



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE
MARCHE**

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA
(DICEA)

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

*Caratterizzazione meccanica di miscele stradali
riciclate a freddo mediante prove cicliche monoassiali*

*Mechanical characterization of cold recycled paving
mixtures by means of uniaxial cyclic tests*

Relatore:
Prof. Ing. Andrea Graziani

Candidato:
Matteo Agostinelli

Anno Accademico 2020-2021

Indice

Introduzione.....	6
Il riciclaggio a freddo.....	8
1 Miscele bituminose a freddo	8
1.1 Materiali.....	10
2 Tipologie di miscele riciclate a freddo.....	14
3 Tecniche per il riciclaggio a freddo	16
3.1 Riciclaggio a freddo in impianto	17
3.2 Riciclaggio a freddo in sito.....	18
Caratteristiche meccaniche delle miscele riciclate a freddo	22
1 Viscoelasticità lineare	22
1.1 Rappresentazioni.....	29
1.2 Curva Maestra.....	31
2 Modellazione reologica.....	33
2.1 Modello Huet-Sayegh.....	34
2.2 Modello 2S2P1D	35
3 Modulo complesso delle miscele bituminose a freddo	36
4 Fatica.....	40
Materiali e metodi	44
1 Materiali componenti e miscela	44
1.1 Conglomerato bituminoso di recupero	44
1.1.1 <i>Analisi granulometrica</i>	45
1.1.2 <i>Massa volumica e assorbimento d'acqua</i>	47
1.2 Emulsione bituminosa	50

1.3	Cemento	51
1.4	Composizione della miscela	51
2	Preparazione dei campioni	52
2.1	Miscelazione	53
2.2	Compattazione	55
2.3	Maturazione	59
2.4	Misura della perdita di umidità.....	59
2.5	Carotaggio.....	60
2.6	Incollaggio dei riscontri.....	62
3	Metodi di prova	63
3.1	Caratterizzazione volumetrica	63
3.1.1	<i>Analisi allo stato fresco</i>	65
3.1.2	<i>Analisi allo stato indurito</i>	68
3.1.3	<i>Risultati della caratterizzazione volumetrica</i>	72
3.2	Misura del modulo complesso	74
3.2.1	<i>Correzione dell'angolo di fase</i>	81
3.3	Costruzione delle curve maestre	82
3.4	Modellazione reologica	86
3.5	Misura della resistenza a fatica.....	88
3.6	Programma sperimentale	92
	Risultati e analisi delle prove di rigidezza	93
1	Esempio di elaborazione dei risultati	93
1.1	Dati sperimentali.....	93
1.2	Costruzione delle curve maestre	96
2	Modulo complesso dei conglomerati bituminosi a freddo	98

3 Modellazione reologica.....	107
Risultati e analisi delle prove di fatica	116
1 Esempio di elaborazione dei risultati	116
1.1 Descrizione della prova	116
2 Confronto tra le prove di fatica	120
Conclusioni.....	122
Bibliografia	124
Appendice	126

Introduzione

Negli ultimi anni la ricerca sui materiali per la costruzione e la manutenzione delle pavimentazioni stradali è stata indirizzata verso il tema della sostenibilità ambientale. A tal proposito, un ruolo importante è rivestito dal riciclaggio delle pavimentazioni stradali in cui sono coinvolte grandi quantità di materiali che possono essere recuperate e riutilizzate previo opportuno trattamento. Tra le tecniche di riciclaggio, quella a freddo risulta essere tra le più vantaggiose in quanto c'è la possibilità di massimizzare il riutilizzo di materiale non rinnovabile, ridurre il dispendio di energia e di emissione di agenti inquinanti.

Lo scopo della presente tesi è quello di valutare quale sia l'effetto che la dimensione del provino produce sulla misura del modulo complesso delle miscele bituminose riciclate a freddo. Verranno studiate tre differenti geometrie di prova rispettivamente di diametro pari a 38, 75 e 100 mm, indagando sulle loro caratteristiche volumetriche ed eseguendo prove di modulo complesso e prove di fatica. Durante la sperimentazione in laboratorio, i vantaggi di utilizzare provini di diametro 38 mm sono molteplici, poiché si migliora l'efficienza andando a ridurre notevolmente i tempi di condizionamento.

La presente tesi è strutturata in cinque capitoli:

- *Il riciclaggio a freddo*: il capitolo descrive brevemente le diverse tipologie di miscele a freddo, i loro materiali costituenti e le tecniche di riciclaggio.
- *Caratteristiche meccaniche delle miscele riciclate a freddo*: si riporta la trattazione teorica della caratterizzazione meccanica dei materiali viscoelastici, del principio di sovrapposizione tempo-temperatura e dei modelli matematici per l'analisi dei risultati di prova. Infine, si affronta la caratterizzazione del

comportamento a rottura dei materiali bituminosi andando ad eseguire prove di fatica.

- *Materiali e metodi*: sono presentati i materiali utilizzati nella sperimentazione, si descrivono nel dettaglio la strumentazione e le metodologie utilizzate per il confezionamento dei provini e per la loro caratterizzazione fisica e meccanica.
- *Risultati e analisi delle prove di rigidità*: in questo capitolo sono descritti e commentati i risultati delle prove di modulo complesso eseguite sui provini di differente geometria mettendo a confronto il loro comportamento reologico, attraverso la costruzione di modelli.
- *Risultati e analisi delle prove di fatica*: nel capitolo si descrivono e commentano i risultati delle prove di fatica confrontando i diversi provini.

Capitolo 1

Il riciclaggio a freddo

In questo capitolo verrà trattato il tema del riciclaggio a freddo, si descriveranno in breve le diverse tipologie di miscele a freddo, i materiali tipicamente impiegati nel confezionamento delle miscele e le tecniche di riciclaggio. L'adozione del riciclaggio a freddo è una prassi sempre più diffusa per il risanamento delle pavimentazioni in quanto presenta diversi benefici sia dal punto di vista ambientale che economico. Questa tecnologia risulta essere, dunque, una soluzione ottimale nell'ottica dello sviluppo sostenibile e della gestione delle risorse e dei costi.

1 Miscele bituminose a freddo

Le miscele bituminose a freddo rappresentano una tecnologia sostenibile nel campo della costruzione, manutenzione e riabilitazione delle pavimentazioni. A differenza delle tradizionali miscele a caldo, la cui produzione avviene a temperature di 150-180 °C, le miscele bituminose riciclate a freddo sono prodotte a temperatura ambiente (< 60°C).

Nei conglomerati riciclati è previsto il riutilizzo di conglomerato bituminoso di recupero proveniente dalla demolizione di vecchie pavimentazioni stradali, in particolare viene riutilizzato il materiale, denominato *Reclaimed Asphalt (RA)* o fresato, proveniente dagli strati di base, binder e usura. Le motivazioni che spingono al reimpiego di tale materiale sono legate ad aspetti economici e ambientali:

- diminuzione o eliminazione completa della necessità di approvvigionamento di materiale vergine da cava;

- reimpiego, sino a percentuali del 100%, del fresato, di pavimentazioni esistenti (nel caso di riciclaggio a freddo);
- riduzione delle problematiche connesse allo smaltimento del materiale, proveniente dalla demolizione di vecchie sovrastrutture, altresì trattato come rifiuto speciale.

Altri vantaggi sono: limitazione dell'inquinamento del suolo e dell'atmosfera, derivante dal trasporto e dall'incenerimento dei rifiuti; conservazione dell'energia: con l'energia necessaria a produrre a caldo 1 kg di conglomerato bituminoso, si riescono a produrre fino a 9 kg di materiale a freddo (studi sperimentali hanno mostrato una riduzione del consumo energetico legata al mancato o minore riscaldamento dei materiali costituenti la miscela del conglomerato); inoltre la ridotta necessità di acquistare aggregati di cava, consente, oltre che la riduzione dell'energia, anche quella dei costi di trasporto e smaltimento.

Una miscela di conglomerato riciclato a freddo è costituita dai seguenti materiali:

- conglomerato bituminoso di recupero o fresato, (*Reclaimed Asphalt*, RA), proveniente dalla fresatura degli strati ammalorati della pavimentazione, impiegabile in quantità fino al 100%;
- aggregati lapidei di primo impiego, inseriti in quantità variabili per correggere la granulometria del fresato;
- legante bituminoso (emulsione bituminosa o bitume schiumato), in quantità variabili tra 11% e il 3%;
- legante idraulico, generalmente cemento, in quantità variabili tra 1% e 3%;
- acqua di aggiunta, per garantire lavorabilità alla miscela in fase di stesa e compattazione.

La mancanza di riscaldamento fa sì che l'acqua (dall'emulsione e di aggiunta) risulti essenziale per ottenere la lavorabilità della miscela a temperatura ambiente. Infatti, l'acqua agisce come lubrificante durante la fase di compattazione sostituendo il calore. Il corretto dosaggio di acqua e un'adatta formulazione di emulsione sono quindi fondamentali per evitare la rottura prematura, che potrebbe portare a disomogeneità e difficoltà di compattazione [1].

1.1 Materiali

Di seguito verranno descritti brevemente i materiali utilizzati per la produzione di miscele a freddo.

Aggregati

La norma UNI-EN 13043 definisce aggregato il materiale granulare utilizzato nelle costruzioni e lo suddivide in: naturale, industriale e riciclato. La norma suddivide l'aggregato in frazioni: grosso, fine e filler. L'aggregato principale utilizzato nelle miscele riciclate a freddo è il RA, il fresato proveniente dalla demolizione di vecchie pavimentazioni. Nelle miscele a freddo il legante bituminoso contenuto nel fresato viene considerato "inattivo" ossia incapace di apportare coesione alla miscela. Ciò implica che si considera la distribuzione granulometrica del RA senza togliere il bitume in esso contenuto: i grumi di aggregati legati dal bitume si considerano "grani".

Il fresato da utilizzare nel riciclaggio a freddo viene campionato e su di esso viene eseguita un'analisi granulometrica, in modo da ricostruirne la curva di distribuzione granulometrica. La curva ottenuta deve rientrare in opportuni fusi granulometrici prescritti dai capitolati, qualora ciò non avvenisse, si devono attuare delle correzioni con aggregati di primo impiego. Oltre all'aggregato fresato e naturale spesso si ricorre all'aggiunta di filler. Il filler naturale, o non attivo, ha come principale scopo quello di favorire la dispersione del bitume all'interno della miscela. Nel caso in cui si utilizzi il bitume schiumato, la quantità e la qualità del filler presente nella miscela di aggregato è fondamentale poiché le particelle di bitume e filler vanno a formare un mastice che funge da legante per gli aggregati più grossi. In caso di utilizzo di emulsione bituminosa, tradizionalmente si è ritenuto che la quantità di filler è meno importante, in quanto il bitume da sé riveste già parzialmente gli aggregati grossi e, in questo caso, il filler ha il solo scopo di correggere la curva granulometrica, qualora fosse mancante della frazione fine. Tuttavia, studi più recenti hanno mostrato che il filler è essenziale per ottenere miscele riciclate a freddo con alte prestazioni.

Leganti

I leganti vengono utilizzati allo scopo di dare coesione alle singole particelle degli aggregati per aumentare la resistenza meccanica e/o la resistenza all'acqua, nonché la durabilità del materiale.

Nelle miscele riciclate a freddo si adoperano due tipologie di leganti:

- i leganti bituminosi;
- i leganti idraulici.

I leganti cementizi, ovvero idraulici, promuovono la rigidità, mentre i leganti bituminosi tendono a rendere un materiale relativamente flessibile. Il materiale cementato può presentare una tendenza al ritiro, che nello strato sottoposto a carichi ripetuti si manifesta sotto forma di fessurazione a blocchi. I materiali legati con bitume, invece, sono relativamente flessibili, presentano proprietà elastiche migliori e tendono a deformarsi sotto carico.

Il tipo e il quantitativo di legante utilizzato sono, dunque, tra i principali fattori che determinano il numero di ripetizioni del carico che uno strato può sopportare prima che si manifesti una fessurazione di tale genere. Nelle miscele a freddo il legante bituminoso, al fine di poter essere adoperato a temperatura ambiente, è inserito in forma di bitume schiumato o emulsione bituminosa. Tra i leganti idraulici quello più comunemente utilizzato è il cemento. Di seguito si descriveranno, brevemente, i tre materiali leganti.

Bitume schiumato

Il bitume schiumato consiste in uno stato di temporanea bassa viscosità del legante. Il bitume passa allo stato schiumato quando piccole particelle d'acqua vengono a contatto con il bitume riscaldato a 160-180 °C: la superficie complessiva aumenta e si riduce la viscosità del bitume che quindi diventa particolarmente adatto per essere miscelato con un aggregato freddo e umido. Il grosso vantaggio del bitume schiumato rispetto all'emulsione bituminosa è un minor tempo di maturazione con conseguente riduzione dei tempi di riapertura al traffico veicolare della sovrastruttura. Di contro il processo di espansione, che necessita di un bitume molto caldo, richiede attrezzature speciali.

Emulsione bituminosa

Un'alternativa al bitume schiumato è rappresentata dalle emulsioni, in cui la viscosità del bitume viene ridotta grazie all'impiego di acqua. Si definisce emulsione un sistema eterogeneo costituito da almeno due fasi immiscibili: una prende il nome di fase dispersa (o discontinua), costituita da piccolissime goccioline o bollicine, l'altra è definita fase disperdente (o continua). Nel caso delle emulsioni bituminose il bitume costituisce la fase dispersa, presentandosi sotto forma di goccioline con diametro compreso tra 0.1 e 20 µm, mentre l'acqua la fase disperdente.

I bitumi che possono essere impiegati per il confezionamento di un'emulsione bituminosa sono bitumi puri o bitumi modificati con polimeri, inseriti in percentuali che variano tra il 40% e il 75% (percentuale in volume del bitume disperso sul volume totale dell'emulsione).

Una fase chiave nella maturazione dell'emulsione è la rottura: meccanismo attraverso il quale, in un primo momento, il bitume coagula sulla superficie degli aggregati formando una pellicola. In seguito, l'acqua evapora, defluisce o viene legata dal cemento. Finché non si utilizza l'emulsione bituminosa, il bitume deve restare in sospensione, ma quando viene impiegata è bene che l'acqua evapori. Le moderne tecnologie di produzione consentono di bilanciare la rottura dell'emulsione per ottenere un prodotto a rottura lenta o veloce, a seconda delle esigenze del progettista nello specifico, le fasi della rottura si succedono nel seguente ordine (Figura 1.1):

- a) decantazione, in cui le gocce di bitume sedimentano sulla superficie del granulo d'aggregato;
- b) flocculazione, ovvero le gocce di bitume sedimentati si raggruppano in flocculi;
- c) coagulazione, ha inizio quando i globuli di bitume flocculati si fondono, formando un coagulo;
- d) si può osservare che in seguito alla coagulazione ha inizio la presa, durante la quale il coagulo di bitume espelle l'acqua rimasta al suo interno e aderisce sempre più al granulo, formando un film totalmente anidro.

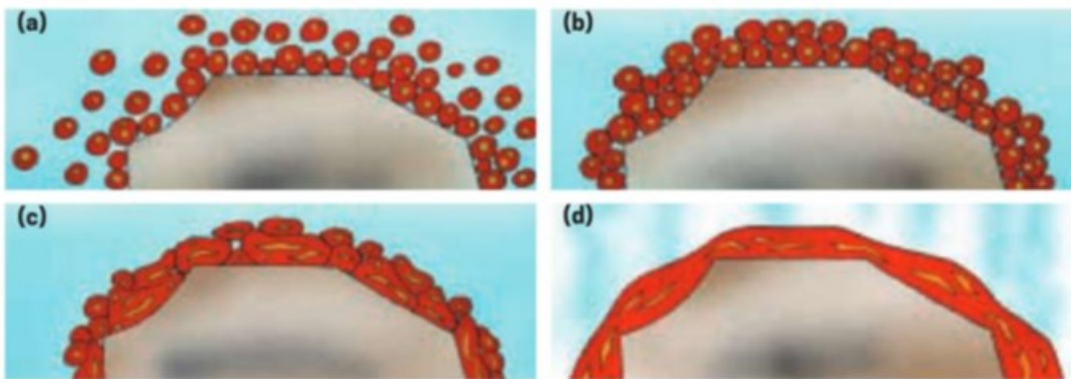


Figura 1.1 Fasi della rottura di un'emulsione: (a) decantazione; (b) flocculazione; (c) coagulazione; (d) presa

Un'emulsione necessita di emulsionanti che la mantengano stabile ostacolando la prematura flocculazione e la coalescenza delle goccioline di bitume. Gli emulsionanti sono agenti chimici dotati di cariche elettriche (negative e positive) in grado di essere assorbiti dalle goccioline di bitume a cui conferiscono una carica positiva o negativa. In

questo modo le particelle di bitume si respingono a vicenda e non incorrono nei fenomeni di flocculazione e coalescenza.

Proprio in relazione agli emulsionanti adottati è possibile suddividere le emulsioni in:

- emulsioni bituminose anioniche (carica negativa delle particelle di bitume), basiche;
- emulsioni bituminose cationiche (carica positiva), acide.

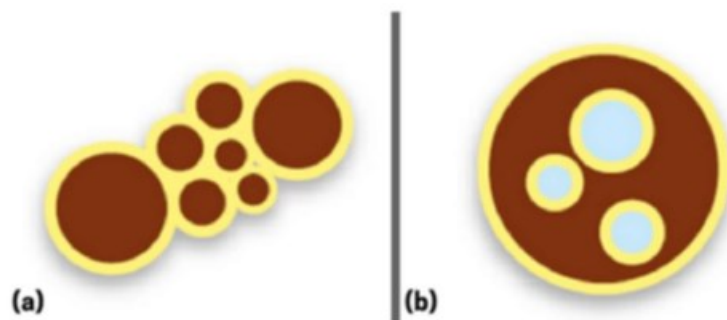


Figura 1.2 a) Flocculazione; b) coagulazione

Le emulsioni sono inoltre caratterizzate in funzione del contenuto di bitume residuo.

Infine, si possono categorizzare in funzione della velocità di rottura, cioè il tempo necessario affinché l'acqua si separi dal bitume e inizi il fenomeno della presa. In base ad essa, le emulsioni si distinguono in:

- emulsione super rapida (RR);
- emulsione rapida (R);
- emulsione media (M);
- emulsione lenta (L);
- emulsione sovrastabilizzata (LL).

In accordo alla normativa europea UNI EN 13808, un'emulsione bituminosa viene classificata con un codice alfanumerico in cui:

- la prima lettera indica la polarità (C per cationica, A per anionica);
- il secondo termine è un numero che individua il contenuto di bitume residuo;
- le lettere successive indicano la tipologia di bitume e la presenza di eventuali agenti modificanti (la lettera B indica il bitume stradale, l'eventuale lettera P individua la modifica con polimeri; infine, se è presente flussante in quantità superiore al 3% si aggiunge la lettera F);
- l'ultimo numero indica la velocità di rottura (da 2 per rottura super rapida a 10 per l'emulsione sovrastabilizzata).

Cemento

La presenza del cemento nelle miscele conferisce rigidità e ne incrementa dunque la capacità portante, migliorando la distribuzione dei carichi di traffico sugli strati sottostanti; tuttavia, una rigidità eccessiva è controproducente, in quanto rende la pavimentazione più fragile e soggetta a fessurazioni da fatica. I cementi sono impiegati nel riciclaggio a freddo in quantità variabili in relazione alla funzione svolta dallo strato riciclato: valori compresi tra 1.5% e 2% sono usualmente adottati per gli strati di base, mentre percentuali fino al 2.5% per gli strati di fondazione o di sottobase.

2 Tipologie di miscele riciclate a freddo

Le miscele a freddo possono essere classificate in accordo alle linee guida della Asphalt Academy, in funzione delle percentuali impiegate di cemento e bitume (Figura 3). L'uso combinato dei due leganti permette di sfruttare gli aspetti positivi di entrambi, eliminando e/o limitando quelli negativi. La combinazione ideale di legante cementizio e legante bituminoso dipende dalla funzione che deve svolgere il materiale all'interno della pavimentazione considerata.

Dalla combinazione dei dosaggi dei due leganti si possono ottenere conglomerati con caratteristiche diverse. Quando il cemento è il legante dominante la miscela mostra un comportamento più rigido, resistente alle deformazioni permanenti e ad elevata capacità portante, mentre quando il bitume è il legante prevalente la miscela è più flessibile e assume termo-dipendenza, caratteristiche duttili e a maggior resistenza a fatica assumendo dunque un comportamento che si avvicina a quello di un conglomerato bituminoso a caldo.

Nel grafico in Figura 1.3 è possibile individuare cinque grandi "categorie" all'interno delle miscele riciclate a freddo contenenti leganti bituminosi e/o cementizi:

- *Portland Cement Concrete* (PCC): miscele che hanno una percentuale di cemento maggiore di 6 e percentuale di bitume nulla;
- *Cement Treated Materials* (CTM): miscele che hanno contenuto di cemento compreso tra l'1 e il 6% e contenuto di bitume nullo;
- *Cement-Bitumen Treated Materials* (CBTM): miscele che hanno i contenuti di cemento e bitume compresi tra l'1 e il 3 %;

- *Bitumen Stabilized Materials* (BSM): miscele con un contenuto di cemento massimo dell'1% e contenuto di bitume compreso tra 1 e 3%;
- COLD MIX ASPHALT: miscele con cemento compreso tra 0 e 2% e con bitume compreso tra 3 e 6 %.

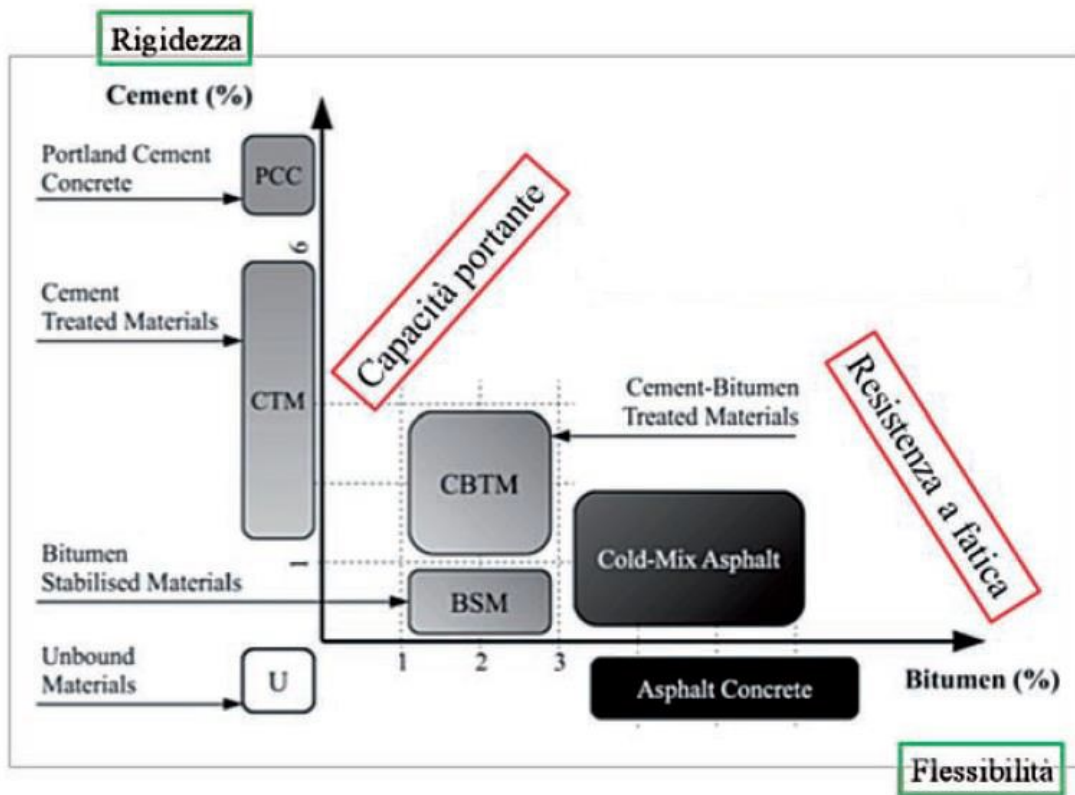


Figura 1.3 Composizione delle miscele in funzione del rapporto cemento/bitume

Con bassi dosaggi di cemento e bitume il comportamento della miscela è simile a quello di un materiale granulare: all'aumentare del rapporto bitume/cemento aumenta la coesione interna e quindi la dipendenza dalla temperatura; al contrario aumenta la rigidità del materiale e questo risulta maggiormente soggetto a fessurazioni da ritiro [2].

Le miscele studiate nella presente sperimentazione possono essere classificate come CBTM e nello specifico *Cement Bitumen Emulsion Materials* (CBEM) caratterizzate da un comportamento evolutivo dovuto alla presenza di emulsione bituminosa e di cemento. Infatti, sia la rottura dell'emulsione bituminosa, sia l'idratazione del cemento, sono fenomeni che si sviluppano progressivamente nel tempo. Ciò porta a una variazione della struttura della miscela, delle sue proprietà fisiche e di quelle meccaniche. Lo studio di tali proprietà non può pertanto prescindere dall'analisi del processo di maturazione (*curing*).

Il prodotto finale, tuttavia, seppur si distingue principalmente per il processo di maturazione iniziale che dipende dalla evaporazione dell'acqua e dall'idratazione del cemento, esibisce un comportamento meccanico simile al conglomerato bituminoso (nonostante le caratteristiche meccaniche delle miscele a freddo sono generalmente inferiori).

3 Tecniche per il riciclaggio a freddo

Le tecniche di riciclaggio possono essere classificate in base alla temperatura, distinguendo il riciclaggio a caldo da quello a freddo (temperatura ambiente), e in base al luogo di confezionamento della miscela, quindi in sito o in impianto. Grazie al riciclaggio dei conglomerati bituminosi è possibile reimpiegare il fresato fino al 40% negli impasti a caldo e fino al 100% nelle tecniche a freddo.

Il riciclaggio a caldo viene effettuato prevalentemente in impianto ed è un processo che consente di ottenere miscele ad alte prestazioni (generalmente paragonabili a quelle dei conglomerati prodotti con solo materiale vergine), rendendolo idoneo per qualsiasi tipo di impiego. Tuttavia, per l'utilizzo del fresato nei conglomerati a caldo va prevista una modifica al ciclo produttivo dell'impianto, in quanto è necessario il riscaldamento dello stesso prima dell'inserimento in camera di miscelazione per evitare un abbassamento della temperatura della miscela ma questo potrebbe causare un'ossidazione eccessiva del bitume nuovo o addirittura la sua combustione, pregiudicando la durabilità e la lavorabilità del conglomerato finale. Per questo motivo le quantità di conglomerato bituminoso sono limitate al massimo al 50%, ma, nella pratica comune, generalmente non si supera il 20%.

Un'alternativa alla miscelazione in impianto è costituita dal riciclaggio in sito: questo grazie a degli impianti mobili semoventi, anche detti "treni a unità multipla". Il riciclaggio in sito viene generalmente utilizzato per la produzione di miscele a freddo. I treni di riciclaggio consentono di fresare la pavimentazione usurata, miscelare il materiale recuperato con acqua, legante bituminoso (emulsione bituminosa o bitume schiumato) e stendere, infine, il conglomerato con la vibrofinitrice e con i rulli gommati per far fuoriuscire l'acqua in eccesso.

3.1 Riciclaggio a freddo in impianto

Il riciclaggio a freddo in impianto può essere effettuato sia con attrezzature e macchinari specifici installati in modo permanente, sia con impianti semoventi installati in prossimità dei cantieri stradali.

Analogamente ai riciclati a caldo possiamo distinguere impianti continui e discontinui: la differenza sta nelle modalità di dosaggio degli aggregati. Negli impianti di tipo continuo gli aggregati vengono introdotti tramite nastri trasportatori, mentre in quelli di tipo discontinuo vengono prima dosati e poi inviati alla miscelazione. Un impianto fisso per il riciclaggio a freddo è composto da: un sistema di frantumazione e/o selezionatura del fresato bituminoso, un sistema di dosatura per il fresato e per gli eventuali aggregati di integrazione, un silos per il cemento (o altro filler attivo) con abbinata una coclea a velocità variabile, un serbatoio di stoccaggio dell'emulsione bituminosa o del bitume per schiumatura, un serbatoio per l'acqua, un sistema di mescolamento di tipo continuo a due alberi, rampe di spruzzatura per l'acqua con misuratori di portata, rampa per l'emulsione, attrezzature, strumenti di controllo e pesatura, al fine di garantire il continuo controllo sul processo, un'apparecchiatura di scarico del mescolatore.

Una volta selezionati gli inerti e mescolati, vengono aggiunti: il bitume tramite emulsione bituminosa o bitume schiumato, l'acqua, il filler e il cemento. Terminata la miscelazione, il materiale viene caricato sui mezzi diretti in cantiere, oppure viene stoccato in attesa della messa in opera.

I principali vantaggi offerti dal confezionamento delle miscele in un impianto fisso rispetto alla miscelazione in sito comprendono tra l'altro:

- Controllo dei materiali aggiunti. Mentre il riciclaggio in sito permette di eseguire solo pochi controlli sul materiale recuperato da una pavimentazione esistente, confezionando le miscele in un impianto centralizzato si può ottenere un prodotto finale conforme a specifici requisiti aggiungendovi diversi tipi di aggregato. I materiali da aggiungere possono essere stoccati e testati prima della miscelazione e le rispettive percentuali possono essere modificate secondo le esigenze.
- Qualità di miscelazione. Si possono impostare diversi parametri operativi del mescolatore forzato per variare opportunamente il tempo che il materiale trascorre nel vano di miscelazione, in modo da modificare la qualità della miscela.

- Stoccabilità. Specialmente nel caso di materiale trattato con bitume schiumato il prodotto miscelato può essere messo a parco e usato nel momento in cui è richiesto. Perciò viene meno l'interdipendenza fra il processo di miscelazione e quello di stesa.

Di contro però oltre ai costi per il trasporto, lo stoccaggio e la gestione del materiale e all'impatto sul traffico veicolare a causa dell'apertura del cantiere sono richiesti anche dei costi aggiuntivi dovuti alla necessità di adeguare impianti pre-esistenti (di solito per misti cementati) alla produzione di miscele a freddo legate con bitume. Per questi motivi, solitamente si usa il riciclaggio in impianto solo quando si prevede la costruzione di uno strato superficiale o uno strato per strade ad elevato traffico in modo da garantire prestazioni finali più affidabili.

3.2 Riciclaggio a freddo in sito

Abbiamo già visto quali siano i notevoli vantaggi del riciclaggio in generale, e del riciclaggio a freddo in particolare; tuttavia quest'ultima tipologia, sviluppata in sito, rappresenta la tecnologia che favorisce il maggior vantaggio economico ed ambientale in assoluto, garantendo anche l'affidabilità tecnica del risultato finale, e che per tali motivi risulta sempre più diffusa.

Il riciclaggio a freddo viene realizzato in situ mediante l'utilizzo di apposite apparecchiature, che permettono la miscelazione in continuo del fresato/materiale in sito, con emulsione bituminosa o bitume schiumato, sostanze stabilizzanti cementizie, acqua e aggregati vergini di integrazione per la correzione del fuso granulometrico, in caso di necessità.

Il riciclaggio a freddo è classificabile secondo tre diverse tipologie:

1) riciclaggio in profondità

Il riciclaggio in profondità è la tecnica più utilizzata nel caso in cui si debba effettuare un intervento strutturale, ossia di consolidamento di pavimentazioni preesistenti e deteriorate, con strati sovrastanti sia spessi che sottili. La profondità dell'intervento è generalmente superiore ai 15 cm, terminato il riciclaggio, è necessario stendere un nuovo manto. Questa tipologia di riciclaggio, si colloca tra i progetti di risanamento delle pavimentazioni stradali.

2) riciclaggio superficiale

Si ricorre a questo tipo di tecnica nei casi in cui la sottofondazione sia solida, tranne per alcuni punti deboli in corrispondenza della pavimentazione superficiale, ma in generale la portanza dell'intero pacchetto stradale non sia ancora compromessa; vengono così eliminate gravi fenditure degli strati, e contemporaneamente migliorata la transitabilità dei piani viabili. Il riciclaggio superficiale si svolge a profondità variabili tra 8÷15 cm.

3) miglioramento di strade inghiaiate non asfaltate

È possibile migliorare le strade inghiaiate non asfaltate riciclando la ghiaia preesistente e aggiungendola ad emulsione bituminosa o a bitume schiumato. Le profondità di questa tipologia di intervento vanno dai 10 ai 15 cm.

Per il riciclaggio in sito è utilizzato un treno di riciclaggio (Figura 1.4). Esso è costituito da un insieme di macchine operatrici semoventi, che possono differenziarsi in base al tipo di macchinari utilizzati, in funzione delle modalità previste per l'intervento; per esempio nel caso di riciclaggio con bitume schiumato, sarà composto da:

- fresatrice-riciclatrice (Figura 1.5);
- mescolatrice (cisterna per l'acqua, dosatore e mescolatore, eventuali silos del cemento e spandimento);
- autocisterna contenente bitume a caldo;
- autocisterna per il rifornimento di acqua (di solito posta davanti alla riciclatrice);
- rullo vibrante per la compattazione.

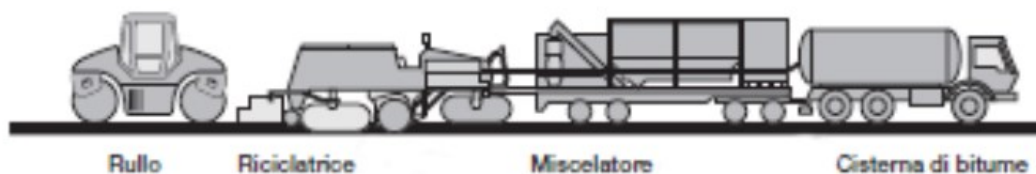


Figura 1.4 Esempio di treno di riciclaggio



Figura 1.5 Riciclatrice

La prima macchina è generalmente una fresa, che lavora alla profondità prevista dall'intervento; il fresato viene quindi caricato dalla macchina che segue, impastato con emulsione o schiuma di bitume, acqua e additivi, per poi essere steso e compattato.

Nel corso degli anni si è poi passati dalle frese e dalle stabilizzatrici alle attuali riciclatrici specializzate: si parla in questo caso di sistema "a singola unità", nel quale la miscelazione del nuovo conglomerato riciclato avviene nella stessa unità nella quale avviene la fresatura, che si differenzia dal sistema "treno di riciclaggio", nel quale invece la fresatrice e la mescolatrice sono due unità distinte. In particolare, in quest'ultima tipologia, la pavimentazione viene prima demolita e successivamente accumulata sotto il treno di riciclaggio, sottoforma di cordolo continuo lungo l'asse stradale, che verrà raccolto dalla mescolatrice che segue: questa macchina è provvista nella parte anteriore di un nastro trasportatore, che permette di convogliare il materiale per una ulteriore frantumazione ed una successiva vagliatura, arrivando infine al mescolatore insieme al legante e agli additivi. Le moderne riciclatrici sono progettate per il trattamento di uno strato notevole della pavimentazione, mediante un'unica passata, e pertanto sono macchine di grandi dimensioni, ma anche elevate prestazioni, che possono essere montate su cingoli o su ruote gommate: si possono addirittura stabilizzare strati della profondità di 30 cm.

La parte più importante di queste macchine, è costituita da un tamburo di fresatura/miscelatura, dotato di un notevole numero di utensili da taglio in acciaio temprato, che ruotando fresano la pavimentazione stradale ammalorata: la rotazione

avviene in senso antiorario rispetto alla direzione di trattamento della pavimentazione (Figura 1.6).

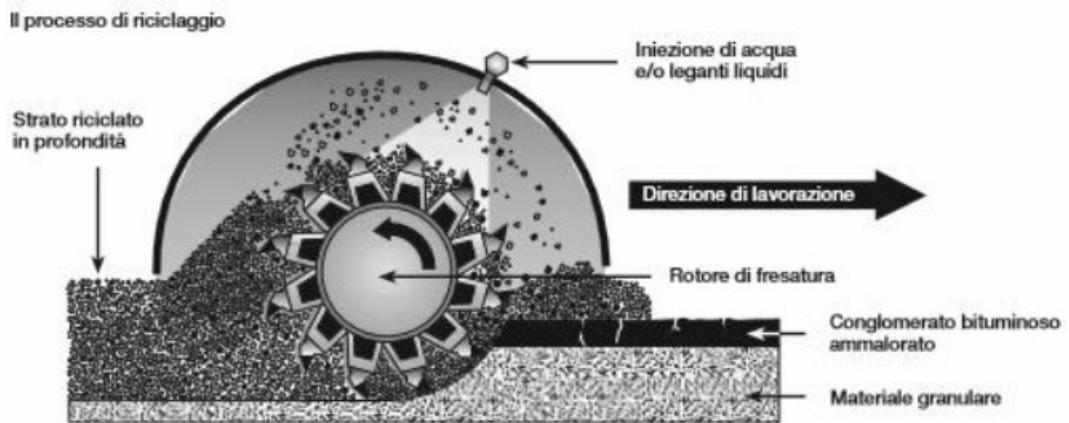


Figura 1.6 Operazione di fresatura della pavimentazione

Durante la fresatura, l'acqua contenuta in una cisterna collegata alla riciclatrice viene dosata con precisione tramite un impianto di iniezione controllato da un microprocessore, spruzzata all'interno della camera di fresatura e attentamente miscelata al materiale di recupero, affinché esso raggiunga il grado di umidità ottimale per il successivo costipamento.

Ogni treno di riciclaggio può quindi essere diverso, a seconda dell'applicazione e del tipo di stabilizzante impiegato; tuttavia un aspetto comune è rappresentato dal fatto che la riciclatrice funga da locomotiva e spinga o tiri l'attrezzatura ad essa collegata attraverso barre di spinta o di traino. Qualora il bitume venga impiegato insieme al cemento, quest'ultimo può essere aggiunto mediante apposito mescolatore collocato davanti la riciclatrice, con la cisterna dell'emulsione bituminosa in testa al treno. Una volta riciclato, il materiale è soggetto a una prima passata da parte di un rullo compressore che lo consolida, di seguito viene profilato da una moto livellatrice prima di essere costipato da un rullo vibrante.

Pure nella semplicità delle operazioni, questo metodo garantisce una elevata produttività; inoltre, la ridotta lunghezza del treno di riciclaggio lo rende compatibile anche per interventi in area urbana [3].

Capitolo 2

Caratteristiche meccaniche delle miscele riciclate a freddo

In questo capitolo vengono riportate le basi teoriche della caratterizzazione meccanica dei materiali viscoelastici. Si illustreranno dapprima le risposte meccaniche dei materiali bituminosi nel dominio viscoelastico lineare a sollecitazioni di tipo variabile con legge oscillatoria sinusoidale, dopodiché verranno presentati il principio di sovrapposizione tempo-temperatura ed i modelli matematici che sono utilizzati per l'analisi dei risultati di prova. Infine, verrà affrontata la caratterizzazione del comportamento a rottura dei materiali bituminosi andando ad eseguire prove di fatica.

1 Viscoelasticità lineare

A causa della presenza di bitume, i materiali a freddo con emulsione bituminosa (*Cold Bitumen Emulsion* CBE), così come tutti i materiali bituminosi, sono caratterizzati da un comportamento che dipende dalla temperatura, dalla frequenza e dall'ampiezza del carico applicato. In funzione dell'ampiezza dello sforzo applicato e il numero dei cicli di carico, si considerano quattro aspetti principali di comportamento quando si modella la risposta dei materiali bituminosi [4; 5]:

- rigidità ed evoluzione della rigidità nel tempo nel dominio lineare;
- fatica ed evoluzione del danno;
- accumulo di deformazione permanente;
- fessurazione e propagazione delle fessure, in particolare a bassa temperatura.

Si possono distinguere tre comportamenti principali, in relazione all'ampiezza di deformazione ϵ e al numero di applicazioni del carico:

- A grandi deformazioni il comportamento è marcatamente non lineare anche per un numero ridotto di applicazioni di carico.
- A piccole deformazioni il comportamento è viscoelastico lineare (*linear viscoelastic LVE*), se il numero di cicli non è troppo elevato.
- Qualora invece, a differenza dei due precedenti casi, il numero di cicli di carico sia consistente, il fenomeno del danno è predominante anche in presenza di piccole deformazioni, si parla quindi di fatica del materiale.

I comportamenti finora descritti vengono ben rappresentati in Figura 2.1 [6].

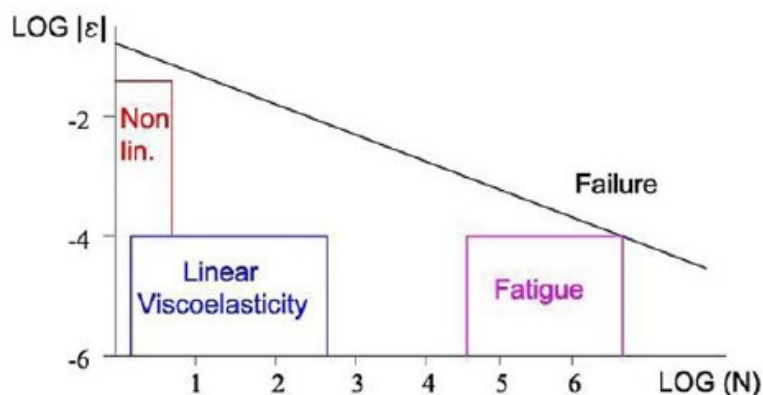


Figura 2.1 Domini di comportamento per le miscele bituminose, (ampiezza della deformazione in funzione del numero di cicli)

Nel dominio LVE, il materiale ha un comportamento a metà strada tra quelli di un materiale elastico e di un materiale viscoso. Si possono identificare due limiti: ad alte frequenze, o a temperature molto basse, il materiale bituminoso può essere considerato perfettamente elastico, mentre a frequenze molto basse frequenze o ad alte temperature, è considerato perfettamente viscoso.

Nel caso di materiali viscoelastici, la caratterizzazione meccanica viene generalmente effettuata considerando prove di creep, di rilassamento o di carico dinamico per valutare la risposta del materiale in funzione del tempo e della temperatura di carico.

Creep

La prova di creep consiste nel misurare la deformazione dipendente dal tempo $\epsilon(t)$ risultante dall'applicazione di una sollecitazione monoassiale costante σ_0 come illustrato in Figura 2.2. Le tre curve rappresentate in Figura 2.2 rappresentano le deformazioni

misurate a tre diversi livelli di sollecitazione, ognuno dei quali è il doppio della grandezza del precedente. Si osserva che quando la sollecitazione è raddoppiata, la deformazione risultante è raddoppiata su tutto il suo intervallo di tempo. Questo accade se il materiale è caratterizzato da una risposta di tipo lineare.

