

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale



Utilizzo Del Reometro Rotazionale Per La Valutazione Della Temperatura Minima Del “Performance Grade” Di Bitumi Ad Uso Stradale

Relatori:

Prof. SANTAGATA Ezio

Prof. DALMAZZO Davide

Prof. TSANTILIS Lucia

Candidato:

ANGIOLINI Marco

Indice

INTRODUZIONE.....	1
1 LEGANTI BITUMINOSI.....	5
1.1 INTRODUZIONE AI LEGANTI BITUMINOSI	7
1.2 PROCESSO DI PRODUZIONE	8
1.2.1 TRATTAMENTO TERMICO DEI RESIDUI.....	9
1.3 COMPOSIZIONE CHIMICA	10
1.4 BITUMI MODIFICATI CON POLIMERI	12
2 REOLOGIA DEL BITUME	15
2.1 INTRODUZIONE ALLA REOLOGIA.....	17
2.2 TEORIA DELLA VISCOELASTICITÀ.....	17
2.2.1 SOLIDO ELASTICO	18
2.2.2 FLUIDO VISCOSO.....	20
2.2.3 NUMERO DI DEBORAH.....	22
2.3 MODELLI VISCOELASTICI.....	24
2.3.1 MODELLO DI HOOKE	25
2.3.2 MODELLO DI NEWTON	27
2.3.3 MODELLO DI VISCOELASTICITÀ LINEARE DI MAXWELL	30
2.3.4 MODELLO VISCOELASTICO LINEARE DI KELVIN-VOIGT	34
2.3.5 MODELLO DI BURGER	40
2.4 PROVE IN REGIME CONTINUO.....	42
2.5 PROVE IN REGIME OSCILLATORIO	45
2.5.1 PIANO DI BLACK	49
2.5.2 PIANO DI COLE-COLE.....	49
2.6 PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE TEMPO-TEMPERATURA	51
2.7 CURVE MAESTRE.....	54
2.8 MODELLO DI CHRISTENSEN-ANDERSON.....	55
2.9 CLASSIFICAZIONE EMPIRICA DEI BITUMI.....	57

2.9.1	PROVA DI DUTTILITÀ.....	57
2.9.2	PROVA FRAAS.....	58
2.9.3	PROVA DI RAMMOLLIMENTO.....	58
2.9.4	PROVA DI PENETRAZIONE.....	59
2.10	SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE PRESTAZIONALE.....	61
2.10.1	PARAMETRI DI CONTROLLO	69
2.10.1.1	ORMAIAMENTO	70
2.10.1.2	FATICA	71
2.10.1.3	ROTTURA DI ORIGINE TERMICA	74
3	INVECCHIAMENTO DEL BITUME	79
3.1	INTRODUZIONE ALL'INVECCHIAMENTO DEL BITUME	81
3.2	INVECCHIAMENTO A BREVE TERMINE	82
3.3	INVECCHIAMENTO A LUNGO TERMINE.....	83
3.4	EFFETTI SULLA CHIMICA DEL BITUME	84
3.5	EFFETTI SULLA REOLOGIA DEL BITUME	85
4	PROVE SPERIMENTALI.....	89
4.1	INTRODUZIONI ALLE PROVE SPERIMENTALI.....	91
4.2	MATERIALI IMPIEGATI.....	91
4.3	ATTREZZATURE ADOPERATE	93
4.3.1	ROLLING THIN FILM OVEN TEST.....	94
4.3.2	PRESSURE AGING VESSEL	100
4.3.3	DEGASSING.....	104
4.3.4	BENDING BEAM RHEOMETER.....	106
4.3.5	DYNAMIC SHEAR RHEOMETER.....	112
5	ANALISI RISULTATI.....	121
5.1	INTRODUZIONE ALL'ANALISI SPERIMENTALE.....	123
5.2	STATO DELL'ARTE	123
5.3	RISULTATI RTFOT	124
5.4	RISULTATI BBR.....	126
5.5	RISULTATI DSR.....	130

5.5.1 DETERMINAZIONE DELLA TEMPERATURA CRITICA CON IL DSR.....	138
5.5.1.1 PROVA A DIVERSO CONDIZIONAMENTO.....	153
5.5.2 PARAMETRI REOLOGICI PER LA TEMPERATURA CRITICA AL BBR.....	155
5.6 TEMPERATURA DI TRANSIZIONE VETROSA.....	161
6 CONCLUSIONI.....	165
BIBLIOGRAFIA.....	171
ALLEGATI.....	175
ALLEGATO A.....	177
ALLEGATO B.....	179
ALLEGATO C.....	181

INTRODUZIONE

Questa tesi di laurea è stata sviluppata, a valle di un lungo percorso di analisi di laboratorio, con lo scopo di determinare, anche sulla base di studi recenti, la stretta relazione che lega due macchinari fondamentali nella determinazione delle caratteristiche reologiche del bitume, apparentemente così distanti tra loro, quali il Bending Beam Rheometer (BBR) e il Dynamic Shear Rheometer (DSR). Lo studio presentato in questo elaborato si prefigge, pertanto, l'obiettivo di individuare il grado di errore che si commetterebbe se nella determinazione della temperatura minima prescritta dal Performance Grade si utilizzasse il DSR piuttosto che il BBR come previsto da normativa.

I motivi che hanno spinto ad approfondire tale argomento sono molteplici:

- analisi dei costi che si dovrebbero affrontare qualora si decidesse di acquistare entrambi i macchinari piuttosto che uno solo;
- studio dei procedimenti che caratterizzano i due macchinari, evidenziando la rapidità nell'esecuzione delle prove che caratterizza il DSR rispetto all'elaborata preparazione dei campioni tipica, invece, del BBR;
- promozione dell'acquisto del DSR quale strumento tecnologicamente più avanzato e che permette molteplici funzioni, anziché del BBR, la cui funzione è solo quella di poter determinare la rigidità flessionale del campione.

Il risultato dell'elaborazione delle prove sperimentali ha fatto emergere che l'errore che correla le due attrezzature nella determinazione della temperatura minima, espresso in percentuale, in certe circostanze, garantisce la possibilità di adoperare il Dynamic Shear Rheometer anche lì dove l'uso del Bending Beam Rheometer risulta essere, storicamente, più appropriato. Ciò è stato possibile anche grazie all'evoluzione tecnologica verificatasi nell'ultimo decennio, che ha fortemente migliorato le prestazioni del DSR. La possibilità per il Dynamic Shear Rheometer, ad esempio, di poter raggiungere temperature sempre più estreme (nel caso specifico temperature anche al di sotto dei -30 °C) lo ha collocato allo stesso livello del Bending Beam Rheometer per quanto riguarda, appunto, la sperimentazione a basse temperature. Al contrario, il BBR, nel corso degli ultimi anni, non ha beneficiato di modifiche e migliorie tecnologiche.

Nella trattazione viene spiegato come sia possibile confrontare i risultati ottenuti mediante una prova al BBR con i risultati derivanti dal DSR, evidenziando la correlazione che lega i parametri tipici di una

prova flessionale ad una di tipo torsionale, passando da un risultato ottenuto mediante carico assiale (tipico del BBR) ad un altro mediante carico di taglio (come quello del DSR).

Le prove sperimentali, che hanno portato ai risultati di questo elaborato, sono state effettuate nel laboratorio di materiali stradali del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino. Gli strumenti principali utilizzati sono stati il Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), il Pressure Aging Vessel (PAV), il Bending Beam Rheometer (BBR) e il Dynamic Shear Rheometer (DSR).

Le prove si sono concentrate, inizialmente, sull'invecchiamento del bitume mediante Rolling Thin Film Oven Test, per simulare l'invecchiamento a breve termine (quello che si registra alla fine della realizzazione della pavimentazione stradale), quindi sull'invecchiamento mediante Pressure Aging Vessel per simulare, invece, l'invecchiamento a lungo termine (dopo 5-10 anni di esercizio). Si è reso, quindi, necessario procedere al degassing per eliminare l'aria in eccesso per poi testare i vari bitumi con prove al Bending Beam Rheometer e al Dynamic Shear Rheometer.

Per garantire un più ampio spettro di risultati da poter poi confrontare, si è scelto di analizzare otto tipologie di bitumi, ognuno caratterizzato da differenti proprietà.

***1. LEGANTI
BITUMINOSI***



1.1 INTRODUZIONE AI LEGANTI BITUMINOSI

Con il termine *bitume* o *legante bituminoso* si intende una miscela di idrocarburi naturali o artificiali derivanti dalla raffinazione del greggio. Il bitume, oggi, viene utilizzato prevalentemente per pavimentazioni stradali e per impermeabilizzazione di superfici, grazie alla caratteristica di non essere volatile a temperatura ambiente e di essere solubile in alcuni solventi, ma non in acqua. Questo si presenta come composto organico eterogeneo facilmente infiammabile.

Il bitume non è da confondere con il *catrame* che, pur essendo un materiale con aspetto molto simile al primo, è del tutto differente da questo per origine e composizione. Al contrario del bitume, il catrame è ottenuto industrialmente dalla distillazione distruttiva del carbon-fossile. I due materiali presentano un'analogia dal punto di vista chimico: entrambi, infatti, contengono sostanze organiche, tra cui idrocarburi insaturi e composti aromatici, eventualmente con tracce di zolfo, ossigeno e azoto, ma, se il catrame presenta principalmente idrocarburi aromatici, il bitume presenta idrocarburi paraffinici. A temperatura ambiente, il catrame è allo stato liquido, più o meno viscoso, con un colore che può andare dal nero al marrone scuro. Come per il bitume, la composizione chimica è fortemente variabile a seconda della materia prima impiegata e del processo industriale cui è sottoposto.

In questa dissertazione, il catrame non verrà trattato e verrà preso come unico materiale di studio il bitume, con riferimento alla sua composizione chimica, al comportamento fisico, alla possibilità di utilizzo ed esponendo, infine, le prove per la sua caratterizzazione.

Volendo partire da un cenno storico, i primi utilizzi di cui si ha testimonianza risalgono all'antica civiltà sumera (circa 6000 a.C.) e, in seguito, a quella egiziana (3000-2000 a.C.). Le fonti riportano che veniva adoperato per l'impermeabilizzazione di opere navali ed idrauliche. Più recentemente, la prima pavimentazione stradale realizzata con l'utilizzo del bitume risale al 1876 negli Stati Uniti d'America, per il tratto di strada della Pennsylvania Avenue nella capitale dello Stato del Maryland, Washington D.C., in cui si è fatto ricorso ad una miscela contenente sabbia e bitume di origine naturale, estratto dal lago Trinidad.

È possibile fare una prima distinzione tra *bitumi naturali* e *bitumi artificiali*. I primi, a differenza di quelli artificiali, è possibile trovarli in natura, sia in affioramenti superficiali sia in rocce prevalentemente sedimentarie, che ne sono impregnate.



Figura 1.1 Trinidad, Pitch-lakes

La definizione che il Consiglio Nazionale delle Ricerche italiano dà al bitume è la seguente: “prodotto completamente solubile in solfuro di carbonio, costituito da idrocarburi o da miscele di idrocarburi di origine naturale o derivati da petroli o da rocce (esclusi i combustibili fossili) anche se accompagnati dai loro derivati non metallici, con spiccate proprietà leganti” (CNR, 1969).

1.2 PROCESSO DI PRODUZIONE

I bitumi artificiali, invece, sono il risultato di un processo chimico derivante dal petrolio grezzo e, in Italia, rappresentano la quasi totalità del bitume adoperato. La qualità del bitume dipende sia dal petrolio greggio utilizzato nel processo sia dalla lavorazione che subisce in raffineria. Le tecniche di lavorazione e produzione di bitume sono principalmente quattro:

- Distillazione frazionata;
- Trattamento termico;
- Produzione per sintesi o ricostruzione;
- Ossidazione.

Ad oggi, circa l'80-90 % del bitume prodotto viene impiegato per applicazioni nel campo delle infrastrutture viarie, di questo, quasi la totalità per andare a formare, insieme a aggregati lapidei, il conglomerato bituminoso e la restante parte per emulsioni bituminose da applicare sempre in campo stradale. Il restante 10-20 %, invece, viene adoperato per processi industriali di varia natura, principalmente per l'impermeabilizzazione.

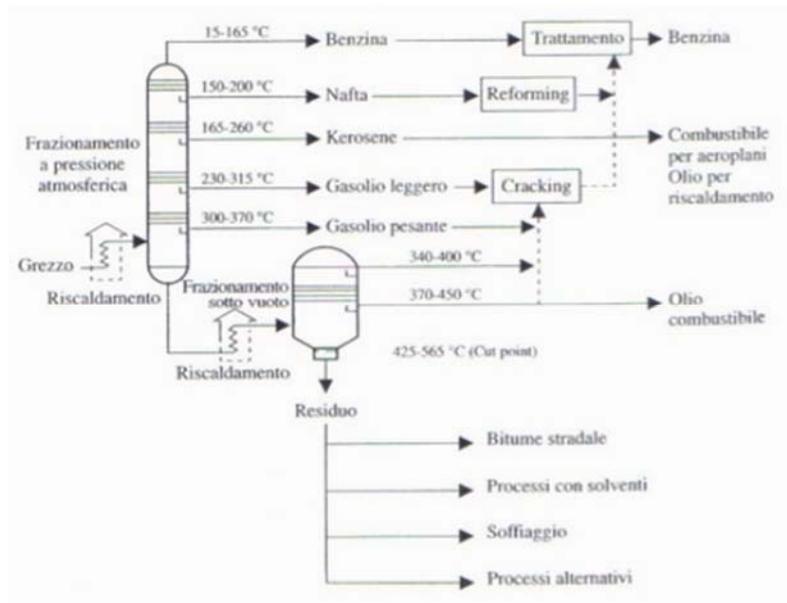


Figura 1.2 Frazionamento del petrolio

1.2.1 TRATTAMENTO TERMICO DEI RESIDUI

Tra tutti le tecnologie di produzione di bitume, quello maggiormente utilizzato nei paesi europei è il trattamento termico dei residui. Si ricorre al *trattamento termico* dei residui ogni volta che si ha come obiettivo principale quello di ottimizzare la produzione dei derivati leggeri come gasolio e benzina. A differenza degli altri processi, nel trattamento termico dei residui, come suggerito dalla definizione stessa, le temperature sono più elevate, con minor quantitativo di “scarto” prodotto. Differenti condizioni di produzione portano, di conseguenza, a differenti qualità di bitume. Il bitume così ottenuto presenta una maggiore suscettibilità alla temperatura e una transizione del comportamento reologico da viscoelastica a fragile.

