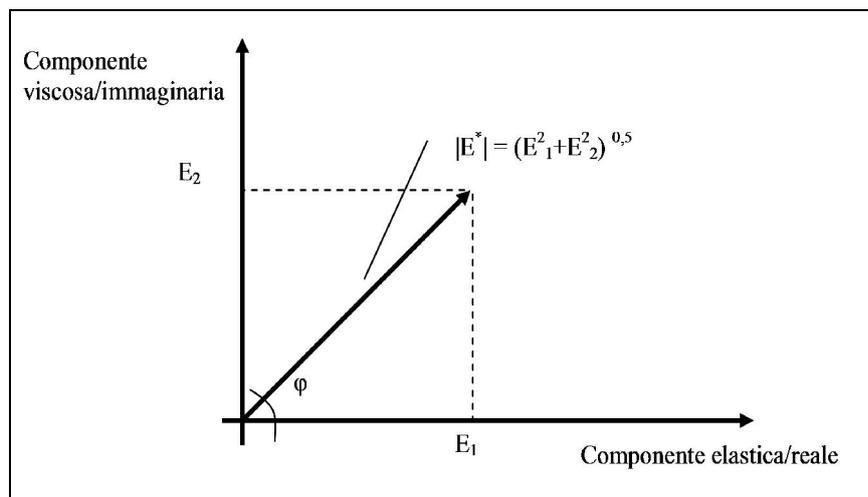


Figura 1.5 - Rappresentazione del Modulo complesso tramite parte reale e immaginaria

Il carico sinusoidale a cui viene sottoposto il provino è definito nella seguente relazione:

$$F(t) = F_0 \text{sen } t$$

con

$F_0$  = massima forza applicata

In Figura 1.6 è rappresentata la corrispondenza tra forza applicata durante la prova e relativa tensione sul provino, e tra spostamento e deformazione.

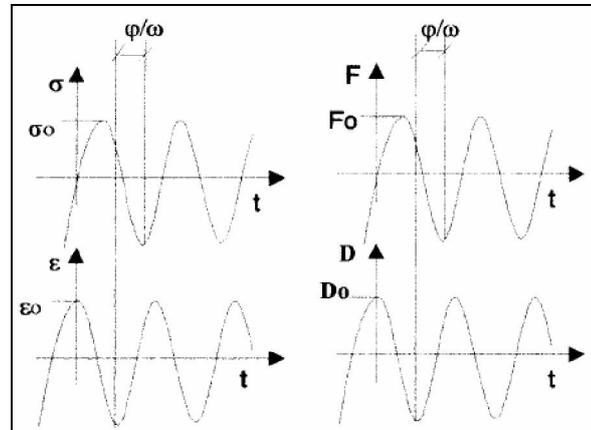


Figura 1.6 - Andamento nel tempo di carico applicato  $F$ , tensione  $\sigma$ , spostamento  $D$  e deformazione  $\epsilon$

Lo sfasamento temporale che intercorre tra l'applicazione del carico e la manifestazione dello spostamento è dato dal rapporto tra l'angolo di fase e la pulsazione.

A causa della natura viscoelastica del conglomerato bituminoso, il Modulo complesso e l'angolo di fase variano al variare della temperatura e della frequenza di applicazione del carico. Proprio per indagare l'influenza di questi due variabili su tali parametri meccanici, le prove dinamiche per la loro determinazione vengono eseguite in diverse modalità variando temperatura e frequenza.

Il Modulo complesso può essere determinato tramite prove di flessione su 2 punti, su 3 punti o su 4 punti, prove di trazione indiretta e diretta.

#### 1.2.4 Il Modulo di rigidità

Il Modulo di rigidità, è definito come il valore assoluto del Modulo complesso, ed è il parametro che viene comunemente utilizzato per fornire indicazioni sulle caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso.

La sua espressione analitica è la seguente:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (1.3)$$

infatti, se si considera il valore del Modulo complesso espresso come:

$$E^* = |E^*| (\cos \delta + i \sin \delta)$$

si ottengono  $E_1 = |E^*| \cos \delta$  ed  $E_2 = |E^*| \sin \delta$ , come definiti in precedenza.

L'angolo di fase invece è definito come  $\delta = \arctg (E_2/E_1)$ .

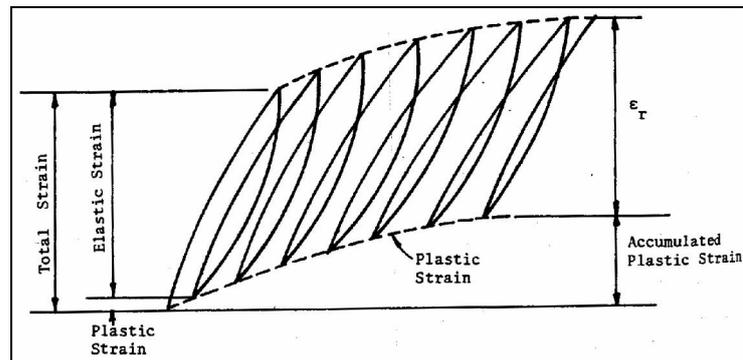
Il Modulo di rigidezza si calcola tramite le stesse prove utilizzate per la determinazione del Modulo complesso.

### 1.2.5 Il Modulo resiliente

Il Modulo resiliente è un altro parametro che serve a caratterizzare meccanicamente i conglomerati bituminosi, introdotto nell'ambito del programma SHRP americano.

Esso esprime la capacità di un materiale di assorbire l'energia quando viene deformato elasticamente e di restituirla successivamente quando viene scaricato.

Se il carico è piccolo rispetto alla rigidezza del materiale e viene ripetuto un grande numero di volte, la deformazione subita per ogni ciclo di carico è quasi completamente recuperabile e proporzionale al carico stesso [7]. Mentre al ciclo iniziale la deformazione permanente non è trascurabile, all'aumentare dei cicli di carico-scarico, la deformazione plastica diminuisce; già dopo circa 100 applicazioni le deformazioni si stabilizzano su un valore che non è più caratterizzato dalla componente plastica, ma solo quella elastica, come rappresentato in Figura 1.7.



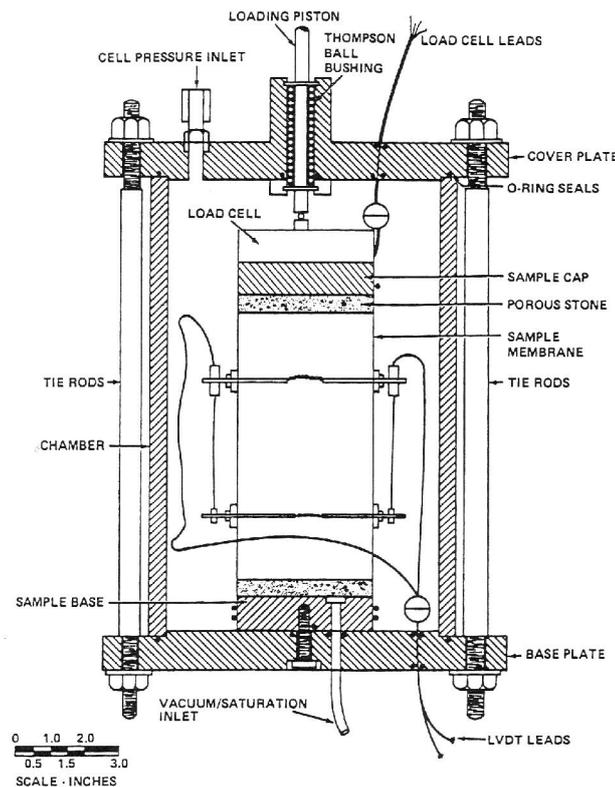
*Figura 1.7 - Andamento della deformazione per un c.b. sotto un carico ripetuto*

Il Modulo resiliente è anch'esso un Modulo di rigidezza, in quanto esprime la relazione tra la sollecitazione applicata ad un provino e la conseguente deformazione, la differenza che intercorre tra questo e il Modulo complesso sta nella modalità di applicazione del carico e nella deformazione considerata. Il Modulo resiliente viene determinato tramite carichi seguiti da un periodo di riposo, mentre il Modulo complesso (da cui si calcola il corrispondente Modulo di rigidezza) deriva da carichi continui ad

andamento sinusoidale o semisinudoidale; nel calcolo del Modulo resiliente si considera la deformazione reversibile recuperata dal materiale durante la fase di riposo, il Modulo complesso invece si calcola sulla deformazione massima.

Può essere determinato tramite prove triassiali oppure tramite prove di trazione indiretta.

Il primo caso consiste nell'applicare cicli di carico di compressione su un provino cilindrico posto all'interno di una cella triassiale con confinamento ad aria. Le deformazioni sono misurate da due trasduttori di spostamento lineari posizionati in corrispondenza del quarto superiore e inferiore dell'altezza del provino, si veda Figura 1.8.



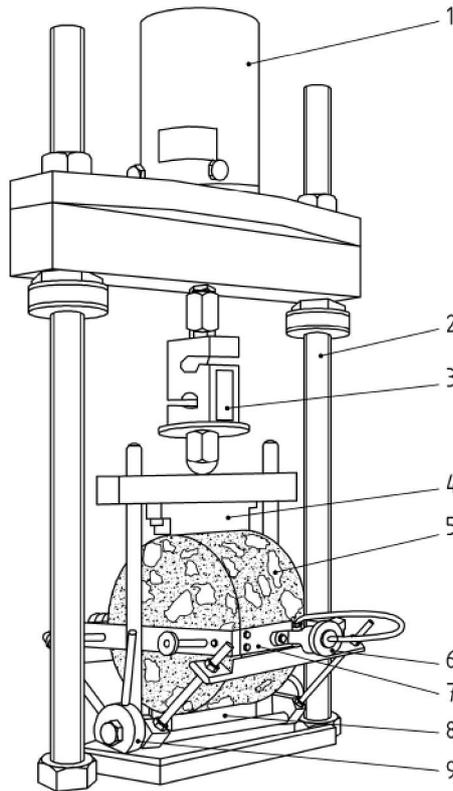
*Figura 1.8 – Apparecchiatura per la prova triassiale*

Il Modulo resiliente calcolato con questo tipo di prova è definito come il rapporto tra la tensione deviatorica applicata  $\sigma_d$  e la deformazione resiliente  $\epsilon_r$ , cioè reversibile, che si manifesta dopo l'eliminazione della tensione [7].

$$M_r = \frac{\sigma_r}{\epsilon_r} \quad (1.4)$$

Nel caso di trazione indiretta, invece, esso viene determinato sottoponendo un provino cilindrico ad un carico ciclico di forma semisinusoidale, applicato sul diametro

verticale tramite una barra metallica, e misurando le deformazioni orizzontali lungo il diametro orizzontale. L'apparecchiatura di prova è rappresentata in Figura 1.9.



- |                                   |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Attuatore di carico pneumatico | 6. Vite regolatrice dell'LVDT     |
| 2. Montante d'acciaio             | 7. Montante dell'LVDT             |
| 3. Cella di carico                | 8. Barra di carico inferiore      |
| 4. Barra di carico superiore      | 9. Vite di allineamento dell'LVDT |
| 5. Provino                        |                                   |

*Figura 1.9 – Apparecchiatura per la prova di trazione indiretta*

Il ciclo di carico è costituito da una fase di carico a forma semiconusoidale della durata di 0.1 secondi seguita da un periodo di riposo di 0.9 secondi.

Il Modulo resiliente, calcolato tramite la prova di trazione indiretta, è dato dalla media, su cinque cicli, del valore del Modulo calcolato sul singolo ciclo tramite l'espressione seguente [8]:

$$M_r = \frac{F(v + 0.27)}{zh} \quad (1.5)$$

con

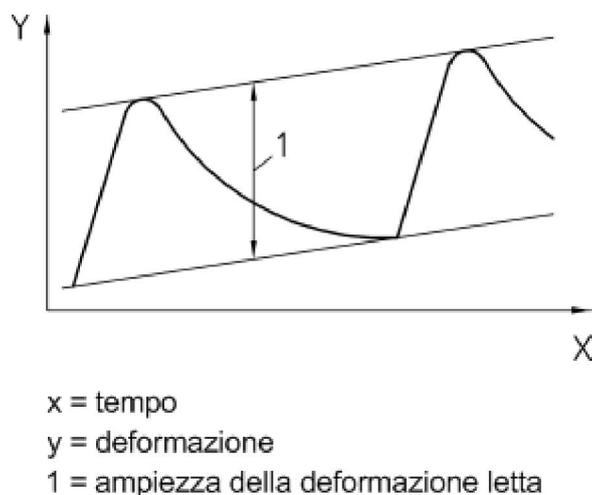
F = carico di picco del ciclo [N]

= coefficiente di Poisson

$h$  = spessore del provino [mm]

$z$  = ampiezza della deformazione orizzontale del singolo ciclo [mm]

La deformazione  $z$  si determina tracciando una linea tra il punto iniziale e finale del ciclo di carico e leggendo la distanza tra questa linea e la deformazione di picco, secondo il metodo Nottingham, si veda Figura 1.10.



*Figura 1.10 – Modalità di lettura della deformazione nella prova di trazione indiretta secondo il metodo Nottingham*

Il metodo americano proposto dall'ASTM, invece, determina la deformazione costruendo le due linee di regressione [9], riportate in Figura 1.11. La prima è un'estensione della porzione lineare della fase di scarico dell'onda (Regression Line 1), la seconda è tangente alla fine della fase di scarico (Regression Line 2). L'intercetta di queste due linee costituisce il punto in corrispondenza del quale viene letta la deformazione  $z$ . La normativa europea, la UNI EN 12697-26, utilizza il primo metodo.

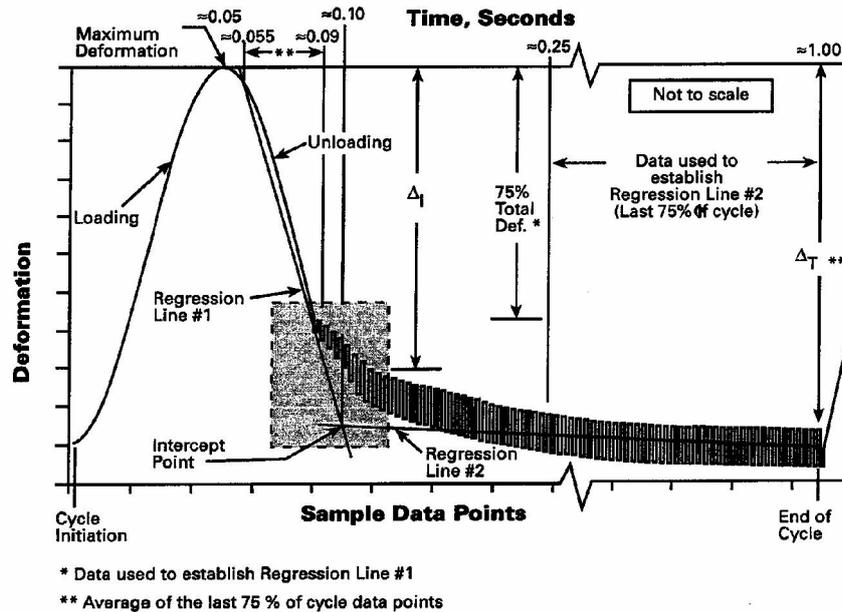


Figura 1.11 - Modalità di lettura della deformazione nella prova di trazione indiretta secondo il metodo ASTM

Il macchinario per la prova di trazione indiretta fu ideato a metà degli anni '70 in Gran Bretagna e chiamato con il nome Nottingham Asphalt Tester, o NAT.

Il Modulo così ottenuto fu chiamato 'Indirect Tensile Stiffness Modulus' ovvero ITSM, per differenziarlo da quello calcolato analiticamente tramite la formula ( 1.3 ).

### 1.2.6 Metodo empirico per la determinazione del Modulo di rigidità

La determinazione dei moduli dinamici di una miscela bituminosa con diverse prove di laboratorio dinamiche può risultare oneroso, sia dal punto di vista economico, perché ciò richiede l'acquisto di macchinari sofisticati, sia dal punto di vista temporale per l'esecuzione stessa delle prove, per l'elaborazione dei dati e per la necessaria fase di studio per l'individuazione delle condizioni ideali di prova nei confronti del software e dell'hardware, infine per la necessaria esperienza dei tecnici.

In passato alcuni filoni della ricerca sui materiali stradali, percorsero la via teorica per il calcolo del Modulo di rigidità sviluppando formule e nomografi sulla base delle proprietà fisiche dei bitumi, sulla densità delle miscele e la concentrazione degli aggregati [5].

Tra questi metodi, il più diffuso e utilizzato tutt'oggi si basa sui nomogrammi sviluppati da Van der Poel e Bonnaure.

Il processo di valutazione del Modulo di rigidezza di una miscela parte dalle considerazioni sul bitume impiegato. Occorre, infatti, conoscere le proprietà fisiche del bitume, tramite le quali si calcola il relativo Modulo di rigidezza, successivamente, in funzione di questo, viene calcolato il Modulo di rigidezza dell'intera miscela.

Le caratteristiche del bitume vengono espresse in indice di penetrazione PI secondo la formula:

$$PI = (20 - 500 A) / (1 + 50 A)$$

in cui A rappresenta la suscettività termica, ovvero:

$$A = \log(\text{pen at } T_1) - \log(\text{pen at } T_2) / (T_1 - T_2)$$

dove  $T_1$  e  $T_2$  sono le due temperature alle quali la penetrazione viene misurata.

La temperatura della palla anello in corrispondenza della quale il bitume ha una penetrazione di circa 800 dmm, viene calcolata con la formula:

$$A = [\log(\text{pen at } T) - \log 800] / (T - T_{\text{palla anello}})$$

Gli altri fattori da considerare sono il tempo di carico e la temperatura normalizzata, cioè la differenza tra la temperatura alla quale viene eseguita la prova e quella di riferimento.

Tramite l'indice di penetrazione vengono calcolati altri due indici che sono il Softening point (SPr) e il Penetration index (PIr) con le seguenti formule:

$$SPr = 98.4 \times 26.35Pr$$

con

$$Pr = 0.65 PI$$

e

$$PIr = [27 \log(PI) \times 21.65] / [73.35 \log(PI) \times 232.82]$$

dove Pr e PI sono rispettivamente la penetrazione iniziale e quella corretta a 25 °C.

Mentre il tempo di carico t, misurato in secondi, ricavato dalla velocità media attesa dei veicoli in km/h.

$$t = 1/V$$

Si entra nel nomogramma in Figura 1.12 con i valori così calcolati di t, SPr e PIr, e si traccia una linea congiungente i primi due valori, fino ad intercettare il valore di PIr, infine si legge il valore del Modulo di rigidezza del bitume, Sb.

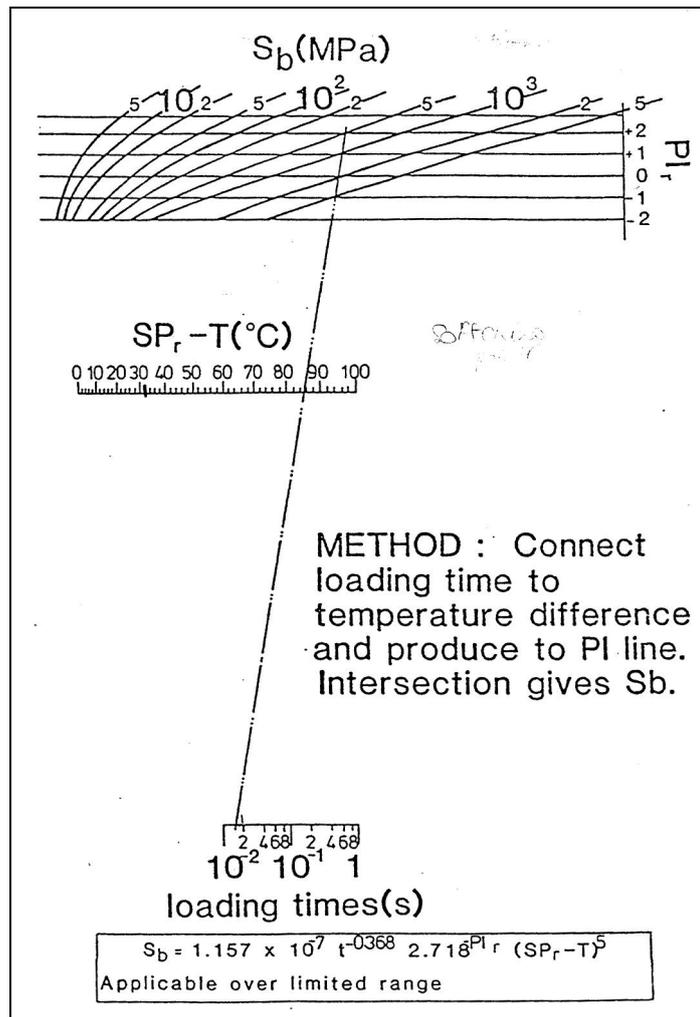


Figura 1.12 - Nomogramma per la valutazione del Modulo di rigidità del bitume

Ottenuto  $S_b$ , si utilizza un altro nomogramma, Figura 1.13, da cui ricavare il valore del Modulo di rigidità della miscela, previa determinazione del VMA degli aggregati, oppure usando la formula:

$$S_b = 1.157 \times 10^7 \times t^{-0.368} \times 2.718^{-PI_r} \times (SP_r - T)^5$$

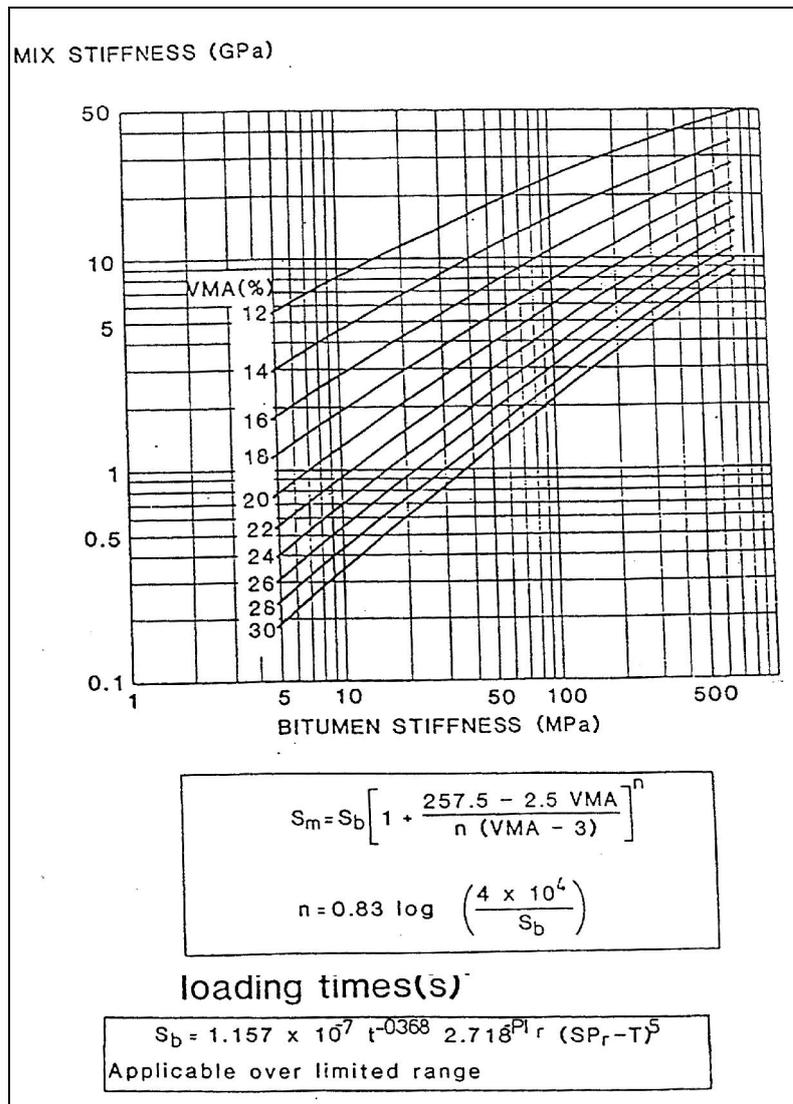


Figura 1.13 - Relazione fra Modulo di rigidezza del miscela di bitume e VMA

Con questa procedura, quindi, è possibile calcolare il Modulo di rigidezza di un conglomerato bituminoso senza eseguire prove di laboratorio, ma semplicemente considerando la temperatura e la velocità dei veicoli di progetto. È necessario osservare che questo metodo è estremamente approssimato perciò non viene utilizzato per la caratterizzazione meccanica del materiale ma può essere impiegato per una previsione del Modulo di rigidezza di un conglomerato bituminoso che verrà poi testato in laboratorio.

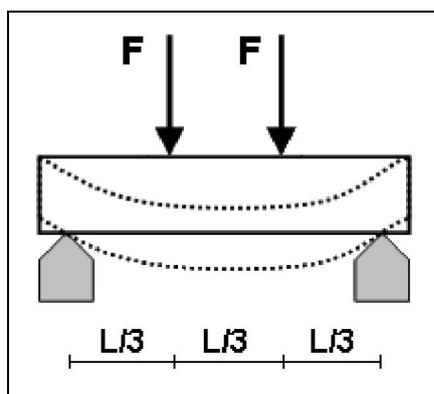
## 1.3 RICHIAMI DI TEORIA DELLA TRAVE

### 1.3.1 Lo schema statico riprodotto dalla prova 4PB

La prova di flessione su quattro punti si esegue su un provino di forma prismatica, tramite un macchinario di cui si parlerà diffusamente nel Capitolo 2, che viene appoggiato su quattro sistemi di bloccaggio posizionati ad una distanza tra loro pari ad  $1/3$  della lunghezza del provino.

Lo scopo della prova consiste nell'applicare dei carichi che riproducano le tensioni causate dal traffico veicolare. In tal modo, sarà possibile ottenere una risposta del materiale, in termini deformativi, a seguito delle sollecitazioni interne provocate da tali carichi.

Il telaio del macchinario è stato progettato in modo tale da riprodurre lo schema statico della trave doppiamente appoggiata e caricata con due forze concentrate, applicate simmetricamente a distanza di  $L/3$ , come rappresentato in Figura 1.14.



*Figura 1.14 – Schema statico della trave appoggiata caricata simmetricamente da due forze.*

La trave così schematizzata è un sistema isostatico, perciò è possibile calcolare le sollecitazioni indotte dai carichi esterni all'interno del solido.

A questo proposito, prima di procedere con il calcolo delle sollecitazioni, si ritiene opportuno richiamare alcuni concetti fondamentali elaborati dall'ingegnere civile e professore di meccanica francese de Saint-Venant verso la metà del 1800, che posero le basi per lo sviluppo della moderna Scienza delle costruzioni.

De Saint-Venant ricavò la soluzione del problema dell'equilibrio statico della trave, cioè arrivò a determinare lo stato tensionale e deformativo indotti dalle forze esterne, a partire da un solido cilindrico retto sufficientemente allungato, di sezione retta qualsiasi,

caricato sulle basi e costituito da materiale linearmente elastico, omogeneo ed isotropo (vd. Figura 1.15).

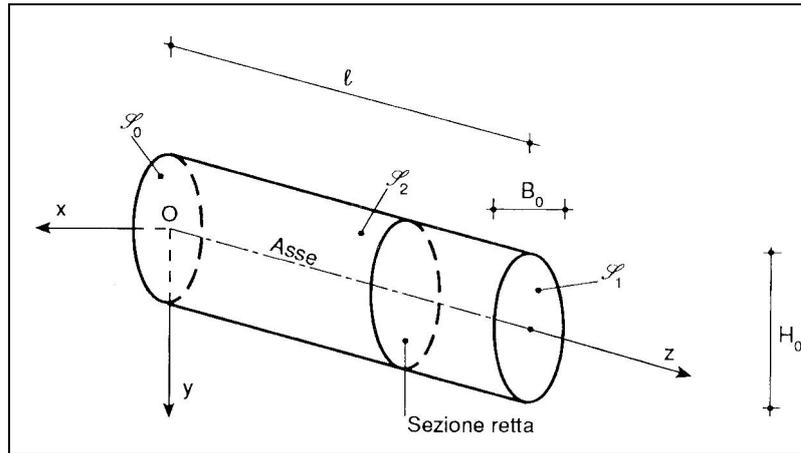


Figura 1.15. Solido cilindrico di de Saint-Venant

Tramite alcune ipotesi sulla soluzione riguardante lo stato tensionale o deformativo, attraverso le equazioni del problema, egli verificò l'esattezza delle ipotesi introdotte, ricavando inoltre i restanti parametri incogniti [10].

I sistemi di equazioni coinvolti nel calcolo sono tre: le equazioni indefinite di equilibrio, le equazioni di congruenza e le equazioni costitutive del materiale.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (1.6)$$

dove  $\sigma$  e  $\tau$  sono le tensioni normali e tangenziali sulle facce del cilindro nella direzione degli assi cartesiani.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (1.7)$$

dove  $u, v, w$  sono le componenti di spostamento, rispettivamente secondo  $x, y$  e  $z$ , mentre  $\varepsilon$  e  $\gamma$  sono le componenti di deformazione lineare e angolari nelle stesse direzioni.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\
 \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\
 \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\
 \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

dove E è il Modulo di elasticità normale, G è il Modulo di elasticità tangenziale e  $\nu$  è il coefficiente di Poisson.

A queste equazioni è necessario aggiungere le equazioni al contorno di sforzo nullo sulla superficie laterale  $\mathcal{S}_2$  e di sforzo assegnato sulle basi con  $z = 0$  e  $z = l$  come in Figura 1.16.

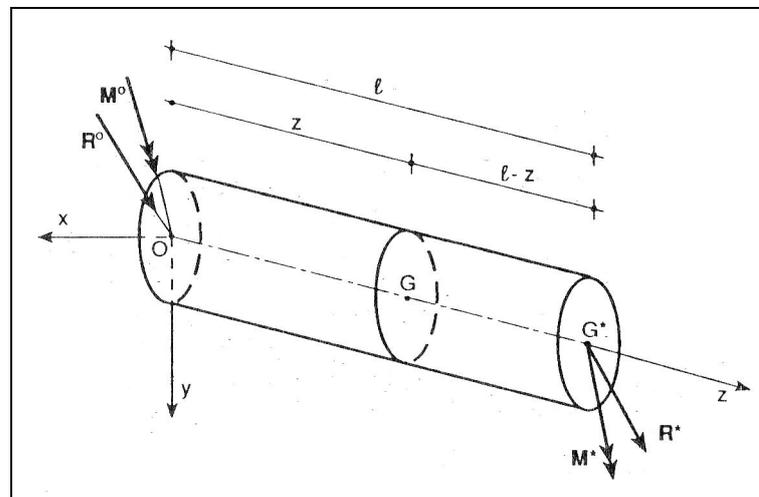


Figura 1.16 – Cilindro di de Saint-Venant con sforzo nullo sulla superficie laterale e caricato sulle basi

In particolare, queste ultime condizioni di sforzo sulle due basi del cilindro, esprimono l'uguaglianza, punto per punto, tra le componenti di tensione affioranti in superficie e le omologhe componenti delle forze esterne.

Inoltre, per il Postulato di de Saint-Venant, che afferma che “a sufficiente distanza della basi caricate da forze esterne, gli stati tensionale e deformativi non dipendono (praticamente) dalla distribuzione puntuale dei carichi, ma solo dai loro vettori risultanti”, consente di ricavare la distribuzione delle tensioni all'interno del solido dipendente dai vettori risultanti delle forze applicate alle basi, e non dalla distribuzione puntuale delle stesse.

Esso elimina anche le difficoltà connesse alla ricerca di una nuova soluzione di equilibrio per ogni condizione di carico. Tutte le possibili condizioni di carico, infatti, possono ricondursi a quattro tipi di sollecitazione fisicamente distinti: sforzo assiale  $N$ , flessione retta  $M_x$  o  $M_y$ , torsione  $M_z$  e taglio  $T_x$  o  $T_y$ .

Si consideri il cilindro di de Saint-Venant, sulle cui basi sono applicati i vettori delle forze esterne (si veda Figura 1.16),  $\mathbf{R}^0$  e  $\mathbf{M}^0$  per la base sinistra e  $\mathbf{R}^*$  e  $\mathbf{M}^*$  per quella destra. Ora, si esegua un taglio del cilindro in una sezione di generica ascissa  $z$ , sulle due sezioni ricavate dal taglio agiranno le componenti dei due vettori caratteristici  $\mathbf{R}$  ed  $\mathbf{M}$  che la parte sinistra esercitava sulla parte destra e viceversa, prima del sezionamento (si veda Figura 1.17). Tali componenti prendono il nome di caratteristiche della sollecitazione interna.

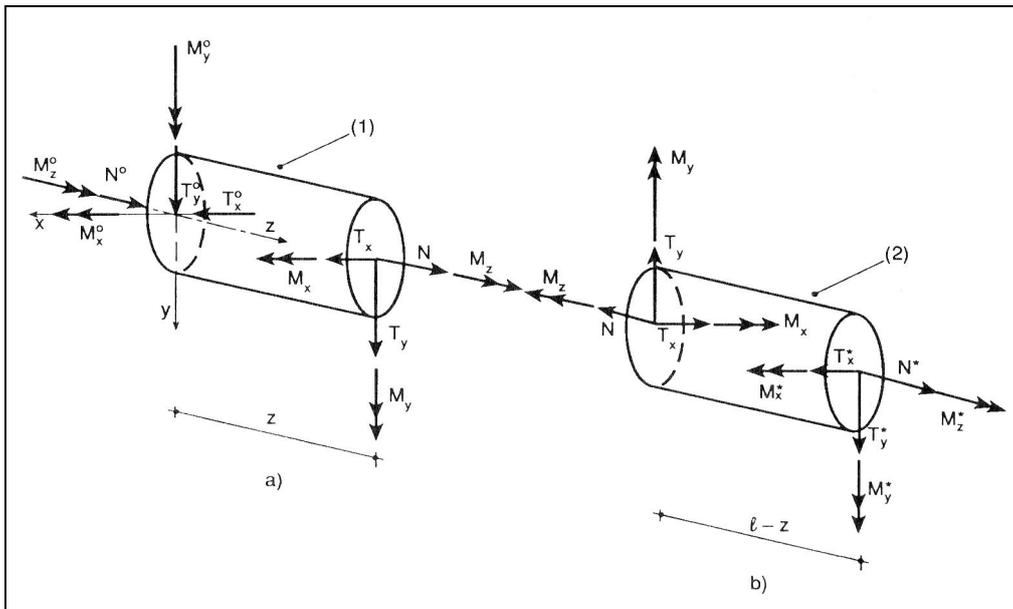


Figura 1.17 – Caratteristiche della sollecitazione interna evidenziate dal taglio eseguito al cilindro

Il sistema di forze che ciascuna delle due parti del cilindro esercita sull'altra deve essere nullo. Per equilibrio alla traslazione secondo gli assi  $x$ ,  $y$  e  $z$  si ottiene che la faccia tagliata della parte destra di cilindro ha le stesse componenti di sollecitazione della base di ascissa  $z = 0$ , cioè  $\mathbf{R}^0$ , quindi sarà:

$$T_x = T_x^*$$

$$T_y = T_y^*$$

$$N = N^*$$

(1.9)

Dall'equilibrio alla rotazione attorno agli stessi assi si ricavano invece le componenti di  $\mathbf{M}$ .

$$M_x = M_x^* - T_y^*(I - z)$$

$$M_y = M_y^* + T_x^*(I - z) \quad (1.10)$$

$$M_z = M_z^*$$

Allo stesso modo si ricavano le collezioni della faccia sinistra, con riferimento ai corrispondenti vettori delle forze esterne  $R^0$  e  $M^0$ .

Dalle ( 1.9 ) e ( 1.10 ) si nota che i tagli, gli sforzi assiali e il momento torcente sono costanti con l'ascissa  $z$ , e pari ai valori corrispondenti alla faccia esterna della parte di cilindro in considerazione, mentre i momenti flettenti variano con legge lineare.

Detto ciò, se ora si considera un generico tronco di trave di lunghezza non trascurabile ad asse rettilineo, compreso tra due forze concentrate qualsiasi, questo può essere assimilato ad un solido di de Saint-Venant.

Il suo comportamento si può studiare considerando applicate alle sue sezioni di estremità, le caratteristiche della sollecitazione lì presenti, in virtù del postulato di de Saint-Venant. Gli stati tensionali e deformativi, ottenuti in ogni punto come soluzione del problema di S.-V. sono validi ovunque, qualunque sia la distribuzione delle tensioni alle basi della trave.

Quindi lo stato di tensione in una qualsiasi sezione della trave viene valutato come se essa appartenesse a un cilindro caricato conformemente alle ipotesi di de Saint-Venant.

Si consideri lo schema statico rappresentato in Figura 1.14, che è un esempio di trave ad asse rettilineo soggetta a sole forze e reazioni vincolari normali all'asse, detta trave inflessa.

Per questo tipo di configurazione geometrica e di sollecitazione, le sollecitazioni relative ad una qualsiasi sua sezione, saranno esclusivamente al più di taglio e di momento flettente, essendo ovunque nullo lo sforzo normale.

Si procede calcolando dapprima le reazioni vincolari dei due appoggi, tramite annullamento dei momenti in corrispondenza di tali vincoli, e successivamente si studiano le distribuzioni delle forze di taglio e del momento flettente al variare dell'ascissa.

I diagrammi che ne risultano sono quelli riportati in Figura 1.18.

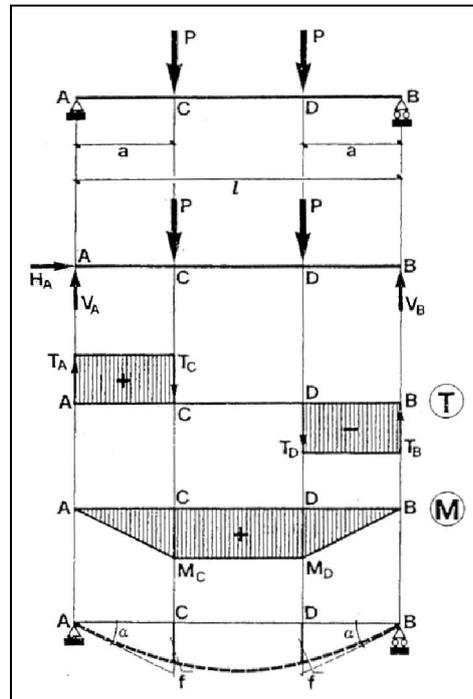


Figura 1.18 – Diagrammi delle sollecitazioni per trave appoggiata caricata simmetricamente da due forze concentrate.

Le reazioni vincolari sono:

$$V_A = V_B = P$$

$$H_A = 0$$

Il taglio è uguale al valore della forza P, con i segni relativi alla convenzione sui segni, nei tratti di lunghezza a, cioè tra gli appoggi e i punti in cui sono applicate le forze, mentre si annulla nella parte centrale.

Il momento ha andamento lineare fino alle forze P e andamento costante nel segmento centrale dove si annulla il taglio, il suo valore massimo è:

$$M_{\max} = P \cdot a$$

Nell'ultimo diagramma, invece, è disegnata la deformata della trave, cioè il luogo dei punti assunti dell'asse per gli spostamenti subiti a seguito dell'applicazione delle forzanti P, la cui equazione prende il nome di linea elastica, di cui si parlerà nel paragrafo successivo.

Nel caso specifico della prova di flessione su quattro punti, la lunghezza a è pari a circa 1/3 della lunghezza del provino e la forza P assume valori variabili con legge sinusoidale.

Per questo motivo il carico sarà ciclicamente rivolto verso il basso e verso l'alto, e di conseguenza, anche i diagrammi delle sollecitazioni si specchieranno rispetto all'asse del provino, seguendo i valori di forza della parte di onda positiva e negativa.

Per quanto riguarda la deformazione della trave, la generica sezione subirà una deformazione uguale a quella del caso di sollecitazione a flessione retta, se si trascura la componente di deformazione tagliante, assunzione lecita in quanto la deformazione dovuta al taglio è trascurabile rispetto a quella flessionale.

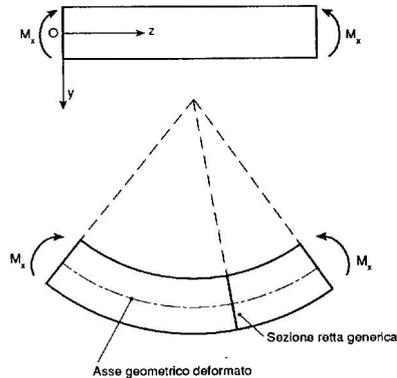


Figura 1.19 – Flessione della trave

La trave, cioè si inflette sotto l'azione del momento che ha l'andamento riportato in Figura 1.17, e la sua sezione trasversale assume la giacitura riportata in Figura 1.20.