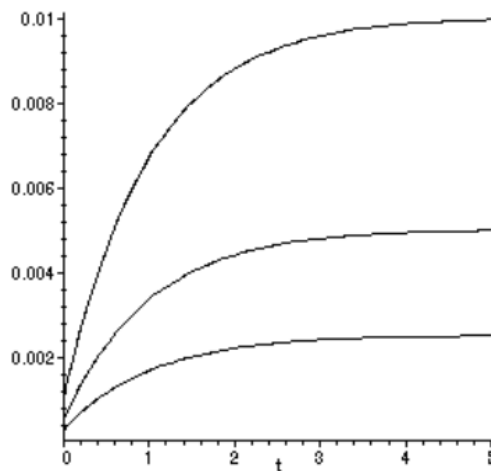


Figura 2.2 Sforzo di creep a varie sollecitazioni costanti

Se le deformazioni da creep prodotte in un dato momento fossero tracciate in ascissa in funzione della sollecitazione applicata in ordinata, si otterrebbe una curva di sforzo-deformazione "isocrona". Se il materiale è lineare, questa "curva" sarà una linea retta, con una pendenza che aumenta al diminuire del tempo scelto. Per i materiali lineari, la famiglia delle storie di deformazione $\varepsilon(t)$ ottenute a varie sollecitazioni costanti possono essere sovrapposte normalizzandole in base alla sollecitazione applicata. Il rapporto tra deformazione e sollecitazione è chiamato *compliance* C , e nel caso di deformazione variabile nel tempo derivante da una sollecitazione costante il rapporto è la *creep compliance* C_{crp} :

$$C_{crp} = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}$$

Una forma tipica di questa funzione è mostrata in Figura 2.3, tracciata in funzione del logaritmo del tempo. Si noti che la forma logaritmica del grafico cambia drasticamente la forma della curva, allungando la porzione relativa alla risposta ottenuta per brevi tempi di carico e comprimendo la regione ottenuta per tempi di carico lunghi. Al momento del carico, il materiale tende inizialmente allo stato vetroso C_g che è la deformazione elastica

corrispondente alla distorsione del legame. Nel tempo C_{crp} aumenta fino a raggiungere un valore di equilibrio o gommoso C_r , corrispondente all'estensione gommosa del materiale. Il valore lungo l'ascissa come $\log \tau$ segnala il punto di flesso e il passaggio dalla pendenza crescente a quella decrescente; τ è chiamato il "tempo di rilassamento" del processo di creep.

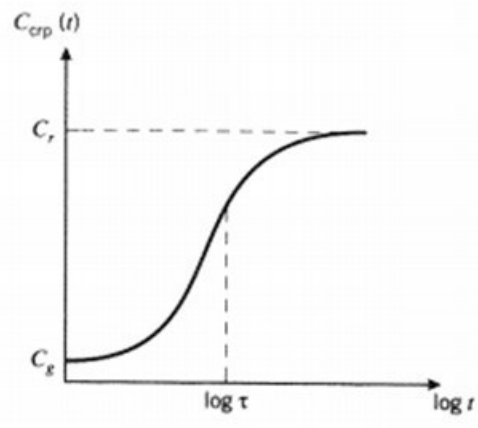


Figura 2.3 La funzione di creep compliance $C_{crp}(t)$

Rilassamento

La prova di rilassamento consiste nel monitorare lo sforzo dipendente dal tempo risultante da una deformazione costante, come si vede in Figura 2.4. Tale comportamento è l'inverso della Figura 2.2; qui le curve di sollecitazione corrispondono a tre diversi livelli di deformazione costante, ognuno dei quali è il doppio della grandezza del precedente.

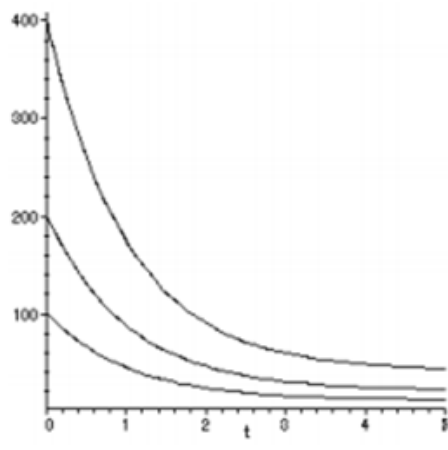


Figura 2.4 Misurazione della risposta di rilassamento

Analogamente al creep compliance, si possono sovrapporre le curve di rilassamento per mezzo del modulo di rilassamento, definito come $E_{rel}(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$, la Figura 2.5 mostra l'andamento del modulo di rilassamento in funzione del logaritmo del tempo di carico. Per tempi ridotti, la curva del modulo di rilassamento presenta un asintoto superiore, corrispondente ad un modulo vetroso E_g . E diminuisce poi fino a raggiungere un valore asintotico inferiore corrispondente al modulo gommoso E_r .

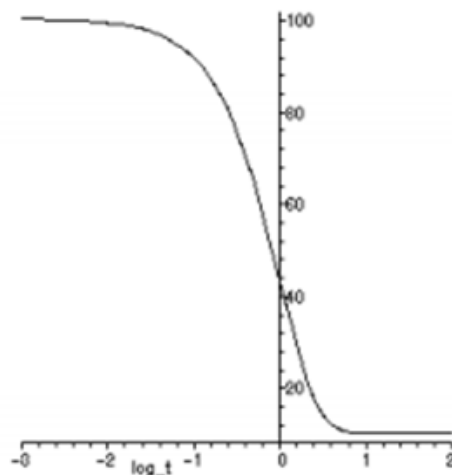


Figura 2.5 Il modulo di rilassamento della tensione $E_{rel}(t)$, con $E_g = 100$, $E_r = 10$ e $\tau = 1$

Carico ciclico

I test di creep e di rilassamento dello stress sono convenienti per studiare la risposta del materiale in tempi lunghi (da minuti a giorni), ma meno accurati per tempi più brevi (secondi e meno). Per questo motivo, i test dinamici, in cui viene misurata la sollecitazione (o la deformazione) risultante da una deformazione (o sollecitazione) sinusoidale, sono generalmente utilizzati per caratterizzare la risposta del materiale per tempi brevi. Quando un materiale viscoelastico è sottoposto a una sollecitazione sinusoidale, dopo una fase transitoria si raggiunge uno stato stazionario in cui la deformazione risultante è anch'essa sinusoidale, con la stessa frequenza angolare ma ritardata in fase di un angolo φ . Tale ritardo è analogo alla deformazione ritardata osservata negli esperimenti di creep. La deformazione ritarda la sollecitazione dell'angolo di fase δ , e questo è vero anche se la deformazione piuttosto che la sollecitazione è la variabile controllata.

Il modulo complesso $E^*(\omega)$ viene utilizzato per caratterizzare il comportamento LVE dei materiali bituminosi. Questa grandezza permette, infatti, di valutare il modulo

elastico del materiale considerando anche la sua dipendenza dalla frequenza. Il modulo complesso $E^*(\omega)$ può essere misurato applicando una sollecitazione sinusoidale σ che produce una risposta sinusoidale della deformazione ε :

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi(\omega))$$

dove $\omega = 2\pi f$ è la frequenza angolare (f è la frequenza di prova in Hz), σ_0 e ε_0 sono, rispettivamente, le ampiezze dello stato stazionario dei segnali di sollecitazione e di deformazione misurati. La deformazione è ritardata rispetto alla sollecitazione dell'angolo di fase, $\varphi(\omega)$, come mostrato in Figura 2.6.

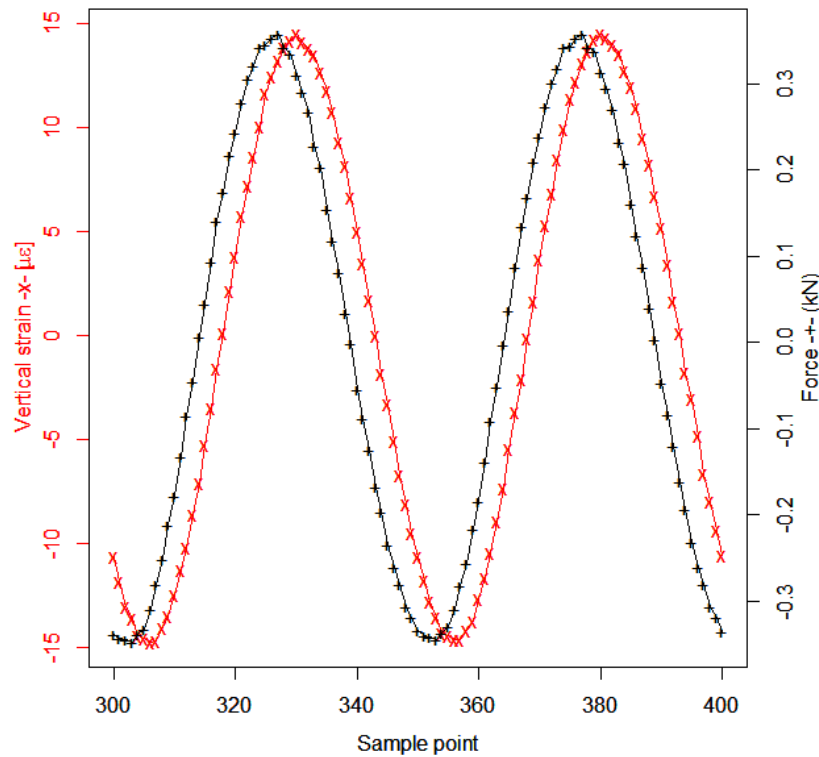


Figura 2.6 Ritardo di fase della deformazione rispetto alla sollecitazione

Per descrivere la risposta dei materiali in campo viscoelastico lineare sottoposti a sollecitazioni sinusoidale si fa ricorso all'utilizzo dei numeri complessi. Le funzioni sinusoidali precedentemente definite, utilizzate per rappresentare tensione e deformazione, rappresentano la parte reale dello sforzo complesso σ^* e della deformazione complessa ε^* . Tali grandezze in forma cartesiana sono descritte come:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 [\sin(\omega t) + i \cos(\omega t)]$$

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_0(\omega) [\sin(\omega t - \varphi) + i \cos(\omega t - \varphi(\omega))]$$

dove i è l'unità immaginaria.

L'ampiezza della risposta deformativa del materiale (ε_0) e il ritardo di fase (φ) sono dipendenti dalla frequenza di applicazione del carico (ω).

Tensione e deformazione complesse possono essere scritte in forma esponenziale:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 e^{i\omega t}$$

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_0(\omega) e^{i(\omega t - \varphi(\omega))}$$

Il rapporto tra le due grandezze appena definite definisce il modulo complesso E^* :

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*(\omega)}{\varepsilon^*(\omega)} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0(\omega) e^{i(\omega t - \varphi(\omega))}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0(\omega)} e^{i\varphi(\omega)} = E_0 e^{i\varphi(\omega)}$$

dove E_0 è il modulo di rigidezza, il valore assoluto del modulo complesso.

Rappresentando il modulo complesso sul piano cartesiano (Figura 2.7):

$$E^* = E_1 + i E_2$$

$$E_0 = |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

dove:

- $E_1 = |E^*| \cos \varphi$ è il modulo di immagazzinamento (o restituzione elastica) che definisce la deformazione reversibile, cioè la componente elastica, la componente reale del modulo complesso
- $E_2 = |E^*| \sin \varphi$ è il modulo di dissipazione (o di perdita viscoso) che definisce la deformazione irreversibile, cioè la componente viscosa, la componente immaginaria del modulo complesso

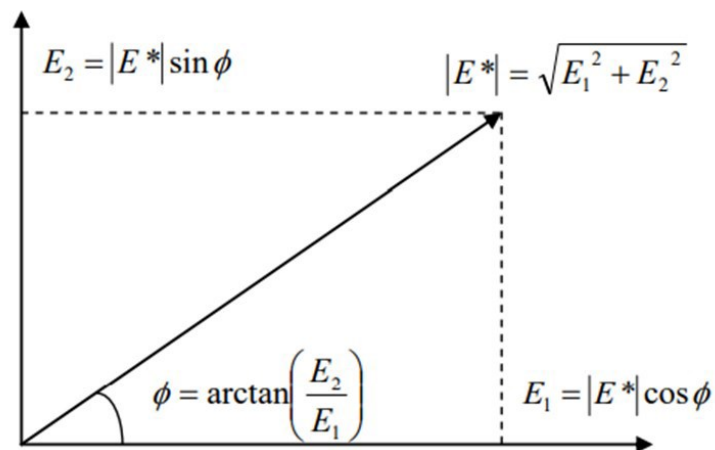


Figura 2.7 Rappresentazione del modulo E^* sul piano complesso

L'angolo di fase φ è un indice del comportamento viscoso del materiale:

- valori bassi riducono la componente E_2 , il materiale manifesta un comportamento elastico;
- valori alti riducono la componente E_1 , il materiale manifesta un comportamento viscoso.

Si può assumere inoltre, che per materiali puramente elastici, $\varphi=0^\circ$, mentre per materiali puramente viscosi, $\varphi =90^\circ$. Per i materiali bituminosi, sia E_0 che φ sono funzioni della frequenza della sollecitazione: alle basse frequenze (tempi di carico elevati) e alte temperature si accentua il comportamento viscoso; alle alte frequenze (tempi di carico ridotti) e basse temperature invece prevale il comportamento elastico.

I valori di E_0 che φ sono comunemente rappresentati in un piano bilogarithmico in funzione della frequenza di misura, dando origine alle curve isoterme del modulo complesso (E_0) e dell'angolo di fase (φ) mostrate in Figura 2.8 tipiche di un conglomerato bituminoso a freddo:

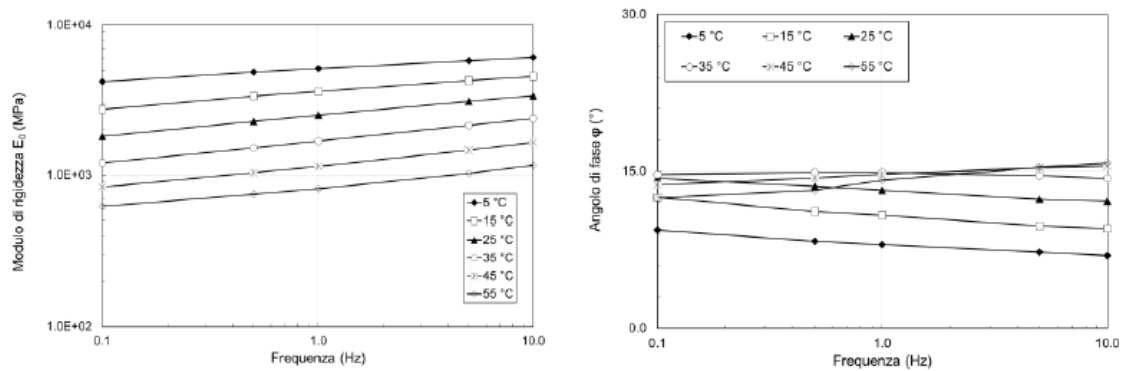


Figura 2.8 Isotherme del modulo complesso E_0 e dell'angolo di fase φ

1.1 Rappresentazioni

Una rappresentazione dei dati provenienti da prove in regime oscillatorio sinusoidale è realizzata nel diagramma Black Space, nel quale ogni coppia angolo di fase – norma del modulo complesso è rappresentativa di una frequenza e di una temperatura come riportato in Figura 2.9.

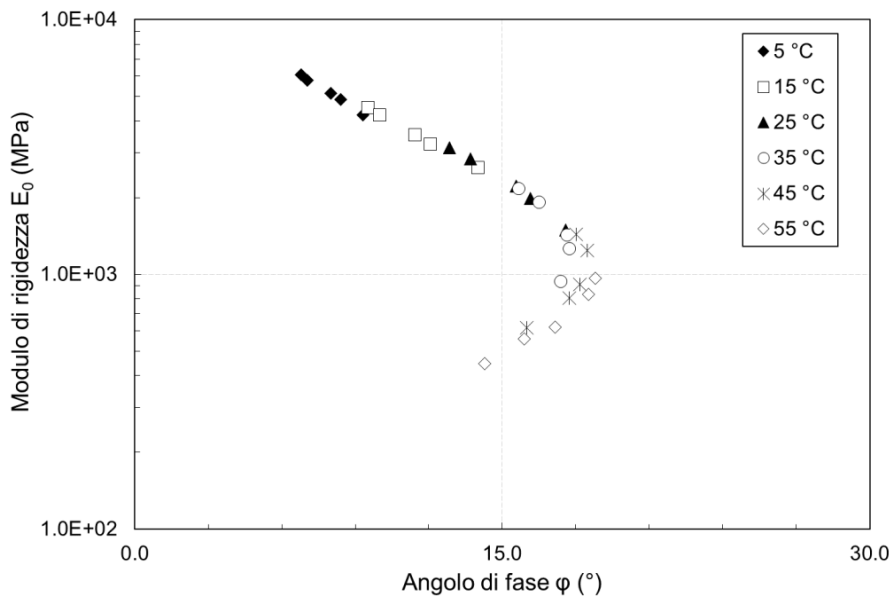


Figura 2.9 Diagramma Black space

Il Black space può essere utilizzato per visualizzare il massimo valore di E_0 e di φ della materiale. La Black curve mostra come l'angolo di fase aumenta al diminuire dell' E_0 o all'aumentare del tempo di carico o della temperatura.

Un'altra modalità di rappresentazione dei risultati è il piano di Cole-Cole (Figura 2.10), per il quale l'asse delle ascisse è rappresentativo del modulo di restituzione E_1 , mentre l'asse delle ordinate lo è del modulo di dissipazione E_2 , per ogni prova di compressione sinusoidale effettuata ad una certa temperatura e ad una certa frequenza.

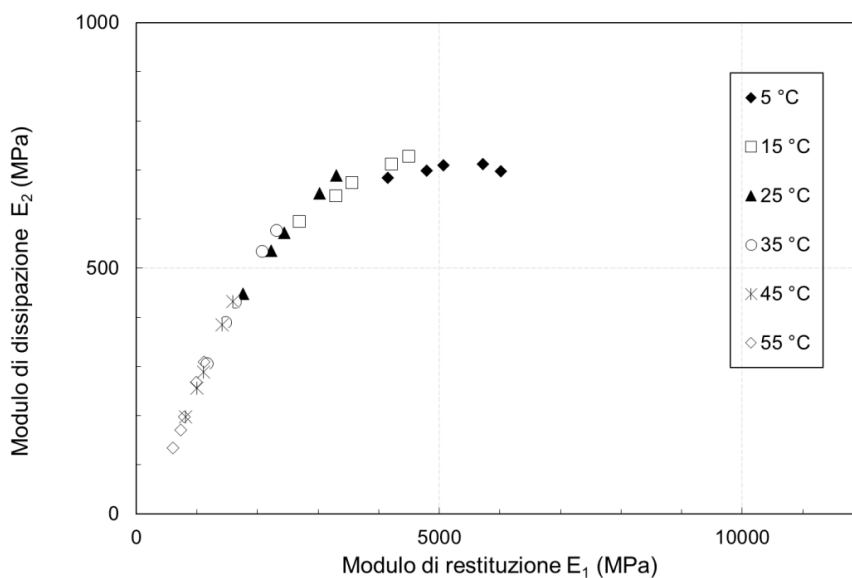


Figura 2.10 Piano complesso Cole-Cole

1.2 Curva Maestra

Quando i dati sperimentali disegnano curve uniche nel piano Cole-Cole e nel Black space, significa che il materiale risulta essere termo-reologicamente semplice, cioè una medesima risposta meccanica è ottenuta o variando la temperatura o variando la frequenza di carico, con una perfetta sovrapposizione degli effetti. Tale proprietà è definita come "principio di sovrapposizione tempo-temperatura" (*Time Temperature Superposition Principle- TTSP*). Il TTSP afferma che lo stesso valore E^* può essere ottenuto con diverse coppie frequenza-temperatura, il che permette di determinare una frequenza equivalente (ridotta) per una temperatura di riferimento.

Pertanto, questo principio viene utilizzato per la costruzione della curva maestra, (*master Curve*), che si ottiene dalla traslazione delle varie isoterme rispetto ad una temperatura di riferimento: le curve maestre di $E_0(\omega)$ o $\varphi(\omega)$ (Figura 2.11 e Figura 2.12), descrivono la risposta della LVE ad una temperatura di riferimento T_{ref} in funzione della frequenza.

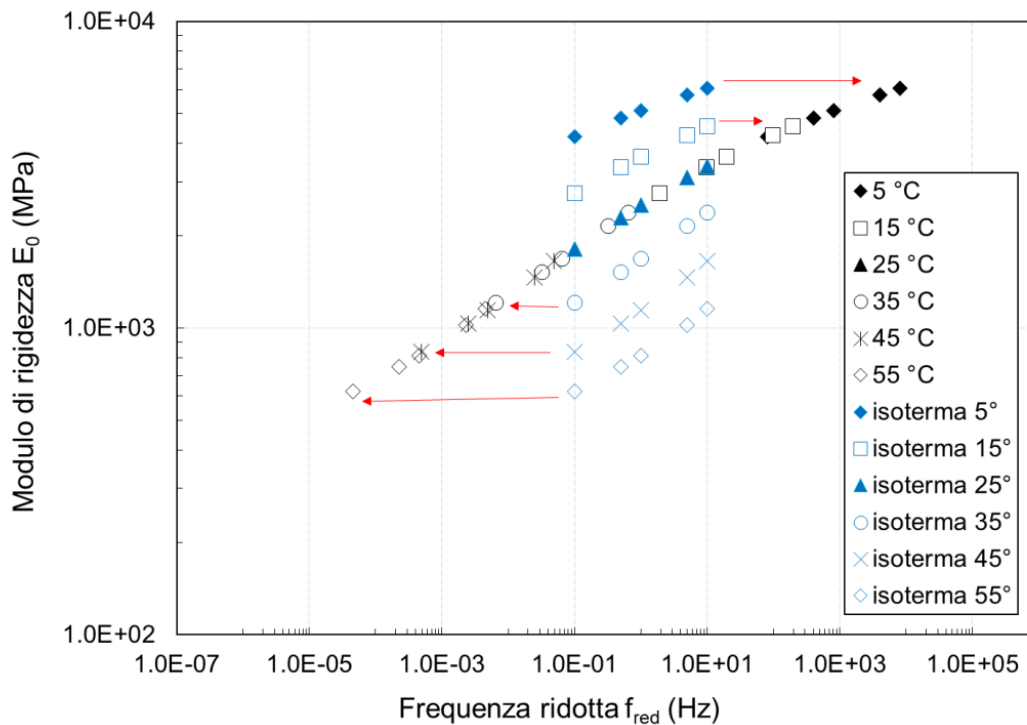


Figura 2.11 Curva Maestra di E_0 a 25°C

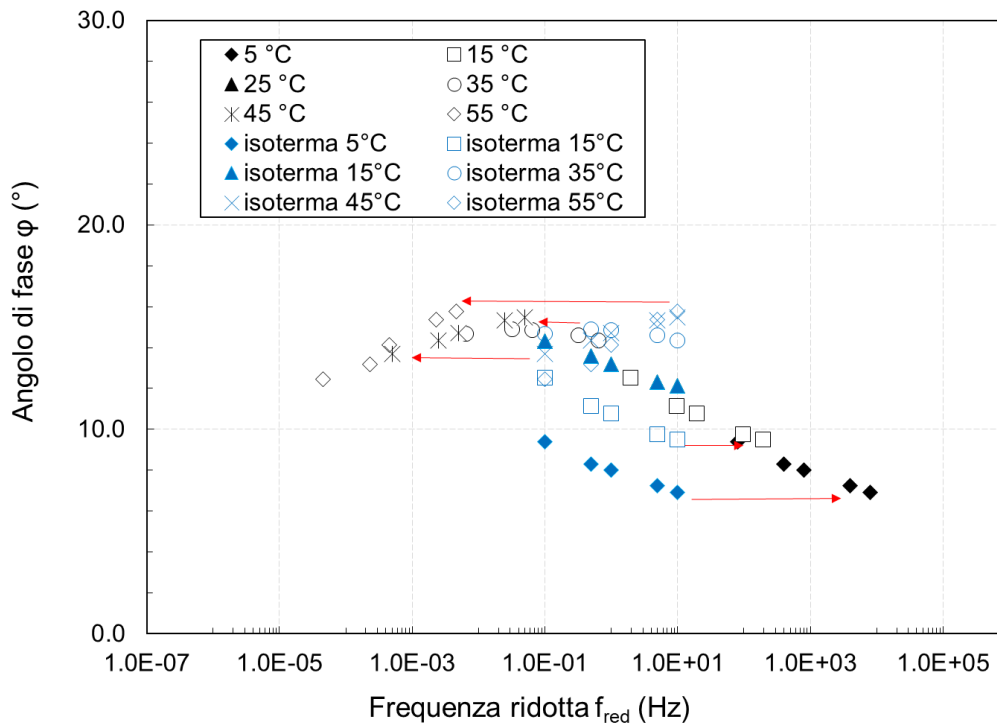


Figura 2.12 Curva Maestra di ϕ a 25°C

Poiché i materiali bituminosi sono generalmente termicamente semplici, il loro comportamento LVE può essere rappresentato tramite curve maestre, che permettono di confrontare materiali diversi con comportamento visco-elastico lineare a diverse frequenze di prova.

Una volta selezionata la temperatura di riferimento, i dati misurati ad ogni temperatura T sono spostati orizzontalmente e allineati a quelli ottenuti a T_{ref} :

$$fr = f \cdot a_{T_{ref}}(T)$$

dove f è la frequenza di prova, fr è la frequenza traslata, solitamente chiamata frequenza ridotta e $a_{T_{ref}}(T)$ è il fattore di traslazione (*shift factor*), relativo alla temperatura considerata, necessario per sovrapporre i dati misurati a T e T_{ref} .

Viene quindi determinata una relazione tra $a_{T_{ref}}(T)$ e la temperatura come mostrato nella Figura 2.13; questa relazione è necessaria per prevedere il valore E_0 a una temperatura diversa da quella di riferimento. In conclusione, la curva maestra descrive la dipendenza del materiale dalla frequenza mentre i fattori di traslazione descrivono invece la dipendenza dalla temperatura.

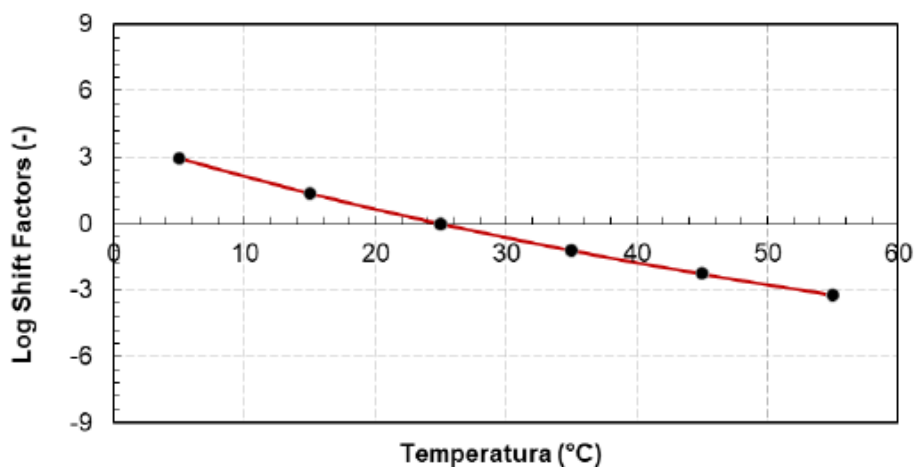


Figura 2.13 Shift Factor ad una temperatura di riferimento di 25°C

2 Modellazione reologica

Le curve maestre rivestono un ruolo fondamentale nell'interpretazione del comportamento reologico dei materiali visco-elastici, consentendo una stima delle proprietà meccaniche in ampi intervalli di temperatura e frequenza, non sempre riproducibili in laboratorio. Per individuare una funzione che meglio approssimi i risultati dedotti dalla sperimentazione sono proposti in letteratura vari modelli: i modelli matematici descritti tramite funzioni algebriche, come ad esempio i modelli sigmoidali a 4 o a 5 parametri e i modelli analogici, che introducono un riferimento fisico del modello stesso. Questi ultimi sono ottenuti combinando un certo numero di molle, che descrivono elementi elastici, e dashpot (smorzatori) lineari che rappresentano elementi viscosi newtoniani [7]. Sono state proposte diverse combinazioni tra questi elementi, le più semplici sono il modello Kelvin-Voigt (Figura 2.14 a) e il modello Maxwell (Figura 2.15 a).

Il modello Kelvin-Voigt consiste in una molla e un dashpot collegati in parallelo e rappresenta un solido viscoelastico. Il modello Maxwell considera la molla e il dashpot in una disposizione in serie ed è usato per i liquidi viscoelastici. Tuttavia, questi modelli sono troppo semplici per descrivere il comportamento dei materiali bituminosi. Pertanto, sono generalmente utilizzati come elementi di base per definire modelli di maggiore complessità, come il Kelvin-Voigt generalizzato (Figura 2.14 b) e il Maxwell generalizzato (Figura 2.15 b) che consistono, rispettivamente, in un numero di elementi

Kelvin-Voigt in serie, possibilmente con una molla e un dashpot lineare in serie, e un numero di elementi Maxwell in parallelo, eventualmente con una molla e un dashpot lineare in parallelo.

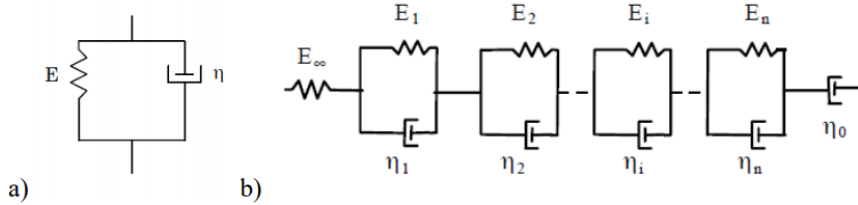


Figura 2.14 a) Modello Kelvin-Voigt; b) Modello Kelvin-Voigt generalizzato

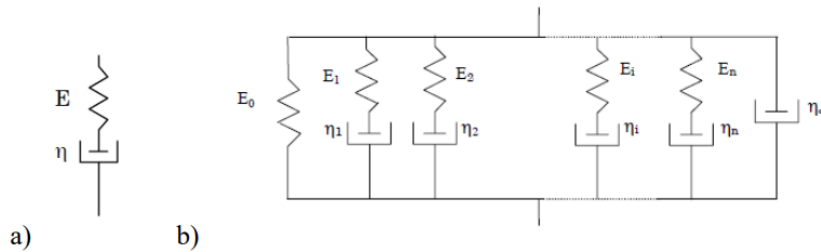


Figura 2.15 a) Modello Maxwell; b) Modello Maxwell generalizzato

2.1 Modello Huet-Sayegh

Altri modelli, caratterizzati da una maggiore complessità, sono stati proposti per descrivere meglio il comportamento LVE dei materiali bituminosi. Tra questi, c'è il modello Huet-Sayegh (HS), proposto per le miscele bituminose [8]. Come mostrato in Figura 2.16, il modello è composto dal collegamento in serie di una molla di rigidezza E_g e due dashpot parabolici, a sua volta paralleli ad una molla di rigidezza inferiore E_e . Il modulo complesso è descritto con il modello HS come:

$$E^*(\omega) = E_e + \frac{E_g - E_e}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$$

dove E_e e E_g sono rispettivamente il modulo di equilibrio e il modulo vetroso, δ , h e k sono parametri del modello, e τ è il tempo caratteristico. I due moduli definiscono la risposta delle molle, mentre k e h sono legati ai dashpot parabolici. E_e rappresenta il valore di E^* quando $\omega\tau \rightarrow 0$, che definisce la risposta puramente viscosa del materiale quando il legante bituminoso diventa liquido (alta temperatura/bassa frequenza). E_g è il valore di E^* quando $\omega\tau \rightarrow \infty$ e descrive la risposta puramente elastica del materiale quando il bitume è un solido vetroso (bassa temperatura/alta frequenza). Il suo valore dipende

principalmente dalle proprietà volumetriche del materiale. I parametri adimensionali k , δ e h influenzano la forma del modello a bassa, media e alta temperatura. Valori più alti di h e k segnalano la presenza di una maggiore componente di dissipazione viscosa (il valore uno indica la risposta puramente viscosa). Valori più bassi di h e k rappresentano un comportamento più elastico del materiale (zero rappresenta la risposta puramente elastica). In generale, $0 < k < h < 1$, con k che caratterizza il comportamento a bassa temperatura/alta frequenza e h il comportamento ad alta temperatura/bassa frequenza, mentre τ è una funzione della temperatura di prova T :

$$\tau(T) = a(T)\tau_0$$

dove $a(T)$ sono i fattori di spostamento funzione della temperatura, e τ_0 è il tempo caratteristico alla temperatura di riferimento. τ , è un moltiplicatore di frequenza e, di conseguenza, influenza solo la posizione della curva maestra lungo gli assi di frequenza senza alcun effetto sulla sua forma. Aumentare il valore di τ si traduce in uno spostamento della curva maestra del modulo di rigidezza verso sinistra. Questo indica una minore capacità di rilassamento del materiale. In generale, valori più elevati di τ sono legati ad un maggiore invecchiamento del bitume e ad un più alto contenuto di RA, sia nelle miscele a caldo che in quelle a freddo [9; 10; 11; 12].

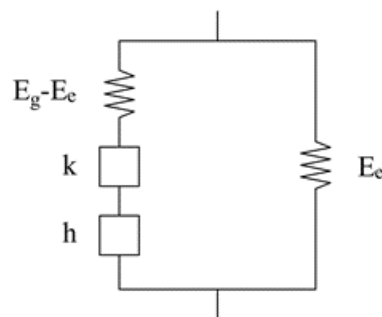


Figura 2.16 Modello Huet-Sayegh

2.2 Modello 2S2P1D

Olard & Di Benedetto [13] hanno osservato che il modello HS non descrive correttamente il comportamento a basse frequenze (alte temperature) dei leganti. Pertanto, hanno proposto un aggiornamento del modello HS, aggiungendo un dashpot lineare, il modello 2S2P1D: 2 molle, 2 elementi parabolici, 1 dashpot (2 *springs*, 2 *parabolic*, 1 *dashpots*) (Figura 2.17).

Il modello 2S2P1D è un modello che racchiude i modelli fino ad ora descritti, proposto da Di Benedetto al fine di ottenere un modello unico che fosse valido sia per i leganti che per i conglomerati bituminosi. In questo modello è stato aggiunto uno smorzatore caratterizzato da una viscosità η in serie con i due elementi parabolici, così da ottenere una risposta migliore dei materiali bituminosi sollecitati a temperature elevate e a bassissima frequenza.

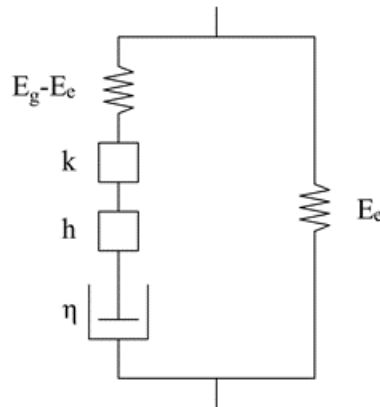


Figura 2.17 Modello 2S2P1D

Il modulo complesso nel modello 2S2P1D è descritto dall'espressione:

$$E^*(\omega) = E_e + \frac{E_g - E_e}{1 + \delta(j\omega t)^{-k} + (j\omega t)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}}$$

dove β è un parametro adimensionale ed è influenzato principalmente dall'invecchiamento del legante:

$$\beta = \frac{\eta}{\tau(E_g - E_e)}$$

3 Modulo complesso delle miscele bituminose a freddo

Studi recenti hanno utilizzato protocolli sperimentali e modelli matematici originariamente sviluppati per le miscele a caldo per caratterizzare il comportamento LVE delle miscele a freddo. La tabella 1.1 fornisce una panoramica dei risultati di una ricerca bibliografica degli ultimi nove anni, incentrata sulle misure di laboratorio del modulo complesso E^* con prove cicliche monoassiali eseguite su provini cilindrici di miscele a freddo. La ricerca considera miscele a freddo prodotte in laboratorio o ottenute da carotaggi in sito, contenenti quantità di aggregati RA tra il 30 e il 100%. Come legante principale sono stati considerati sia l'emulsione bituminosa che il bitume schiumato, con

dosaggio di emulsione e di bitume schiumato che variavano rispettivamente tra il 2 e il 6% e tra il 2 e il 3%. Il cemento è stato spesso utilizzato, sia come agente stabilizzante secondario/filler attivo, sia come co-legante. I periodi di maturazione considerati erano estremamente variabili, da pochi giorni a diversi anni. Anche la gamma di temperature studiate è ampia. La frequenza e le temperature adottate sono quelle normalmente utilizzate per testare le miscele bituminose a caldo. Principalmente sono stati considerati gli standard AASHTO (AASHTO TP 62, AASHTO TP 79, AASHTO T 342). Per quanto riguarda il livello di deformazione adottato spesso non era specificato dagli Autori. In questi casi esso era probabilmente $100 \cdot 10^{-6}$ m/m (valore di riferimento da normativa). Altri autori hanno considerato che il limite di linearità delle miscele a freddo potrebbe essere inferiore a quello di quelle a caldo, e pertanto hanno utilizzato valori inferiori a $100 \mu\text{m/m}$. Le miscele a freddo testate comunque erano caratterizzate da un comportamento LVE simile a quello delle miscele a caldo, dove all'aumentare della temperatura (o al diminuire della frequenza) il modulo di rigidezza diminuiva e l'angolo di fase cresceva. In generale, i materiali a freddo sono risultati essere termo-reologicamente semplici, e il TTSP risultava essere valido. In generale, a causa della presenza del legante cementizio, le miscele a freddo hanno comunque mostrato di essere caratterizzati da una ridotta termosensibilità rispetto alle miscele a caldo. Hanno inoltre mostrato una ridotta risposta viscosa [10; 14; 15], che si è tradotta in una minore riduzione del modulo di rigidezza alle alte temperature (basse frequenze). Inoltre, il contenuto più elevato dei vuoti rispetto alle tradizionali miscele a caldo ha comportato generalmente una riduzione della rigidezza e probabilmente, a causa della presenza dei legami cementizi, a valori di angolo di fase più bassi a tutte le temperature e frequenze rispetto alle miscele a freddo [10; 15]. Il bitume schiumato ha causato miscele leggermente più rigide a temperature più elevate, mentre l'emulsione ha portato ad avere miscele leggermente più rigide alle temperature più basse [16]. Riguardo al periodo di maturazione, un suo aumento ha generalmente portato ad un aumento del modulo e ad una riduzione dell'angolo di fase [10; 15]. La risposta reologica dei materiali a freddo dipende fortemente dalla loro composizione in termini di dosaggio dei leganti bituminosi e cementizi, dal comportamento reologico del legante bituminoso e dal suo invecchiamento.

Il modulo complesso delle miscele a freddo può essere misurato e modellato utilizzando le stesse procedure sperimentali e gli stessi modelli reologici (Huet -Sayegh o il modello 2S2P1D), sviluppati per miscele a caldo. Tuttavia, anche se i modelli si adattano bene alla curva maestra del modulo di rigidità, sono stati osservati alcuni problemi relativi alla modellazione dell'angolo di fase. In particolare, si è osservato che i modelli Huet-Sayegh e 2S2P1D tendono a sottostimare l'angolo di fase dei dati sperimentali e l'errore è abbastanza costante, indipendente dalla frequenza (o temperatura) considerata. Graziani et al., 2020 [10] hanno proposto di adottare un modello reologico modificato per superare questo problema considerando una parte isteretica.

Il modello, abbreviato HY, descrive E^* come:

$$E_{HY}^*(\omega) = E^*(\omega)\exp(i\varphi_0)$$

dove:

- $E^*(\omega)$ rappresenta il modello reologico originale (Huet-Sayegh o 2S2P1D);
- $\exp(j\varphi_0)$ è un termine di correzione che aggiunge un angolo di fase costante φ_0 . Il termine $\exp(j\varphi_0)$ risulta praticamente una rotazione nel piano complesso.

Dal punto di vista fisico, l'angolo isteretico φ_0 descrive un fenomeno di dissipazione indipendente dal tempo (non viscoso) e dalla temperatura, che si presenta durante il carico ciclico. Il termine isteretico descrive generalmente meccanismi di dissipazione che possono essere attribuiti ai legami cementizi o a fenomeni di attrito interno [17; 18]. Si riporta in Figura 2.18 il confronto tra i due modelli sul piano Cole-Cole e Black space.

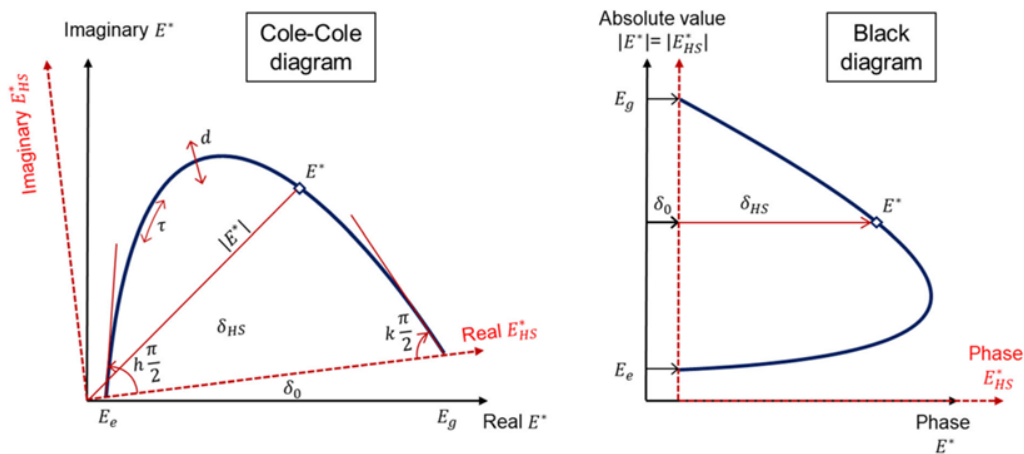


Figura 2.18 Confronto tra il modello HY e HS

Tabella 1.1 Sintesi delle proprietà delle miscele a freddo e degli approcci di caratterizzazione termo-reologica basati su prove assiali cicliche su provini cilindrici

Riferimento	Contenuto RAP	Agenti stabilizzanti riciclatori	Preparazione Campione	Stagionatura	T di prova	Frequenza di prova	Deformazione assiale	Modello reologico
[15] Stimilli et al., 2013.	90%	4% Emulsione + 2% Cemento	Carote di campo e compattatore giratorio	1 a 6 mesi	0 - 40 °C	0.3 - 20 Hz	50 *10 ⁻⁶ m/m	4 parametri sigmoidali
[16] Schwartz & Khosravifar, 2013	40% e 100%	2.8-2.2% Schiuma	Carote di campo e compattatore giratorio	4-6 mesi (carote); 3 giorni a 40 °C (campioni GC)	5 - 35 °C	0.1 - 20 Hz	AASHTO T P62	4 parametri sigmoidali
[9] Godenzoni et al., 2017	50% e 70%	3% schiuma + 2% Cemento	Compattatore a lastra	14 giorni a 40°C	-20 - 55 °C	0.03 - 10 Hz	30-50*10 ⁻⁶ m/m	Huet Sayegh HY
[10] Graziani et al., 2020	33%	3% Emulsione + 2% Cemento; 3% schiuma + 1.75% Cemento	Carote di campo	7anni	0- 50 °C	0.1 - 20 Hz	30*10 ⁻⁶ m/m	Huet Sayegh HY
[10] Graziani, et al., 2020b	94%	5% Emulsione + 1.5% Cemento	Compattatore giratorio	14 giorni a 25 °C e 14 giorni a 25 °C + giorni a 40 °C	0- 50 °C	0.1 - 20 Hz	30*10 ⁻⁶ m/m	Huet Sayegh HY

4 Fatica

La fatica è un fenomeno di deterioramento del materiale causato dal ciclico ripetersi di sollecitazioni che, pur non raggiungendo valori prossimi al carico di rottura del sistema, ne provoca comunque la crisi.

I fattori significativi di questo fenomeno sono:

- carico agente in superficie (entità, tipo e distribuzione);
- condizioni ambientali (temperatura, gelo);
- natura dei materiali legati (composizione, volumetria, rigidità);
- risposta strutturale del multistrato.