Il trattamento termico dei residui prende forma da uno dei seguenti processi:

- Reforming;
- Cracking;
- Visbreaking;
- Coking.

Il processo largamente più diffuso nelle raffinerie Italiane, e anche quello meno severo tra i quattro su elencati, è il trattamento di “visbreaking”. Esso mira a produrre, dallo scarto su citato, una quantità di gas derivante dal petrolio, benzina e gasolio a scapito del bitume (materiale meno nobile) con conseguente abbattimento della viscosità di quest’ultimo. Durante il processo il bitume si trova ad una

temperatura compresa tra i 400 °C e i 450 °C. Tale processo, a differenza degli altri, sebbene privi il bitume di alcune componenti, garantisce, tuttavia, delle caratteristiche fisiche che ne permettono l'impiego nelle pavimentazioni stradali (Petretto, 2012).

Di seguito si riporta lo schema della produzione di bitume per visbreaking.

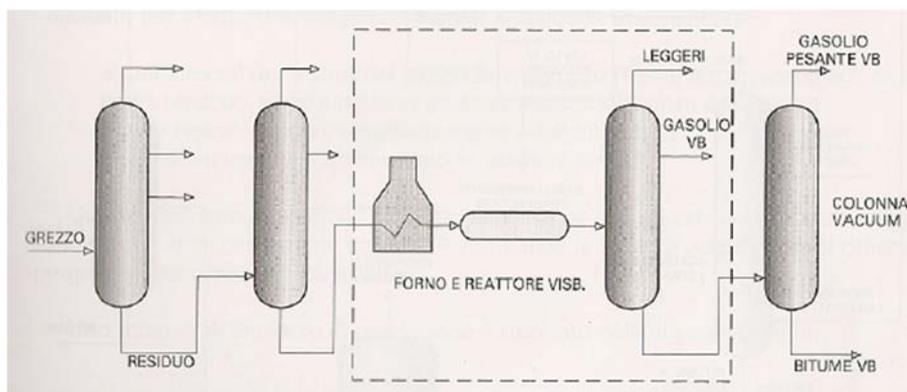


Figura 1.3 Produzione per visbreaking

1.3 COMPOSIZIONE CHIMICA

I bitumi tradizionali sono la miscela di quattro componenti che ne determinano le proprietà chimiche e fisiche. Questi sono: oli saturi, oli aromatici, resine e asfalteni (il cui acronimo è SARA) che danno vita a legami covalenti molto forti. Il bitume, come tutti gli idrocarburi e i derivati del petrolio, è composto principalmente da molecole di carbonio (nella percentuale dell'80% circa) e di idrogeno (variabile tra il 10% e il 14%). La restante percentuale è da dividere principalmente tra atomi di azoto, zolfo e ossigeno, indicati con il nome di eteroatomi, che influenzano il comportamento del bitume modificandone le cariche elettro-chimiche, in particolare lo zolfo che reagisce con l'ossigeno molto più facilmente di quanto facciano carbonio e idrogeno. Questo fenomeno dà luogo a processi di ossidazione che sono alla base del fenomeno di invecchiamento del bitume. In minor quantità è possibile trovare tracce di nichel, ferro e vanadio.

Tabella 1.1 Composizione chimica del bitume

Elemento chimico	% in peso
Carbonio (C)	80-85
Idrogeno (H)	10-14
Zolfo (S)	1-8
Ossigeno (O)	0-2
Azoto (N)	0,05-1,5

In base alla percentuale dei componenti chimici ed alla forma che assumono le molecole nel legarsi tra loro, si possono distinguere diversi tipi di idrocarburi legati ad altrettante catene idrocarburiche. Si riportano di seguito le catene idrocarburiche più note:

- *paraffine* (alcani): il legame chimico è di tipo semplice e rappresentano degli idrocarburi saturi, non potendo inglobare al proprio interno degli altri atomi di idrogeno. La catena ha una forma aperta (detta aciclica) lineare o ramificata con formula chimica C_nH_{2n+2} alla cui base vi sono il metano (CH_4), l'etano (C_2H_6), il propano (C_3H_8) e il butano (C_4H_{10});
- *aromatici*: generalmente con piccole quantità nel bitume, presenta un legame idrocarburico insaturo a catena chiusa. La formula chimica è del tipo C_nH_{2n-6} ;
- *nafteni* (cicloalcani): formula chimica C_nH_{2n} , idrocarburi saturi che presentano una struttura chimica a catena chiusa (ciclici);
- *resine ed asfaltini*: catene idrocarburiche che contengono atomi diversi dal carbonio e idrogeno come, ad esempio, Ossigeno (O), azoto (N) e zolfo (S), identificati anche come composti NSO per via della presenza di uno o più eteroatomi.

La natura viscoelastica termoplastica del bitume dipende dalla debolezza dei legami che uniscono tra di loro le molecole. Infatti, questi legami possono facilmente essere spezzati applicando azioni tangenziali o scaldando il materiale. Nel caso in cui i legami dovessero rompersi a seguito di riscaldamento, il processo risulta essere reversibile, cioè, raffreddando il bitume, vengono a formarsi nuovamente questi legami, sebbene presentino una struttura differente dalla precedente (Martelli, 2010).

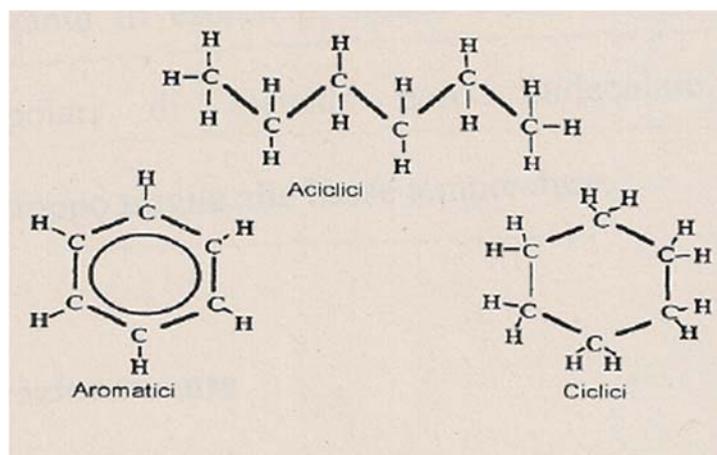


Figura 1.4 schema chimico di un idrocarburo

1.4 BITUMI MODIFICATI CON POLIMERI

Negli ultimi decenni, il *bitume tradizionale* sta lasciando sempre più strada a *bitumi modificati con polimeri*, identificati dalla comunità scientifica con il nome *Polymer Modified Bitumens* (PmB) o *Polymer Modified Asphalts* (PmA), che ne alterano la struttura chimica, le proprietà fisiche e reologiche. Il passaggio dai primi ai secondi è dettato dal fatto che sono richieste miscele sempre più performanti e durature nel tempo per venire incontro alle esigenze crescenti del traffico. Un primo tentativo risale alla metà del secolo scorso, in cui si è cercato di mischiare il bitume con della gomma naturale (lattice) senza però portare a significativi apprezzamenti nel campo delle applicazioni infrastrutturali.

Altro vantaggio che caratterizza i bitumi modificati è quello di permettere la realizzazione di pavimentazioni drenanti, ossia strade aventi un grado di porosità molto elevato con un indice dei vuoti pari fino al 18% contro un massimo 5% consentito dai bitumi tradizionali. Oltre a garantire un ottimo deflusso delle acque piovane, le pavimentazioni drenanti con l'impiego dei bitumi modificati permettono anche una notevole riduzione del rumore proveniente dalla percorrenza dei veicoli.

I polimeri utilizzati nella miscela con il bitume sono materiali organici di sintesi, costituiti da molecole aventi un elevatissimo numero di atomi legati tra loro con legami covalenti. In un bitume modificato, il quantitativo di polimeri varia normalmente da un minimo del 3% ad un massimo di 6% sul peso totale.

Nelle fasi di miscelazione del bitume con il polimero, i composti maltenici vengono assorbiti dalla fase polimerica che, rigonfiando, aumenta di volume. Il processo continua fintanto che gli asfalteni sono tutti intrappolati nella matrice polimerica, che coincide con l'inversione di fase, arrivando ad avere il bitume come fase dispersa e la fase polimerica come continua. Tuttavia, pur essendo la percentuale in peso di polimero alquanto modesta, la nuova fase formatasi (fase polimerica) diventa quella che predomina volumetricamente nel prodotto finale e quella che maggiormente conferisce alla miscela le proprietà chimiche e fisiche.

Gli elastomeri e i plastomeri (i polimeri impiegati per la modifica del bitume) formano con la matrice bituminosa una struttura reticolata sulla quale si rispecchiano le caratteristiche reologiche e prestazionali. Più nello specifico, gli elastomeri conferiscono maggiori caratteristiche elastiche, permettendo così al bitume di recuperare elasticamente la deformazione dello stesso. Al contrario, i plastomeri conferiscono rigidità. Ciò porta il bitume ad avere una resistenza maggiore e quindi, conseguenzialmente, una maggiore durabilità della pavimentazione.

I polimeri che maggiormente vengono impiegati per la modifica del bitume sono di tipo elastomeri, di tipo plastomeri o, ancora, è possibile modificare il bitume con cere sintetiche per ridurre la viscosità.

2. REOLOGIA ***DEL BITUME***



2.1 INTRODUZIONE ALLA REOLOGIA

Il termine *reologia* venne impiegato per la prima volta da J.R. Crawford nel 1928 e deve la sua origine dai termini greci “rei” e “logia” che significano rispettivamente flusso e studio. La reologia, dunque, per definizione, sta ad indicare quella branca della fisica che si occupa di studiare il flusso; in altre parole, la reologia studia il comportamento tenso-deformativo, in funzione dei parametri tempo e temperatura, di quei materiali che non obbediscono alle leggi classiche introdotte da Hooke e Newton rispettivamente sull’elasticità e la viscosità due secoli prima. La reologia poggia le sue basi sulla teoria della viscoelasticità

Recentemente, in seguito al sempre maggior impiego di materiali di origine artificiale o dal comportamento più complesso, la reologia ha visto un notevole sviluppo e diffusione a livello mondiale, in ambiti anche molto differenti tra loro come potrebbero essere, ad esempio, l’industria petrolchimica e quella alimentare.

Presentando il bitume un comportamento di tipo viscoelastico lineare, si farà ricorso alla reologia per analizzarne il comportamento che dipende principalmente da tre fattori e questi quali:

- Temperatura
- Tempo di carico
- Invecchiamento

Nel caso in cui ci si trovasse nelle condizioni di basse temperature con tempi di carico bassi (quindi alte frequenze per sollecitazioni critiche), il bitume avrebbe un comportamento che si avvicina ad un solido elastico. Contrariamente, nel caso in cui le temperature fossero alte e i tempi di carico alti (basse frequenze), il comportamento tenderebbe ad essere simile a quello di un fluido newtoniano.

2.2 TEORIA DELLA VISCOELASTICITÀ

“La *viscoelasticità* è quella proprietà di alcuni materiali (in particolare, materie plastiche) suscettibili di subire deformazioni di tipo elastico, associate a deformazioni di tipo viscoso” (Enciclopedia Treccani).

Il concetto di viscoelasticità venne introdotto da James Clerk Maxwell nel 1878 in seguito a osservazioni su fenomeni di scorrimento viscoso (anche detto “creep”) per studiare il comportamento di quei

materiali che non rispettano né il modello di solido elastico descritto da Hooke né quello di fluido viscoso descritto da Newton.

È molto importante non confondere un comportamento di tipo elastoplastico con quello di tipo viscoelastico. Se il primo, infatti, al superamento del limite elastico presenta la nascita di una deformazione permanente, il comportamento di tipo viscoelastico, invece, comporta un recupero graduale e parziale nel tempo della deformazione, che si è imposta dopo aver applicato un determinato carico e averlo rimosso a deformazione avvenuta.

Di seguito si vuole riportare un elenco dei principali fenomeni fisici che differenziano un materiale viscoelastico dai restanti altri:

- il materiale sottoposto ad uno sforzo costante aumenta con il tempo la sua deformazione (fenomeno di creep);
- il materiale sottoposto ad una deformazione costante diminuisce gradualmente lo sforzo interno agente sullo stesso col passare del tempo (fenomeno di rilassamento);
- il materiale sottoposto a carichi ciclici presenta curve di carico non sovrapponibili a quelle di scarico, con una dissipazione di energia meccanica (fenomeno dell'isteresi);
- il materiale che subisce un urto ha una risposta anelastica;
- il materiale varia la propria rigidità (rapporto tra sforzo e deformazione) al variare della velocità di applicazione del carico;
- il materiale attraversato da onde fa sì che queste si attenuino nel tempo (smorzamento).

Per poter far ricorso a leggi fisiche e modelli matematici che descrivano il comportamento di materiali viscoelastici, è doveroso assumere l'ipotesi che il materiale reale sia identificabile, in realtà, come un corpo omogeneo, continuo ed isotropo. Come dettagliatamente descritto in precedenza, al livello molecolare il bitume presenta particelle molto differenti tra loro, tuttavia, considerando una scala di osservazione più piccola, il materiale si può considerare omogeneo (Olli, Ville Laukkanen, 2015)

2.2.1 SOLIDO ELASTICO

In fisica, per *elasticità* si intende quella proprietà intrinseca di un corpo di subire deformazioni, sotto l'azione di una sollecitazione esterna, e di ritornare alle configurazioni di forma e volume iniziali. L'elasticità può essere distinta tra due diverse forme e queste sono:

- elasticità di forma;
- elasticità di volume.

Nel caso di un solido, le deformazioni che lo interessano sono sia di tipo volumetrico sia di forma e, quindi, questo reagisce elasticamente ad entrambe le deformazioni. Al contrario, i fluidi presentano una sola deformazione di volume (sola elasticità di volume), in quanto reagiscono elasticamente ad una sollecitazione esterna, ma non si oppongono al cambiamento di forma. In questa trattazione, si farà riferimento ai soli solidi elastici.

Al livello atomico, le deformazioni elastiche provocano una distorsione ordinata e reversibile degli atomi che compongono il solido.