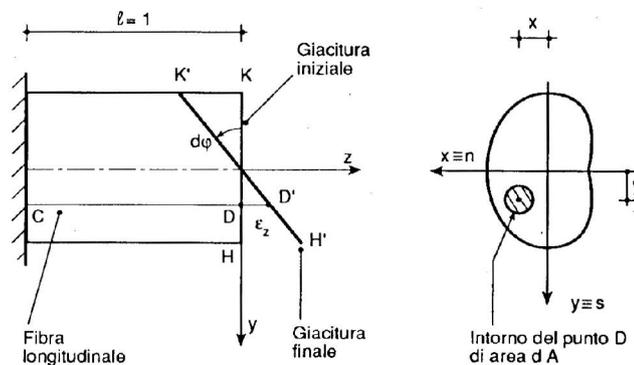


Figura 1.20 – Giacitura della generica sezione della trave a seguito dell'applicazione del carico

Come si vede, le fibre che si trovano dalla parte della convessità si allungano mentre quelle dalla parte della concavità si accorciano. La sezione si conserva piana e ortogonale all'asse geometrico deformato, per l'ipotesi di Eulero-Bernoulli, detta anche ipotesi di conservazione delle sezioni piane.

Si supponga di analizzare un tronco di trave di lunghezza unitaria con la faccia sinistra tenuta fissa e quella destra libera da ogni impedimento. A seguito della rotazione di angolo  $d$ , la dilatazione  $\varepsilon_z = \overline{DD'}$  della generica fibra longitudinale risulta proporzionale alla distanza  $y$  dall'asse neutro  $A \equiv z$ , cioè:

$$\varepsilon_z = cy \quad (1.11)$$

dove  $c$  è una costante che si determina nel seguente modo.

Trattandosi di uno stato tensionale monoassiale, la legge di Hooke permette di ricavare la tensione principale  $\sigma_z$  nel punto D:

$$\sigma_z = E\varepsilon_z = Ecy$$

L'equivalenza tra le forze  $\sigma_z dA$  associate alla tensione  $\sigma_z$  e la sollecitazione di sforzo assiale nulla permette di scrivere:

$$N=0 = \int_A \sigma_z dA = cE \int_A y dA \quad (1.12)$$

dove A è l'area della sezione trasversale della trave.

Ma  $\int_A y dA$  è il momento statico dell'area della sezione retta rispetto all'asse neutro

$x \equiv z$ . Sostituendo  $S_x$  all'integrale in (1.12), si può quindi riscrivere l'uguaglianza come:

$$cES_x = 0$$

Allo stesso modo le forze elementari  $\sigma_z dA$  devono costituire un sistema equivalente alla coppia interna  $M_x$  per equilibrio attorno all'asse neutro, si ha quindi:

$$M_x = \int_A \sigma_z y dA = cE \int_A y^2 dA \quad (1.13)$$

In cui  $\int_A y^2 dA = I_x = I_n$ , momento d'inerzia rispetto all'asse neutro  $x \equiv z$ .

Dalla (1.13) si ricava quindi il valore della costante  $c$  dell'equazione (1.11), cioè

$$c = \frac{M_x}{EJ_x}.$$

### 1.3.2 Calcolo dell'equazione della linea elastica

Si consideri il provino da testare tramite la prova di flessione su quattro punti come facente parte dello stesso sistema di riferimento di Figura 1.15, con origine nell'estremità sinistra, ascissa dell'asse indeformato coincidente con l'asse  $z$  e asse  $y$  verticale e positivo verso il basso.

A seguito dell'applicazione del carico, il provino subisce un determinato spostamento, che viene rappresentato tramite la linea dell'asse in posizione deformata, come in Figura 1.21.

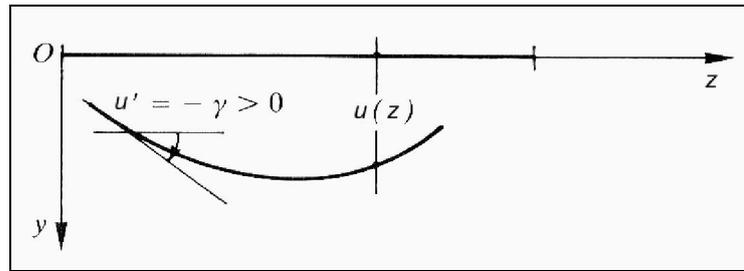


Figura 1.21 – L'asse della trave deformato nel sistema di riferimento utilizzato per la determinazione della linea elastica

Questa linea prende il nome di linea elastica e di seguito viene riportato il procedimento per la determinazione della sua equazione [11].

Si parte dalle equazioni che legano le caratteristiche della sollecitazione nella generica sezione alla distribuzione di carico, per trave ad asse rettilineo.

$$\frac{dN}{dz} = -q_z$$

$$\frac{dT}{dz} = -q_y$$

$$\frac{dM}{dz} = T - m$$

dove  $q_z$  e  $q_y$  sono rispettivamente i carichi distribuiti lungo l'asse  $z$  e  $y$ , mentre  $m$  sono le eventuali coppie distribuite.

Nel caso della trave doppiamente appoggiata e caricata simmetricamente da due forze queste si semplificano a

$$\frac{dT}{dz} = -q_y \tag{1.14}$$

$$\frac{dM}{dz} = T - m \tag{1.15}$$

e, derivando la seconda e sostituendo alla derivata di  $T$  la sua definizione indicata nella prima equazione, rimane

$$\frac{d^2 M}{dz^2} = -q_z - \frac{dm}{dz}$$

Nell'ipotesi di piccoli spostamenti si può confondere l'angolo di rotazione della generica sezione con la sua tangente, e perciò risulta:

$$\gamma = -\frac{du}{dz}$$

Se si considera solo il contributo del momento flettente, ai fini deformativi, trascurando quello del taglio, allora si ha che:

$$EJ \frac{d\gamma}{dz} = M$$

Sostituendo l'espressione di  $\gamma$  in questa equazione, si perviene al legame differenziale che esprime M in funzione dello spostamento verticale dell'asse della trave:

$$EJ \frac{d^2 u}{dz^2} = -M \quad (1.16)$$

Differenziando ulteriormente l'equazione ( 1.16 ), si ricavano le espressioni ( 1.14 ) e ( 1.15 ) in termini di spostamento, cioè:

$$\frac{d}{dz} \left( EJ \frac{d^2 u}{dz^2} \right) = -T + m \quad (1.17)$$

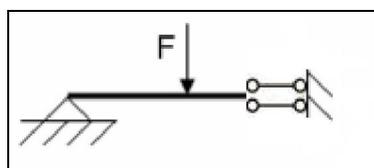
$$\frac{d^2}{dz^2} \left( EJ \frac{d^2 u}{dz^2} \right) = q_y + \frac{dm}{dz} \quad (1.18)$$

L'equazione di partenza per il calcolo dell'equazione della linea elastica, secondo la teoria di Eulero-Bernoulli, sarà quindi un caso particolare dell'ultima, con carico distribuito e coppie distribuite nulli, cioè

$$EJ \frac{d^4 u}{dz^4} = 0 \quad (1.19)$$

Il problema della determinazione dell'equazione della linea elastica si traduce nella successiva integrazione dell'equazione differenziale di quarto grado, ai fini di ottenere l'espressione dello spostamento della linea d'asse in funzione dell'ascissa z.

Lo schema che si considera per il calcolo della linea elastica nel caso della trave inflessa su quattro punti (si veda Figura 1.14), è quello di mezza trave con un estremo appoggiato e l'altro estremo vincolato con un doppio pendolo, essendo la configurazione geometrica e statica simmetriche rispetto alla mezzeria.

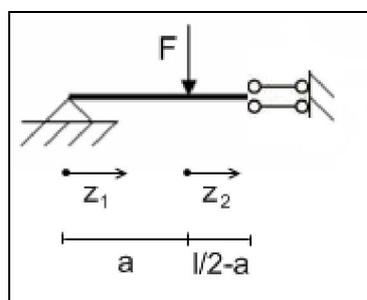


*Figura 1.22 – Schema statico per il calcolo dell'equazione della linea elastica*

Come si vede nell'equazione ( 1.17 ), la linea elastica presenta delle discontinuità del terzo ordine nelle sezioni dove variano il taglio o l'eventuale distribuzione delle coppie  $m$ , che si traducono in sezioni in cui, ad esempio, agiscano forze concentrate. Allo stesso modo, osservando l'equazione ( 1.18 ), una discontinuità del quarto ordine si verifica anche in corrispondenza di variazioni del carico distribuito.

In presenza di una discontinuità di carico, come nel caso in esame, è necessario ricavare un'equazione differenze per ogni tratto in cui sia rispettata la continuità delle funzioni  $u$ ,  $u'$ ,  $u''$  e  $u'''$ , che sono rispettivamente spostamento, angolo di rotazione, momento e taglio.

L'ascissa  $z$  viene quindi suddivisa in due tratti, il primo che parte dall'appoggio fino al punto di discontinuità e il secondo che parte da questo punto fino al doppio pendolo, come rappresentato in .



*Figura 1.23 – Suddivisione delle ascisse per il calcolo della linea elastica per la presenza di una discontinuità di carico*

Si procede, quindi, con l'integrazione dell'equazione ( 1.19 ) quattro volte, fino ad ottenere l'espressione dello spostamento nei due tratti di lunghezza  $a$  e  $l/2-a$ , in funzione delle due ascisse  $z_1$  e  $z_2$ .

$$u(z_1) = c_1 + c_2 z_1 + c_3 z_1^2 + c_4 z_1^3$$

$$u(z_2) = c_5 + c_6 z_2 + c_7 z_2^2 + c_8 z_2^3$$

Le otto costanti di integrazione si determinano ponendo quattro condizioni al contorno sulle sezioni vincolate e quattro condizioni di congruenza in corrispondenza della sezione con la discontinuità di carico.

Le condizioni al contorno, due per ogni vincolo, devono essere una di tipo geometrico e una di tipo statico. Quella di tipo geometrico è determinata dal grado di libertà impedito dai vincoli cinematici posizionati alle estremità della trave, perciò nella sezione in corrispondenza dell'appoggio ( $z_1=0$ ), si imporrà lo spostamento verticale nullo, perché bloccato dal vincolo di cerniera, mentre nella sezione in corrispondenza

del doppio pendolo ( $z_2=l/2-a$ ), si dovrà imporre che l'angolo di rotazione sia nullo perché questo vincolo agisce come un incastro cedevole. Le condizioni di tipo statico rotazione, allo stesso modo, sono determinate dalla conseguente componente della sollecitazione che risulta essere nota dalla struttura del vincolo stesso. In questo caso sulla cerniera si imporrà un momento nullo, mentre sul doppio pendolo si imporrà un taglio nullo.

Cioè

$$\begin{cases} u(z_1 = 0) = 0 \\ u''(z_1 = 0) = 0 \\ \\ u'(z_2 = \frac{l}{2} - a) = 0 \\ u'''(z_2 = \frac{l}{2} - a) = 0 \end{cases}$$

Le ulteriori quattro condizioni per riuscire a determinare le otto costanti di integrazione sono le condizioni di congruenza; si impone, cioè, che le grandezze cinematiche e statiche imposte precedentemente alle due estremità, assumano lo stesso valore nella sezione in cui è presente la discontinuità, cioè la forza concentrata  $F$ . Questo si traduce nell'eguagliare le due espressioni che assumono lo spostamento, l'angolo di rotazione, il momento, nei due tratti in cui è stata divisa la trave, con le rispettive ascisse. La condizione sul taglio, invece, impone che il suo valore sia proprio la forza  $F$ , nella sezione con la discontinuità.

$$\begin{cases} u(z_1 = a) = u(z_2 = 0) \\ u'(z_1 = a) = u'(z_2 = 0) \\ u''(z_1 = a) = u''(z_2 = 0) \\ -EJu'''(z_1 = a) + EJu'''(z_2 = 0) = F \end{cases}$$

Sostituendo le espressioni di  $u$  e delle sue derivate successive all'interno delle otto equazioni, calcolate nelle rispettive ascisse, il sistema da risolvere diventa:

$$\begin{cases} c_1 = 0 \\ c_3 = 0 \\ c_6 + 2c_7\left(\frac{l}{2} - a\right) + 3c_8\left(\frac{l}{2} - a\right)^2 = 0 \\ c_8 = 0 \\ c_1 + c_2 a + c_3 a^2 + c_4 a^3 = c_5 \\ c_2 + 2c_3 a + 3c_4 a^2 = c_6 \\ 2c_3 + 6c_4 a = 2c_7 \\ -6EJc_4 + 6EJc_8 = F \end{cases}$$

Dopo aver risolto questo sistema di otto equazioni in otto incognite si perviene all'equazione della linea elastica, che avrà espressioni diverse nei due tratti, in particolare:

$$u(z_1) = \frac{Fa}{2EJ}(l-a)z_1 - \frac{F}{6EJ}z_1^3 \quad (1.20)$$

nel tratto con ascissa  $z_1$  compresa tra 0 e  $a$

$$u(z_2) = \frac{Fa^2 l}{2EJ} - \frac{2Fa^3}{3EJ} + \frac{Fa}{EJ}\left(\frac{l}{2} - a\right)z_2 - \frac{Fa}{2EJ}z_2^2 \quad (1.21)$$

nel tratto con ascissa  $z_2$  compresa tra 0 ed  $l/2-a$ .

Per verificarne l'esattezza si è eseguito il confronto tra l'espressione della freccia massima per lo schema statico in esame, cioè

$$u_{\max} = \frac{Fa}{24EJ}(3l^2 - 4a^2) \quad (1.22)$$

e quello che si ottiene sostituendo a  $z_2$ , in ( 1.21 ), il valore di  $l/2-a$ .

## **CAPITOLO 2 LA FASE SPERIMENTALE: ESECUZIONE DELLE PROVE PER LA CARATTERIZZAZIONE FISICA E MECCANICA DEL MATERIALE**

### **2.1 INTRODUZIONE**

Lo scopo dello studio sperimentale oggetto della presente tesi è l'analisi di una tra le prove di laboratorio dinamiche disponibili per la determinazione della rigidità di un conglomerato bituminoso. Questa ricerca di tipo meccanico è inoltre stata associata allo studio fisico del materiale in esame, per costruirne un quadro più completo delle caratteristiche fisiche e prestazionali.

Uno degli obiettivi è quello di studiare il comportamento reologico di un conglomerato bituminoso, cioè la sua risposta in termini di deformazione a seguito dell'applicazione di sollecitazioni flessionali, che riproducano gli stati tensionali che si verificano all'interno di una pavimentazione stradale.

Inoltre, data la particolare e irripetibile opportunità di avere a disposizione due versioni successive dell'apparecchiatura di prova per la flessione su quattro punti, una parte dello studio è stata finalizzata al confronto dei due macchinari per verificare se le modifiche geometriche e quelle apportate nel software determinino un differente comportamento del materiale.

Nel paragrafo 2.2 viene quindi illustrato il programma sperimentale condotto per lo studio, evidenziando le operazioni che sono state svolte nel corso dei mesi e il criterio di suddivisione dei provini, a seconda delle prove che su di essi sono state fatte.

Il materiale utilizzato per il presente studio è un binder confezionato al Nottingham Transportation Engineering Center dell'Università di Nottingham, nel Regno Unito.

La sua caratterizzazione fisica è stata realizzata in parte in fase di progettazione della miscela nel laboratorio del NTEC, in parte nella sezione adibita ai conglomerati bituminosi presso il laboratorio prove Elletipi S.p.A di Ferrara, sul materiale finito.

La curva granulometrica degli aggregati della miscela è stata ricavata a partire da inerti calcarei dalle dimensioni massime di 10 mm, variando le percentuali di materiale

lapideo delle diverse dimensioni affinché la curva risultasse interna al fuso granulometrico (si veda il sottoparagrafo 2.3.4).

Il legante utilizzato per il confezionamento della miscela è stato un bitume non modificato di categoria 50/70, nella percentuale del 5.5% in peso sul totale degli inerti.

Una volta miscelati i materiali è stata calcolata la massa volumica massima, la cui procedura di determinazione verrà descritta nel sottoparagrafo 2.3.1.

Nota la massa volumica massima e la percentuale dei vuoti che si voleva ottenere dopo la compattazione della miscela con “roller compactor”, è stato calcolato il volume imponendo le dimensioni della piastra da stendere (500x500x135 mm) e ricavata quindi la massa di materiale richiesta.

Le piastre di binder sono state successivamente tagliate per ricavarne dei provini di forma prismatica, dalle dimensioni di circa 400x60x50 mm, da sottoporre a diverse prove di flessione su quattro punti per la determinazione del Modulo di rigidità e il tracciamento delle “Master Curve”, di cui si parlerà nel Capitolo 3, per evidenziarne il comportamento meccanico al variare della frequenza di carico e della temperatura.

La caratterizzazione meccanica del materiale, tramite la prova di flessione su quattro punti, è descritta nel paragrafo 2.4. Al suo interno è presentata dapprima la normativa di riferimento, successivamente sono descritti l’apparecchiatura di prova e il software per la sua gestione, infine la procedura di prova nel dettaglio.

La caratterizzazione fisica è terminata, successivamente alle prove meccaniche, nel laboratorio Elletipi di Ferrara, tramite le prove per la determinazione della massa volumica apparente dei provini e il calcolo della percentuale dei vuoti d’aria, si vedano i sottoparagrafi 2.3.2 e 2.3.3.

## **2.2 PROGRAMMA SPERIMENTALE**

Il materiale a disposizione per i test era costituito da 14 travetti di binder, tagliati da una piastra di dimensione 500x500x135 mm di materiale confezionato presso il NTEC dell’Università di Nottingham.

Lo scopo della fase sperimentale è stato quello di caratterizzare un materiale non solo fisicamente, tramite le prove di routine che si eseguono quotidianamente nei laboratori, ma anche di indagarlo dal punto di vista meccanico. L’interesse maggiore era infatti rivolto allo studio reologico del materiale, cioè allo studio del comportamento deformativo a seguito dell’applicazione di determinate sollecitazioni.

Per questo motivo le prove sono state eseguite in diverse condizioni, sia dal punto di vista ambientale, variando cioè la temperatura di prova, sia dal punto di vista sollecitativo, variando i parametri caratterizzanti i carichi applicati, per riprodurre gli stati tensionali che si verificano in una pavimentazione reale, per l'effetto del carico veicolare, come esposto nel capitolo precedente.

I 14 provini a disposizione sono quindi stati suddivisi in due gruppi, riservandone una parte per la caratterizzazione reologica del materiale e una parte per il confronto dei due apparati di prova.

<b>Provini</b>	<b>Scopo delle prove</b>	<b>Condizioni di prova</b>
1-9	Caratterizzazione reologica	Temperature: 10, 20, 30 °C Frequenze: 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 30, 0.1 Hz N° di cicli per frequenza: 300 Deformazione massima: 50 µ
10-14	Confronto apparecchiature di prova	Temperatura: 20 °C Frequenze: 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 30, 0.1 Hz N° di cicli per frequenza: 100 Deformazione massima: 50 µ

*Tabella 2.1 – Suddivisione dei provini e relative condizioni di prova*

Come si può vedere, i provini destinati allo studio reologico del materiale, sono stati sottoposti a prove di flessione su quattro punti, variando i parametri caratterizzanti le condizioni di carico e ambientali, proprio per riuscire ad ottenere informazioni sul comportamento del conglomerato bituminoso, che essendo un materiale viscoelastico, si comporta in maniera differente a seconda della velocità di carico e della temperatura alla quale si trova.

Le temperature scelte sono state 10°, 20° e 30° C, mentre per quanto riguarda le frequenze di carico, la prova è stata ripetuta alla stessa temperatura in maniera continua, variando la frequenza scegliendo la progressione 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 30 Hz e poi ripetendo la prova a 0.1 Hz, come suggerito nella norma UNI EN 12697-26 [8].

La restante parte dei provini, riservata al confronto dei due macchinari, invece, è stata testata solamente alla temperatura di riferimento di 20 °C, mantenuto lo spettro di

sei frequenze adottato nelle prove sui travetti N 1-9. A differenza delle prove precedenti, si è diminuito il numero di cicli di carico a cui sono stati sottoposti i provini (100 cicli) per evitare di superare la soglia di deformazione elastica (come indicato nella norma UNI EN 12697-24 [12]), e quindi l'instaurarsi di fenomeni di fatica, che, inserendo elementi di diversità nelle condizioni del materiale stesso, avrebbero inficiato il confronto tra le due apparecchiature.

Il diagramma di Gantt alla pagina successiva, infine, schematizza il percorso temporale seguito durante i mesi dedicati alle attività di laboratorio svolte nell'ambito dello studio sperimentale oggetto della presente tesi di laurea.

Attività di laboratorio 2008	Gennaio		Febbraio				Marzo				Aprile		Maggio					
Analisi bibliografica			■	■	■	■	■	■	■				■	■	■	■	■	■
Prove preliminari su provino standard di gomma			■	■														
Prove preliminari su provini bituminosi					■	■	■	■										
Calibrazione dei campioni da testare							■											
Prove di caratterizzazione fisica a geometrica							■											
Prove su campioni N 1-9 a 20 °C								■	■									
Pausa tecnica										■	■	■	■					
Prove su campioni N 1-9 a 10 °C													■					
Prove su campioni N 1-9 a 30 °C														■				
Prove su campioni N 10-14 con le due apparecchiature															■			

*Tabella 2.2 - Diagramma di Gantt delle attività svolte. Anno 2008.*

## **2.3 LA CARATTERIZZAZIONE FISICA E GEOMETRICA DEL MATERIALE**

### **2.3.1 Determinazione della massa volumica massima**

La massa volumica massima di una miscela bituminosa è la massa per volume unitario, senza vuoti d'aria, ad una temperatura di prova nota. Le procedure per la sua determinazione sono regolate dalla norma UNI EN 12697-5 del 2002 [13].

Questa grandezza, combinata alla massa volumica apparente, consente di determinare la percentuale di vuoti di un conglomerato bituminoso compattato.

La prova si esegue su campioni di miscela compattata pulita o lavata prima di essere posta in un armadietto ventilato a  $110 \pm 5$  °C, essiccati fino a massa costante e successivamente separati. Il materiale deve essere separato in granuli e agglomerati grossolani di dimensioni non superiori a 6 mm; se la miscela non è sufficientemente morbida per essere separata manualmente, si deve riscaldare su un vassoio in stufa ad una temperatura inferiore a 110 °C, solamente fino al punto in cui può essere lavorata adeguatamente.

I procedimenti per la determinazione della massa volumica massima sono tre: volumetrico, idrostatico e matematico.

Il procedimento volumetrico si articola nelle seguenti operazioni:

- pesare il picnometro vuoto compresa la testa ( $m_1$ ) di volume noto  $V_p$ ;
- collocare il provino essiccato nel picnometro e portarlo a temperatura ambiente, quindi pesarlo nuovamente, assieme alla testa ( $m_2$ );
- riempire il picnometro con acqua privata dell'aria o solvente, fino ad un massimo di 30 mm al di sotto del giunto della testa;
- evacuare l'aria intrappolata, generando un vuoto parziale di una pressione residua di 4 kPa o minore per  $15 \pm 1$  minuti;
- fissare la testa e riempire con attenzione il picnometro con acqua privata di aria o solvente almeno fino al segno di riferimento sulla testa;
- collocare il picnometro in un bagno d'acqua alla temperatura di prova uniforme nota per almeno 30 minuti, per portare la temperatura del campione e dell'acqua all'interno del picnometro allo stesso valore di quella del bagno d'acqua;
- riempire il picnometro fino al segno di misurazione con l'acqua;

- estrarre il picnometro dal bagno d'acqua, asciugare l'esterno e pesarlo immediatamente ( $m_3$ ).

La formula per il calcolo della densità massima con il procedimento volumetrico si traduce in:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 V_p - (m_3 - m_2) / \rho_w}$$

dove  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  sono le masse misurate in g,  $V_p$  il volume noto del picnometro in  $m^3$  e  $\rho_w$  la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova in  $kg/m^3$ .

Il procedimento idrostatico, di più semplice esecuzione, si articola nelle seguenti operazioni:

- determinare la massa del contenitore vuoto nell'aria ( $m_1$ ), e quando sommerso nell'acqua ( $m_2$ );
- collocare il provino nel contenitore asciutto e portarlo a temperatura ambiente, quindi determinare la massa del contenitore più quella del provino nell'aria ( $m_3$ );
- riempire il contenitore con acqua privata di aria ed evacuare l'aria intrappolata agitandolo o facendolo vibrare;
- collocare il contenitore nel bagno d'acqua a una temperatura uniforme nota nell'intervallo da 20 °C a 30 °C per almeno 30 minuti, per portare la temperatura del campione e dell'acqua all'interno del picnometro allo stesso valore di quella del bagno d'acqua;
- determinare la massa del contenitore più quella del provino quando sospeso nell'acqua ( $m_4$ ).

La formula per il calcolo della densità massima con il procedimento idrostatico é la seguente:

$$\rho_{mh} = \frac{m_3 - m_1}{(m_3 - m_1) - (m_4 - m_2)} \rho_w$$

Infine, il procedimento matematico, che consiste nell'esprimere la composizione della miscela in percentuali della miscela totale.

La determinazione per via matematica, prevedere la conoscenza della composizione, perciò se il contenuto di legante non è noto, bisogna provvedere alla sua determinazione tramite la norma UNI EN 12697-1. Le densità invece devono essere calcolate in conformità alla EN 1097-6 per gli aggregati e alla EN ISO 3838 per i leganti.

La relativa formula è:

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

con  $p_a$  e  $p_b$  percentuali di aggregati e di legante nella miscela,  $\rho_a$  la massa volumica apparente degli aggregati e  $\rho_b$  la massa volumica del legante a 25 °C.

La massa volumica massima della miscela utilizzata per il confezionamento del materiale da cui sono stati ricavati i provini da testare in questo studio, è stata calcolata a Nottingham con il metodo idrostatico, in fase di confezionamento, ed ha un valore di 2407 kg/m<sup>3</sup>.

### **2.3.2 Determinazione della massa volumica apparente**

La massa volumica apparente è la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria, di un provino compattato in laboratorio o ricavato da carote estratte dalla pavimentazione dopo la stesa e la compattazione. Le procedure per la sua determinazione sono regolate dalla norma UNI EN 12697-6 del 2003 [14].

Le modalità secondo cui si può determinare questa grandezza sono quattro: la massa volumica apparente secca, con superficie saturata asciugata, con provino sigillato e la massa volumica apparente geometrica.

Il principio su cui si basa la sua determinazione, per le prima tre modalità di prova, consiste nel ricavare la massa del campione pesandolo secco in aria e nel determinarne il volume tramite pesata in acqua, sfruttando cioè il principio di Archimede.

La procedura geometrica è l'unica che si basa esclusivamente sulle dimensioni del provino per il calcolo del volume, e si può quindi utilizzare per i campioni con superficie regolare e una forma geometrica che consenta una facile misurazione delle dimensioni.

Le procedure in acqua invece si differenziano per le condizioni di confinamento del provino e per la durata della sua permanenza in acqua.

La massa volumica apparente secca si determina nel seguente modo:

- determinare la massa del provino secco tramite pesatura in aria ( $m_1$ );
- misurare la temperatura del bagno d'acqua
- determinare la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova tramite la Tabella 2.3;

Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m <sup>3</sup>	Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m <sup>3</sup>
10	1,002 7	999,8	20	1,001 2	998,3
11	1,002 6	999,7	21	1,001 0	998,1
12	1,002 5	999,6	22	1,000 7	997,8
13	1,002 3	999,4	23	1,000 5	997,6
14	1,002 2	999,3	24	1,000 3	997,4
15	1,002 1	999,2	25	1,000 0	997,1
16	1,001 9	999,0	26	0,999 7	996,8
17	1,001 7	998,8	27	0,999 5	996,6
18	1,001 6	998,7	28	0,999 2	996,3
19	1,001 4	998,5	29	0,998 9	996,0
20	1,001 2	998,3	30	0,998 6	995,7

*Tabella 2.3 – Valore della massa volumica dell'acqua al variare della temperatura*

- immergere il provino nel bagno d'acqua e fermare le oscillazioni della bilancia bloccando delicatamente il provino con una mano;
- leggere il valore della massa del provino subito dopo che l'acqua si è quietata dopo l'immersione ( $m_2$ ).

Questa procedura è adatta per conglomerati bituminosi molto densi, lisci, praticamente non assorbenti. È una procedura molto veloce, facile e particolarmente conveniente per la maggior parte dei provini chiusi preparati in laboratori. È quindi idonea per esempio per i conglomerati bituminosi chiodati e per l'asfalto colato.

La formula per il calcolo della massa volumica apparente secca è la seguente:

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{(m_1 - m_2)} \rho_w$$

dove  $\rho_w$  è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova.

La massa volumica apparente con superficie satura asciugata si differenzia dalla modalità secca per la permanenza del provino nel bagno d'acqua, affinché venga saturato.

Il procedimento rimane invariato fino all'immersione del provino in acqua; da questo momento, il campione deve rimanere immerso per almeno 30 minuti alla temperatura di prova.

I due passi successivi (che non si effettuano nella procedura secca) sono:

- determinare la massa del provino saturo ( $m_2$ ) mentre è ancora immerso, facendo attenzione che non vi siano bolle d'aria aderenti alla superficie o che fuoriescano dal provino durante la pesata;
- rimuovere il provino dall'acqua, asciugare velocemente le gocce sulla superficie utilizzando una pelle di camoscio umida;

- determinare la massa in aria del provino saturo, subito dopo averne asciugato la superficie ( $m_3$ ).

Questa modalità di prova è applicabile a provini bituminosi chiusi con un basso livello di assorbimento di acqua o con lento drenaggio di quella assorbita.

Si può utilizzare con materiale con curva granulometrica continua e contenuto dei vuoti inferiore al 5%, come un conglomerato bituminoso prodotto a caldo.

La formula per il calcolo della massa volumica apparente con superficie satura asciugata é la seguente:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{(m_3 - m_2)} \rho_w$$

La procedura con provino sigillato, invece, è del tutto analoga a quella con superficie secca, con la differenza che il provino va sigillato in modo che i vuoti interni del provino che fanno parte della composizione volumetrica del materiale non siano riempiti e che sia completamente impermeabile all'acqua.

Dopo la determinazione della massa del provino secco e dell'acqua alla temperatura di prova, sempre grazie alla Tabella 2.3, si procede nel seguente modo:

- sciogliere la paraffina portandola alla sua temperatura di fusione +10 °C e mantenendo tale temperatura con  $\pm 5$  °C;
- immergere il provino parzialmente nella paraffina per almeno 5 secondi, agitandolo per far uscire le bolle d'aria. Dopo il raffreddamento e la solidificazione della paraffina su questa parte del provino, ripetere la procedura sulla restante parte, fino ad ottenere una pellicola continua di paraffina che ricopra tutta la superficie del provino;
- determinare la massa del provino asciutto sigillato ( $m_2$ );
- immergere il provino nel bagno d'acqua tenuto alla temperatura di prova;
- determinare la massa del provino sigillato immerso in acqua ( $m_3$ ).

La formula per il calcolo della massa volumica apparente con provino sigillato é:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{((m_2 - m_3) / \rho_w) - ((m_2 - m_1) / \rho_{sm})}$$

dove  $\rho_{sm}$  è la massa volumica del materiale sigillante alla temperatura di prova, con approssimazione di 10 kg/m<sup>3</sup>.

Infine, se si utilizza il procedimento geometrico, basta determinare la massa del provino a secco ( $m_1$ ) e misurarne le dimensioni. La formula in questo caso ha due espressioni diverse per provini cilindrici e rettangolari.

Per i provini cilindrici sarà:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} h d^2} 10^6$$

dove h è l'altezza del provino e d il suo diametro, espressi in mm, e la massa  $m_1$  espressa in grammi.

Per i provini rettangolari sarà:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{hlw} 10^3$$

dove l è la lunghezza del provino, w la larghezza e h l'altezza, espresse in mm e la massa  $m_1$  espressa in grammi.

La massa volumica apparente del materiale a disposizione è stata calcolata tramite tre dei quattro metodi appena illustrati, cioè con provino secco, con superficie satura asciugata e tramite il metodo geometrico.

I risultati ottenuti sono riassunti nella Tabella 2.4.

	<b>bdry</b>	<b>bssd</b>	<b>b,dim</b>
<b>N2</b>	2337,3	2335,8	2316,1
<b>N3</b>	2263,4	2241,2	2202,2
<b>N4</b>	2359,7	2356,6	2339,6
<b>N5</b>	2286,8	2275,6	2252,4
<b>N6</b>	2356,6	2354,9	2329,0
<b>N7</b>	2296,4	2285,5	2263,5
<b>N8</b>	2353,3	2349,2	2327,9
<b>N9</b>	2290,8	2273,6	2252,6
<b>N10</b>	2343,4	2340,1	2322,5
<b>N11</b>	2280,8	2257,5	2240,2
<b>N12</b>	2327,0	2320,4	2293,1
<b>N13</b>	2270,3	2227,3	2183,6
<b>N14</b>	2302,4	2291,8	2271,4

*Tabella 2.4 – Valori della massa volumica apparente determinati con il metodo secco, superficie satura asciugata e geometrico*

Mettendo a rapporto i risultati ottenuti con i tre metodi si può verificare che lo scarto tra i dati, nei diversi procedimenti, non è mai superiore al 3% per tutti i campioni

e solo in un caso, il numero 13, risulta essere il 4%. Ciò significa che si possono considerare validi tutti i metodi per questo tipo di materiale.

### 2.3.3 Calcolo della percentuale dei vuoti

La determinazione della massa volumica massima e la massa volumica apparente hanno lo scopo di poter arrivare alla determinazione di un'altra caratteristica volumetrica del conglomerato bituminoso, cioè la percentuale dei vuoti d'aria.

La norma che riporta la formula per il suo calcolo è la UNI EN 12697-8 del 2003 [15].

Il contenuto di vuoti d'aria è:

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

dove  $\rho_m$  è la massa volumica massima della miscela e  $\rho_b$  è la massa volumica apparente.

I valori ottenuti utilizzando i valori di massa volumica apparente precedentemente determinati con le tre procedure si ottengono i seguenti risultati:

	% vuoti dry	% vuoti ssd	% vuoti geom
<b>N2</b>	2,9	3,0	3,8
<b>N3</b>	6,0	6,9	8,5
<b>N4</b>	2,0	2,1	2,8
<b>N5</b>	5,0	5,5	6,4
<b>N6</b>	2,1	2,2	3,2
<b>N7</b>	4,6	5,0	6,0
<b>N8</b>	2,2	2,4	3,3
<b>N9</b>	4,8	5,5	6,4
<b>N10</b>	2,6	2,8	3,5
<b>N11</b>	5,2	6,2	6,9
<b>N12</b>	3,3	3,6	4,7
<b>N13</b>	5,7	7,5	9,3
<b>N14</b>	5,7	4,8	5,6

*Tabella 2.5 – Valori della percentuale di vuoti d'aria calcolati a partire dai valori di massa volumica apparente ottenuti con i tre diversi metodi*

In questo caso si nota come i valori siano più discordanti tra le diverse procedure, ma mettendo a rapporto i risultati ottenuti con la procedura secca e superficie satura

asciugata si ottiene uno scarto massimo del 15% per tutti i provini, ad eccezione dei provini 11 e 13, che presentano valori più elevati, cioè del 18% e del 31% rispettivamente. In particolare, il provino 13 era lo stesso che presentava lo scostamento maggiore anche nel calcolo della massa volumica apparente; si può quindi pensare che la porzione di materiale dalla quale è stato tagliato quel particolare campione avesse subito localmente una minore compattazione durante la stesa.

Se invece si rapportano i valori del contenuto di vuoti d'aria ottenuti tramite il metodo geometrico con quelli ottenuti tramite il metodo con superficie secca il divario è maggiore; la media degli errori tra tutti i provini è del 36%, con una punta del 63% sempre per il provino 13.

Detto ciò, nonostante non ci fossero sostanziali differenze nei valori delle masse volumiche apparenti ottenuti con i tre metodi, una volta calcolata la percentuale dei vuoti, si può concludere che i metodi con superficie secca oppure con provino saturo si equivalgono per il materiale in esame, mentre il metodo geometrico non è idoneo alla geometria, non sufficientemente regolare, dei campioni.

### **2.3.4 Granulometria**

La granulometria di un insieme di aggregati lapidei definisce le caratteristiche di assortimento nei riguardi delle dimensioni degli aggregati di cui è costituita la parte inerte della miscela bituminosa.

I terreni sono classificati a seconda delle loro dimensioni secondo la UNI 10006 nel seguente modo:

ciottolo, pietra	> 71 mm
ghiaia, breccia, pietrisco	25 - 71 mm
ghiaietto, freccetta, pietrischetto	10 - 25 mm
ghiaino, brecciolino, graniglia	2 - 10 mm
sabbia, sabbia di frantoio	0.05 - 2 mm
limo, filler	0.005 - 0.5 mm
argilla, filler	< 0.005 mm

La distribuzione granulometrica degli aggregati si ottiene mediante setacciatura, suddividendo il materiale in diverse classi a seconda del loro diametro, come descritto nella norma UNI EN 933-1 e 2.

Il materiale viene dapprima lavato e agitato per separarne gli aggregati, poi viene tolta la parte fine con i soli setacci da 2 mm e da 63 µm lavando il materiale fine di sospensione. Il trattenuto al setaccio da 63 µm viene essiccato a 110±5 °C, se ne calcola la massa, e posto in un colonna di setacci sovrapposti con dimensione della maglia decrescente dall'alto verso il basso. Questa colonna viene agitata, in modo che, in corrispondenza di ogni setaccio, rimanga trattenuto solo il materiale con dimensione superiore al diametro della maglia.

Si determina la massa trattenuta da ogni setaccio, partendo da quello più alto, e la si esprime come percentuale della massa totale del materiale essiccato. Si procede in questo modo, determinando la percentuale cumulativa, sempre rispetto alla massa di prova, che attraversa ogni setaccio fino a quello di dimensioni di 63 µm.

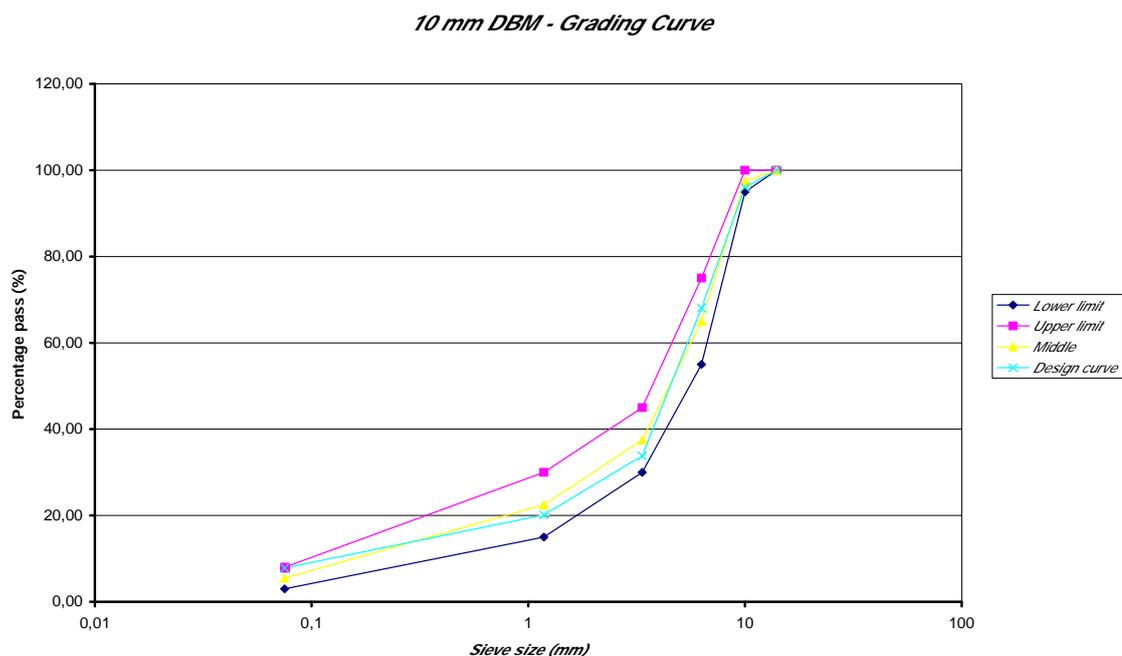
Poi si grafica, la percentuale cumulativa di passante per ciascun setaccio in funzione della dimensione della sua maglia (in scala logaritmica) e si ottiene la curva granulometrica.