Il diffondersi della fessurazione porta al progressivo degrado dovuto alla perdita di portanza (depressioni e buche). La via è aperta all'infiltrazione dell'acqua che investirà gli strati non legati riducendo ulteriormente la capacità strutturale della pavimentazione. L'accumulo di micro-fessure dovute a sollecitazioni inferiori alla resistenza a trazione del materiale porta gradualmente al collasso.

E' stata completata nel 1996 un'indagine sulla fatica tra diversi laboratori, organizzata dal Comitato Tecnico RILEM 182-PEB [19]. Le condizioni di prova erano specificate e imponevano una sollecitazione sinusoidale a 10 Hz e 10 °C con prove a deformazione e sollecitazione controllate; in totale sono state effettuate più di 150 prove di fatica. In questa campagna per indagare sulle caratteristiche di fatica di una miscela bituminosa sono state eseguite le 5 geometrie di prova più comuni: prove di trazione/compressione uniassiale, flessione su 2, 3 e 4 punti e prove di trazione indiretta (Figura 2.19).

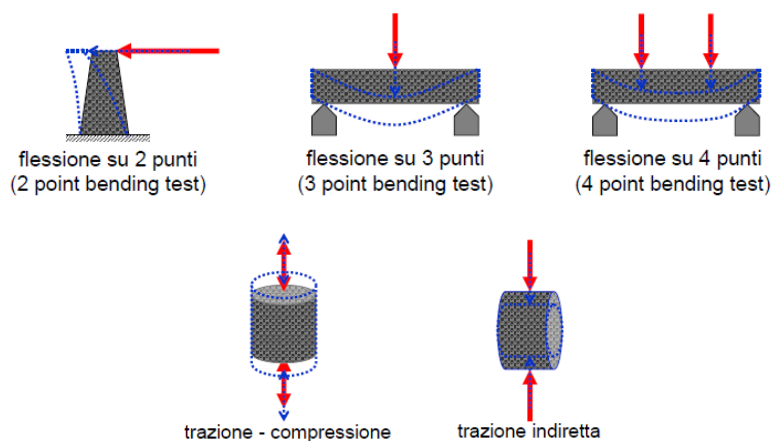
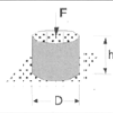
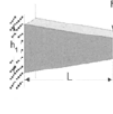
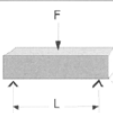
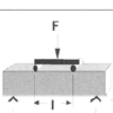
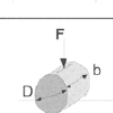


Figura 2.19 Geometrie di prova

Le diverse condizioni di prova adottate da ciascuno degli 11 team del Belgio (B), Francia (F), Paesi Bassi (N), Polonia (PL), Portogallo (P), Svezia (S) e Regno Unito (UK), sono presentate in Tabella 2.2.

Tabella 2.2 Caratteristiche delle 11 prove di fatica eseguite

Type	Test Geometry	Type of loading/ Country of the team	Amplitude (10^{-6} m/m or MPa)
T/C		Tension- Compression "Homogeneous" F_1, S_1	Strain: (80), 100,140, 180 Stress: 0.9
2PB		Two-Point Bending "Non Homogeneous" F_2, B_1, B_2	Displacement; max strain: 140, 180, 220 Load; max stress: 1.4
3PB		Three-Point Bending "Non Homogeneous" N_1	Displacement; max strain: 140, 180, 220 Load; max stress: 1.4
4PB		Four-Point Bending "Non Homogeneous" N_2, P, PL, UK	Displacement; max strain: 140, 180, 220 Load; max stress: 1.4
ITT		Indirect Tensile Test "Non Homogeneous" S_2	Load; max strain: at first cycle: ~25, ~40, ~65

Come osservazione generale, bisogna sottolineare che, a causa del comportamento non lineare, la risposta a un carico sinusoidale non è anch'essa perfettamente sinusoidale; tuttavia, per deformazioni di ampiezza dell'ordine di 10^{-4} m/m, la risposta può essere approssimata come sinusoidale. Di conseguenza, il modulo complesso (E e ϕ) può essere considerato con una buona approssimazione. Un esempio di come evolvono i parametri E e ϕ in funzione del numero di cicli (N_b) è dato in Figura 2.20, che rappresenta una tra le oltre 150 prove eseguite.

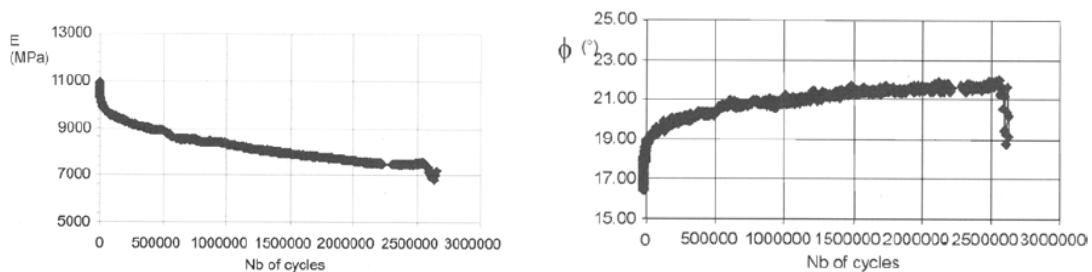


Figura 2.20 Andamento di E e ϕ in funzione di N_b

La Figura 2.21 mostra le classiche curve di Wohler ottenute con prove a tensione (o deformazione) controllata degli 11 tipi di test effettuati. Queste curve, che rappresentano

la durata della vita in funzione dello sforzo (o deformazione massima per i test non omogenei), seguono la seguente formula:

$$N_{f50} = \alpha \varepsilon^{-\beta}$$

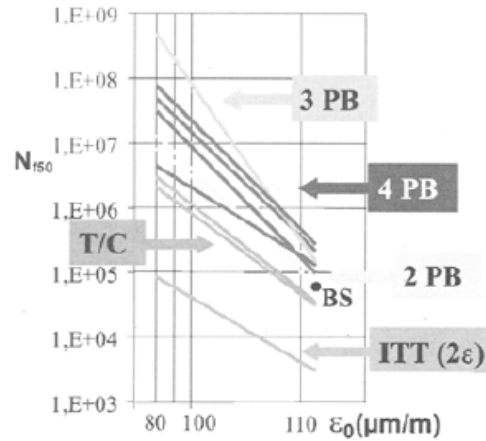


Figura 2.21 Curve di Wohler

I parametri α e β sono presenti in Tabella 2.3 per ciascuna delle 11 prove di fatica; il criterio di rottura a fatica è definito come la diminuzione del 50% della rigidità iniziale.

Tabella 2.3 Valore dei parametri α e β

Laboratory	α	Log (α)	β
F ₁	1.72E+14	14.2	4.16
S ₁	7.48E+14	14.9	4.41
F ₂	9.83E+17	18.0	5.51
B ₁	3.36E+15	15.5	4.52
B ₂	1.87E+17	17.3	5.33
UK	8.79E+17	17.9	5.40
PL	2.34E+18	18.4	5.71
N ₁	1.96E+13	13.3	3.49
P	1.03E+18	24.0	5.35
N ₂	9.48E+23	11.2	8.03
S ₂	1.71E+11	18.0	3.31
Average all		16.6	5.0
Standard dev.		3.4	1.3

Inoltre è stata eseguita un'analisi sulle tre differenti fasi che compaiono successivamente durante ogni prova di fatica, come è possibile vedere in Figura 2.22.

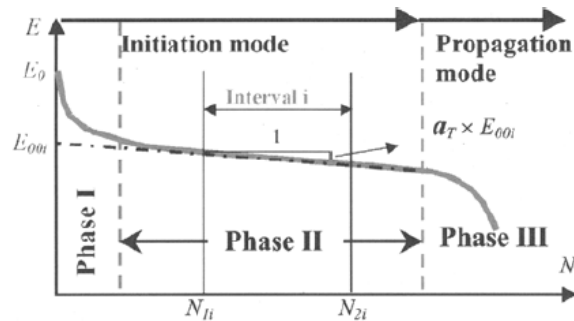


Figura 2.22 Fasi delle prove di fatica

Fase I o fase di adattamento: questa fase è caratterizzata da una rapida diminuzione della rigidità dovuta alla ripetitività della sollecitazione. Tuttavia la diminuzione della rigidità non è dovuta solo alla fatica ma anche al riscaldamento e alla tissotropia che probabilmente svolgono un ruolo importante.

Fase II o fase quasi stazionaria: durante questa fase, il ruolo della fatica sulla diminuzione della rigidità è predominante.

Fase III o fase di rottura: le fasi I e II corrispondono al processo formazione della fessura nel materiale, mentre durante la fase III, si verifica la propagazione della fessura locale. La macro-fessura inizia a svilupparsi e al termine di questa fase si raggiunge la rottura globale.

I risultati ottenuti da questa campagna di indagine consentono di trarre le seguenti principali conclusioni:

- il Modulo Complesso ottenuto all'inizio delle prove di fatica è indipendente dal tipo di prova;
- la durata a fatica " N_{f50} " dipende notevolmente dal tipo di prova e della modalità di carico utilizzata;
- i due test di trazione/compressione (T/C) danno risultati simili;
- oltre alla fatica esistono ulteriori effetti durante le prove di fatica: uno è il riscaldamento causato dall'accumulo di energia viscosa dissipata, l'altro è meno noto e sembra sia dovuto alla tissotropia del legante.

Capitolo 3

Materiali e metodi

In questo capitolo verranno descritti i materiali utilizzati per la realizzazione delle miscele riciclate a freddo appartenenti alla famiglia dei CBEM: fresato, filler, emulsione bituminosa, cemento e acqua. Inoltre, si descriveranno nel dettaglio la strumentazione e le metodologie utilizzate per la loro caratterizzazione fisica, per il confezionamento dei provini e per la loro caratterizzazione meccanica. Nel capitolo sono presenti anche i risultati riguardanti la maturazione e la caratterizzazione volumetrica.

1 Materiali componenti e miscela

Per il confezionamento della miscela a freddo è stato impiegato in qualità di aggregato il conglomerato bituminoso di recupero e il filler, mentre come leganti sono stati previsti sia il cemento che l'emulsione bituminosa, più l'acqua.

1.1 Conglomerato bituminoso di recupero

Il RA (Figura 3.1) impiegato nella sperimentazione è stato fornito dalla società "Cooperativa Braccianti Riminese" (CBR). Il materiale, proveniente dalla demolizione e fresatura degli strati legati a bitume di pavimentazioni stradali ammalorate, è stato accumulato nel corso del tempo presso l'impianto di San Leo (RN). Pertanto, esso risulta essere molto eterogeneo e non è possibile reperire informazioni dettagliate sulla provenienza, sulla composizione e sulle caratteristiche dei suoi costituenti (tipo e origine).

Al fine di permetterne l'impiego come aggregato per nuove miscele, il fresato tal quale viene sottoposto, direttamente in impianto, a specifiche operazioni di frantumazione e successivamente a vagliatura meccanica che permette di rimuovere gli elementi di dimensioni superiori a 16 mm.



Figura 3.1 Conglomerato bituminoso di recupero

In seguito si descrivono i procedimenti e le metodologie utilizzate per condurre le analisi preliminari sul RA per determinare l'assortimento granulometrico con i setacci, e le masse volumiche e l'assorbimento d'acqua con il picnometro.

1.1.1 Analisi granulometrica

Per effettuare l'analisi granulometrica del RA mediante setacciatura, è stata prelevata una quantità significativa di materiale data da normativa ed è stato messo in forno a 40 °C per farlo essiccare ed eliminare l'eventuale presenza di umidità. È stato pesato ogni ora fino al raggiungimento della massa costante (ovvero due pesate successive devono differire meno dello 0,1 %). Dopo un'ora, la differenza di peso era pressoché nulla, quindi si è potuto procedere al lavaggio: si sono utilizzati due setacci (2 mm e 0,063 mm) per separare la frazione fine da quella grossa. Il materiale viene lasciato in forno a 40 °C per 24 h per eliminare l'acqua.

Per effettuare la setacciatura vengono disposti i setacci con maglie di varie aperture (20 mm, 16 mm, 10 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, 0,063 mm) in ordine decrescente, dall'alto verso il basso, viene inserito tutto il materiale e si dispone la pila di setacci sul vibrovaglio per circa 10 minuti. L'operazione

di setacciatura può essere considerata completata quando la quantità di materiale trattenuto non subisce variazioni maggiori dell'1,0% durante 1 minuto di setacciatura.



Figura 3.2 Setacci e Vibrovaglio

Al termine della vagliatura meccanica, si pesano tutti i trattenuti alle varie aperture; nella Tabella 3.1 sono riportati i valori percentuali medi di trattenuto e passante ottenuti da tre setacciature. Si procede, tramite l'ausilio di un foglio excel, al tracciamento della curva granulometrica media (Figura 3.3). In Appendice sono riportate le curve granulometriche e i valori percentuali di trattenuto e passante delle singole setacciature.

Tabella 3.1 Percentuali medie di trattenuto e passante

setaccio/ crivello [mm]	parziale trattenuto [%]	trattenuto [%]	passante [%]
20	0.0	0.0	100.0
16	1.6	1.6	98.4
10	9.5	11.1	88.9
8	10.7	21.8	78.2
4	28.3	50.2	49.8
2	20.3	70.5	29.5
1	13.2	83.7	16.3
0,5	7.1	90.7	9.3
0,25	2.8	93.6	6.4
0,125	2.1	95.6	4.4
0,063	2.6	98.3	1.7
FONDO	1.9	100.0	0.0

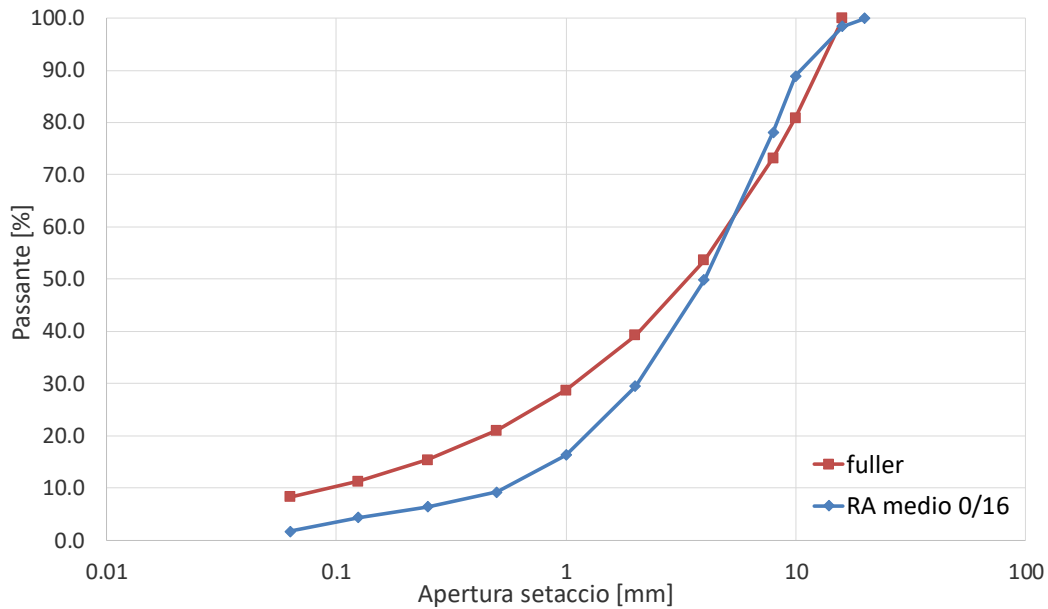


Figura 3.3 Curve granulometriche

1.1.2 Massa volumica e assorbimento d'acqua

Per determinare la massa volumica e l'assorbimento d'acqua si procede andando a setacciare il campione di RA per avere due pezzature diverse (2 mm e 0,063 mm) si useranno poi due picnometri diversi, uno per il materiale fino e l'altro per il grosso, inserendo 1,5 kg per l'aggregato grosso e 0,6 kg per l'aggregato fino.

Si inserisce una quantità d'acqua tale da sommergere tutto l'aggregato senza riempire il picnometro; per circa 30 minuti si collega lo strumento ad una pompa che aspira l'aria e crea il vuoto nel picnometro (Figura 3.4).



Figura 3.4 Picnometro collegato alla pompa

I picnometri vengono inseriti in camera climatica a 20 °C per almeno 12 h, inserendo anche delle bottiglie d'acqua per averla già a temperatura. Si tolgono i picnometri dalla camera climatica, si riempiono con l'acqua (già a temperatura) fino al menisco presente sul tappo. Si asciuga la superficie esterna del picnometro e si misura la massa (M_2) (Figura 3.5).



Figura 3.5 Calcolo della massa M_2

Si misura anche la temperatura dell'acqua con il termometro ad ago ($T = 22 \pm 3$ °C); a questo punto la procedura si differenzia in base alla granulometria del materiale.

Aggregato grosso

Si svuota il materiale nel setaccio da 2 mm così da eliminare l'acqua, si raccoglie tutto l'aggregato e si posiziona su una teglia pulita misurandone prima la tara. Successivamente si versa il materiale su una teglia con sopra un panno di stoffa asciutto per raggiungere la condizione di SSA, si tamponano gli aggregati fino ad eliminare il film d'acqua superficiale e si misura la massa del materiale a SSA (M_1). Si inserisce il materiale in forno finché non risulta completamente essiccato (finché la massa tra due pesate successive rimane pressoché costante) misurando poi la massa così ottenuta (M_4). Infine si riempie il picnometro d'acqua fino al menisco e si misura la massa (M_3), ora si possono calcolare densità e assorbimento d'acqua.

Aggregato fine

Si svuota il picnometro al setaccio 0,063, si raccoglie tutto il materiale e si versa su una teglia di alluminio pulita, si pesa e si inserisce in forno a 40 °C per togliere l'acqua in eccesso, successivamente si toglie il materiale dal forno e si inizia la procedura per

portarlo a SSA. Si pesa la spatolina, il cono e il pistone (tara) e si versa una parte di materiale nel cono (stando attenti a non compattarlo), si batte con il pistone dando 25 colpi: una volta sollevato il cono, la SSA è raggiunta se il materiale si dispone sulla teglia in maniera uniforme, senza picchi, con superficie curvilinea, come mostrato in Figura 3.6, altrimenti si ripete la procedura. Si calcolano M_3 e M_4 come per l'aggregato grosso.



Figura 3.6 Determinazione SSA

Ora si possono calcolare, sia per aggregato grosso che per aggregato fine, le masse volumiche e l'assorbimento d'acqua attraverso le seguenti formule della normativa:

- Massa volumica apparente dei granuli

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

- Massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Massa volumica dei granuli in condizione di SSA

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Assorbimento dell'acqua

$$W_{abs24} = 100 \frac{(M_1 - M_4)}{M_4}$$

Tabella 1 Masse volumiche e Assorbimento d'acqua

Aggregato	grosso	fine
M1 [g]	620.50	452.60
M2 [g]	3628.70	3506.80
M3 [g]	3251.10	3250.10
M4 [g]	614.10	429.40
T1 [°C]	23.10	19.30
ρ_w [g/cm ³]	1.00	1.00
taral [g]	450.30	1441.70
M _{ssa} [g]	1070.80	1894.30
M _{dry} [g]	1064.40	1871.10
ρ_a [g/cm ³]	2.59	2.48
ρ_{rd} [g/cm ³]	2.52	2.19
ρ_{ssd} [g/cm ³]	2.55	2.31
W _{abs24} [%]	1.04	5.40

1.2 Emulsione bituminosa

L'emulsione bituminosa utilizzata è stata fornita dalla ditta "Valli Zabban S.p.A." di Bologna (BO), nello specifico denominata C60B10 secondo la norma vigente UNI-EN 13808. Si tratta di un'emulsione:

- cationica (C);
- al 60% di bitume residuo (60);
- bitume normale (B), ossia non modificato;
- sovrastabilizzata (10).

Le principali caratteristiche fisiche sono state fornite dalla ditta produttrice e sono riassunte in Tabella 3.3.

Tabella 3.3 Caratteristiche fisiche emulsione con bitume normale

Requisiti essenziali	Caratteristica	UdM	Prestazione			Specifica tecnica
			min	max	classe	
Contenuto di legante	Distillazione Azeotropica	%	58	62	6	EN 13808:2013
Viscosità	Tempo di efflusso a 40°C 2 mm	sec	15	70	3	EN 13808:2013
Indice di rottura	Stabilità mix con cemento	%		2	2	EN 13808:2013
Caratteristiche del legante estratto per evaporazione						
Consistenza alle temperature intermedie di servizio	Penetrazione a 25°C	dmm		100	3	EN 13808:2013
Consistenza alle temperature elevate di esercizio	Punto di rammollimento	°C	43		6	EN 13808:2013

1.3 Cemento

Per quanto riguarda il cemento è stato utilizzato un cemento di tipo Portland al calcare classificato CEM II/B-LL 32.5 R.

1.4 Composizione della miscela

Di seguito verrà indicata la composizione finale della miscela andando a definire i dosaggi dei materiali appena descritti.

Gli aggregati sono stati preparati mediante analisi granulometrica dosando l'80% di RA 0/16 e il 20% di filler calcareo, nella miscela sono presenti 5480 g di RA e 1370 g di filler.

Il dosaggio di emulsione bituminosa è pari al 4 %, che corrisponde al rapporto tra il bitume della miscela e quello dell'emulsione:

$$\frac{2,4}{60} 100 = 4,0 \%$$

espresso in grammi:

$$\frac{6850 \cdot 2,4}{100} = 164,4 \text{ g}$$

da questo valore si ottiene il dosaggio in grammi, dell'emulsione rispetto al peso dell'aggregato:

$$\frac{164,4}{60} 100 = 274,0 \text{ g.}$$

Il dosaggio del cemento è pari al 2% rispetto al peso secco dell'aggregato, in grammi corrisponde a:

$$\frac{6850,0}{2,0} 100 = 137,0 \text{ g.}$$

Il Contenuto d'acqua W_{tot} in dosaggio è pari al 4 %, è ottenuto sommando il contenuto totale di acqua libera della miscela e quello dell'acqua di assorbimento:

$$w_{tot} = 3,09 + 0,91 = 4,00 \%$$

dove la percentuale di acqua di assorbimento è ottenuta dal rapporto tra l'aliquota d'acqua assorbita dal RA e il peso totale dell'aggregato essiccato, espressi in grammi:

$$\frac{62,2}{5480} 100 = 0,91 \%$$

Nella seguente tabella è fornita la composizione finale della miscela.

Tabella 3.4 Composizione miscela

ID	Name	Dosage [g]
-	-	
RA1	0/16	5480
RA2	-	0
VA1	-	0
VA2	-	0
VA3	-	0
VA4	0	0
Filler	calcareo	1370
Water (abs)		62,2
Cement	CEM 32.5 R	137
Emulsion	C60B10	274
Water (pre-wetting)		102
TOTAL		7425

2 Preparazione dei campioni

Il confezionamento dei provini è l'operazione che porta alla realizzazione dei provini di diametro 150 mm, si suddivide in due fasi: miscelazione e compattazione.

2.1 Miscelazione

La miscelazione a sua volta consta di due momenti: la prima, da eseguire almeno 12 ore prima della compattazione, prevede il dosaggio e mescolamento degli aggregati con la sola acqua di assorbimento in modo da far raggiungere la condizione di superficie satura asciutta (SSA); la seconda prevede l'aggiunta dei restanti componenti della miscela.

Fase 1

Gli aggregati devono essere asciutti: vanno fatti asciugare stesi a terra o messi in forno (40°C il RA e 100 °C gli aggregati vergini) fino al raggiungimento della massa costante (due pesate successive a almeno 1 ora di tempo differiscono di meno dello 0.1%). Il prelievo degli aggregati segue il metodo della quartatura per avere un campione statisticamente significativo di tutto il materiale.

In un secchio si pesano gli aggregati asciutti (secondo la ricetta) e si miscela manualmente: le quantità di materiale sono state preparate per fare tre provini al giorno, per cinque giorni, così da ottenere 15 provini. Successivamente viene aggiunta l'acqua di assorbimento (W_{abs}) seguita da una seconda miscelazione (Figura 3.7a). Infine l'impasto viene lasciato almeno 12 ore nel contenitore reso impermeabile da un sacchetto di plastica per impedire l'evaporazione (Figura 3.7b).

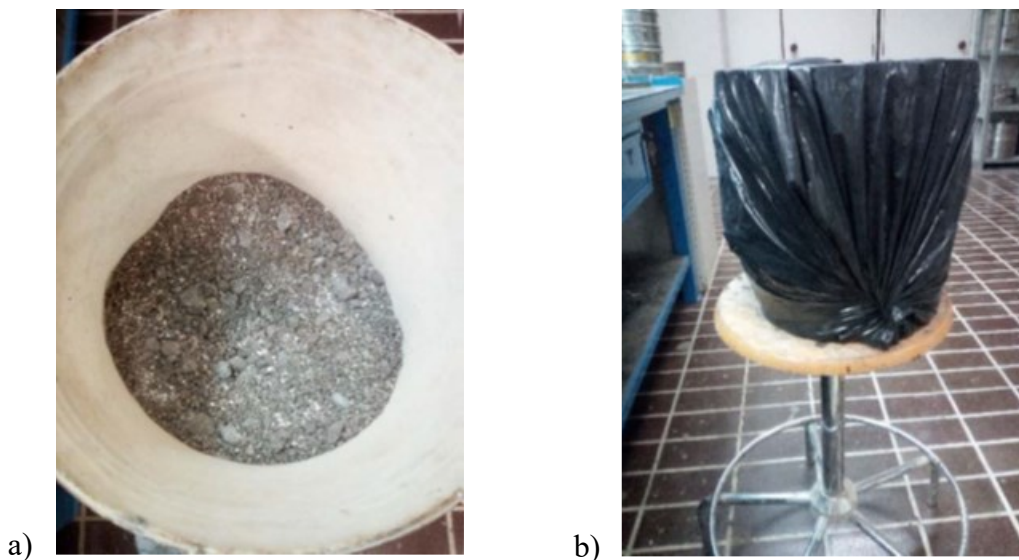


Figura 3.7 a) Aggregati miscelati; b) Contenitore a evaporazione impedita

Fase 2

La seconda fase di miscelazione va effettuata poco prima della compattazione, trascorse almeno 12 ore dalla prima (in modo che gli aggregati siano in condizione SSA).

Preliminarmente sono state eseguite le seguenti operazioni:

- bagnare il secchio del miscelatore e lasciarlo asciugare;
- pesare il cemento e l'acqua (secondo ricetta);
- mescolare bene l'emulsione per assicurarsi che bitume e acqua non siano separati.

Una volta effettuate le operazioni appena descritte si è proceduto a:

- versare gli aggregati nel secchio e aggiungere cemento
- miscelazione meccanica con idoneo miscelatore per un minuto;
- breve miscelazione manuale;
- aggiungere l'acqua
- miscelazione meccanica con idoneo miscelatore per un minuto;
- breve miscelazione manuale;
- aggiungere metà dell'emulsione bituminosa;
- miscelazione meccanica con idoneo miscelatore per un minuto;
- breve miscelazione manuale (pulendo preventivamente le pale meccaniche dai fini + bitume);
- aggiungere l'altra metà dell'emulsione bituminosa;
- miscelazione meccanica con idoneo miscelatore per un minuto;
- breve miscelazione manuale (pulendo precedentemente le pale meccaniche dai fini + bitume).

Durante le fasi di aggiunta sia di acqua che di emulsione bituminosa, è stata creata una piccola buca dove sono stati versati i liquidi poi adeguatamente ricoperti con il materiale così da evitare che si attaccassero alle pale del miscelatore.



Figura 3.8 Fasi essenziali della miscelazione

2.2 Compattazione

La compattazione dei provini viene eseguita tramite pressa giratoria a taglio (*Shear Gyratory Compactor*, SGC) (Figura 3.9). La pressa giratoria a taglio esegue la compattazione mediante l'applicazione contemporanea di una pressione assiale costante e di una rotazione, secondo un angolo di inclinazione predefinito. Tale configurazione genera nel provino delle forze di taglio che, combinate alla compressione statica, promuovono una riorganizzazione interna della struttura del materiale che simula al meglio il costipamento che avviene in sito per mezzo dei rulli compattatori. L'apparecchiatura è costituita da un telaio di contrasto al cui interno sono inseriti una barra di inclinazione, il pistone pneumatico che permette l'applicazione del carico

verticale ed un basamento rotante. La compattazione avviene all'interno di fustelle cilindriche, realizzate in acciaio inox, costituite da una piastra di base rimovibile e dalle pareti laterali; esse possono avere diametro interno pari a 100 mm oppure 150 mm. Per il confezionamento dei provini studiati nella sperimentazione è stata utilizzata una fustella con diametro di 150 mm.



Figura 3.9 Pressa a taglio giratoria con fustella

Preliminarmente sono state effettuate le seguenti operazioni:

- su tutto il piano di lavoro, si spalma del grasso per far scivolare la fustella;
- si pesa la sola fustella;
- si pesa la fustella e un disco di carta filtro (inferiore);
- con un raschietto lungo e la sessola si versa il materiale nella fustella, dopo aver fatto i calcoli necessari per determinarne la quantità precisa per il confezionamento di un provino (Figura 3.10);
- si sistemano i bordi affinché non ci siano grossi aggregati, passandoci il raschietto;
- si appone sul materiale il disco di carta filtro superiore.



Figura 3.10 Inserimento del materiale nella fustella

Per quanto riguarda l'utilizzo del software:

- si scrive il nome del provino; il diametro stampo; il metodo di compattazione (altezza finale, numero di giri o metodo Superpave); la pressione di compattazione è pari a 600 kPa. In questa sperimentazione si procede ad altezza imposta, 180 mm;
- si fa scorrere la fustella posizionandola correttamente nel macchinario;
- si chiude lo sportello;
- una volta dato START, si abbassa la pressa superiore all'interno dello stampo. Una volta centrato, chiede di applicare l'angolo giratorio;
- si apre lo sportello, si gira la manopola nera sulla destra in senso orario (verso sinistra) fino a fine corsa;
- finita la compattazione, il software chiede il Raddrizzamento del provino. Aprire lo sportello, togliere metà dell'angolo rotatorio (girare la manopola nell'altro verso) e richiudere. Si ripete il procedimento due volte, dando in totale 4 rotazioni per stabilizzarlo.

Successivamente il provino viene estratto con l'apposito pistone che spinge verso l'alto il fondo della fustella e il provino da essa contenuto. Si estrae il provino, si appoggia il piattino e si pesa provino più piattino. Prima, si sfila la base della fustella traslandola sulla mano (Figura 3.11).



Figura 3.11 Estrazione del provino dalla fustella

Una volta terminata la compattazione, ci si deve assicurare che i provini non abbiano perso acqua durante questa fase. Per questo motivo vengono pesati prima e immediatamente dopo la fine della compattazione; la perdita d'acqua durante la compattazione (WL) viene calcolata con la seguente formula:

$$WL = \frac{P_w}{P_s} 100$$

dove P_w è il peso dell'acqua persa e P_s il peso degli aggregati che è uguale per tutti i provini ed è pari a 6530 g.

Tabella 3.5 Percentuali perdita d'acqua pre e post compattazione

ID provino	ora e data compattazione	N° giri	P_w	WL
	[-]	[-]	[g]	[%]
R1	27/09/2021 11:13	504	2	0.031
R2	27/09/2021 12:16	210	6.9	0.106
R3	27/09/2021 12:52	238	5	0.077
R4	28/09/2021 12:26	101	2.8	0.043
R5	28/09/2021 14:50	89	5.3	0.081
R6	28/09/2021 15:50	366	1.8	0.028
R7	29/09/2021 12:40	141	3.5	0.054
R8	29/09/2021 13:14	126	3.3	0.051
R9	29/09/2021 15:17	155	3.5	0.054
R10	30/09/2021 10:15	121	0.7	0.011
R11	30/09/2021 11:51	451	2.8	0.043
R12	30/09/2021 11:25	138	3.8	0.058
R13	01/10/2021 10:08	216	1.7	0.026
R14	01/10/2021 10:50	190	2.9	0.044
R15	01/10/2021 11:27	181	4.8	0.074

Per i provini R1, R6 e R11 nel corso del confezionamento sono state riscontrate diverse difficoltà nel posizionamento della fustella nella pressa giratoria, per questo motivo per la compattazione sono serviti un numero di giri notevolmente maggiore rispetto agli altri.

2.3 Maturazione

La maturazione gioca un ruolo fondamentale nello sviluppo delle proprietà meccaniche delle miscele riciclate a freddo. I provini sono stati messi in forno a 40 °C per i primi 3 giorni (ambiente secco) per poi essere trasferiti in camera climatica, sempre a 40 °C, per 28 giorni. Successivamente sono rimasti in camera climatica a umidità controllata ad una temperatura di 25 °C fino al giorno precedente alla prova in cui sono stati fatti condizionare alla temperatura di prova.

2.4 Misura della perdita di umidità

Dopo la compattazione e prima dell'esecuzione delle prove meccaniche (dunque all'inizio e durante la maturazione) ciascun provino è stato pesato al fine di valutarne la perdita in peso. Poiché la variazione di peso durante la maturazione è dovuta solo all'evaporazione dell'acqua, tale operazione ha permesso di determinare la perdita di umidità rispetto al peso degli aggregati (*moisture loss*, DW), che i provini manifestano durante il processo di maturazione, calcolata secondo l'espressione seguente:

$$DW = \frac{M_0 - M_f}{M_a} = \frac{\Delta W_{maturazione}}{M_a} 100$$

dove:

- M_0 = peso del provino all'inizio della maturazione;
- M_f = peso del provino al termine della maturazione (immediatamente prima della rottura);
- M_a = peso dell'aggregato contenuto nel provino;
- $\Delta W_{maturazione}$ = acqua persa per evaporazione calcolata come differenza tra M_0 e M_f .

Durante la maturazione sono stati pesati per controllare la perdita di umidità nei primi 6 giorni e successivamente a 14 e 28 giorni. Nella Figura 3.12 si mostra la maturazione di tutte e 15 le miscele dividendole nei 5 giorni in cui sono state confezionate.

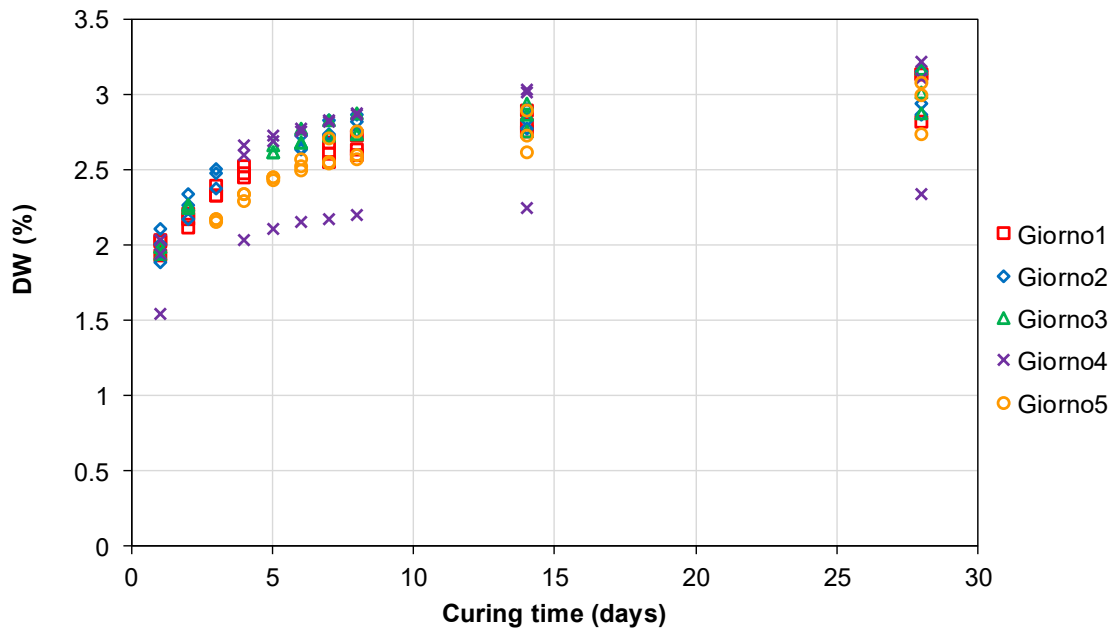


Figura 3.12 Maturazione delle 15 miscele

2.5 Carotaggio

Una volta terminato il periodo di maturazione, tramite l'ausilio di un carotiere cilindrico riportato in Figura 3.13, è stato necessario operare sulla geometria dei campioni così da ottenere i diametri di nostro interesse, ovvero 100 mm, 75 mm, 38 mm.



Figura 3.13 Carotaggio provini

Sono stati carotati solo i provini del secondo, terzo e quarto giorno di compattazione; da un provino di diametro 150 mm è possibile ricavarne uno solo da 75 mm o 100 mm, mentre invece se ne possono ricavare 3 da 38 mm.

Dal carotaggio abbiamo quindi ottenuto 3 provini di diametro 100 mm, 3 provini di diametro 75 mm e 8 da 38 mm poiché uno di essi si è rotto durante il carotaggio.



Figura 3.14 Provini carotati

Prima dell'esecuzione delle prove è stato registrato il peso dei provini e ne sono stati rilevati i parametri geometrici, effettuando una media di quattro misurazioni sul diametro e sull'altezza. Le grandezze misurate sono riportate in Tabella 3.6.

Tabella 3.6 Geometria e Peso dei provini

Codice provino	D1	D2	D3	D4	H1	H2	H3	H4	Dm	Hm	Peso
-	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	g
38_3.2_R1	38.2	38.1	38.1	38.2	109.5	109.6	109.4	109.5	38.15	109.5	264.1
38_3.2_R2	38.2	38.3	38.1	38.2	109.6	109.3	109.1	109.5	38.2	109.375	260.4
38_4.1_R3	38.2	38.3	38.1	38.1	110.5	110.6	111	110.5	38.175	110.65	268.5
38_4.1_R2	38.4	38.2	38.3	38.4	111.2	110.9	111	110.8	38.325	110.975	267.7
38_4.1_R1	38.2	38.1	38.2	38.3	109.5	109.3	109.4	109.1	38.2	109.325	264.1
38_2.3_R1	38.2	38.3	38.5	38.5	111.1	111.1	110.6	110.6	38.375	110.85	264.8
38_2.3_R2	38.2	38.3	38.2	38.2	111.1	110.4	110.5	110.5	38.225	110.625	265.9
38_2.3_R3	38.3	38.3	38.2	38.4	111.2	110.9	111.1	111	38.3	111.05	266.8
75_3.1	74.2	74.3	74.4	74.3	129.2	130.1	130	129.5	74.3	129.7	1207.4
75_4.3	74.4	74.1	74.2	74.4	130.1	129.8	129.7	130.1	74.275	129.925	1212.6
75_2.2	74.2	74.3	74.2	74.2	128.7	129.1	128.9	129.1	74.225	128.95	1204.1
100_4.2	94.3	94.2	93.9	94.5	152	149.9	148.1	150	94.225	150	2253
100_3.3	94.1	93.8	94.2	94.1	149.1	149.3	149.5	149.6	94.05	149.375	2216.6
100_2.1	94.2	94.1	94.2	93.9	149	150.2	149.4	149.2	94.1	149.45	2240.7

2.6 Incollaggio dei riscontri

L'ultima operazione di preparazione dei provini permetterà l'installazione dei trasduttori. Si procede quindi all'incollaggio di due riscontri distanziati di 70 mm, per ognuna delle tre verticali disposte a 120° una dall'altra su cui si andrà a leggere la deformazione durante la prova, con apposita attrezzatura e colla bicomponente (Figura 3.15).



Figura 3.15 Provino sulla piattaforma di incollaggio

Il macchinario, attivato da un apparato pneumatico, procede all'installazione dei riscontri: si attende un tempo di circa 15 minuti per la solidificazione della colla (Figura 3.16).



Figura 3.16 Incollaggio dei riscontri

3 Metodi di prova

Si illustrano i metodi adottati per la caratterizzazione volumetrica delle miscele e le procedure applicate per l'esecuzione delle prove di modulo complesso e prove di fatica.

3.1 Caratterizzazione volumetrica

Le caratteristiche volumetriche sono importanti per le miscele bituminose sia nella progettazione della miscela che nelle fasi di controllo della qualità, poiché influenzano in modo significativo le prestazioni meccaniche e la durabilità della miscela stessa. Inoltre, per le miscele bituminose a freddo, si deve considerare che le caratteristiche fisiche cambiano con la maturazione; pertanto, lo studio delle proprietà volumetriche è diverso quando la miscela viene analizzata allo stato fresco o allo stato indurito.

Considerando un volume unitario di una miscela di riciclato a freddo, possiamo vedere le varie porzioni di cui essa è composta. Sono presenti aria, acqua (assorbita o intergranulare), bitume, cemento e aggregati. Si considera pertanto un sistema multifase, come si può notare da Figura 3.17 e Figura 3.18 [20].

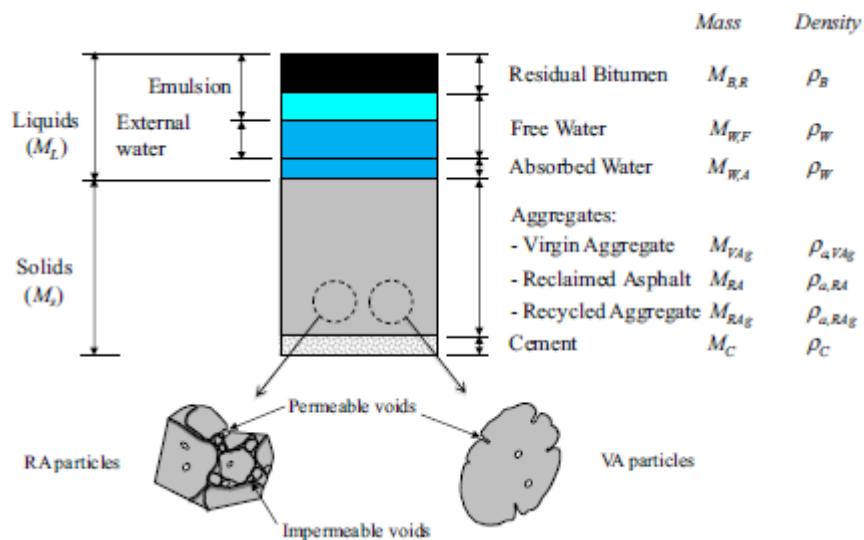


Figura 3.17 Componenti della miscela in peso di riciclato a freddo prima della rottura dell'emulsione

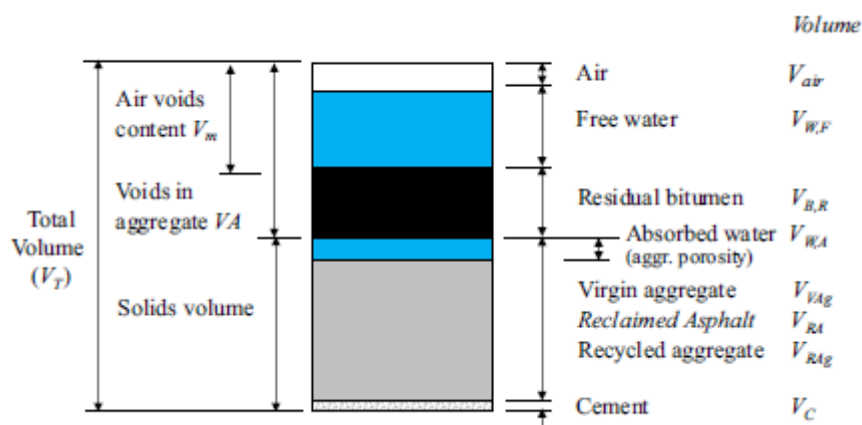


Figura 3.18 Analisi volumetrica di una miscela di riciclato a freddo

Possiamo dunque andare a definire i seguenti parametri:

-I vuoti tra gli elementi solidi (*Voids in the Aggregate*, VA) presenti nella miscela possono essere definiti dalla seguente equazione:

$$VA = \frac{V_v + V_{b,res} + V_{w,free}}{V_t} 100$$

in cui:

V_v = volume dei vuoti d'aria;

$V_{b,res}$ = volume del bitume residuo;

$V_{w,free}$ = volume dell'acqua libera;

V_t = volume totale del composto.