Considerando un solido elastico omogeneo ed isotropo sottoposto ad uno sforzo di pura trazione, è possibile definire la tensione normale agente su di esso come:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2.1)$$

Dove:

$N =$ forza normale applicata [N];

$A =$ superficie di applicazione del carico [mm^2].

E la deformazione lineare come:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

Dove:

$\Delta L =$ variazione di lunghezza;

$L =$ lunghezza iniziale.

È ora possibile esprimere il modulo di Young, parametro che caratterizza un solido elastico, come rapporto tra tensione e deformazione:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Nel caso in cui il rapporto tra sforzo e deformazione sia di proporzionalità diretta, allora si parla di elasticità lineare e l'equazione su riportata descrive la legge di Hooke (1676) riassunta con l'aforisma "ut tensio sic vis".

C'è, altresì, da specificare che nei solidi elastici, così come nei liquidi, tutto il lavoro impiegato per imprimere la deformazione viene poi recuperato nel momento in cui il provino torna alle sue dimensioni originarie.

2.2.2 FLUIDO VISCOSO

Si definisce *fluido viscoso* un materiale che durante un processo deformativo trasforma in maniera irreversibile, tutta o in parte, l'energia meccanica in energia termica. Si può parlare di fluido puramente viscoso quando l'energia meccanica è interamente trasformata in energia termica (Scott Blair G.W., 1944).

La grandezza fisica che più di tutte caratterizza un fluido viscoso è, appunto, la viscosità. Questo parametro, corrispondente ad un coefficiente di scambio di quantità di moto, misura la resistenza che oppone un fluido a scorrimento ed è la reazione, al livello atomico, dell'attrito che lega le particelle che lo compongono. Più nello specifico, "[...] la viscosità misura la capacità di scorrimento di un fluido sotto l'azione di forze di taglio. Maggiore la viscosità, a parità di forza applicata, minore il gradiente di scorrimento che si sviluppa nel fluido. O viceversa, a parità di gradiente, un fluido di viscosità maggiore richiede una forza di scorrimento maggiore" (Grizzuti, Nino, 2012).

In contrapposizione alla legge di Hooke, la legge che descrive il comportamento dei fluidi e che identifica la viscosità è stata formulata da Newton, da cui, infatti, prende il nome. La legge di Newton è così espressa:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.4)$$

Dove:

η = viscosità dinamica [Pa · s];

τ = sforzo di scorrimento;

$\dot{\gamma}$ = gradiente della velocità di scorrimento.

Nel caso di fluido newtoniano, la viscosità varia solo in funzione della temperatura. Qualora, invece, il valore della viscosità dovesse essere nullo, questo fluido è definito fluido ideale. Trattandosi di un limite fisico invalicabile, non potrà mai esistere un fluido la cui viscosità sia nulla, ma vi sono dei fluidi che si avvicinano molto a tale valore e vengono identificati con il nome di superfluidi (R.G. Larson, 1999).

Si riporta di seguito l'andamento della retta dello sforzo tangenziale in funzione del gradiente della velocità, caratteristica di un fluido newtoniano. Il fluido newtoniano, infatti, per definizione, presenta questo rapporto (coefficiente angolare che indica, appunto, la viscosità dinamica) costante, da qui l'andamento rettilineo della curva.

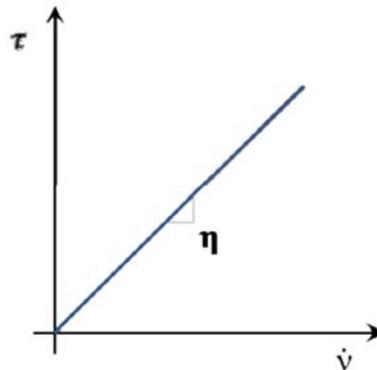


Figura 2.1 Viscosità dinamica per un fluido newtoniano

In aggiunta alla *viscosità dinamica* η vi è la *viscosità cinematica* ν che è definita come rapporto tra la viscosità dinamica e la densità stessa del fluido:

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.5)$$

Dove:

η = viscosità dinamica;

ρ = densità.

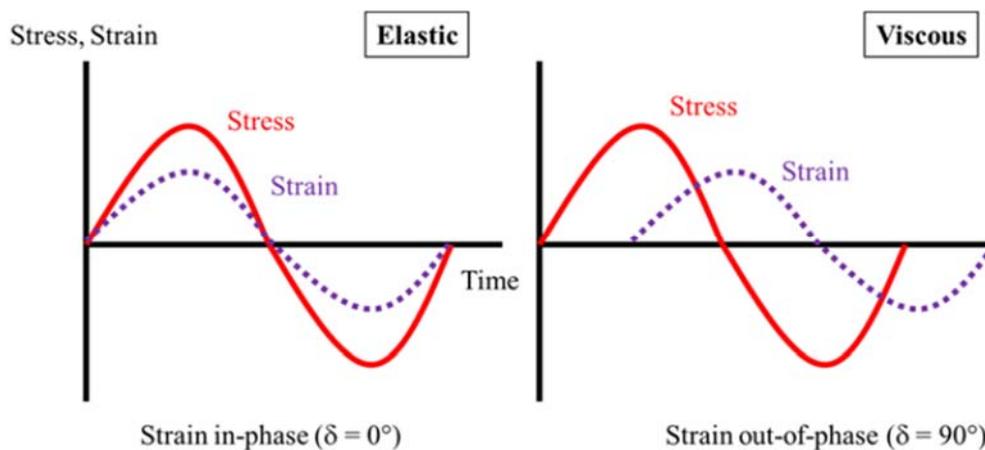


Figura 2.2 Angolo di fase per materiali elastici (Sx) e viscosi (Dx)

2.2.3 NUMERO DI DEBORAH

Le diverse condizioni fisiche che possono influenzare le caratteristiche meccaniche di un qualsiasi materiale non rendono possibile una netta distinzione tra ciò che è liquido e ciò che è solido. A dimostrazione di tale teoria, è sufficiente prendere a titolo di esempio un qualsiasi oggetto di ferro. Analizzando l'oggetto, a temperatura ambiente apparirà evidente come questo sia rigido e difficilmente deformabile (tipico di un materiale molto elastico) ma già se lo si dovesse portare a temperature elevate il ferro inizierebbe a perdere di rigidità arrivando, per temperature vicino a quelle di fusione, ad assumere un comportamento di tipo viscoso tipico dei fluidi.

Il semplice esempio su riportato, quindi, dimostra come temperatura, tipo di carico, entità del carico e altre condizioni fisiche possano facilmente variare la risposta comportamentale di un materiale, rendendo così non idonea, o addirittura superflua, un'univoca definizione di ciò che è liquido e ciò che è solido.

Volendo, però, fissare i parametri fisici come temperatura e carico (cioè definire a priori il valore della temperatura e del carico lasciandoli inalterati nel tempo), è possibile riportare tutto in funzione del solo parametro tempo ed affermare che, per tempi di carico sufficientemente lunghi, tutti i materiali defluiscono e mostrano caratteristiche di tipo viscoso.

Facendo un tuffo nel passato, è curioso come già millenni fa l'uomo si era accorto come nulla intorno a sé rimanesse immobile e che, anzi, tutto scorre. Se pur nato con una connotazione puramente filosofica, il concetto del <<panta rhei>>, espresso quasi 2500 anni fa dal filosofo greco Eraclito (ca. 500 a.C.), può essere traslato nel campo della fisica, riassumendo in maniera egregia quello che è lo studio della reologia moderna.

Un chiaro esempio di tale fenomeno è espresso da Castiglioni e Pipkin. Essi affermano che, se si ragiona per tempi molto lunghi (ere geologiche), anche le rocce possono scorrere e deformarsi in modo viscoso, dando origine a differenti fenomeni geomorfologici quali, ad esempio, pieghe sinclinali ed anticlinali (Castiglioni, 1980, Pipkin, 1986).

In sostituzione della definizione di solido e liquido, a fronte di tutto ciò precedentemente esplicitato, è possibile introdurre un nuovo parametro definito da Markus Reiner nel 1964 che viene identificato come *numero di Deborah*.

Il numero di Deborah è un valore adimensionale, adoperato nel campo della reologia, che indica il rapporto che lega il tempo di rilassamento del materiale con il tempo di osservazione del campione. Tale valore è così espresso:

$$De = \frac{\Lambda}{t} \quad (2.13)$$

Dove:

Λ = tempo di rilassamento del materiale;

t = tempo di osservazione della prova.

Il tempo t risulta essere pari a zero nel caso in cui venisse analizzato un fluido ideale, come quello ipotizzato da Newton, e pari ad infinito, invece, nel caso in cui si osservasse il solido elastico definito da Hooke. Tutti i materiali reali ricadono nell'intervallo compreso tra questi due valori e, quindi, il

numero di Deborah avrà sempre un valore finito e positivo. A seguito di ciò, è possibile definire un materiale in funzione del numero di Deborah, senza però poter definire questo come puramente solido o viscoso.

Per quanto riguarda il bitume, si avrà un comportamento che si avvicina a quello di solido elastico, nel caso in cui sia soggetto a tensioni e/o deformazioni che si sviluppano in tempi molto brevi e, al contrario, un comportamento simile a quello di fluido newtoniano (comportamento viscoso), nel caso di deformazione prolungata nel tempo.

Vengono considerati solidi viscoelastici quei materiali che in una prefissata scala temporale non variano in modo continuo la propria forma quando soggetti ad un determinato livello di tensione. Sono, invece, definiti liquidi viscoelastici quei materiali che variano in modo continuo la propria forma quando soggetti a carico, indipendentemente da quanto ridotta sia l'entità della tensione applicata (Barnes et al., 1989).

2.3 MODELLI VISCOELASTICI

Come riportato nei paragrafi precedenti, la conseguenza che vi sia una proporzionalità diretta tra sforzo e deformazione per solidi elastici e fluidi viscosi ideali porta ad avere i coefficienti di proporzionalità, caratterizzanti un solido di Hooke ed un fluido newtoniano, che non dipendono dalle condizioni di carico. Nel caso in cui questo concetto fosse estendibile nel campo dei materiali viscoelastici (materiali che, a seconda delle condizioni esterne, presentano un comportamento intermedio tra elastico e viscoso), allora si potrebbe parlare di *viscoelasticità lineare*.

Con buona approssimazione, il legante bituminoso può essere assunto come tale. In questa trattazione, pertanto, si farà riferimento al bitume sempre come materiale che segue una legge di tipo viscoelastico lineare.

Sulla base della teoria della sovrapposizione degli effetti, è possibile analizzare il comportamento del bitume schematizzandolo tramite modelli matematici sviluppati nel corso degli anni. Esempi in tal senso sono il modello di Maxwell, il modello di Kelvin-Voigt, il modello di Burger e altri ancora. Successivamente si riporta una breve schematizzazione dei modelli su citati, analizzando per primi il modello che descrive il comportamento di un solido elastico e il modello che descrive, invece, un fluido viscoso.

2.3.1 MODELLO DI HOOKE

Il *modello di Hooke* bene si presta a descrivere il comportamento di quei materiali, ipotizzati omogenei ed isotropi, che seguono un andamento di tipo *elastico lineare*. La caratteristica che contraddistingue un solido elastico lineare è l'energia isteretica nulla, cioè la capacità del materiale a cui è applicato un carico di raggiungere istantaneamente la configurazione deformata per poi ritornare alla configurazione iniziale al cessare di questa azione di carico.

Nella schematizzazione del modello, per la rappresentazione di un elemento il cui comportamento rispetta la teoria ipotizzata da Hooke, si fa ricorso ad una *molla* stilizzata.

I parametri che caratterizzano un solido elastico lineare sono, banalmente, il *modulo di Young* E (anche chiamato modulo di elasticità) e il *coefficiente di Poisson* ν .

La *legge di Hooke* che descrive il comportamento nelle tre direzioni cardinali è la seguente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \\ \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Dove:

ε_i = deformazione assiale lungo l'asse i ;

σ_i = tensione assiale lungo l'asse i ;

γ_{iy} = deformazione tangenziale lungo gli assi iy ;

τ_{iy} = tensione di taglio lungo gli assi iy ;

E = modulo di Young;

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \text{modulo di elasticità tangenziale.}$$

Conseguenza della proprietà di deformazione istantanea sotto un'azione è il valore nullo dell'*angolo di sfasamento* δ (o angolo di fase) tra tensione e deformazione.

Il modello analogico che segue la legge di Hooke è schematizzato nelle immagini sottostanti:

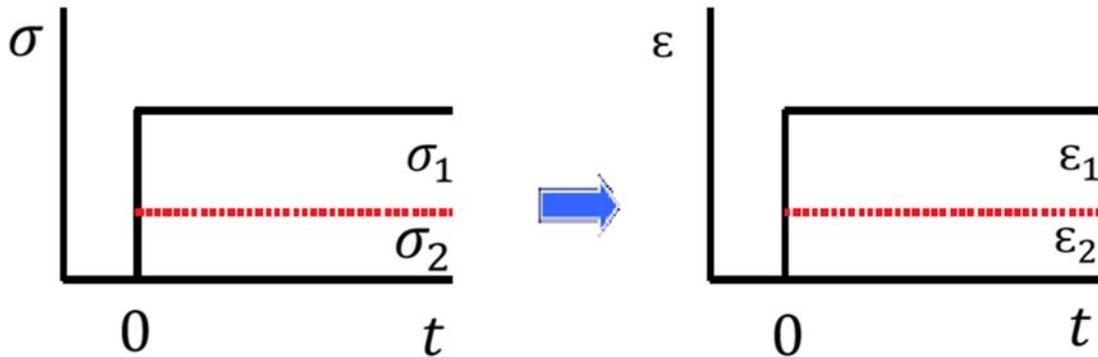


Figura 2.3 Diagramma delle tensioni e delle deformazioni in funzione del tempo

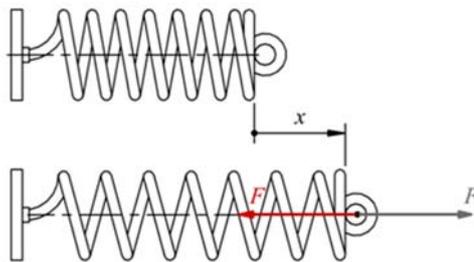


Figura 2.4 Molla ideale su cui agisce una forza F

Ad un istante $t = 0$ viene applicato una forza F alla molla che genera un aumento di *tensione* σ (τ) e, contemporaneamente, imprime una *deformazione* ε (γ) direttamente proporzionata ad essa secondo la relazione:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{2.15}$$

$$\tau = G \cdot \gamma \tag{2.16}$$

2.3.2 MODELLO DI NEWTON

Il *modello di Newton*, definito anche modello *viscoelastico lineare*, descrive quei *fluidi viscosi*, classificati come ideali, per cui ad una sollecitazione corrisponde una deformazione direttamente proporzionata al tempo di carico secondo il coefficiente di viscosità dinamica η . Quando la sollecitazione cessa di essere non si registrerà, al contrario della molla elastica, un ritorno della deformazione fin qui ottenuta. La permanenza della deformazione al termine del ciclo, anche in assenza di carico, implica che l'energia necessaria per la stessa viene completamente dissipata.