Per il materiale oggetto dello studio la curva granulometrica è stata ricavata a partire dagli aggregati calcarei a disposizione delle dimensioni massime di 10 mm.

<i>Material</i>	<i>05-2429</i>	<i>05-2430</i>	<i>05-2431</i>	<i>05-1049</i>
	<i>10 mm</i>	<i>6 mm</i>	<i>Dust</i>	<i>Filler</i>
<i>Sieve Size</i>	<i>Percentage pass (%)</i>			
<i>14</i>	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>10</i>	88,43	100,00	100,00	100,00
<i>6,3</i>	17,26	88,85	100,00	100,00
<i>5</i>	7,05	59,75	99,67	100,00
<i>3,35</i>	2,34	10,05	92,42	100,00
<i>2,36</i>	1,77	7,37	79,84	100,00
<i>1,18</i>	1,51	3,90	56,26	100,00
<i>0,6</i>	1,41	3,47	40,58	100,00
<i>0,3</i>	1,33	3,29	31,29	100,00
<i>0,212</i>	1,30	3,20	27,80	100,00
<i>0,15</i>	1,23	3,08	24,44	100,00
<i>0,075</i>	1,08	2,68	18,77	100,00

*Figura 2.1 - Percentuali di passante ai diversi setacci per i materiali a disposizione*

Si sono variate le percentuali dei quattro composti di aggregati affinché la curva risultasse compresa tra le curve limiti inferiore e superiore, ottenendo il grafico in Figura 2.2.



*Figura 2.2 – Curva granulometrica degli aggregati e curve limite inferiore e superiore*

## 2.4 LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEL MATERIALE

### 2.4.1 La normativa UNI EN 12697-26

La prova di flessione su quattro punti, è una prova di laboratorio dinamica che sottopone provini prismatici a sollecitazione flessionale, allo scopo di determinare il Modulo di rigidezza di un conglomerato bituminoso, di cui si è già parlato nel Capitolo 1, cercando di riprodurre gli stati tensionali che si verificano realmente all'interno di una pavimentazione stradale.

La normativa che regola le prove per la determinazione della rigidezza dei conglomerati bituminosi è la UNI EN 12697-26 del 2004, denominata *“Miscela bituminosa - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Rigidezza”* [8]. In particolare, i principi e la modalità d'esecuzione della prova di flessione su quattro punti su provini di forma prismatica, o 4PB-PR, sono contenuti nell'annesso B.

La prova consiste nell'applicazione di un carico ciclico variabile con andamento sinusoidale, come già mostrato in Figura 1.4, a travetti prismatici, ad una fissata temperatura e frequenza di carico.

I provini sono collocati all'interno di un'apparecchiatura, di cui si parlerà nel paragrafo successivo, la quale provoca la loro ciclica flessione. Essa si realizza tramite il movimento verticale della parte centrale del provino, mentre i punti estremi rimangono nella stessa posizione.

Lo spostamento è perpendicolare all'asse longitudinale del campione e il movimento è alternato verso il basso e verso l'alto, simmetrico rispetto alla posizione iniziale, che coincide con l'asse delle ascisse nel riferimento cartesiano in cui è rappresentato il carico sinusoidale.

In

Figura 2.3 è schematizzato il movimento subito dal provino a causa del carico applicato sui due dispositivi di serraggio interni e i movimenti che questi blocchi lasciano liberi di compiere al provino, per rispettare nella maniera più fedele possibile lo schema statico visto in Figura 1.14. Il provino è quindi libero di ruotare e di traslare orizzontalmente.

I morsetti sono posizionati da una distanza gli uni dagli altri di  $L_{eff}/3$ , dove  $L_{eff}$  è la lunghezza effettiva del provino che viene realmente testato, cioè la distanza tra i due morsetti esterni.

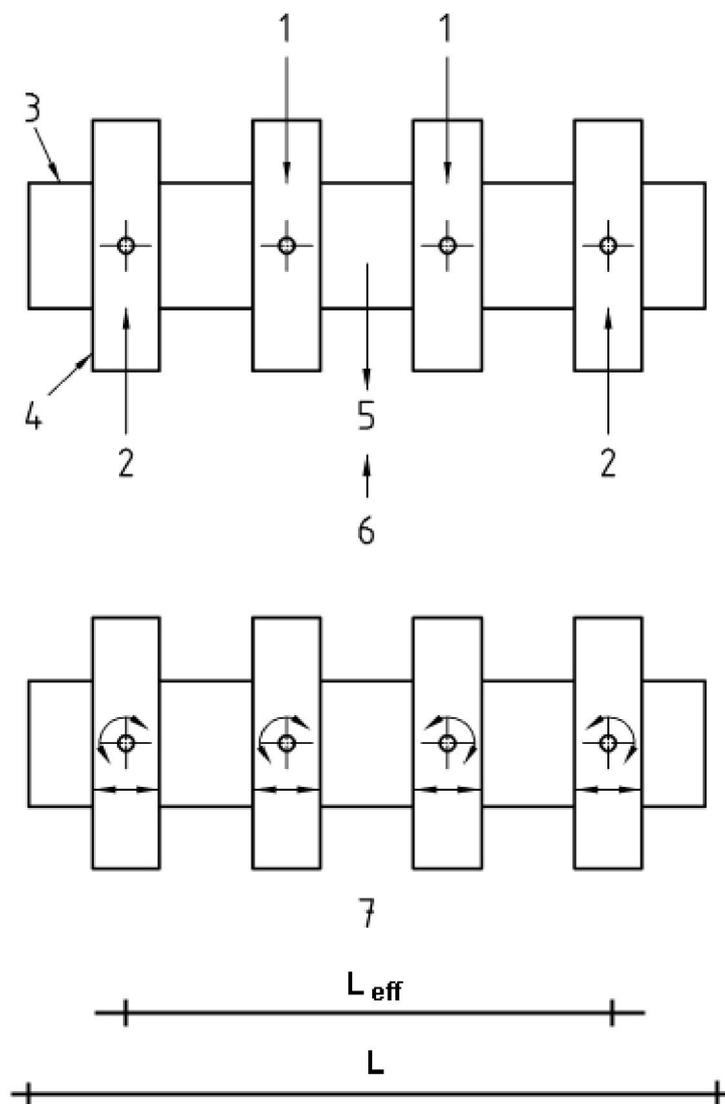
La norma descrive i limiti dimensionali che i provini prismatici devono rispettare, nello specifico:

- la lunghezza totale non deve superare la lunghezza effettiva di oltre il 10%;
- la differenza tra il valore misurato massimo e minimo della larghezza e dell'altezza non deve essere maggiore di 1 mm; la differenza tra il valore misurato massimo e minimo della lunghezza non deve essere maggiore di 2 mm;
- l'angolo tra superfici longitudinali adiacenti non deve scostarsi da un angolo retto di oltre  $1^\circ$ ;
- la lunghezza effettiva non dovrebbe essere minore di sei volte quello che è il valore massimo per la larghezza o dell'altezza;
- la larghezza e l'altezza dovrebbero essere pari ad almeno 3 volte la granulometria massima del materiale sottoposto a prova.

La normativa prescrive anche le modalità di confezionamento, taglio e conservazione dei provini nei periodi in cui non vengono testati. Essi devono essere ricavati da piastre stese in laboratorio o prelevate da strati stradali, dallo spessore maggiore di 60 mm. Da ognuna delle lastre si devono estrarre sei provini, di cui almeno quattro vanno testati, e due tenuti di riserva. Le travi devono essere segate dal centro e

la distanza minima dal bordo della slab deve essere di 20 mm. I campioni devono essere conservati su una superficie piana, per evitare di sottoporre a prova materiale già inflesso, e protetti dal sole, ad una temperatura inferiore ai 30 °C.

Infine sono prescritti i tempi minimi di acclimatazione dei provini in cella termostatica prima dell'esecuzione di una prova, a seconda della temperatura alla quale questa viene eseguita, e, per ultima, la procedura di esecuzione, che verrà descritta dettagliatamente nel sottoparagrafo 2.4.3.



- |                          |                                    |
|--------------------------|------------------------------------|
| 1. Carico applicato      | 5. Deflessione                     |
| 2. Reazione              | 6. Ritorno alla posizione iniziale |
| 3. Provino               | 7. Traslazione e rotazione libere  |
| 4. Serraggio del provino |                                    |

*Figura 2.3 - Schematizzazione del movimento del provino e dei suoi gradi di libertà nella prova APB-PR*

Si passi ora all'analisi delle formule indicate nella normativa per il calcolo del Modulo di rigidità del conglomerato bituminoso.

Le espressioni fornite per le due componenti del Modulo sono le seguenti:

$$E_1 = \gamma \left( \frac{F}{z} \cos \varphi + \frac{\mu}{10^3} \omega^2 \right) \quad (2.1)$$

$$E_2 = \gamma \left( \frac{F}{z} \operatorname{sen} \varphi \right) \quad (2.2)$$

con

= fattore di forma dipendente dalla forma e dalle misure del provino, definito come in Figura 2.4

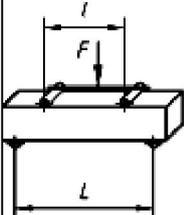
$\mu$  = fattore di massa che tiene conto degli effetti inerziali dovuti alla massa del provino e delle parti mobili

F = forza applicata al provino

z = spostamento

= 2 f, pulsazione di carico

= angolo di fase

Type of loading	Form factor, $\gamma$ $L^{-1}$	Mass factor, $\mu$
<p>4PB-PR</p> 	$\frac{L^2 A}{bh^3} \left( \frac{3}{4} - \frac{A^2}{L^2} \right)$	$R(X) \left( \frac{M}{4} + \frac{m}{R(A)} \right)$

con  $R(X) = \frac{12L}{A} \left( \frac{1}{3X/L - 3X^2/L^2 - A^2/L^2} \right)$ ,  $A = \frac{L-l}{2}$ , X = coordinata alla

quale viene misurata la deflessione, m = massa della parti mobili.

*Figura 2.4 - Fattore di forma e fattore di massa per la 4PB*

Le formule ( 2.1 ) e ( 2.2 ) derivano da una serie di calcoli svolti tradizionalmente a partire dall'equazione del moto di una trave elastica sottoposta ad una forzante sinusoidale  $q(x,t)$  esprimibile nella forma [16]:

$$q(x, t) = \sum_n q_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \operatorname{sen}(\omega t)$$

Si può dimostrare che lo spostamento conseguente all'applicazione di tale carico, sostituendo il Modulo elastico E con il Modulo di rigidezza complesso E\*, nell'espressione dello spostamento, è dato dalla seguente equazione:

$$u(x, t) = \sum_n \frac{q_n}{m(\omega_n^2 - \omega^2)} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) [\operatorname{sen}(\omega t) - \operatorname{sen}(w_n t)]$$

in cui

$$q_n = \frac{2}{L} P \left( \operatorname{sen}\frac{n\pi}{3} + \operatorname{sen}\frac{2n\pi}{3} \right)$$

P = ampiezza del carico sul singolo punto di applicazione, cioè F/2

L = lunghezza del provino

m = massa del provino per unità di lunghezza

= pulsazione del carico

$$\omega_n = \omega_n^* = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{E^* J}{m}}, \text{ pulsazione dell'n-esimo carico applicato (è un numero$$

complesso)

J = momento d'inerzia della sezione trasversale del provino

E' possibile calcolare lo spostamento massimo in mezzzeria:

$$u_{\max} = \frac{2PE^*}{EJ\pi^4} \left[ \sum_n \frac{1}{n^4 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)} \left( \operatorname{sen}\frac{n\pi}{3} + \operatorname{sen}\frac{2n\pi}{3} \right) \operatorname{sen}\frac{n\pi}{2} \right]$$

Da cui si può scrivere l'espressione dell'impedenza complessa:

$$Z^* = \frac{2P}{u_{\max}} e^{i\varphi} = \frac{E^* J\pi^4}{E \left[ \sum_n \frac{1}{n^4 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)} \left( \operatorname{sen}\frac{n\pi}{3} + \operatorname{sen}\frac{2n\pi}{3} \right) \operatorname{sen}\frac{n\pi}{2} \right]} e^{i\varphi}$$

Se si considera soltanto il primo termine della sommatoria in Z\* e si esplica il Modulo complesso

$$E^* = E_1 + iE_2 = E_1 + i E_1 \tan \delta$$

con  $\delta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{E_2}{E_1}$

si ottiene

$$(Z^*)_{n=1} = \frac{\frac{\pi^4 E_1 J}{\bar{L}} + iE_1 \frac{\pi^4 J}{\bar{L}} \theta - \omega^2 Lm}{\left( \operatorname{sen} \frac{\pi}{3} + \operatorname{sen} \frac{2\pi}{3} \right)} = \frac{\pi^4 E_1 J}{\sqrt{3} \bar{L}} + iE_1 \frac{\pi^4 J \theta}{\sqrt{3} \bar{L}} - \frac{\omega^2 Lm}{\sqrt{3}}$$

che può essere scritto nella forma

$$(Z^*)_{n=1} = \frac{2P}{u_{\max}} e^{i\varphi} = \frac{2P}{u_{\max}} (\cos \varphi + i \operatorname{sen} \varphi)$$

Per ottenere l'espressione in forma chiusa di  $E_1$ , si eguagliano le parti reali nelle due formule di  $(Z^*)_{n=1}$ :

$$\frac{\pi^4 E_1 J}{\sqrt{3} \bar{L}} - \frac{\omega^2 Lm}{\sqrt{3}} = \frac{2P}{u_{\max}} \cos \varphi$$

da cui

$$E_1 = \left( \frac{2P}{u_{\max}} \cos \varphi + \frac{M}{\sqrt{3}} \omega^2 \right) \frac{\sqrt{3} \bar{L}^3}{\pi^4 J} \quad (2.3)$$

avendo posto  $M = mL$ .

Si ottiene quindi anche l'espressione di  $E_2$ :

$$E_2 = E_1 \theta = E_1 \tan \varphi = \left( \frac{2P}{u_{\max}} \cos \varphi + \frac{M}{\sqrt{3}} \omega^2 \right) \frac{\sqrt{3} \bar{L}^3}{\pi^4 J} \tan \varphi \quad (2.4)$$

(2.5)

Le relazioni ( 2.3 ) e ( 2.4 ) sono equivalenti alle espressioni di  $E_1$  ed  $E_2$  fornite dalla normativa, cioè ( 2.1 ) e ( 2.2 ), a meno del termine inerziale nell'espressione di  $E_2$ , che potrebbe essere stato omissso a causa della forte influenza che su tale termine ha l'angolo di fase (che compare sottoforma di tangente), il quale è caratterizzato da un'elevata dispersione e di conseguenza, anche una piccola variazione nel valore dell'angolo, porterebbe all'amplificarsi dello scarto tra i valori di  $E_2$  per la presenza della funzione tangente.

Sottolineata questa differenza, le formule della normativa e quelle appena ricavate sono del tutto equivalenti, effettuando le seguenti sostituzioni:

$$F = 2P$$

$$D = u$$

$$\lambda = \frac{\bar{L} A}{bh^3} \left( \frac{3}{4} - \frac{A^2}{\bar{L}^2} \right) \approx \frac{\sqrt{3} \bar{L}^3}{\pi^4 J}, \text{ fattore di forma (con } A=L/3)$$

$$\mu = R(x) \left( \frac{M}{\pi^4} + \frac{m}{RA} \right) \approx \frac{M}{\sqrt{3}}, \text{ fattore di massa (con } R(x) = R \left( \frac{L}{2} \right) = \frac{36^2}{23} \text{ ed } m = 0,$$

in quanto il carico viene calcolato da una cella dinamometrica posizionata in modo tale da tenere già conto di tali forze d'inerzia).

Allo stesso modo, le formule ottenute attraverso questi calcoli, che si equivalgono a quelle fornite dalla normativa, possono essere confrontate anche con la formula dello spostamento massimo ricavata nel Capitolo 1 durante il calcolo dell'equazione della linea elastica.

Infatti,  $u_{\max} = \frac{Fa}{24EJ} (3l^2 - 4a^2)$ , si può riscrivere esplicitando l'espressione di  $J = bh^3/12$ , e ponendo  $a = L/3$ .

Il termine che moltiplica  $\frac{FL^3}{Ebh^3}$  risulterà pari a  $\frac{23}{648}$ . Lo stesso coefficiente si ottiene dall'espressione di  $\lambda = \frac{L}{bh^3} A \left( \frac{3}{4} - \frac{A^2}{L^2} \right)$ , con  $A = L/3$  ed  $F = 2P$ .

Le funzioni seno e coseno derivano dalla sostituzione di  $E$  con  $E^*$  all'interno della formula dello spostamento massimo.

L'unica differenza che intercorre tra le formule della normativa e quella derivante dalla linea elastica è il contributo inerziale  $\frac{\mu}{10^3} \omega^2$ , che uno schema di carico puramente statico non considera.

### 2.4.2 Descrizione dell'apparecchiatura e del software

L'apparecchiatura per l'esecuzione della prova di flessione su quattro punti consta di quattro elementi fondamentali: il sistema di applicazione del carico, il telaio in cui è alloggiato il provino, la camera termostatica, la stazione elettronica per la registrazione dei dati.

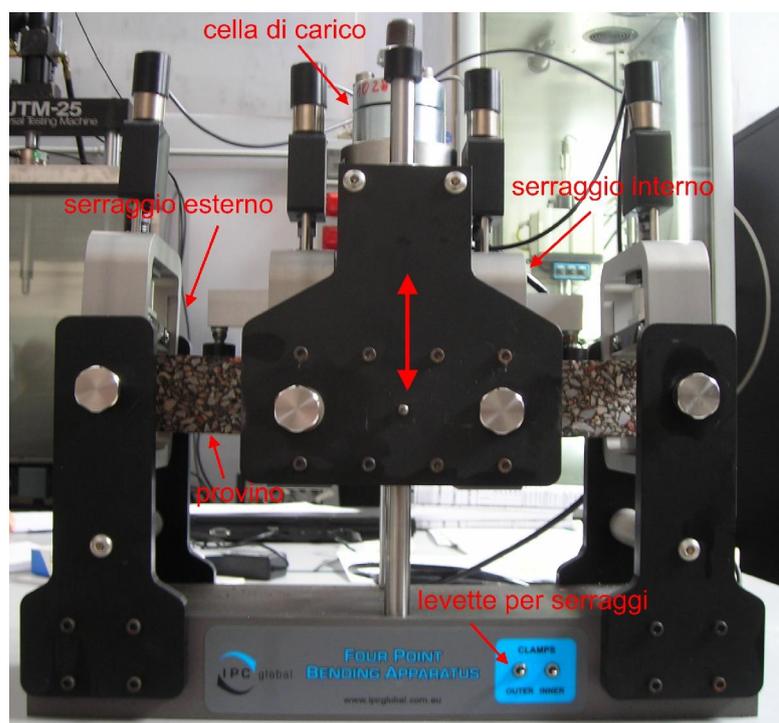
Il sistema di applicazione del carico, UTM 25 (Universal Testing Machine), caratterizzato da carico massimo applicabile di 25 kN, è costituito da uno stelo svitabile che applica il carico al telaio in cui è alloggiato il provino, ed è alimentato da un motore idraulico ad olio in pressione. Esso si collega superiormente all'asse dell'applicatore di carico (si veda Figura 2.5) e inferiormente alla cella di carico fissata al telaio della 4PB.



*Figura 2.5 - Sistema di applicazione del carico UTM 25*

Il carico applicato con il sistema UTM 25 può avere una frequenza compresa tra 0 e 60 Hz.

Il telaio è la parte più complessa dell'intero apparato di prova, si veda Figura 2.6. Esso, come anticipato nel paragrafo precedente, ospita il provino prismatico e, grazie alla particolare configurazione geometrica e meccanica, consente la riproduzione dello schema statico della trave doppiamente appoggiata caricata simmetricamente da due forze.

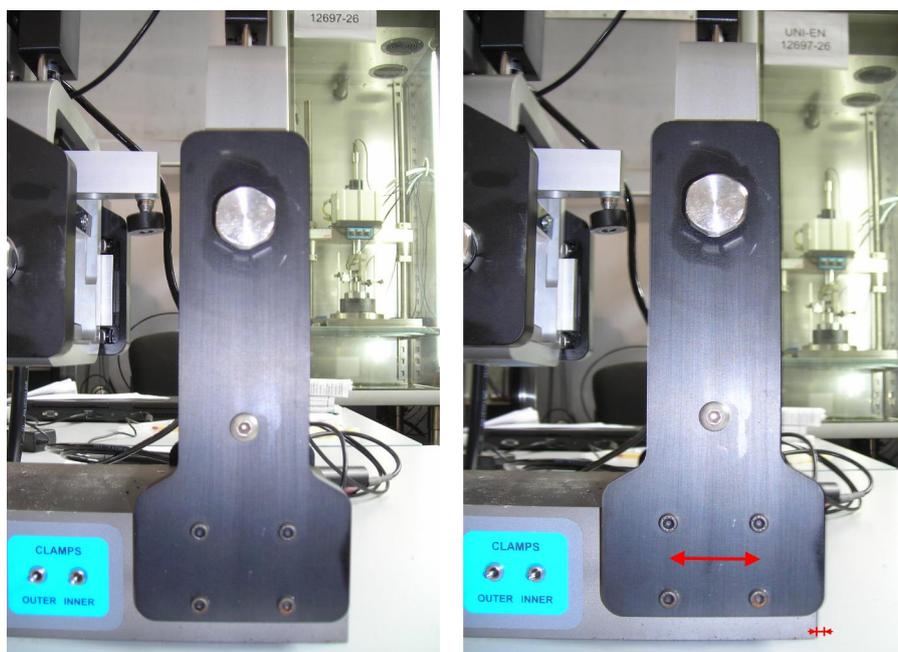


*Figura 2.6 - Telaio per la prova di flessione su quattro punti*

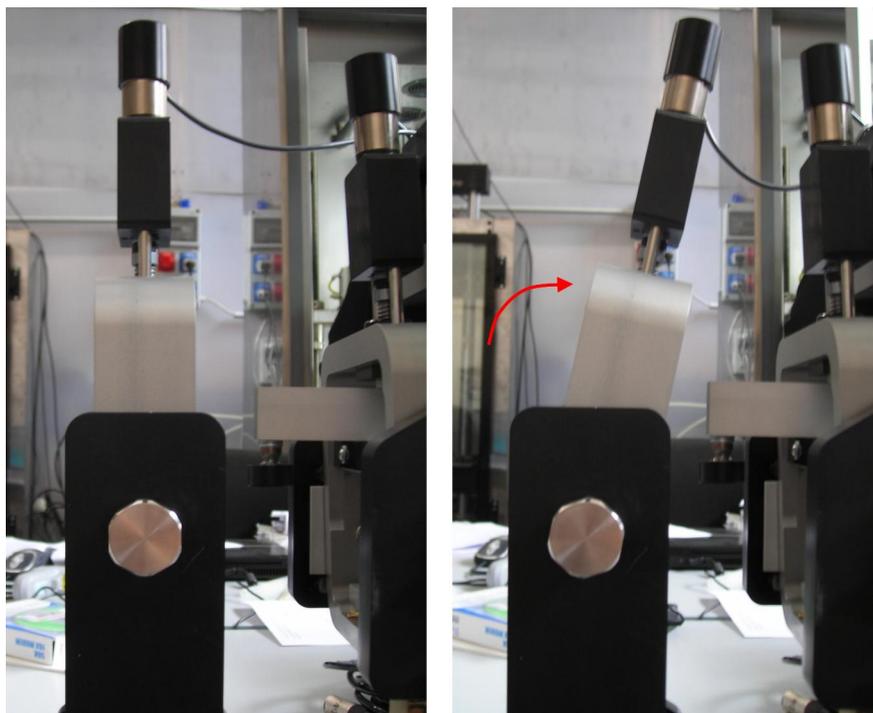
I quattro punti di appoggio sono realizzati da quattro dispositivi di serraggio in acciaio che mantengono il provino in posizione durante la prova. Sono divisi in serraggi esterni e serraggi interni; i primi rimangono sempre all'altezza fissata alla geometria del macchinario e giocano il ruolo di doppio appoggio della trave, mentre quelli interni si muovono verticalmente e ciclicamente durante l'applicazione del carico, simmetricamente rispetto alla posizione di inizio della prova, come è l'andamento sinusoidale rispetto all'asse delle ascisse.

I due montanti interni sono solidali tra loro alle traslazioni e sono i responsabili della flessione del provino grazie al loro movimento verticale, in quanto collegati allo stelo del sistema di applicazione del carico; costituiscono, cioè, i due punti di applicazione della forzante.

I montanti esterni invece non si muovono verticalmente ma possono traslare orizzontalmente di qualche millimetro (si veda Figura 2.7), garantendo uno dei due gradi di libertà del provino illustrato in Figura 2.3, la traslazione appunto. La rotazione del provino in corrispondenza di tutti e quattro i dispositivi di serraggio, invece, è lasciata libera grazie alla possibilità che questi hanno di ruotare attorno ad un asse orizzontale e trasversale rispetto a quello del provino (si veda Figura 2.8).

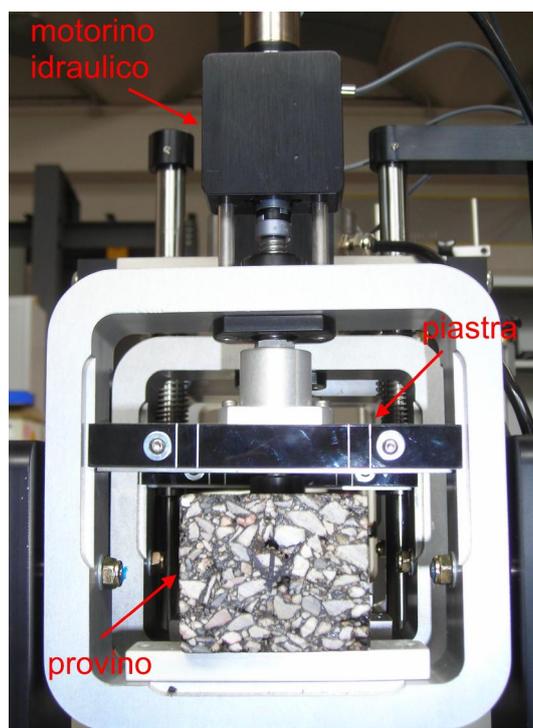


*Figura 2.7 - Movimento del dispositivo di serraggio che garantisce la libera traslazione del provino in corrispondenza degli appoggi esterni*



*Figura 2.8 - Movimento del dispositivo di serraggio che garantisce la libera rotazione del provino in corrispondenza degli appoggi*

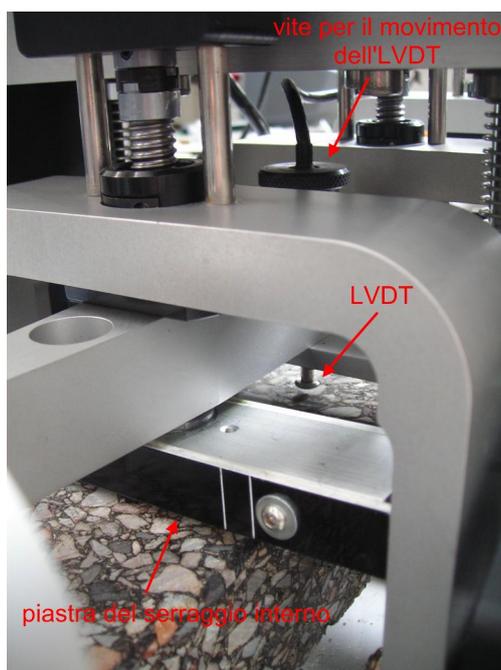
Il serraggio del provino avviene tramite quattro piccoli motorini idraulici, che fanno abbassare una piastra che premerà verticalmente sul campione, tramite le due levette che si trovano sul lato frontale della parte fissa del telaio, e che continuano ad imprimere la loro compressione durante tutto il corso della prova. Il particolare è illustrato in Figura 2.9.



*Figura 2.9 - Particolare del dispositivo di serraggio del provino*

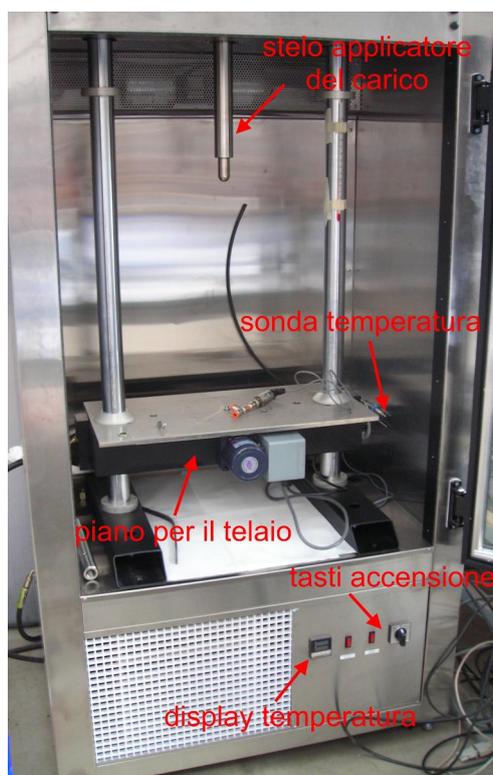
Gli spostamenti del provino sono misurati tramite un trasduttore LVDT (Linear Variable Differential Transformer) posizionato al centro del telaio, a contatto con la superficie superiore del provino, si veda Figura 2.10.

Esso calcola gli spostamenti totali del campione in relazione allo spostamento che si verifica alla distanza di  $L_{eff}/6$  dai dispositivi di serraggi esterni (noto il rapporto tra lo spostamento in questo punto e quello in mezzzeria, cioè  $1/2$ ) tramite un “ponte” metallico che aderisce al provino con l’ausilio di due appoggi di gomma montati su una molla (si veda anche Figura 2.26).



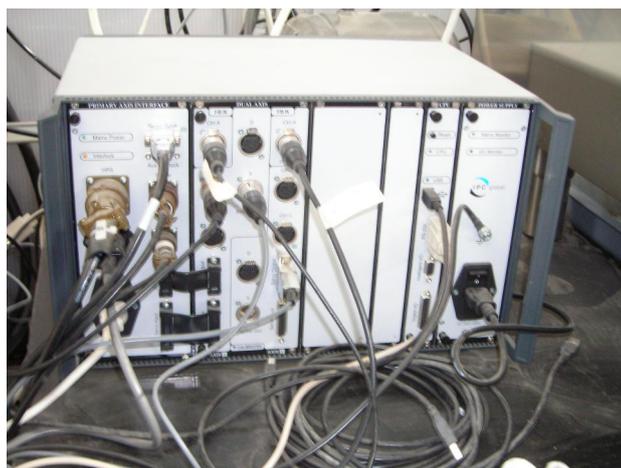
*Figura 2.10 – Posizione dell' LVDT nel punto centrale della superficie superiore del provino*

Il telaio è collocato all'interno di una camera termostatica ventilata (si veda Figura 2.11) che garantisce il mantenimento della temperatura scelta, compresa tra -15 e +60 °C, durante tutto il tempo di prova. Tale temperatura viene mantenuta costante tramite l'azione combinata di serpentine, poste dietro un pannello metallico sul lato frontale posteriore della camera, che scaldano l'aria, e di un compressore, alloggiato sul fondo della cella, che la raffredda tramite un ciclo frigorifero. La misura della temperatura dell'aria è affidata ad una sonda fissata internamente sul fianco destro della camera. Essa viene visualizzata in un piccolo display sul lato frontale dell'apparecchio, da cui si agisce per impostare la temperatura desiderata.



*Figura 2.11 - Cella temostatica*

La stazione elettronica per la registrazione dei dati (si veda Figura 2.12) è collegata elettricamente al dispositivo di applicazione del carico, ai motorini che tengono bloccato il provino in corrispondenza dei quattro serraggi e al computer con il software che gestisce la prova, tramite porta USB. Essa ha il compito di mettere in comunicazione la componente software con la componente hardware. Riceve, cioè, gli input provenienti dal software che stabilisce l'intensità del carico da applicare in base all'ampiezza dello spostamento che si vuole raggiungere, o viceversa, l'ampiezza dello spostamento da ottenere in base al carico che si vuole applicare, a seconda della modalità di prova che si sceglie di eseguire, di cui si parlerà nel prossimo sottoparagrafo.



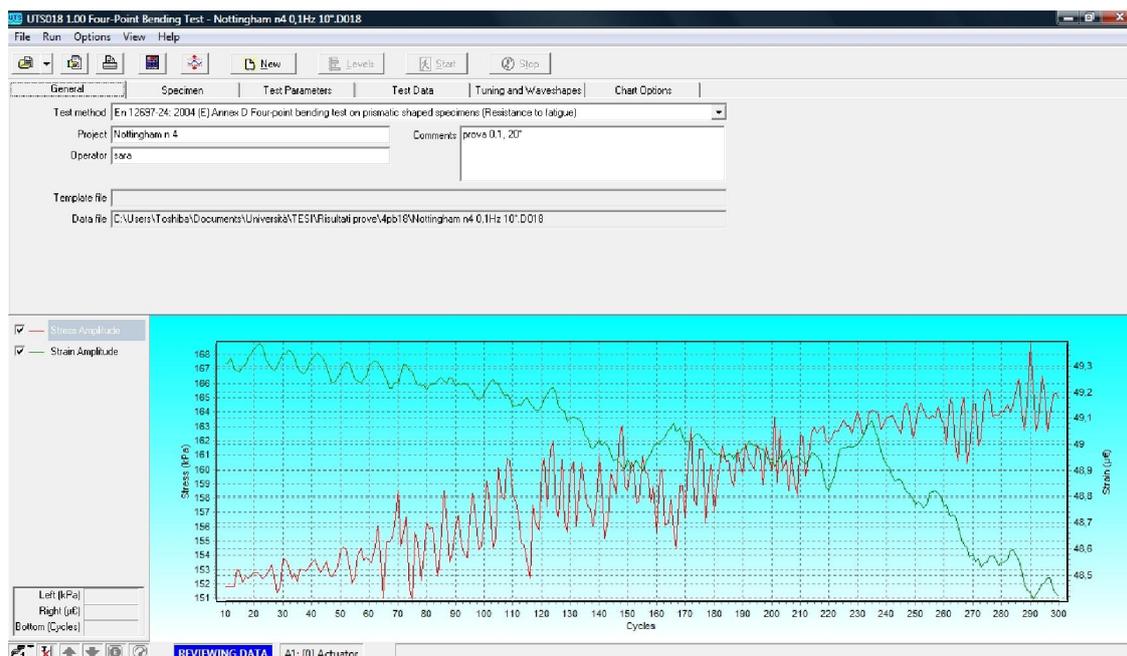
*Figura 2.12 - Stazione elettronica per l'acquisizione dei dati*

Ad essa è affidato anche il compito di registrare tutti i dati della prova durante la sua esecuzione: Modulo di rigidità, angolo di fase, valore della forza, spostamento, deformazione, tensione, energia dissipata.

Il software che gestisce i dati di input e output per la prova 4PB è lo Universal Testing System 18.

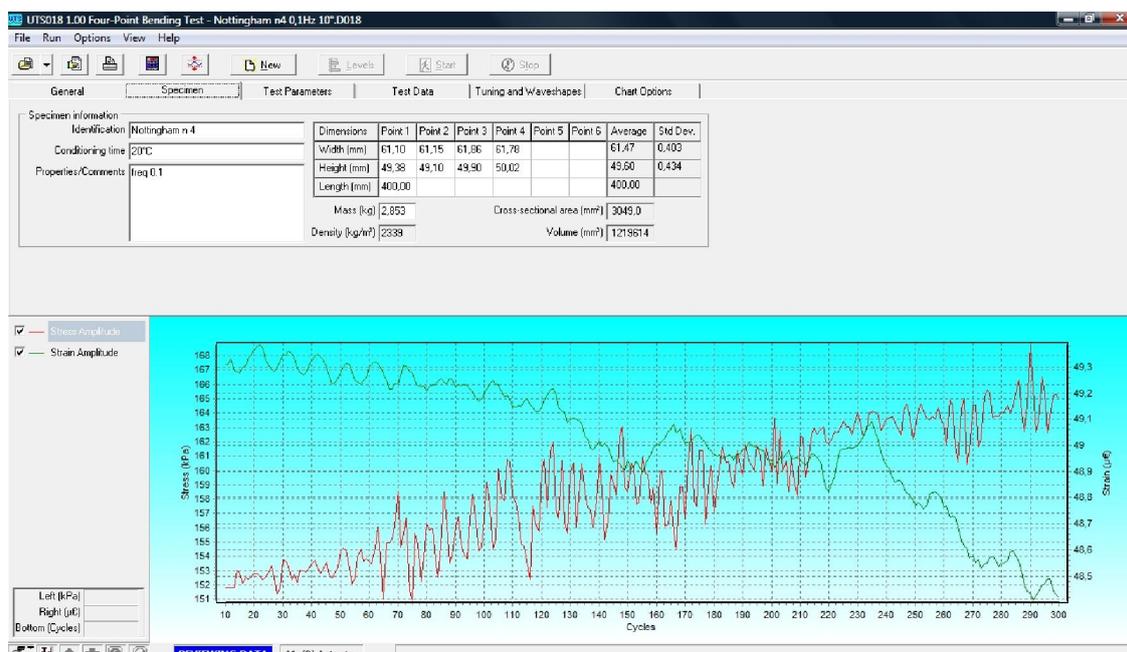
E' costituito da diverse finestre, in alcune di queste vanno inserite le informazioni riguardanti i parametri di prova, in altre invece sono visualizzati i risultati ottenuti durante il suo corso.

Nella pagina General (si veda Figura 2.13) va indicata la normativa alla quale si vuole fare riferimento, UNI EN 12697-24 o 26, che differiscono per la sola opzione, presente nella parte 24, di eseguire una prova preliminare su uno spettro di frequenze, prima di procedere alla prova di fatica. Qui si inseriscono il nome del progetto, che diventerà quello del file dei dati che verranno salvati, ed eventuali commenti dell'operatore, come ad esempio la temperatura alla quale viene eseguita la prova, la frequenza di carico.



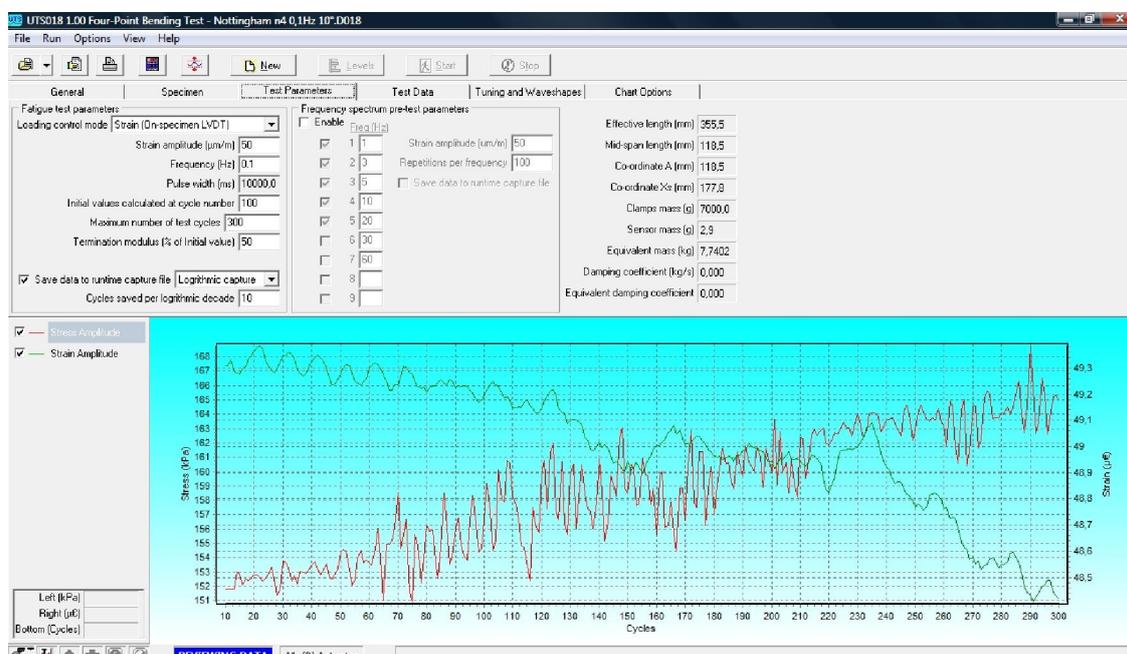
*Figura 2.13 – Finestra General del software UTS 18*

Nella pagina Specimen (Figura 2.14) vengono inserite le informazioni riguardanti il provino: il codice identificativo, il tempo di condizionamento, e le misurazioni delle dimensioni e della massa preventivamente eseguite.