VA è la percentuale di volume occupata dallo spazio tra le particelle solide (aggregato e cemento); l'indice può essere utilizzato per valutare il grado di compenetrazione tra gli elementi costituenti lo scheletro solido, durante la fase di compattazione.

-L'indice dei vuoti in miscela (*Voids in mixture*, V_m) può essere definito come la percentuale di volume occupata dai vuoti d'aria e dall'acqua libera, che rappresentano i componenti non strutturali della miscela, come indicato dalla seguente equazione:

$$V_m = \frac{V_v + V_{w,free}}{V_t} 100$$

Dall'equazione precedente si deduce che:

$$VA = V_m + \frac{V_{b,res}}{V_t}$$

-Un ulteriore parametro è rappresentato dall'indice dei vuoti contenenti liquido (*Voids Filled with Liquids*, VFL), che indica la percentuale di VA occupati da acqua e bitume, calcolati attraverso la seguente equazione:

$$VFL = \frac{V_{b,res} + V_{w,free}}{V_v + V_{b,res} + V_{w,free}} 100$$

VFL assume particolare importanza nella valutazione dell'efficacia della compattazione della miscela:

- se VFL è minore del 100%, la miscela contiene ancora vuoti d'aria e quindi non ha ancor raggiunto la condizione di saturazione;
- se VFL raggiunge, o supera, il 100% (corrispondente alla condizione in cui i vuoti d'aria sono nulli), la miscela risulta satura e l'acqua libera, insieme alle particelle di bitume disperse in essa, sono espulse dal materiale.

Si può effettuare uno studio sui vuoti dei provini post-compattazione andando ad elaborare i dati forniti dalla pressa giratoria durante la compattazione (Analisi allo stato fresco) e, una volta che i provini sono stati fatti maturare all'aria, si è potuto identificare i vuoti reali nelle miscele (Analisi allo stato indurito).

3.1.1 Analisi allo stato fresco

L'analisi allo stato fresco è condotta a partire dalle proprietà volumetriche delle miscele, il cui scopo è ricavare gli indici volumetrici V_A (vuoti della componente solida), V_m (vuoti della miscela) e VFL (vuoti della componente liquida).

Tale analisi è efficace per comprendere come il sistema multifase delle miscele di conglomerato evolve durante la compattazione, i valori degli indici infatti vengono ricalcolati ad ogni giro eseguito dalla pressa giratoria identificando il grado di compattazione raggiunto, se ottimale o scarso, in base soprattutto al VFL:

- se minore del 100%, la miscela non ha raggiunto la saturazione;
- se prossimo o superiore al 100%, il provino espelle acqua e la miscela non potrà esser considerata più tale e quale a quella di progetto, per cui il valore sperimentale di vuoti che ne deriva non potrà essere considerato rappresentativo.

Esempio di analisi volumetrica della miscela R10

Si illustra il procedimento impiegato per lo studio volumetrico della miscela preparata, per seguire la trasformazione delle caratteristiche iniziali a partire quindi dai pesi dei singoli componenti, fino ad arrivare alla composizione volumetrica finale.

In Tabella 3.7 si riportano: il tipo di materiale, il nome di materiale, il dosaggio degli aggregati asciutti e degli altri componenti della miscela, il peso del provino secco,

il peso dei solidi (senza bitume), la massima densità asciutta, la densità apparente, ed infine il volume occupato da ciascuno di essi, per finire con il volume del secco ed il volume dei solidi.

Tabella 3.7 Calcolo delle masse e dei volumi dei componenti di una miscela

ID	Name	Dosage with oven-dried aggregates [g]	Dry Weight (no water) [g]	Solids Weight (no Bitumen) [g]	Maximum (dry) density [g/cm ³]	Density (apparent) [g/cm ³]	Volume [cm ³]	Dry Volume (no water) [cm ³]	Solids Volume (no Bitumen) [cm ³]
RA1	0/16	5122			2.482		2064.0		
RA2	-	0			0.000				
VA1	-	0			0.000				
VA2	-	0			0.000				
VA3	-	0.0			0.000				
VA4	0/2	0.0			2.732		0.0		
Filler	calcareo	1280.5			2.650		483.2		
Cemento	C3-fine	128.0			3.020		42.4		
Bitumen		153.7			1.015		151.4		
Water		256.0			1.000		256.0		
Abs Water		58.2			1.000		58.2		
TOTAL		6940	6684	6530	2.439		2997.0	2741.0	2589.6

Sottoposto il provino alla fase di compattazione mediante l'utilizzo della pressa giratoria, si può arrivare a definire dai dati di output il volume del provino, i parametri di densità (ρ_b , ρ_a), e quelli volumetrici (V_m , VMA, VFL) in corrispondenza della variazione del numero di giri, nel nostro caso è stata imposta un'altezza finale pari a 180 mm, e quindi del grado di compattazione raggiunto.

Impostando un foglio di calcolo excel e inserendo le formule delle grandezze sopra citate, che si desiderano monitorare, si può eseguire l'elaborazione dei dati. A livello esemplificativo, si mostra in Tabella 3.8 l'analisi delle altezze h registrate in continuo dalla pressa giratoria, grazie alle quali si possono definire le grandezze volumetriche. Si riportano per intero i primi cinque giri di compattazione, per poi passare direttamente all'ultimo giro (121esimo in questo caso), ovvero quando il provino ha raggiunto l'altezza imposta di 180 mm.

Tabella 3.8 Elaborazione dei dati: parametri di densità e volumetrici

Gyration	Specimen Height	Specimen Volume	Specimen Total Density	Specimen Dry Density	Voids (Air+Water free)	Voids in Aggregates (Air+Wfree+Bit)	Voids filled with Liquids (Water+Bit)
N.	mm	[cm3]	ρ_b [g/cm3]	ρ_d [g/cm3]	V_m [%]	VA [%]	VFL [%]
0	208.533						
1	202.514	3579	1.939	1.868	21.78	26.01	37.51
2	198.869	3514	1.975	1.902	20.35	24.66	40.30
3	196.654	3475	1.997	1.923	19.45	23.81	42.21
4	194.944	3445	2.015	1.940	18.75	23.14	43.81
5	193.692	3423	2.028	1.953	18.22	22.64	45.06
121	179.981	3181	2.182	2.102	11.99	16.75	65.55

Si considerano, ai fini dell'analisi, solo i valori relativi all'ultimo giro, cioè a fine compattazione, da cui si può vedere se il provino ha eventualmente espulso acqua, condizione a noi sfavorevole poiché significa che la miscela di progetto non si è mantenuta tale. È facile riconoscere o meno se si rientra in questa casistica: il valore di VFL non deve oltrepassare il 90%, limite riconosciuto come pratico, in opposizione al limite teorico del 100%; pertanto non è necessario raggiungere obbligatoriamente la saturazione per espellere acqua.

Si può anche seguire l'avanzamento della compattazione dal grafico prodotto direttamente dalla pressa, qui sotto riproposto in Figura 3.19, dove al variare del numero di giri segue il diminuire progressivo dell'altezza del provino, tracciando così la curva di compattazione.

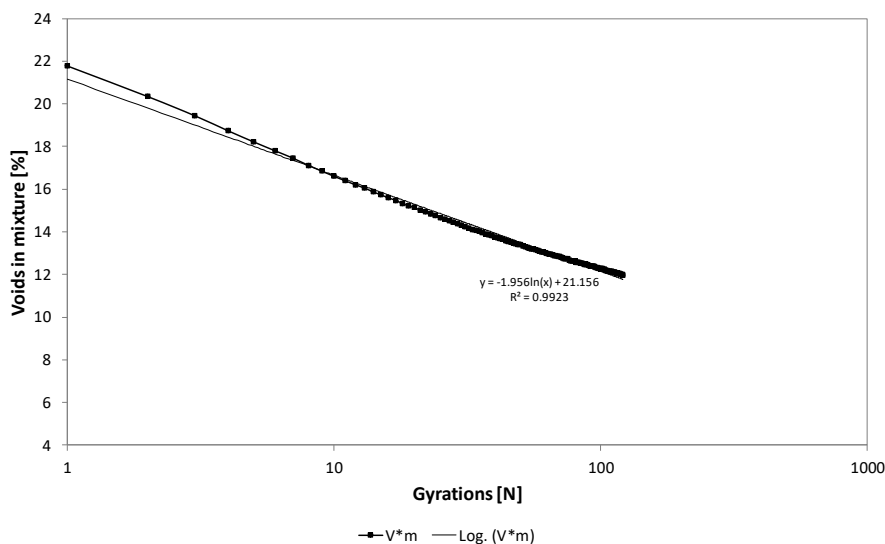


Figura 3.19 Curva di compattazione

Dall'elaborazione si ottengono poi le curve dell'andamento di V_m e VFL, come da Figura 3.20, che rappresentano la variazione dei parametri considerati in ordinata, mentre in ascissa si riporta il progredire del numero di giri. Si nota che con il progredire della compattazione il valore dei vuoti V_m si riduce poiché i vuoti vengono ridotti per l'energia meccanica imposta, mentre l'andamento contrario è intrapreso dal VFL, parametro che indica il grado di saturazione del provino.

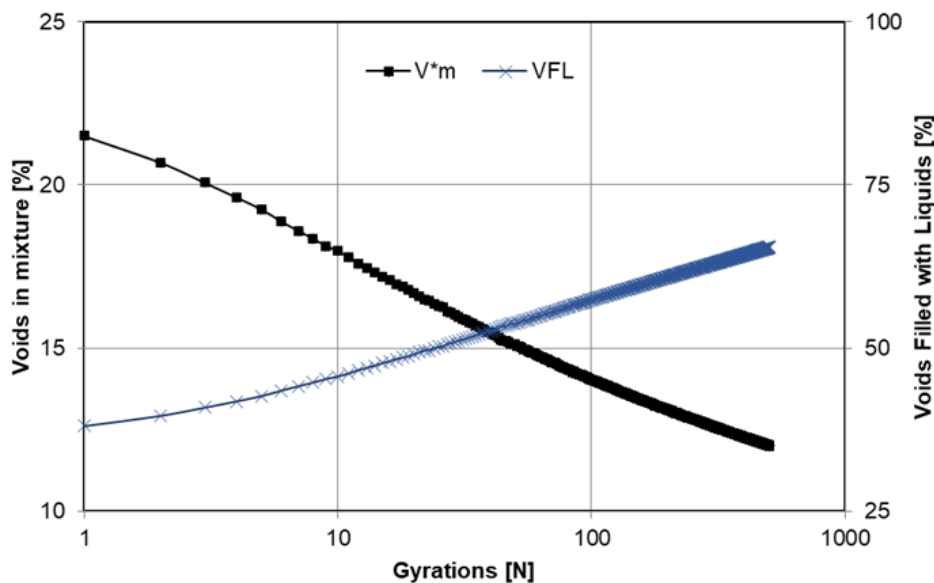


Figura 3.20 Curva di compattazione di V_m e VFL

3.1.2 Analisi allo stato indurito

Attraverso l'analisi allo stato indurito si fa un confronto diretto tra i vuoti calcolati con l'analisi allo stato fresco e quelli realmente insiti nella miscela, una volta portata a maturazione. L'idea è trovare una corrispondenza quanto più univoca, ma altri processi possono aver influito portando ad una variazione dall'ottimo.

Determinazione dei vuoti

La stima del tenore dei vuoti è una fase necessaria durante il progetto di un conglomerato bituminoso. Una miscela chiusa, ossia con basso tenore dei vuoti (compresi tra 3% e 8%), ha un comportamento in esercizio differente da una miscela con un tenore di vuoti alto (compreso tra 8% e 14%). Un elevato tenore dei vuoti riduce la resistenza meccanica del conglomerato, inoltre si ottiene un prodotto più permeabile in cui è accelerato il processo di invecchiamento del bitume in quanto risulta maggiormente esposto agli agenti atmosferici.

La norma di riferimento è la UNI EN 12697-8 che tratta la determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi, anche se nello specifico delle miscele riciclate a freddo non è presente alcuna informazione nella norma.

Il calcolo della percentuale dei vuoti di un conglomerato bituminoso si esegue con la formula:

$$Vm = \frac{\rho m - \rho b}{\rho m}$$

dove:

- Vm= indice dei vuoti espresso in percentuale;
- ρm = massa volumica massima;
- ρb = massa volumica apparente del provino in questione.

Determinazione della massa volumica apparente dei provini

La norma di riferimento è la UNI EN 12697-6 che tratta a proposito della massa volumica apparente di provini bituminosi compattati, in laboratorio o ricavati da carote prelevate dalla pavimentazione. Le procedure citate nella norma sono quattro:

1. massa volumica apparente secca, $\rho_{b,dry}$
2. massa volumica apparente a superficie satura asciutta, $\rho_{b,ssd}$
3. massa volumica apparente con provino sigillato, $\rho_{b,sea}$
4. massa volumica apparente geometrica, $\rho_{b,dim}$

le procedure impiegate nel presente studio sono la 1 e la 4.

1. Per ottenere la massa volumica apparente secca (ρ_{dry}) bisogna prima di tutto determinare la massa del provino secco (m_1), determinare la densità dell'acqua (ρ_w) alla temperatura di prova, che nel nostro caso è $t = 21.6^\circ$, con la seguente formula:

$$\rho_w = 1,00025205 + \frac{7,59 * t - 5,32 * t^2}{10^6}$$

Infine determinare la massa m_2 , ovvero la massa del provino immerso in acqua a temperatura di prova nota; determinare la massa appena dopo l'immersione.

Si calcola la massa volumica apparente secca (ρ_{dry}) con la formula:

$$\rho_{b, dry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_w$$

dove

- ρ_{dry} è la densità apparente secca in Mg/m^3 ;

- m_1 è la massa del provino secco in grammi;
- m_2 è la massa del campione in acqua in grammi;
- ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova in Mg/m^3 .

4. La massa volumica apparente geometrica è molto semplice da ottenere, si determina la massa del provino secco m_1 , poi con apposito strumento, in genere un calibro, si misurano le dimensioni del provino in millimetri.

Per calcolare invece la massa volumica apparente geometrica, su provini cilindrici, si può utilizzare:

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

dove:

- h = altezza del provino;
- d = diametro del provino.

Determinazione del contenuto di bitume

Per determinare il contenuto di legante nella miscela, i provini compattati vengono sottoposti all'estrazione di bitume. Si campiona almeno 1 kg di materiale e lo si inserisce in apposito cestello a contatto con del solvente, che sobbollendo permette di estrarre il contenuto di legante presente nel provino, ovvero in parte proveniente dal RA ed in parte dall'emulsione bituminosa aggiunta.

Prima di procedere alla prova si dovranno pesare le tare della capsula e del cestello, poi si inserisce circa 1 kg di materiale, il macchinario esegue 8 cicli di lavaggio e 8 cicli di asciugatura. Il macchinario per l'estrazione (Figura 3.21) separa aggregato, filler e bitume, alla fine della prova che dura circa 55 minuti, si pesa l'aggregato nel cestello e il filler nella capsula, e per differenza si ottiene il contenuto di bitume.



Figura 3.21 Macchinario per l'estrazione

Sono state effettuate quattro estrazioni così da prendere i valori medi ottenuti da esse.

Tabella 3.9 Estrazione 1, 2, 3 e 4

		Estrazione 1	Estrazione 2	Estrazione 3	Estrazione 4
Prima dell'estrazione					
tara cestello	[g]	3451.2	3448.1	3449.1	3449.4
lordo cestello	[g]	4848.7	4487.6	4488.9	4498.2
tara capsula	[g]	534.6	534	534	534
m iniziale	[g]	1397.5	1039.5	1039.8	1044.4
Dopo l'estrazione					
lordo cestello	[g]	4564.6	4274.9	4294.1	4285
lordo capsula	[g]	739.3	683.8	674.9	687.3
m filler	[g]	204.7	149.8	140.9	153.3
m aggregato	[g]	1113.4	823.3	845	835.6
m bit	[g]	79.4	62.9	53.9	59.9
Percentuali finali					
bitume	%	5.7	6.1	5.18	5.74
filler	%	14.6	14.4	13.55	14.68
aggregato	%	79.7	79.5	81.27	79.59

Determinazione della massa volumica massima

I vari metodi di prova per la determinazione della massa volumica massima (ρ_{max}) di una miscela bituminosa sono specificati dalla normativa tecnica europea UNI EN 12697-5. La ρ_{max} è la massa per volume unitario, senza vuoti d'aria, di una miscela di conglomerato bituminoso. La norma propone tre metodi:

1. volumetrico: il volume del campione è misurato come lo spostamento dell'acqua da parte del campione in un picnometro;
2. idrostatico: il volume del campione è calcolato a partire dalla massa essiccata del campione e dalla sua massa nell'acqua;

3. matematico: la massa volumica massima di una miscela bituminosa è calcolata a partire dalla sua composizione (contenuto di legante e contenuto di aggregati) e dalle masse volumiche dei materiali cui è composto il conglomerato bituminoso.

Nel presente studio è stato utilizzato il terzo metodo.

3. Nel metodo matematico si calcola la massa volumica facendo riferimento alle percentuali d'impiego degli aggregati e del bitume e alle rispettive densità. È un metodo semplice da utilizzare nel caso in cui sia nota la composizione della miscela, la percentuale dell'aggregato, la percentuale del legante, e le densità dell'aggregato e del legante. Per calcolare la massa volumica massima del conglomerato bituminoso si può impiegare la seguente formula:

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{p_a}{\rho_a} + \frac{p_b}{\rho_b}}$$

dove:

p_a = percentuale dell'aggregato rispetto alla miscela (aggregato+bitume);

ρ_a = densità dell'aggregato;

p_b = percentuale di bitume rispetto alla miscela (aggregato+bitume);

ρ_b = densità del bitume.

Il metodo matematico è stato applicato due volte, "a priori" e "a posteriori". "A priori" andando a inserire nella formula le percentuali dei vari componenti della miscela prendendoli direttamente da ricetta; "a posteriori" inserendo le percentuali di aggregato, filler e bitume ottenute una volta eseguita l'operazione di estrazione del bitume.

3.1.3 Risultati della caratterizzazione volumetrica

Nelle Tabelle 3.10 e 3.11 vengono riportati i risultati della caratterizzazione volumetrica eseguita sui provini da 38, 75 e 100 mm. Nella Figura 3.22 si mostra un confronto dell'indice dei vuoti calcolato con il metodo geometrico ($V_{m,dim}$) e il metodo idrostatico ($V_{m,dry}$).

Tabella 3.10 Caratterizzazione volumetrica dei provini parte prima

Codice provino	Dm [mm]	Hm [mm]	Volume geom [mm ³]	m1 [g]	m2 [g]	T [°]	ρw [g/cm ³]
38_3.2_R1	38.15	109.5	125167.93	264.1	141.3	21.6	0.998
38_3.2_R2	38.2	109.375	125352.98	260.4	139.98	21.6	0.998
38_4.1_R3	38.175	110.65	126648.31	268.5	144.3	21.6	0.998
38_4.1_R2	38.325	110.975	128020.45	267.7	144.87	21.6	0.998
38_4.1_R1	38.2	109.325	125295.68	264.1	141.5	21.6	0.998
38_2.3_R1	38.375	110.85	128210.13	264.8	142.05	21.6	0.998
38_2.3_R2	38.225	110.625	126951.59	265.9	142.36	21.6	0.998
38_2.3_R3	38.3	111.05	127939.90	266.8	141.9	21.6	0.998
75_3.1	74.3	129.7	562351.02	1207.4	651.7	21.6	0.998
75_4.3	74.275	129.925	562947.54	1212.6	654.3	21.6	0.998
75_2.2	74.225	128.95	557971.02	1204.1	649.25	21.6	0.998
100_4.2	94.225	150	1045956.04	2253	1215.7	21.6	0.998
100_3.3	94.05	149.375	1037732.45	2216.6	1189.25	21.6	0.998
100_2.1	94.1	149.45	1039357.72	2240.7	1209.2	21.6	0.998

Tabella 3.11 Caratterizzazione volumetrica dei provini parte seconda

Codice provino	ρb,dim [Mg/m ³]	ρb,dry [Mg/m ³]	ρm (priori) [Mg/m ³]	ρm (posteriori) [Mg/m ³]	Vm,dim [%]	Vm,dry (priori) [%]	Vm,dry (posteriori) [%]
38_3.2_R1	2.110	2.146	2.439	2.429	13.47	11.99	11.63
38_3.2_R2	2.077	2.158	2.439	2.429	14.81	11.51	11.14
38_4.1_R3	2.120	2.157	2.439	2.429	13.06	11.53	11.17
38_4.1_R2	2.091	2.175	2.439	2.429	14.25	10.81	10.44
38_4.1_R1	2.108	2.150	2.439	2.429	13.56	11.85	11.48
38_2.3_R1	2.065	2.153	2.439	2.429	15.30	11.72	11.35
38_2.3_R2	2.094	2.148	2.439	2.429	14.11	11.92	11.56
38_2.3_R3	2.085	2.132	2.439	2.429	14.48	12.58	12.22
75_3.1	2.147	2.168	2.439	2.429	11.95	11.08	10.72
75_4.3	2.154	2.167	2.439	2.429	11.67	11.12	10.75
75_2.2	2.158	2.166	2.439	2.429	11.51	11.19	10.82
100_4.2	2.154	2.167	2.439	2.429	11.67	11.12	10.75
100_3.3	2.136	2.153	2.439	2.429	12.41	11.70	11.34
100_2.1	2.156	2.168	2.439	2.429	11.59	11.10	10.74

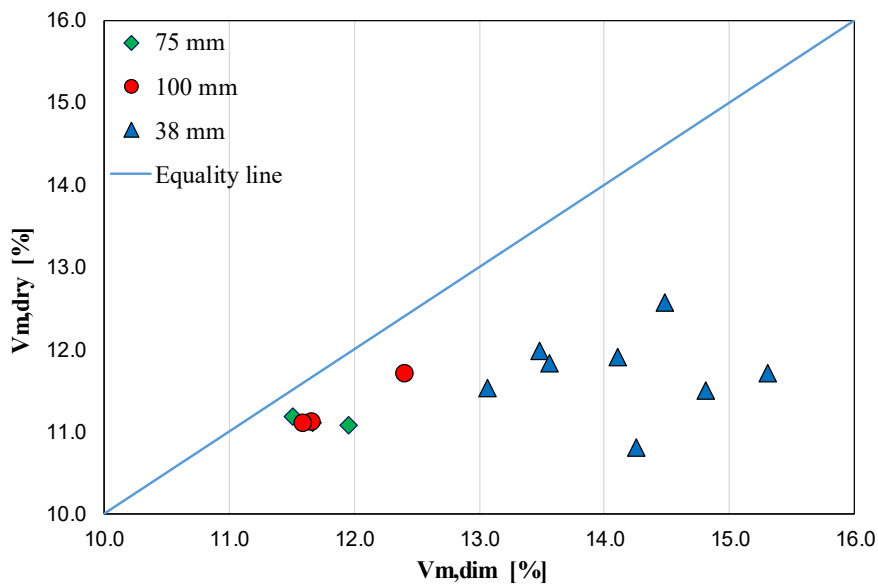


Figura 3.22 Confronto indice dei vuoti con metodo geometrico e metodo idrostatico

3.2 Misura del modulo complesso

Per valutare quale sia l'effetto che la dimensione del provino produce sulla misura del comportamento meccanico delle miscele e la sua dipendenza da temperatura e frequenza, sono state realizzate prove di modulo complesso.

I provini sono stati sottoposti a prove di compressione monoassiale, con ampiezza dell'onda sinusoidale di $30 \mu\epsilon$ alle temperature di 5, 15, 25, 35, 45, 55 °C. La prova alla temperatura di 25 °C è stata eseguita altre due volte, una prima volta prima del test a 5 °C (pre-test) ed una terza volta dopo il test a 55 °C (post-test).

Ad ogni temperatura, raggiunta tramite condizionamento di circa 3 ore, sono state realizzate le prove alle frequenze di 20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1, Hz, tramite una cosiddetta "spazzata di frequenze" (*frequency sweep*).

Strumentazione AMPT Pro

La strumentazione utilizzata nel presente studio sperimentale è AMPT Pro - Asphalt Mixture Performance Tester (Figura 3.23).

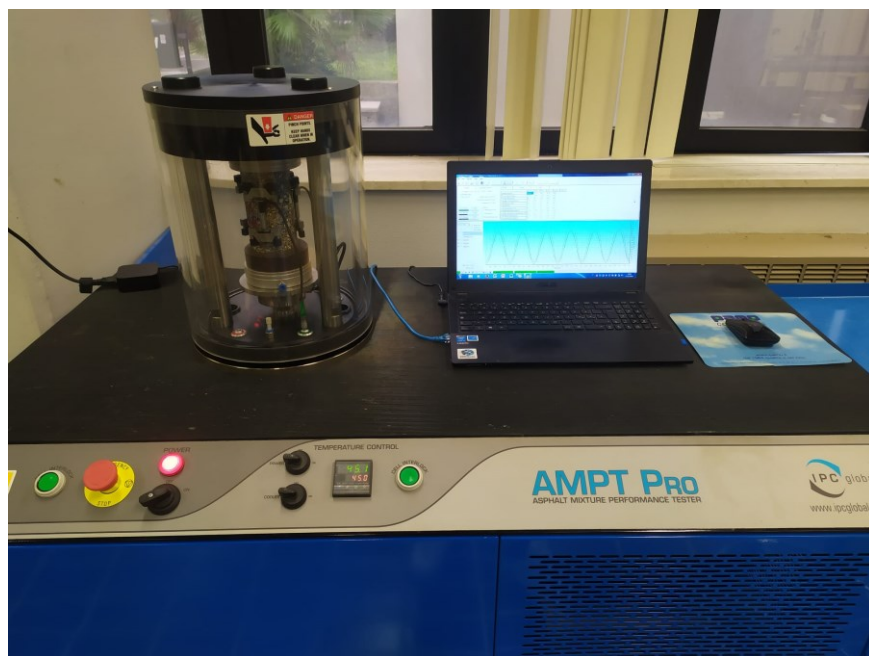
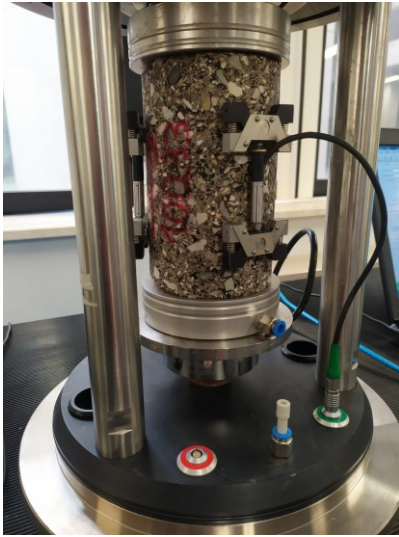


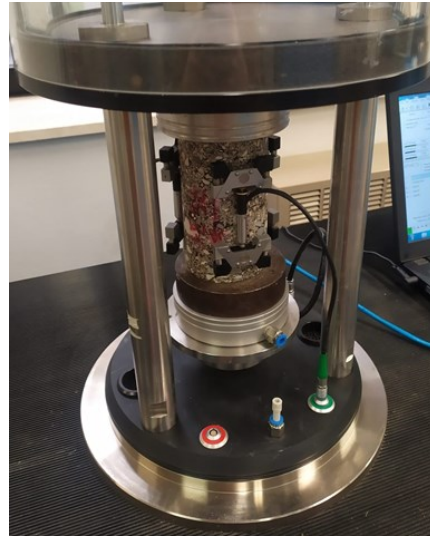
Figura 3.23 Strumentazione AMPT PRO

L'apparecchiatura AMPT Pro costituisce una strumentazione integrata composta, da un punto di vista meccanico, da un impianto di condizionamento a controllo digitale e da un motore a funzionamento idraulico in controllo della piastra di carico, gestito direttamente tramite il software di prova. La camera in cui avviene il test del provino, camera il cui sollevamento è anch'esso gestito tramite software, è una cella triassiale climatizzata: la presenza di bocchette d'aria consentono una rapida rimozione del calore favorendo l'efficienza energetica ed una buona performance nel raffreddamento.

Come mostrato in Figura 3.24, il provino viene strumentato attraverso l'uso di tre trasduttori (nero, verde, blu) distanziati a 120° , centrati rispetto all'altezza, atti a fornire al software la quantificazione della deformazione subita dal provino durante la compressione assiale. Vengono installati sul provino con l'ausilio degli x-man, direttamente collegati ai riscontri precedentemente incollati.



a)



b)



c)

Figura 3.24 Montaggio nella cella climatica del provino da 100 mm (a), da 75 mm (b), x-man (c)

L'AMPT Pro è collegata tramite cavo di rete ad un notebook, in cui sono installati i software di controllo: nella sperimentazione oggetto di questa tesi è stato utilizzato "UTS6".

Nella prima schermata "*General*", come mostrato in Figura 3.25, è possibile inserire i seguenti dati:

- *Project name*;
- *Operator name*;
- *Comments*;
- *Data file*;
- *Template*: modello in uso riferito al range di temperature (rigidezze) adottato.

Queste informazioni verranno inserite nei file di output della prova. In alto, i pulsanti "*Raise*" e "*Lower*" consentono di elevare o abbassare la cella.

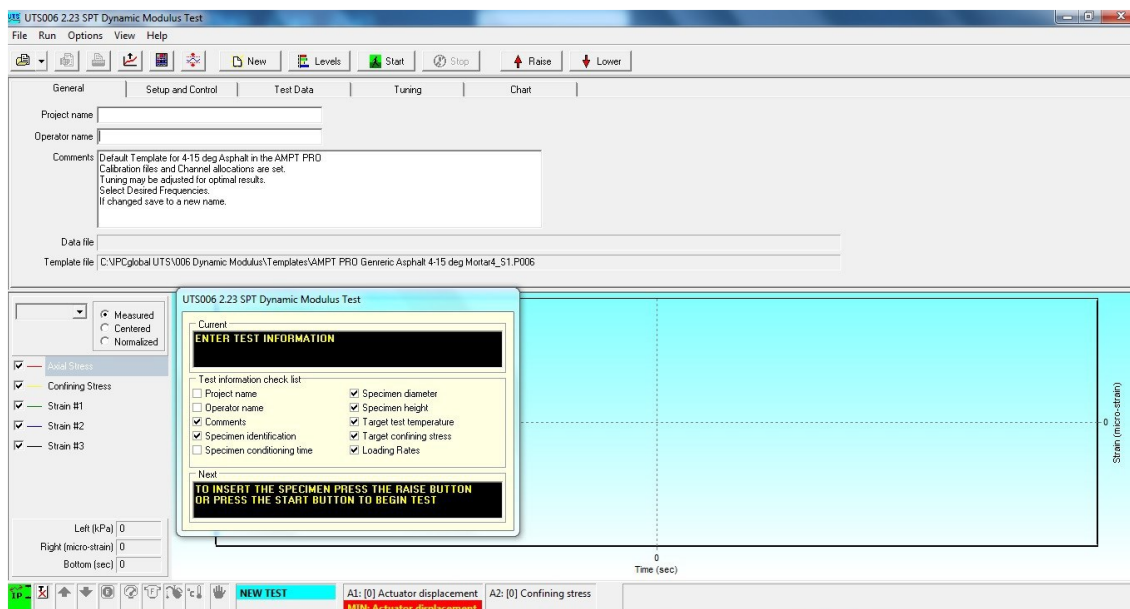


Figura 3.25 Schermata "General"

Nella seconda schermata, "*Setup and Control*", mostrata in Figura 3.26, vengono inseriti i parametri relativi alla prova di compressione sinusoidale che si vuole effettuare:

- *Frequencies*: il software consente di selezionare le frequenze di prova desiderate, sia ad una singola frequenza, che a gruppi di frequenze;
- *Specimen information*: nello spazio "*Identification*" viene inserito il nome del provino;
- *Conditioning time*, e *Properties/Comments*: informazioni che verranno legate agli output di prova;
- *Dimensions*: in queste caselle si inseriscono i dati relativi al diametro (mm) e all'altezza (mm) del provino sperimentato, per consentire al software di elaborare correttamente la pressione applicata: $pressione = forza/area$. In caso di letture multiple delle dimensioni geometriche è possibile inserire fino a 6 diverse letture, delle quali il software provvederà ad eseguire la media;
- *Target test temperature*: la temperatura obiettivo di prova;
- *Target confining stress*: la cella di prova è in grado di instaurare un regime di pressione radiale grazie all'insufflazione di aria dalle bocchette interne alla cella. Per quanto riguarda la sperimentazione effettuata non è stata adottata pressione di confinamento;
- *Initial modulus*: questo parametro consente all'operatore di tarare lo stato di sollecitazione che andrà ad utilizzare l'apparecchiatura all'applicazione della

prima onda sinusoidale, per impedire che una sollecitazione eccessiva vada ad impegnare il provino: durante la sperimentazione si è utilizzata come buona norma quella di impostare il modulo iniziale ad un valore inferiore a quello generalmente atteso alla frequenza e temperatura di ogni singola prova;

- *Axial gauge length* (mm): la distanza alla quale sono applicati i riscontri sul provino, che individua la lunghezza a riposo del trasduttore. Nella sperimentazione è di 70 mm;
- *Average dynamic strain range*: indica il range all'interno del quale ricade il livello deformativo desiderato;
- *Contact stress (% of dynamic stress)*: la pressione minima applicata sulla piastra di carico per garantire il contatto con il provino.

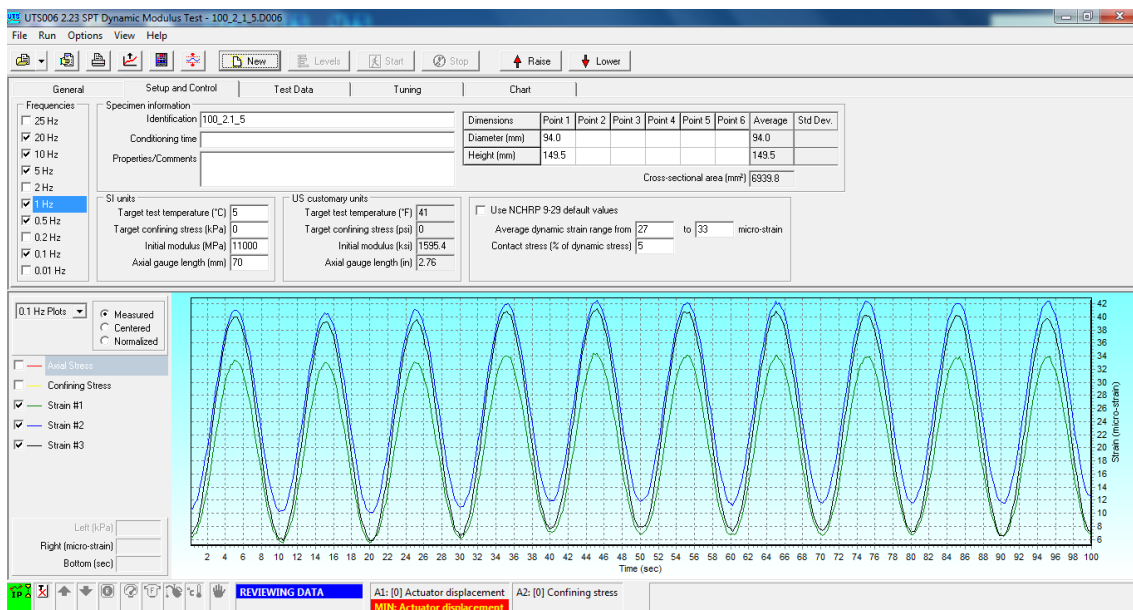


Figura 3.26 Schermata "Setup and Control"

Una volta definite tutte le grandezze inerenti alla prova, si può passare al controllo del motore idraulico che gestisce la testa di carico, tramite un telecomando virtuale (Figura 3.27) si gestiscono indipendentemente l'alimentazione fornita "Hydraulic power supply" secondo due livelli ("medium" ed "high"), e la pressione nei pistoni, "Hydraulic service manifold", anche questa con due livelli ("medium" ed "high"). Una accensione corretta della macchina prevede prima l'attivazione dell'alimentazione e poi la messa in pressione dei pistoni. Terza funzionalità è "Axis jog control" con la quale si può determinare manualmente l'innalzamento o l'abbassamento del pistone su cui è montato il provino.

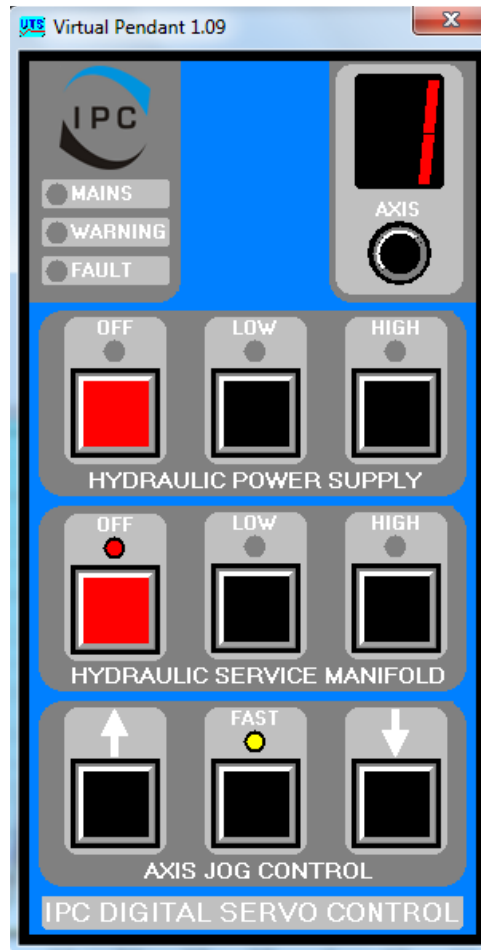


Figura 3.27 "Virtual Pendant"

L'installazione corretta dei trasduttori viene valutata nella schermata "Levels", riportata in Figura 3.28. Su questa finestra si leggono i parametri di prova che il macchinario rileva in seguito al montaggio del provino:

- *Actuator displacement* (mm): posizione dell'attuatore;
- *Axial force* (kN): valore forza assiale;
- *Confining stress* (kPa): pressione di confinamento applicata, che nel caso studio viene prevista nulla;
- *Temperature* (°C): la temperatura interna della cella triassiale climatizzata;
- *Axial LVD T* (#1, #2, #3) (mm): deformazione applicata ai tre trasduttori.

Durante la fase iniziale di montaggio del provino, nella camera climatica, si mira a garantire il suo corretto centraggio. Questa operazione prevede di realizzare dei movimenti controllati sulla posizione del provino, con l'obiettivo di raggiungere uno stato tensionale uniforme sui tre trasduttori. Affinché essi non risultino essere né troppo

compressi e né troppo tesi, bisogna verificare che la deformazione in *Axial LVD T*, per ciascuno, sia prossima allo zero.



Figura 3.28 Schermata "Levels"

L'ultima schermata illustrata è quella in Figura 3.29. È possibile monitorare l'evoluzione dello stato di sollecitazione e deformazione in presa diretta durante l'esecuzione del test, tramite il grafico time-stress; al termine della prova vengono illustrati i risultati.

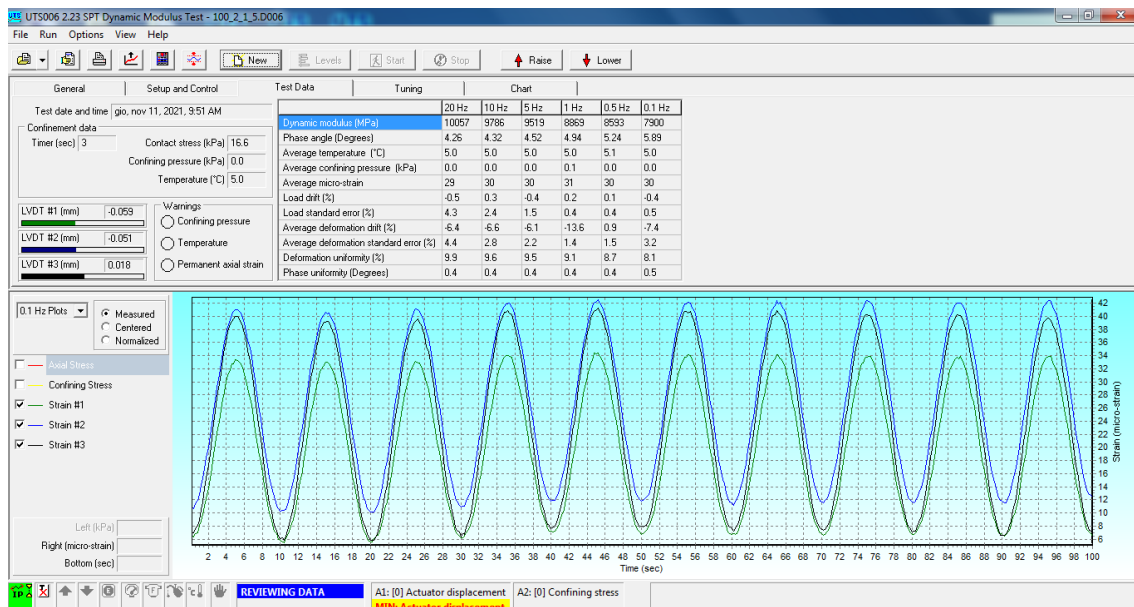


Figura 3.29 Schermata "Test Data"

Al completamento della prova è possibile, oltre a salvare il file nativo del software in formato “D006” e esportare i risultati in formato “.CSV” (Comma-Separated Values): vengono creati un file sommario "_Sum" contenente informazioni generali, ed un file relativo alla singola frequenza di prova contenente, oltre ai risultati appena illustrati, i seguenti valori, relativi a 50 punti per onda, per le 10 onde di prova.

3.2.1 Correzione dell'angolo di fase

A tutte le temperature e per tutti i materiali è possibile notare un'incongruenza nella misurazione del modulo nei risultati sperimentali ottenuti sui provini testati, soprattutto a frequenze più elevate. Ciò è dovuto a un piccolo ritardo della macchina di prova (0,003 – 0,005 s) nella misurazione della sollecitazione rispetto alla deformazione, questo mi dà angoli di fase elevati specialmente alle alte frequenze. Sarà quindi necessario applicare una correzione sull'angolo di fase φ tramite la formula:

$$\varphi = \varphi_{mis} - \frac{2\pi}{T} \Delta t$$

nello studio sperimentale della presente tesi si è assunto un ritardo Δt di 0,004 secondi.