Nella schematizzazione del modello viscoelastico lineare, per la rappresentazione di un elemento il cui comportamento rispetta la teoria ipotizzata da Newton, si fa ricorso ad uno *smorzatore* stilizzato.

I parametri che caratterizzano un fluido viscoso lineare sono la *viscosità dinamica* η e la *viscosità elongazionale* λ .

La legge di Newton che descrive il comportamento di uno smorzatore lineare è la seguente:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.17)$$

$$\sigma = \eta_{el} \cdot \dot{\epsilon} \quad (2.18)$$

Dove:

τ = sforzo di taglio;

η = viscosità dinamica [Pa · s];

$\dot{\gamma}$ = gradiente di deformazione trasversale;

σ = sforzo di trazione;

η_{el} = viscosità elongazionale [Pa · s];

$\dot{\epsilon}$ = gradiente di allungamento.

Nel caso di regime oscillatorio, con:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t); \quad (2.19)$$

$$\dot{\gamma} = \omega \cdot \gamma_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t); \quad (2.20)$$

$$\tau = \eta \cdot \omega \cdot \gamma_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t). \quad (2.21)$$

Dove:

$\omega =$ velocità angolare.

Si può così dimostrare che in uno smorzatore, contrariamente a quanto accadeva nel caso della molla di Hooke, vi sia una risposta in quadratura di fase tra la deformazione e la sollecitazione, il che corrisponde a dire un *angolo di fase* $\delta = 90^\circ$ (Macosko, 1994).

È, inoltre, dimostrabile che la viscosità elongazionale η_{el} non è un parametro a sé indipendente, ma una relazione che lo lega strettamente alla viscosità dinamica η è stata espressa da F.T. Trouton nel 1905 che enuncia quanto segue:

$$\eta_{el} = 3 \cdot \eta \quad (2.22)$$

Il rapporto su espresso viene anche identificato come *rapporto di Trouton*. Nel caso in cui si fosse in presenza di un fluido non-newtoniano, questa relazione non è più rispettata in quanto il comportamento viscoso estensionale si discosta sostanzialmente da quello fin qui analizzato, presentando una complessità nella sua determinazione molto maggiore (Grizzuti, Nino, 2012).

Il modello analogico che segue la legge di Newton per quanto concerne un fluido viscoso con comportamento lineare è schematizzato nelle immagini sottostanti:

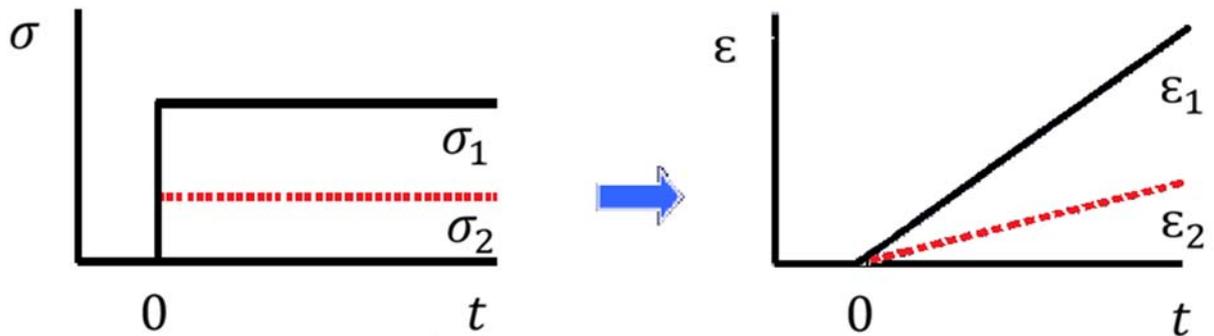


Figura 2.5 Diagramma delle tensioni e delle deformazioni in funzione del tempo

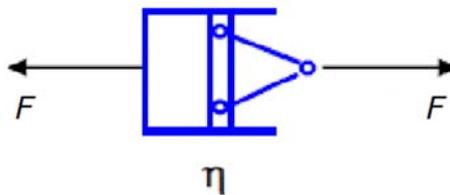


Figura 2.6 Smorzatore idealizzato

Lo sforzo applicato $\sigma(\tau)$ produce una *velocità di deformazione* $d\varepsilon/dt$ ($d\gamma/dt$) linearmente dipendente dallo sforzo stesso per mezzo della viscosità η .

La viscosità η è un parametro strettamente dipendente dalla temperatura con una relazione inversamente proporzionale, cioè, al crescere della temperatura, la viscosità diminuisce e viceversa. Nel caso in cui la temperatura raggiungesse un determinato limite superiore (temperature molto elevate), allora non si avrebbe più la dipendenza della viscosità dalla velocità di deformazione e dalla sollecitazione, avvicinandosi al comportamento di un liquido.

Questa relazione è espressa dall'*equazione di Arrhenius*, che lega tramite un'equazione differenziale omogenea lineare la viscosità (in generale una velocità) alla temperatura

$$\eta = A \cdot e^{-\frac{B}{T}} \quad (2.23)$$

Dove:

A e B = costanti generiche;

$T =$ temperatura di riferimento.

Tale legge descrive il rapporto di inversa proporzionalità precedentemente accennato, che lega la viscosità alla temperatura con un'equazione di tipo esponenziale.

2.3.3 MODELLO DI VISCOELASTICITÀ LINEARE DI MAXWELL

Il *modello di Maxwell* descrive quei materiali che presentano un comportamento intermedio tra il solido elastico e il fluido viscoso lineare classificati come *liquidi viscoelastici* di cui si è parlato nei paragrafi precedenti. Questo modello analogico rappresenta il modo più semplice di delineare il comportamento di suddetti materiali in quanto è costituito esclusivamente da due componenti elementari quali una molla di rigidezza E e uno smorzatore caratterizzato da un liquido con una viscosità η allineati in serie, che si presta in maniera adeguata alla descrizione del comportamento di un liquido viscoelastico.

Di seguito, se ne riporta la schematizzazione grafica dove, come espresso sopra, si può osservare la presenza di una molla e uno smorzatore allineati in serie:

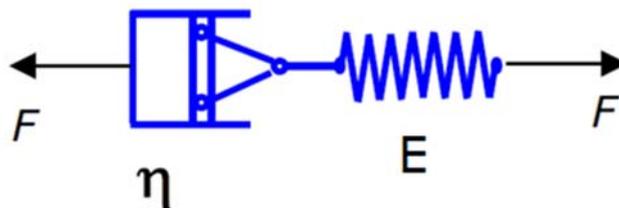


Figura 2.7 Modello di Maxwell schematizzato

La velocità di deformazione è la somma del contributo dato da entrambi gli elementi, si può dunque scrivere:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{tot} = \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{molla} + \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{dissipatore} \quad (2.24)$$

Dove:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{molla} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (\text{legge di Hooke}); \quad (2.25)$$

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{dissipatore} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (\text{legge di Maxwell}). \quad (2.26)$$

È, quindi, possibile descrivere l'equazione differenziale come:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{tot} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.27)$$

Da cui:

$$\varepsilon(t) = \left(\frac{1}{E} + \frac{t}{\eta}\right) \cdot \tau \quad (2.28)$$

O, equivalentemente:

$$\varepsilon_M = \frac{\sigma_S}{E_m} + \frac{1}{\eta_M} \int_0^t \sigma_M dt \quad (2.29)$$

Dove si indica con:

$\varepsilon =$ *deformazione*;

$\sigma =$ *tensione*;

$\eta =$ *viscosità*;

$E =$ *modulo elastico*.

E i pedici M, S e D dei vari valori indicano:

M = modello di Maxwell;

S = molla;

D = dissipatore.

Dal momento che la viscosità è un parametro appartenente al solo smorzatore e il modulo elastico alla sola molla, è possibile riferire entrambi i valori al modello indicandoli, quindi, con il pedice "M".

Dalla disposizione in serie della molla e del dissipatore è possibile stabilire a priori che si avrà, per ogni istante, la stessa sollecitazione in entrambi i componenti:

$$\sigma = \sigma_M = \sigma_S = \sigma_D \quad (2.30)$$

Ricordando che:

$$\sigma_S = E_M \cdot \varepsilon_S \quad (2.31)$$

$$\sigma_D = \eta_M \cdot \frac{d\varepsilon_D}{dt} \quad (2.32)$$

E che per quanto riguarda la deformazione, invece, quella dell'intero sistema è data dalla somma dei suoi componenti:

$$\varepsilon = \varepsilon_M = \varepsilon_S + \varepsilon_D \quad (2.33)$$

Per cui si avrà:

$$\varepsilon_S = \frac{\sigma_S}{E_M} \quad (2.34)$$

$$\varepsilon_D = \frac{1}{\eta_M} \int_0^t \sigma_M dt \quad (2.35)$$

Da cui la legge costitutiva risulterà essere:

$$\varepsilon_M = \frac{\sigma_S}{E_M} + \frac{1}{\eta_M} \int_0^t \sigma_M dt \quad (2.36)$$

Per descrivere l'andamento delle sollecitazioni e delle deformazioni in funzione del tempo, è possibile eseguire due differenti tipo di prove di cui se ne riporteranno gli andamenti:

- *Prova di Creep* per cui si ha che il carico è costante per tutta la durata della prova in cui si avrà una deformazione istantanea attribuibile alla molla per poi dare il via al processo deformativo del dissipatore:

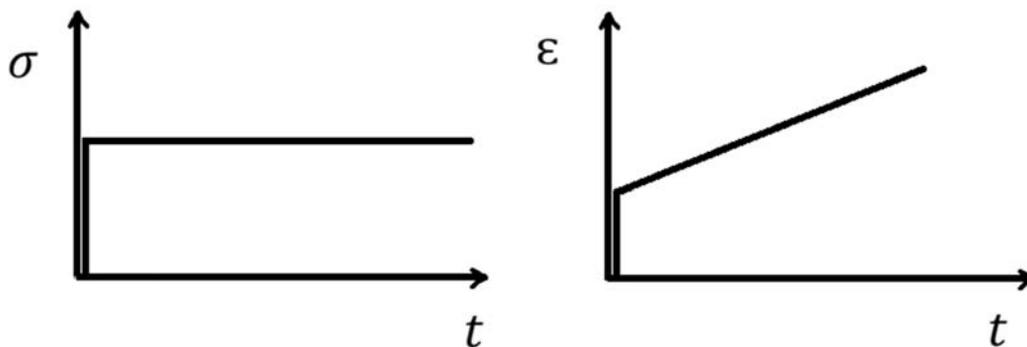


Figura 2.8 Prova di Creep

- *Prova di rilassamento* a cui corrisponde una deformazione inizialmente impressa che si mantiene costante nel tempo e, conseguenzialmente, una variazione della tensione, presentando questa un picco raggiunto nell'istante stesso in cui si conferisce la deformazione ($t = 0$) per merito della molla e quindi una progressiva riduzione, conseguenza dell'espansione dello smorzatore e dal rilassamento della molla:

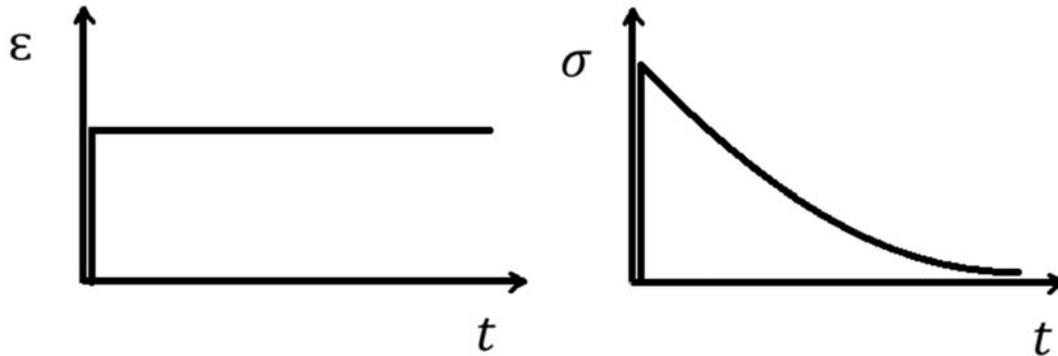


Figura 2.9 Prova di rilassamento

È possibile definire il *tempo di rilassamento* λ come rapporto tra la viscosità η e il modulo elastico E da cui si avrà, quindi:

$$E_M \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{dt} + \frac{1}{\lambda_M} \sigma \quad (2.37)$$

Il modello di Maxwell, in generale, non è idoneo a descrivere il comportamento dei leganti bituminosi, ma lo è esclusivamente in determinate condizioni quali:

- Temperature elevate;
- Tempi di carico molto estesi.

2.3.4 MODELLO VISCOELASTICO LINEARE DI KELVIN-VOIGT

A differenza del modello di Maxwell, il *modello viscoelastico lineare di Kelvin-Voigt* delinea il comportamento dei solidi viscoelastici e, insieme a Maxwell, è il modello analogico più elementare, che bene si approssima allo studio di questi materiali viscoelastici, caratterizzato, come il precedente, da una molla di rigidezza E e uno smorzatore caratterizzato da una viscosità η , questa volta, però, allineati in parallelo, per meglio approssimare il comportamento di un solido viscoelastico.