*Figura 2.14 – Finestra Specimen del software UTS 18*

All'interno della pagina Test Parameters (Figura 2.15) vengono indicati i parametri di prova scelti: la modalità di controllo del carico, il valore della deformazione o della sollecitazione fissate che si vogliono raggiungere ad ogni ciclo di carico durante la prova, la frequenza di carico, il numero di cicli a cui sottoporre il provino e la % del valore del Modulo complesso rispetto a quello iniziale (tipicamente quello del 100esimo ciclo), a cui decade, raggiunto il quale, si vuole interrompere la prova.



*Figura 2.15 – Finestra Test Parameters del software UTS 18*

E' possibile eseguire le prove sottoponendo i campioni a cicli di carico sinusoidali dall'intensità tale da provocare, in corrispondenza del valore massimo, il verificarsi di un determinato valore della sollecitazione oppure della deformazione (si ricorda la Figura 1.6). Per questo motivo, le modalità di controllo di carico sono due: controllo di deformazione o controllo di sollecitazione.

La prima consiste nell'impostare un valore di deformazione a cui il provino verrà ciclicamente portato. Per deformazione si intende l'allungamento delle fibre superiori e inferiori del campione come rappresentato in Figura 1.20. Questo parametro è espresso in microstrain, cioè  $\mu\text{m}/\text{m}$ , che è il rapporto tra la deformazione, nell'ordine di  $10^{-6}$  m per m di sezione trasversale del provino. Va indicato il valore desiderato della deformazione da raggiungere a seguito dell'applicazione del singolo picco di carico. Se si vuole, quindi, che la deformazione totale del provino, considerando che avviene per metà sulla faccia superiore e per metà sulla faccia inferiore, abbia un valore di  $100 \mu$ , per esempio, bisogna inserire il valore 50 nell'apposita casella. Proprio perché il software considera la deformazione con andamento sinusoidale, che si ripete simmetricamente verso l'alto e verso il basso, misurandola dal picco massimo al picco minimo. Il valore che si inserisce nel software è quindi la metà della deformazione totale subita dal campione.

Nel caso di modalità di controllo della deformazione, il carico applicato varierà durante la prova regolandosi in base alle deformazioni subite dal provino. Il software, cioè, controlla il valore del carico nel tempo e fa in modo che la forza applicata al provino sia quella necessaria per provocare la deformazione massima desiderata ed impostata ad inizio prova.

Con la modalità di controllo di sollecitazione invece, viene prefissato un valore di sollecitazione massima raggiunta all'interno del provino che sarà provocato da un carico massimo che rimarrà costante durante tutta la prova. In questo caso, sono quindi le deformazioni a subire variazioni. Il valore è espresso in kPa.

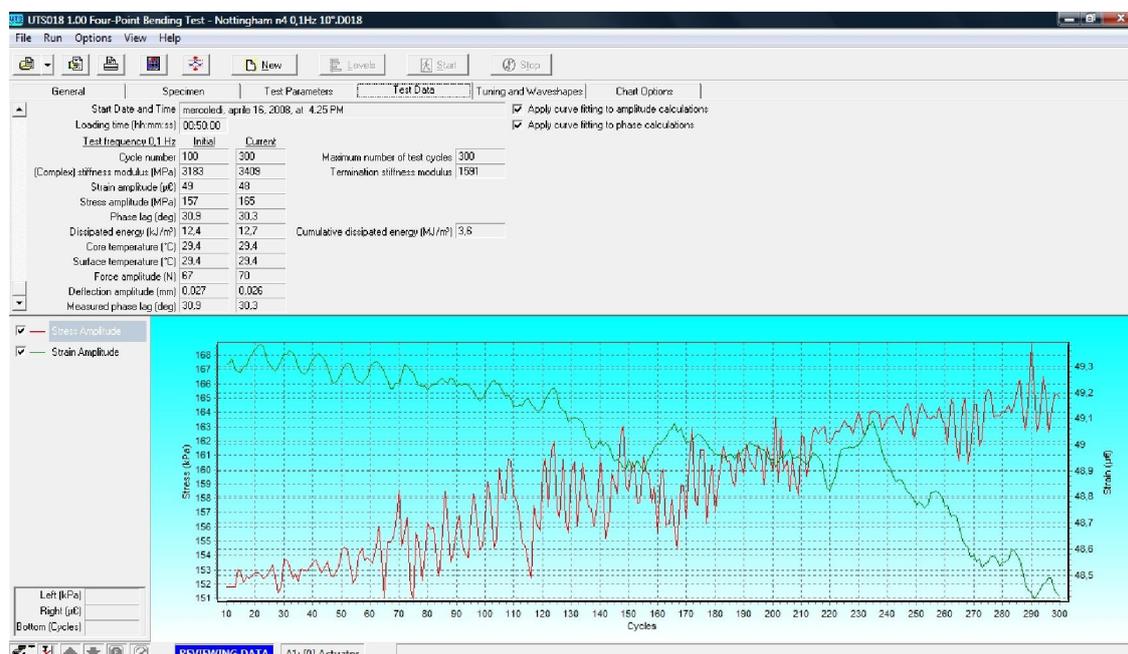
Se non ci si limita ad indagare la rigidità del materiale ma si eseguono delle prove di fatica, per le quali viene superata la soglia elastica e quindi accumulate delle deformazioni plastiche irreversibili, mano a mano che il provino si affatica sotto l'azione del carico costante, il materiale subirà deformazioni sempre maggiori. Per questo motivo, a parità di frequenza e di temperatura, la prova in condizioni di controllo di carico risulterà più breve rispetto a quella in controllo di deformazione, a causa

dell'accumularsi di fatica nel provino. Questa differenza invece non è apprezzabile per le brevi prove di rigidezza, che vengono interrotte dopo un numero esiguo di cicli.

Rimanendo nella pagina Test Parameters, se si decide di eseguire la prova preliminare sullo spettro di frequenze disponibile con la UNI EN 12697-24, vanno indicate le frequenze scelte e il numero di cicli per ognuna di esse.

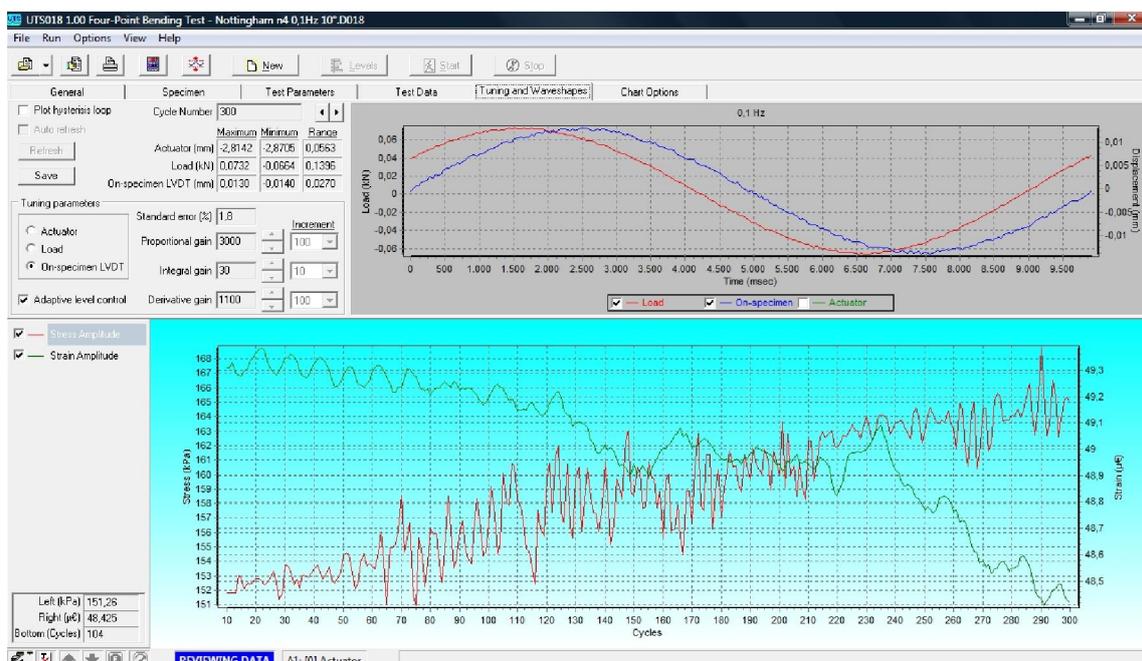
Le restanti tre finestre, sono quelle che illustrano i dati che vengono registrati durante la prova.

In Test Data (Figura 2.16) compariranno: il ciclo corrente, il valore del Modulo di rigidezza, i valori reali dello stress e della deformazioni applicati, l'angolo di fase, l'energia dissipata, la forza applicata, lo spostamento misurato dall'LVDT. Nella parte inferiore della pagina sono graficati gli andamenti delle grandezze selezionate nella finestra Chart Options, al trascorrere dei cicli. Per esempio si può decidere di visualizzare i valori del Modulo e della deformazione, oppure del Modulo e della sollecitazione, ecc.



*Figura 2.16 – Finestra Test Data del software UTS 18*

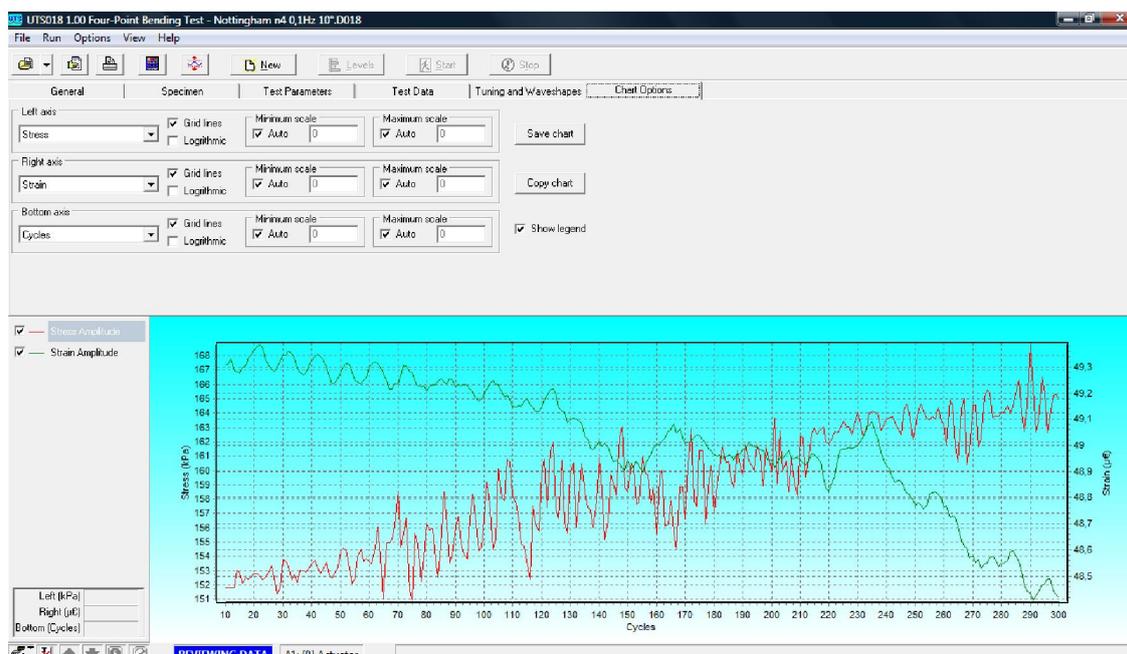
La finestra Tuning and Waveshapes è divisa in due parti, si veda Figura 2.17.



*Figura 2.17 – Finestra Tuning and Waveshapes del software UTS 18*

Nella parte inferiore è riportato lo stesso grafico che si trova anche in Test Data, mentre in quella superiore è possibile visualizzare anche l'andamento del carico e dello spostamento in tempo reale, per osservare quanto precisamente questi approssimino delle sinusoidali. Se queste curve presentano troppo "rumore", cioè picchi relativi sulla sinusoide troppo grandi, che creano determinano una curva che si scosta troppo da un andamento sinusoidale perfetto, si può agire sui Tuning Parameters che si trovano a fianco. Questi sono il Proportional Gain, l'Integral Gain e il Derivative Gain (abbreviati in PID) per fare in modo che le due curve si avvicinino maggiormente ad una sinusoide. I PID sono dei fattori correttivi che hanno lo scopo di ridurre l'errore tra i valori di carico e di spostamento misurati e quelli teorici, appartenenti alle sinusoidi ideali. Il Proportional Gain determina una reazione correttiva sull'errore del dato di output corrente, moltiplicandolo per una costante; l'Integral Gain apporta la sua correzione sulla somma degli errori recenti, integrando questo valore nel tempo di durata e moltiplicandola per una costante, fornendo così la correzione cumulativa; il Derivative Gain provoca una reazione in base al tasso secondo il quale l'errore sta cambiando, tramite la derivata dell'errore nel tempo, moltiplicato per una costante.

Nell'ultima scheda, Chart Options, si scelgono quali grandezze visualizzare nei grafici che appaiono nelle altre finestre, si veda Figura 2.18. All'interno dei menù a tendina si attribuiscono all'asse destro e sinistro due delle parametri elencati in Test Data, per esempio angolo di fase, Modulo, forza applicata, deformazione ecc.



*Figura 2.18 – Finestra Chart Options del software UTS 18*

Quando si eseguono più prove sullo stesso provino è possibile salvarne il template dal menù File. Il template è un file che contiene tutte le informazioni inserite prima e durante una prova (le dimensioni del provino, i parametri di test impostati, le grandezze graficate), a meno dei dati ottenuti nel suo corso, che invece si salvano nei file Data. In questo modo che non sarà necessario inserire le stesse informazioni ogni volta, ma basterà semplicemente richiamarlo e cambiare solamente i parametri di prova, per esempio la frequenza o il valore della deformazione (o dello stress) che si vogliono raggiungere.

I tasti posizionati al di sopra delle finestre appena descritte sono: Open Data/Template, Preview Report, Print Report, Virtual Pendant, Machine limits, Levels, New, Start, Stop. Si veda Figura 2.19.

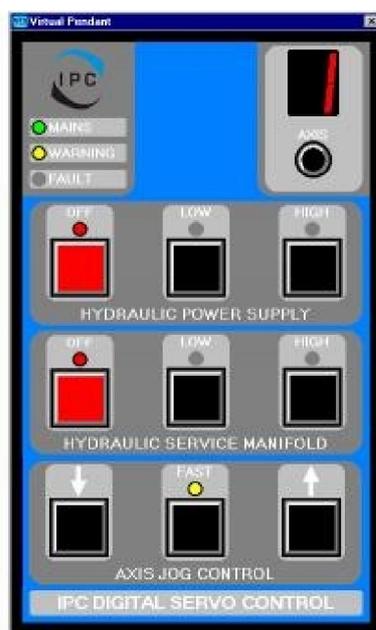


*Figura 2.19 – Tasti all'interno del software UTS 18*

Open Data/Template serve ad aprire un template o un file data già salvati oppure a richiamarli dalla history tramite la freccia sulla destra del tasto stesso. Queste due opzioni sono accessibili anche dal menù File, posizionato al di sopra dei tasti,

Preview Report apre un'anteprima del report della prova, un foglio che contiene: il grafico che si è creato durante il corso della prova al passare dei cicli, lo stesso che si visualizza nella parte inferiore di tutte le pagine del software; i parametri contenuti nella finestra Test Data. Print Report serve chiaramente a stampare tale foglio.

Il Virtual Pendant serve ad avviare il motore ad olio che eserciterà la pressione necessaria per l'applicazione dei carichi (le prime due righe) e per muovere verticalmente il montante che ospita i dispositivi di serraggio interni, chiamato con l'etichetta Asse 1, in alto a destra, si veda Figura 2.20.



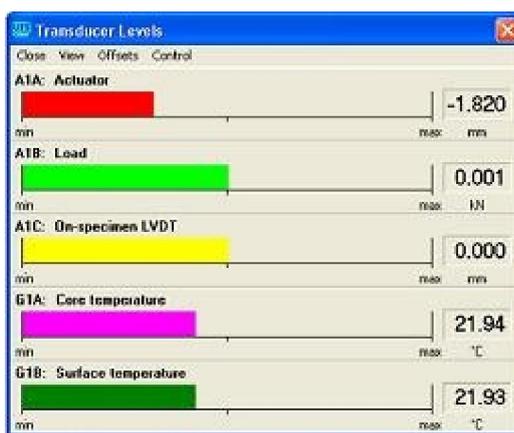
*Figura 2.20 - Virtual Pendant*

Per fare in modo che il provino sia perfettamente poggiante su tutti e quattro i dispositivi di bloccaggio bisogna alzare o abbassare il montante interno prima di iniziare una prova. I tasti per i movimenti sono quelli in basso dove si legge Axis Jog Control; il tasto fast, se attivavo, velocizza gli spostamenti, ma si consiglia di premerlo soltanto se si devono compiere movimenti apprezzabili ad occhio nudo e di non utilizzarlo durante il settaggio della corretta posizione dei dispositivi di serraggio ad inizio prova, per ottenere la massima precisione. Oltre al montante interno, dal Virtual Pendant è possibile spostare verticalmente anche il piano su cui è collocato l'intero telaio, basta cambiare l'etichetta dell'asse, impostandola su C. Questa operazione in genere serve in fase di montaggio o smontaggio del telaio per la prova a flessione. Il macchinario UTM 25, infatti, può essere utilizzato anche per eseguire prove differenti, come prove di trazione indiretta o di creep, semplicemente sostituendo il telaio con quello necessario. In fase di collocamento del telaio, a causa delle loro diverse

geometrie, è necessario disporre di spazio per smontare lo stelo che trasferisce il carico e per posizionarlo alla giusta altezza.

Machine Limits visualizza un menù in cui è possibile inserire dei valori limite per qualsiasi asse, per esempio per limitare il valore del carico applicato o dello spostamento dell'LVDT o dell'attuatore. Se però i limiti sull'LVDT o sull'attuatore sono attivati e vengono raggiunti durante la prova, il software la interromperà automaticamente.

Il tasto Levels (Figura 2.21) apre una finestra dove sono indicati i livelli di ogni trasduttore del sistema.



*Figura 2.21 – Finestra Transducer Levels del software UTS 18*

A1A Actuator indica la posizione del montante dei serraggi interni, A1B Load è il valore del carico applicato in quel preciso istante, A1C On Specimen LVDT è il valore letto dall'LVDT posizionato sul provino. Quest'ultimo livello serve a fare in modo da appoggiare perfettamente il traduttore degli spostamenti sulla superficie del provino all'inizio della prova, si controllerà quindi il corrispondente livello fino a leggere esattamente il valore 0.000 mentre, come verrà spiegato nel prossimo sottoparagrafo.

I tasti New, Start e Stop servono rispettivamente ad aprire un file per eseguire una nuova prova, per farla partire dopo aver settato tutti i parametri e per fermarla eventualmente prima della sua fine.

Dal punto di vista computazionale, la formula per il calcolo del Modulo di rigidità implementata nel software è la seguente:

$$S_{mix} = \frac{12 FL^3}{Z(x_s) R(x_s) BH^3} \sqrt{1 + 2[\cos(\varphi(x_s))\mathcal{I}(x_s) - \sin(\varphi(x_s))\mathcal{J}(x_s)] + [\mathcal{I}^2(x_s) + \mathcal{J}^2(x_s)]}$$

con

$F$  = ampiezza della forza totale nei due morsetti interni [N]

$L$  = distanza tra i due morsetti esterni, cioè  $L_{\text{eff}}$  [mm]

$x_s$  = coordinata  $x$  in corrispondenza della quale è misurata la flessione [mm] ( $A < x_s < L / 2$ ), con  $A$  = distanza tra due morsetti successivi

$Z(x_s)$  = ampiezza della flessione della trave durante un solo ciclo, misurata tra i due morsetti interni a una distanza  $x_s$  dal morsetto esterno sinistro

$R(x_s)$  = funzione di ponderazione. Funzione adimensionale dipendente dalla distanza  $x$  dal morsetto esterno sinistro, dalla coordinata  $A$  del morsetto interno sinistro e dalla lunghezza effettiva  $L$  tra i due morsetti esterni:

$$R(x) = \frac{12L^3}{A(3Lx - 3x^2 - A^2)}$$

$B$  = larghezza del provino [mm]

$H$  = altezza del provino [mm]

$\phi(x_s)$  = ritardo di fase misurato in gradi durante un ciclo tra il carico sinusoidale applicato e la flessione misurata  $Z(x_s)$

$I(x_s)$  = funzione d'inerzia. Funzione adimensionale dipendente dalla distanza  $x_s$  per tenere conto degli effetti inerziali della massa:

$$I(x_s) = M_{eq} \frac{Z(x_s)}{F} \omega^2 10^{-3}$$

$M_{eq}$  = massa equivalente. Massa ponderata in kg delle parti mobili: trave, sensore e morsetti, il cui valore dipende dal luogo di misurazione della flessione  $Z(x_s)$ :

$$M_{eq} = \frac{R(x_s)}{\pi^4} M_{trave} + \frac{R(x_s)}{R(A)} M_{morsetto} + M_{sensore}$$

= frequenza circolare del carico sinusoidale applicato [rad/s], con  $f$  frequenza in Hz:

$$\omega = 2\pi f$$

$J(x_s)$  = funzione di smorzamento. Funzione adimensionale dipendente dalla distanza  $x_s$  per tenere conto degli effetti (non viscosi) dello smorzamento nel sistema (perdite di sistema):

$$J(x_s) = T_{eq} \frac{Z(x_s)}{F} \omega^2 10^{-3}$$

$T_{eq}$  = coefficiente di smorzamento equivalente. Coefficiente ponderato di smorzamento nel sistema in kg/s, il cui valore dipende dal luogo di misurazione della flessione  $Z(x_s)$ :

$$T_{eq} = \frac{R(X_s)}{R(A)} T, \text{ con } T = \text{coefficiente di smorzamento: coefficiente necessario}$$

per calcolare le perdite di sistema in kg/s.

### **2.4.3 Procedura di esecuzione della prova**

Prima di procedere a qualsiasi operazione è necessario mantenere il provino da testare all'interno di una cella termostatica alla temperatura di prova per un tempo non inferiore a quello prescritto dalla normativa, la quale indica un tempo di 2 ore per una prova a 0 °C e di almeno 1 ora per una prova a 20 °C. Per le prove eseguite per questo studio, vista la possibilità di tenere i provini all'interno di una seconda cella termostatica diversa da quella utilizzata per le prove, questi sono stati mantenuti in condizionamento per tempi molto più lunghi, per avere la certezza che ogni punto dei provini, anche quelli interni, fossero effettivamente alla temperatura desiderata.

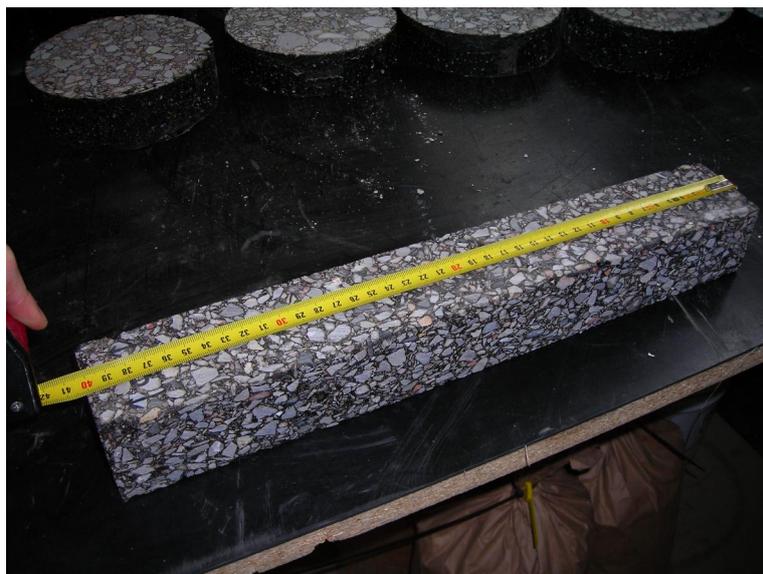
Le operazioni preparatorie alla prova iniziano con l'accensione della camera termostatica in cui è inserito il telaio, impostata alla temperatura richiesta, che in breve tempo viene raggiunta.

Si accendono la stazione elettronica per la registrazione dei dati, premendo prima il tasto di sinistra e poi il tasto di destra, ed il computer, dal quale si fa partire il software. Da qui si mettono in comunicazione i due dispositivi elettronici tramite il percorso File - > System Setup -> Communication, spuntando la voce Enable packet display e premendo il tasto Apply.

Dopo di che si deve accendere il motorino che mette in pressione l'olio che servirà ad applicare i carichi tramite lo stelo metallico dell'UTM 25. Per fare ciò si apre la finestra Virtual Pendant, che apparirà come in Figura 2.20: nella riga Hydraulic Power Supply si preme il tasto Low e dopo qualche secondo il tasto High, lo stesso per la riga Hydraulic Service Manifold.

A questo punto si deve procedere alla misurazione del provino: la lunghezza va misurata sulle quattro facce con un metro con accuratezza di 1 mm (si veda Figura 2.22), la larghezza e l'altezza con un calibro a corsoio con accuratezza di 0,1 mm (si veda Figura 2.23), preferibilmente all'incirca in corrispondenza dei quattro punti in cui saranno posizionati i dispositivi di bloccaggio, infine il peso con accuratezza al g. Tutti questi dati vanno registrati in un foglio di laboratorio e inseriti nella pagina Specimen del software. Le operazioni di misurazione devono essere eseguite senza perdere tempo,

per fare in modo che la temperatura non cambi significativamente, soprattutto se il gradiente tra quella dell'ambiente e quella della cella termostatica è elevato.



*Figura 2.22 - Misurazione della lunghezza del provino con metro*



*Figura 2.23 - Misurazione della larghezza del provino con calibro*

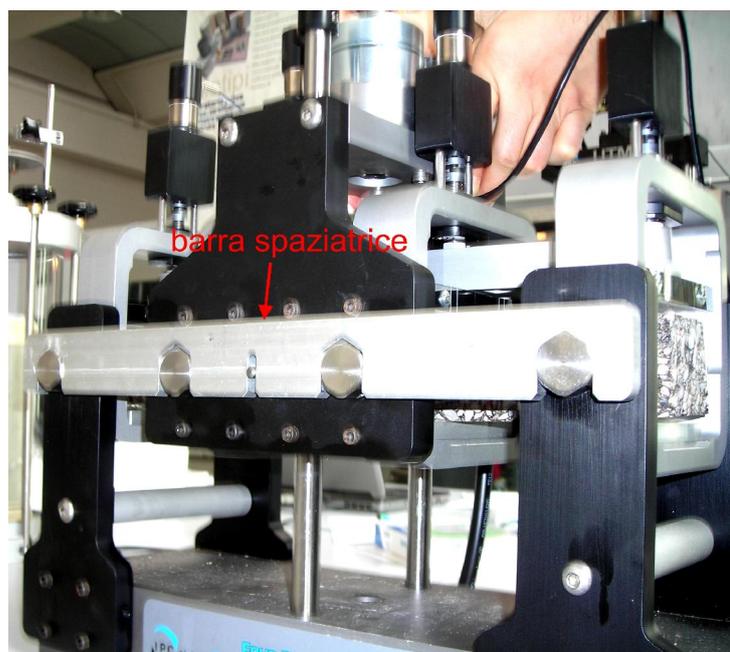
Ora il provino va alloggiato all'interno del telaio, prima però bisogna accertarsi che l'LVDT sia stato alzato per evitare di urtarlo durante l'inserimento. Il provino va posizionato centralmente sia in senso longitudinale, sia in senso trasversale, per agevolare la precisione di quest'ultima posizione, sulla piastra dei bloccaggi sono disegnati dei segni verticali. A questo punto occorre fare in modo che il provino appoggi perfettamente su tutti e quattro i serraggi; bisogna quindi regolare elettricamente l'altezza dei due interni tramite i tasti presenti nel Virtual Pendant, fino a che non si vede che tutte le piastre inferiori dei dispositivi di bloccaggio non adescano

al provino (si veda Figura 2.24), per fare ciò ci si può aiutare spostando trasversalmente uno dei montanti esterni e verificando che il provino non scorra sulle piastre.



*Figura 2.24 - Spostamento dell'Actuator in modo che il provino appoggi perfettamente su tutti i quattro dispositivi di serraggio*

A questo punto si infila la barra distanziatrice sui quattro bulloni dei serraggi, per fare in modo che essi siano effettivamente tutti distanti gli uni dagli altri di  $L_{eff}/3$ ; in questa posizione si chiudono i morsetti agendo sulle levette che si trovano sulla base del telaio, poi si toglie la barra distanziatrice. Si veda Figura 2.25.



*Figura 2.25 - Inserimento della barra spaziatrice*

Fatto ciò, bisogna posizionare l'LVDT sulla superficie del provino. Si apre quindi la finestra Levels e si controlla il valore mentre si ruota manualmente la vite posizionata

al di sopra del trasduttore, tra i due serraggi interni; raggiunto il valore 0.000 nella voce A1C On Specimen LVDT si chiude la vite di blocco, si veda Figura 2.26.



*Figura 2.26 - Particolare dell'LVDT*

Dalla stessa finestra occorre prendere nota del valore di A1A Actuator, che indica l'altezza alla quale si trova il montante dei serraggi interni, cioè quello che si è spostato verticalmente per raggiungere l'allineamento di tutti gli appoggi.

A questo punto il provino è correttamente posizionato all'interno del telaio, prima di far partire la prova però bisogna settare i parametri sul software.

Si inseriscono i parametri di test nella scheda Test Parameters, in particolare la modalità di controllo (di deformazione o di carico) e la relativa ampiezza, la frequenza del carico, il numero di cicli a cui si vuole sottoporre il provino.

La prova può ora essere avviata.

Al termine di ogni prova, prima di procedere ad una successiva sullo stesso provino, occorre settare di nuovo l'LVDT sullo zero e riportare A1A Actuator al valore di cui si era preso nota prima di iniziare la prova, in modo che il provino ritorni alla sua posizione naturale e subisca la stessa deformazione verso l'alto e verso il basso. In caso contrario, si agisce spostando l'attuatore dalla finestra Virtual Pendant, come si era fatto in precedenza, fino a tornare al valore di inizio prova. Potrebbe capitare infatti che alla fine di una prova, il campione si trovi leggermente spostato rispetto al suo asse a causa dell'ultimo input di spostamento dato dal software; in questo modo si evita che il provino venga sollecitato maggiormente su un lato rispetto all'altro, nella prova successiva.

## **CAPITOLO 3 ELABORAZIONE DEI DATI E ANALISI DEI RISULTATI**

### **3.1 INTRODUZIONE**

Nel presente capitolo verranno analizzati i dati raccolti dalle prove di flessione su 4 punti condotte sui campioni prismatici dedicati alla caratterizzazione reologica del conglomerato bituminoso suddividendoli secondo il programma sperimentale di Tabella 2.1.

L'analisi dei valori del Modulo di rigidezza e dell'angolo di fase ottenuti dalle diverse prove ha inizio con la selezione dei dati restituiti dal software di gestione del macchinario, per arrivare al tracciamento delle relative isoterme, secondo le due modalità di calcolo dei parametri ("fitted" e non "fitted"), di cui si dirà nel paragrafo successivo.

Per completezza di analisi, verrà eseguito anche il calcolo statistico delle medie e delle deviazioni standard dei dati relativi al Modulo e all'angolo di fase di tutti i provini, per discuterne la dispersione.

Infine, si passerà alla descrizione e al tracciamento della curva maestra del Modulo ad un'unica temperatura di riferimento.

### **3.2 SELEZIONE DEI DATI DI OUTPUT**

La selezione dei dati registrati nel corso delle prove avviene tramite i file di output forniti dal software UTS 18.

Il programma restituisce tre tipi di file: i "Data", i "Runtime" e i file contenenti i dati elaborati.

I file "Data" si aprono tramite il software dal menù File oppure con il tasto Open Data/Template già illustrato in Figura 2.19. Essi permettono di visualizzare nell'interfaccia del programma i grafici i cui punti sono stati registrati durante i cicli di prova: quelli che riportano i parametri calcolati e quelli che restituiscono l'andamento sinusoidale del carico e dello spostamento, si ricorda la Figura 2.17.

Oltre ai grafici è possibile consultare la tabella riassuntiva di tutti i parametri in corrispondenza del ciclo assunto come iniziale (tradizionalmente il centesimo) e in corrispondenza dell'ultimo ciclo di prova.

I file Runtime e i file contenenti i dati elaborati sono file con estensione .csv (Comma Separated Values), cioè file che possono essere visualizzati ed elaborati tramite fogli di calcolo o software per elaborare file di testo e contengono dati sottoforma di testo separato da virgole.

I “Runtime” riportano i “raw data” (dati grezzi) ovvero il risultato delle letture dei sensori presenti nell'apparecchiatura di prova, cioè degli LVDT sul provino e sull'attuatore, della cella di carico, al trascorrere del tempo.

I file che si esportano dal software dal menù File contengono, invece, i “processed data” (dati elaborati). Vi si trova il riepilogo dei valori inseriti dall'operatore nelle finestre inerenti i dati geometrici del provino, i parametri di prova impostati nella sezione Test Parameters, i Test Data al centesimo e al trecentesimo, e tutti i dati calcolati dal software, a partire dai dati grezzi, al trascorrere dei cicli. Questi dati sono:

- Modulo [MPa] ;
- deformazione [ $\mu$  ];
- tensione applicata [MPa];
- angolo di fase [ $^{\circ}$  ] ;
- energia dissipata [ $\text{kJ/m}^3$ ];
- temperatura del provino [ $^{\circ}$ ];
- forza applicata [N] ;
- massima e minima forza applicata [N];
- spostamento [mm];
- spostamento massimo e minimo [mm];
- angolo di fase misurato [ $^{\circ}$ ].

Tali dati possono essere rielaborati applicando una particolare procedura detta di “fitting”, proposta dal NCHRP Project 9-29: Simple Performance Tester for Superpave Mix Design [17].

Questa procedura ha lo scopo di ridurre l'effetto di rumore sul segnale dei dati e la distorsione delle curve sinusoidali, per fare in modo che esse approssimino nel miglior modo possibile l'andamento sinusoidale. La procedura dell'NCHRP, implementata

all'interno del software di calcolo, utilizza il metodo di regressione ai minimi quadrati sui dati grezzi affinché questi interpolino una sinusoidale.

Il software fornisce due tipi di “fitting” inerenti: il primo, il calcolo dell'angolo di fase, il secondo, il calcolo della forza e dello spostamento, quindi della sollecitazione e della deformazione e, di conseguenza, del Modulo di rigidità.

I file di tipo .csv esportabili dal programma saranno quindi quattro, in base a quale tipologia di “fitting” sia selezionata: quelli con entrambi i “fitting” attivati o disattivati, e quelli con un solo tipo di “fitting” attivato.

L'opportunità di applicare una o entrambe le tipologie di “fitting” è lasciata all'operatore. Per fini di ricerca, in generale, si ritiene opportuno analizzare i dati grezzi. Per scopo commerciale, l'opportunità di applicare tali procedure deve essere ancora attentamente studiata e valutata.

### 3.2.1 Il Modulo di rigidità

I dati raccolti nei file “Data” sono stati classificati e suddivisi secondo le tre temperature di prova. Per ogni provino è stato tabulato il valore del Modulo di rigidità (espresso in MPa) al trecentesimo ciclo, ottenuto a tutte le frequenze, con o senza l'applicazione del “fitting”.

I risultati delle elaborazioni computazionali del software sono riportati nelle seguenti tabelle.

PROVE A 10 °C								
Frequenza [Hz]								
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1	
N2	3613	5585	6557	9261	10125	12033	3583	Fitted
	3677	5881	6815	9448	9962	11953	3460	Non fitted
N3	-	-	-	-	-	-	-	Fitted
	-	-	-	-	-	-	-	Non fitted
N4	3409	5646	6808	9468	10789	12346	3656	Fitted
	3301	5806	6879	9476	10521	12410	3798	Non fitted
N5	3708	5630	6477	8802	9767	12927	3806	Fitted
	3705	5876	6739	9006	9530	12867	3717	Non fitted
N6	4021	5927	6944	9537	10672	12507	3873	Fitted
	3807	6241	7258	9762	10378	12868	3663	Non fitted
N7	3558	5676	6584	9131	10202	13419	3946	Fitted
	3524	5962	6821	9002	9867	13458	3838	Non fitted
N8	3867	5892	6938	9607	10610	12204	3864	Fitted
	3852	6240	7216	9849	10673	12367	3869	Non fitted
N9	4046	6157	7258	9811	10738	12346	3967	Fitted
	4001	6266	7268	9688	10692	11368	3770	Non fitted

*Tabella 3.1 – Risultati del Modulo di rigidità [MPa] a 10 °C*

PROVE A 20 °C								
Frequenza [Hz]								
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1	
N2	718	1479	1929	3406	4192	5056	770	Fitted
	863	1869	2350	3783	4595	5407	945	Non fitted
N3	901	1780	2273	3938	4800	6163	916	Fitted
	941	2172	2617	4374	5201	6481	884	Non fitted
N4	980	1845	2377	4133	5048	6532	897	Fitted
	1012	2220	2798	4440	5441	6333	926	Non fitted
N5	887	1791	2332	4008	4951	6660	954	Fitted
	992	2092	2695	4346	5224	6245	994	Non fitted
N6	829	1627	2147	3811	4725	6068	1046	Fitted
	1025	1949	2483	4084	4757	6160	1162	Non fitted
N7	1065	2013	2611	4407	5229	7093	998	Fitted
	1078	2408	3010	4787	5419	7224	966	Non fitted
N8	925	1763	2309	4046	4929	6516	843	Fitted
	865	2197	2743	4425	5272	6388	998	Non fitted
N9	844	1695	2213	3874	4733	5879	810	Fitted
	838	2044	2596	4131	4929	6721	879	Non fitted

Tabella 3.2 Risultati del Modulo di rigidità [MPa] a 20 °C

PROVE A 30 °C								
Frequenza [Hz]								
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1	
N2	292	483	649	1308	1664	2725	216	Fitted
	349	902	1078	1794	1987	2777	225	Non fitted
N3	-	-	-	-	-	-	-	Fitted
	-	-	-	-	-	-	-	Non fitted
N4	263	414	549	1113	1459	1745	265	Fitted
	513	801	973	1553	1809	2662	295	Non fitted
N5	244	426	563	1123	1437	1981	263	Fitted
	343	806	961	1520	1936	2214	226	Non fitted
N6	298	516	690	1329	1708	2037	243	Fitted
	335	898	1067	1700	2217	2833	262	Non fitted
N7	278	436	581	1138	1450	2340	192	Fitted
	271	875	960	1536	1765	2183	241	Non fitted
N8	239	446	610	1217	1568	2438	243	Fitted
	249	529	688	1328	1834	2076	260	Non fitted
N9	274	501	672	1317	1726	2389	284	Fitted
	310	566	780	1411	1851	2454	278	Non fitted

Tabella 3.3 - Risultati del Modulo di rigidità [MPa] a 30 °C

I dati del provino N3 sono stati raccolti alla sola temperatura di 20 °C, che successivamente si è rotto a causa di un malfunzionamento del macchinario.

Le prove alla frequenza di 0.1 Hz sono state ripetute alla fine dello spettro di frequenze per controllare se, ed in quale misura, si fossero verificati fenomeni di fatica del provino durante le misurazioni alle altre frequenze imposte. Mettendo a rapporto i due dati si ottiene la percentuale indicativa della variazione del Modulo di rigidità.