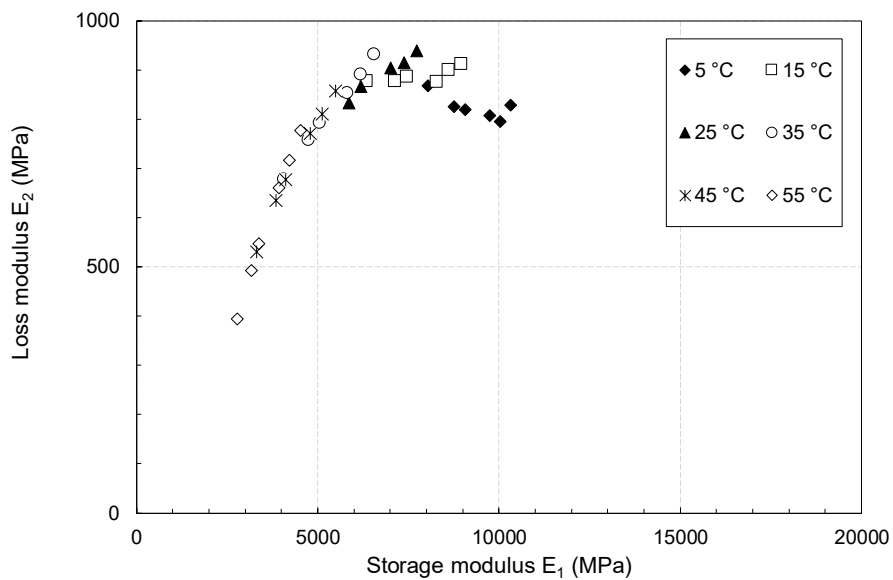


Figura 3.30 Esempio di dati sperimentali di un provino rappresentati nel piano Cole-Cole, senza correzione dell'angolo

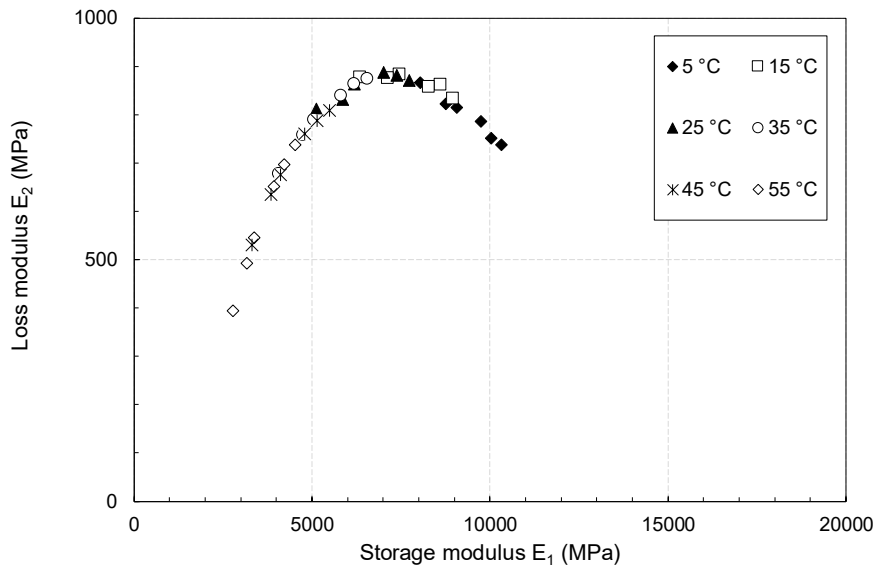


Figura 3.31 Esempio di dati sperimentali di un provino rappresentati nel piano Cole-Cole, con correzione dell'angolo

3.3 Costruzione delle curve maestre

Le curve maestre (*master curves*) di $E_0(\omega)$ o $\varphi(\omega)$ che descrivono la risposta LVE del materiale ad una temperatura di riferimento T_{ref} in funzione della frequenza, possono quindi essere costruite applicando il TTSP, come descritto precedentemente. I dati misurati ad ogni temperatura T sono traslati orizzontalmente e allineati a quelli ottenuti a T_{ref} , con l'applicazione del fattore di traslazione $aT_{ref}(T)$, necessario per sovrapporre i dati misurati a T e T_{ref} . I fattori di traslazione $aT_{ref}(T)$ sono comunemente determinati manualmente spostando i segmenti della funzione di risposta lungo la scala temporale logaritmica. La determinazione di $aT_{ref}(T)$ diventa così puramente soggettiva e dipende molto dall'esperienza dell'operatore. Una procedura matematica alternativa è stata proposta per rimuovere l'ambiguità relativa alla procedura di traslazione: l'algoritmo di spostamento in forma chiusa (*Closed-Form Shifting*, CFS). Nell'applicazione del CFS al fine di determinare i fattori di traslazione si calcolano il logaritmo della frequenza e il logaritmo del modulo di rigidità. Si determinano poi i punti di sovrapposizione dei valori del modulo e si determina tramite formule matematiche il valore del fattore di traslazione necessario ad annullare l'area tra le due isoterme (Figura 3.32).

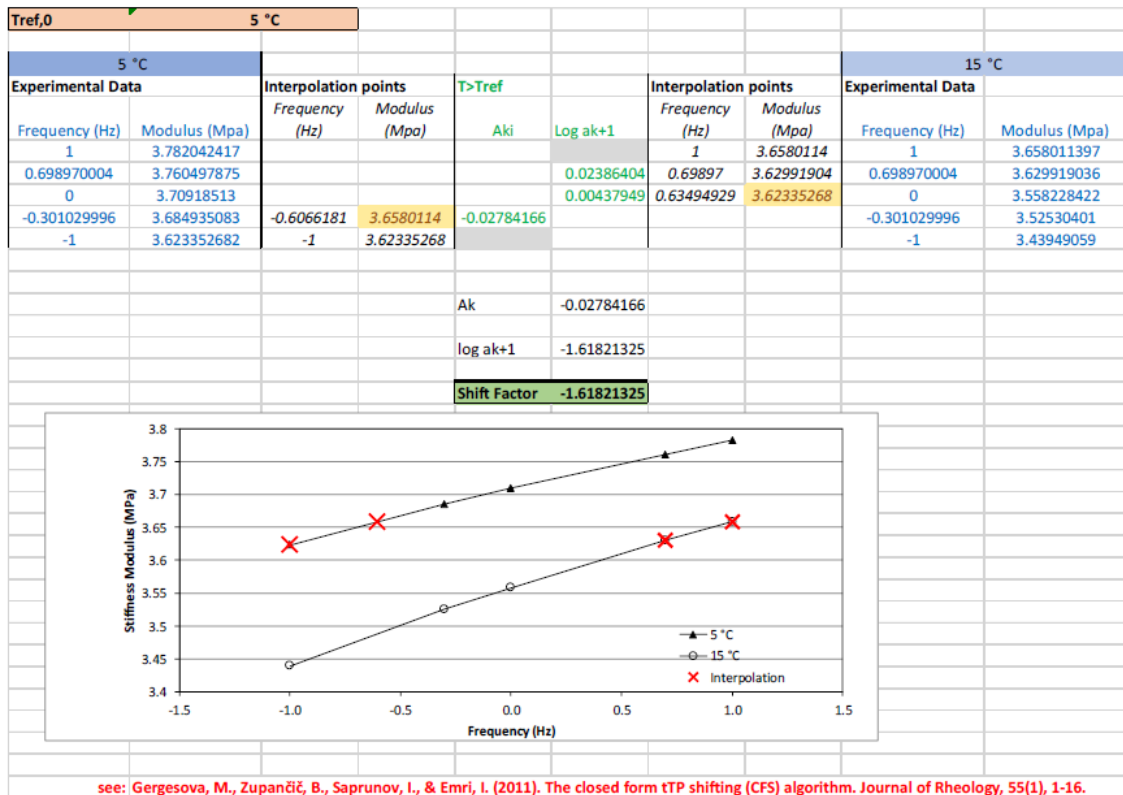


Figura 3.32 Foglio di calcolo "CFS" con isoterme del logaritmo del modulo di rigidezza

Per semplicità di calcolo, nel presente foglio si considera come temperatura di riferimento la più bassa tra le temperature di prova, ovvero 5 °C.

La dipendenza dalla temperatura degli aT ottenuti è stata modellata utilizzando il modello Williams-Landel-Ferry (WLF) dove C_1 , C_2 sono costanti ottenute tramite adattamento ai minimi quadrati (Ferry, 1980):

$$\text{Log}(a_{Tref}) = -\frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}}$$

E' stato definito un ulteriore foglio di calcolo "WLF" (Figura 3.33), che permette di calcolare i valori delle costanti C_1 e C_2 attraverso una regressione lineare, nella quale i valori in ascissa sono rappresentati dal valore dT che definisce la differenza tra la temperatura di prova e la temperatura di riferimento considerata (5°C), mentre in ordinata si ha il rapporto tra dT e il valore del logaritmo del fattore di traslazione determinato mediante il CFS. Si procede determinando, tramite la funzione matrice di Excel, i due parametri "a", coefficiente angolare, "b" intercetta della retta di tendenza. Si ricavano i due coefficienti come segue:

- C_1 come il rapporto di $\frac{1}{a}$;

- C_2 come il rapporto di $\frac{a}{b}$.

Noti i valori dei due parametri del modello WLF per una temperatura di riferimento T_0 (nel caso in questione 5°C), $C_{1,0}$ e $C_{2,0}$, è possibile determinare i loro valori $C_{1,g}$ e $C_{2,g}$ facendo riferimento ad una qualsiasi altra temperatura di prova T_g utilizzando le seguenti relazioni (Tschoegl et al., 2002):

$$C_{2,0} - T_0 = C_{2,g} - T_g$$

$$C_{1,0}C_{2,0} = C_{1,g}C_{2,g}$$

Nella presente investigazione si è deciso di adottare come temperatura di riferimento $T_{\text{rif}}=25^\circ\text{C}$. La Figura 3.34 mostra la dipendenza degli shift factors $aTrif(T)$ dalla temperatura sia per $T_0=5^\circ\text{C}$ che per $T_{\text{ref}}=25^\circ\text{C}$.

Tref,0 5 °C					Tref,g 25 °C					
T	Teff	LOG SF	dT	dT/logSF	regr lin	y=ax+b	Teff	LOG SF*	Teff	LOG SF*
5	5	0			a	b	5	0		
15	15	-1.61821325	10	-6.17965525	-0.044442217	-5.879056107	15	-1.58141		
25	25	-2.906312256	20	-6.88157302			25	-2.95513		
35	35	-4.098149722	30	-7.32037676	C1	C2	35	-4.15955	C1	C2
45	45	-5.21178688	40	-7.67491091	22.50	132.29	45	-5.22415	19.55	152.29
55	55	-6.246020387	50	-8.00509715			55	-6.17195		

Figura 3.33 Calcolo degli shift factors tramite regressione lineare

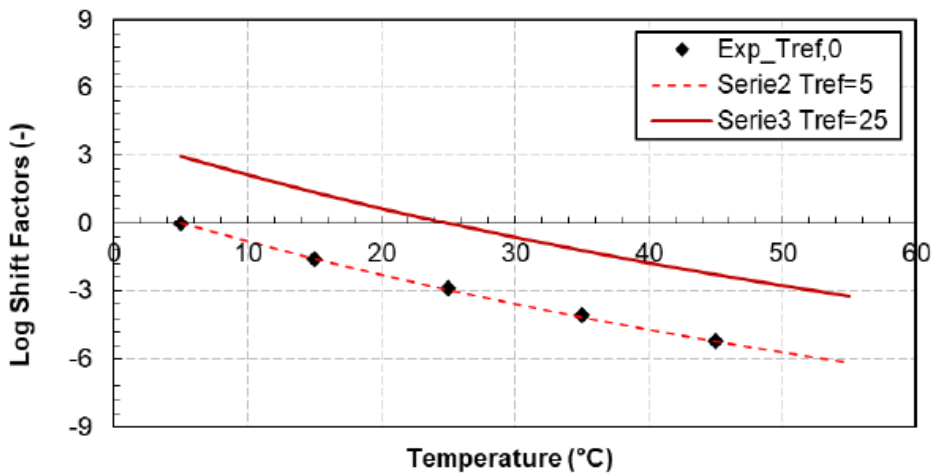


Figura 3.34 Fattori di traslazione e confronto con la legge WLF

Possiamo quindi costruire la Curva Maestra del modulo di rigidezza (Figura 3.35) determinando la frequenza ridotta f_r come:

$$f_r = f \cdot a_{Trif}(T)$$

Sono stati adottati gli stessi fattori di traslazione determinati per il modulo di rigidezza per costruire la curva maestra dell'angolo di fase (Figura 3.36).

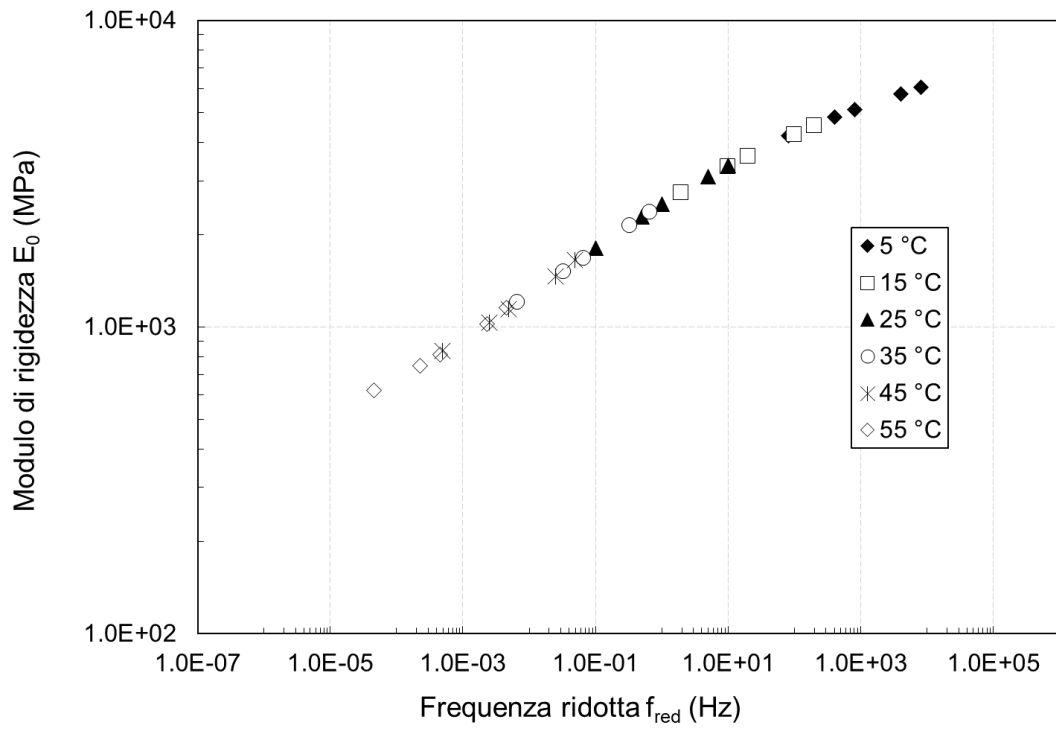


Figura 3.35 Curva Maestra di E_0 (Trif= 25°C)

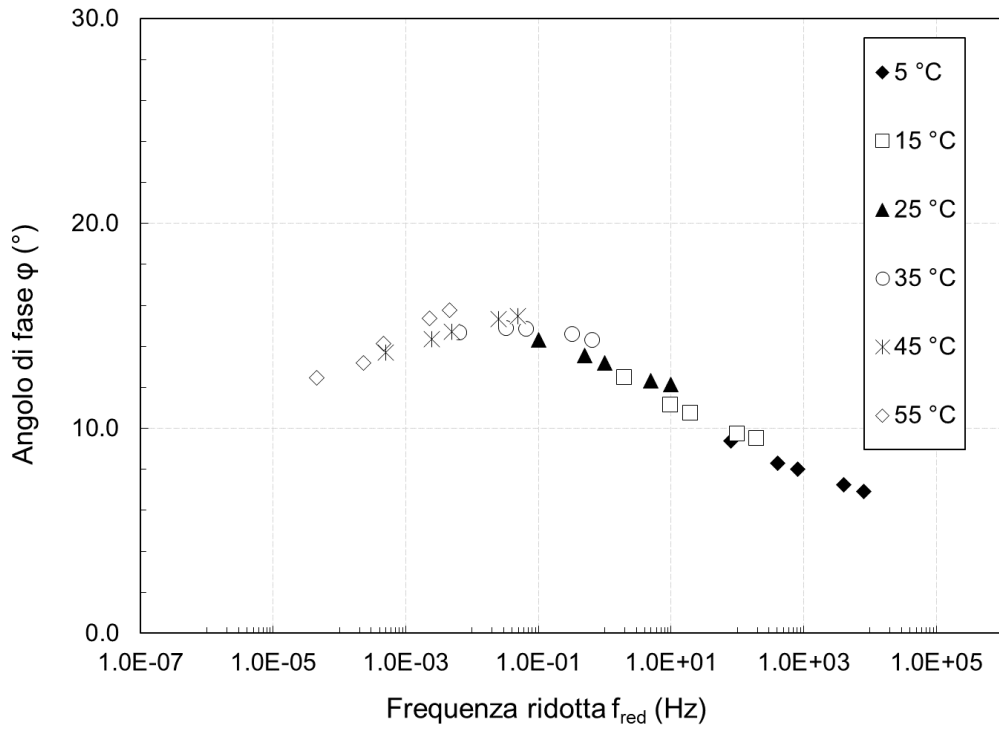


Figura 3.36 Curva maestra di φ (Trif= 25°C)

3.4 Modellazione reologica

La modellazione del comportamento reologico è stata realizzata attraverso il modello di 2S2P1D-HY, questo modello è basato sui seguenti parametri:

- E_e modulo di equilibrio (ω tende a 0);
- E_g modulo vetroso (ω tende a ∞);
- h, k , parametri compresi tra 0 e 1 rappresentativi dell'inclinazione della curva del modello nel piano di Cole-Cole;
- δ parametro che governa l'ampiezza della curva del modello nel piano di Cole-Cole;
- τ tempo caratteristico.

Il modello è stato implementato in un foglio di calcolo excel che consente la determinazione dei suoi parametri tramite la funzione "Risolutore": il foglio di calcolo si avvale di un processo numerico per iterazioni successive, provando a minimizzare l'errore ai minimi quadrati. Gli errori considerati sono calcolati considerando la distanza ovvero l'errore sulla serie E1-E2 (Cole-Cole), l'errore sul modulo di rigidità e l'errore sull'angolo di fase.

Tuttavia si possono determinare preliminarmente per via grafica il modulo vetroso E_g e il modulo di equilibrio E_e . Per stimare un valore di massima del modulo vetroso E_g si estrapola l'andamento dei punti sperimentali nel piano di Black fino ad intercettare l'asse delle ordinate (Figura 3.38), analogamente sul diagramma Cole-Cole si stima il valore per il quale i dati sperimentali intersecano l'asse delle ascisse, questo rappresenta E_e (Figura 3.39).

Tabella 3.6 Funzione "Risolutore"

Modello		Risolutore	
Ee	400	LogEe	2.60205999
Eg	9136	LogEg	3.960756085
k	0.175	k	0.175
h	0.383	h	0.383
d	3.660	d	3.660
beta	3162.278	Logbeta	3.5
tau	0.991	Logtau	-0.00412289
		qpi/2	1.28

Errore (Eo)
128.639188

Distance
15454.3567

Errore (dE)
5.30997522

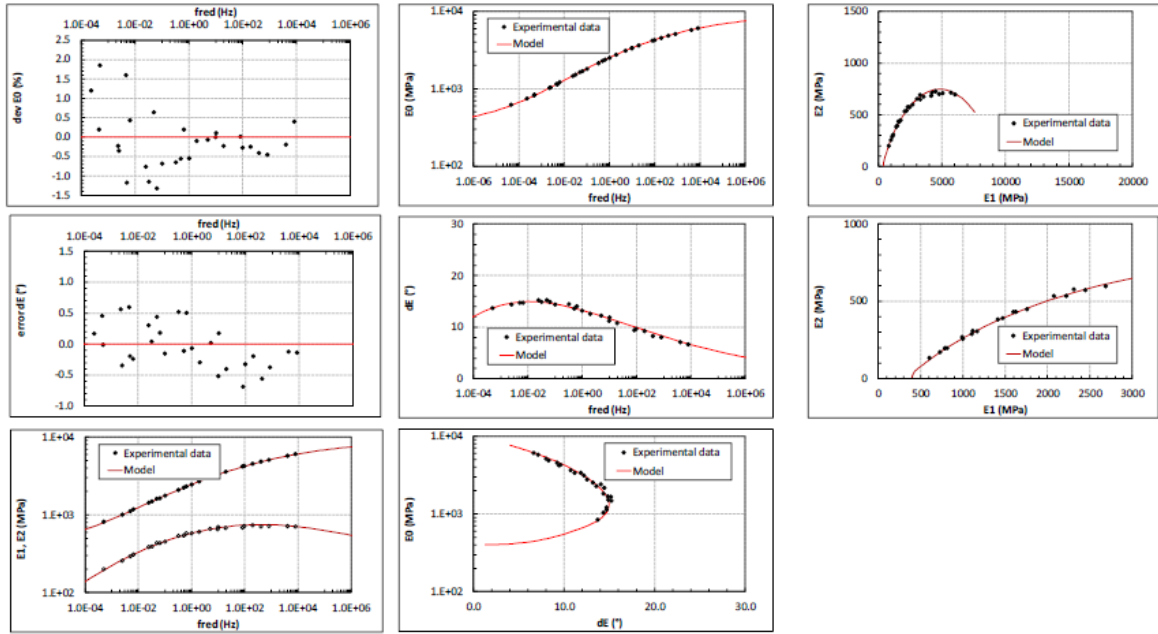


Figura 3.37 Piani di rappresentazione del modello 2S2P1D-HY

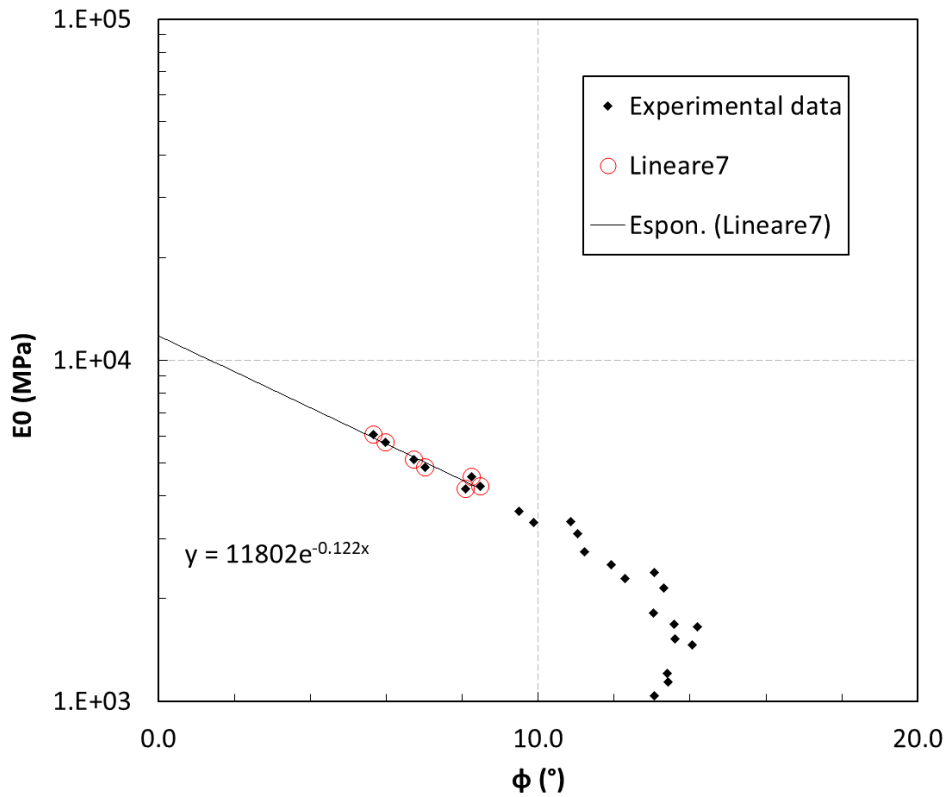


Figura 3.38 Stima del modulo vetroso sul Black Space

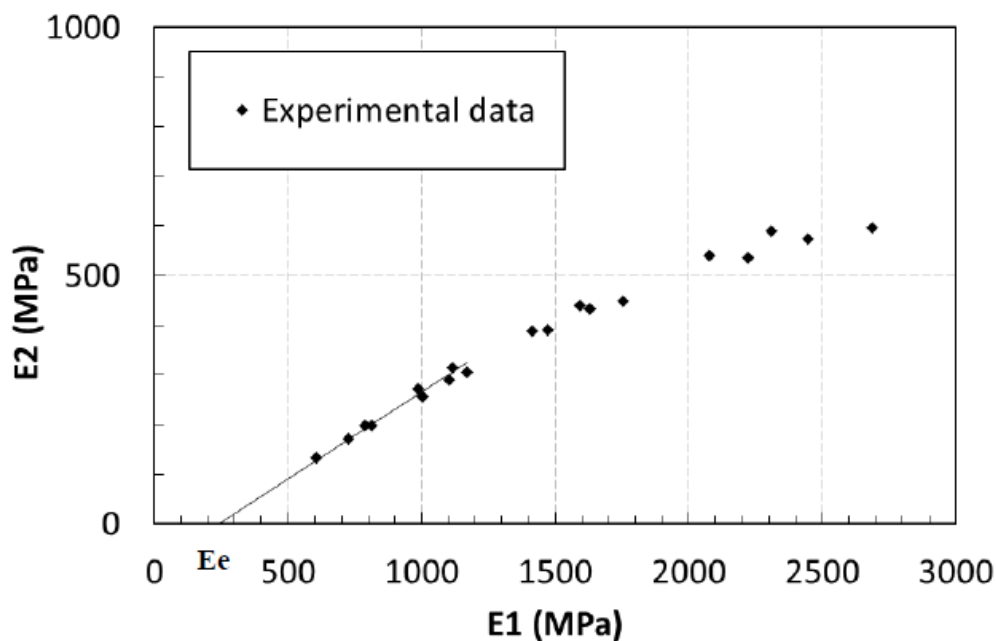


Figura 3.39 Stima del modulo di equilibrio sul piano Cole-Cole

Per stimare i parametri rimanenti si opera tramite processo iterativo; ciascuno di essi regola in maniera differente parti geometriche ben distinte del modello, inserito a sua volta sui diversi piani di rappresentazione (Figura 3.37).

3.5 Misura della resistenza a fatica

I provini sono stati sottoposti a prove di trazione diretta monoassiale, con ampiezza sinusoidale di $30 \mu\epsilon$ alla temperatura di $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Il condizionamento è stato effettuato tenendo il provino per almeno 3 ore in camera climatica esterna alla temperatura di prova più un'altra ora nell'AMPT nel caso dei provini da 100 mm, 45 minuti per i provini da 75 mm e 30 minuti per quelli da 38 mm.

Incollaggio ai piatti di carico

Come prima cosa è stato necessario incollare i provini ai piatti di carico così da permettermi il corretto montaggio di questi nell'AMPT per effettuare la prova.

L'incollaggio viene effettuato con resina bicomponente fischer epossidica *FISEM Plus 390 S fischer* e con l'aiuto di una spatola grande e una piccola. L'attrezzatura per comprimere (Figura 3.40) è costituita da una base inferiore semplicemente appoggiata nella sagoma e da una superiore magnetica.

Per prima cosa, si sistemano i bulloni laterali affinché il provino risulti centrato sul piatto inferiore facendo attenzione poiché i riscontri potrebbero dar fastidio. Viene

messa della resina bicomponente su un pezzo di cartone e si miscela bene fino a che non diventa di colore grigio, spalmando poi quest'ultima sul piatto inferiore e sulla faccia superiore del provino. Si applica la resina con la spatola grande, riempiendo bene le eventuali porosità e mettendo più resina se la faccia non è a livello. Si inserisce prima la base inferiore nell'attrezzatura, successivamente il provino con la resina superiormente. Viene bloccato lateralmente e superiormente abbassando la testa di carico, un po' di resina deve fuoriuscire altrimenti significa che non era sufficiente. Successivamente si crea una sorta di bordino sul provino aiutandosi con la spatola piccola e si lascia far presa per circa 4 ore. Infine viene tolto il provino alzando la testa di carico facendo attenzione a tenere contemporaneamente il piatto di carico superiore altrimenti si rischia di staccarlo perché si sta applicando uno sforzo di trazione.

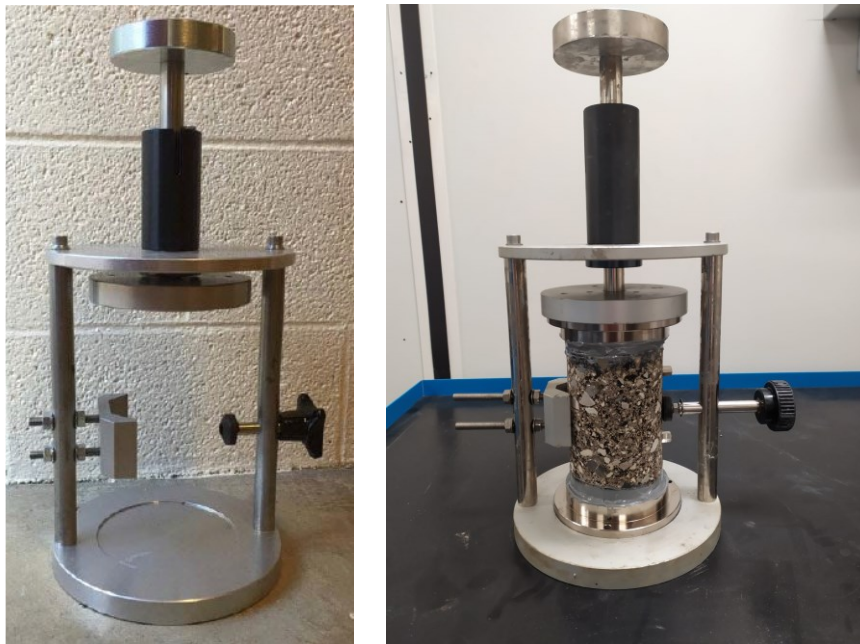


Figura 3.40 Attrezzatura per comprimere e Provino incollato ai piatti di carico

Descrizione della prova

Un attuatore a controllo di spostamento applica al provino un carico assiale ciclico di pura trazione alla frequenza di 10 Hz fino a rottura. L'output sono i dati di modulo complesso, angolo di fase e deformazione all'aumentare dei cicli di carico.

La prova di fatica è preceduta da un *Finger Print test* (carico di compressione e trazione) per cogliere la variabilità da provino a provino. Inoltre serve per:

- caratterizzare le proprietà viscoelastiche del provino, attraverso la misura del modulo complesso;

- determinare un livello deformativo orientativo.

Preparazione del provino nell'AMPT

L'AMPT Pro è collegata tramite cavo di rete ad un notebook, in cui sono installati i software di controllo: nella sperimentazione oggetto di questa tesi è stato utilizzato "UTS32".

In *Test parameters*, inserire l'*Estimated Initial Modulus* pari a 200 MPa, deve infatti essere un valore molto basso, necessario solo per poter portare a contatto il pistone. Aprire la campana premendo *Raise*→*Raise cell* e mettere gli X-men al provino. Inserire il provino attaccato ai piatti di carico e avvito alla piastra inferiore con 3 viti stringendo forte. Poi accendere le parti idrauliche aprendo l'UTS "*Virtual Pendant*" (Figura 3.27) come spiegato in 3.2. Ora dal "*Virtual Pendant*" si muove il pistone: premere su *FAST* per aumentare la velocità, poi tenere premuto il bottone freccia su fino a che i piatti superiori siano vicini ma non tocchino. Successivamente ruotare il provino affinché i buchi per le viti coincidano ed avvitare i piatti superiori con 3 viti senza stringerle. Premere poi *Raise*→*Raise actuator*, il pistone andrà a contatto. Ora si può avvitare e stringere forte le viti dei piatti superiori, se ci sono dei gap sarà necessario inserire gli spessori (*shims*); il provino è fissato. Premere *Start* → *Apply Zero Load*.

Attaccare poi i trasduttori verde, blu e nero, inserendoli tra gli x-men in posizione centrale. Sull' "UTS32" premere Levels, in Levels, le righe di nostro interesse sono le ultime tre, relative alla corsa dei trasduttori, pari a $\pm 500\mu\text{m}$, che deve essere portata a $0\pm 0.1\text{mm}$. Se è col segno - significa che è compresso, se col segno + è teso. Ora si può abbassare la cella premendo *Lower* → *Lower cell*, viene richiesto di premere contemporaneamente i 2 bottoni verdi sull'AMPT. Per il condizionamento bisogna girare su ON sia POWER che COOLER nella zona *temperature control*, si imposta la temperatura di prova nello schermo premendo il primo tasto a sinistra e si cambia la cifra da impostare col secondo tasto da sinistra abbassandola o alzandola con le frecce.

Parametri di input

Su *General*, inserire le informazioni:

- *Test method*: si sceglie dal menu "Non standard test" così da non avere blocchi;
- *Project name*: codice del provino;
- *Operator name*: il nome dell'operatore;

- *Comments*: vengono visualizzati i dati del Template aperto, poi si possono aggiungere altri commenti.

Nella pagina *Specimen Information*, inserire il codice del provino, i suoi valori di altezza e diametro, il Condition time è bene appuntarselo.

In *Test parameters*, specificare la frequenza di prova di 10 Hz, la temperatura di prova, e la Axial gauge length, ovvero la distanza dei trasduttori sempre fissa a 70mm.

In *Dynamic Modulus Fingerprint Test*, selezionare *Enable Fingerprint Test*, ed inserire *peak to peak microstrain* tra 27 e 33 e l'*Estimated Initial Modulus*. Quest'ultimo deve essere una stima reale (non più di 200 MPa di prima, necessari solo per applicare lo Zero Load) conservativa per non danneggiare il provino; grazie alle prove di modulo effettuate precedentemente si ha un'idea di che valore inserire a 10 Hz e 15 °C.

In *Fatigue test parameters*, selezionare in "control mode" *Direct tension*, inserire il livello di deformazione *peak to peak micro-strain*, ed inserire un numero molto alto di *Maximum number of test cycles*, altrimenti la prova si interromperebbe una volta raggiunto quel numero. Un provino più rigido è più fragile, quindi va sollecitato a deformazioni più basse.

Cyclic Fatigue Test

Premere *Start*→*S-VECD Fatigue Test*. Durante la prova, possono essere monitorate l'evoluzione di modulo e angolo di fase, deformazioni, tensioni, all'aumentare del numero di cicli. La prova si stoppa automaticamente dopo aver raggiunto il picco dell'angolo di fase; altrimenti si può stoppare con *Stop*. E' importante assicurarsi che i trasduttori stiano registrando un accumulo di deformazione, altrimenti significa che stanno registrando male (o per nulla, e il software blocca tutto).

Affinché la prova sia valida, la rottura deve avvenire all'interno dell'area di misura (Middle Failures) e il numero minimo di cicli pari a 500; se la rottura avviene in estremità (End Failures) la prova non sarà valida.

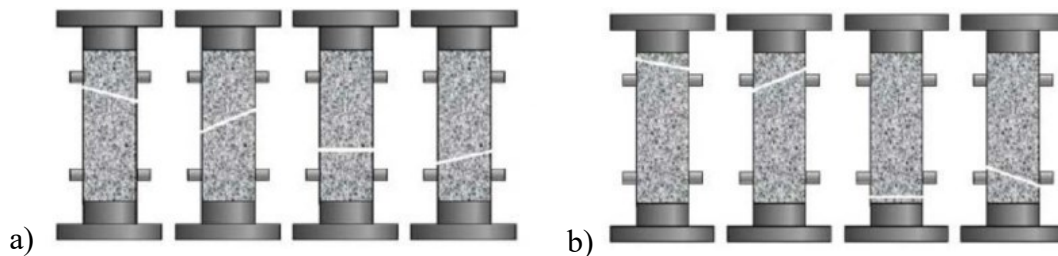


Figura 3.41 a) Middle Failures; b) End Failures

Conclusa la prova si possono esportare uno per uno i 4 file csv da: *File* → *Export*.

Successivamente per rimuovere il provino:

- premere *Raise* → *Raise cell*;
- rimuovere i trasduttori e gli x-men;
- svincolare il provino dal piatto di carico superiore rimuovendo le 3 viti;
- da *Levels*, abbassare al minimo l'attuatore: *FAST* tenendo premuta la freccia giù;
- svitare anche il piatto inferiore e rimuovere il provino dall'AMPT.

Poi si ripeteranno tutte le fasi appena descritte per gli altri provini andando a variare il livello di deformazione in funzione della sua rigidità.

3.6 Programma sperimentale

La sperimentazione è stata condotta nel Laboratorio di Strade “F. A. Santagata” del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura dell'Università Politecnica delle Marche. Con la finalità di confrontare provini di diverse dimensioni, sono state eseguite prove di modulo complesso e prove di fatica riassunte nella tabella 3.12.

Tabella 3.12 Prove di modulo complesso e di fatica realizzate sui provini

Specimen Code	Prove di modulo complesso		Prove di fatica		
	T (°)	fr (Hz)	ε (μstrain)	T (°)	fr (Hz)
100_2.1	25 (pre-test), 5, 15, 25, 35, 45, 55, 25 (post-test)	20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1	150	15	10
100_3.3	25 (pre-test), 5, 15, 25, 35, 45, 55, 25 (post-test)	20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1	110	15	10
100_4.2	25 (pre-test), 5, 15, 25, 35, 45, 55, 25 (post-test)	20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1	70	15	10
75_2.2	25 (pre-test), 5, 15, 25, 35, 45, 55, 25 (post-test)	20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1	-	-	-
75_3.1	25 (pre-test), 5, 15, 25, 35, 45, 55, 25 (post-test)	20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1	130	15	10
75_4.3	25 (pre-test), 5, 15, 25, 35, 45, 55, 25 (post-test)	20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1	-	-	-
38_3.2_R1	25 (pre-test), 5, 15, 25, 35, 45, 55, 25 (post-test)	20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1	160	15	10
38_3.2_R2	25 (pre-test), 5, 15, 25, 35, 45, 55, 25 (post-test)	20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1	-	-	-
38_4.1_R1	25 (pre-test), 5, 15, 25, 35, 45, 55, 25 (post-test)	20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1	140	15	10
38_4.1_R3	25 (pre-test), 5, 15, 25, 35, 45, 55, 25 (post-test)	20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1	100	15	10
38_2.3_R3	-	-	120	15	10

Capitolo 4

Risultati e analisi delle prove di rigidezza

In questo capitolo verranno descritti e commentati i risultati delle prove di modulo complesso eseguite sui conglomerati bituminosi a freddo mettendo a confronto il loro comportamento reologico.

1 Esempio di elaborazione dei risultati

Nel presente paragrafo si descrivono le operazioni eseguite tramite foglio di calcolo excel per la costruzione delle curve maestre relative ad E_0 e φ e la loro modellazione. In particolare, si farà riferimento ai risultati del test eseguito sul provino 75_4.3. Le operazioni descritte sono state poi ripetute per ciascuno dei campioni testati.

1.1 Dati sperimentali

Si costruisce un database “*Test Data*” contenente colonne relative a: nome della prova, temperatura obiettivo, frequenza, modulo di restituzione E_1 , modulo di dissipazione E_2 , modulo di rigidezza E_0 e angolo di fase φ (vedi Appendice). I risultati dell'elaborazione, restituiti dal software, vengono inseriti nelle colonne appena descritte, dove per ciascuna frequenza si procede al calcolo di E_1 ed E_2 tramite le formule note, descritte nel Capitolo 2. Successivamente sia per il modulo di rigidezza (*Stiffness modulus*) che per l'angolo di fase (*Loss Angle*) vengono rappresentate graficamente le rispettive isoterme (Figura 4.1 e Figura 4.2) riferite all'ampiezza di deformazione di $30 \mu\epsilon$, adottata per le prove di

modulo. Infine, le coppie di dati (E_0, φ) e (E_1 e E_2) sono rappresentati nel diagramma di Black e nel piano complesso Cole-Cole, riportati in Figura 4.3 e Figura 4.4.