Di seguito, se ne riporta la schematizzazione dove, come espresso sopra, si può osservare la presenza di una molla e di uno smorzatore allineati in parallelo:

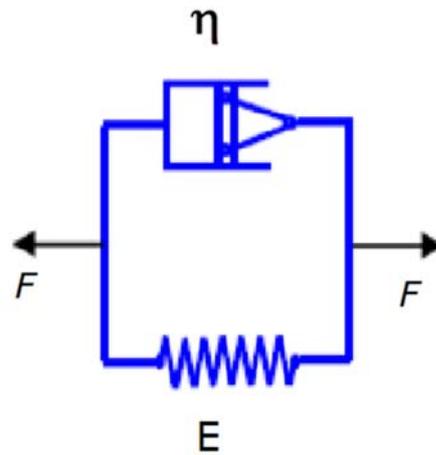


Figura 2.10 Modello di Kelvin-Voigt schematizzato

La tensione σ è la somma del contributo delle tensioni dato da entrambi gli elementi, si può dunque scrivere:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{molla} + \sigma_{dissipatore} \quad (2.38)$$

Dove:

$$\sigma_{molla} = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma_{dissipatore} = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$$

È, quindi, possibile ricavare σ_{tot} come:

$$\sigma_{tot} = E \cdot \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.39)$$

Da cui:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{\rho}\right)} \right] \quad (2.40)$$

Dove si indica con:

$\varepsilon =$ *deformazione*;

$\sigma =$ *tensione*;

$\eta =$ *viscosità*;

$E =$ *modulo elastico*;

$\rho = \frac{\eta}{E} =$ *tempo di rilassamento*.

E i pedici, analogamente per il modello di Maxwell, V, S e D dei vari valori indicano:

$V =$ *modello di Kelvin – Voigt*;

$S =$ *molla*;

$D =$ *dissipatore*.

Dalla disposizione in parallelo della molla e del dissipatore è possibile stabilire a priori che si avrà, per ogni istante, la stessa deformazione in entrambi i componenti:

$$\varepsilon = \varepsilon_V = \varepsilon_S = \varepsilon_D \quad (2.41)$$

Ricordando che:

$$\varepsilon_S = \frac{\sigma_S}{E_V} \quad (2.42)$$

$$\varepsilon_D = \frac{1}{\eta_V} \cdot \int_0^t \sigma_V dt \quad (2.43)$$

E che per quanto riguarda la tensione, invece, quella dell'intero sistema è data dalla somma dei suoi componenti:

$$\sigma = \sigma_V = \sigma_S + \sigma_D \quad (2.44)$$

Per cui si avrà:

$$\sigma_S = E_V \cdot \varepsilon_S \quad (2.45)$$

$$\sigma_D = \eta_V \cdot \frac{d\varepsilon_D}{dt} \quad (2.46)$$

Da cui la legge costitutiva risulterà essere:

$$\sigma_V = E_V \cdot \varepsilon_S + \eta_V \cdot \frac{d\varepsilon_D}{dt} \quad (2.47)$$

Come per il caso su trattato, si fa ricorso alle due differenti tipologie di prove per descrivere l'andamento delle sollecitazioni e delle deformazioni in funzione del tempo, in questo caso non sarà possibile distinguere le diverse fasi della molla e dello smorzatore siccome lavorano in parallelo e non più in serie:

- *Prova di rilassamento* a cui corrisponde una deformazione inizialmente impressa che si mantiene costante nel tempo e, conseguenzialmente, una variazione della tensione, presentando questa un picco raggiunto nell'istante stesso in cui si conferisce la deformazione ($t = 0$) per merito della molla e quindi una progressiva riduzione, conseguenza dell'espansione dello smorzatore e del rilassamento della molla:

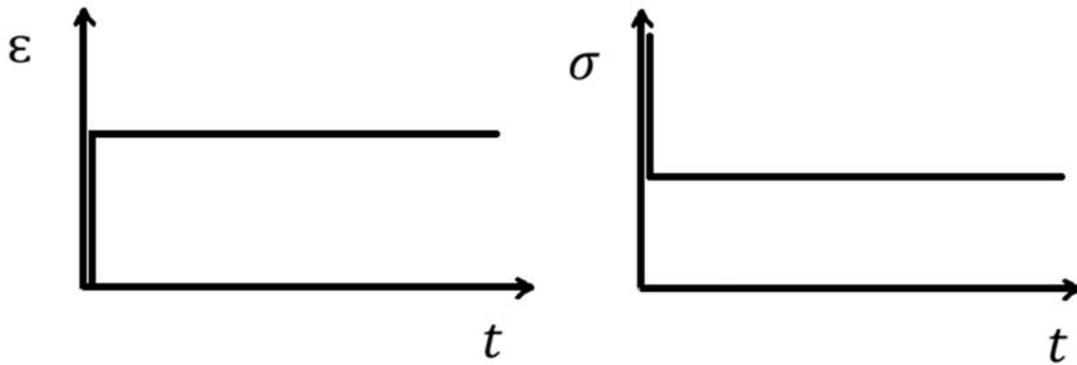


Figura 2.11 Prova di rilassamento

In cui si ha:

$$\text{per } t = 0 \rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} = \infty \rightarrow \sigma_v = \infty$$

$$\text{per } t > 0 \rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \rightarrow \sigma_v = \sigma_v \cdot \varepsilon$$

- *Prova di Creep* per cui si ha che il carico è costante per tutta la durata della prova di cui si avrà una deformazione progressiva dell'intero sistema fino a raggiungere un asintoto orizzontale corrispondente al caso in cui si ha la molla al massimo della sua estensione e quindi la viscosità risulterà nulla ($\eta = 0$):

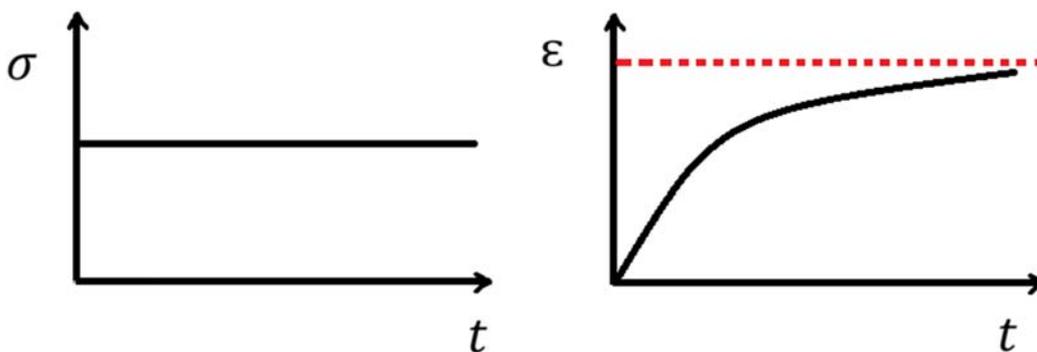


Figura 2.12 Prova di Creep

È possibile, in questo caso, definire il *tempo di rilassamento* (o tempo di ritardo) λ come rapporto tra la viscosità η e il modulo elastico E da cui si avrà, quindi:

$$\frac{\sigma_0}{\eta_V} = \frac{E_V}{\eta_V} \cdot \varepsilon + \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma_0}{\eta_V} = \frac{\varepsilon}{\lambda} + \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.48)$$

E, infine:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_V} \left[1 - e\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \right] \quad (2.49)$$

Al contrario del modello di Maxwell, quello di Kelvin-Voigt non dà una deformazione permanente e questo modello descrive quei corpi con un'elasticità ritardata.

Allo stesso modo, il modello di Kelvin-Voigt, in generale, non è idoneo a descrivere il comportamento dei leganti bituminosi, ma lo è esclusivamente in determinate condizioni quali:

- Temperature basse;
- Tempi di carico molto brevi.

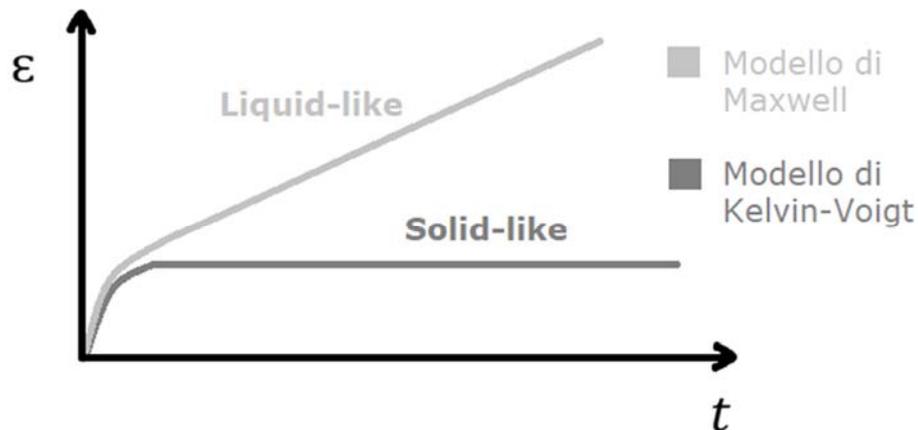


Figura 2.13 prova di creep per le i due diversi modelli

2.3.5 MODELLO DI BURGER

Come si è visto precedentemente, entrambi i modelli sopra trattati non si prestano bene a descrivere il comportamento del legante bituminoso in tutte le casistiche possibili, ma solo in particolari condizioni classificabili come “estreme”. Si rende, dunque, necessario introdurre un nuovo modello che descriva il comportamento del bitume anche nelle situazioni intermedie. Rispetto ai precedenti, il modello che si andrà di seguito a descrivere è più complesso e prende il nome di *modello di Burger*.

Burger propose un modello che combinasse quello di Maxwell (elementi in serie) e quello di Kelvin-Voigt (elementi in parallelo) facendo ricorso al principio di sovrapposizione degli effetti. Se ne riporta una schematizzazione di seguito:

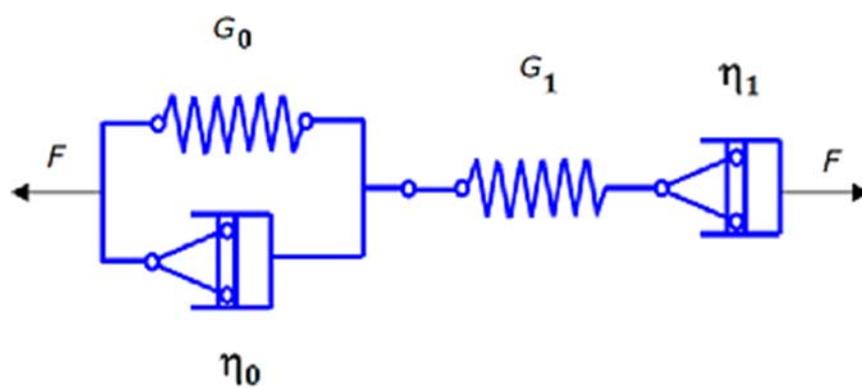


Figura 2.14 Modello di Burger schematizzato

Differentemente agli altri due modelli, per questo si farà riferimento ad una sollecitazione di taglio per cui si indicherà la *sollecitazione* con la lettera greca τ (invece che con σ), la *deformazione* con γ (al posto della ϵ) e la *rigidezza* della molla con G (piuttosto che con la E).

Si riporta, dunque, la legge costitutiva:

$$\gamma(t) = \frac{\tau}{G_0} + \frac{\tau}{\eta_0} \cdot (t - t_0) + \frac{\tau}{G_1} \cdot \left[e^{\left(-\frac{t-t_0}{\lambda_1}\right)} \right] \quad (2.50)$$

Dove:

t_0 = tempo di inizio carico;

t = tempo;

$\lambda =$ tempo di rilassamento;

$G_i =$ rigidità dell' i – esima molla;

$\eta_i =$ viscosità dell' i – esimo smorzatore.

Si fa ricorso alla *prova di creep* a tensione costante per un determinato lasso di tempo per analizzare l'andamento delle deformazioni in funzione del tempo nell'intero modello. Il grafico sottostante mostra la variazione della deformazione γ in funzione del tempo τ :

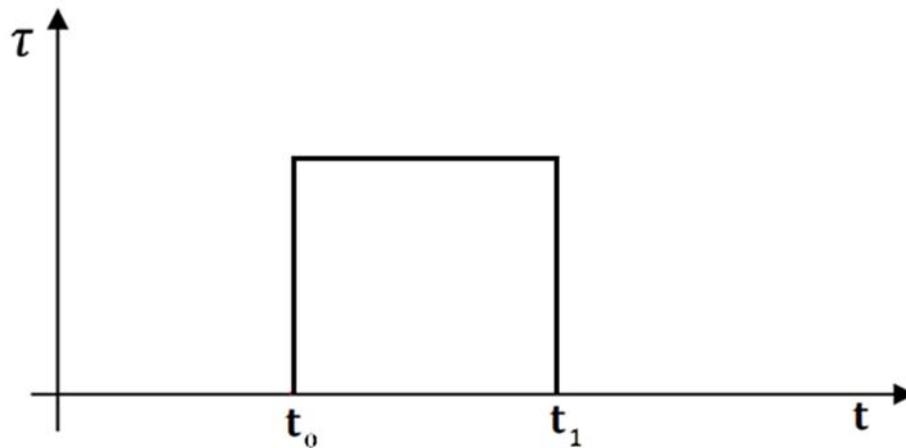


Figura 2.15 Prova creep $\tau(t)$

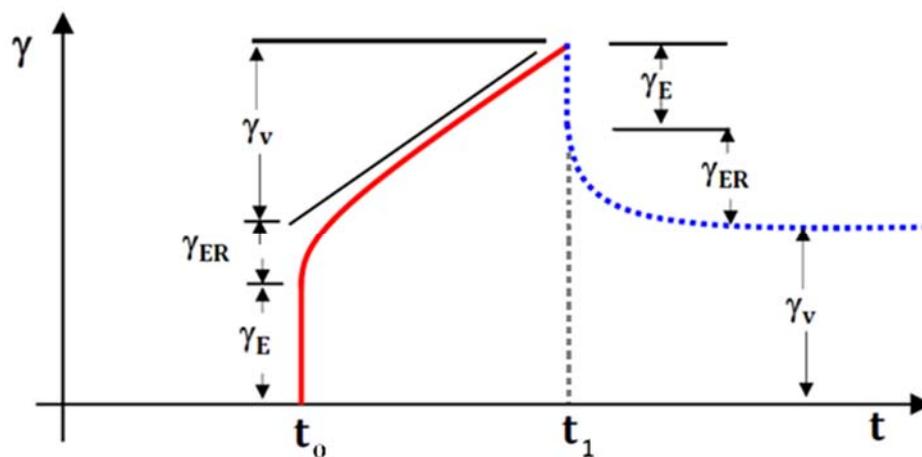


Figura 2.16 Prova creep $\gamma(t)$

Identificato con t_0 l'istante in cui viene applicato il carico e con t_1 , invece, l'istante in cui esso cessa, si avrà contemporaneamente all'applicazione del carico una deformazione elastica della molla con rigidità G_1 e, successivamente, quella della molla in parallelo con rigidità G_0 in contemporanea con i due smorzatori. Una volta scaricato il provino ($t = t_1$) si avrà un immediato ritorno della deformazione elastica data dalla molla in serie e, in seguito, quello fornito dalla molla in parallelo. Non si avrà, invece, un ritorno della deformazione da parte degli smorzatori che nel processo di carico sono stati sottoposti ad una deformazione irreversibile (dispersione totale dell'energia, al contrario delle molle). Si è così raggiunto un nuovo stato di equilibrio in cui il provino, sottoposto ad un nuovo ciclo di carico, presenterà già una deformazione iniziale pari proprio alla deformazione permanente vista in precedenza.