Valori del 100% indicano la perfetta uguaglianza dei moduli ottenuti nelle due prove ripetute, valori superiori al 100% evidenziano un Modulo maggiore corrispondente alla seconda prova rispetto alla prima, viceversa per valori inferiori.

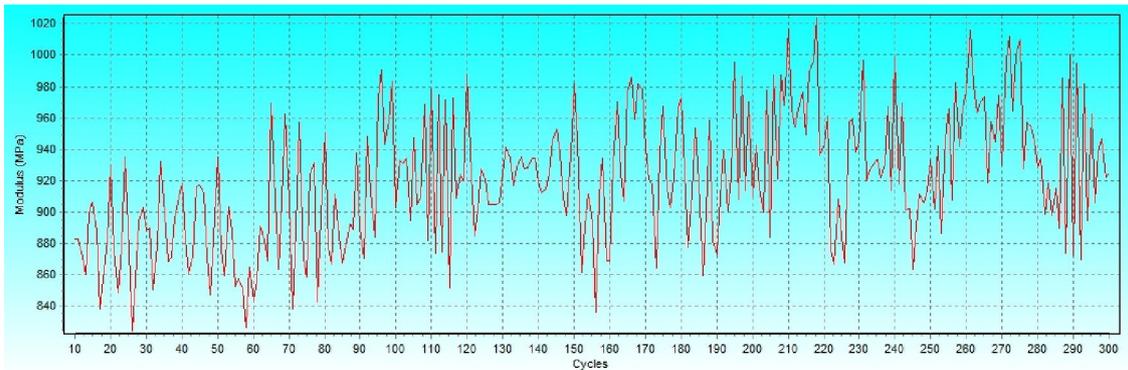
		<b>E(0.1)"/E(0.1)'</b>			
Provino		10 °C	20 °C	30 °C	
N2		99%	107%	74%	Fitted
		94%	110%	64%	Non fitted
N3		-	102%	-	Fitted
		-	94%	-	Non fitted
N4		107%	92%	101%	Fitted
		115%	92%	58%	Non fitted
N5		103%	108%	108%	Fitted
		100%	100%	66%	Non fitted
N6		96%	126%	82%	Fitted
		96%	113%	78%	Non fitted
N7		111%	94%	69%	Fitted
		109%	90%	89%	Non fitted
N8		100%	91%	102%	Fitted
		100%	115%	104%	Non fitted
N9		98%	96%	104%	Fitted
		94%	105%	90%	Non fitted

*Tabella 3.4 – Rapporto dei valori del Modulo alle due prove eseguite alla frequenza di 0.1 Hz*

In realtà, non è possibile concludere che la ripetizione della prova alla stessa frequenza restituisca sempre lo stesso valore del Modulo di rigidità, ma si possono comunque fare un paio di osservazioni.

Come si può notare la maggiore differenza tra i due valori del Modulo di rigidità si è verificata alla temperatura di 30 °C. Data la variabilità riscontrata nei valori di Modulo calcolati anche durante lo svolgimento del stesso singolo test, tra cicli successivi, come si può osservare in Figura 3.1, non si ritiene che i dati raccolti possano far attribuire la manifestazione di decadimento del Modulo di rigidità a fenomeni di affaticamento del provino, anche perché essi sono stati testati con un numero limitato di cicli per non superare la soglia di deformazioni elastiche così come prescritto nella norma UNI EN 12697-24.

Di tale variabilità nelle grandezze calcolate dal software si parlerà più approfonditamente nel paragrafo 3.4.



*Figura 3.1 - Variabilità del Modulo di rigidità durante una prova*

Alle temperature minori, invece, si ha una maggiore corrispondenza nei valori.

Inoltre, osservando i valori del rapporto dei moduli alla frequenza ripetuta, non si è evidenziato un marcato trend che possa portare a concludere che la seconda prova restituisca valori sempre superiori o sempre inferiori rispetto alla prima, in quanto i rapporti sono per metà superiori e per metà inferiori al 100%. Ripetendo una prova alla stessa frequenza, quindi, il valore di Modulo che si otterrà inizialmente non sarà sempre perfettamente uguale a quello della reiterazione, ma sarà maggiore o minore in modo casuale.

### **3.2.2 L'angolo di fase**

Dai file Data sono stati raccolti anche i valori ottenuti per l'angolo di fase, con gli stessi criteri utilizzati per la raccolta dei dati del Modulo di rigidità (300esimo ciclo), alle diverse frequenze e temperature, con e senza "fitting".

I valori, espressi in gradi sessagesimali, vengono riportati nelle seguenti tabelle.

PROVE A 10 °C								
Frequenza [Hz]								
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1	
N2	28.2	22.2	20	14.7	13.2	18.8	28.3	Fitted
	27.7	25.7	24.1	15.9	19.1	12.5	31.8	Non fitted
N3	-	-	-	-	-	-	-	Fitted
	-	-	-	-	-	-	-	Non fitted
N4	30.3	23.6	20.8	15.3	13.1	13.8	29.3	Fitted
	33.6	26.6	22.8	14.5	14.2	4.8	28	Non fitted
N5	26.9	21.4	19.5	14.6	12.6	15	27.6	Fitted
	26.9	22.8	23.5	18.9	17	2.2	25.6	Non fitted
N6	26.6	22.4	20.3	15.3	13.7	15.6	28.1	Fitted
	31	26.7	25.4	14.3	18.8	5.9	33.5	Non fitted
N7	26.9	22.5	20.3	15.9	13.8	15.1	27.1	Fitted
	26.6	24.1	22.9	14.5	18.2	0.8	26.1	Non fitted
N8	26.9	21.3	19.2	14.4	12.2	15.7	25.8	Fitted
	27.8	20.9	21.6	12.2	15.2	9.4	-3.5	Non fitted
N9	26.3	20.8	18.7	13.7	12.3	12.6	27.3	Fitted
	25.5	21.7	20.3	-11.1	16.1	2.4	30.5	Non fitted

Tabella 3.5 – Risultati dell'angolo di fase [°] a 10 °C

PROVE A 20 °C								
Frequenza [Hz]								
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1	
N2	41.6	38.9	36.5	30.1	27	25.4	43	Fitted
	5	47.6	46.2	42	24.9	24.9	-0.3	Non fitted
N3	42	37.4	35	28.6	25.8	25.2	42.9	Fitted
	40.7	49.1	45	38.6	27.2	22.5	51.7	Non fitted
N4	42.1	38	35.6	29.1	26.3	25.9	42.6	Fitted
	34.4	46.9	45.9	31.1	28.6	27.1	45.3	Non fitted
N5	42	36.8	34.3	28.2	25.1	23.9	41.3	Fitted
	28.9	45	45.3	27	26.4	21.1	40.7	Non fitted
N6	40.3	37.8	35.2	28.8	26	26.2	39	Fitted
	25.9	52.3	41.1	29.5	31.9	26.7	35.2	Non fitted
N7	40.8	35.8	33.4	27	24	24.6	41.7	Fitted
	39.4	40.8	45.8	36	23.7	24.2	45.5	Non fitted
N8	40.7	37.2	35	28.3	25.5	24.2	41.8	Fitted
	47.6	45.8	45.9	39.4	23.6	28.3	30.2	Non fitted
N9	42.7	37.3	34.9	28.6	25.4	25.9	43.6	Fitted
	46.7	42.4	44	33.3	27	36.6	44	Non fitted

Tabella 3.6 – Risultati dell'angolo di fase [°] a 20 °C

PROVE A 30 °C								
Frequenza [Hz]								
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1	
N2	45.5	47.4	46.4	42.4	40.3	44.4	47.6	Fitted
	54.8	-73.4	81.4	51.4	46.9	28.8	70.5	Non fitted
N3	-	-	-	-	-	-	-	Fitted
	-	-	-	-	-	-	-	Non fitted
N4	35.6	46.7	46.5	43.6	41.9	46.1	36.4	Fitted
	0.9	-45.1	-88.4	50.2	38.7	32.7	34.8	Non fitted
N5	41.5	44	43.4	41.6	40.2	42.7	43.5	Fitted
	60.7	88.5	76.2	57.7	38.7	41.8	56.4	Non fitted
N6	45.5	45.3	44.6	41.4	39.4	41.5	45.7	Fitted
	48.3	-85.3	79.8	54.5	37.9	38.3	50	Non fitted
N7	43.7	46	45.9	42.5	40.5	44.6	45.3	Fitted
	34.6	-50.1	83.9	58.8	47	29.6	52.7	Non fitted
N8	45.8	45.3	45	42.4	40.5	43.3	46.7	Fitted
	50	57.6	55.3	50	42.9	35.5	53.3	Non fitted
N9	42.5	44.9	44.3	41.4	39	40.5	43.6	Fitted
	52.3	45.7	50	50.6	46	37.6	56.4	Non fitted

Tabella 3.7 – Risultati dell’angolo di fase [°] a 30 °C

Ripetendo la stessa operazione già eseguita per il Modulo di rigidezza, si sono divisi i valori dell’angolo di fase ottenuto tramite le due prove alla frequenza di 0.1 per ogni provino.

Come si può osservare dalla Tabella 3.8, il numero di dati con errore superiore al 10% è paragonabile al numero di dati che manifestano tale errore anche per il Modulo di rigidezza, ma si nota come gli scarti superiori raggiungano valori molto maggiori, sempre in corrispondenza dei dati non “fitted”, mentre quelli “fitted” hanno restituito risultati congruenti.

L’angolo di fase, manifesta infatti una variabilità molto più elevata del Modulo di rigidezza in caso di mancata applicazione del “fitting”. Si rimanda al paragrafo 3.4 per un’analisi più approfondita di quanto detto.

Provino	(0.1)"/ (0.1)'			
	10 °C	20 °C	30 °C	
N2	100%	103%	105%	Fitted
	115%	-6%	129%	Non fitted
N3	-	102%	-	Fitted
	-	127%	-	Non fitted
N4	97%	101%	102%	Fitted
	83%	132%	3867%	Non fitted
N5	103%	98%	105%	Fitted
	95%	141%	93%	Non fitted
N6	106%	97%	100%	Fitted
	108%	136%	104%	Non fitted
N7	101%	102%	104%	Fitted
	98%	115%	152%	Non fitted
N8	96%	103%	102%	Fitted
	-13%	63%	107%	Non fitted
N9	104%	102%	103%	Fitted
	120%	94%	108%	Non fitted

Tabella 3.8 - Rapporto dei valori dell'angolo di fase alle due prove eseguite alla frequenza di 0.1 Hz

I valori negativi del rapporto tra angoli di fase alle due prove eseguite a frequenza di 0.1 Hz, derivano da valori negativi dello stesso parametro meccanico. Un valore negativo di angolo di fase non ha significato fisico, perché implicherebbe il manifestarsi di una deformazione precedente all'applicazione della sollecitazione responsabile, ma può risultare dalle elaborazioni del software a causa della distorsione delle curve di carico e spostamento da cui viene calcolato. Tali curve, infatti, non sempre hanno andamento perfettamente sinusoidale, ma si deformano, soprattutto alle alte frequenze, come si illustrerà nel commento alle Figure 3.16-3.19.

### 3.3 COSTRUZIONE DELLE ISOTERME DEL MODULO DI RIGIDEZZA E DELL'ANGOLO DI FASE

Per capire con maggiore chiarezza il comportamento reologico del conglomerato bituminoso in esame, è necessario visualizzare i risultati del Modulo di rigidezza e dell'angolo di fase tramite grafici che ne riportino i valori al variare della temperatura e della frequenza, in scala bilogarithmica.

Come primo passo sono stati presi in considerazione i valori “fitted”, di tutti i provini per ciascuna temperatura ottenendo i grafici di Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4.

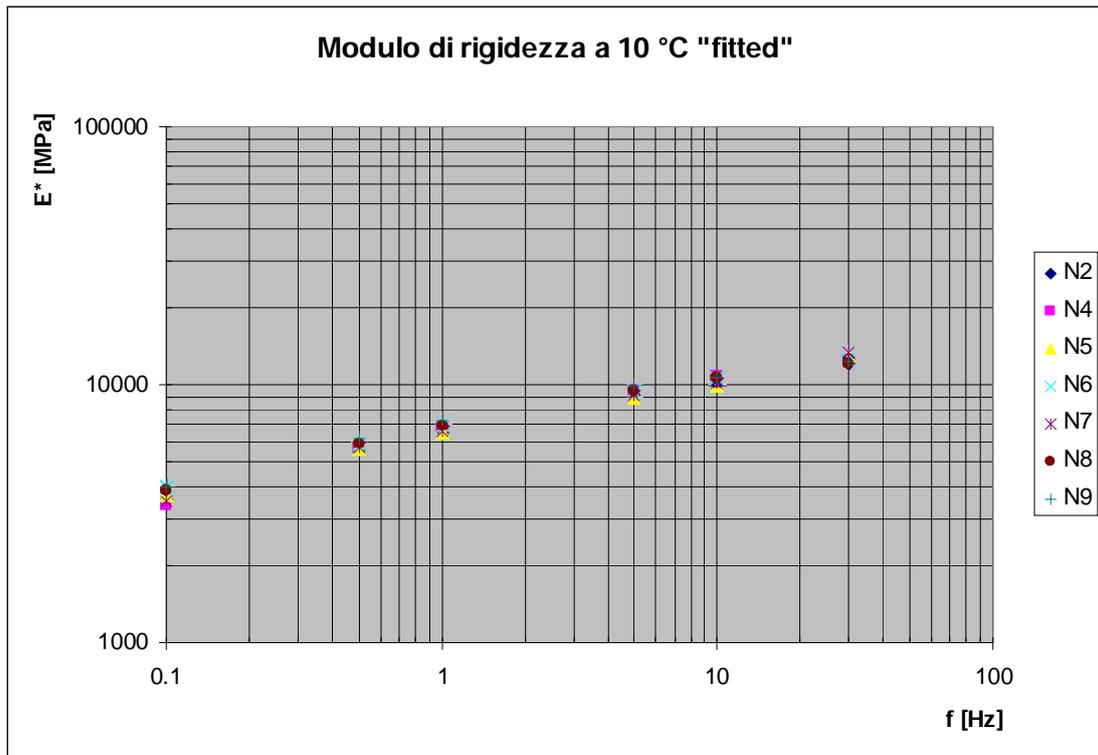


Figura 3.2 – Grafico dei valori di Modulo a 10 °C "fitted"

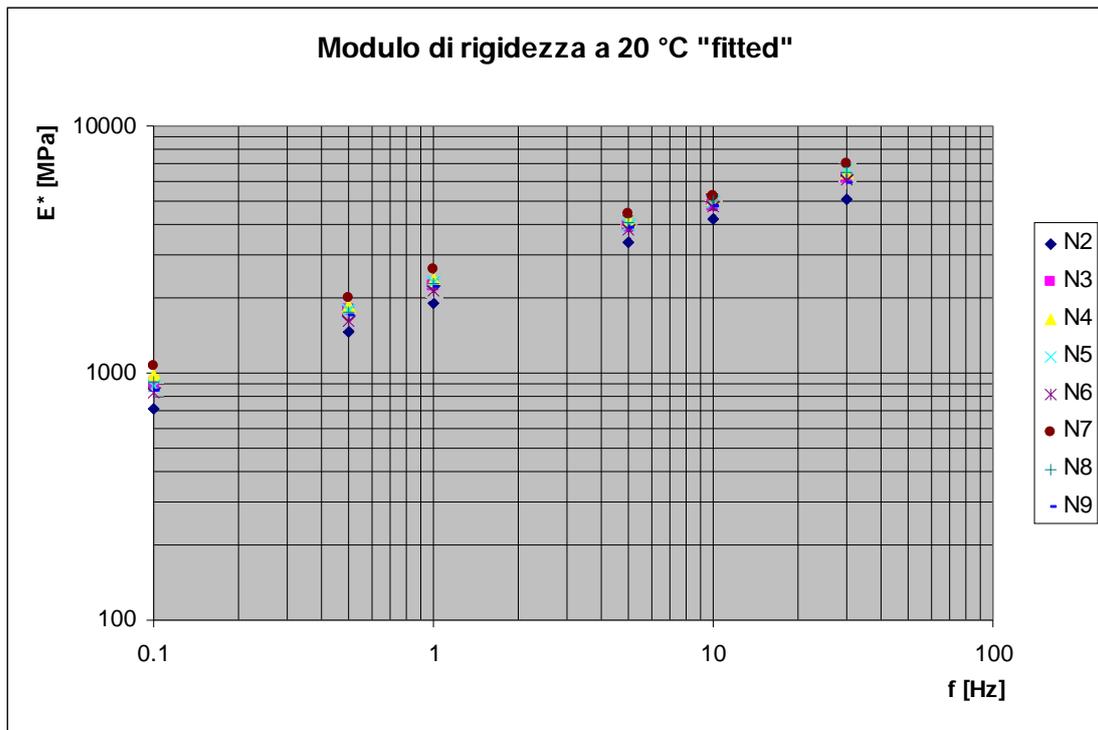


Figura 3.3 - Grafico dei valori di Modulo a 20 °C "fitted"

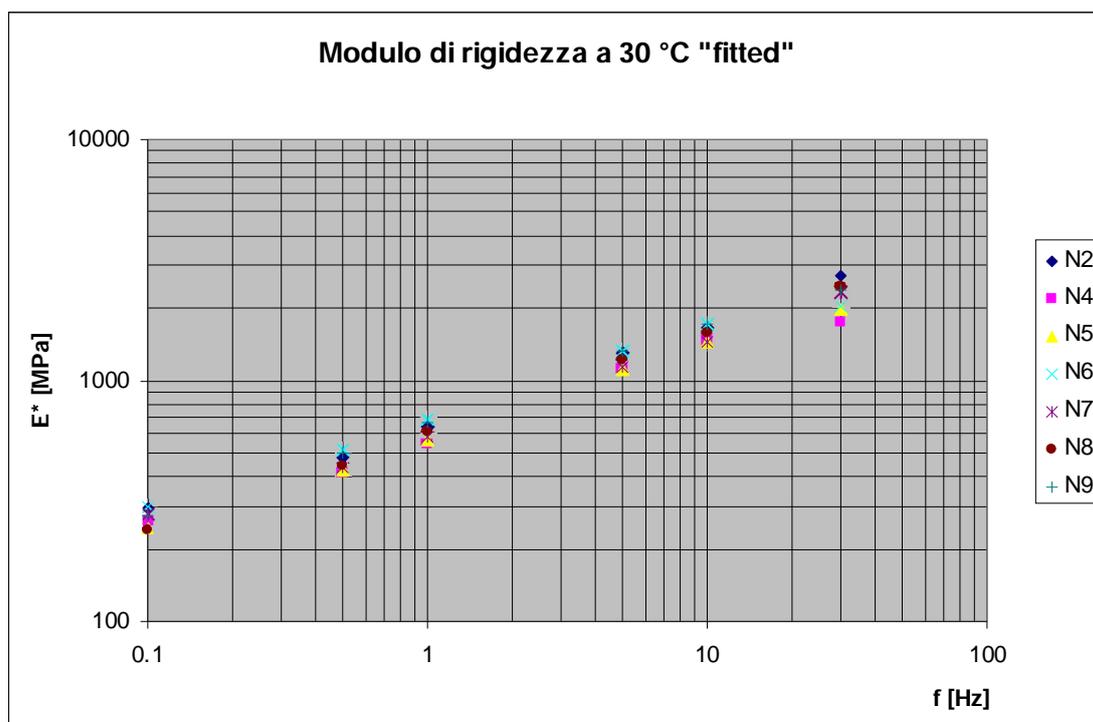


Figura 3.4 - Grafico dei valori di Modulo a 30 °C "fitted"

Successivamente sono state tracciate le isoterme del Modulo di rigidezza.

Riportando le tre isoterme sullo stesso piano, il comportamento viscoelastico del conglomerato bituminoso è chiaro.

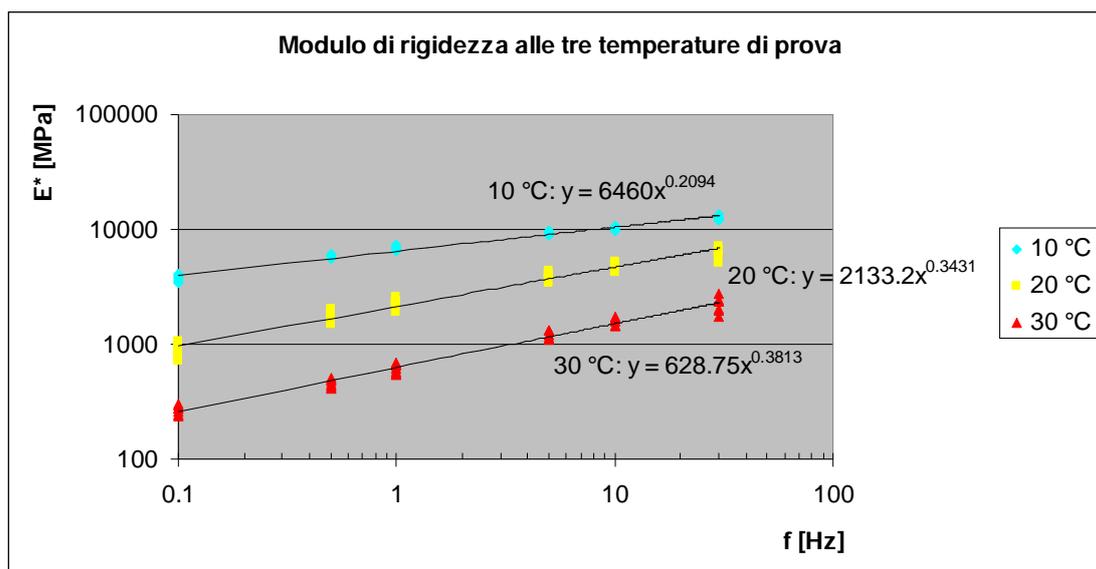


Figura 3.5 – Isotherme del Modulo di rigidezza

Al crescere della temperatura il conglomerato bituminoso esibisce un Modulo di rigidezza inferiore. Lo stesso avviene considerando la frequenza: all'aumentare della frequenza il Modulo di rigidezza diventa maggiore, a parità di temperatura.

Temperatura e frequenza, infatti, sono i due fattori che influenzano in maniera più significativa il Modulo di rigidità. Oltre a questi due fondamentali parametri, la rigidità di un conglomerato bituminoso è influenzata da una serie di ulteriori fattori quali: il tipo di bitume (modificato o non, con indice di penetrazione diverso) e la sua percentuale, la modalità di applicazione del carico (continua o con periodi di riposo) e la forma della sua onda (sinusoidale, semisinusoidale, quadrata), l'indice dei vuoti e la granulometria degli aggregati, la quantità di filler, ecc [18].

In scala bilogarithmica la isoterme seguono un andamento lineare secondo le equazioni delle linee di interpolazione dei dati riportate all'interno del grafico.

Le stesse elaborazioni sono state eseguite anche per l'angolo di fase, graficando dapprima i valori "fitted" al variare della frequenza e della temperatura per ciascun provino e tracciando successivamente le relative isoterme.

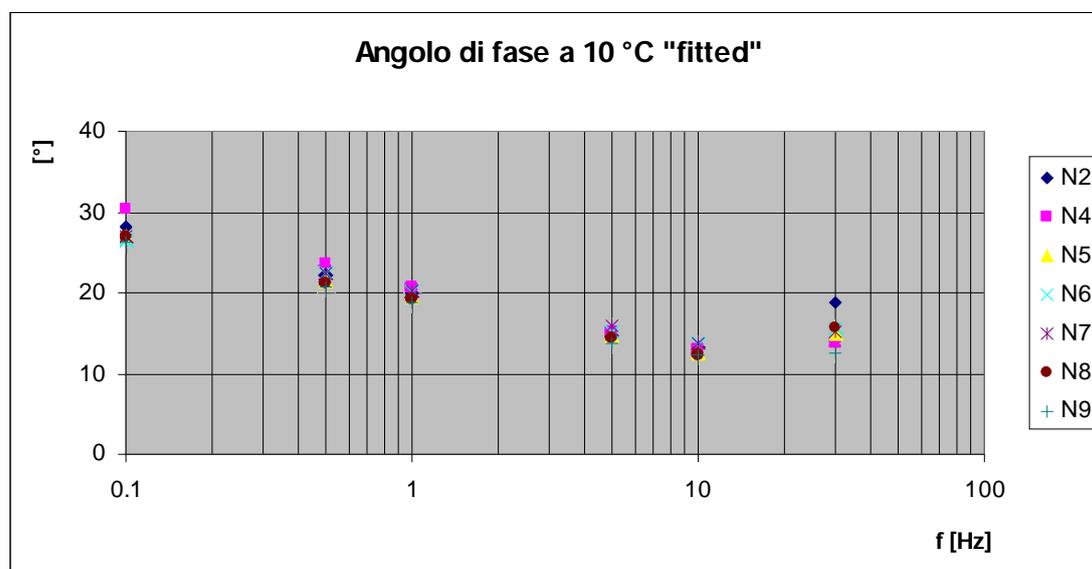


Figura 3.6 - Grafico dei valori dell'angolo di fase a 10 °C "fitted"

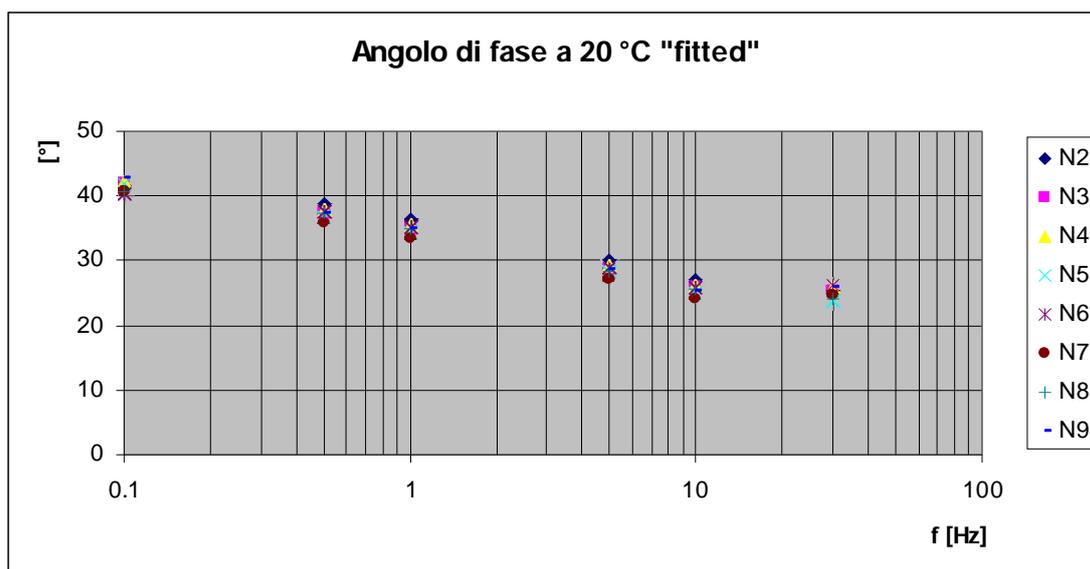


Figura 3.7 - Grafico dei valori dell'angolo di fase a 20 °C "fitted"

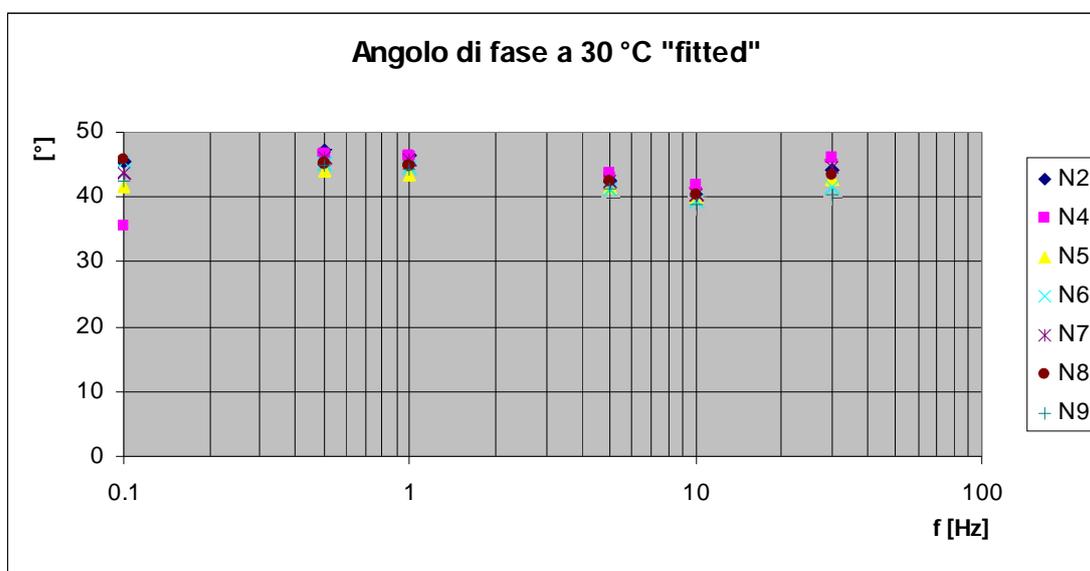


Figura 3.8 - Grafico dei valori dell'angolo di fase a 30 °C "fitted"

Anche in questo caso, come si era detto nel paragrafo 1.2, si può verificare che l'angolo di fase cresce all'aumentare della temperatura e al diminuire della frequenza, perché la risposta in termini di deformazione a seguito di una sollecitazione avviene con maggior ritardo alle temperature più elevate e in caso di bassa velocità di applicazione del carico, a causa della maggiore viscosità esibita dal materiale.

Infine, vengono riportate le tre isoterme dell'angolo di fase nello stesso grafico per evidenziarne le variazioni in funzione della temperatura.

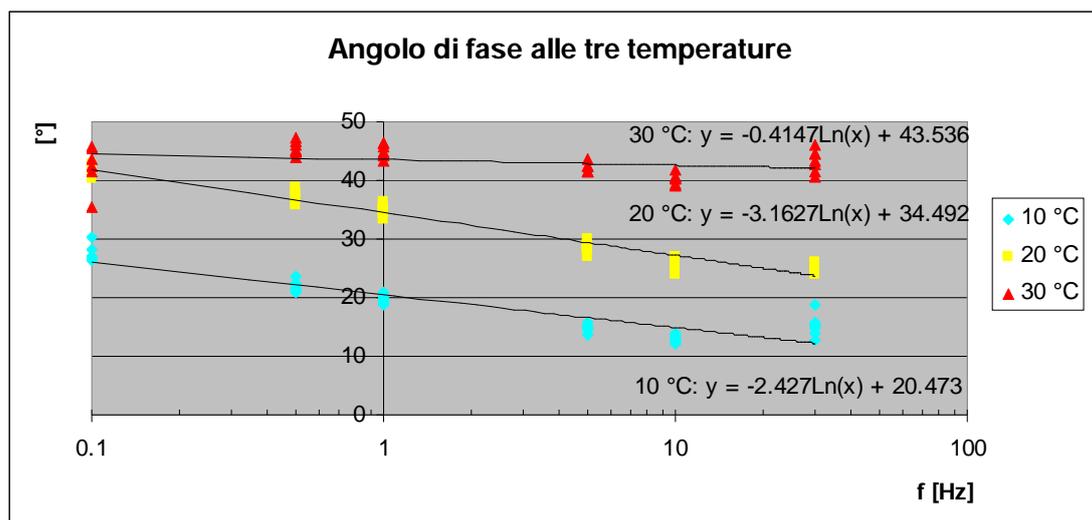


Figura 3.9 – Isoterme dell'angolo di fase

Dalla Figura 3.9 si può notare come la diminuzione dell'angolo di fase all'aumentare della frequenza sia più marcata alle temperature basse e intermedie rispetto alle alte temperature; l'isoterma a 30 °C, infatti, risulta molto meno inclinata rispetto alle altre due. Questo è dovuto al fatto che il materiale è maggiormente viscoso a causa della temperatura, perciò la velocità con cui viene caricato ha una scarsa influenza sull'ulteriore contributo di viscosità.

A tutte le temperature si può notare che i valori ottenuti alla frequenza di 30 Hz tendono ad uscire dall'andamento evidenziato dai valori esibiti a tutte le altre frequenze. Ad elevata velocità di carico, cioè, il ritardo nella deformazione in seguito alla sollecitazione aumenta, probabilmente per l'impossibilità del macchinario di correggere in tempo reale i valori del carico applicato.

### 3.4 LE ISOTERME TRACCIATE CON E SENZA "FITTING" DEI DATI

In questo paragrafo verranno messi a confronto i valori a cui è stato applicato l'algoritmo di "fitting" con i valori di Modulo ottenuti senza il "fitting".

Dopo aver costruito i grafici dei dati relativi ai singoli campioni, suddivisi per temperatura di esecuzione delle prove, allo stesso modo del paragrafo precedente ma questa volta visualizzando i dati calcolati senza l'applicazione della procedura di "fitting", si sono tracciate le due curve di interpolazione per ogni isoterma.

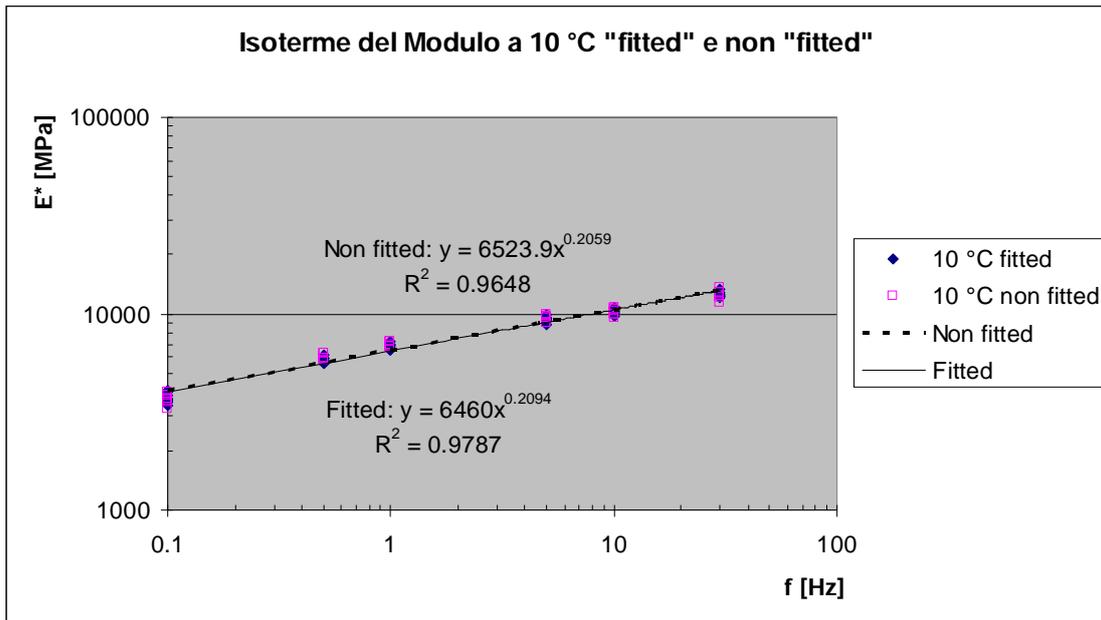


Figura 3.10 – Isoterme dei valori di Modulo a 10 °C "fitted" e non "fitted"

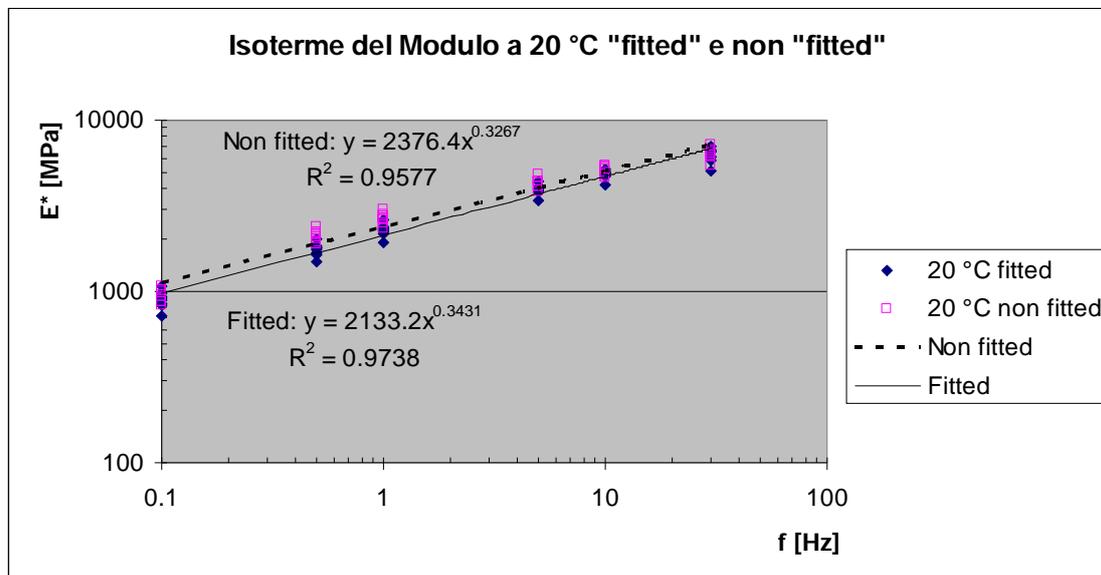


Figura 3.11 - Isoterme dei valori di Modulo a 20 °C "fitted" e non "fitted"

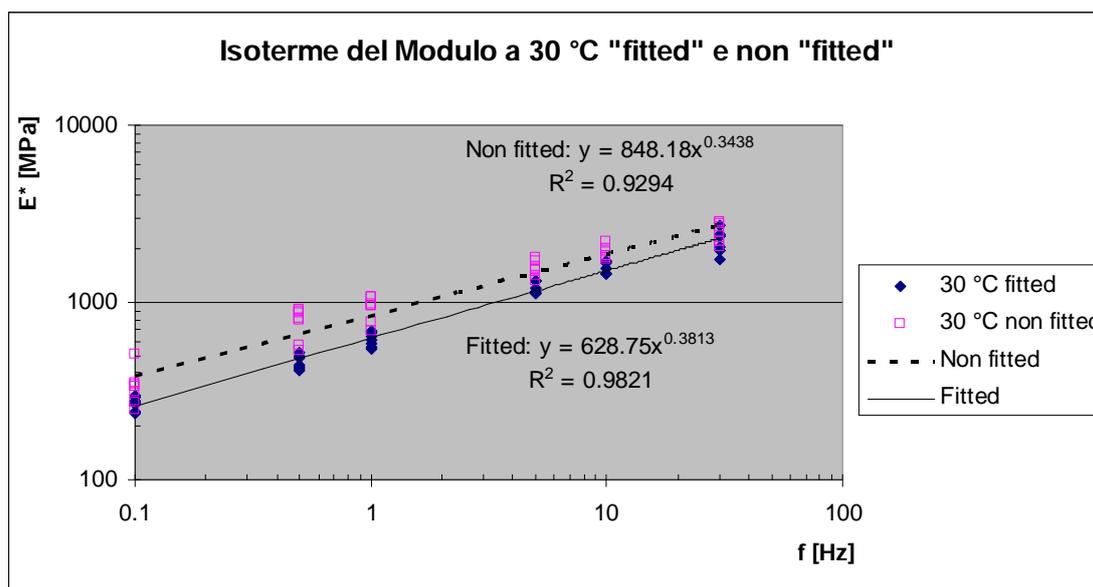


Figura 3.12 – Isoterme dei valori di Modulo a 30 °C “fitted” e non “fitted”

Alle basse temperature, il materiale si comporta maggiormente secondo la sua componente elastica rispetto a quella viscosa, perciò il già scarso ritardo nella risposta deformativa è poco influenzato dalla minimizzazione degli errori sui valori di carico e spostamento apportata dall’algoritmo di “fitting”. Come verrà evidenziato successivamente, in Figura 3.16 e Figura 3.18, alle basse temperature i grafici dello spostamento e del carico sono, in generale, più regolari rispetto a quelli alle alte temperature; il minor rumore sui segnali, quindi, necessita di una minore correzione applicata tramite il “fitting”. Per questo motivo, le due isoterme dei dati con o senza “fitting” sono praticamente coincidenti, come si vede in Figura 3.10.

Al contrario, aumentando la temperatura, il divario tra queste due serie di dati aumenta, come mostrato in Figura 3.11 e Figura 3.12; questo è indice del fatto che quando il materiale si comporta più viscosamente, rispondendo con maggiore ritardo al segnale di carico, in termini di deformazione, l’algoritmo di “fitting” deve apportare una correzione maggiore dei dati di carico e spostamento letti durante la prova, che si risconterà nei valori di Modulo da essi calcolati.