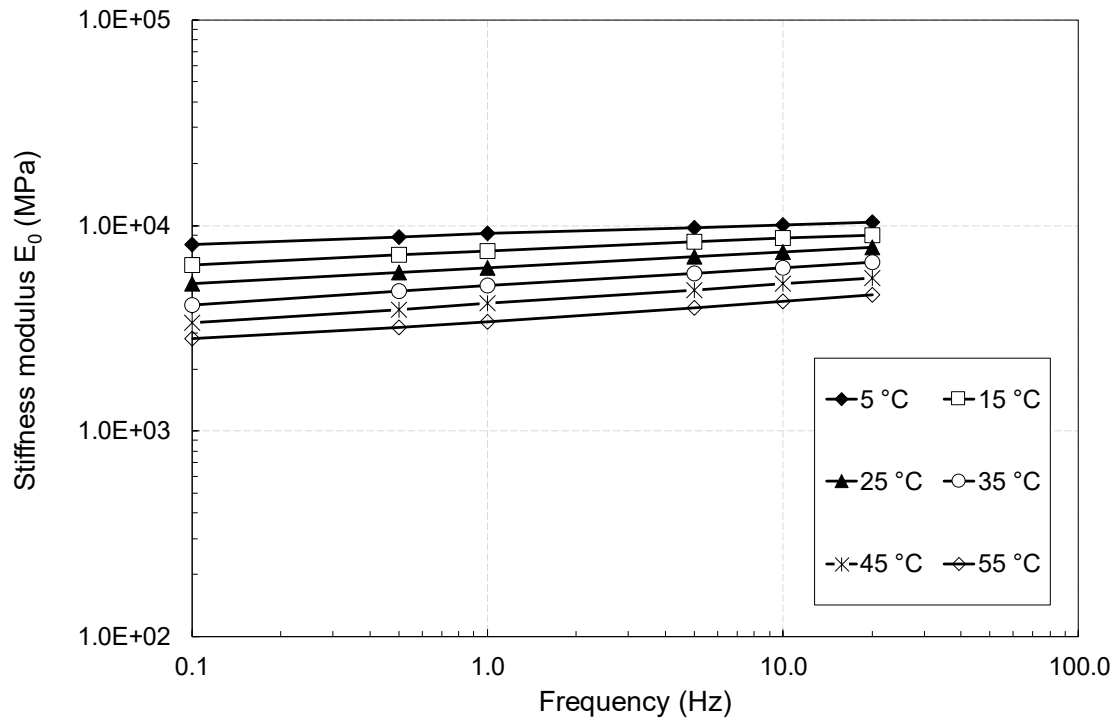


Figura 4.1 Isoterma del modulo di rigidità E_0

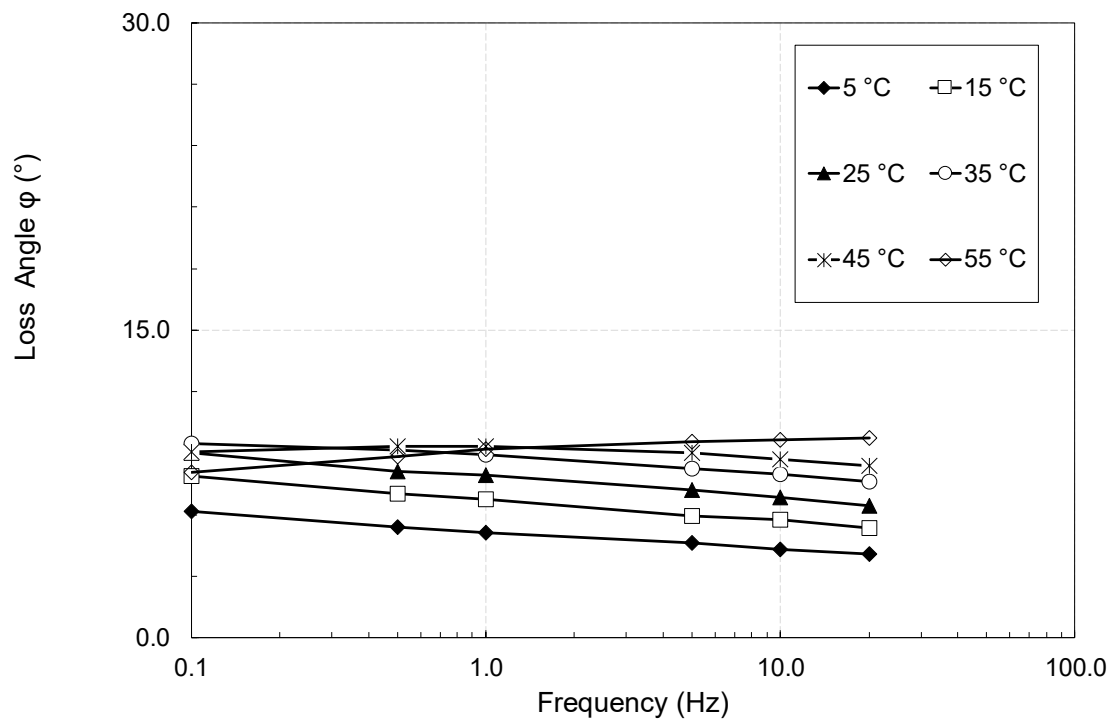


Figura 4.2 Isoterma dell'angolo di fase φ

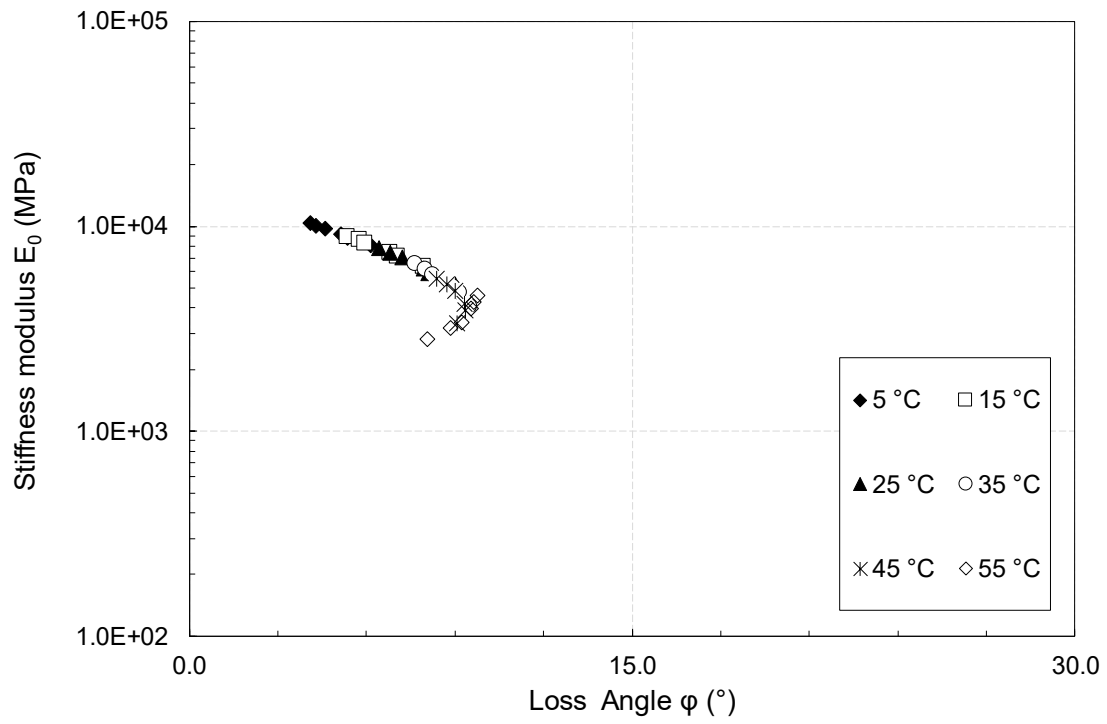


Figura 4.3 Dati sperimentali del provino 75_4.3 rappresentati nel diagramma Black Space

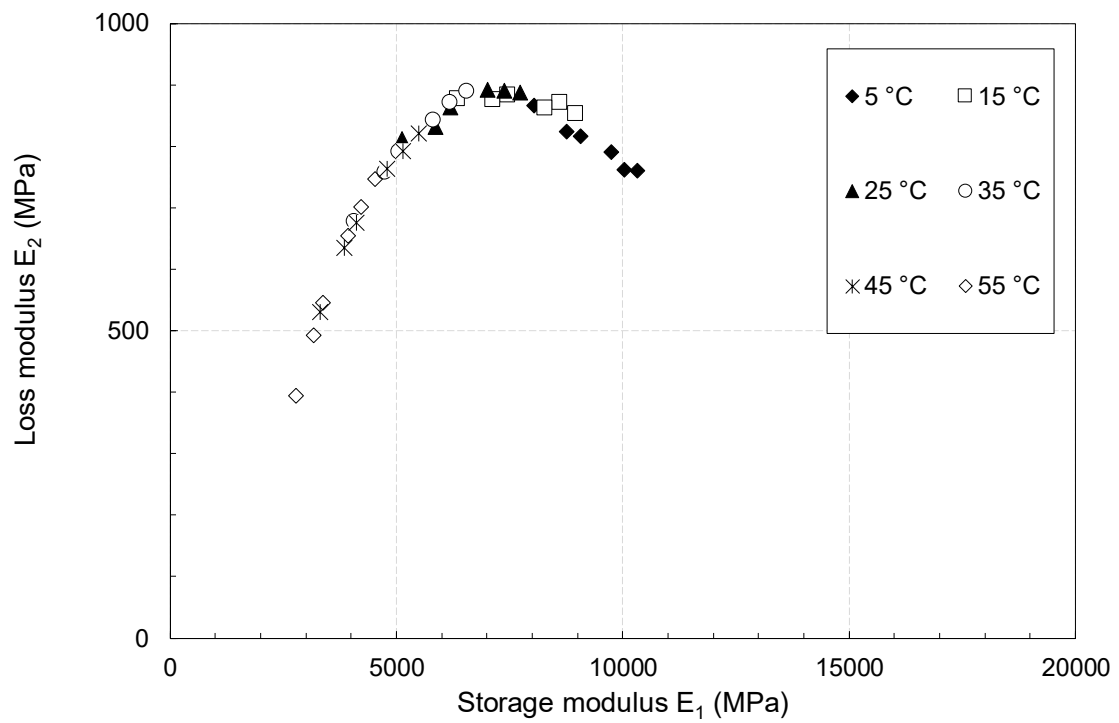


Figura 4.4 Dati sperimentali del provino 75_4.3 rappresentati nel piano Cole-Cole

1.2 Costruzione delle curve maestre

Nella presente investigazione si è deciso di adottare come temperatura di riferimento $T_{rif}=25^{\circ}\text{C}$. La Figura 4.6 mostra la dipendenza degli shift factors $a_{Trif}(T)$ dalla temperatura sia per $T_0=5^{\circ}\text{C}$ che per $T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$.

Tref,0 5 °C					Tref,g 25 °C					
T	Teff	LOG SF	dT	dT/logST	regr lin	y=ax+b	Teff	LOG SF*	Teff	LOG SF*
5	5	0			a	b	5	0	5	2.61365
15	15	-1.461156498	10	-6.84389387	-0.058266439	-6.486805802	15	-1.41453	15	1.199117
25	25	-2.549446706	20	-7.84483941			25	-2.61365	25	0
35	35	-3.585878106	30	-8.36615164	C1	C2	35	-3.64308	35	-1.02943
45	45	-4.505037788	40	-8.87894883	17.16	111.33	45	-4.53645	45	-1.9228
55	55	-5.41116106	50	-9.24016111			55	-5.31908	55	-2.70543

Figura 4.5 Calcolo degli shift factors tramite regressione lineare

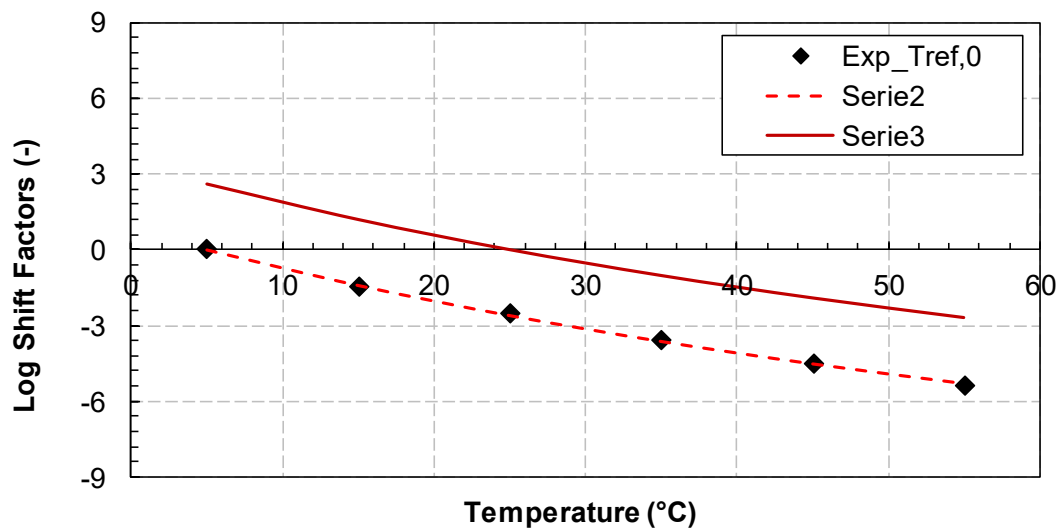


Figura 4.6 Fattori di traslazione e confronto con la legge WLF

Possiamo quindi costruire la Curva Maestra del modulo di rigidità (Figura 4.7) determinando la frequenza ridotta f_r come:

$$f_r = f \cdot a_{Trif}(T)$$

Sono stati adottati gli stessi fattori di traslazione determinati per il modulo di rigidità per costruire la curva maestra dell'angolo di fase (Figura 4.8).

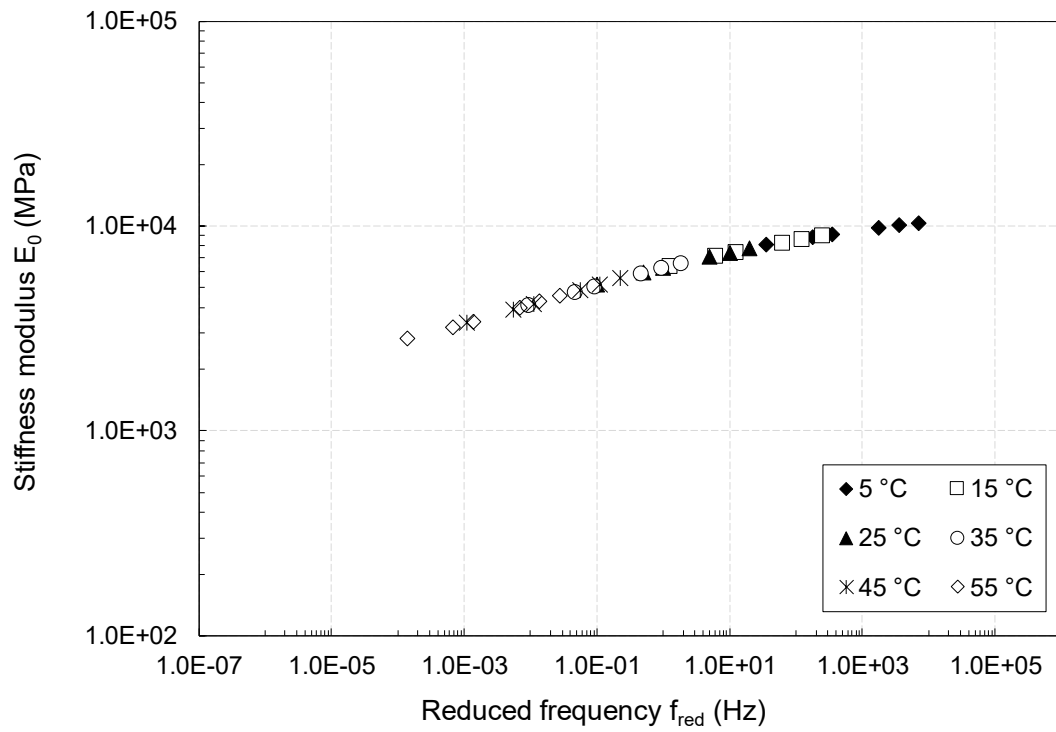


Figura 4.7 Curva Maestra di E_0 (Trif= 25°C)

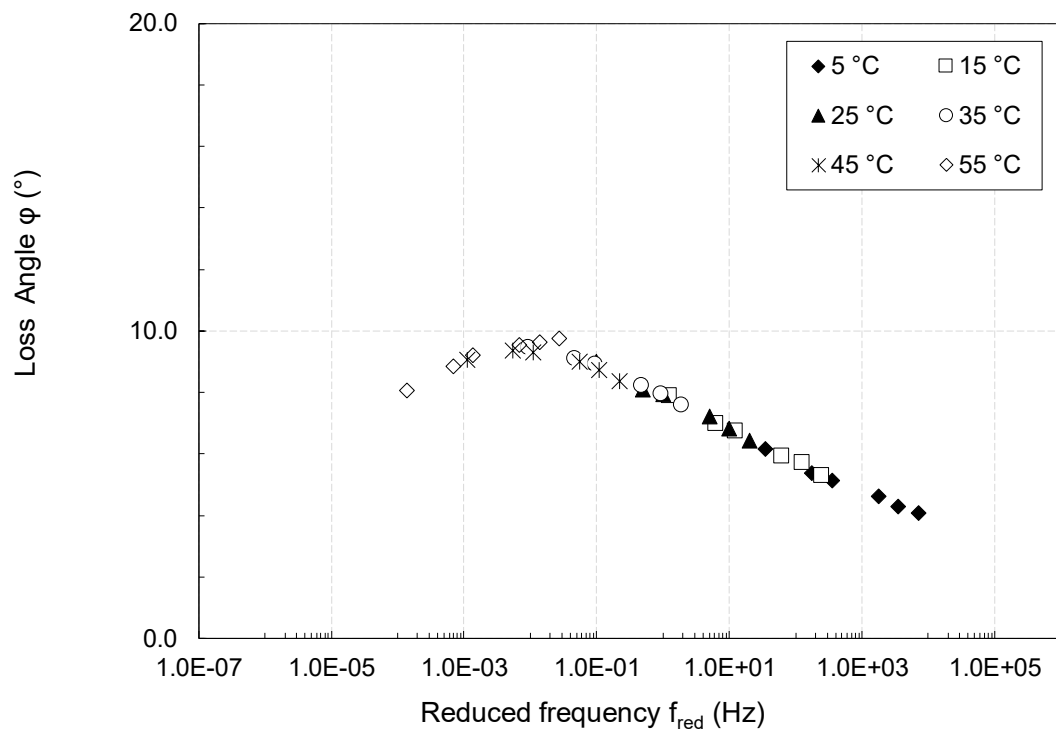


Figura 4.8 Curva Maestra di ϕ (Trif= 25°C)

2 Modulo complesso dei conglomerati bituminosi a freddo

Nel seguente paragrafo si mostrano i risultati delle prove eseguite per determinare il modulo complesso nel diagramma Black space (Figura 4.9) e nel diagramma Cole-Cole (Figura 4.10). Si inseriscono in uno stesso grafico i provini testati aventi stessa dimensione così da poterli confrontare. Si può vedere come il loro comportamento reologico risulti essere simile.

Dal Black space può essere osservata la variabilità di E_0 e ϕ , in generale tutti i provini mostrano lo stesso comportamento caratterizzato da: elevati moduli di rigidezza ad alte frequenze e basse temperature e valori alti dell'angolo di fase ad alte temperature e basse frequenze. I risultati mostrano, dunque, che tutti i campioni hanno un comportamento dipendente dalla temperatura e dalla frequenza.

Come mostrato in Figura 4.9 e Figura 4.10 per tutti i provini i dati sperimentali descrivono un'unica curva nel diagramma Black Space e nel diagramma Cole Cole. Questo conferma la validità del TTSP ovvero che le variazioni di temperatura e frequenza hanno lo stesso effetto su E , i provini investigati presentano quindi il comportamento termoreologicamente semplice. Di conseguenza si possono andare a creare le curve maestre del modulo di rigidezza E_0 e dell'angolo di fase ϕ . Successivamente vengono mostrate le curve maestre del modulo di rigidezza (Figure 4.11 – 4.13 – 4.15) e dell'angolo di fase (Figure 4.12 – 4.14 – 4.16) determinate per tutti i provini alla temperatura di riferimento $T=25^\circ\text{C}$. Troviamo disposti in uno stesso grafico i provini testati aventi stessa dimensione.

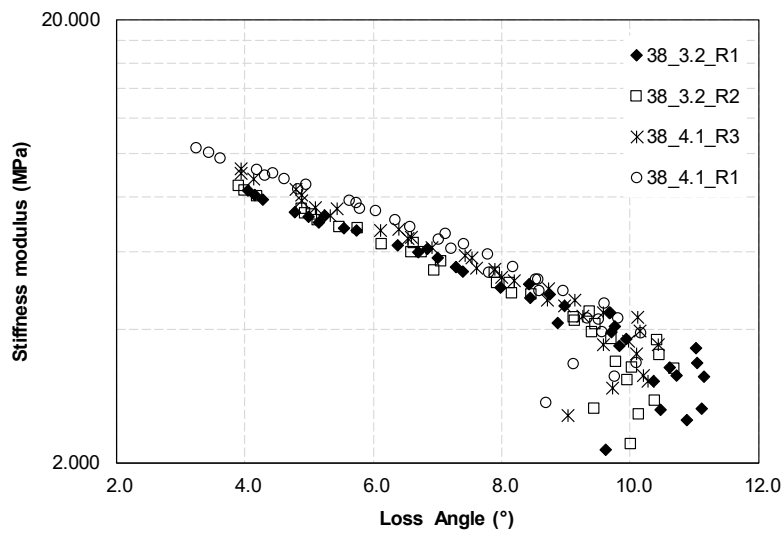
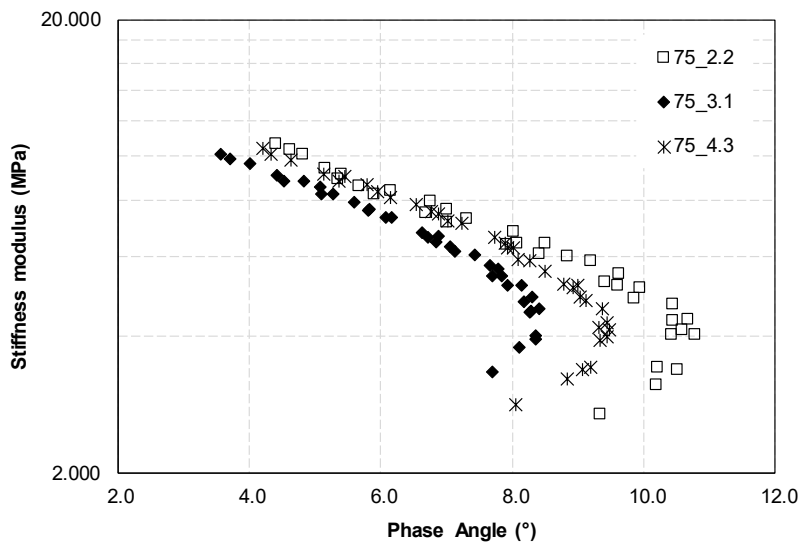
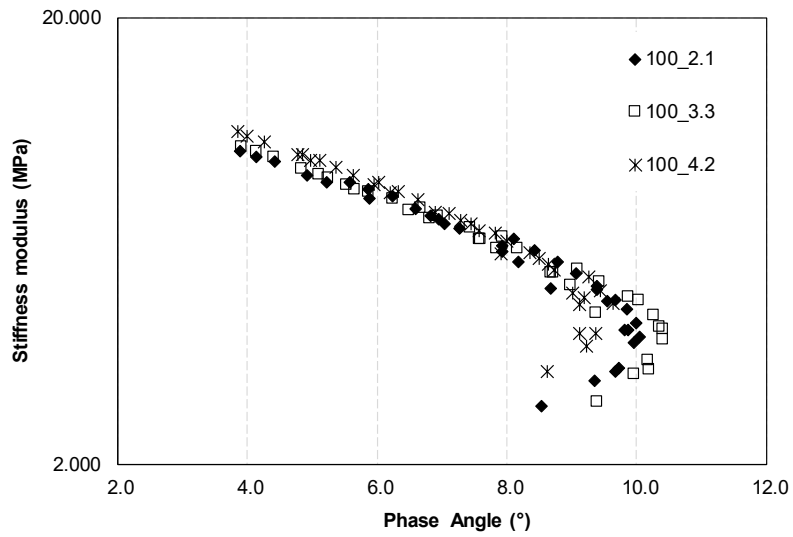


Figura 4.9 Dati sperimentali dei 100, 75 e 38 mm visualizzati nel Black Space

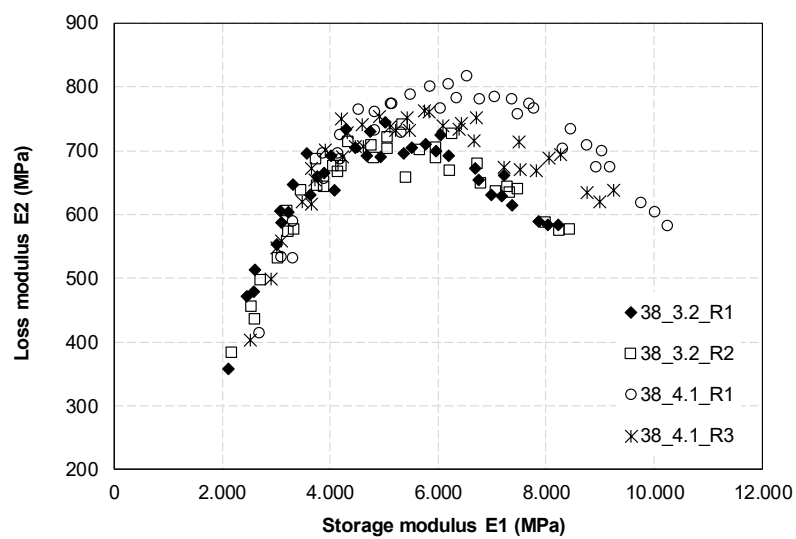
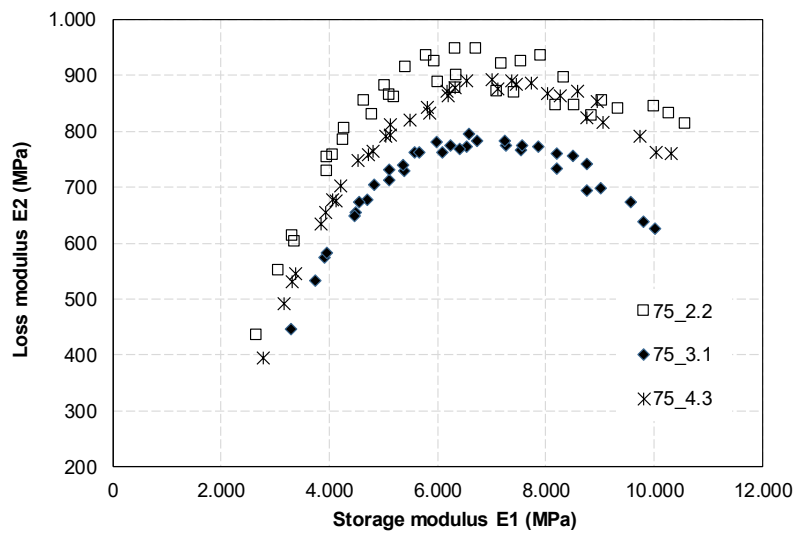
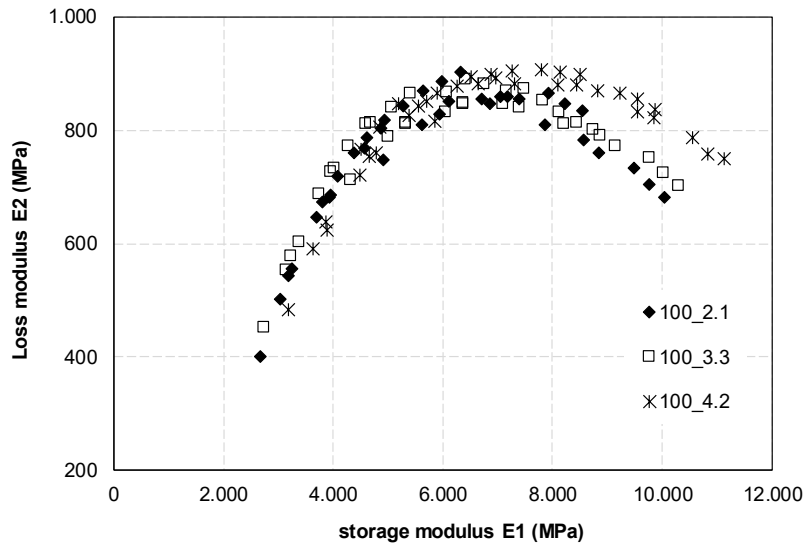


Figura 4.10 Dati sperimentali dei 100, 75 e 38 mm visualizzati nel diagramma Cole-Cole

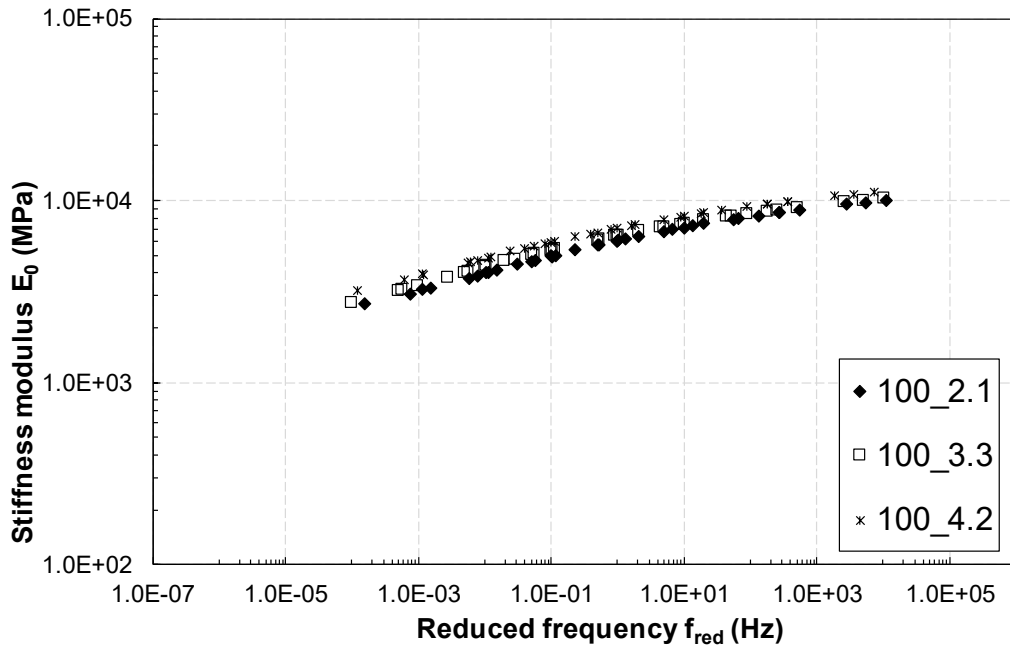


Figura 4.11 Curva maestra dei 100 mm del modulo di rigidità E_0 [$T_{ref}=25^\circ\text{C}$]

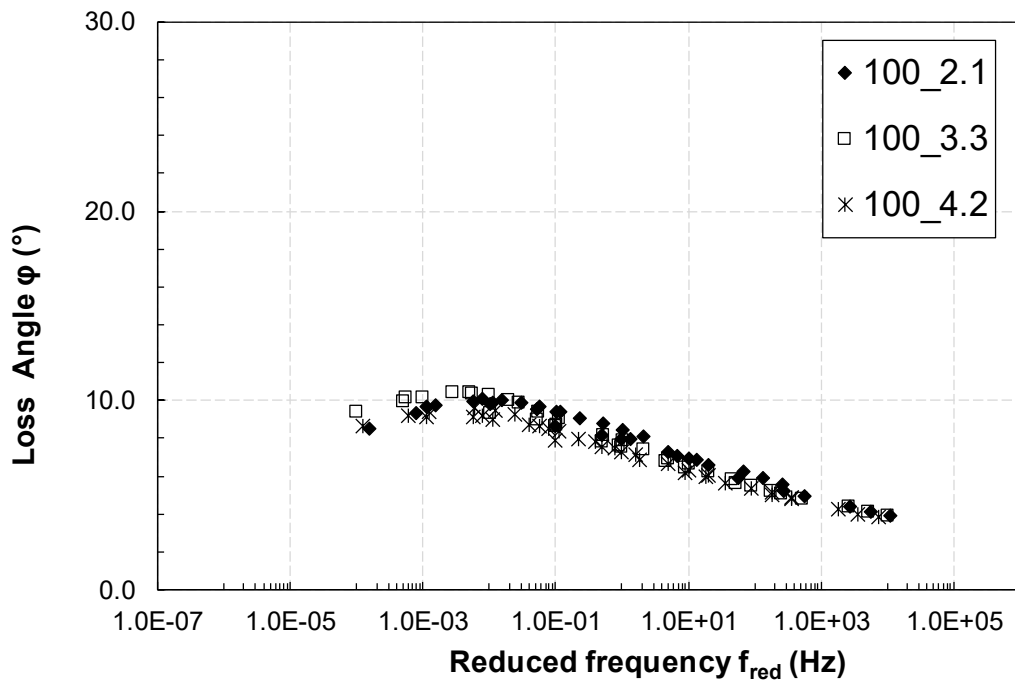


Figura 4.12 Curva maestra dei 100 mm dell'angolo di fase ϕ [$T_{ref}=25^\circ\text{C}$]

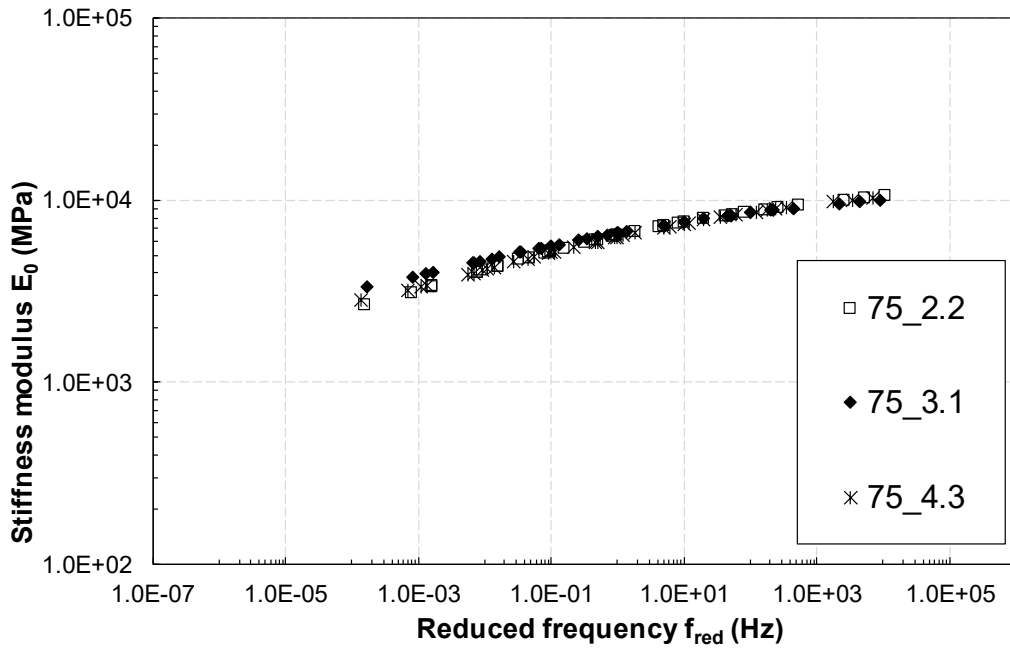


Figura 4.13 Curva maestra dei 75 mm del modulo di rigidità E_0 [$T_{ref}=25^\circ\text{C}$]

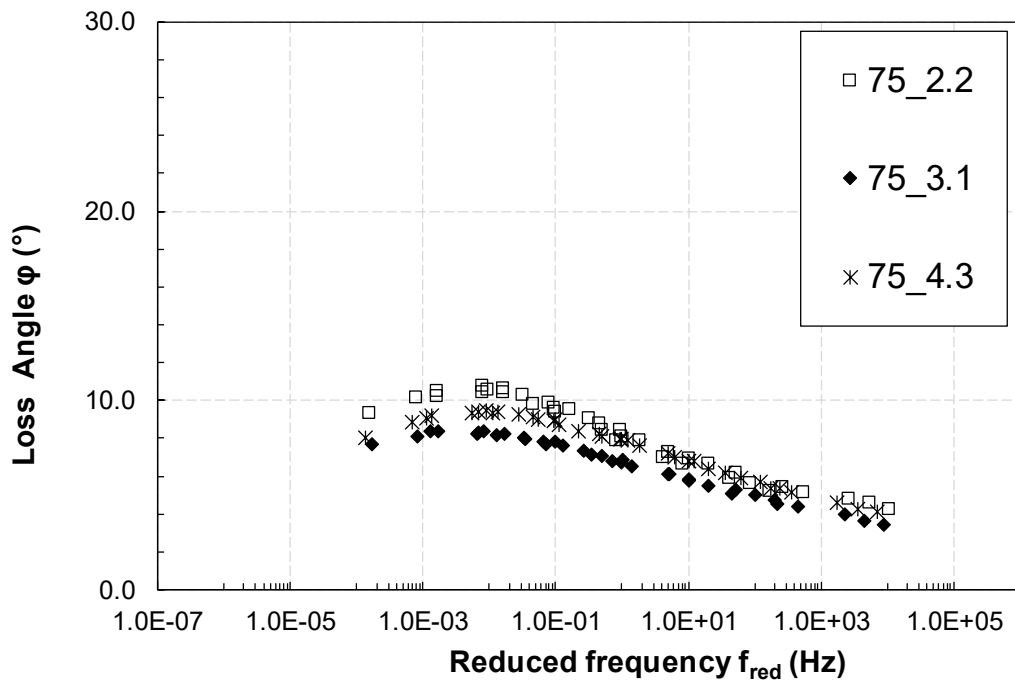


Figura 4.14 Curva maestra dei 75 mm dell'angolo di fase ϕ [$T_{ref}=25^\circ\text{C}$]

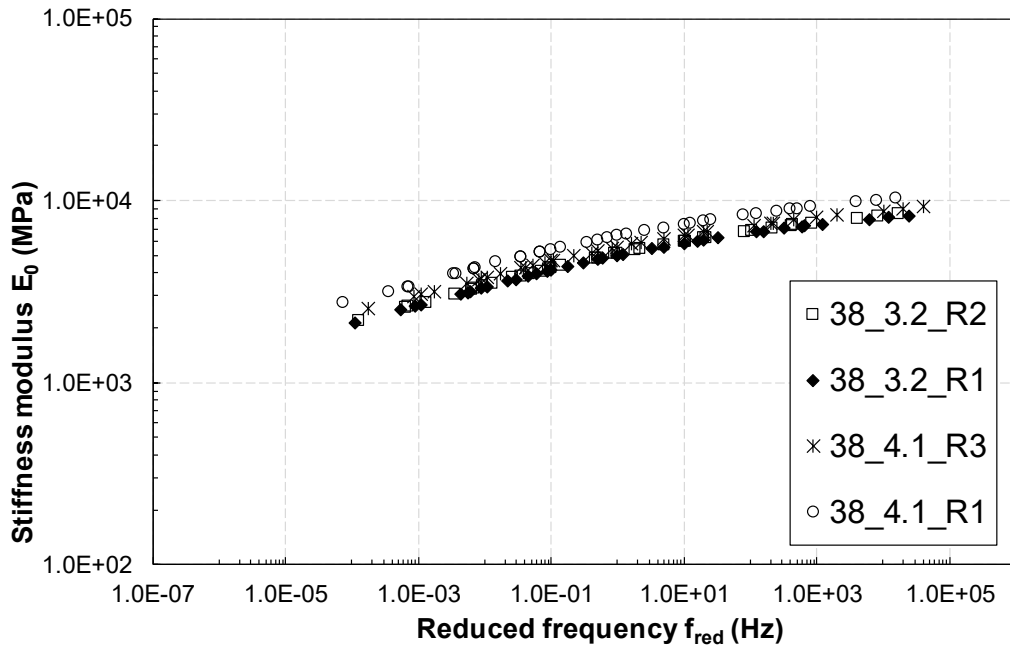


Figura 4.15 Curva maestra dei 38 mm del modulo di rigidità E_0 [$T_{ref}=25^\circ\text{C}$]

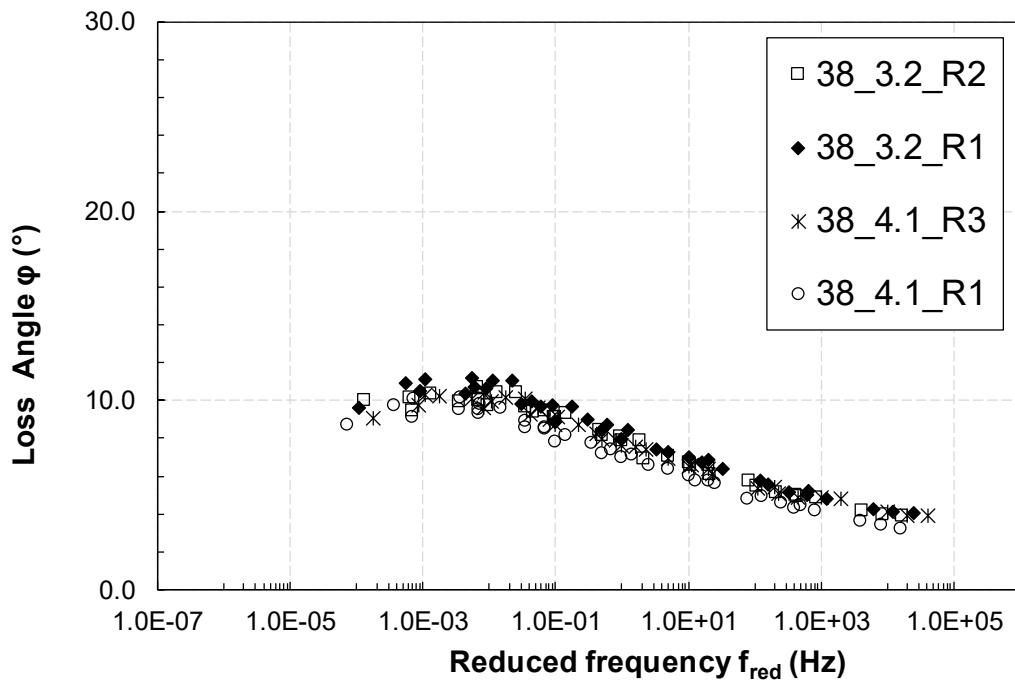


Figura 4.16 Curva maestra dei 38 mm dell'angolo di fase ϕ [$T_{ref}=25^\circ\text{C}$]

Il comportamento dei provini, tutti costituiti dalla stessa composizione della miscela, differisce solo per piccole variazioni casuali probabilmente dovute ad incertezze nella fase di preparazione della miscela e durante il centraggio nell'AMPT. Si può però notare un comportamento reologico dei provini da 100 e 75 mm simile tra loro. I provini da 38 mm hanno invece una distribuzione meno omogenea degli altri due ma con un comportamento pur sempre paragonabile a quello dei 100 e 75 mm; ciò è dovuto probabilmente a maggiori difficoltà riscontrate nella fase di carotaggio e nel centraggio nell'AMPT durante le fasi finali di prova.

Per questi motivi andremo a considerare la media dei dati sperimentali per una successiva analisi e per un confronto tra queste tre famiglie di provini di differenti dimensioni. Di seguito sono presenti i grafici che mostrano un confronto dei dati sperimentali medi visualizzati nel diagramma Black space (Figura 4.17) e nel Cole-Cole (Figura 4.18). Inoltre è presente anche un confronto delle curve maestre medie del modulo di rigidità E_0 (Figura 4.19) e dell'angolo di fase φ (Figura 4.20) alla temperatura di riferimento di 25 °C.