Il modello che meglio descrive il comportamento reologico del bitume dipende dalla tipologia dello stesso e varia in funzione della temperatura e della velocità di carico.

2.4 PROVE IN REGIME CONTINUO

Le *prove in regime continuo* sono caratterizzate da un'unica fase di carico del materiale (sia essa di taglio o di sforzo normale) seguita da un'altra di scarico ad una prefissata temperatura. Una tra le prove di carico in regime continuo maggiormente studiata nell'ambito della reologia è la *prova di creep*, il cui fenomeno era noto già due secoli fa quando l'ingegnere francese Louis Vicat osservò che dei cavi usati per la telecomunicazione continuavano ad estendersi nel tempo, nonostante il carico rimanesse inalterato. Tale prova si prefigge di comprendere lo scorrimento di un materiale sottoposto a determinate azioni. Dai risultati è possibile tracciare un diagramma delle deformazioni in funzione del tempo in cui la pendenza della curva in ogni suo punto rappresenta la *velocità di deformazione* $\dot{\epsilon}$. Nel caso vi fosse rottura del provino durante lo sviluppo della prova, è possibile registrare il *tempo di rottura* t_r , contrariamente, se questo dovesse resistere fino al termine della prova, allora si può procedere con la misurazione del *recupero* del creep.

È possibile definire due differenti parametri (l'uno inverso dell'altro) peculiari della prova creep quali la *rigidità* $S(t)$ e la *deformabilità o cedevolezza* $J(t)$ come:

$$S(t) = \frac{\tau_0}{\gamma(t)} \quad (\text{creep stiffness}) \quad (2.53)$$

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau_0} \quad (\text{creep compliance}) \quad (2.54)$$

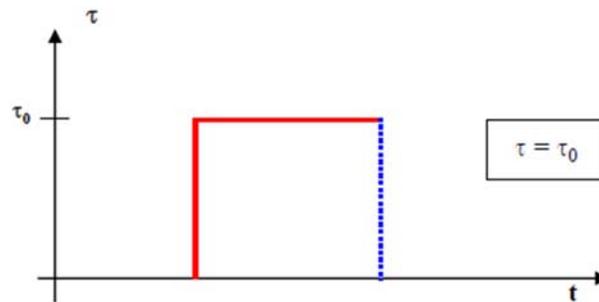


Figura 2.17 Prova di creep – grafico della tensione

Considerando il caso in cui si porti il provino a rottura, a tale sollecitazione corrisponde una deformazione $\varepsilon(t)$ che può essere suddivisa in tre differenti fasi:

- *creep primario*, caratterizzato da un decremento di deformazione;
- *creep secondario*, in cui si può osservare una crescita quasi lineare della deformazione a cui equivale un gradiente quasi costante;
- *creep terziario*, che inizia subito dopo il secondario e termina con la rottura del provino in cui, anche in questo caso, si ha un incremento della deformazione.

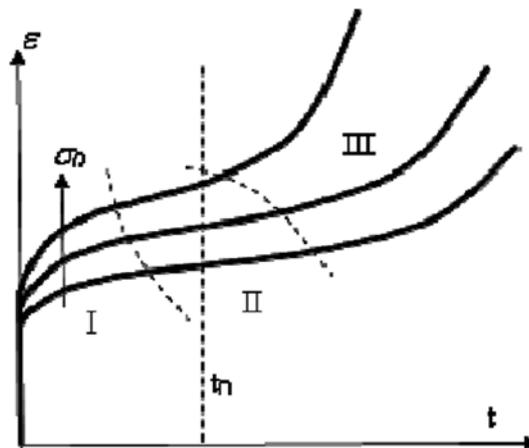


Figura 2.18 Prove di creep a diverse tensioni – grafico della deformazione

Com'è possibile osservare dal grafico soprastante, la deformazione totale è contributo di due termini, una deformazione elastica immediata ε_e e una di creep ε_c propriamente detta:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_c \quad (2.55)$$

Il gradiente, invece, si ricava come:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_c}{dt} \quad (2.56)$$

Qualora non si portasse il campione a rottura ma, ad un certo tempo t_1 si rimuovesse il carico, si avrà in seguito alla prova di creep, invece, una *fase di recovery*. Il *rilassamento* è il fenomeno duale al creep. In questo caso, cessata la sollecitazione, si registrerebbe un recupero di deformazione, pari proprio a quella elastica, identificata con il nome di *elasticità ritardata*.

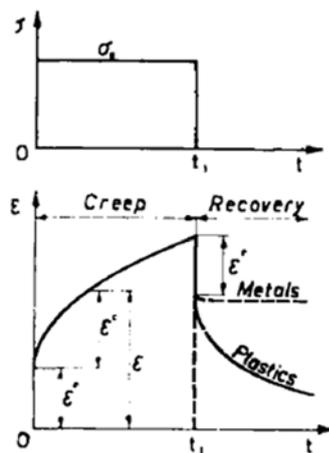


Figura 2.19 Prova di creep-recovery

Altro fenomeno osservabile, duale a quello di creep in cui si ha che la tensione è costante nel tempo, è quello del *relaxation*, tipico dei materiali viscoelastici, che consiste nel ridurre lo sforzo tensionale per mantenere costante nel tempo la deformazione del provino. In altri termini, per mantenere inalterata la deformazione bisogna procedere con un'operazione di rilassamento (come suggerisce il nome del fenomeno stesso) del carico. Di seguito se ne riporta una schematizzazione elementare.

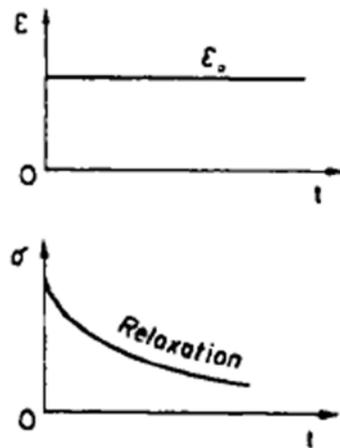


Figura 2.20 Prova di relaxation

Nella realtà, la storia tensionale e deformativa a cui il provino è stato sottoposto può essere dato da un solo processo di quelli visti sopra o da una combinazione di questi di tipo ciclico o del tutto casuale (W.N. Findley et al., 1978)

2.5 PROVE IN REGIME OSCILLATORIO

Una prova di carico in regime continuo male si presta a descrivere le reali sollecitazioni a cui è sottoposta una pavimentazione nel corso della sua vita di esercizio. Si è reso quindi necessario introdurre una nuova tipologia di prove che più si avvicinasse al caso reale e, cioè, ai carichi trasmessi dal traffico veicolare sull'infrastruttura. Una buona approssimazione è quella di considerare la sollecitazione di un veicolo come un carico ciclico. Vengono dunque introdotte delle *prove in regime oscillatorio* che consistono nell'applicare un carico (σ , in alternativa una deformazione) ciclico che segue una legge armonica del tipo:

$$\tau = \tau_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.57)$$

Dove:

τ_0 = ampiezza di oscillazione della tensione;

ω = pulsazione o frequenza.

A cui corrisponde una deformazione pari a:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (2.58)$$

Dove:

$\gamma_0 =$ ampiezza di oscillazione della deformazione;

$\delta =$ angolo di fase.

Il comportamento viscoelastico intrinseco del bitume (quindi di un materiale viscoelastico in generale) fa sì che non ci sia una perfetta sovrapposizione tra la sollecitazione e la sua risposta deformativa in termini temporali. Questo ritardo che misura il rapporto che vi è tra la componente deformativa reversibile e quella viscosa prende il nome di *angolo di fase* δ che può assumere valori compresi tra 0 (caso di risposta perfettamente elastica) e $\pi/2$ (caso di fluido viscoso ideale).

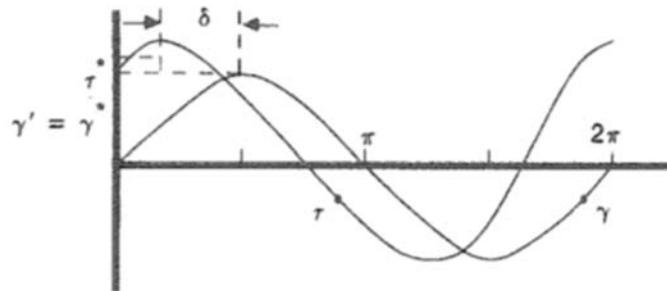


Figura 2.21 Carico e deformazione sinusoidale

Il rapporto tra la sollecitazione τ_0 e la deformazione γ_0 prende il nome di *norma del modulo complesso* $|G^*|$ (indicato nell'elaborato anche solo come modulo complesso G^*) ed è così chiamato perché può essere rappresentato come un numero complesso con una parte reale G' (componente elastica) e un'altra immaginaria G'' (componente viscosa) dove la prima è correlata all'energia immagazzinata dal materiale in ogni ciclo di carico e la seconda, invece, all'energia dissipata a causa della deformazione plastica. Tale coefficiente definisce la rigidità del materiale, parametro fondamentale nel valutare le prestazioni meccaniche di un materiale oltre che, ovviamente, il suo comportamento.

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (2.59)$$

$$G^* = G' + iG'' = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (2.60)$$

Con:

$$G' = G^* \cdot \cos \delta \rightarrow \text{Modulo elastico};$$

$$G'' = G^* \cdot \sin \delta \rightarrow \text{Modulo dissipativo}.$$

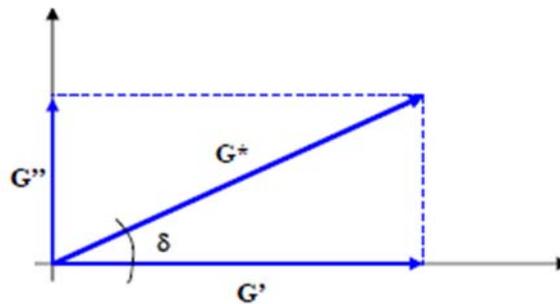


Figura 2.22 Modulo complesso

Da cui è possibile scrivere la tensione come:

$$\tau = \tau_0 \cdot \sin(\omega t + \delta) = \tau_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\delta) + \tau_0 \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin(\delta) \quad (2.61)$$

$$\tau = e_0 G' \cdot \sin(\omega t) + e_0 G'' \cdot \cos(\omega t) \quad (2.62)$$

È doveroso precisare come i termini G' e G'' (anche chiamati rispettivamente *modulo di immagazzinamento* e *modulo di dissipazione*) sono in funzione dalla sola frequenza angolare ω e che anche solo da essi è possibile distinguere differenti condizioni strutturali e comportamentali dei materiali.

Nell'equazione sopra è possibile fare una netta distinzione tra i due termini che compaiono a destra dell'uguale: il primo rappresenta la componente in fase elastica che descrive, appunto, il

comportamento di un solido elastico; il secondo, invece, identifica la componente in opposizione di fase tipica di un fluido viscoso ideale. Tale equazione è scritta in maniera generale, il che significa che può essere usata per descrivere qualsiasi tipologia di materiale, dall'elastico al viscoso passando per i materiali viscoelastici.

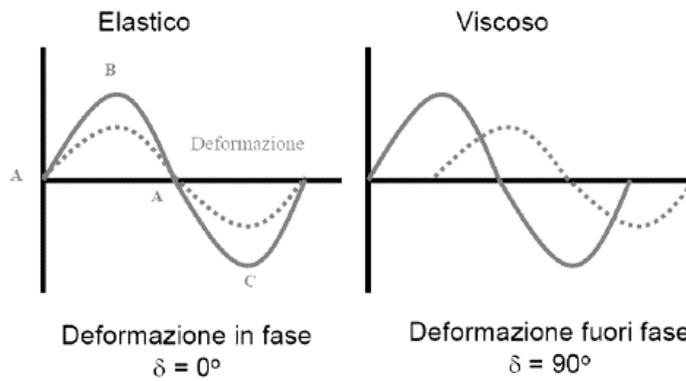


Figura 2.23 Prove in regime oscillatorio in materiale elastico (sx) e viscoso (dx)

È possibile determinare la tangente dell'angolo di fase δ come rapporto tra le due componenti del modulo complesso G^* secondo la relazione:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (2.63)$$

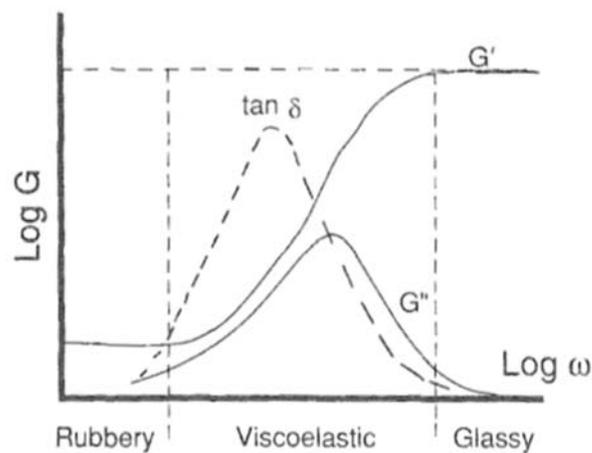


Figura 2.24 Esempio di G' e G'' al variare della frequenza

Lo strumento maggiormente impiegato per effettuare prove in regime oscillatorio nel campo dei bitumi è il Dynamic Shear Rheometer il cui funzionamento verrà approfondito nei capitoli successivi.