Di seguito verranno riportati i grafici relativi ai valori dell’angolo di fase “fitted” e non “fitted”, come si è fatto con il Modulo di rigidità.

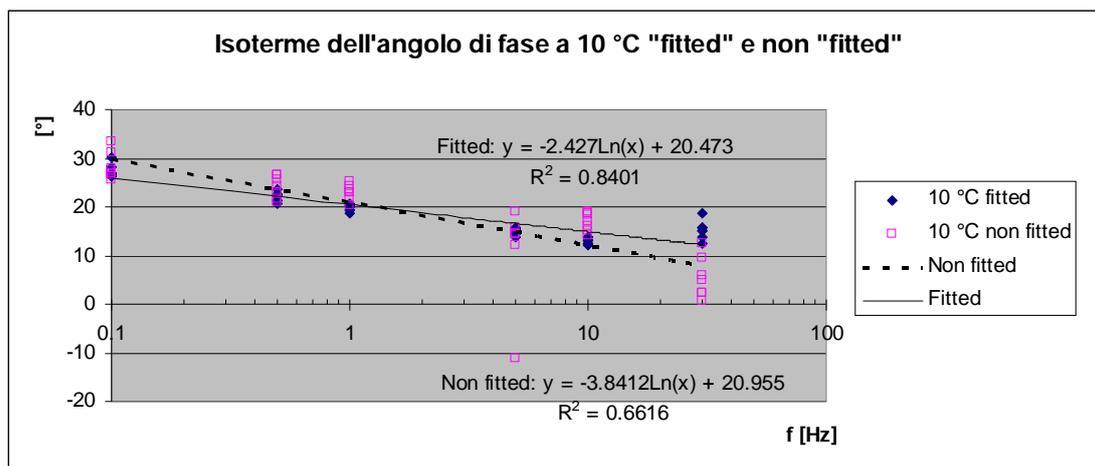


Figura 3.13 - Isotherme dei valori di angolo di fase a 10 °C "fitted" e non "fitted"

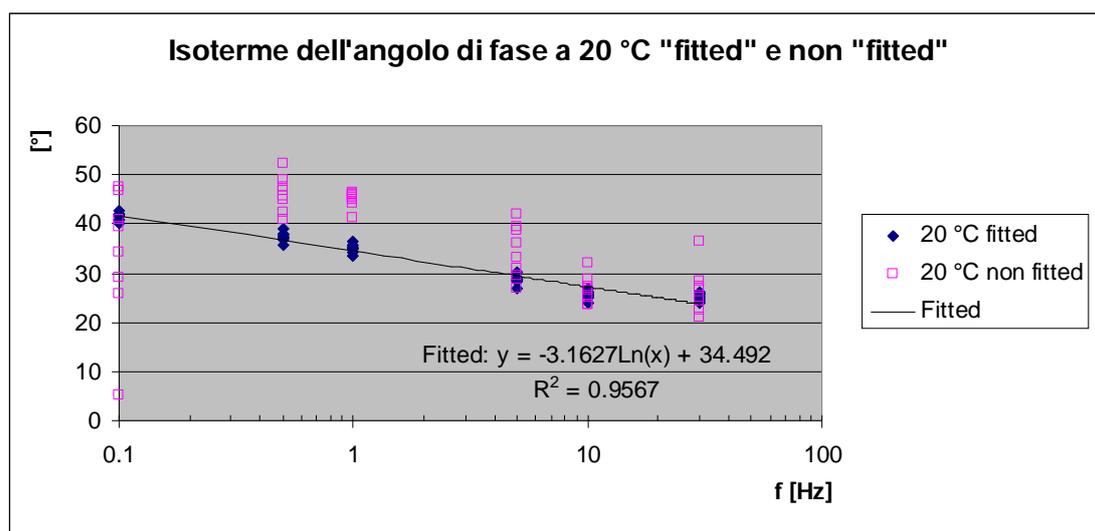


Figura 3.14 - Isotherme dei valori di angolo di fase a 20 °C "fitted" e non "fitted"

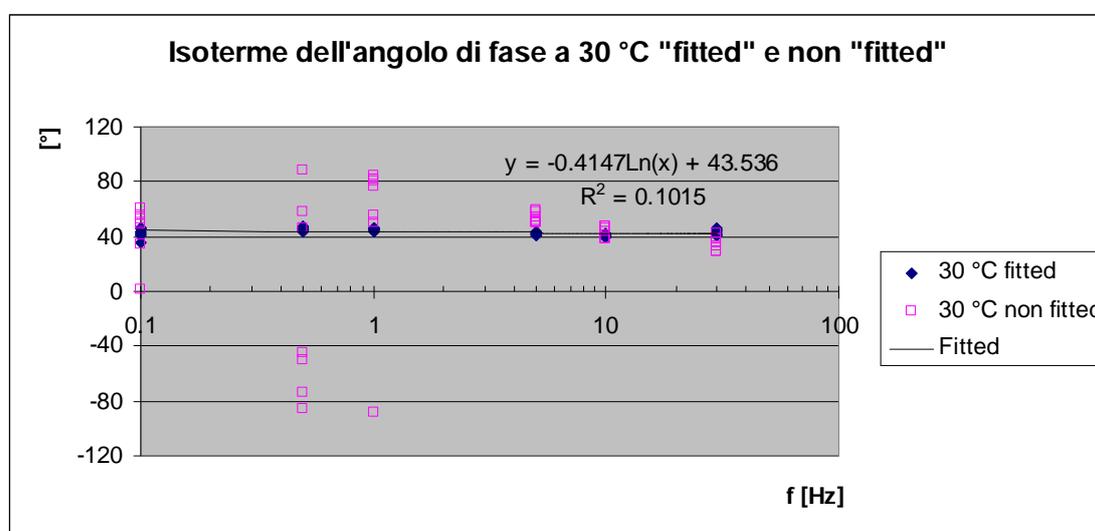


Figura 3.15 - Isotherme dei valori di angolo di fase a 30 °C "fitted" e non "fitted"

Dai grafici sopra riportati si può ancora verificare che i valori dell'angolo di fase sono in genere maggiori alla temperatura di 30 °C rispetto ai 20 e 10 °C, anche se si osserva una grande dispersione nei dati non “fitted”, che invece non era apprezzabile nei dati “fitted” visti nei relativi grafici del paragrafo 3.3. Nei grafici alle temperature di 20 e 30 °C le linee di tendenza dei dati non “fitted” non sono state tracciate perché la dispersione dei valori avrebbe restituito curve interpolanti errate.

Questa dispersione di valori è dovuta al fatto che il sistema di acquisizione dei dati è discreto e, soprattutto, che le curve di carico e spostamento non sono perfettamente sinusoidali. All'atto della raccolta dei dati si è notato che il valore dell'angolo di fase può variare molto anche tra due cicli successivi.

La distorsione delle curve di carico e spostamento è responsabile anche dei valori negativi di angolo di fase, in quanto può accadere che il dato di spostamento preso in considerazione per il calcolo dello stesso si trovi, sulla scala temporale, antecedente alla sollecitazione.

Inoltre, è necessario sottolineare come le sinusoidi divengano più irregolari all'aumentare della temperatura e della frequenza, soprattutto quella del carico. Avendo, infatti, eseguito le prove in modalità di controllo di deformazione, l'andamento dello spostamento è in genere abbastanza fedele ad una sinusoide, mentre il carico si presenta molto spesso piuttosto irregolare.

Nelle seguenti figure sono riportati i diagrammi dello spostamento e del carico registrati durante quattro prove; essi permettono di visualizzare quanto affermato precedentemente.

Alle basse temperature e basse frequenze le curve sono pressoché perfette perché lo spostamento avviene lentamente, in questo modo, il sistema ha la possibilità di regolare più accuratamente il carico.

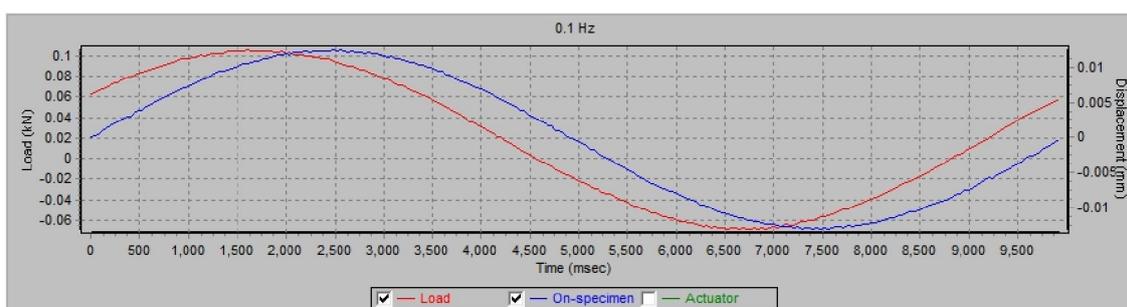


Figura 3.16 – Andamento dello spostamento e del carico durante una prova a bassa temperatura e bassa frequenza

Ad alta temperatura e a basse frequenze le curve dello spostamento (blu) e del carico (rosso) assumono gli andamenti in Figura 3.17.

Come si vede, in questo caso lo spostamento è ancora pressoché una sinusoide perfetta, per lo stesso motivo di cui sopra, ma, essendo la temperatura più elevata ed esibendo il provino un comportamento più viscoso, il carico è caratterizzato da picchi relativi, causati probabilmente dal fatto che il materiale si deforma con maggiore ritardo dopo l'applicazione della sollecitazione, quindi il sistema deve regolare il carico applicato in un range di valori più ampio affinché il materiale possa subire sempre lo stesso spostamento.

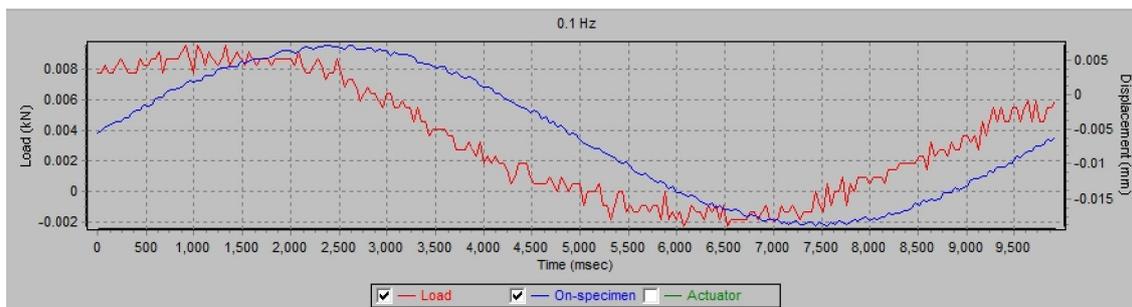


Figura 3.17 - Andamento dello spostamento e del carico durante una prova ad alta temperatura e bassa frequenza

L'altro caso intermedio è quello di bassa temperatura e alta frequenza, rappresentato in Figura 3.18. Qui le curve sono caratterizzate da un rumore relativo pressoché inesistente, in quanto il provino è quasi perfettamente elastico alle basse temperature, ma l'andamento si è dilatato e deformato rispetto alla sinusoide a causa dell'elevata velocità di applicazione e successiva regolazione del carico.



Figura 3.18 - Andamento dello spostamento e del carico durante una prova a bassa temperatura e alta frequenza

Infine, il caso limite di alta temperatura e alta frequenza. Questo è sicuramente il caso in cui le curve subiscono una distorsione maggiore perché combina la viscosità del materiale dovuta alla temperatura elevata e il fatto che il carico debba essere regolato ad intervalli molto ravvicinati in relazione alla maggiore velocità di applicazione dello stesso.

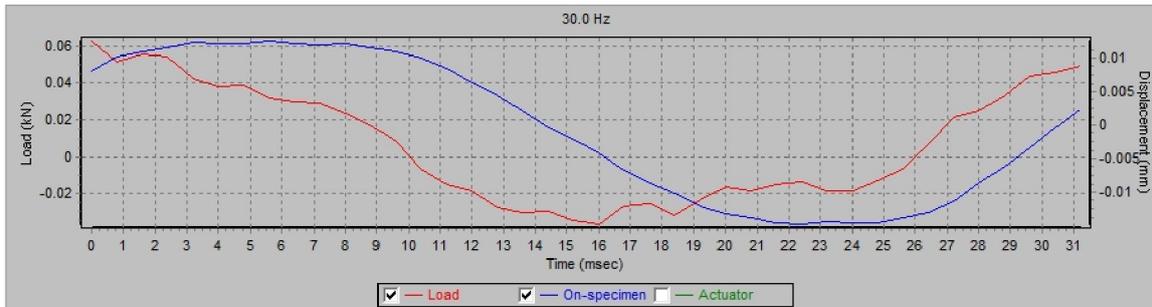


Figura 3.19 - Andamento dello spostamento e del carico durante una prova ad alta temperatura e alta frequenza

Per questi motivi l'angolo di fase è caratterizzato da un'elevata dispersione e da un comportamento, nei confronti della frequenza e della temperatura, non altrettanto netto quanto quello del Modulo, il quale, come si è visto, cresce sempre al diminuire della temperatura e all'aumentare della frequenza.

Esaminando più approfonditamente la Figura 3.19, si nota che la curva rossa del carico risulta segmentata. Analizzando i file .csv infatti si è potuto riscontrare che il numero di acquisizioni per secondo eseguite dal software durante una prova ad alta frequenza è molto maggiore rispetto alle stesse letture relativamente ad una prova a bassa frequenza, perché il carico è applicato più velocemente, ma il numero di acquisizioni fatte all'interno di uno singolo ciclo (quello rappresentato nelle precedenti figure), è molto inferiore nel caso di alta frequenza. È possibile ipotizzare, quindi, che l'andamento della curva sia così distorto per mancanza di valori nei punti intermedi, e che il problema potrebbe essere risolto con un sistema di acquisizione più veloce.

La forte variabilità dell'angolo di fase è dovuta, quindi, oltre al comportamento viscoelastico del materiale, anche all'acquisizione discreta dei dati e si verifica anche tra cicli molto ravvicinati perché, come si vede in particolare in Figura 3.20, il valore di questo parametro meccanico dipende fortemente da quale punto del carico (e quindi della sollecitazione), tra i picchi, cade in corrispondenza del massimo della sinusoide e viene utilizzato dal sistema per i calcoli, in relazione al corrispondente valore dello spostamento (e quindi della deformazione) che, invece, ha un andamento più regolare.

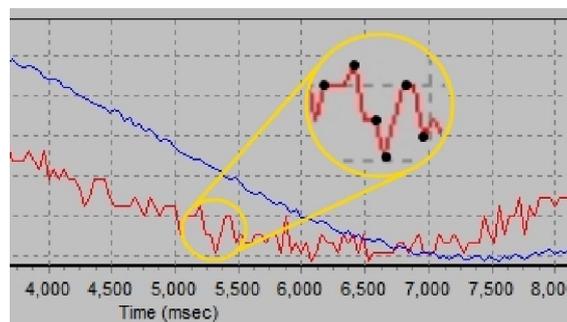


Figura 3.20 – Particolare delle sinusoidi di carico e spostamento tra punti di rilevamento vicini

Per tutti questi motivi, sembrerebbe consigliato l'utilizzo dei valori "fitted" quando si analizza l'angolo di fase, anche se si rimanda ad un commento più approfondito in merito a tale procedura nel Capitolo 4, a seguito delle evidenze emerse tramite l'analisi del confronto tra i due macchinari.

### 3.5 CALCOLO DELLE MEDIE E DELLE DEVIAZIONI STANDARD DEI MODULI E DEGLI ANGOLI DI FASE

In questo paragrafo si completa l'analisi dei dati ottenuti dalle prove alle diverse temperature e frequenze, tramite il calcolo statistico.

L'evidenza della dispersione dei valori di Modulo e angolo di fase, già visibile nei grafici rappresentati nel paragrafo precedente, viene qui supportata matematicamente dal calcolo dei valori massimi, minimi, medi e della deviazione standard per gli 8 provini testati.

Per ogni frequenza sono state calcolate tali grandezze (al trecentesimo ciclo), tra i valori di tutti i campioni.

I risultati sono riportati nelle seguenti tabelle per le tre temperature di prova.

Freq.	$E_{max}$	$E_{min}$	$E_{medio}$	Dev Stand	
0.1	4046	3409	3746	241	Fitted
	4001	3301	3695	229	Non fitted
0.5	6157	5585	5788	210	Fitted
	6266	5806	6039	202	Non fitted
1	7258	6477	6795	277	Fitted
	7268	6739	6999	236	Non fitted
5	9811	8802	9374	337	Fitted
	9849	9002	9462	344	Non fitted
10	10789	9767	10415	387	Fitted
	10692	9530	10232	449	Non fitted
30	13419	12033	12540	478	Fitted
	13458	11368	12470	682	Non fitted

*Tabella 3.9 – Risultati del calcolo di Modulo massimo, minimo, medio e deviazione standard dei dati di tutti i provini a 10 °C*

Freq.	$E_{max}$	$E_{min}$	$E_{medio}$	Dev Stand	
0.1	1065	718	894	104	Fitted
	1078	838	952	89	Non fitted
0.5	2013	1479	1749	157	Fitted
	2408	1869	2119	169	Non fitted
1	2611	1929	2274	196	Fitted
	3010	2350	2662	201	Non fitted
5	4407	3406	3953	287	Fitted
	4787	3783	4296	298	Non fitted
10	5229	4192	4826	307	Fitted
	5441	4595	5105	311	Non fitted
30	7093	5056	6246	613	Fitted
	7224	5407	6370	515	Non fitted

Tabella 3.10 - Risultati del calcolo di Modulo massimo, minimo, medio e deviazione standard dei dati di tutti i provini a 20 °C

Freq.	$E_{max}$	$E_{min}$	$E_{medio}$	Dev Stand	
0.1	298	239	270	22	Fitted
	513	249	339	86	Non fitted
0.5	516	414	460	40	Fitted
	902	529	768	156	Non fitted
1	690	549	616	55	Fitted
	1078	688	930	145	Non fitted
5	1329	1113	1221	97	Fitted
	1794	1328	1549	159	Non fitted
10	1726	1437	1573	127	Fitted
	2217	1765	1914	153	Non fitted
30	2725	1745	2236	332	Fitted
	2833	2076	2457	307	Non fitted

Tabella 3.11 - Risultati del calcolo di Modulo massimo, minimo, medio e deviazione standard dei dati di tutti i provini a 30 °C

Le deviazioni standard, che forniscono un'indicazione riguardo la dispersione dei dati attorno al valore medio, sono state successivamente graficate in funzione delle frequenze per agevolarne la lettura.

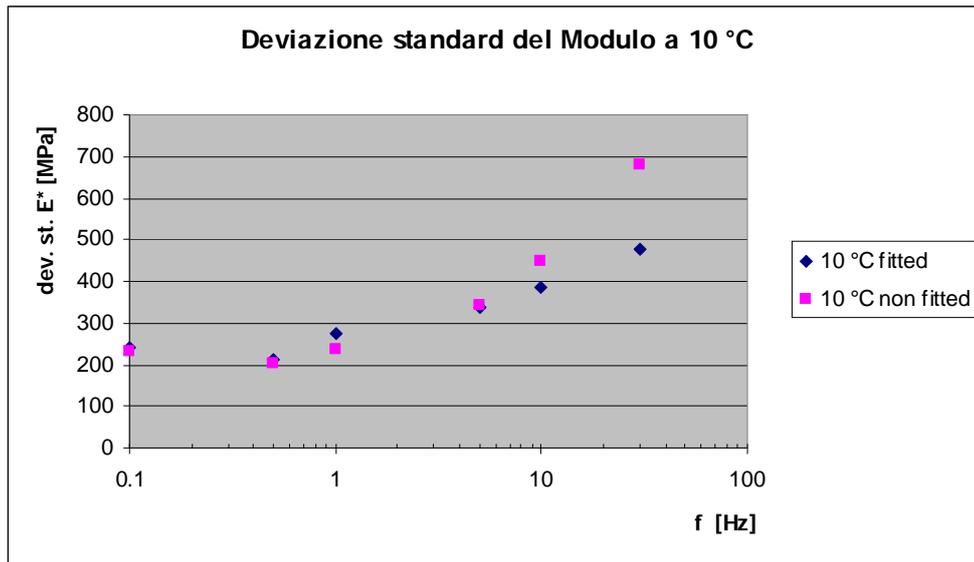


Figura 3.21 – Grafico della deviazione standard del Modulo a 10 °C

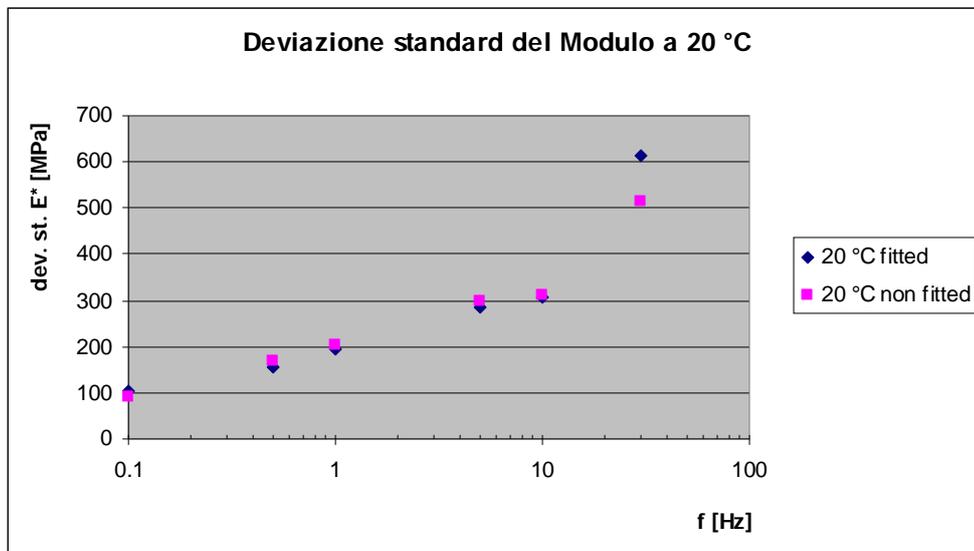


Figura 3.22 - Grafico della deviazione standard del Modulo a 20 °C

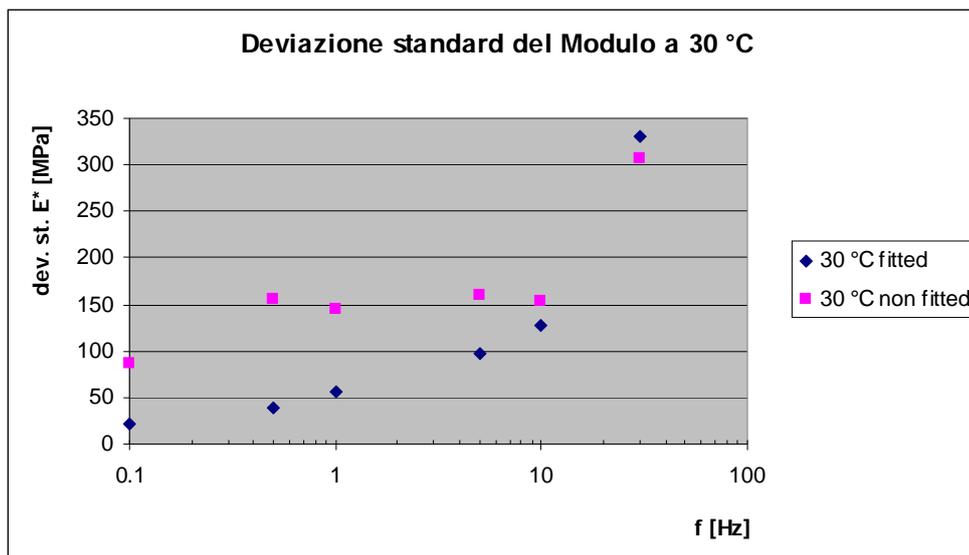


Figura 3.23 - Grafico della deviazione standard del Modulo a 30 °C

Possiamo affermare che, in generale, il valore della deviazione standard è maggiore per i dati non “fitted” rispetto a quelli “fitted”. Ciò si riscontra soprattutto alla temperatura di 30 °C. Per i dati a 10 °C, questo fenomeno si manifesta per le frequenze superiori a 1 Hz mentre avviene il contrario a 0.1 e 0.5 Hz. In ogni caso, la dispersione dei dati aumenta al crescere della frequenza e al crescere della temperatura. I valori maggiori di deviazione standard per le basse temperature non devono infatti trarre in inganno, essi vanno paragonati all’ordine di grandezza dei valori di Modulo corrispondenti. Perciò la dispersione maggiore si verifica relativamente alle temperature più alte.

Gli stessi calcoli sono stati eseguiti anche per i corrispondenti valori di angolo di fase a 10, 20 e 30 °C rispettivamente, come riportato nelle seguenti tabelle.

Freq.	max	min	medio	Dev Stand	
0.1	30.3	26.3	27.44	1.39	Fitted
	33.6	25.5	28.44	2.84	Non fitted
0.5	23.6	20.8	22.03	0.94	Fitted
	26.7	20.9	24.07	2.35	Non fitted
1	20.8	18.7	19.83	0.73	Fitted
	25.4	20.3	22.94	1.66	Non fitted
5	15.9	13.7	14.84	0.72	Fitted
	18.9	-11.1	11.31	10.09	Non fitted
10	13.8	12.2	12.99	0.64	Fitted
	19.1	14.2	16.94	1.87	Non fitted
30	18.8	12.6	15.23	1.92	Fitted
	12.5	0.8	5.43	4.23	Non fitted

Tabella 3.12 - Risultati del calcolo di angolo di fase massimo, minimo, medio e deviazione standard dei dati di tutti i provini a 10 °C

Freq.	max	min	medio	Dev Stand	
0.1	42.7	40.3	41.53	0.83	Fitted
	47.6	5	33.58	13.90	Non fitted
0.5	38.9	35.8	37.40	0.91	Fitted
	52.3	40.8	46.24	3.65	Non fitted
1	36.5	33.4	34.99	0.90	Fitted
	46.2	41.1	44.90	1.69	Non fitted
5	15.9	13.7	14.84	0.72	Fitted
	42	27	34.61	5.26	Non fitted
10	27	24	25.64	0.89	Fitted
	31.9	23.6	26.66	2.75	Non fitted
30	26.2	23.9	25.16	0.85	Fitted
	36.6	21.1	26.43	4.76	Non fitted

Tabella 3.13 - Risultati del calcolo di angolo di fase massimo, minimo, medio e deviazione standard dei dati di tutti i provini a 20 °C

Freq.	max	min	medio	Dev Stand	
0.1	45.8	35.6	42.87	3.60	Fitted
	60.7	0.9	43.09	20.24	Non fitted
0.5	47.4	44	45.66	1.14	Fitted
	88.5	-85.3	-8.87	70.59	Non fitted
1	46.5	43.4	45.16	1.16	Fitted
	83.9	-88.4	48.31	61.74	Non fitted
5	43.6	41.4	42.19	0.79	Fitted
	58.8	50	53.31	3.71	Non fitted
10	41.9	39	40.26	0.93	Fitted
	47	37.9	42.59	4.12	Non fitted
30	46.1	40.5	43.30	1.92	Fitted
	41.8	28.8	34.90	4.78	Non fitted

Tabella 3.14 - Risultati del calcolo di angolo di fase massimo, minimo, medio e deviazione standard dei dati di tutti i provini a 30 °C

I valori di deviazione standard calcolati sono stati riportati nei seguenti grafici.

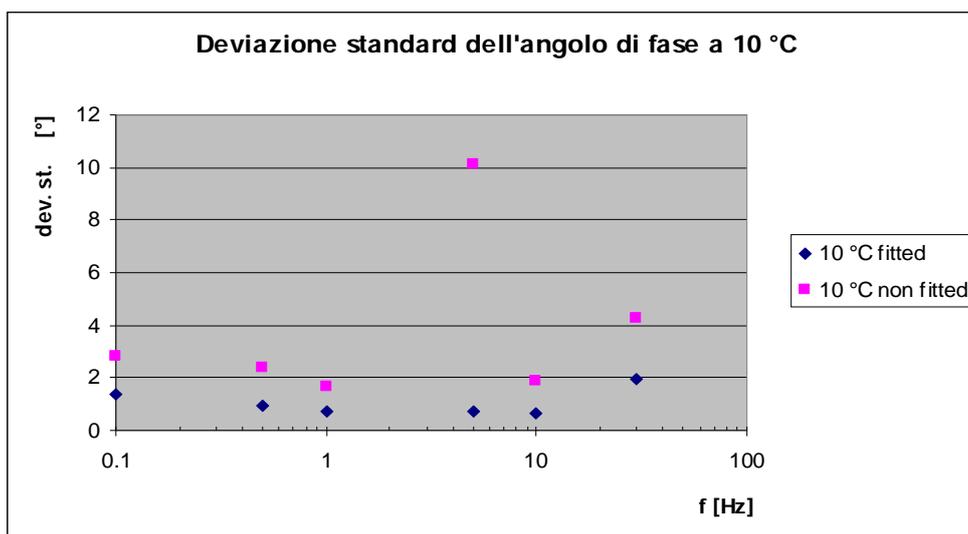


Figura 3.24 - Grafico della deviazione standard dell'angolo di fase a 10 °C

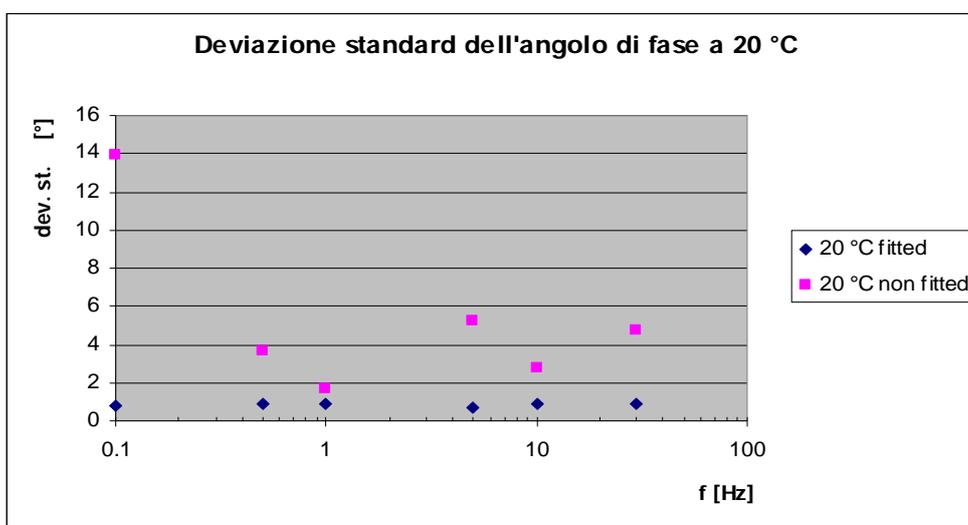


Figura 3.25 - Grafico della deviazione standard dell'angolo di fase a 20 °C

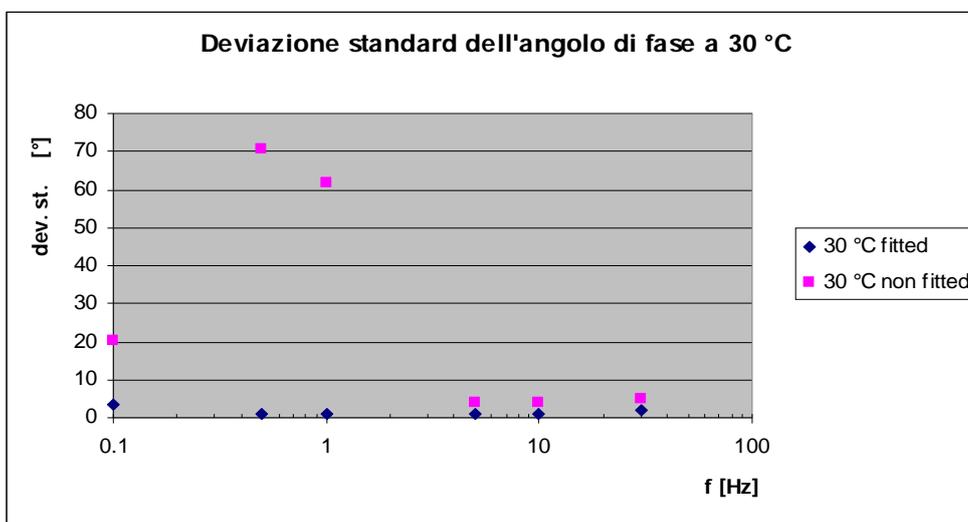


Figura 3.26 - Grafico della deviazione standard dell'angolo di fase a 30 °C

Nel caso dell'angolo di fase l'influenza sulla variabilità dei dati tra la modalità "fitted" e non "fitted" è molto più marcata, come già si era intuito nei grafici di di tutti gli 8 provini al paragrafo 3.4.

Si può notare che la deviazione standard si mantiene praticamente costante al variare della frequenza e per tutte le temperature di prova, con il "fitting" applicato ai dati. I valori inoltre sono molto bassi. Ciò significa che le condizioni di prova (temperatura e frequenza) non influenzano in maniera significativa l'efficacia dell'algoritmo di "fitting", che è in grado di ridurre l'errore sui segnali adeguatamente e costantemente.

Per i dati non "fitted" gli errori, invece, sono molto più elevati e aumentano (in alcuni casi considerevolmente) al crescere della temperatura, mentre non esiste un trend di crescita nei confronti della frequenza, come invece succedeva per il Modulo di rigidità.

Ancora una volta, si può concludere che il "fitting" sull'angolo di fase ha una grande influenza nei confronti della dispersione dei dati e si può affermare che tale procedura è efficace nella correzione degli errori dovuti alla discretezza dei segnali perché abbassa quasi sempre la deviazione standard, anche nei confronti del Modulo di rigidità.

### **3.6 LA COSTRUZIONE DELLE CURVE MAESTRE**

Come è stato evidenziato dai grafici illustrati nelle precedenti figure, il comportamento reologico di un materiale viscoelastico, come il conglomerato bituminoso, è fortemente dipendente dalla temperatura e dal tempo di carico (o dalla frequenza, cioè il reciproco del periodo).

Per confrontare i risultati restituiti dalle prove sul materiale a diverse temperature si usa normalizzare una delle due variabili. Si arriva, cioè, a riunire in un'unica curva i dati registrati alle diverse isoterme, in virtù del *principio di sovrapposizione tempo-temperatura* teorizzato da P.E. Rouse all'interno di The Journal of Chemical Physics 21 del 1953.

Il principio implica che la stessa variazione di una grandezza meccanica, in questo caso il Modulo di rigidità, ottenuta variando la temperatura a frequenza fissata, può essere ottenuta variando la frequenza e tenendo fissa la temperatura [19].

La singola curva alla quale vengono ricondotti i dati relativi alle diverse temperature prende il nome di “Master Curve”, o Curva Maestra.

Questa curva si ottiene scegliendo una temperatura di riferimento e traslando orizzontalmente i valori del Modulo ottenuti alle rimanenti temperature di prova. Si assume come fondamentale il tratto di curva  $E(f)$  ricavato alla temperatura di riferimento e si traslano le altre isoterme mantenendole parallele a se stesse, lungo l’asse del logaritmo delle frequenze fino a coincidenza delle curve [20].

La conseguenza del principio di sovrapposizione tempo-temperatura si traduce nella possibilità di visualizzare su una singola curva il comportamento viscoelastico del materiale in esame in un range di frequenze più vasto di quello accessibile all'apparato sperimentale a temperatura fissata. Infatti, traslando orizzontalmente i valori si ottengono informazioni a frequenze più basse e più alte rispetto a quelle riprodotte in laboratorio [19].

Tale principio è applicabile solo ai materiali a comportamento termoreologicamente semplice, come il conglomerato bituminoso, per i quali le proprietà viscoelastiche variano con la temperatura per effetto di una modificazione della scala dei tempi [21]. Per questi materiali è sufficiente traslare orizzontalmente i valori della grandezza meccanica in esame nei confronti del tempo per ottenere informazioni relative a frequenze non indagate sperimentalmente, per i materiali reologicamente complessi (come i polimeri), invece, è necessaria anche una traslazione verticale [19].

La correlazione che lega il tempo (o la frequenza) alla temperatura è espressa da un parametro chiamato “shift factor” tramite l’equazione:

$$A(T) = a_T A(T_0)$$

oppure, sostituendo ai tempi di carico le relative frequenze:

$$f_r = a_T f \quad (3.1)$$

dove:

$f$  = frequenza di carico a cui è stata eseguita la prova

$f_r$  = frequenza di carico ridotta, frequenza corrispondente ad  $f$  letta sulla isoterma di riferimento

$a_T$  = “shift factor”

Questa relazione esprime la possibilità di ritrovare un dato valore di Modulo  $E^*$ , determinato alla temperatura di prova  $T$  e alla frequenza  $f$ , sulla curva della isoterma

relativa alla temperatura di riferimento  $T_0$  in corrispondenza di un altro valore di frequenza,  $f_r$ .

Lo “shift factor” è il rapporto tra la frequenza letta sulla isoterma di riferimento e la corrispondente frequenza letta su un’altra isoterma, frequenze che restituiscono lo stesso valore di Modulo, come rappresentato in . Esso dà quindi una misura dell’entità della traslazione dei dati, in termini di frequenza, che si deve eseguire per ottenere un’unica curva maestra.

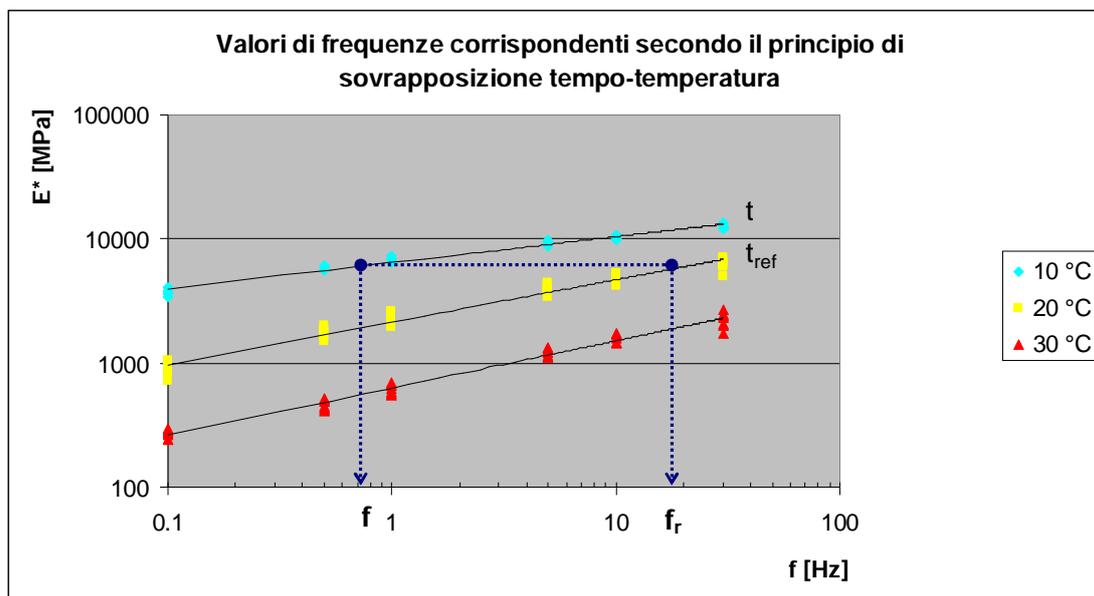


Figura 3.27 – Valori di frequenze sull’isoterma di riferimento e sull’isoterma da traslare

I metodi per la costruzione delle Master Curve disponibili in letteratura sono diversi; nel presente studio ne sono stati utilizzati tre per poterne fare un confronto e verificare la conformità dei risultati ottenuti.

Tali metodi sono rispettivamente: il metodo geometrico proposto dalla normativa UNI EN 12967-26, il modello sigmoideale di Medani e Huerman e il modello sigmoideale sviluppato dal NCHRP Project 1-37A, “Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures” e standardizzato all’interno della AASHTO TP62-03 “Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Mixtures”.

Prendendo in considerazione i dati disponibili dalle prove eseguite, si è deciso di tracciare la “Master Curve” alla temperatura di riferimento intermedia, cioè 20 °C, secondo i tre diversi metodi di calcolo.