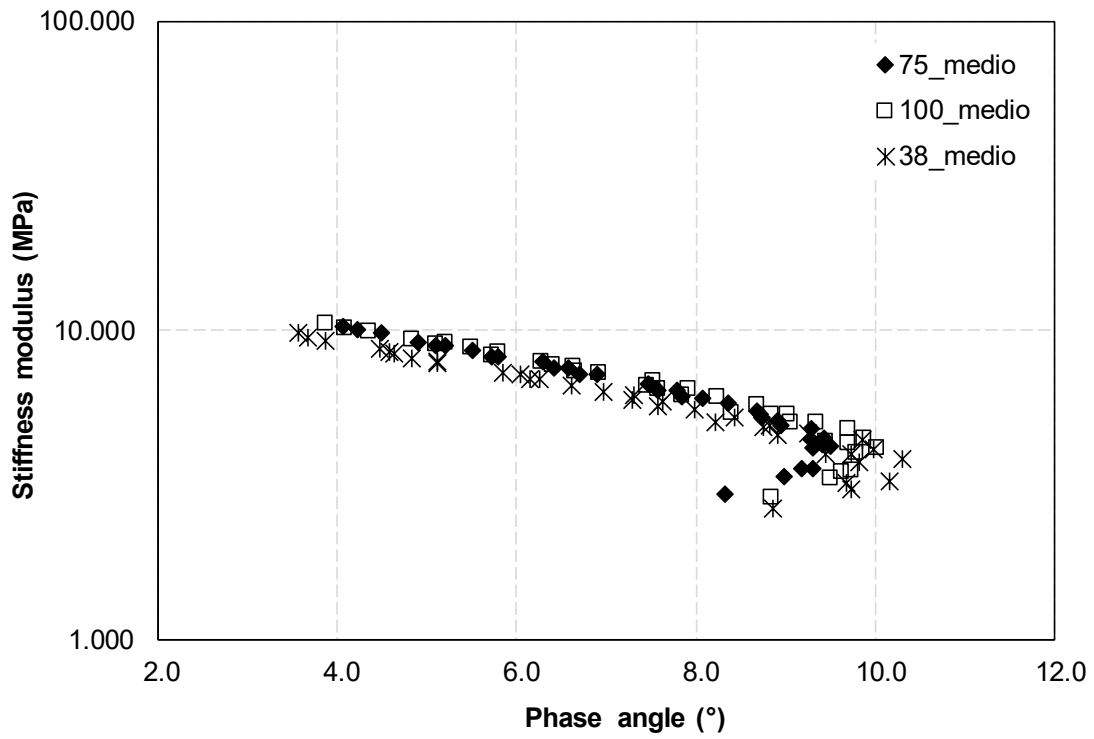


Figura 4.17 Confronto dati sperimentali medi visualizzati nel Black Space

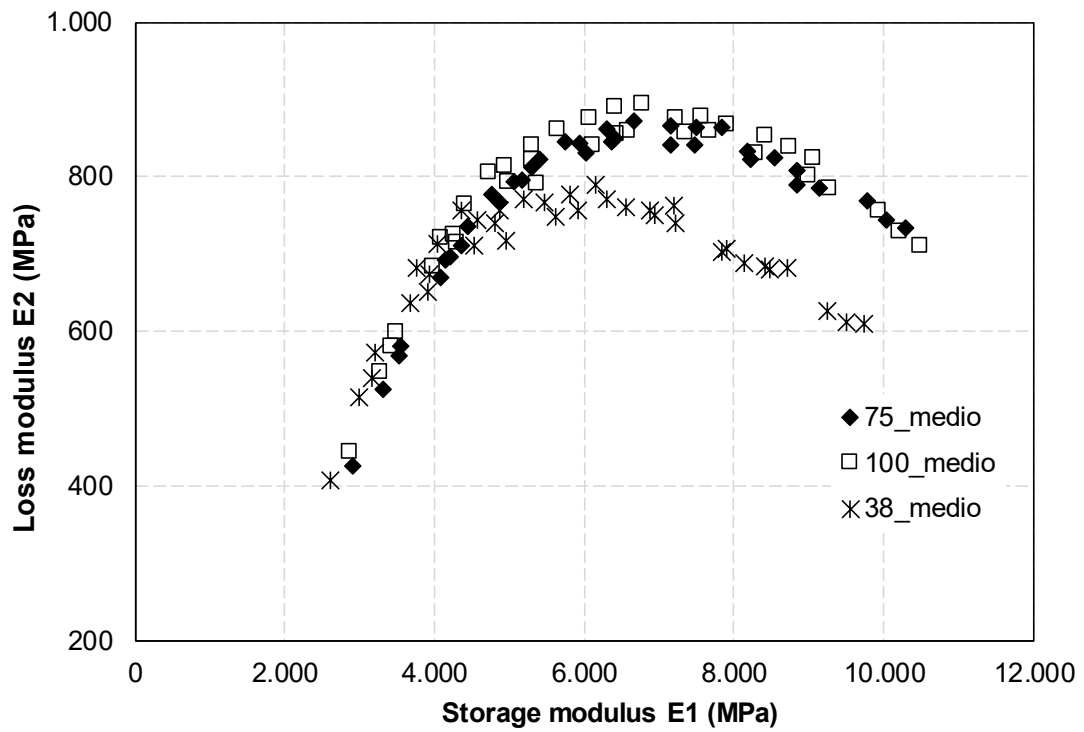


Figura 4.18 Confronto dati sperimentali medi visualizzati nel diagramma Cole-Cole

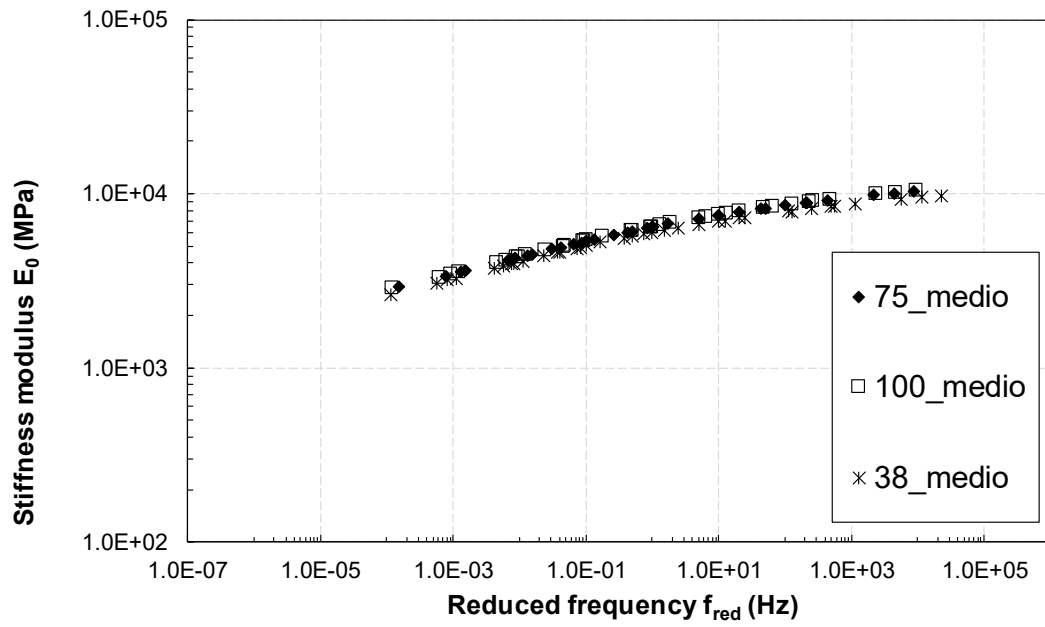


Figura 4.19 Confronto delle curve maestre medie del modulo di rigidezza E_0 [Tref=25°C]

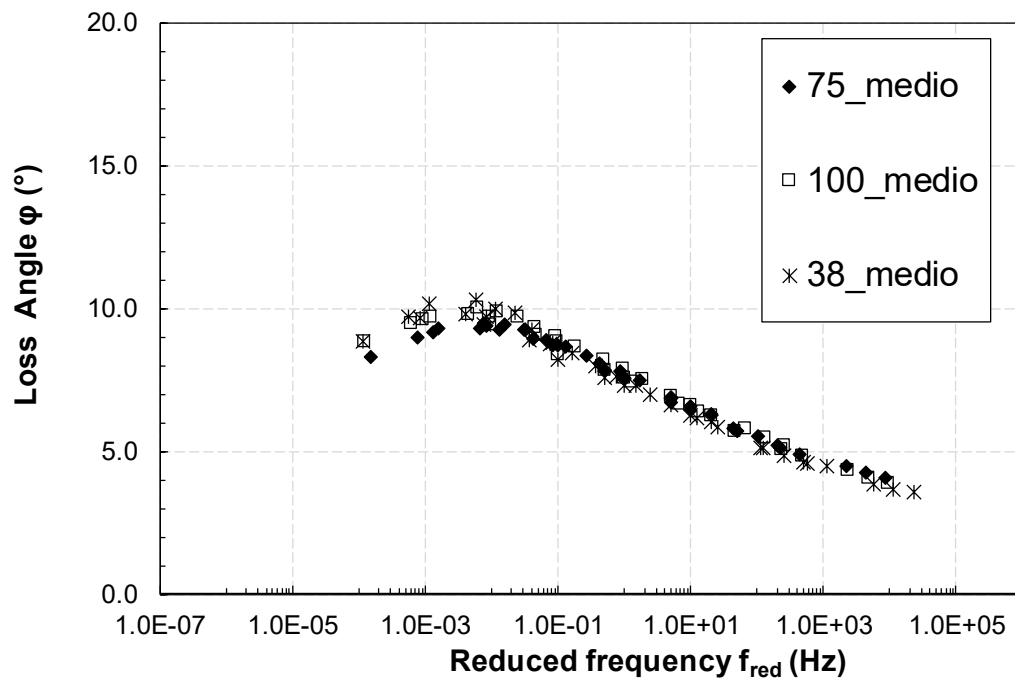


Figura 4.20 Confronto delle curve maestre medie dell'angolo di fase ϕ [Tref=25°C]

3 Modellazione reologica

Il modello WLF è stato utilizzato per descrivere la dipendenza dalla temperatura dei fattori di traslazione. Successivamente il comportamento reologico dei conglomerati è stato modellato utilizzando il modello 2S2P1D-HY, illustrato nei Capitoli 2 e 3.

Inizialmente è stata fatta la calibrazione dei parametri del modello (*Model Fitting*) dei valori medi dei 38, 75 e 100 mm ottenendo così un set di parametri che hanno assunto poi la funzione di valori di riferimento. Successivamente, partendo da questi valori, sono stati modellati i singoli provini tenendo fissi i parametri k , h , δ e τ e andando ad aggiustare i restanti, servendoci dello strumento “*Risolutore*” di excel. Nei successivi grafici presenti in questo paragrafo è possibile notare come i modelli si adattino bene ai dati sperimentali.

La Tabella 4.1 mostra i parametri dedotti dalla modellazione, inoltre si riportano le due costanti C1 e C2 che sono state utilizzate per modellare l'andamento dei fattori di spostamento con la temperatura, secondo l'equazione di Williams-Landel-Ferry.

Tabella 4.1 Parametri del modello 2S2P1D e WLF [Tref = 25°C]

Codice provino	Eg [MPa]	Ee [MPa]	k [-]	h [-]	δ [-]	β [-]	τ [sec]	φ_0 [°]	C1 [-]	C2 [°C]
100_2.1	14496	1839	0.117	0.331	2.014	10 ¹⁰	1.347	1.171	11.7	103.4
100_3.3	14329	1746	0.117	0.331	2.014	10 ¹⁰	4.362	1.132	11.8	101.6
100_4.2	15722	2178	0.117	0.331	2.014	10 ¹⁰	3.040	0.865	22.3	196.3
100_media	14836	1924	0.117	0.331	2.014	10 ¹⁰	2.640	1.046	13.8	120.6
75_2.2	15620	1519	0.103	0.305	1.677	10 ¹⁰	1.178	0.966	8.8	81.1
75_3.1	14219	2253	0.103	0.305	1.677	10 ¹⁰	1.928	0.859	10.5	95.0
75_4.3	15763	1962	0.103	0.305	1.677	10 ¹⁰	0.464	0.802	14.5	131.3
75_media	15182	1924	0.103	0.305	1.677	10 ¹⁰	0.986	0.923	10.8	97.9
38_3.2_R1	10834	1394	0.131	0.379	2.385	10 ¹⁰	8.229	1.676	16.3	128.3
38_3.2_R2	11344	1512	0.131	0.379	2.385	10 ¹⁰	5.787	1.136	14.8	121.6
38_4.1_R1	13535	1903	0.131	0.379	2.385	10 ¹⁰	9.700	0.823	20.9	166.3
38_4.1_R3	11885	1714	0.131	0.379	2.385	10 ¹⁰	7.239	1.397	9.5	76.8
38_media	11888	1653	0.131	0.379	2.385	10 ¹⁰	7.219	1.212	14.1	113.2

Si può notare come i valori di modulo di vetroso Eg e il modulo di equilibrio Ee siano paragonabili tra 100_media e 75_media (in particolare il valore di Ee coincide), mentre invece sono notevolmente più bassi quelli relativi a 38_media. Eg e Ee sono parametri legati alle caratteristiche elastiche del materiale e dipendono soprattutto dai vuoti, infatti precedentemente abbiamo visto che i vuoti dei provini da 75 e 100 mm sono pressoché uguali. Di seguito si fa un confronto tra i valori medi di Eg e di Ee dei provini da 38 e 75 mm con quelli da 100 mm:

$$\frac{E_g^{75}}{E_g^{100}} = \frac{15182}{14836} = 1.02$$

$$\frac{E_e^{75}}{E_e^{100}} = \frac{1924}{1924} = 1$$

$$\frac{E_g^{38}}{E_g^{100}} = \frac{11888}{14836} = 0.80$$

$$\frac{E_e^{38}}{E_e^{100}} = \frac{1653}{1924} = 0.86$$

I provini da 75 e 100 mm hanno rigidezza del tutto simile, mentre quelli da 38 mm hanno una rigidezza inferiore di circa il 15% rispetto a quella dei 100 mm. Questa differenza probabilmente è dovuto ad una maggiore eccentricità del carico dei provini di diametro 38 mm durante la prova. I valori di E_g e E_e influiscono sulla posizione della curva maestra del modulo di rigidezza E_0 , infatti dalla Figura 4.23 si nota che la curva maestra dei 38 mm è leggermente più in basso rispetto alle altre due.

Passando ai parametri k , h , δ e τ , essi dipendono dalle caratteristiche viscoelastiche del materiale. k varia da un valore minimo di 0.103 a un valore massimo di 0.131, h da 0.305 a 0.379, δ da 1.677 a 2.385 e infine τ da un valore minimo di 0.986 sec relativo a 75_media a un massimo di 7.219 sec relativo a 38_media. La variabilità di questi parametri non ha un grande effetto sul comportamento reologico, essi influiscono sulla forma delle curve ma questa diversità non è significativa dal punto di vista pratico. Abbiamo concluso che la loro variabilità è dovuta alle incertezze nella composizione del materiale e alle incertezze introdotte dal metodo di prova.

Andremo a considerare la media delle modellazioni reologiche così come abbiamo fatto precedentemente con i dati sperimentali per analizzare e confrontare le tre famiglie di provini di differenti dimensioni. Di seguito sono presenti i grafici che mostrano un confronto dei modelli dei dati sperimentali medi visualizzati nel diagramma Black space (Figura 4.21) e nel Cole-Cole (Figura 4.22); inoltre è anche presente un confronto dei modelli delle curve maestre medie del modulo di rigidezza E_0 (Figura 4.23) e dell'angolo di fase φ (Figura 4.24) alla temperatura di riferimento di 25 °C.

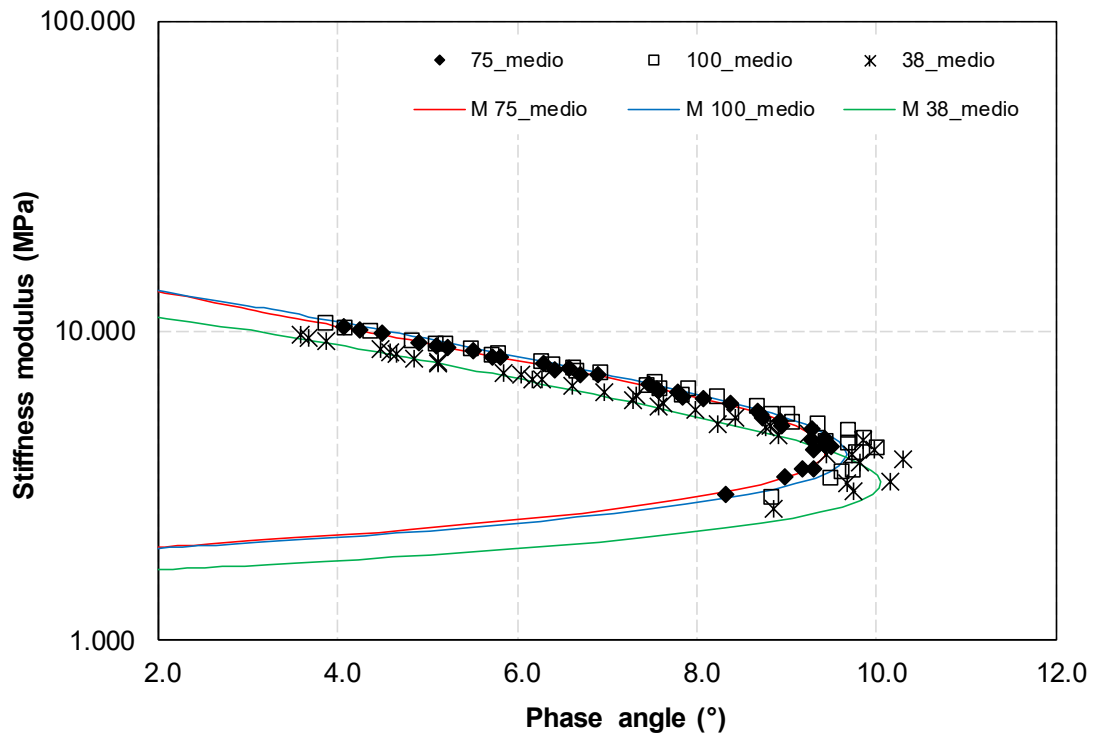


Figura 4.21 Confronto dei modelli dei dati sperimentali medi visualizzati nel diagramma Black space

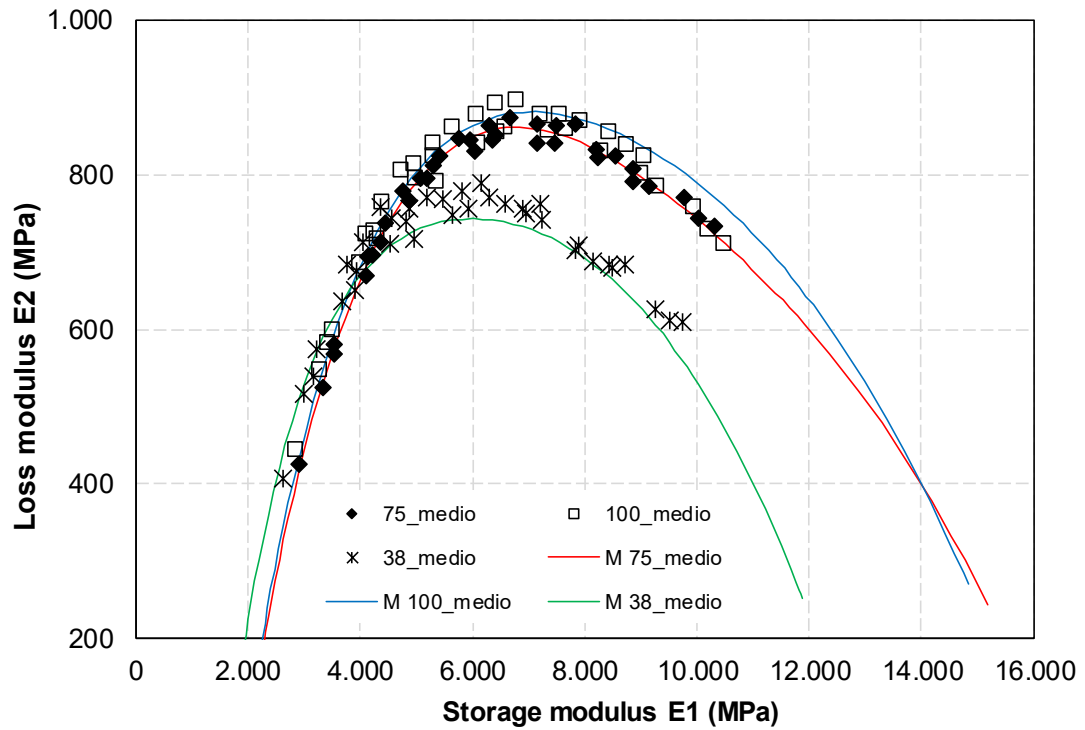


Figura 4.22 Confronto dei modelli dei dati sperimentali medi visualizzati nel diagramma Cole-Cole

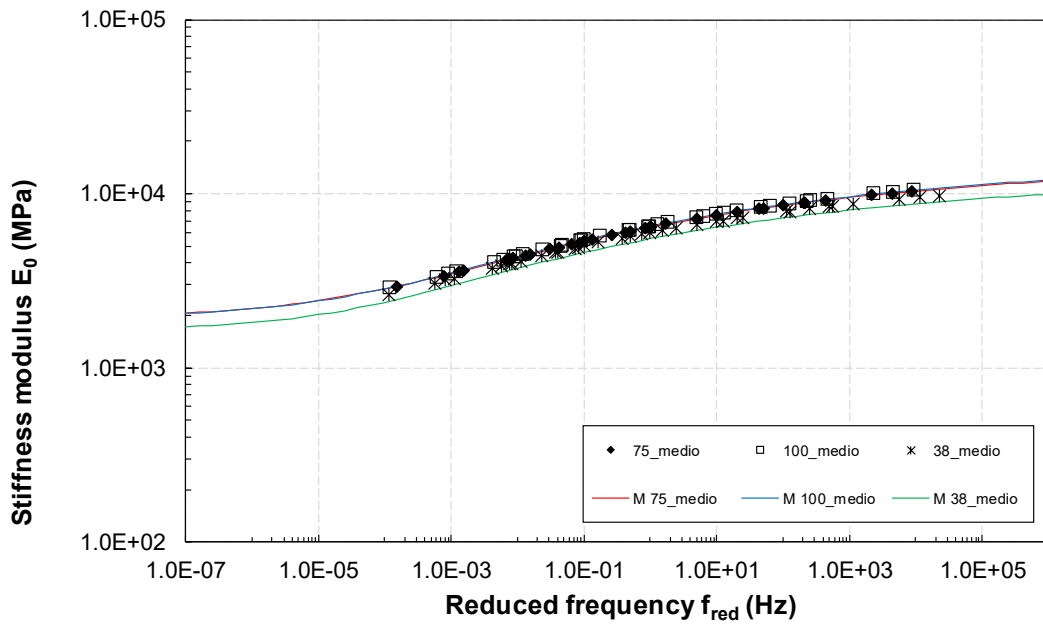


Figura 4.23 Confronto dei modelli delle curve maestre medie del modulo di rigidità E_0 [Tref=25°C]

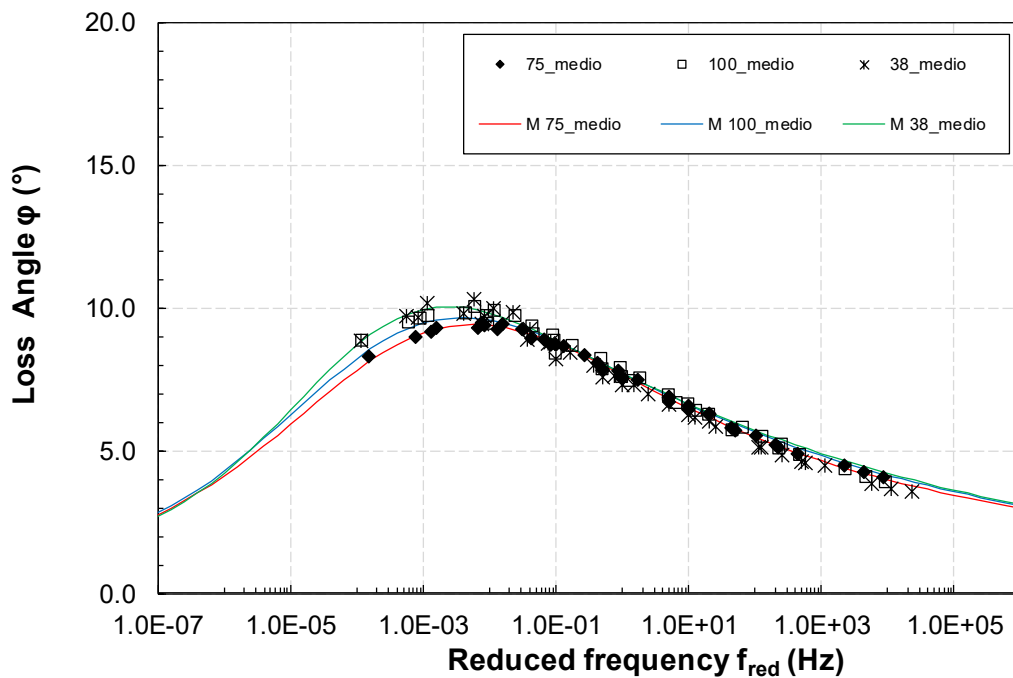


Figura 4.24 Confronto dei modelli delle curve maestre medie dell'angolo di fase ϕ [Tref=25°C]

La rappresentazione dei modelli dei singoli provini è di seguito illustrata nel diagramma Black space (Figura 4.25), nel diagramma Cole-Cole (Figura 4.26) e rispettivamente sulle curve maestre del modulo di rigidità E_0 (Figure 4.27 - 4.29 - 4.31) e dell'angolo di fase ϕ (Figure 4.28 - 4.30 - 4.32).

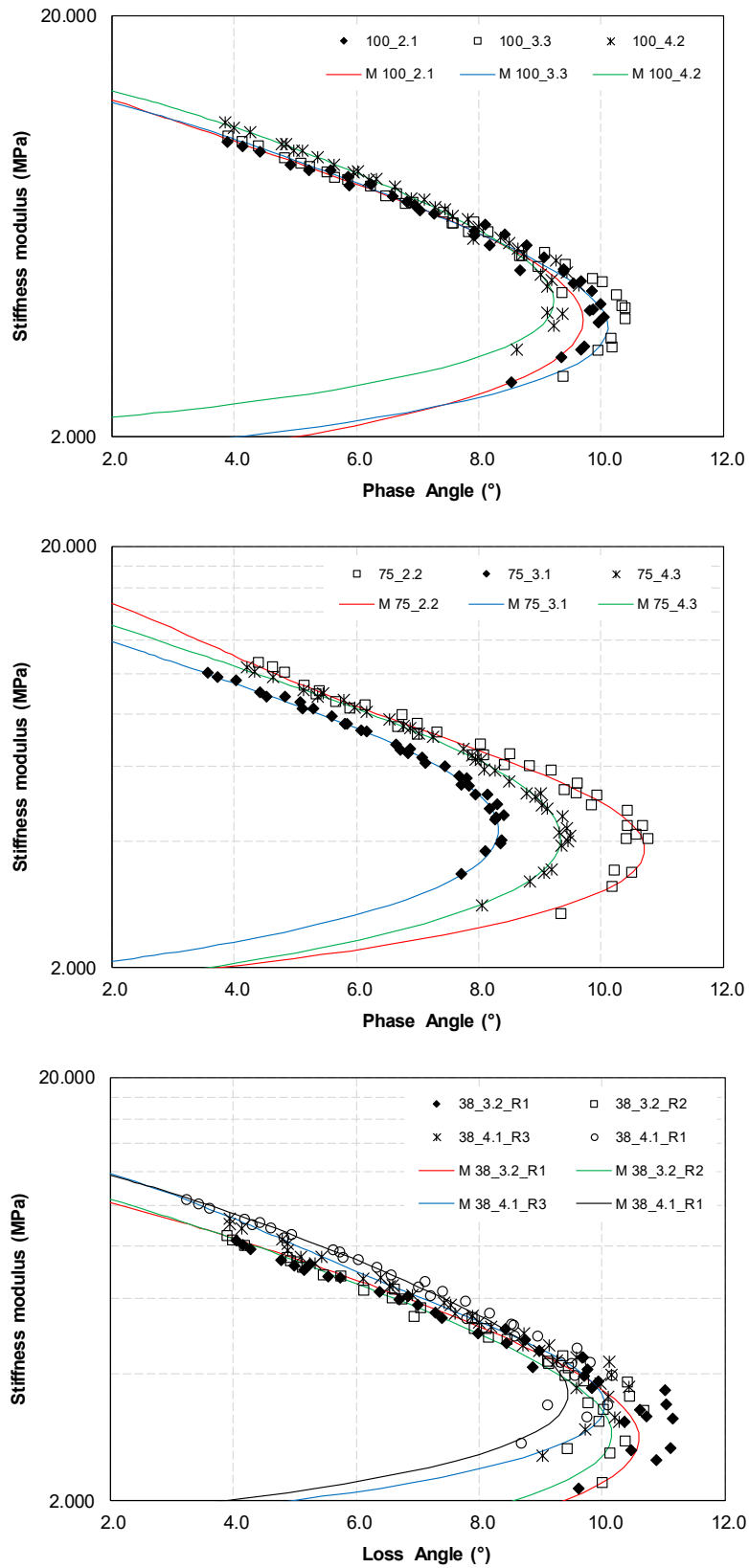


Figura 4.25 Risultati sperimentali e modellazione reologica dei 100, 75 e 38 mm sul Black space

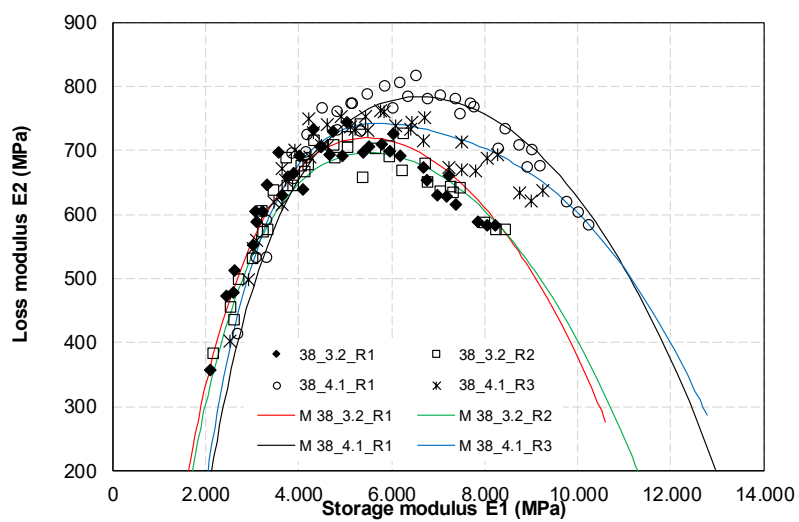
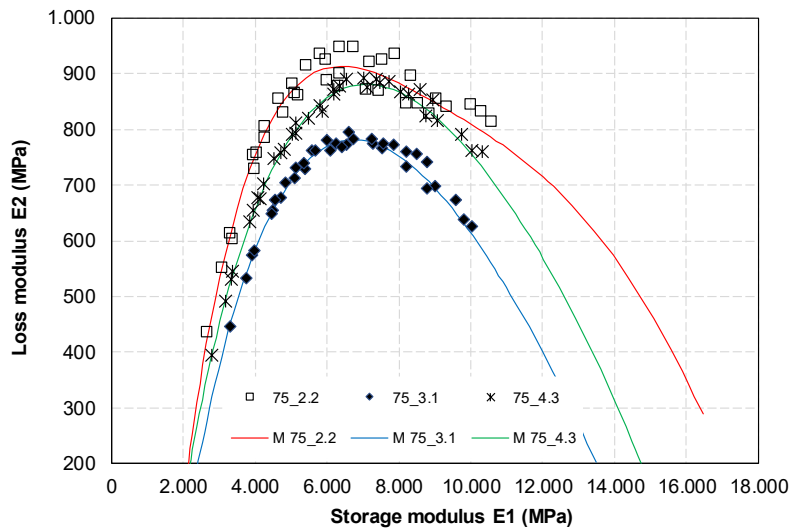
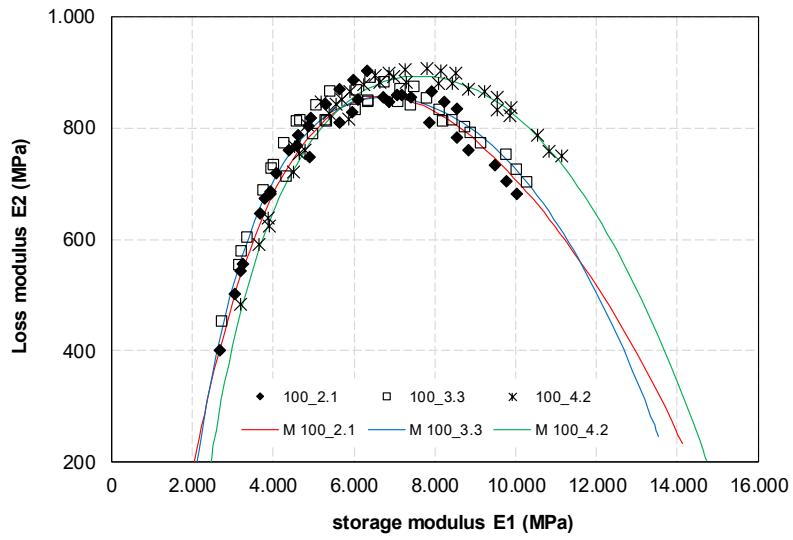


Figura 4.26 Risultati sperimentali e modellazione reologica dei 100, 75 e 38 mm sul piano Cole Cole

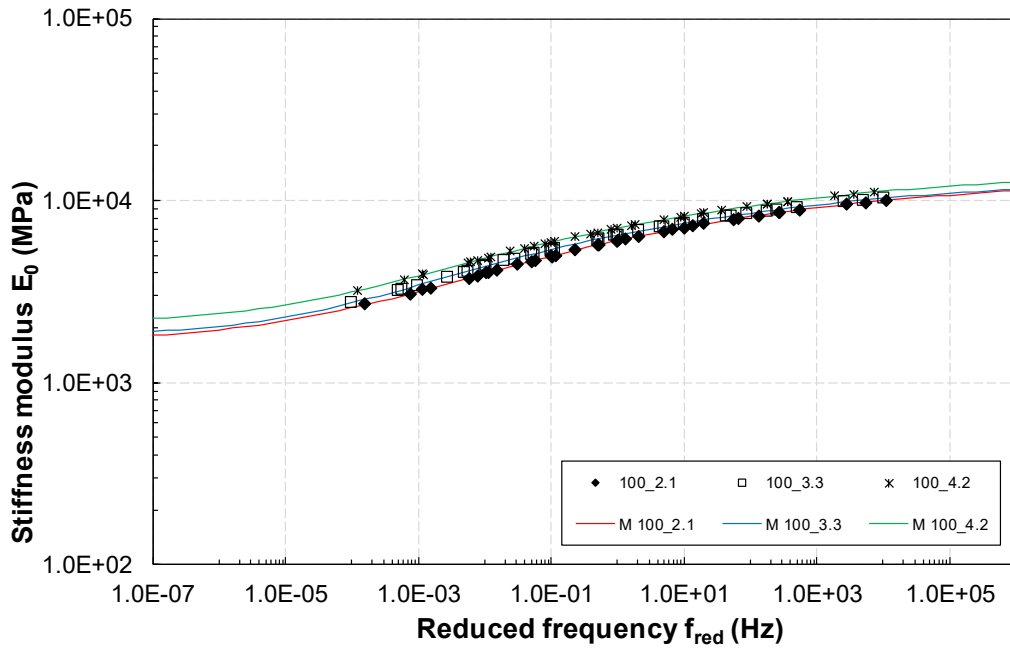


Figura 4.27 Dati sperimentali e modello delle curve maestre dei 100 mm del modulo di rigidezza [Tref =25°C]

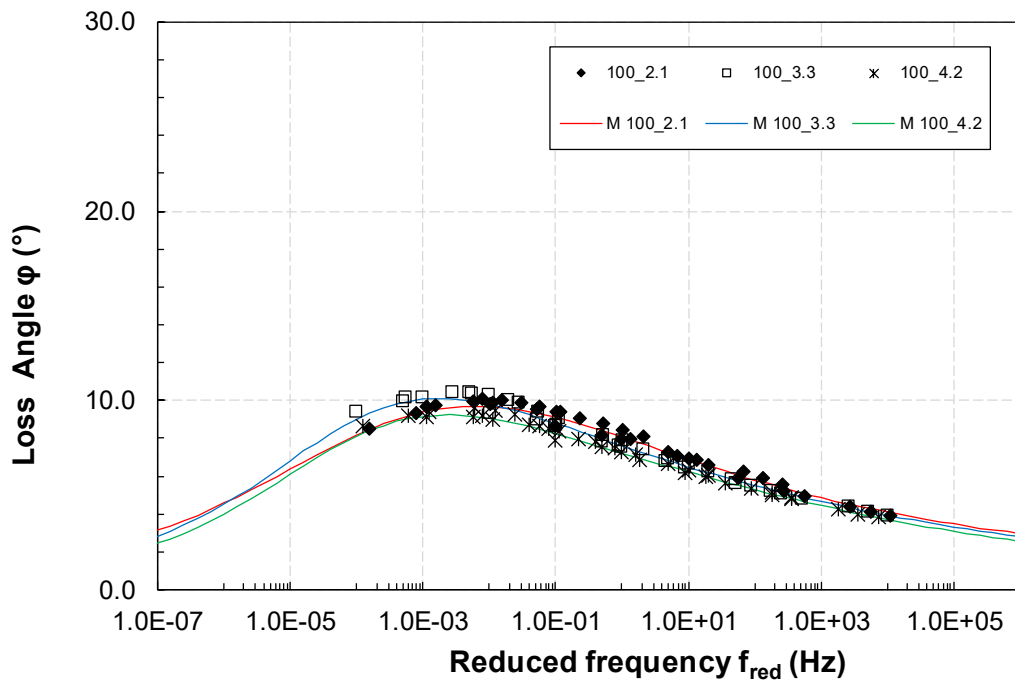


Figura 4.28 Dati sperimentali e modello delle curve maestre dei 100 mm dell'angolo di fase [Tref =25°C]

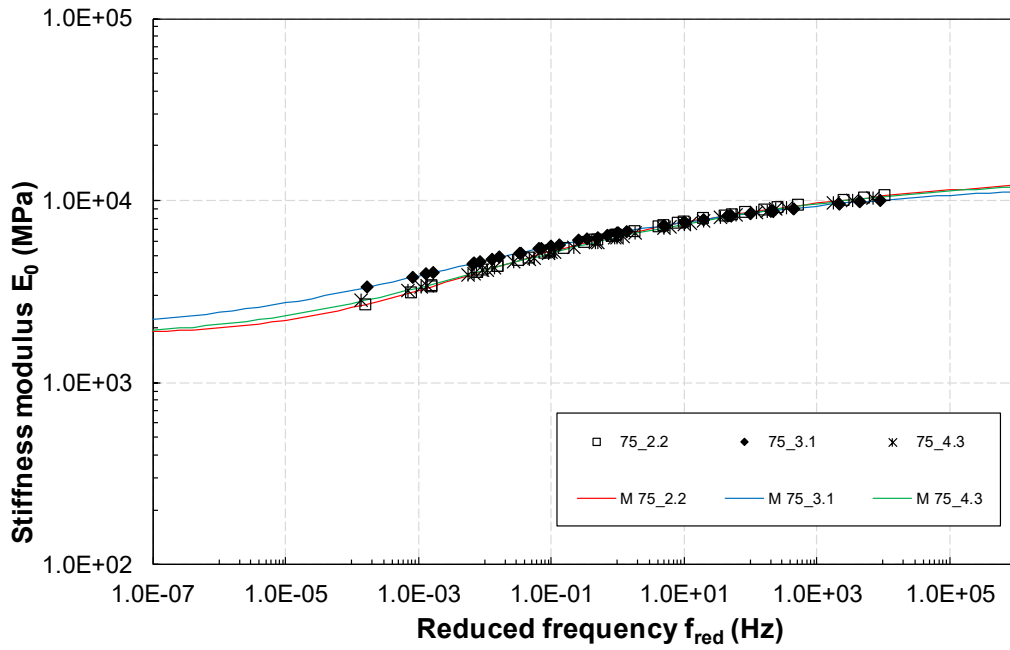


Figura 4.29 Dati sperimentali e modello delle curve maestre dei 75 mm del modulo di rigidezza [$T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$]

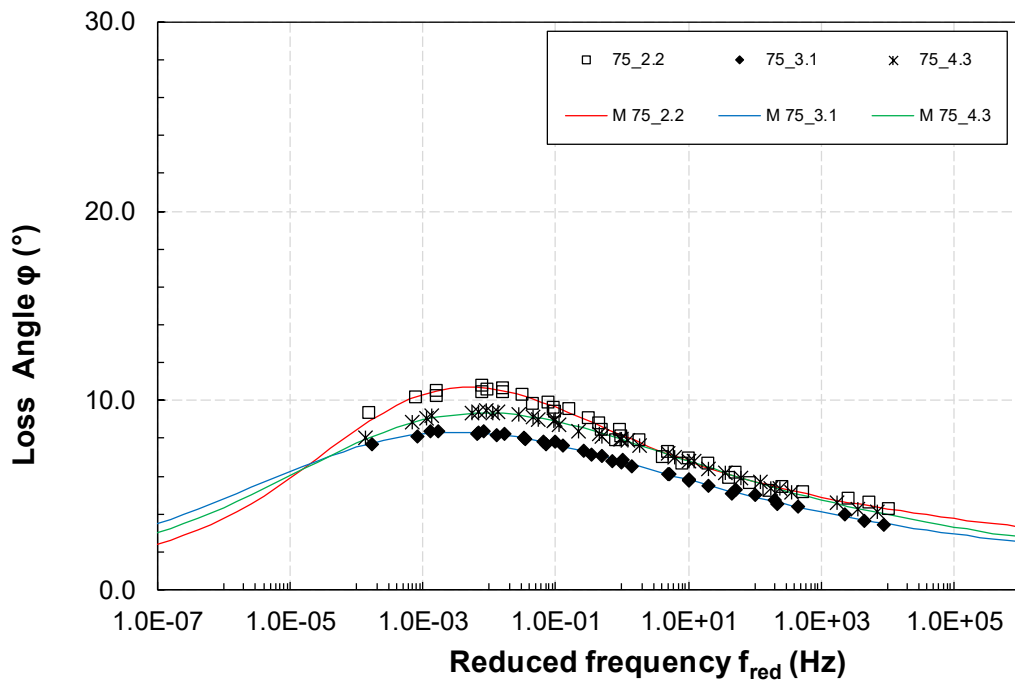


Figura 4.30 Dati sperimentali e modello delle curve maestre dei 75 mm dell'angolo di fase [$T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$]

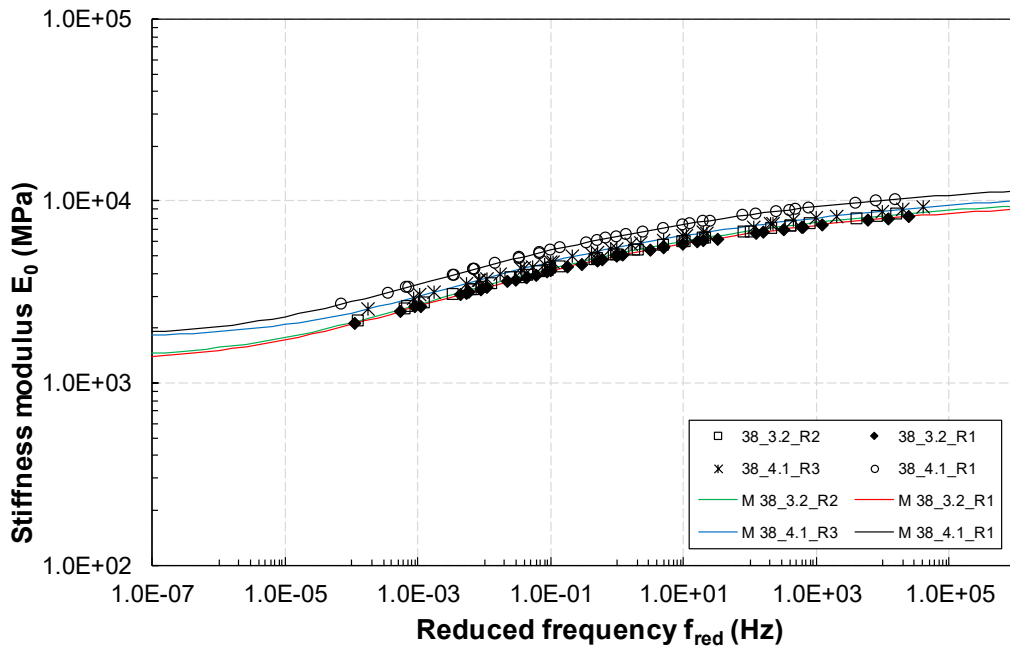


Figura 4.31 Dati sperimentali e modello delle curve maestre dei 38 mm del modulo di rigidezza [$T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$]

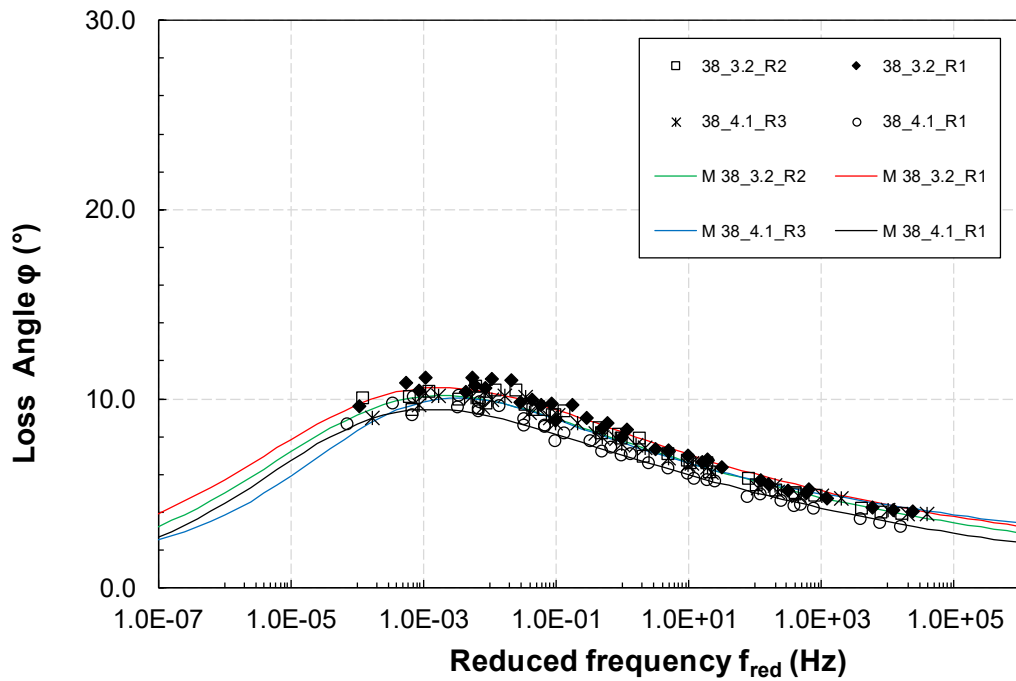


Figura 4.32 Dati sperimentali e modello delle curve maestre dei 38 mm dell'angolo di fase [$T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$]

Capitolo 5

Risultati e analisi delle prove di fatica

In questo capitolo verranno descritti e commentati i risultati delle prove di fatica eseguite sui conglomerati bituminosi a freddo mettendo a confronto i provini testati di differenti dimensioni.