2.5.1 PIANO DI BLACK

Con i dati ottenuti da una prova in regime oscillatorio è possibile procedere con la rappresentazione grafica del modulo complesso G^* in scala logaritmica in funzione dell'angolo di fase δ . Un diagramma così fatto viene identificato con il nome di *piano di Black*. Se ne riporta di seguito una rappresentazione a titolo di esempio:

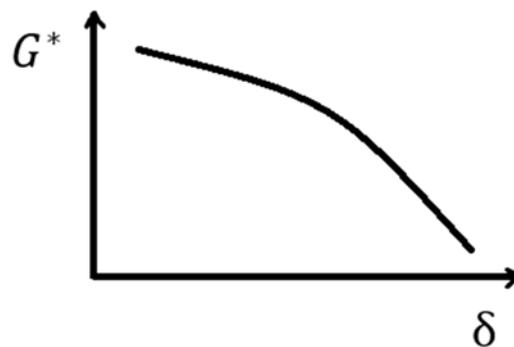


Figura 2.25 Piano di Black

Tale grafico è rappresentativo di una specifica temperatura a cui si sono eseguite le prove. Per temperature diverse appare scontato come i dati cambino di valore.

2.5.2 PIANO DI COLE-COLE

Si intende per *piano di Cole-Cole*, invece, quel diagramma che correla tra loro il modulo elastico G' e il modulo dissipativo G'' ricavati sempre da una prova a regime oscillatorio. Anche in questo caso se ne riporta un esempio:

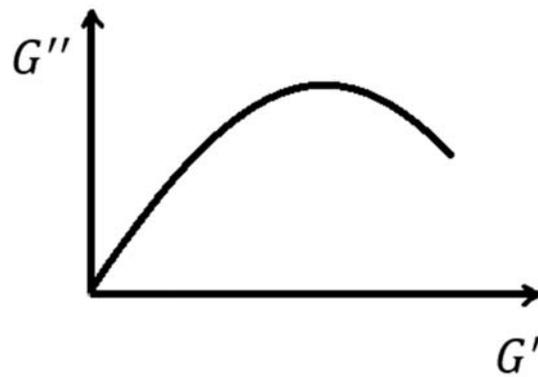


Figura 2.26 Piano di Cole-Cole

Volendo descrivere il piano di Cole-Cole per i vari modelli in precedenza analizzati, si potrebbe osservare come nel caso del solido elastico (schematizzato da una molla) questo non venga in alcun modo influenzato dalla frequenza di carico, per cui il piano Cole-Cole risulterebbe caratterizzato da un valore univoco di G' e G'' . Al contrario, qualora ci si trovasse ad analizzare un fluido viscoso, il che sarebbe analogo al caso in cui si avessero frequenze di carico prossime allo zero, allora si tenderebbe ad avere un valore nullo di G' per ogni valore di G'' , andando a ricalcare con la rappresentazione dei dati sperimentali l'asse delle ordinate. Più complessa è la situazione di quei modelli non elementari come Maxwell e Kelvin-Voight per cui il piano Cole-Cole rappresenterebbe, nel primo caso, una campana e, nel secondo, un andamento analogo a quello che si ha per lo smorzatore (fluido viscoso) ma traslato sull'asse delle ascisse di un valore proprio pari a G . I vari andamenti dei quattro modelli sono descritti graficamente nella figura sottostante:

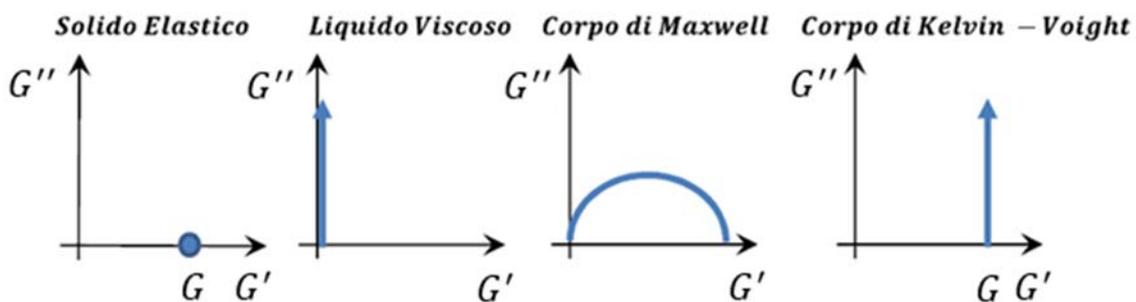


Figura 2.27 Rappresentazione dei modelli nel piano di Cole-Cole

2.6 PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE TEMPO-TEMPERATURA

Come già espresso più volte nei paragrafi precedenti, si ricorda come le proprietà di un materiale viscoelastico sono sì in funzione del *tempo*, ma anche della *temperatura*. Questi due fenomeni di dipendenza non sono da considerarsi distaccati tra loro in quanto vi è una stretta relazione che le lega. La legge che correla la dipendenza dal tempo a quella della temperatura e viceversa può essere espressa se si prende in considerazione nel modello generalizzato di Maxwell l'equazione che fornisce il modulo di rilassamento G_i :

$$G_i(t, T) = \frac{(T \cdot \rho)}{T_o \cdot \rho_o} \cdot \sum_{i=1}^n G_i(T_o) e^{-\frac{t}{a_T \lambda_i(T_o)}} \quad (2.67)$$

Dove si è definita con ρ la *densità* del materiale.

Introducendo la definizione di *modulo di rilassamento ridotto* G_r ed il *tempo ridotto* t_r come:

$$G_r(t) = G_i(t, T) \frac{(T_o \rho_o)}{T \rho} \quad (2.68)$$

$$t_r = \frac{t}{a_T} \quad (2.69)$$

Dalle eq. (2.68) e dall'eq. (2.69) è possibile ricavare la legge del modulo ridotto in funzione del tempo ridotto:

$$G_i(t_r) = \sum_{i=1}^n G_i(T_o) e^{-\frac{t_r}{\lambda_i(T_o)}} \quad (2.70)$$

Da tale relazione è possibile dedurre come le grandezze fisiche dipendenti da tempo e temperatura che descrivono il comportamento di un materiale viscoelastico possono essere espresse in funzione della sola variabile tempo ridotto.

Un qualsiasi parametro che descrive il comportamento di un materiale viscoelastico, come potrebbe essere, ad esempio, il modulo elastico G' , che si trova ad una temperatura T_0 e sottoposto ad una determinata sollecitazione, presenta, al tempo t , uno specifico valore $G'(t, T_0)$. Questo stesso valore può essere ottenuto, sempre se sottoposto ad una sollecitazione di pari entità, ad una diversa temperatura T e ad un differente valore del tempo τ :

$$G'(t, T_0) = G'(\tau, T) \quad (2.71)$$

In cui si definisce T_0 come temperatura di riferimento, cioè, quella temperatura in cui si vogliono conoscere le proprietà meccaniche del materiale.

Tale fenomeno è noto con il nome di *principio di sovrapposizione tempo-temperatura* (*Time - Temperature Superposition* TTS) ed implica che una stessa variazione del modulo elastico G' al variare della temperatura, in funzione di una prefissata frequenza di carico, la si può ricavare imponendo fissa una determinata temperatura e variando, invece, la frequenza.

Prefissata la temperatura di riferimento T_0 della prova di indagine, quindi, è possibile traslare orizzontalmente una curva che descriva la variazione del modulo elastico G' alle stesse frequenze ma con temperatura differente, di una quantità costante definita *shift factor* a_T . I materiali il cui comportamento rispetta la suddetta proprietà prendono il nome di *materiali termoreologicamente semplici*.

Per la determinazione dello shift factor per i materiali bituminosi si può far ricorso, a seconda se la temperatura di riferimento sia maggiore o minore rispetto a quella di transizione vetrosa, a due differenti leggi quali quella di *Williams-Lander-Ferry* (WLF), eq. (2.72), nel caso in cui $T > T_g$ e quella di *Arrhenius*, eq. (2.73), per $T < T_g$:

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T_1 - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (2.72)$$

$$\log(a_T) = \frac{E_f}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (2.73)$$

Dove:

C_1 e C_2 = costanti di adattamento in funzione del materiale;

E_f = energia di attivazione;

R = costante universale dei gas.

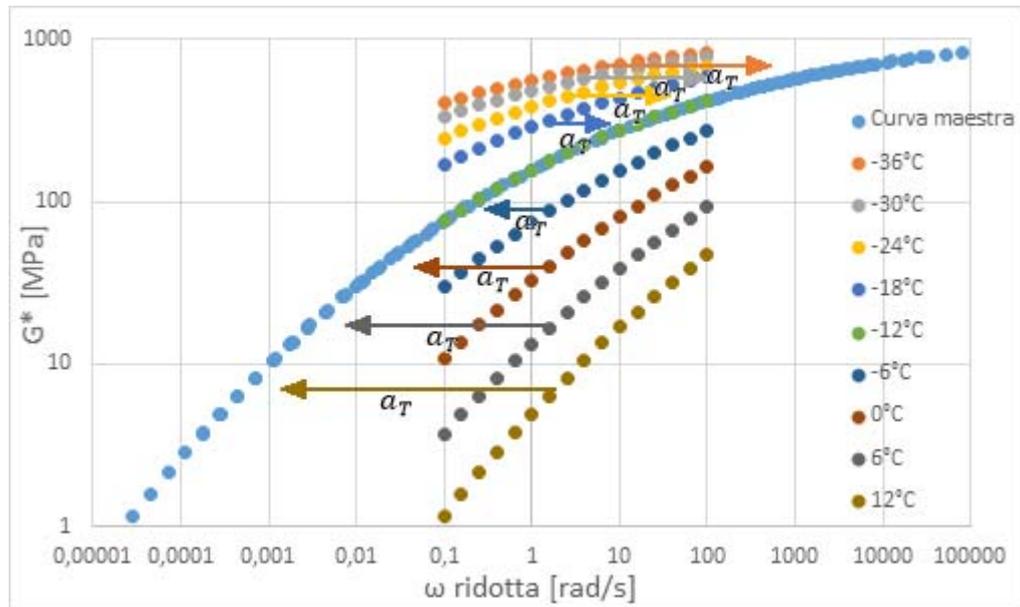


Figura 2.28 Shift factor di curve a diversa T

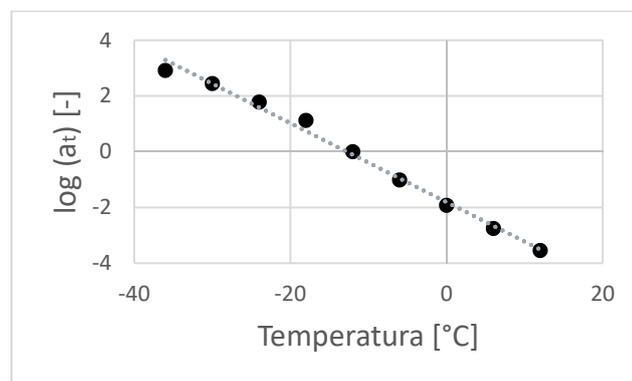


Figura 2.29 valore degli shift factors in funzione della temperatura

2.7 CURVE MAESTRE

La *curva maestra*, comunemente chiamata col nome inglese *master curve*, descrive l'andamento della curva del modulo complesso G^* in funzione della frequenza di carico ω ad una specifica temperatura.

Le curve maestre per i leganti bituminosi sono caratterizzate da:

- *Asintoto vetroso*, descritto da una retta orizzontale, che definisce il comportamento limite del materiale ad alte frequenze e basse temperature il cui modulo complesso viene definito modulo vetroso G_g , simile al comportamento che si avrebbe per un solido elastico perfetto.

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} G^*(\omega) = G_g \quad (2.74)$$

- *Asintoto viscoso*, rappresentato da una curva con coefficiente angolare pari alla viscosità η_0 , che definisce il comportamento limite del materiale a basse frequenze e ad alte temperature, simile al comportamento che si avrebbe per un fluido viscoso ideale.

$$\lim_{\omega \rightarrow 0^+} G^*(\omega) = 0 \quad (2.75)$$

- *Frequenza di crossover* ω_c , che corrisponde al valore della frequenza per cui si ha l'intersezione dell'asintoto vetroso con quello viscoso (angolo di fase $\delta = 45^\circ$) e, quindi, il bilanciamento tra componente viscosa G'' e componente elastica G'
- *Indice reologico* R , esprimibile come differenza tra il modulo vetroso G_g e il modulo complesso alla frequenza di crossover $G^*(\omega_c)$ che si ricava come:

$$G^*(\omega_c) = 2^{\left(-\frac{R}{\log 2}\right)} G_g \rightarrow R = \log(G_g) - \log(G^*(\omega_c)) \quad (2.76)$$

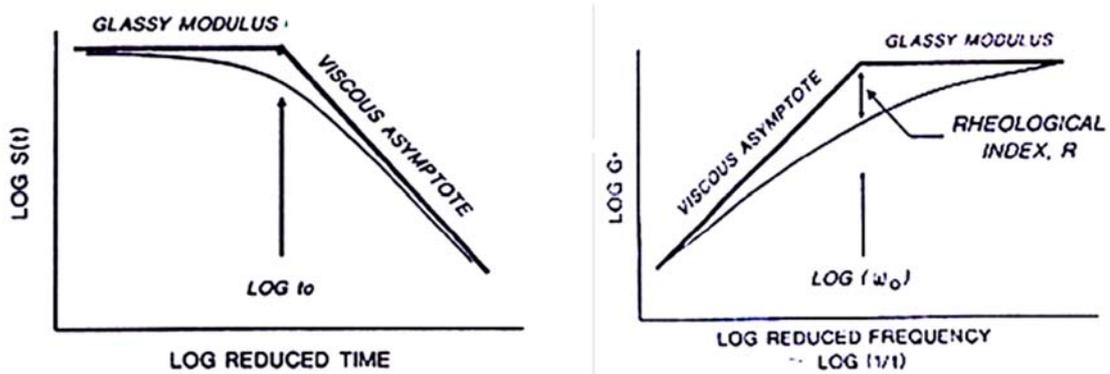


Figura 2.30 Curva maestra in funzione del tempo e frequenza ridotti

Una curva maestra può essere costruita a partire sia da prove in regime oscillatorio (come quelle ricavabili dal DSR), sia da prove in regime continuo (prove al BBR) e vengono rappresentate in un piano bi-logaritmico in cui sull'asse delle ordinate vi è riportato il modulo complesso G^* per le prove in regime oscillatorio o il modulo elastico E^* per le prove in regime continuo e su quello delle ascisse il tempo o la frequenza.