### 3.6.1 Il metodo geometrico

Il metodo geometrico prevede una semplice traslazione orizzontale delle isoterme che si vogliono riportare sull'unica curva alla temperatura di riferimento. Si ricorda la Figura 3.5, che riporta su un piano logaritmico le tre isoterme del Modulo di rigidità; tale traslazione comporterà lo spostamento delle isoterme relative a 10 e 30 °C verso l'esterno, rispettivamente nel campo delle alte e delle basse frequenze, come indicato in Figura 3.28.

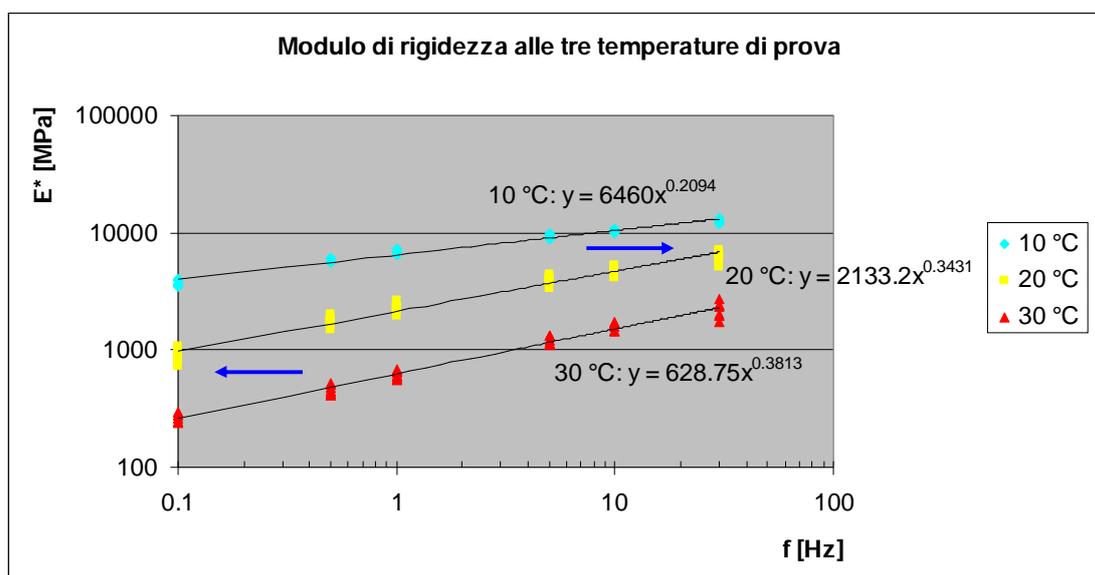


Figura 3.28 – Traslazione delle isoterme per la costruzione della Master Curve

Essendo il grafico in scala logaritmica, la traslazione delle curve si traduce in uno stiramento o una contrazione delle stesse a causa della modifica della scala delle frequenze.

Come accennato in precedenza, la curva alla temperatura di riferimento, in questo caso 20 °C, viene assunta come fondamentale e mantenuta inalterata, è necessario calcolare le frequenze limite (lette sulle isoterme da traslare) oltre le quali esisteranno i valori di Modulo determinati alle temperature di 10 e 30 °C, come rappresentato dalle frecce in Figura 3.29.

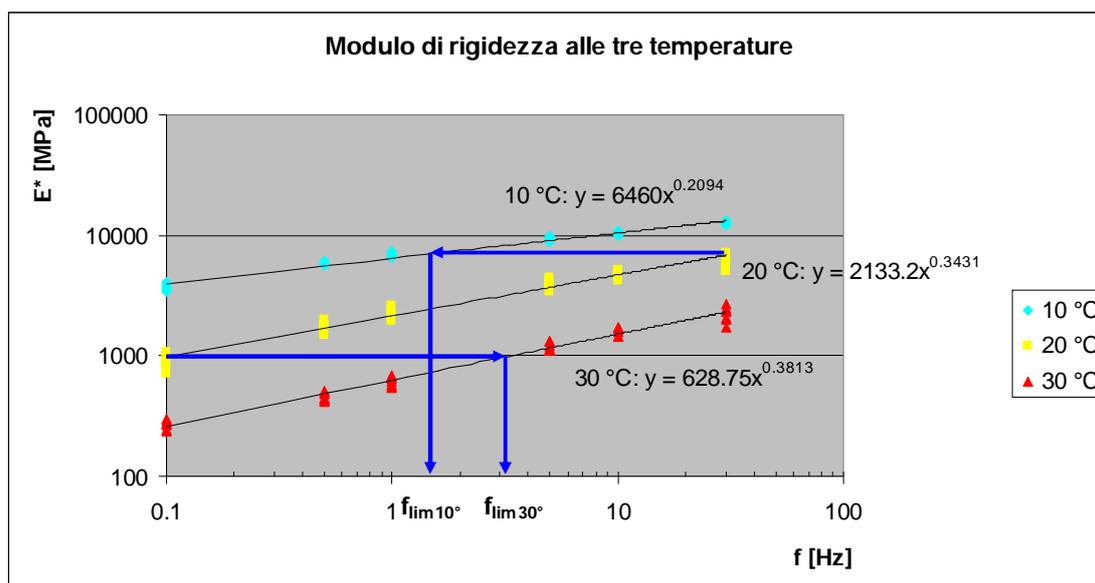


Figura 3.29 – Determinazione delle frequenze limite di traslazione delle isoterme

Per fare ciò si calcolano i valori del Modulo di rigidezza alla temperatura di 20 °C e alle frequenze di 0.1 e 30 Hz tramite l’equazione della relativa isoterma indicata in Figura 3.28. Noti tali valori si determinano le frequenze limite alle quali il Modulo assume gli stessi valori sulle isoterme di 10 e 30 °C [22], invertendo le due corrispondenti equazioni e vincolando y ad assumere tali valori di Modulo. A questo punto si calcolano gli “shift factor” che daranno la misura dei valori di traslazione delle due isoterme, come il rapporto tra la frequenza ridotta (cioè quella letta sull’isoterma di riferimento) e le corrispondenti frequenze limite appena calcolate, ritrovate sulle isoterme di 10 e 30 °C.

I valori di “shift factor” ottenuti sono i seguenti:

	10 °C	30 °C
$\tau$	22.640	0.032

Tabella 3.15 – “Shift factor” delle due isoterme

Lo “shift factor” dell’isoterma di riferimento a 20 °C è pari ad 1 in quanto essa non va traslata.

Successivamente si calcolano le frequenze ridotte alle quali si dovranno leggere, a seguito della traslazione delle due isoterme, i valori di Modulo corrispondenti ai punti esterni alle due frequenze limite, vale a dire i punti relativi alle frequenze di 5, 10 e 30 Hz per l’isoterma di 10 °C e quelli relativi alle frequenze di 0.1, 0.5 e 1 Hz per l’isoterma di 30 °C. Ricordando l’espressione dello “shift factor” ( 3.1 ), esse vengono calcolate come:

$$\log f_r = \log \alpha_T + \log f$$

dove  $f_r$  sono le frequenze lette sull'isoterma di riferimento, perciò le frequenze reali alle quali sono state eseguite le prove, gli  $a$  sono gli "shift factor" riportati nella precedente tabella ed  $f$  le frequenze a cui i valori di Modulo verranno traslati.

Questi valori di Modulo ottenuti dalle prove alle tre frequenze che verranno traslate si determinano tramite le equazioni delle curve interpolanti, analogamente a quanto fatto per la temperatura di 20 °C.

Il grafico della "Master Curve" che ne risulta è il seguente:

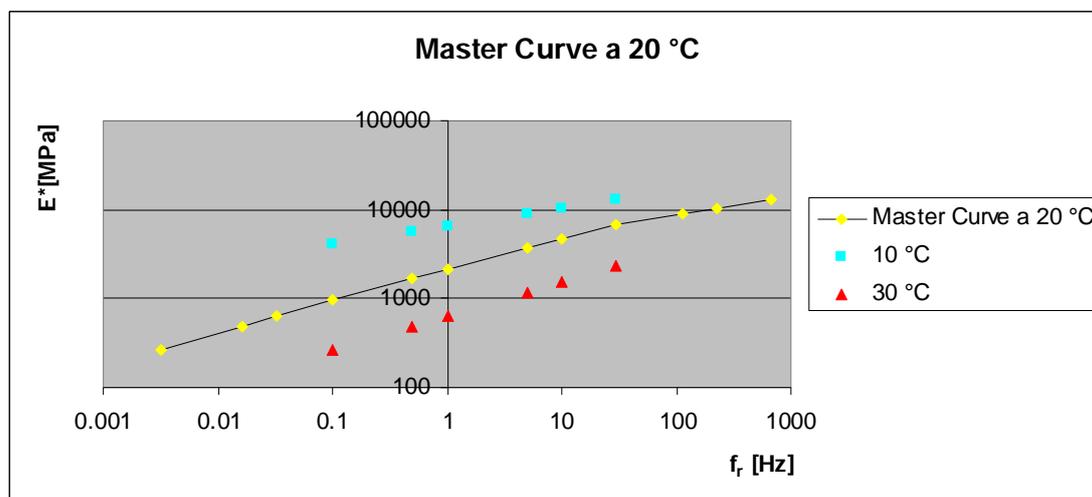


Figura 3.30 – Master Curve a 20 °C

La curva di colore giallo rappresenta la "Master Curve" con tutti i dati traslati alla temperatura di 20 °C; le curve di colore azzurro e rosso rappresentano le isoterme a 10 e 30 °C prima di essere traslate.

Gli "shift factor" variano in funzione della temperatura ed avendo a disposizione almeno tre isoterme è possibile tracciare tale dipendenza, come rappresentato in Figura 3.31.

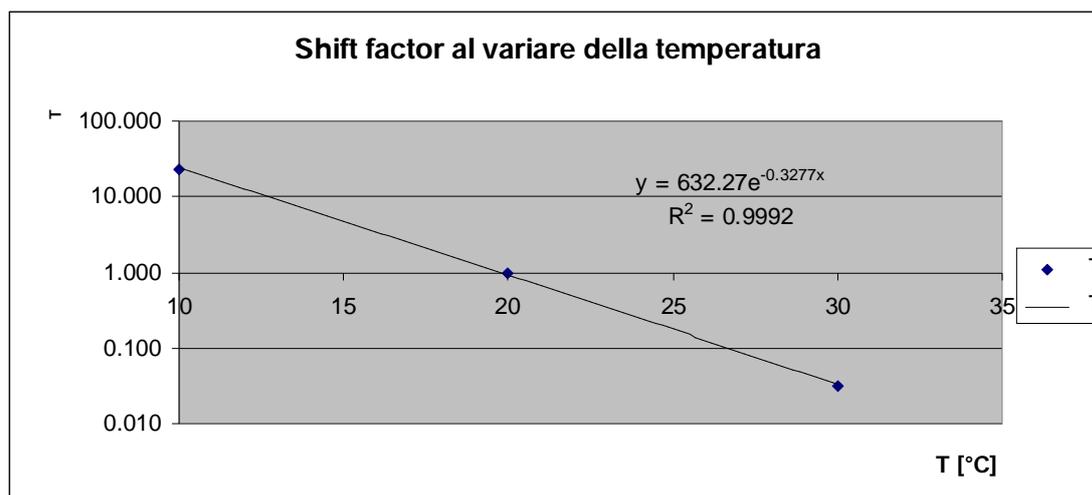


Figura 3.31 – Andamento degli "shift factor" in funzione della temperatura

### 3.6.2 Il modello sigmoidale di Medani e Huurman

Si prenderà ora in esame il primo dei due metodi che utilizzano un modello sigmoidale, cioè quello proposto da Medani e Huurman [23],[24].

Il modello sigmoidale è una funzione che applica una trasformazione sui valori di Modulo di rigidezza sperimentali in modo che essi possano essere visualizzati tramite una curva con la caratteristica forma ad “S” in funzione della frequenza ridotta. La giustificazione dell’utilizzo di un modello sigmoidale per l’adeguamento dei dati sperimentali è basata su osservazioni fisiche.

L’espressione proposta da Medani e Huurman è la seguente:

$$\log(\mathcal{S}_{mix}) = \log(\mathcal{S}_{min}) + [\log(\mathcal{S}_{max}) - \log(\mathcal{S}_{min})]\mathcal{S} \quad (3.2)$$

con

$$\mathcal{S} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{10 + \log f_r}{\beta}\right)^\gamma\right]$$

dove:

$\mathcal{S}_{mix}$  = Modulo di rigidezza del materiale calcolato secondo il modello [MPa]

$\mathcal{S}_{min}$  = Modulo di rigidezza minimo del materiale ottenuto sperimentalmente [MPa]

$\mathcal{S}_{max}$  = Modulo di rigidezza massimo del materiale ottenuto sperimentalmente [MPa]

$f_r$  = frequenza ridotta [Hz]

$\gamma, \beta$  = parametri di forma

I parametri  $\gamma$  e  $\beta$  descrivono la curvatura della funzione sigmoidale  $\mathcal{S}$  e la distanza orizzontale tra l’origine e il punto di flesso (si veda Figura 3.32), i moduli di rigidezza  $\mathcal{S}_{max}$  ed  $\mathcal{S}_{min}$  sono i moduli massimo e minimo assoluti del materiale ottenuti sperimentalmente.

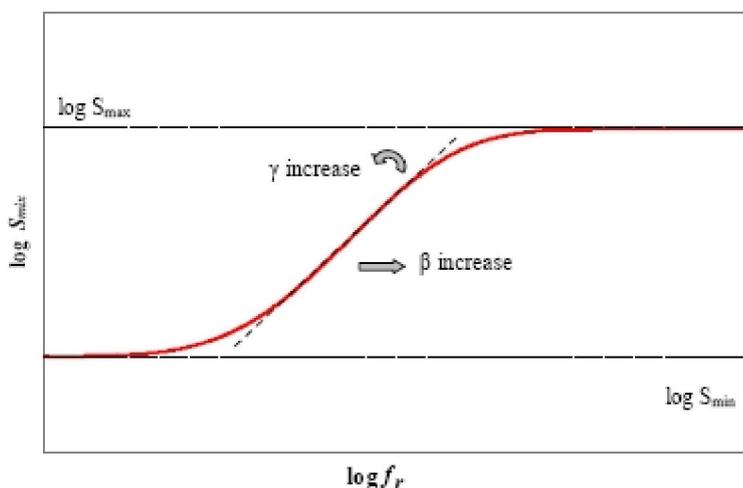


Figura 3.32 – Forma e parametri della funzione sigmoideale

Le frequenze ridotte  $f_r$  possono essere determinate tramite la procedura adottata in precedenza oppure tramite l'equazione di Arrhenius o l'equazione di Williams-Landel-Ferry.

In questo caso si è scelto di utilizzare l'equazione di Arrhenius, che meglio approssima i dati sperimentali nel caso in cui la differenza tra la temperatura delle isoterme da shiftare e l'isoterma di riferimento sia inferiore a 20 °C, secondo uno studio di comparazione effettuato da Cheung.

L'equazione di Arrhenius ha la seguente espressione:

$$\log \alpha_T = \log e^{\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (3.3)$$

dove:

$T$  = temperatura di prova [K]

$T_{ref}$  = temperatura di riferimento [K]

$H$  = energia di attivazione [J/mol]

$R$  = costante dei gas ideali, pari a 8.314 [J/molK]

Il termine  $\log f_r$  che compare nella funzione  $S$  del modello sigmoideale sarà quindi:

$$\log f_r = \log \alpha_T + \log f$$

dove:

$f_r$  = frequenza ridotta letta sulla isoterma di riferimento a cui vengono traslati i valori delle altre due isoterme

$f$  = frequenza reale alla quale la prova è stata eseguita

$T$  = "shift factor determinato per mezzo dell'equazione di Arrhenius.

I parametri incogniti del problema sono tre:  $H$ ,  $\Delta H$  e  $\Delta S$ . Queste incognite vengono determinate simultaneamente, utilizzando la funzione Risolutore (o “Solver”) di Microsoft Excel, minimizzando la somma dei quadrati degli errori tra i valori del Modulo di rigidezza calcolati tramite l’equazione del modello ( 3.2 ) e i valori determinati sperimentalmente.

La procedura di applicazione del modello sigmoidale si articola delle seguenti fasi:

- determinazione del valore massimo e minimo del Modulo di rigidezza del materiale tramite le equazioni in Figura 3.28 e corrispondente alle combinazioni frequenza-temperatura di 0.1 Hz-30 °C e 30 Hz-10 °C;
- conversione delle tre temperature in gradi Kelvin;
- implementazione delle formule ( 3.2 ) e ( 3.3 ) all’interno di un foglio di calcolo;
- calcolo del logaritmo di tutti i valori di  $E^*$  determinati sperimentalmente;
- organizzazione delle colonne contenenti i parametri coinvolti nel calcolo nel seguente ordine: f, log f,  $E^*$ ,  $E^*_{min}$ ,  $E^*_{max}$ , T,  $T_{ref}$ , R,  $H$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ,  $S$ , log  $S_{mix}$ , log  $E^*$ ,  $(\log E^* - \log S_{mix})^2$ , log  $f_r$ ,  $f_r$ ;
- assunzione di tre valori di tentativo per le incognite  $H$ ,  $\Delta H$  e  $\Delta S$  per il primo calcolo di tutti le variabili;
- avvio del componente aggiuntivo Microsoft Excel Risolutore;
- impostazione dei parametri del Risolutore: la cella obiettivo è quella contenente la somma dei quadrati degli errori tra i valori del Modulo di rigidezza calcolati tramite l’equazione del modello e i valori determinati sperimentalmente, cioè  $(\log E^* - \log S_{mix})^2$ , le celle da cambiare sono quelle contenenti le tre incognite;
- risoluzione del problema.

L’operazione iterata che svolge il Risolutore è, quindi, quella di determinare i valori delle tre incognite (  $H$ ,  $\Delta H$  e  $\Delta S$  ) in modo che esse minimizzino la somma dei quadrati degli errori tra i dati sperimentali e quelli calcolati utilizzando l’equazione del modello sigmoidale.

Il risultato ottenuto è il seguente grafico della “Master Curve” in forma sigmoidale, che riporta i valori del logaritmo del Modulo di rigidezza in funzione della frequenza ridotta. I parametri relativi alla curva restituiti dal Risolutore sono:

H [kJmol]		
246.73	10.46	6.49

*Tabella 3.16 – Parametri del modello sigmoidale determinati tramite il Risolutore*

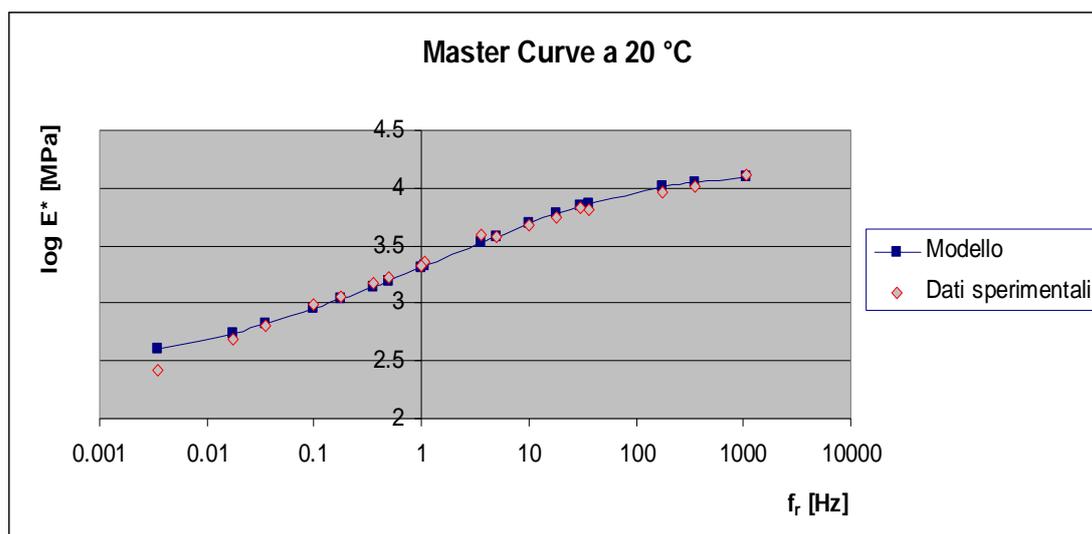


Figura 3.33 – Master Curve determinata tramite il modello sigmoide di Medani e Huurman

La curva blu è quella del modello, i punti rossi sono i dati sperimentali. Come si vede, il modello di Medani e Huurman approssima perfettamente i valori ottenuti dalle prove.

### 3.6.3 Il modello sigmoide della normativa AASHTO TP-62

Il secondo modello sigmoide preso in esame è quello sviluppato dal NCHRP Project 1-37A e basato sull'equazione riportata in seguito [25][26]:

$$\log(\mathcal{S}_{mix}) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log f_r)}} \quad (3.4)$$

dove:

$\mathcal{S}_{mix}$  = Modulo di rigidezza del materiale determinato tramite il modello sigmoide [MPa]

$\delta$  = Modulo di rigidezza minimo del materiale ottenuto sperimentalmente [MPa]

$\alpha$  = Modulo di rigidezza massimo del materiale ottenuto sperimentalmente [MPa]

$\beta, \gamma$  = parametri di forma

$f_r$  = frequenza ridotta [Hz]

Anche in questo caso, la frequenza ridotta  $f_r$  può essere calcolata matematicamente come nel metodo geometrico oppure utilizzando l'equazione di Arrhenius o di Williams-Landel-Ferry.

Il procedimento di risoluzione è del tutto analogo al caso precedente ad eccezione del numero della variabili in gioco; in questo caso i parametri che devono essere calcolati dal Risolutore per ottenere la minimizzazione dei quadrati degli errori tra i dati del modello e i dati sperimentali sono cinque:  $\tau$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  e  $H$ .

I valori dei parametri incogniti, ottenuti per tentativi successivi utilizzando il Risolutore, sono riportati in Tabella 3.17 e il grafico della “Master Curve” è mostrato in Figura 3.34.

H [kJ/mol]				
200.00	-2.40	-0.19	-20.08	25.54

Tabella 3.17 - Parametri del modello sigmoideale determinati tramite il Risolutore

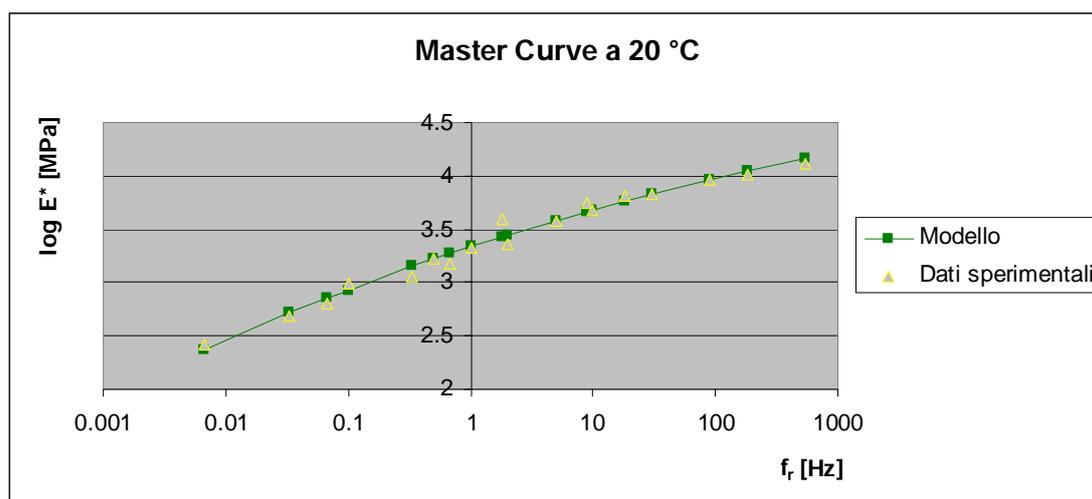


Figura 3.34 - Master Curve determinata tramite il modello sigmoideale del NCHRP Project 1-37A

Come si vede in figura, l’andamento della curva del modello proposto dal NCHRP Project 1-37A non assume una forma tipicamente sigmoideale e i dati sperimentali sono caratterizzati da una maggiore dispersione attorno alla curva stessa.

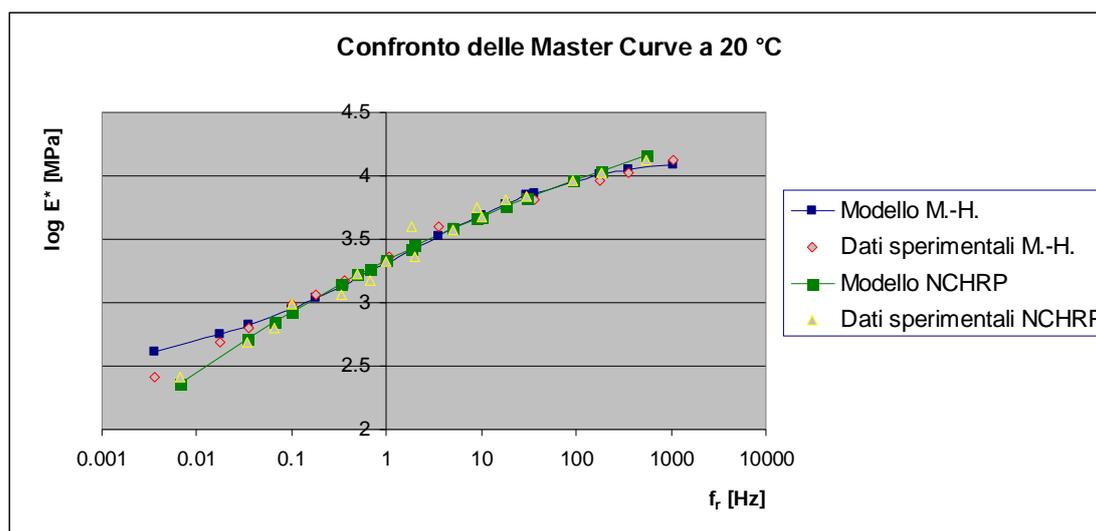


Figura 3.35 – Le Master Curve determinate tramite i due modelli sigmoidali

Sovrapponendo le due “Master Curve” ottenute dai due modelli sigmoidali e i relativi dati sperimentali traslati tramite le procedure degli stessi, è ancora più evidente la maggiore dispersione dei dati nel caso del modello del NCHRP e la sua mancata forma ad S.

Si può quindi trarre come prima conclusione che la procedura proposta da Medani e Huurman sembra essere più idonea per il calcolo della “Master Curve” con i dati a disposizione nel presente studio.

La forma del ad S del modello sigmoidale è determinata dai parametri di forma che variano in funzione dei dati sperimentali a disposizione, per ottenere una buona corrispondenza tra i dati sperimentali e la curva del modello è bene eseguire le prove a diverse temperature, un maggiore numero di temperature scelte fornisce migliori risultati.

Se, invece si sottopongono agli stessi test conglomerati bituminosi diversi, per esempio ad alto o basso modulo, con bitume modificano o non, ci si aspetta di ottenere curve che, se riportate nello stesso grafico, avranno forme diverse e saranno sfalsate verticalmente le une dalle altre. La sola osservazione delle curve ricavate dai modelli sigmoidali riesce, quindi, già a fornire un’indicazione sul comportamento reologico di un materiale rispetto ad un altro, a partire dal range di variazione del Modulo di rigidità dal valore minimo al valore massimo.

Infine, si sottolinea che la possibilità di utilizzare modelli sigmoidali per la costruzione delle “Master Curve” è indicata all’interno delle normative americane, mentre la normativa europea non specifica nessuna particolare procedura di calcolo, ma indica solamente che esse vanno ottenute tramite la traslazione dei dati lungo l’asse

delle frequenze. Le “Master Curve”, nate e utilizzate tradizionalmente nel campo dei materiali polimerici, sono ancora in fase di studio nel campo dei conglomerati bituminosi.

## **CAPITOLO 4      CONFRONTO      DELLE      DUE APPARECCHIATURE DI PROVA**

### **4.1      INTRODUZIONE**

Il presente capitolo è dedicato al confronto di due versioni successive dell'apparecchiatura per la flessione su quattro punti tramite; tramite l'esecuzione di test alle stesse condizioni di prova e con gli stessi campioni, si verificherà se le modifiche apportate abbiano un'influenza sul comportamento meccanico del materiale.

Verranno dapprima analizzate le differenze strutturali e di software che intercorrono tra le due versioni e messe in evidenza le formule utilizzate per il calcolo del Modulo di rigidezza.

Successivamente si passerà all'analisi dei risultati ottenuti dalla prove e si cercheranno e discuteranno le cause che li hanno determinati. A tal proposito si analizzerà più approfonditamente la procedura di "fitting", di cui si è già parlato nel Capitolo 3, e la variabilità riscontrata all'interno di alcune prove per arrivare ad una conclusione in merito alla confrontabilità dei dati ottenuti tramite le due apparecchiature.

### **4.2      DIFFERENZE STRUTTURALI E DI SOFTWARE DELLE DUE APPARECCHIATURE**

L'apparecchiatura e il software per la prova di flessione su quattro punti, nella versione precedente a quella utilizzata per la caratterizzazione reologica del materiale proposta nel Capitolo 3, mantengono, in generale, le strutture descritte al paragrafo 2.4.2, seppur con alcune sostanziali differenze.

Per quanto riguarda il macchinario, le differenze sostanziali si traducono nel tipo applicazione del carico e in qualche modifica dell'assetto geometrico. Il sistema utilizzato in questo caso, infatti, è di tipo pneumatico, a differenza della versione più recente che, al contrario, è di tipo idraulico.

Per quanto concerne la geometria, il provino è sempre inserito all'interno di un telaio ed è bloccato tramite quattro dispositivi di serraggio posizionati a distanza di

$L_{eff}/3$  gli uni dagli altri, come rappresentato in Figura 4.1. La deformazione del provino è sempre provocata dalla traslazione verticale dei morsetti interni.

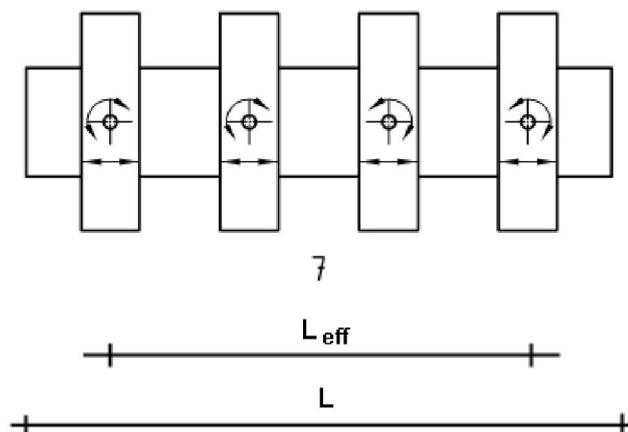


Figura 4.1 – Schema del provino inserito nei serraggi del telaio

Esiste, però, una differenza nel modo di riprodurre lo schema statico della trave doppiamente appoggiata e caricata simmetricamente da due forze concentrate. Il telaio dell'apparecchiatura più recente garantisce, infatti, i due gradi di libertà di rotazione e traslazione longitudinale garantiti da cerniere e carrelli posizionati in ogni punto di appoggio. (si ricorda quanto riportato in riferimento alla Figura 2.7). Nella versione precedente, invece, la traslazione dei due appoggi esterni è messa in atto non tramite una vera traslazione dei montanti esterni ma per mezzo della loro rotazione rispetto ad un punto di vincolo fissato alla base del telaio, si veda Figura 4.2.



Figura 4.2 – Versione precedente dell'apparecchiatura di prova

La conseguenza di questo schema geometrico è un piccolo ulteriore abbassamento del provino in corrispondenza dei serraggi esterni, in quanto essi non traslano orizzontalmente ma, ruotando attorno ai punti evidenziati in Figura 4.2, allo stesso tempo, si abbassano.

Altre piccole differenze sono:

- la diversa posizione dell'LVDT, che in questo caso si trova al centro della faccia inferiore del provino (come si vede in figura);
- la presenza di due ulteriori morse, di tipo pneumatico, che si trovano sui lati verticali dei serraggi esterni, che vengono chiuse dopo aver alloggiato il provino e che servono a centrarlo perfettamente in senso trasversale.

Dal punto di vista del software, quello che gestisce la prova sulla versione precedente del macchinario prende il nome di UTS 15.

Ha un'architettura del tutto simile all'UTS 18 ma con qualche significativa differenza computazionale. Partendo dal particolare che non ha effetti pratici sui calcoli dei parametri meccanici, si può evidenziare il fatto che il valore della deformazione da impostare corrisponde in questo caso alla deformazione totale da picco massimo a picco minimo della sinusoide; mentre nel software UTS 18 va inserita la deformazione provocata in una sola direzione del movimento di carico, che corrisponde cioè a metà della deformazione totale, considerata come somma di quella subita dal provino sulla faccia inferiore e sulla faccia superiore

Le differenze più importanti, però, si trovano nella mancanza del sistema di "fitting" dei dati e nella formula di calcolo del Modulo di rigidezza.

La procedura di "fitting" dei dati grezzi che, come si è ampiamente commentato nel capitolo precedente, ha un'influenza importante sui valori dei parametri meccanici calcolati, è stata implementata nel software dell'apparecchiatura nuova, mentre era assente nella versione precedente.

Per quanto riguarda il Modulo di rigidezza, il macchinario nuovo esegue il calcolo considerando il contributo inerziale delle masse in movimento, tramite la definizione di una massa equivalente, che tiene conto delle masse del provino, dei sensori, dei serraggi e della velocità di carico. Per facilitare in confronto delle formule relative alle due versioni del software viene di seguito richiamata la formula già indicata a pagina 74.

$$S_{mix} = \frac{12 FE^3}{Z(x_s) R(x_s) BH^3} \sqrt{1 + 2[\cos(\varphi(x_s))J(x_s) - \sin(\varphi(x_s))J(x_s)] + [J^2(x_s) + J^2(x_s)]}$$

dove

$F$  = ampiezza della forza totale applicata nei due morsetti interni [N]

$L$  = distanza tra i due morsetti esterni, cioè  $L_{\text{eff}}$  [mm]

$x_s$  = coordinata  $x$  in corrispondenza della quale è misurata la freccia di inflessione [mm] ( $A < x_s < L / 2$ ), con  $A$  = distanza tra due morsetti successivi

$Z(x_s)$  = ampiezza della flessione della trave durante un solo ciclo, misurata tra i due morsetti interni a una distanza  $x_s$  dal morsetto esterno sinistro

$R(x_s)$  = funzione di ponderazione. Funzione adimensionale dipendente dalla distanza  $x$  dal morsetto esterno sinistro, dalla coordinata  $A$  del morsetto interno sinistro e dalla lunghezza effettiva  $L$  tra i due morsetti esterni:

$$R(x) = \frac{12L^3}{A(3Lx - 3x^2 - A^2)}$$

$B$  = larghezza del provino [mm]

$H$  = altezza del provino [mm]

$\phi(x_s)$  = ritardo di fase durante un ciclo tra il carico sinusoidale applicato e la flessione misurata  $Z(x_s)$ , misurato in gradi

$I(x_s)$  = funzione d'inerzia. Funzione adimensionale dipendente dalla distanza  $x_s$  per tenere conto degli effetti inerziali della massa:

$$I(x_s) = M_{eq} \frac{Z(x_s)}{F} \omega^2 10^{-3}$$

$M_{eq}$  = massa equivalente. Massa ponderata (in kg) delle parti mobili: trave, sensore e morsetti, il cui valore dipende dalla posizione di misurazione della freccia di inflessione  $Z(x_s)$ :

$$M_{eq} = \frac{R(x_s)}{\pi^4} M_{trave} + \frac{R(x_s)}{R(A)} M_{morsetto} + M_{sensore}$$

$\omega$  = frequenza circolare del carico sinusoidale applicato [rad/s], con  $f$  frequenza misurata in Hz:

$$\omega = 2\pi f$$

$J(x_s)$  = funzione di smorzamento. Funzione adimensionale dipendente dalla distanza  $x_s$  per tenere conto degli effetti (non viscosi) dello smorzamento nel sistema (perdite di sistema):

$$J(x_s) = T_{eq} \frac{Z(x_s)}{F} \omega^2 10^{-3}$$

$T_{eq}$  = coefficiente di smorzamento equivalente. Coefficiente ponderato di smorzamento nel sistema in kg/s, il cui valore dipende dal luogo di misurazione della flessione  $Z(x_s)$ :

$$T_{eq} = \frac{R(x_s)}{R(A)} T, \text{ con } T = \text{coefficiente di smorzamento: coefficiente necessario}$$

per calcolare le perdite di sistema in kg/s.

Il software del macchinario meno recente, invece, non prende in considerazione il contributo di alcuna massa in movimento, ma calcola due tipi diversi di Modulo: un Modulo che viene definito come Rigidezza flessionale e un Modulo definito Modulo di elasticità. La differenza che intercorre tra i due sta nel considerare o meno il contributo alla deformazione dovuto alla sollecitazione di taglio.

La Rigidezza flessionale, che considera solo la tensione e la deformazione causate dal momento flettente, ha la seguente espressione:

$$S = \frac{1000\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (4.1)$$

con

$$\sigma_t = \frac{S_w P * 1000000}{wh^2}$$

$$\varepsilon_t = \frac{12\delta h * 1000000}{3S_w^2 - 4L_w^2}$$

dove

$S_w$  = distanza tra gli appoggi esterni, cioè  $L_{eff}$  [mm]

$P$  = ampiezza della forza totale nei due morsetti interni [kN]

$w$  = larghezza media del provino [mm]

$h$  = altezza media del provino [mm]

= spostamento massimo al centro del provino [mm]

$L_w$  = distanza tra due appoggi, cioè  $L_{eff}/3$  [mm]

Sostituendo le espressioni di  $\sigma_t$  ed  $\varepsilon_t$  in ( 4.1 ) si verifica immediatamente l'uguaglianza con la formula restituita dal calcolo della linea elastica, cioè l'equazione ( 1.22 ).

Il Modulo chiamato Modulo di elasticità, invece, tiene in considerazione anche la deformazione e la sollecitazione date dal taglio e ha la seguente espressione:

$$E = \frac{PL}{\delta wh} \left[ \frac{3S_w^2 - 4L_w^2}{4f} + K(i + \nu) \right] \quad (4.2)$$

con

$K$  = rapporto tra la sollecitazione di taglio istantanea e la sollecitazione di taglio media

= coefficiente di Poisson.

### 4.3 CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI

I provini N 10-14 sono stati testati tramite le due apparecchiature, secondo le stesse modalità di prova, per poterle confrontare tramite i risultati da loro restituiti.

Il numero di cicli per frequenza è stato ridotto a 100 per mantenersi piuttosto lontani dalla soglia di deformazione elastica, oltre la quale potrebbero insorgere fenomeni di fatica, per avere la certezza di testare lo stesso materiale e di non poter imputare le eventuali differenze nei valori del Modulo, nel caso si fossero verificate, a variazioni fisiche del materiale.

I dati messi inizialmente a confronto, alla luce della possibilità di applicare o non applicare la procedura di “fitting”, sono stati quelli non “fitted” per l’apparecchiatura nuova, in quanto la versione meno recente non disponeva di tale procedura di elaborazione dei dati; relativamente ai due moduli di rigidezza calcolati dall’apparecchiatura precedente, invece, è stato preso in considerazione il parametro chiamato Rigidezza flessionale, il quale non tiene conto degli effetti tenso-deformativi dovuti al taglio, in quanto essi vengono trascurati anche dal software dell’apparecchiatura più recente.

I valori del Modulo di rigidezza, espressi come sempre in MPa, in corrispondenza del centesimo ciclo sono tabulati di seguito.

Apparecchiatura nuova							
Frequenza [Hz]							
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1
N10	869	2007	2438	3949	4563	6030	851
N12	740	1799	2238	3699	4545	5710	1012
N13	791	1670	2110	3409	3841	4492	778
N14	724	1861	2296	3805	4494	5245	781

Tabella 4.1 – Risultati del Modulo ottenuti dall’apparecchiatura di prova nuova

Apparecchiatura precedente							
Frequenza [Hz]							
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1
N10	834	1543	1981	3626	4409	6314	854
N12	666	1267	1598	2665	3551	4813	632
N13	676	1199	1569	2611	3463	4915	682
N14	654	1264	1648	2723	3635	5033	723

Tabella 4.2 – Risultati del Modulo ottenuti dall'apparecchiatura di prova precedente

Questi dati sono stati riportati in un grafico in scala bilogarithmica, ottenendo le curve in Figura 4.3.