1 Esempio di elaborazione dei risultati

Nel presente paragrafo si descrivono le operazioni eseguite durante le prove di fatica e le operazioni compiute, tramite foglio di calcolo excel, per la costruzione delle curve di modulo di rigidezza e di deformazione permanente in funzione del numero di cicli di prova. In particolare, si farà riferimento ai risultati del test eseguito sul provino 38_2.3_R3. Le operazioni descritte sono state poi ripetute per ciascun provino analizzato.

1.1 Descrizione della prova

Prima di procedere con la prova di fatica si esegue il *Finger Print*, ovvero si sottopone il provino a una prova di modulo a trazione-comprensione dalla durata di 55 cicli così da ottenere una stima della sua rigidezza nel range di deformazione imposto.

Il *Finger Print* permette di scegliere il livello di deformazione da impostare nella successiva prova di fatica, inoltre permette di verificare se tutti i campioni testati hanno rigidezze paragonabili, infatti il comportamento del provino nella prova di fatica è strettamente legato alla sua rigidezza, un provino con rigidezza maggiore avrà un comportamento più fragile di uno con valori di rigidezza inferiori. Qualora i valori di

rigidezza verificati durante il *Finger Print* fossero paragonabili sarà possibile confrontare i risultati delle prove dei diversi provini testati.

Successivamente il provino viene fatto riposare per un periodo di 5 minuti prima di essere sottoposto alla prova di fatica eseguita ad una temperatura di 15 °C e ad una frequenza di 10 Hz. Nel caso del provino 38_2.3_R3 il *Finger Print* ha restituito un valore del modulo di 3413 MPa; si è deciso di eseguire la prova ad un livello di deformazione pari a 120 μ strain come riportato in tabella 5.1.

Tabella 5.1 Dati di prova del campione 38_2.3_R3

Date	07/12/2021
Specimen code	38_2.3_R3
Diameter	38 mm
Height	111.1 mm
Test temperature	15 °C
E*f.p. (27-33 μstrain)	3413 MPa
Rest period	5 minutes
Defm level	120 μ strain

Di seguito vengono riportati i grafici che mostrano l'andamento del modulo di rigidezza (*Stiffness modulus*) (Figura 5.1) e della deformazione permanente (*Deformation*) (Figura 5.2) in funzione del numero di cicli, è anche presente un grafico in cui si evidenziano gli andamenti del modulo di rigidezza e della deformazione media nei primi 1500 cicli di prova (Figura 5.3). Si nota come il valore del modulo, che a inizio prova è di 2474 MPa, degrada con il numero di cicli mentre invece la deformazione permanente ha un comportamento inverso, aumenta man mano che la prova procede. La prova termina con la rottura del provino. Affinché sia valida, la rottura deve avvenire all'interno dell'area di misura (Middle Failures), qualora avvenisse in estremità (End Failures) non sarà considerata valida. La prova, per come è concepita, porta all'accumulo di deformazione permanente (non è una prova di fatica pura), di conseguenza il danneggiamento è dovuto sia alla fatica che all'accumulo del danno.

Nel caso del provino in esame si è deciso di interrompere la prova dopo 48 ore poiché il provino non era ancora arrivato a rottura. Si registrava una diminuzione del modulo estremamente lenta (circa 100MPa/500000 cicli), andandosi a stabilizzare su valori di circa 660 MPa dopo oltre 1.6 milioni di cicli di prova.

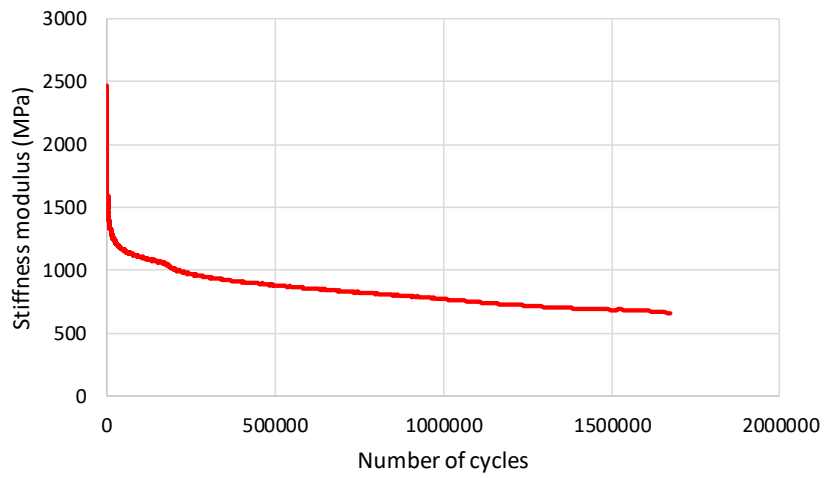


Figura 5.1 Andamento del modulo di rigidità

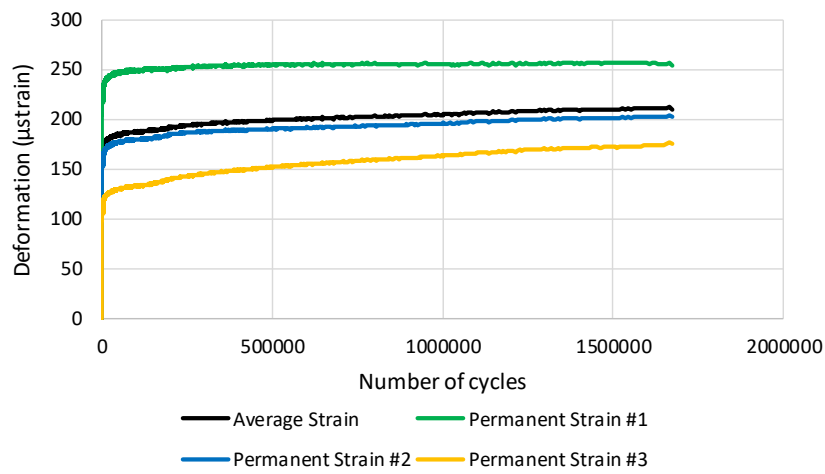


Figura 5.2 Andamento della deformazione permanente

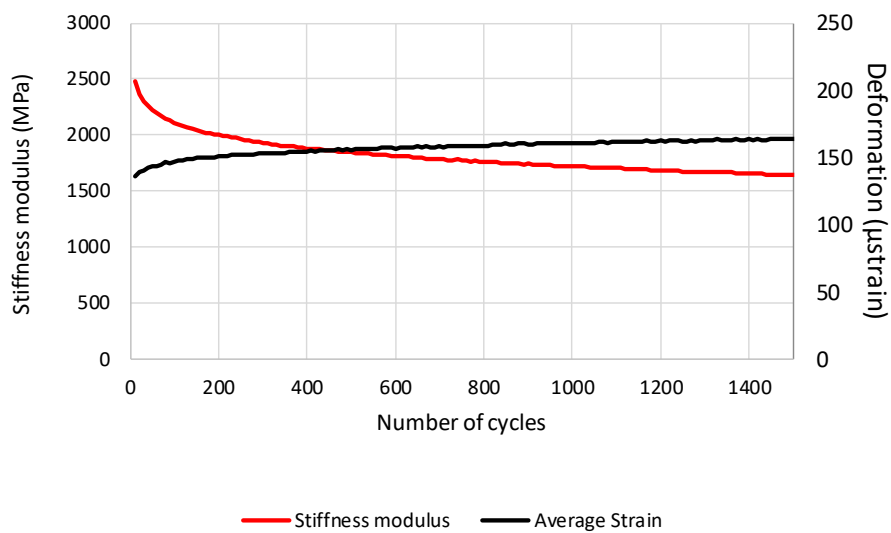


Figura 5.3 Andamento del modulo di rigidità e della deformazione media nei primi 1500 cicli



Figura 5.4 Provino 38_2.3_R3 incollato ai piatti di carico

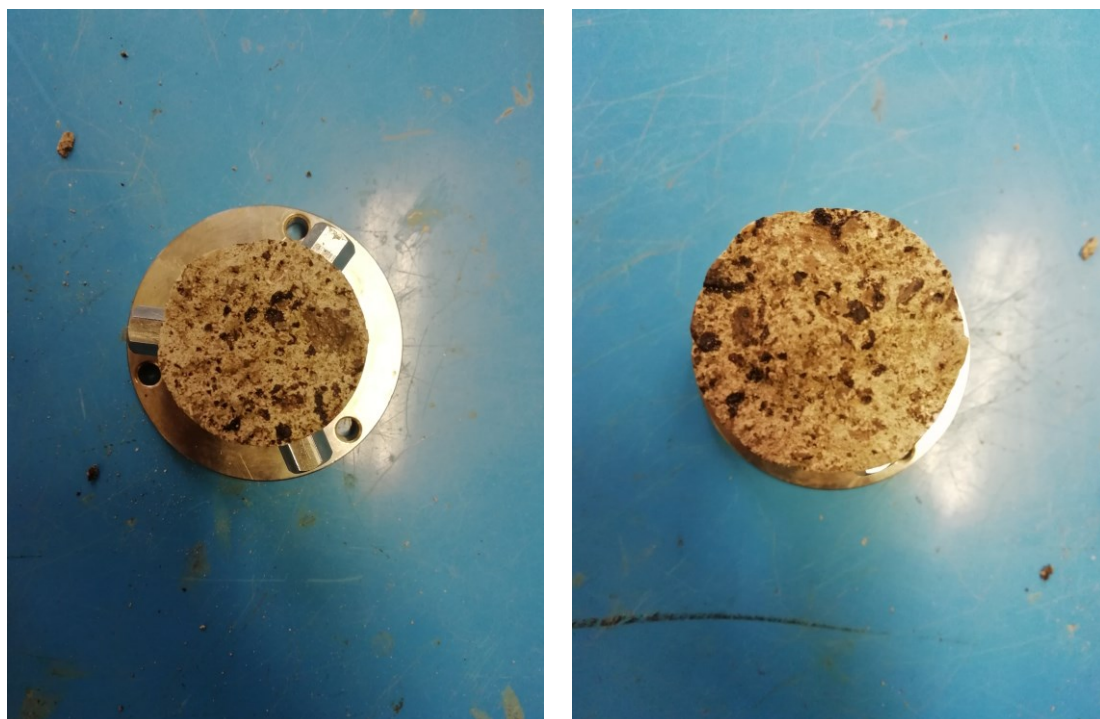


Figura 5.5 Rottura del provino 38_2.3_R3

2 Confronto tra le prove di fatica

Nel seguente paragrafo si mostrano i risultati delle prove di fatica eseguite sui provini di conglomerato bituminoso a freddo studiati. Nella Figura 5.6 è presente un grafico riassuntivo dei risultati ottenuti sui provini testati in cui si mostra l'andamento del modulo di rigidità (*Stiffness modulus*) nei primi 20000 cicli di prova. In questo grafico è stato anche inserito l'andamento tipico di una prova di fatica eseguita su un conglomerato bituminoso a caldo (HMA). Si nota che per gli HMA sono presenti due rapidi decrementi del modulo, ad inizio e fine prova, con al centro una fase di propagazione delle fessure lineare. Al secondo rapido decremento del modulo corrisponde un aumento delle deformazioni che porta poi il provino in breve tempo alla rottura.

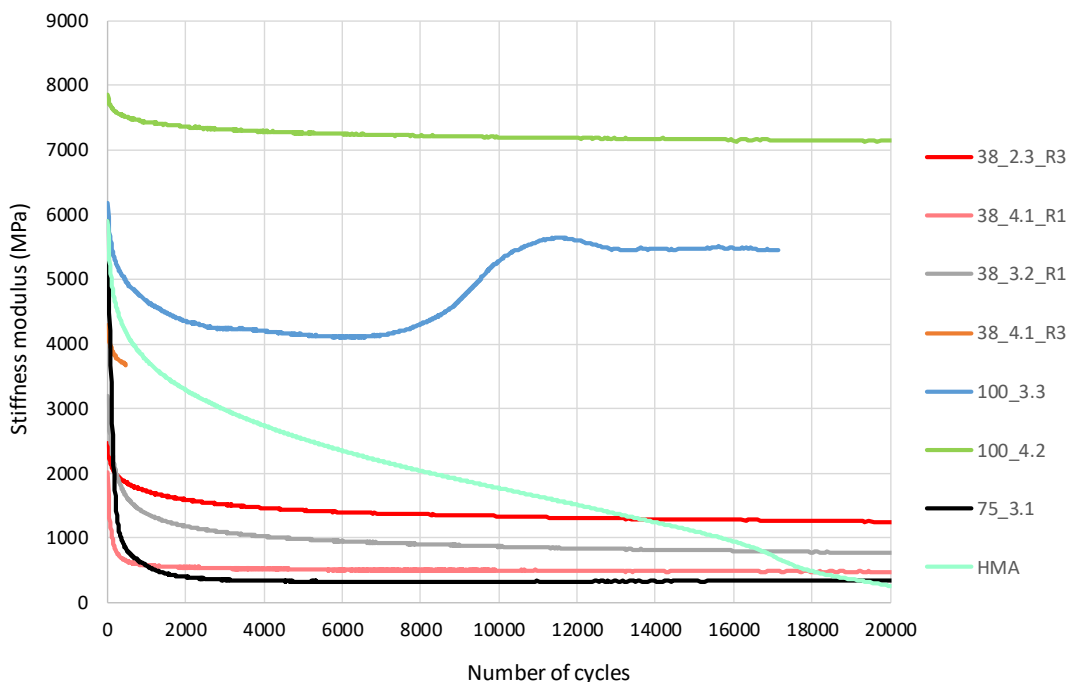


Figura 5.6 Riassunto risultati prove di fatica

Si sono riscontrati principalmente due diversi comportamenti. I provini 100_3.3 e 100_4.2 hanno mostrato un andamento simile a quello dei conglomerati a caldo però poi la rottura è avvenuta all'estremità (End Failures) di conseguenza la prova non può essere considerata valida. Negli altri provini invece si nota un rapido crollo della rigidità nei primi cicli. Probabilmente dovuto al fatto che si sono rotti i legami cementizi sin da subito. Questi provini hanno avuto un comportamento più simile a quello di un misto cementato. Si potrebbe anche dire che macroscopicamente si è visto che il provino ha avuto un comportamento fragile. Una volta creatasi la cricca la rottura è partita ma il

provino non è collassato infatti la rigidezza ha continuato a mantenersi, seppur ad un livello basso. Si è ipotizzato che questo sia dovuto al fatto che, mentre i legami cementizi si sono rotti subito, i legami bituminosi, dovuti alla presenza dell'emulsione bituminosa nella miscela, hanno continuato a resistere facendo procedere la prova su bassi livelli di rigidezza.

Per quanto riguarda i due campioni da 100 mm questo decorso non è avvenuto, i valori di rigidezza si sono mantenuti su livelli più alti durante la prova poiché i legami cementizi hanno continuato a resistere. Una delle ipotesi fatte è che probabilmente il carico nei provini da 100 mm è meno eccentrico rispetto a quelli di diametro inferiore, infatti spesso ciò che porta alla rottura fragile nelle prove di fatica è proprio un picco di sforzo. Sui provini di diametro inferiore una piccola eccentricità può portare a una grossa disuniformità.

In conclusione si potrebbe affermare che la miscela, composta dal 2% di cemento e 4% di emulsione bituminosa, ha mostrato un comportamento quasi-brittle (quasi fragile), mostrando un rapido collasso della rigidezza ma che comunque mantiene una riserva di rigidezza probabilmente grazie alla presenza della componente bituminosa.

Conclusioni

L'obiettivo principale della presente tesi è quello di valutare gli effetti che hanno le dimensioni dei provini sulla misura del modulo complesso di miscele riciclate a freddo attraverso prove cicliche di compressione. L'utilizzo di provini di diametro 38 mm ha sia il vantaggio di migliorare l'efficienza in laboratorio nel confezionamento dei provini, sia una notevole riduzione dei tempi di condizionamento antecedenti all'esecuzione delle prove.

La miscela analizzata appartiene alla famiglia delle miscele riciclate a freddo mediante emulsione bituminosa. Sono state ottenute e studiate tre differenti geometrie, caratterizzate dai diametri 38, 75 e 100 mm, attraverso il carotaggio di provini compattati con pressa giratoria. I provini sono poi stati caratterizzati dal punto di vista volumetrico calcolando i vuoti sia allo stato fresco che allo stato indurito, allo scopo di verificare se la dimensione degli stessi influenzasse anche le caratteristiche volumetriche.

Il programma sperimentale si compone di una prima parte in cui sono state eseguite prove di modulo complesso, per analizzare la risposta deformativa del materiale, attraverso la costruzione di curve maestre. Utilizzando il modello reologico 2S2P1D-HY sono stati inoltre costruiti i modelli reologici di tutti i provini studiati. Nella seconda parte del programma sperimentale sono state eseguite prove di resistenza a fatica.

Dai risultati della sperimentazione si sono tratte le seguenti conclusioni:

- Dall'analisi volumetrica, come previsto, si è riscontrata una discrepanza tra il metodo geometrico e quello idrostatico. Con il metodo geometrico si sovrastima il volume dei provini poiché, a seguito del carotaggio, non risultano mai perfettamente cilindrici. Questo effetto è molto più evidente nei provini di diametro 38 mm a causa delle maggiori difficoltà nel carotaggio, infatti si

ottengono provini meno regolari rispetto a quelli di diametro 75 e 100 mm. In generale, l'analisi dei vuoti ha dato risultati soddisfacenti poiché ci si avvicina al valore target del 12%. La differenza tra i provini da 75 e 100 mm è minima, mentre è un po' più elevata in quelli da 38 mm, questo fenomeno è dovuto al fatto che quest'ultimi vengono ricavati dalla parte più esterna della carota.

- I risultati ottenuti dalle prove di modulo complesso sono stati riportati nei diagrammi di Black e Cole-Cole e hanno mostrato un andamento simile tra tutti i provini. In particolare i 75 e 100 mm hanno dato valori quasi coincidenti tra loro, una minima differenza può essere attribuita ad errori casuali introdotti dal metodo di prova e dal confezionamento della miscela.
- I provini di diametro 38 mm hanno mostrato una maggiore variabilità non tanto tra loro, ma all'interno dello stesso provino. Si ipotizza che ciò sia dovuto a maggiori difficoltà riscontrate durante la fase di centraggio nell'AMPT. In generale si è constatato che la variabilità è ridotta, infatti è stato possibile effettuare la media dei risultati dei 38, 75 e 100 mm e dal confronto delle medie si sono ottenuti risultati paragonabili tra loro.
- Nelle prove di fatica la rottura è diversa da quella dei conglomerati bituminosi a caldo, probabilmente a causa del fatto che, nelle miscele a freddo, è presente anche il legante cementizio. La maggior parte dei campioni ha mostrato un comportamento *quasi-brittle* (quasi fragile). La rigidità ha un rapido decremento nei primi cicli di prova, ma senza una rottura completa perché il modulo di rigidità si mantiene costante, seppur su bassi valori. Si è ipotizzato che questo comportamento sia dovuto al fatto che, mentre i legami cementizi si rompono subito, esibendo un comportamento fragile, quelli bituminosi impediscono la rottura totale, garantendo un comportamento duttile.

Bibliografia

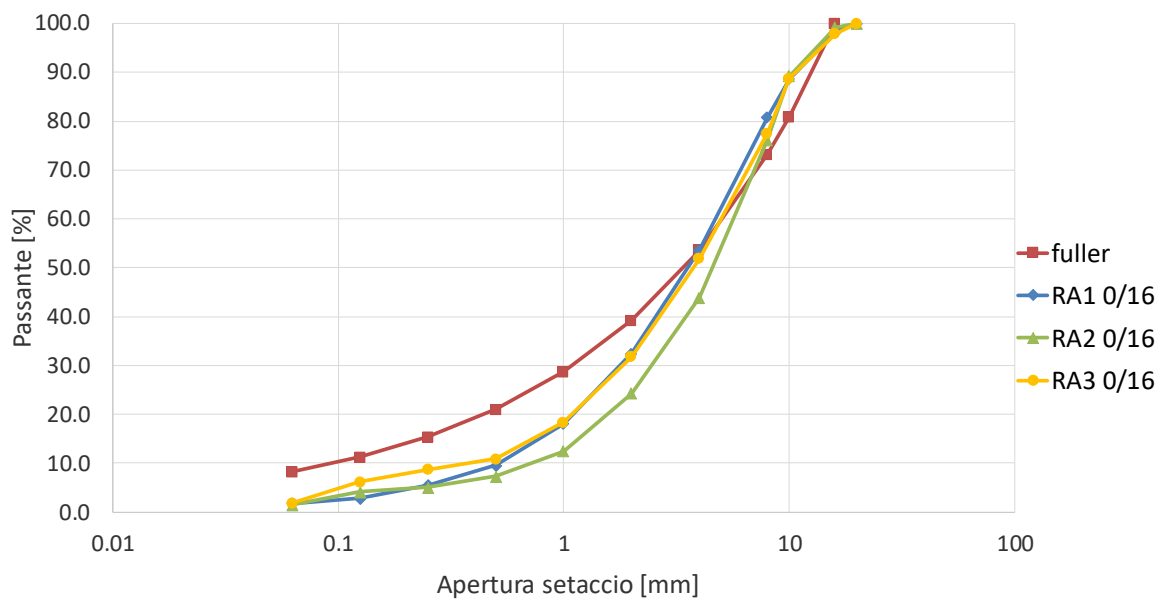
1. Pellicciotta, A., Graziani, A., Mignini, C. (2021). Caratterizzazione reologica delle malte bituminose a freddo.
2. Andrea, G. Cold mix asphalt used for base layers: an application work on the “variante” to the SP 424 in San Lorenzo in Campo (PU).
3. Ranieri, A., Graziani, A., Cardone, F. (2018). L’effetto del dosaggio di legante sulle proprietà meccaniche delle miscele bituminose a freddo.
4. Di Benedetto, H., Mondher, N., Sauzéat, C., & Olard, F. (2007). Three-dimensional thermo-viscoplastic behaviour of bituminous materials: the DBN model. *Road Materials and Pavement Design*, 8(2), 285-315.
5. Olard, F., Di Benedetto, H., Dony, A., & Vaniscote, J. C. (2005). Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics. *Materials and structures*, 38(1), 121-126.
6. Francken, L. (1998). *Bituminous Binders and Mixes*.
7. Ferry, J.D. (1980). *Viscoelastic properties of polymers*.
8. Sayegh, G. (1967). *Viscoelastic properties of bituminous mixtures*. 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. University of Michigan, Ann Arbor.
9. Godenzoni, C., Bocci, M., & Graziani, A. (2017). Rheological characterization of cold bituminous mastics produced with different mineral additions. In *Transport Infrastructure and Systems*, 185-192. CRC Press.
10. Graziani, A., Raschia, S., Mignini, C., Carter, A., & Perraton, D. (2020). Use of fine aggregate matrix to analyze the rheological behavior of cold recycled materials. *Materials and Structures*, 53(4), 1-16.

11. Mangiafico, S., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Olard, F., Pouget, S., & Planque, L. (2013). Influence of reclaimed asphalt pavement content on complex modulus of asphalt binder blends and corresponding mixes: experimental results and modelling. *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup1), 132-148.
12. Mangiafico, S., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Olard, F., Pouget, S., & Planque, L. (2014). New method to obtain viscoelastic properties of bitumen blends from pure and reclaimed asphalt pavement binder constituents. *Road materials and pavement design*, 15(2), 312-329.
13. Olard, F., & Di Benedetto, H. (2003). General “2S2P1D” model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. *Road materials and pavement design*, 4(2), 185-224.
14. Lin, J., Hong, J., & Xiao, Y. (2017). Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement. *Journal of Cleaner Production*, 156, 337-344.
15. Stimilli, A., Ferrotti, G., Graziani, A., & Canestrari, F. (2013). Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup1), 149-161.
16. Schwartz, C. W., & Khosravifar, S. (2013). Design and evaluation of foamed asphalt base materials (No. MD-13-SP909B4E). Maryland. State Highway Administration. Office of Policy & Research.
17. Ashmawy, A.K., Salgado, R., Guha, S., and Drnevich, V.P. (1995). Soil Damping and Its Use in Dynamic Analyses. Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering & Soil Dynamics-Session 1-Static and Dynamic Engineering Soil Parameters and Constitutive Relations of Soils.
18. Genta, G. (2009). *Vibration dynamics and control* (Vol. 616). New York: Springer.
19. Di Benedetto, H., de La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A. and Lundstrom, R. (2004). Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, 37, 202-216.
20. Grilli, A., Graziani, A., Bocci, E., & Bocci, M. (2016). Volumetric properties and influence of water content on the compactability of cold recycled mixtures. *Materials and Structures*, 49(10), 4349-4362.

Appendice

Si riportano le tabelle con le percentuali di trattenuto e passante e le curve granulometriche delle tre granulometrie eseguite.

setaccio/ crivello [mm]	Granulometria 1 (RA1 0/16)				Granulometria 2 (RA2 0/16)				Granulometria 3 (RA3 0/16)			
	trattenuto	parziale trattenuto	trattenuto	passante	trattenuto	parziale trattenuto	trattenuto	passante	trattenuto	parziale trattenuto	trattenuto	passante
	[g]	[%]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	[%]
20	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0	100
16	29.8	1.8	1.8	98.2	10.8	0.8	0.8	99.2	45.9	2.1	2.1	97.9
10	157.8	9.5	11.3	88.7	131.7	10	10.8	89.2	196.7	9.1	11.2	88.8
8	130.3	7.9	19.2	80.8	171.3	13	23.8	76.2	244.7	11.3	22.5	77.5
4	449.4	27.1	46.3	53.7	427.5	32.3	56.1	43.9	555	25.6	48.1	51.9
2	350.6	21.2	67.5	32.5	258.9	19.6	75.7	24.3	435.8	20.1	68.2	31.8
1	239	14.4	81.9	18.1	155.6	11.8	87.5	12.5	290.9	13.4	81.6	18.4
0,5	140.2	8.5	90.4	9.6	68.8	5.2	92.7	7.3	162.7	7.5	89.1	10.9
0,25	68.5	4.1	94.5	5.5	29.2	2.2	94.9	5.1	47.3	2.2	91.3	8.7
0,125	45.4	2.7	97.2	2.8	12.7	1	95.9	4.1	53.2	2.5	93.8	6.2
0,063	16.7	1	98.2	1.8	34	2.6	98.5	1.5	92.6	4.3	98.1	1.9
FONDO	29.8	1.8	100	0	21.9	1.7	100	0	45.6	2.1	100	0



Si riportano i risultati delle prove di modulo complesso di tutti i provini esaminati mostrando: temperatura obiettivo, frequenza, modulo di restituzione E1, modulo di dissipazione E2, modulo di rigidezza E e angolo di fase ϕ .

100_2.1					
Temperature	frequency	E1	E2	E	ϕ
[°C]	[hz]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[°]
5	20	10034	681	10057	3.88
5	10	9761	705	9786	4.13
5	5	9491	735	9519	4.43
5	1	8836	761	8869	4.92
5	0.5	8557	783	8593	5.23
5	0.1	7858	810	7900	5.89
15	20	8547	836	8588	5.58
15	10	8234	847	8277	5.87
15	5	7919	867	7966	6.25
15	1	7175	859	7226	6.83
15	0.5	6861	847	6913	7.04
15	0.1	6106	851	6165	7.94
25	20	7403	856	7452	6.59
25	10	7052	860	7104	6.95
25	5	6714	856	6768	7.27
25	1	5948	829	6005	7.93
25	0.5	5630	809	5688	8.18
25	0.1	4905	749	4962	8.68
35	20	6331	903	6395	8.11
35	10	5983	886	6048	8.42
35	5	5634	870	5701	8.78
35	1	4870	805	4936	9.38
35	0.5	4575	769	4639	9.54
35	0.1	3938	682	3997	9.82
45	20	5287	843	5354	9.06
45	10	4942	817	5009	9.39
45	5	4618	787	4685	9.68
45	1	3945	686	4004	9.86
45	0.5	3687	647	3743	9.95
45	0.1	3184	543	3230	9.68
55	20	4384	761	4450	9.85
55	10	4082	719	4145	9.99
55	5	3796	673	3855	10.06
55	1	3240	555	3287	9.72
55	0.5	3042	501	3083	9.36
55	0.1	2668	400	2698	8.53

100_3.3					
Temperature	frequency	E1	E2	E	ϕ
[°C]	[hz]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[°]
5	20	10288	702	10312	3.9
5	10	10027	726	10053	4.14
5	5	9767	753	9796	4.41
5	1	9150	773	9183	4.83
5	0.5	8876	792	8911	5.1
5	0.1	8210	812	8250	5.65
15	20	8737	802	8774	5.24
15	10	8433	815	8472	5.52
15	5	8119	833	8162	5.86
15	1	7398	840	7446	6.48
15	0.5	7096	847	7146	6.81
15	0.1	6365	849	6421	7.6
25	20	7817	854	7863	6.23
25	10	7479	874	7530	6.66
25	5	7148	870	7201	6.94
25	1	6366	847	6422	7.58
25	0.5	6054	834	6111	7.84
25	0.1	5328	812	5390	8.67
35	20	6758	882	6815	7.43
35	10	6404	891	6466	7.92
35	5	6060	868	6122	8.16
35	1	5313	815	5375	8.72
35	0.5	4994	789	5056	8.98
35	0.1	4327	714	4385	9.37
45	20	5416	867	5485	9.09
45	10	5063	841	5132	9.43
45	5	4679	814	4749	9.87
45	1	4018	734	4084	10.35
45	0.5	3748	689	3811	10.41
45	0.1	3216	578	3268	10.19
55	20	4596	813	4667	10.03
55	10	4265	772	4334	10.26
55	5	3964	728	4030	10.41
55	1	3368	604	3422	10.17
55	0.5	3151	553	3199	9.95
55	0.1	2733	452	2770	9.39

100_4.2					
Temperature	frequency	E1	E2	E	ϕ
[°C]	[hz]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[°]
5	20	11139	750	11164	3.85
5	10	10830	758	10856	4
5	5	10551	787	10580	4.27
5	1	9858	823	9892	4.77
5	0.5	9546	832	9582	4.98
5	0.1	8822	871	8865	5.64
15	20	9873	836	9908	4.84
15	10	9551	856	9589	5.12
15	5	9220	866	9261	5.37
15	1	8430	880	8476	5.96
15	0.5	8099	880	8147	6.2
15	0.1	7300	883	7353	6.9
25	20	8514	898	8561	6.02
25	10	8146	904	8196	6.33
25	5	7802	906	7854	6.63
25	1	6974	892	7031	7.29
25	0.5	6636	882	6694	7.57
25	0.1	5865	816	5921	7.92
35	20	7256	905	7312	7.11
35	10	6877	900	6936	7.45
35	5	6518	896	6579	7.83
35	1	5710	852	5773	8.49
35	0.5	5380	826	5443	8.73
35	0.1	4657	754	4718	9.2
45	20	6253	878	6314	7.99
45	10	5894	865	5957	8.35
45	5	5547	843	5611	8.64
45	1	4792	760	4852	9.01
45	0.5	4491	722	4549	9.13
45	0.1	3893	625	3943	9.12
55	20	5183	846	5252	9.27
55	10	4842	805	4908	9.44
55	5	4519	767	4584	9.64
55	1	3874	639	3926	9.37
55	0.5	3635	591	3683	9.23
55	0.1	3192	484	3228	8.62

75_2.2					
Temperature	frequency	E1	E2	E	ϕ
[°C]	[hz]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[°]
5	20	10574	814	10605	4.4
5	10	10280	833	10314	4.63
5	5	10006	845	10042	4.83
5	1	9331	841	9369	5.15
5	0.5	9043	855	9083	5.4
5	0.1	8327	897	8375	6.15
15	20	8846	829	8885	5.35
15	10	8530	847	8572	5.67
15	5	8190	847	8234	5.91
15	1	7423	871	7474	6.69
15	0.5	7100	873	7153	7.01
15	0.1	6317	879	6378	7.92
25	20	7900	935	7955	6.75
25	10	7546	927	7603	7
25	5	7184	922	7243	7.32
25	1	6340	900	6404	8.08
25	0.5	5998	888	6063	8.42
25	0.1	5198	861	5269	9.41
35	20	6716	948	6783	8.03
35	10	6336	948	6407	8.51
35	5	5948	926	6020	8.85
35	1	5107	865	5180	9.61
35	0.5	4779	830	4851	9.85
35	0.1	4055	758	4125	10.59
45	20	5790	937	5865	9.19
45	10	5406	916	5483	9.62
45	5	5034	883	5111	9.95
45	1	4256	784	4328	10.44
45	0.5	3963	729	4029	10.42
45	0.1	3351	604	3405	10.22
55	20	4638	855	4716	10.44
55	10	4271	806	4346	10.68
55	5	3958	753	4029	10.78
55	1	3306	613	3362	10.51
55	0.5	3064	551	3113	10.19
55	0.1	2647	436	2683	9.35

75_3.1					
Temperature	frequency	E1	E2	E	ϕ
[°C]	[hz]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[°]
5	20	10024	626	10044	3.57
5	10	9804	638	9825	3.72
5	5	9580	674	9604	4.03
5	1	9016	699	9043	4.43
5	0.5	8773	695	8801	4.53
5	0.1	8213	734	8246	5.11
15	20	8769	741	8800	4.83
15	10	8497	756	8531	5.08
15	5	8213	760	8248	5.29
15	1	7543	768	7582	5.81
15	0.5	7273	775	7314	6.08
15	0.1	6590	795	6638	6.88
25	20	7868	772	7906	5.6
25	10	7568	774	7608	5.84
25	5	7256	784	7298	6.17
25	1	6552	772	6597	6.72
25	0.5	6248	775	6296	7.07
25	0.1	5571	763	5623	7.8
35	20	6729	784	6774	6.64
35	10	6411	769	6457	6.84
35	5	6094	763	6142	7.14
35	1	5392	730	5441	7.71
35	0.5	5113	713	5162	7.94
35	0.1	4496	655	4543	8.29
45	20	5981	781	6032	7.44
45	10	5666	763	5717	7.67
45	5	5366	739	5417	7.85
45	1	4715	678	4763	8.18
45	0.5	4459	648	4506	8.27
45	0.1	3904	574	3946	8.36
55	20	5117	732	5169	8.14
55	10	4826	704	4877	8.3
55	5	4549	673	4599	8.42
55	1	3962	583	4005	8.37
55	0.5	3736	532	3774	8.11
55	0.1	3300	447	3330	7.71

75_4.3					
Temperature	frequency	E1	E2	E	ϕ
[°C]	[hz]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[°]
5	20	10323	760	10351	4.21
5	10	10041	762	10070	4.34
5	5	9756	791	9788	4.64
5	1	9070	816	9107	5.14
5	0.5	8762	824	8801	5.37
5	0.1	8037	867	8084	6.16
15	20	8945	854	8986	5.45
15	10	8600	872	8644	5.79
15	5	8261	863	8306	5.97
15	1	7455	885	7507	6.77
15	0.5	7120	877	7174	7.02
15	0.1	6333	879	6394	7.90
25	20	7738	888	7789	6.54
25	10	7377	890	7431	6.88
25	5	7017	892	7073	7.25
25	1	6192	864	6252	7.94
25	0.5	5853	832	5912	8.09
25	0.1	5121	812	5185	9.01
35	20	6547	890	6607	7.74
35	10	6179	872	6240	8.03
35	5	5810	844	5871	8.27
35	1	5038	792	5100	8.93
35	0.5	4722	759	4783	9.13
35	0.1	4061	679	4117	9.49
45	20	5492	821	5553	8.50
45	10	5133	793	5194	8.78
45	5	4802	764	4862	9.04
45	1	4120	676	4175	9.32
45	0.5	3854	635	3906	9.35
45	0.1	3322	530	3364	9.07
55	20	4527	747	4588	9.37
55	10	4222	702	4280	9.44
55	5	3929	654	3983	9.46
55	1	3370	545	3414	9.19
55	0.5	3168	493	3206	8.84
55	0.1	2789	395	2817	8.06

38_3.2_R1					
Temperature	frequency	E1	E2	E	ϕ
[°C]	[hz]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[°]
5	20	8234	565	8253	3.93
5	10	8043	575	8064	4.09
5	5	7856	584	7878	4.25
5	1	7368	614	7394	4.76
5	0.5	7182	628	7209	5.00
5	0.1	6687	673	6721	5.75
15	20	7218	645	7247	5.11
15	10	6989	622	7017	5.09
15	5	6753	651	6784	5.50
15	1	6190	692	6229	6.37
15	0.5	5955	699	5996	6.70
15	0.1	5373	697	5418	7.39
25	20	6045	712	6087	6.72
25	10	5778	704	5821	6.95
25	5	5518	702	5563	7.25
25	1	4928	690	4976	7.97
25	0.5	4670	693	4721	8.44
25	0.1	4089	639	4139	8.88
35	20	5027	733	5080	8.30
35	10	4744	724	4799	8.68
35	5	4468	703	4523	8.94
35	1	3886	665	3942	9.70
35	0.5	3637	630	3691	9.83
35	0.1	3103	588	3158	10.73
45	20	4302	724	4363	9.56
45	10	4021	688	4079	9.71
45	5	3761	657	3818	9.91
45	1	3225	604	3281	10.60
45	0.5	3020	552	3070	10.36
45	0.1	2593	479	2637	10.47
55	20	3575	688	3641	10.90
55	10	3311	643	3373	10.99
55	5	3067	603	3126	11.12
55	1	2611	513	2661	11.11
55	0.5	2455	472	2500	10.88
55	0.1	2107	357	2137	9.63

38_3.2_R2					
Temperature	frequency	E1	E2	E	ϕ
[°C]	[hz]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[°]
5	20	8449	558	8467	3.78
5	10	8246	566	8265	3.93
5	5	8001	583	8022	4.16
5	1	7484	640	7511	4.88
5	0.5	7285	642	7313	5.04
5	0.1	6740	680	6774	5.76
15	20	7332	618	7358	4.82
15	10	7067	628	7095	5.08
15	5	6789	646	6820	5.43
15	1	6226	668	6262	6.12
15	0.5	5965	689	6005	6.59
15	0.1	5397	658	5437	6.95
25	20	6253	712	6293	6.50
25	10	5958	699	5999	6.69
25	5	5669	699	5712	7.02
25	1	5056	703	5105	7.91
25	0.5	4798	688	4847	8.16
25	0.1	4217	677	4271	9.12
35	20	5345	729	5394	7.77
35	10	5056	716	5106	8.06
35	5	4755	705	4807	8.43
35	1	4146	667	4199	9.13
35	0.5	3890	644	3943	9.40
35	0.1	3341	576	3390	9.78
45	20	4335	705	4392	9.24
45	10	4060	671	4115	9.39
45	5	3772	643	3826	9.67
45	1	3235	572	3285	10.02
45	0.5	3025	531	3071	9.96
45	0.1	2612	435	2648	9.45
55	20	3737	679	3798	10.30
55	10	3457	634	3515	10.39
55	5	3208	603	3264	10.65
55	1	2715	497	2760	10.37
55	0.5	2542	454	2582	10.14
55	0.1	2171	383	2205	10.01

38_4.1_R1					
Temperature	frequency	E1	E2	E	ϕ
[°C]	[hz]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[°]
5	20	10254	605	10272	3.38
5	10	10020	614	10039	3.51
5	5	9769	624	9789	3.65
5	1	9187	675	9212	4.20
5	0.5	8925	674	8950	4.32
5	0.1	8304	703	8334	4.84
15	20	9032	720	9061	4.56
15	10	8756	718	8785	4.69
15	5	8462	738	8494	4.98
15	1	7783	768	7821	5.63
15	0.5	7473	757	7511	5.79
15	0.1	6770	781	6815	6.58
25	20	7692	791	7733	5.87
25	10	7379	788	7421	6.10
25	5	7049	789	7093	6.38
25	1	6354	784	6402	7.03
25	0.5	6039	766	6087	7.23
25	0.1	5323	729	5373	7.80
35	20	6537	831	6590	7.25
35	10	6192	812	6245	7.47
35	5	5854	803	5909	7.81
35	1	5133	774	5191	8.57
35	0.5	4838	731	4893	8.60
35	0.1	4186	688	4242	9.33
45	20	5484	800	5542	8.30
45	10	5152	779	5211	8.60
45	5	4824	763	4884	8.98
45	1	4154	697	4212	9.52
45	0.5	3891	656	3946	9.57
45	0.1	3311	532	3353	9.13
55	20	4523	775	4589	9.73
55	10	4186	729	4249	9.88
55	5	3876	698	3938	10.20
55	1	3311	590	3363	10.10
55	0.5	3099	533	3144	9.76
55	0.1	2702	413	2733	8.70

38_4.1_R3					
Temperature	frequency	E1	E2	E	ϕ
[°C]	[hz]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[°]
5	20	9251	658	9274	4.07
5	10	8991	630	9013	4.01
5	5	8757	639	8780	4.17
5	1	8275	694	8304	4.79
5	0.5	8057	689	8086	4.89
5	0.1	7502	714	7536	5.44
15	20	7808	685	7838	5.02
15	10	7510	678	7541	5.16
15	5	7229	678	7261	5.35
15	1	6673	716	6711	6.12
15	0.5	6432	744	6475	6.60
15	0.1	5831	761	5880	7.44
25	20	6705	766	6749	6.52
25	10	6397	740	6440	6.60
25	5	6091	742	6136	6.94
25	1	5473	732	5522	7.61
25	0.5	5217	733	5268	8.00
25	0.1	4606	706	4660	8.72
35	20	5755	775	5807	7.67
35	10	5430	758	5483	7.95
35	5	5110	739	5163	8.23
35	1	4476	708	4532	8.98
35	0.5	4233	691	4289	9.27
35	0.1	3645	616	3697	9.59
45	20	4911	764	4970	8.85
45	10	4603	745	4663	9.20
45	5	4316	731	4377	9.61
45	1	3718	654	3775	9.97
45	0.5	3477	619	3532	10.10
45	0.1	3018	548	3067	10.29
55	20	4206	760	4274	10.24
55	10	3915	706	3978	10.22
55	5	3645	674	3707	10.47
55	1	3104	559	3154	10.21
55	0.5	2910	499	2952	9.73
55	0.1	2530	402	2562	9.03