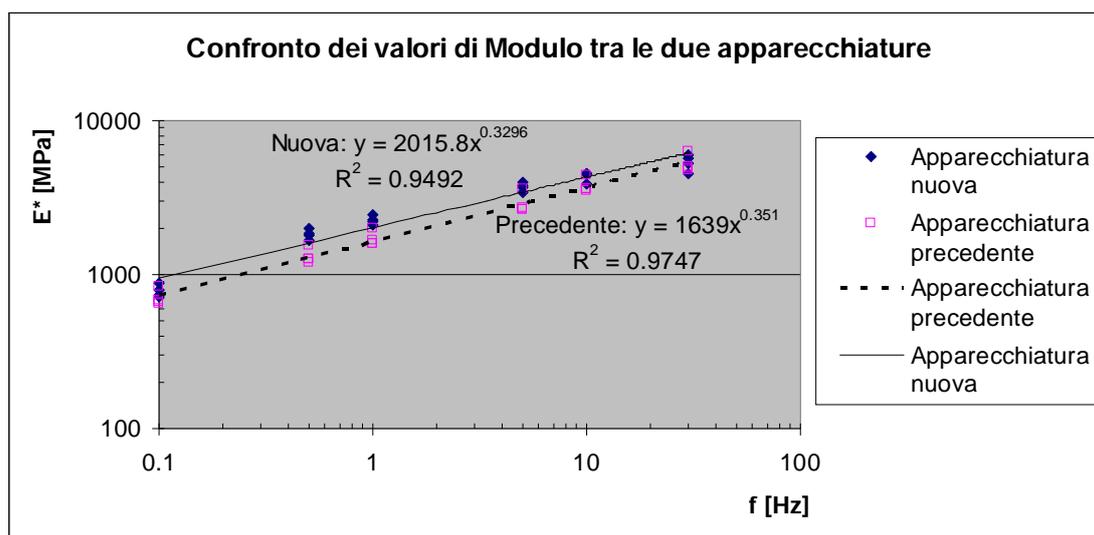


Figura 4.3 – Grafico relativo al confronto dei valori di Modulo ottenuti con le due apparecchiature di prova

Come si può notare, i valori di Modulo ottenuti con l'apparecchiatura di prova nuova sono maggiori di quelli forniti dall'apparecchiatura meno recente.

Per evidenziarne lo scarto, i dati sono stati messi a rapporto ottenendo così la percentuale indicativa della variazione. Ancora una volta, il valore di 100% indica la perfetta uguaglianza tra i due dati, valori inferiori indicano che i Moduli ottenuti con la versione precedente del macchinario sono minori di quelli ottenuti con il nuovo e viceversa.

$E_{precedente}/E_{nuova}$							
Frequenza [Hz]							
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1
N10	96%	77%	81%	92%	97%	105%	100%
N12	90%	70%	71%	72%	78%	84%	62%
N13	85%	72%	74%	77%	90%	109%	88%
N14	90%	68%	72%	72%	81%	96%	93%

Tabella 4.3 – Rapporto tra i risultati di Modulo ottenuti con le due apparecchiature di prova

I dati relativi all'angolo di fase raccolti nelle stesse modalità sono stati tabulati di seguito e riportati nel grafico in Figura 4.4.

Apparecchiatura nuova							
Frequenza [Hz]							
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1
N10	51	46.6	42.4	28.3	32.1	25.7	50.6
N12	48.5	48.5	47.8	41.8	38.5	29.2	20.4
N13	54.7	48.6	42.9	39.1	37.6	20.8	40.3
N14	56.2	53	45.8	33	35.8	44.7	39.8

Tabella 4.4 - Risultati dell'angolo di fase ottenuti dall'apparecchiatura di prova nuova

Apparecchiatura precedente							
Frequenza [Hz]							
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1
N10	41.1	37.5	32.6	20.8	18	19.3	37
N12	45.5	40.4	35.2	29.5	26.2	18.2	46.6
N13	37.2	35.9	32.8	20.3	18.8	21.3	34.7
N14	40.6	39.3	34.2	28.1	27.8	22.7	44.8

Tabella 4.5 - Risultati dell'angolo di fase ottenuti dall'apparecchiatura di prova precedente

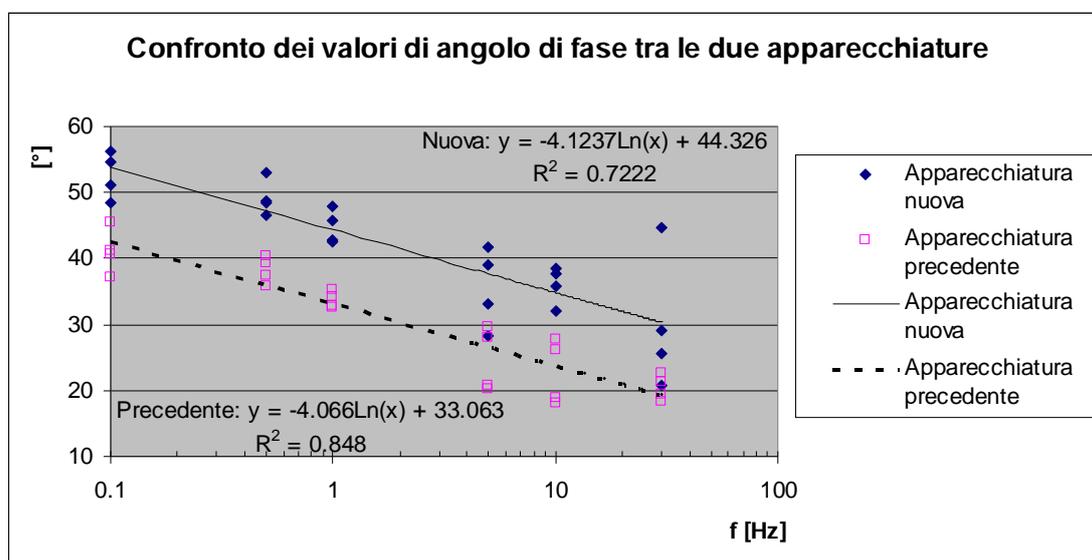


Figura 4.4 – Grafico relativo al confronto dei valori di angolo di fase ottenuti con le due apparecchiature di prova

Anche nei riguardi dell'angolo di fase, i valori ottenuti tramite l'uso dell'apparecchiatura nuova sono maggiori di quelli restituiti dall'apparecchiatura meno recente.

Allo stesso modo i dati sono stati messi a rapporto in Tabella 4.6 per valutarne la variazione.

	precedente / nuova						
	Frequenza [Hz]						
Provino	0.1	0.5	1	5	10	30	0.1
N10	81%	80%	77%	73%	56%	75%	73%
N12	94%	83%	74%	71%	68%	62%	228%
N13	68%	74%	76%	52%	50%	102%	86%
N14	72%	74%	75%	85%	78%	51%	113%

Tabella 4.6 - Rapporto tra i risultati di angolo di fase ottenuti con le due apparecchiature di prova

Come si può notare dai grafici e dalle tabelle, le differenze nei valori dei parametri meccanici restituiti dalle due apparecchiature di prova sono in alcuni casi piuttosto elevate.

Per cercare di capire quali possano essere le cause che hanno portato a tale divario si è proceduto nel seguente modo: è stata calcolata dapprima l'influenza delle masse in movimento, la quale, come sottolineato al paragrafo precedente, viene tenuta in considerazione nel calcolo del Modulo di rigidezza solamente all'interno del software UTS 18, quello, cioè, relativo al macchinario nuovo.

I risultati ottenuti sono stati espressi in percentuale di variazione sui valori del Modulo di rigidezza tenendo conto o meno del contributo inerziale di tali masse e riportati in Tabella 4.7.

Provino	Percentuale di contributo delle masse in movimento					
	0.1	0.5	1	5	10	30
N10	0.00%	0.00%	0.00%	0.24%	0.66%	4.79%
N12	0.00%	0.00%	0.01%	0.16%	0.59%	3.81%
N13	0.00%	0.00%	0.01%	0.05%	0.88%	2.04%
N14	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.24%	4.66%

Tabella 4.7 - Contributo delle masse in movimento sul valore del Modulo di rigidezza

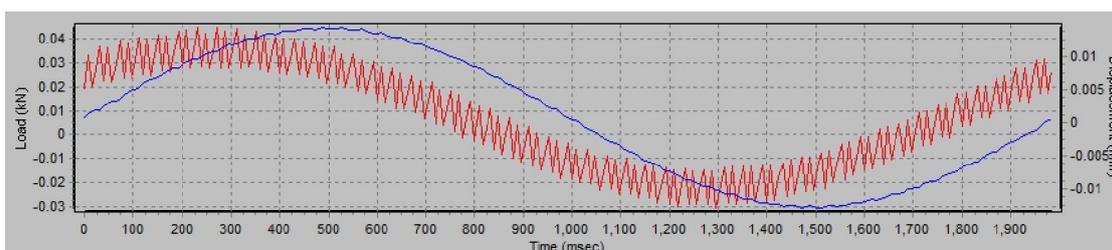
Osservando i valori in tabella, è lecito concludere che le masse in movimento non influenzano il valore del Modulo di rigidezza in modo significativo, in quanto la percentuale di contributo massimo è inferiore al 5%. Le differenze riscontrate nei due parametri meccanici non è quindi da ricercarsi nel contributo inerziale delle masse in movimento facenti parte dell'apparecchiatura di prova.

Nel corso dell'analisi dei risultati relativi alle prove eseguite per la caratterizzazione reologica del materiale documentata nel Capitolo 3, si era notata una certa irregolarità nei segnali di spostamento e carico registrati dal software, e una significativa variabilità nei valori di Modulo e di angolo di fase calcolati anche all'interno di uno stesso test. Si è pensato quindi di analizzare la variazione di tali grandezze registrate dai due software in riferimento alle stesse prove.

Si è potuto verificare come la significativa discordanza dei valori di Modulo e angolo di fase calcolati rispettivamente dalle due apparecchiature, riportati in Tabella 4.3 e in Tabella 4.6 sottoforma di rapporto, è dovuta, in alcuni casi, all'irregolarità del segnale di carico all'interno di un singolo ciclo, altre volte alla variabilità che caratterizza i parametri meccanici all'interno della stessa prova.

Si analizzeranno di seguito le due tipologie di fattore di variabilità.

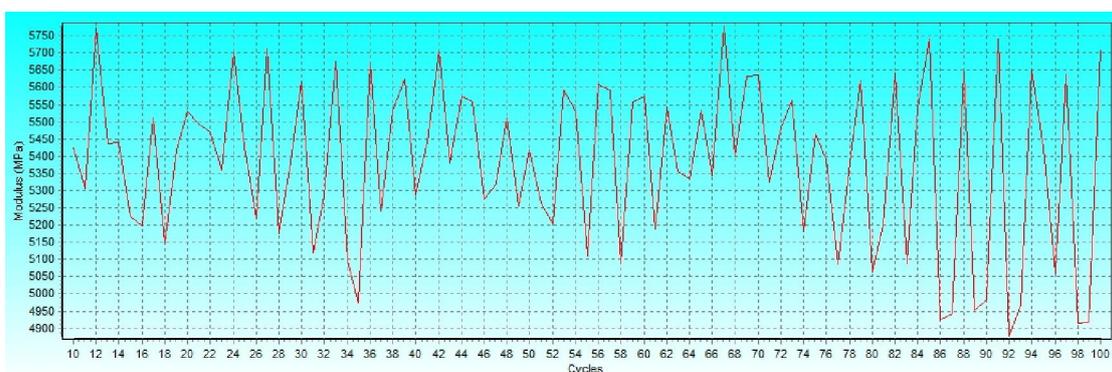
Per quanto concerne le irregolarità nell'onda di carico all'interno di un ciclo di prova, essa a volte (in genere alle basse frequenze) ha assunto, con l'uso del macchinario nuovo, l'andamento rappresentato in Figura 4.5.



*Figura 4.5 – Andamento del carico e dello spostamento in una prova a bassa frequenza*

Come si può notare, il carico è caratterizzato da valori che variano, tra un punto di acquisizione e il successivo, di una quantità superiore alla metà dei valori stessi. Questa irregolarità causerà, quindi, una forte variabilità nel calcolo Modulo di rigidezza a seconda di quale valore (tra i picchi) venga considerato essere il valore di massimo della sinusoide all'interno del ciclo. Tale variabilità è molto più marcata nel software dell'apparecchiatura nuova rispetto a quella precedente.

Per quanto riguarda, invece, la variabilità del Modulo di rigidezza all'interno di una stessa prova, in Figura 4.6 viene riportato il grafico dei valori del parametro meccanico al trascorrere dei cicli ottenuti con l'utilizzo del macchinario nuovo.



*Figura 4.6 – Variazione del Modulo di rigidezza all'interno di una singola prova*

È evidente che, essendo il Modulo di rigidità caratterizzato, in questo caso, da valori in un range di 800 MPa su una media di 5300 MPa, il rapporto tra lo stesso Modulo ottenuto all'ultimo ciclo con i due macchinari può essere estremamente variabile a seconda di quale valore si ritrovi in corrispondenza di quel ciclo. Ancora una volta questo tipo di variabilità è molto più marcato nel software dell'apparecchiatura nuova rispetto a quella meno recente.

La combinazione di questi due fattori di variabilità ha portato alla restituzione dei rapporti tra i valori di Moduli di rigidità e angoli di fase restituiti dalle due apparecchiature, tabulati in Tabella 4.3 e Tabella 4.6, che non sono indicativi dell'effettiva somiglianza o divario che si verificano nei calcoli attraverso i due software.

Infatti, valori dell'ordine del 60-70% (relativamente al Modulo, ancora inferiori per l'angolo di fase) o in un intorno del 100%, che indicherebbero rispettivamente una grande discrepanza dei dati oppure una perfetta uguaglianza, in realtà sono dovuti in parte all'ordine di grandezza del valore ritrovato al centesimo ciclo con i due software (come già illustrato in Figura 4.6), in parte al valore di carico considerato di picco nel caso si sinusoidali del carico caratterizzate da "rumore" nei valori (come detto in riferimento alla Figura 4.5). Tale rapporto è quindi imputabile unicamente al "caso".

Si è verificato, inoltre, che le masse in movimento hanno un'influenza pressoché nulla sui valori di Modulo calcolati, inoltre si ritiene che gli spostamenti provocati sul provino dall'assetto geometrico nell'apparecchiatura meno recente, in cui i montanti esterni ruotano anziché traslare, possano essere trascurati in virtù del fatto che lo spostamento massimo a cui si sottopone il campione durante la prova è dell'ordine del centesimo di millimetro. Tale spostamento, infatti, induce una rotazione dei montanti esterni di un angolo estremamente piccolo, mentre il raggio della circonferenza della traiettoria è grande se paragonato alla corrispondente corda di circonferenza; come si vede in Figura 4.7, la componente orizzontale dello spostamento è pari a  $C \cos$ , mentre quella verticale è pari a  $C \sin$ . Con un angolo molto piccolo, la componente di spostamento verticale diventa trascurabile rispetto a quella orizzontale, quindi lo schema di vincolo rotazionale può essere paragonato ad uno schema di vincolo traslativo, come quello che riproduce l'apparecchiatura nuova.

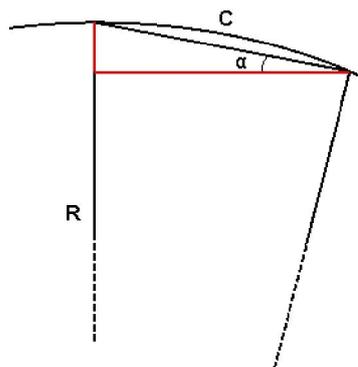


Figura 4.7 – Schema della componente orizzontale e verticale dello spostamento rotazionale del montante esterno

Alla luce di tutte le osservazioni discusse, si può concludere che le due apparecchiature restituiscono valori sostanzialmente paragonabili, ma la variabilità degli stessi all'interno delle singole prove può dare risultati non significativi se non si procede nel confronto tramite un'analisi del tipo appena illustrato.

Quanto detto finora era riferito sempre ai parametri meccanici calcolati a partire dai dati non “fitted”, in quanto la procedura è disponibile solo in uno dei due software, ma per maggiore completezza d'analisi si ritiene opportuno descrivere anche quando osservato nei confronti della procedura.

Si è proceduto pertanto al confronto anche dei dati forniti dall'apparecchiatura meno recente con quelli restituiti dall'apparecchiatura nuova con l'applicazione del “fitted”, anche se i dati in teoria non sarebbero del tutto paragonabili in quanto l'algoritmo di “fitting” non è presente nel software di questa versione del macchinario.

Il risultato di tale confronto è riportato nei grafici in Figura 4.8 e Figura 4.9.

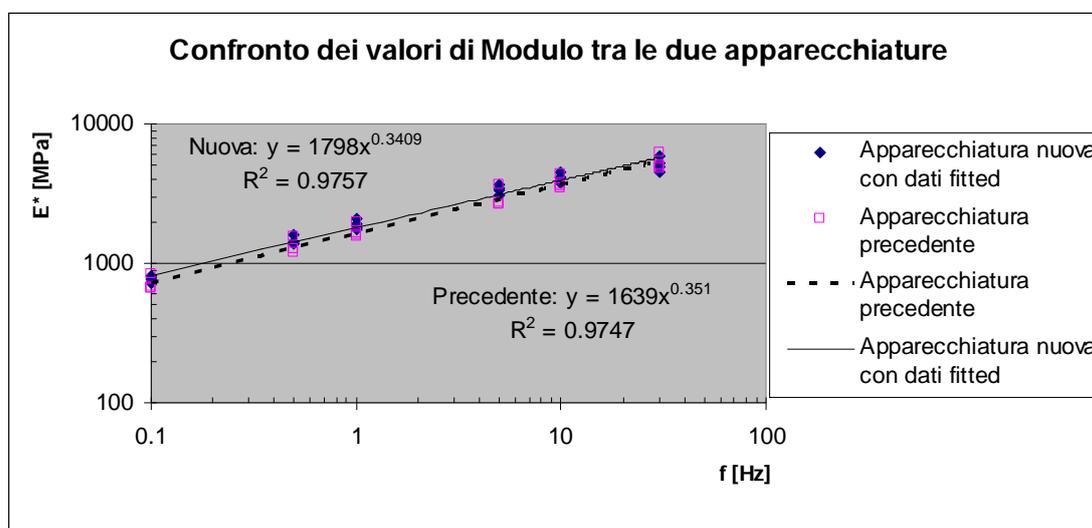


Figura 4.8 - Grafico relativo al confronto dei valori di Modulo ottenuti con le due apparecchiature di prova con dati “fitted”

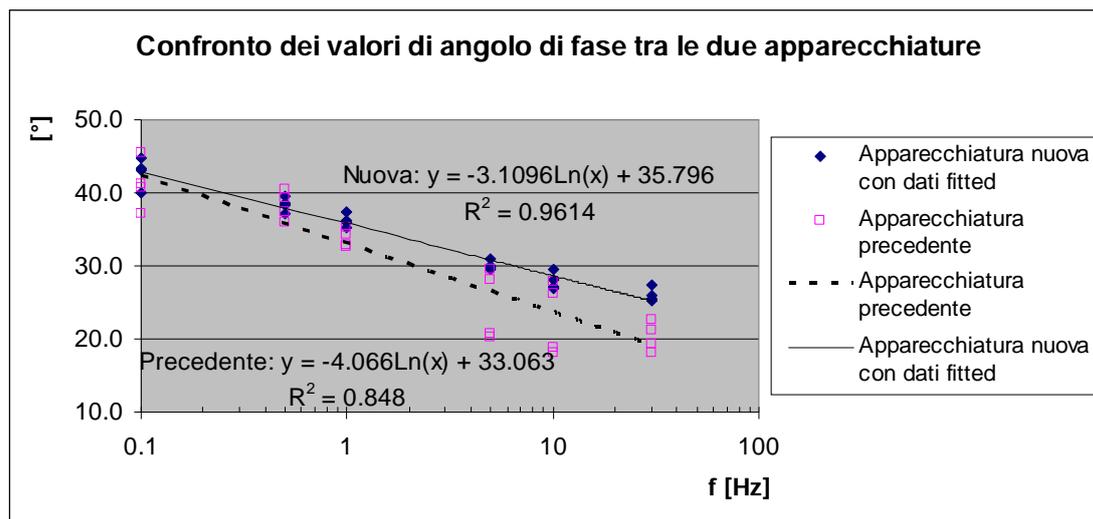


Figura 4.9 - Grafico relativo al confronto dei valori di angolo di fase ottenuti con le due apparecchiature di prova con dati "fitted"

Come si nota, il divario tra le due serie di dati ottenuti è nettamente inferiore.

L'apparecchiatura nuova, quindi, restituisce valori più prossimi a quelli dati dalla versione precedente se si applica l'algoritmo di "fitting", altrimenti è caratterizzata da una dispersione nei valori molto più elevata rispetto alla versione precedente dell'apparecchiatura. Tale dispersione, a seguito di tutte le considerazioni fatte in merito alle masse in movimento e al modo di riprodurre lo schema statico di riferimento, potrebbero essere dovute ai due diversi sistemi di applicazione del carico (pneumatico e idraulico).

L'algoritmo di "fitting", però, esegue dei calcoli di "post-processing" perché non applica un adeguamento delle curve di carico e spostamento durante l'esecuzione della prova in tempo reale, ma media i valori di spostamento e carico letti dai trasduttori (LVDT e cella di carico) durante la prova, e da questi valori mediati calcola il Modulo di rigidità e l'angolo di fase.

L'opportunità di applicare la procedura di "fitting" a tutt'oggi non è ancora stata studiata in modo approfondito e valutata accuratamente. A livello europeo, all'interno delle normative, non si fa riferimento alla validità di alcuna procedura di adeguamento delle curve di carico e spostamento per ottenere valori dei parametri meccanici che risentano in maniera minore il problema della discretezza dei segnali, perciò si ritiene più opportuno non utilizzarla per il momento.

## CONCLUSIONI

La caratterizzazione prestazionale dei conglomerati bituminosi ha assunto negli ultimi anni un'importanza rilevante ai fini della progettazione delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali.

La fase di studio per la determinazione del mix design, ovvero i rapporti volumetrici tra i materiali costitutivi, si basa su metodi atti ad individuare la ricetta ottimale in relazione ai requisiti di durabilità, lavorabilità della miscela in fase di stesa e proprietà meccaniche, che rappresentino un punto di equilibrio tra le qualità prestazionali richieste dal materiale in sito e i costi di confezionamento e posa in opera.

L'importanza della caratterizzazione meccanica dei conglomerati bituminosi riveste un ruolo ancora maggiore da quanto è entrata in vigore la Marcatura CE, la quale prescrive, tra le altre prove, anche quelle di determinazione del Modulo di rigidità dinamica del conglomerato bituminoso attraverso la norma UNI-EN 13108-20.

Alla luce dei risultati ottenuti con lo studio sperimentale svolto si è avuta la conferma della fortissima influenza che hanno le condizioni ambientali e di carico sul comportamento reologico di un materiale viscoelastico.

I grafici che riportano i valori di Modulo e di angolo di fase al variare della temperatura e della frequenza hanno evidenziato una netta variazione delle proprietà meccaniche del materiale all'aumentare della temperatura e al diminuire della frequenza di carico. Il conglomerato bituminoso, cioè, non è univocamente caratterizzato da un determinato modo di reagire alle sollecitazioni indotte in termini di deformazione, come invece accade per i materiali perfettamente elastici, che sono caratterizzati da un unico parametro che lega le deformazioni alle sollecitazioni, il Modulo di Young.

Il calcolo statistico delle deviazioni standard sui due parametri meccanici studiati ha evidenziato una maggiore dispersione dei dati all'aumentare della frequenza di carico e della temperatura.

Gli stessi dati hanno rivelato la grandissima importanza che assume la procedura di "fitting" implementata all'interno del software dell'apparecchiatura più recente, soprattutto in riferimento all'angolo di fase; infatti, la deviazione standard dei dati "fitted" è pressoché nulla, mentre si osserva una ampia dispersione degli stessi, calcolati dal sistema senza l'applicazione dell'algoritmo.

Tale procedura di regolazione dei dati di spostamento e carico, tuttavia, non è sufficiente ad evitare una certa variabilità nei parametri calcolati all'interno della stessa prova al trascorrere dei cicli. Si è visto, infatti, che il valore del Modulo di rigidezza, così come quello dell'angolo di fase, può essere caratterizzato, in alcune condizioni di prova, dalla presenza di picchi nei valori all'interno della stessa prova, che influenzano l'analisi dei risultati a seconda di quale valore viene scelto per il parametro. A tal proposito si suggerisce di considerare il valore medio calcolato sugli ultimi 5-10 cicli di prova, come indicato nella normativa americana AASHTO TP62.

Alla luce dell'importanza acclarata della temperatura sul comportamento del materiale è necessario eseguire le prove all'interno di una cella termostatica che garantisca, per certo, il mantenimento della temperatura costante durante tutta la prova. Si consiglia, quindi, di controllare più volte la temperatura dell'aria all'interno della camera tramite un termometro a mercurio o ad alcool senza riporre piena fiducia sul valore rilevato e dichiarato dai sensori della cella, in quanto tali sensori possono essere posizionati in un punto della camera termostatica in cui non circola l'aria; di conseguenza, è necessario garantire una adeguata circolazione dell'aria attraverso ventole idonee.

Per quanto concerne le "Master Curve", esse sono uno strumento efficace per ottenere informazioni sul comportamento di un conglomerato bituminoso non solo alle condizioni di carico relative alle prove eseguite, ma anche al di fuori del range di frequenze riproducibili in laboratorio. Esse vengono calcolate rispetto ad una temperatura di riferimento, ripetendo l'operazione per le diverse temperature di prova, quindi, si possono ottenere informazioni sul Modulo di rigidezza al di fuori dell'intervallo di frequenze analizzato, per tutte le temperature. La procedura che utilizza uno dei modelli sigmoidali è più laboriosa di quella che si basa sul metodo geometrico e necessita di alcuni accorgimenti nella accettazione dei risultati forniti dal suo calcolo; queste accortezze si possono acquisire con un po' di esperienza nell'utilizzo del componente Risolutore di Microsoft Excel e con la conoscenza dei risultati che ci si aspetta di ottenere data da una documentazione bibliografica pregressa.

Le difficoltà incontrate durante l'esecuzione delle prove sono state di tipo tecnico. La vite di regolazione dell'LVDT si trova in una posizione piuttosto scomoda, in un piccolo spazio tra i due dispositivi di serraggio interni e il loro montante (si ricorda Figura 2.26). Il suo movimento e il suo bloccaggio non risultano di facile esecuzione. Inoltre, la stessa posizione potrebbe rivelarsi pericolosa in quanto, nel caso in cui venga

a mancare la corrente elettrica all'interno del laboratorio, il montante si abbassa fino a fine corsa perché l'attuatore al quale è collegato non percepisce più nessun segnale di carico dalla stazione elettronica. Per la sicurezza dell'operatore, quindi, è bene avere un gruppo di continuità elettrica all'interno del laboratorio.

Sempre nei riguardi dell'LVDT, esso misura gli spostamenti massimi subiti dal campione in mezzeria relativamente ad un "ponte" metallico che poggia sul provino alla distanza di  $L/6$  dal montante esterno per mezzo di una molla, noto il rapporto che intercorre tra lo spostamento in questo punto e quello in mezzeria, vale a dire  $1/2$ . Questo sistema di misurazione era lecito, nonché necessario, nella configurazione geometrica del macchinario meno recente per il tipo di vincolo che i montanti esterni esercitano sul provino, per non considerare, cioè, il contributo di spostamento verticale dovuto alla rotazione degli stessi. Ora che la traslazione degli appoggi esterni è stata tradotta in un vero movimento di traslazione dei montanti ed è stato eliminato tale spostamento verticale dovuto alla rotazione dei montanti, questa configurazione di misurazione non ha più ragione d'essere, ma si potrebbe pensare di passare ad un sistema di riferimento degli spostamenti rispetto ad un piano fisso, anziché relativo ai due punti a distanza  $L/6$ . In questo modo verrebbero eliminate le due molle su cui poggia il "ponte" metallico che potrebbero avere anch'esse un'influenza sui risultati e l'LVDT sarebbe spostato, magari in una posizione di più facile raggiungimento.

Un altro piccolo inconveniente riscontrato durante le prove si è verificato all'atto di ricercare l'esatto allineamento delle piastre dei serraggi in modo che questi aderissero perfettamente al provino in tutti e quattro i punti d'appoggio all'inizio della prova (si ricorda Figura 2.24). Sarebbe più opportuno un sistema capace di rilevare automaticamente una posizione iniziale di allineamento o la posizione dell'asse della trave e di regolare di conseguenza la posizione verticale dei montanti, riportandola ogni volta al valore iniziale, come viene fatto ora manualmente. Occorre anche un controllo via software sullo zero iniziale, in modo che il discostamento dallo stesso durante la prova sia minimo e che il provino subisca, quindi, lo stesso spostamento sia inferiormente sia superiormente. Il software dovrebbe essere in grado di correggere in tempo reale la forza o lo spostamento applicati in modo da garantire questo, cioè di centrare le onde sinusoidi simmetricamente sull'asse zero. Inoltre, a fine prova, il provino deve ritrovarsi di nuovo in posizione zero.

Per quanto riguarda la dispersione dei valori di carico che si riscontra durante le prove, si ritiene che l'utilizzo di una cella di carico più sensibile per valori bassi di

carico potrebbe ovviare al problema. Analizzando le forze massime applicate in tutte le prove si è visto che queste non superano mai valori massimi di 600 Newton, con minimi dell'ordine della decina di Newton. La cella di carico montata sul telaio, però, ha una capacità massima di 15 kN, cioè 250 volte il carico massimo applicato. Forse, sostituendo la cella di carico con una di capacità minore, si potrebbe ottenere una maggiore accuratezza nella lettura di valori di carico poco elevati, come quelli che si riscontrano con un materiale come il conglomerato bituminoso. Nel caso di test su materiali più rigidi, come l'acciaio, o di test (come quelli di fatica) che prevedono l'applicazione di carichi maggiori, si potrebbe invece montare una cella con capacità superiore.

Infine, per quanto concerne il confronto delle due apparecchiature, sono state prese in esame le modifiche apportate nei software di gestione della prova e quelle geometriche. Si è visto che il contributo inerziale delle masse in movimento considerato solo nel software nuovo, ha una trascurabile influenza sul calcolo del Modulo di rigidità, così come il diverso assetto geometrico del telaio di prova che riproduce lo schema statico in esame in maniera leggermente differente. Da un'attenta analisi dei file restituiti dal software si è potuto inoltre osservare che il macchinario nuovo è caratterizzato da una variabilità dei dati maggiore sia per quanto riguarda l'onda di carico del singolo ciclo, sia nei confronti dei valori di Modulo di rigidità e di angolo di fase calcolati all'interno di una stessa prova. Si può concludere che le due apparecchiature restituiscono valori sostanzialmente paragonabili, ma a causa della variabilità dei dati all'interno delle singole prove, in particolare nel caso dell'apparecchiatura nuova, è necessario effettuare un'analisi più approfondita dei file senza limitarsi al confronto del valore di Modulo registrato all'ultimo ciclo.

La procedura di "fitting" dei dati, che ha il compito di ridurre il rumore nei segnali di carico e spostamento registrati dal sistema di acquisizione affinché le loro onde approssimino maggiormente l'andamento sinusoidale, si è rivelato essenziale non solo nella valutazione dei risultati inerenti alla apparecchiatura nuova ma anche per poterne confrontare i risultati con quelli forniti dal macchinario meno recente, nonostante dal punto di vista della ricerca si sia ritenuto più opportuno paragonare i valori calcolati senza il "fitting" in quanto l'apparecchiatura meno recente non disponeva di tale procedura. Tale procedura, infatti, necessita ancora di essere studiata in modo approfondito e di essere valutata accuratamente in quanto, nelle normative a livello europeo, non si fa alcun riferimento a procedure di adeguamento delle curve di carico e

spostamento progettate per ridurre gli errori causati dalla discretezza dei segnali delle apparecchiature elettroniche. La validità della procedura è messa in discussione anche per il fatto che essa non applica un adeguamento delle curve di carico e spostamento durante l'esecuzione della prova in tempo reale, ma esegue una media dei valori di spostamento e carico letti dai trasduttori e da questi valori mediati calcola il Modulo di rigidità e l'angolo di fase; si tratta, quindi, di una procedura di "post-processing".

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Sterpi, Enrico, *“Le pavimentazioni”*, Appunti per il corso di Costruzioni di infrastrutture per i trasporti 1, Università degli Studi di Genova, 2005.
- [2] Sangiorgi, Cesare, *“Analisi sperimentale e teorica dei meccanismi di collegamento con leganti bituminosi degli strati di conglomerato bituminoso delle pavimentazioni stradali”*, Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Trasporti, Università degli studi di Bologna, 2004.
- [3] Bragaglia, Massimiliano, *“Studio del comportamento visco-elastico del conglomerato bituminoso con il metodo degli elementi distinti particellari”*, Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Trasporti, Università degli studi di Bologna, 2007.
- [4] Cremon, Linda, *“Caratterizzazione meccanica di un conglomerato bituminoso con prova di Modulo IT-CY ai fini della marcatura CE”*, Tesi di Laurea in Ingegneria Civile ed Ambientale, Università degli Studi di Ferrara, 2007.
- [5] Picariello, Fabio, *“Studio del modulo di rigidità dinamico ISTM dei conglomerati bituminosi con test di trazione indiretta mediante l'utilizzo del Matta”*, Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Trasporti, Università degli studi di Bologna, 2006.
- [6] Festa, Bruna, Giuliana, Giovanni, Nicolosi, Vittorio, *“Analisi del comportamento viscoelastico dei conglomerati bituminosi drenanti”*, XXV Convegno Nazionale Stradale AIPCR, pagine: 492-518, Napoli, 2006.
- [7] Huang, Yang H., *“Pavement Analysis and Design”*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [8] European Committee for Standardization, *“EN 12697-26, Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 26: Stiffness”*, 2004.
- [9] Rowe, Geoffrey M., *“Application of the dissipated energy concept to fatigue cracking in asphalt pavements”*, Ph.D. Thesis, University of Nottingham, Department of Civil Engineering, 1996.
- [10] Viola, Erasmo, *“Scienza delle costruzioni 3 - Teoria della trave”*, Pitagora Editrice, Bologna, 1992.
- [11] Sollazzo, Alfredo, Mezzana, Mauro, *“Teoria tecnica delle travi”*, UTET, Torino, 1993.
- [12] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *“UNI EN 12697-24, Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 24: Resistenza alla fatica”*, 2005.
- [13] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *“UNI EN 12697-5, Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 5: Determinazione della massa volumica massima”*, 2003.
- [14] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *“UNI EN 12697-6, Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi”*, 2003.
- [15] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *“UNI EN 12697-8, Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi”*, 2003.
- [16] Giuliana, Giovanni e Nicolosi, Vittorio, *“Caratterizzazione del comportamento viscoso reversibile dei conglomerati bituminosi attraverso le prove di flessione”*, XIII Convegno Nazionale S.I.I.V., Padova, 2003.
- [17] NCHRP, Bonaquist R.F., Christensen, D.W. & William Stump III, *“REPORT 513, Simple Performance Tester for Superpave Mix Design: First-Article Development and Evaluation”*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003.
- [18] Read, J. M., *“Fatigue cracking of bituminous paving mixtures”*, Ph.D. Thesis, University of Nottingham, Department of Civil Engineering, 1996.

- [19] Andreozzi, Laura, “*Analisi dinamico-meccanica in sistemi viscoelastici*”, VII Scuola Nazionale di Fisica della Materia dell'INFM, Pisa, 1997.
- [20] Savarese, Rosalia, “*Sintesi e caratterizzazione strutturale, viscoelastica e meccanica di bioresine epossidiche multifunzionali reticolate con poliammide*”, Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture, Università degli Studi di Napoli “Federico II”, 2008.
- [21] Fontanari V., Pegoretti A. e Tassan M., “*Relazione tra proprietà viscoelastiche dell’adesivo e comportamento a creep di giunti incollati*”, XXX Convegno Nazionale AIAS, Alghero, 2001.
- [22] Connecticut Department of Transportation and U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Dougan, C.E. et al., “*E\* - Dynamic Modulus, Test protocol, Problems and solutions*”, Storrs, CT, 2003.
- [23] Huurman, M. & Medani, T.O., “*Constructing the stiffness master curves for asphaltic mixes*”, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering GeoSciences, 2003.
- [24] Huurman, M., Medani, T.O. & Molenaar, A.A.A., “*On the computation of master curves for bituminous mixes*”, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering GeoSciences, 2004.
- [25] Bonaquist, R. & Christensen, D.W., “*A practical procedure for developing dynamic modulus master curves for pavement structural design*”, 2005 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2004.
- [26] Bari, J. & Witczak, M.W., “*Development of a master curve (E\*) database for lime modified asphaltic mixtures*”, Arizona State University, Ira A. Fulton School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Tempe, AZ, 2004.

## **RINGRAZIAMENTI**

Giunta al termine del mio ultimo sforzo accademico desidero ringraziare tutte le persone che con il loro contributo, nelle più svariate forme che possono assumere i rapporti umani, hanno reso possibile il mio percorso e la realizzazione di questa tesi.

Il primo enorme ringraziamento va alla mia famiglia che mi ha dato la possibilità di vivere l'esperienza universitaria sostenendomi economicamente e moralmente, sopportando il disordine dei miei fogli accampati sul tavolo in fase di esame che tanto hanno fatto disperare mia mamma. Spero che tutti i loro sforzi siano in parte ripagati dalla soddisfazione di vedermi arrivare a questo traguardo e per quello che riuscirò a fare del mio futuro. A mio fratello per tutte le volte che ci siamo scontrati e per quelle discussioni in cui ci troviamo d'accordo su ciò che proprio non si può sentire in tv e sulla ridicolezza di certi gruppi musicali.

Ringrazio tutti gli amici soprattutto per le distrazioni dallo studio, le risate e gli sfoghi condivisi, a loro sono riservati i ringraziamenti meno formali nella mia copia della tesi che, per pudore, ometto in questa sede.

Ringrazio il Rag. Domiziano Mezzadri per l'accoglienza che mi ha riservato all'interno di Elletipi, per l'immane simpatia e l'allegria che ha manifestato ogni volta che mi vedeva arrivare in laboratorio.

Ringrazio il Prof. Giulio Dondi per avermi dato l'opportunità di elaborare questa interessante tesi.

Ringrazio l'Ing. Fabio Picariello per avermi introdotta nel mondo dei materiali stradali, per avermi insegnato l'utilizzo del macchinario, per il materiale che mi ha fornito e per l'aiuto che mi ha dato, per la simpatia e le battute anche quando voleva essere serio e farsi dare del Lei.

Ringrazio l'Ing. Andrea Cocurullo per l'enorme aiuto che mi ha dato in fase di stesura della tesi, senza di lui il risultato sarebbe stato lontano da questo. Per le lunghe

discussioni in cui i dubbi si rischiavano e i problemi si risolvevano nello stesso momento in cui se ne stava parlando, per i preziosissimi spunti di riflessione e le innumerevoli dritte.

Ringrazio l'Ing. Cesare Sangiorgi per avermi proposto questa tesi e aver creduto che sarei stata in grado di arrivare a quello che penso possa essere considerato un buon risultato. Per tutte le indispensabili correzioni, gli incoraggiamenti finali e per aver smesso di darmi della dark.

Ringrazio Max per l'accoglienza in laboratorio, per la pazienza che ha dimostrato quando gli rubavo il termometro, il calibro e mi impossessavo della cella termostatica.

Ringrazio tutti i dipendenti di Elletipi, in particolare Riccardo, Erik, Andrea, Morris, Matteo, Sergio, Barbara, Ombretta, Beatrice.

Ringrazio tutto il Dipartimento di Strade dell'Università di Bologna per la disponibilità e la compagnia, in particolare il Prof. Andrea Simone, l'Ing. Massimiliano Bragaglia e l'Ing. Matteo Pettinari.

Ringrazio l'Ing. Pierpaolo Viola per aver confezionato il materiale da me utilizzato per la tesi e la relativa documentazione che mi ha fornito.

Ringrazio l'Ing. Domenico Terra e il Geom. Paolo Barboni per il piacevole e prezioso tempo trascorso insieme all'aeroporto durante il tirocinio.