Riprendendo il principio di sovrapposizione tempo-temperatura, è possibile, a partire da prove di tipo frequency sweep eseguite a diverse temperature, estendere l'intervallo nel dominio delle frequenze (o del tempo) di una curva maestra ottenuta da una singola prova. Il vantaggio dato dall'applicazione del TTP permette di superare i limiti strumentali delle apparecchiature in quanto, per una prefissata temperatura, è difficile ricoprire tutto il range di frequenze (Fig. 2.35).

2.8 MODELLO DI CHRISTENSEN-ANDERSON

Il *modello di Christensen-Anderson* (CA) nacque in seguito a ricerche condotte dai due scienziati nel 1993 da cui prende il nome, sulla relazione che lega il modulo complesso G^* con il modulo vetroso G_g , l'indice reologico R e la frequenza di crossover ω_c per far fronte al sistema di caratterizzazione SHRP, avendo come base la *funzione di Weibul* che definisce lo spettro di rilassamento a cui vanno sostituiti i parametri reologici (Anderson, 2008). Il modello di tipo viscoelastico lineare CA si cura di determinare il comportamento del bitume, in un largo spettro di temperature e frequenze che caratterizzano un'infrastruttura in condizioni di esercizio, sottoposto a prove in regime oscillatorio e continuo (prove di creep). Le equazioni che legano il modulo complesso G^* e l'angolo di fase δ in funzione dei parametri reologici su elencati sono di seguito riportate:

$$G^*(\omega) = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^{\left(\frac{\log 2}{R} \right)} \right]^{-\left(\frac{R}{\log 2} \right)} \quad (2.77)$$

$$\delta(\omega) = \frac{90}{\left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^{\left(\frac{\log 2}{R} \right)} \right]} \quad (2.78)$$

Dove:

$G^*(\omega)$ = modulo complesso dinamico;

ω_c = frequenza di crossover;

ω = frequenza sperimentale;

R = indice reologico.

I parametri caratterizzanti le curve maestre del modello di Christensen-Anderson sono:

- *Asintoto vetroso*, a cui corrisponde un valore del modulo vetroso (glassy modulus) G_g , che rappresenta il valore a cui tende il modulo complesso in condizioni di frequenze di carico alte e basse temperature. Tale valore è indipendente dal tipo di bitume considerato ed è pari all'incirca ad 1 GPa. All'avvicinarsi della curva all'asintoto vetroso si tenderà ad avere un valore dell'angolo di fase $\delta = 0^\circ$;
- *Asintoto viscoso*, che rappresenta la retta con coefficiente angolare pari a 1 (angolo di fase δ all'incirca di 90°) coincidente con il raggiungimento della zona di viscosità newtoniana o stazionaria (alte temperature e basse frequenze);
- *Frequenza di crossover* ω_c , indica il valore della frequenza corrispondente all'intersezione dell'asintoto vetroso con quello viscoso nella rappresentazione della curva maestra e dà informazioni sulla consistenza e la durezza del materiale in esame. L'inverso della frequenza di crossover è detto *crossover time* ed è l'equivalente nel grafico in funzione del tempo;
- *Indice reologico* R , che è dato dalla differenza tra il modulo vetroso G_g e il modulo complesso dinamico G^* in corrispondenza della frequenza di crossover ω_c . Questo parametro caratterizza

l'andamento delle curve reologiche, avendo una diretta proporzionalità rispetto all'ampiezza dello spettro di rilassamento. L'indice reologico dipende dal tipo di bitume che si sta analizzando ma non dalla temperatura di riferimento ed è possibile determinarlo come:

$$R = \frac{\log 2 \log \left(\frac{|G^*|}{G_g} \right)}{\log \left(1 - \frac{\delta}{90} \right)} \quad (2.79)$$

2.9 CLASSIFICAZIONE EMPIRICA DEI BITUMI

Attraverso delle prove empiriche è possibile determinare dei parametri caratterizzanti il tipo di bitume impiegato in ambito stradale. Queste prove sono:

- prova di duttilità;
- prova Fraas;
- prova di rammollimento;
- prova di penetrazione.

2.9.1 PROVA DI DUTTILITÀ

La *duttilità* di un bitume viene valutata sottoponendo alcuni campioni, messi all'interno di un bagno termostatico alla temperatura di 25 °C, ad una velocità di elongazione corrispondente a 50 mm al minuto, fino al raggiungimento della rottura.

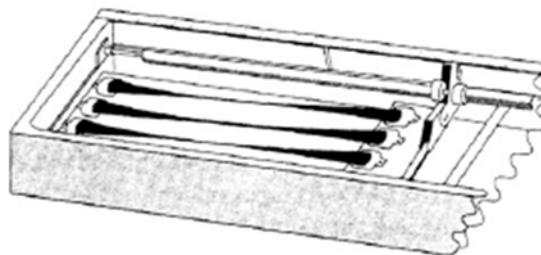


Figura 2.31 Prova di duttilità

Temperatura di prova = 25 °C

Velocità di allungamento = 50 mm / 60 s

Tempo di carico = fino a rottura del campione

Duttilità o elongazione misurata in cm

2.9.2 PROVA FRAAS

La *prova Fraas*, secondo normativa EN 12593, determina il comportamento del bitume a basse temperature, misurando la temperatura alla quale su una goccia di bitume, di spessore 0,5 mm colata su una piastra metallica soggetta a flessione continua e con variazione termica di $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ al minuto, si ha rottura della superficie per via della formazione di una crepa. Tale temperatura è definita temperatura di Fraas. Nell'immagine seguente viene riportata una foto dell'apparecchiatura utilizzata per la prova.



Figura 2.32 Strumentazione per la prova Fraas

Temperatura di inizio prova = $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Gradiente di temperatura = $-1\text{ }^{\circ}\text{C} / 60\text{ s}$

Spessore del campione = $0,5\text{ mm}$

Temperatura di rottura Fraas espressa in $^{\circ}\text{C}$

2.9.3 PROVA DI RAMMOLLIMENTO

La *prova di rammollimento* (UNI EN 1427) viene eseguita mediante uno strumento che prevede l'utilizzo di una palla ed un anello (da qui anche la denominazione di prova "palla-anello"). La prova

consiste nello scaldare un liquido, solitamente glicerina, in cui è immerso il campione di bitume (si testano contemporaneamente due provini, da cui ricavare diverse misurazioni che poi verranno mediate) compreso nell'anello metallico su cui sopra è poggiata una biglia d'acciaio con caratteristiche standard (dal peso di 3,5g) e determinare la temperatura per cui si ha il superamento di un determinato limite imposto all'abbassamento della palla. La temperatura viene aumentata progressivamente con una velocità di 5 °C al minuto finché questa non porta al rammollimento del bitume, che inizia a deformarsi sotto il peso della palla. La temperatura così ottenuta, che prenderà il nome di temperatura di rammollimento, indica il passaggio dallo stato viscoelastico a quello puramente viscoso. Questa prova serve a determinare l'idoneità del bitume in ambienti caldi, se la temperatura di rammollimento è bassa, per esempio, il bitume è poco indicato per quella applicazione.

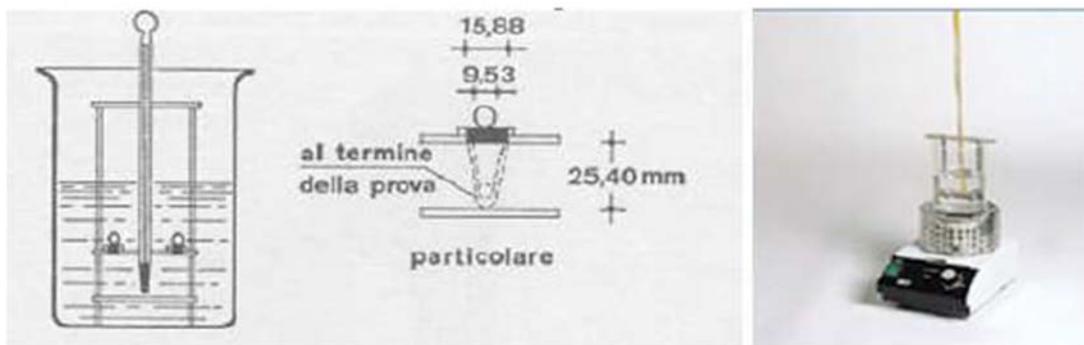


Figura 2.33 Prova di rammollimento

Temperatura di inizio prova = 5 °C

Gradiente di temperatura = 5 °C / 60 s

Carico sferette di acciaio = 3,5 g

Temperatura di rammollimento espressa in °C

2.9.4 PROVA DI PENETRAZIONE

La prova consiste nel misurare la *penetrazione* (e quindi l'abbassamento) di un ago, a cui è applicato un peso di 100 g per un periodo di 5 secondi, in un campione di bitume alla temperatura di 25 °C (UNI EN 1426). I bitumi vengono classificati secondo classi di penetrazione. La prova permette di

determinare il grado di consistenza del bitume che va da valori molto bassi per bitumi duri (20/30 minimo per legge) a quelli più alti per bitumi fluidi (180/220 massimo per legge).

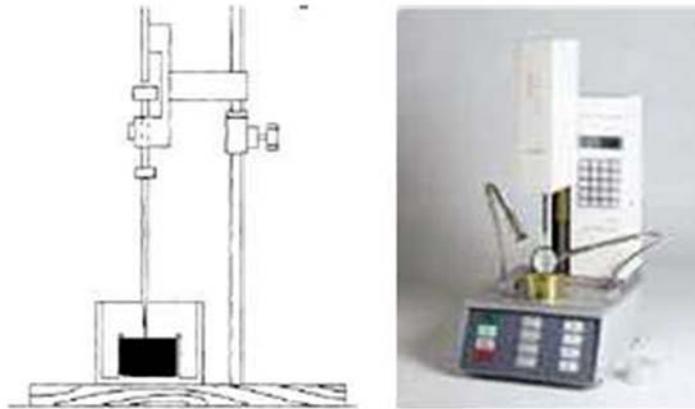


Figura 2.34 Prova penetrometrica

Temperatura di prova = 25 °C

Massa totale gravante sull'ago = 100 g

Tempo di penetrazione = 5 s

Penetrazione misurata in dmm

La classificazione dei bitumi per uso stradale in Italia fa riferimento alla norma CNR (B.U. n24/71) che li identifica in funzione della classe di penetrazione.

Caratteristiche	Bitumi semisolidi per usi stradali				
	B 40/50	B 50/70	B 80/100	B 130/150	B 180/220
Penetrazione a 25°C. dmm	40-50	50-70	80-100	130-150	180-220
Punto di rammolimento (palla e anello) °C	51-60	47-56	44-49	40-45	35-42
Punto di rottura (Fraass), massimo . . °C	-6	-7	-10	-12	-14
Duttilità a 25 °C, minima cm	70	80	100	100	100
Solubilità in solventi organici, minima %	99	99	99	99	99
Perdita per riscaldamento (volatilità):					
a 163 °C, massima %	—	—	0,5	1	1
a 200 °C, massima %	0,5	0,5	—	—	—
Penetrazione a 25 °C del residuo della prova di volatilità: valore espresso in percentuale di quello del bitume originario, minimo %	60	60	60	60	60
Punto di rottura del residuo della prova di volatilità, massimo . . °C	-4	-5	-7	-9	-11
Contenuto di paraffina, massimo . . . %	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Densità a 25/25 °C	1,00-1,10	1,00-1,10	1,00-1,07	1,00-1,07	1,00-1,07

Nella presente norma viene applicato il Sistema internazionale di unità (SI) – ved. Norma CNR-UNI 10003-74. In particolare, lo stesso numero che esprime il peso nel Sistema Tecnico, prima in uso, esprime la massa nel Sistema SI.

Figura 2.35 Classificazione dei bitumi secondo la norma CNR (B.U. n24/71)

È possibile notare come all'aumentare della penetrazione del bitume si registra, per bitumi tradizionali, un incremento di duttilità e che, al contrario, si ha un abbassamento sia della temperatura di rammolimento sia della temperatura di Fraas.

2.10 SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE PRESTAZIONALE

A causa dell'inadeguatezza dei sistemi di classificazione basati sulla penetrazione e sulla viscosità, lo Strategic Highway Research Program (SHRP, 1994), sul finire del secolo scorso negli Stati Uniti, ha condotto un progetto per ovviare alle carenze di classificazione dei bitumi con sistemi empirici. Da questo progetto è partorita l'idea di determinare una diversa classificazione basata su una nuova serie di test. Il prodotto finale di tale ricerca prende il nome di *classificazione SUPERPAVE*, termine che sta per *Superior Performing Asphalt Pavements*. Questa classificazione prestazionale, al contrario di quella empirica, garantisce ottimi risultati sia per bitumi vergini sia per bitumi modificati.

Nel sistema di classificazione SUPERPAVE, i leganti bituminosi sono classificati in base alle loro prestazioni a temperature estreme calde e fredde e vengono definiti bitumi *Performance Grade (PG)*.

Lo scopo principale della classificazione e della selezione del legante per conglomerato bituminoso mediante il sistema PG è quello di assicurarsi che il bitume abbia delle proprietà appropriate sulla base delle condizioni ambientali in sito. I leganti per conglomerato bituminoso PG sono selezionati per soddisfare le condizioni climatiche previste nel sito di applicazione, nonché le regolazioni sulla velocità e sul volume del traffico. Pertanto, nell'ambito di ricerca SUPERPAVE, sono stati sviluppati nuovi test e specifiche dei leganti per caratterizzare in modo più accurato e completo i leganti bituminosi da utilizzare per le infrastrutture viarie. Il sistema PG utilizza una serie comune di test per misurare le proprietà fisiche del bitume, che possono essere direttamente correlate alle prestazioni sul campo della pavimentazione nelle temperature di servizio.

Questi test e queste specifiche sono noti per affrontare i parametri di prestazione della pavimentazione come sfilacciatura, rottura a fatica e rottura termica. Il concetto di base si fonda sull'idea che le proprietà di un legante per conglomerato bituminoso dovrebbero essere correlate alle condizioni in cui il bitume viene impiegato. Ciò comporta, nella progettazione, l'analisi e la previsione delle condizioni climatiche, nonché considerazioni sui processi di invecchiamento.

Il *Long-Term Pavement Performance (LTPP)* fornisce un algoritmo per calcolare la temperatura della pavimentazione a partire da quella dell'aria ambiente. Da questo, vengono calcolate le temperature più alte e più basse che possono essere raggiunte della pavimentazione e viene selezionato il bitume che meglio si presta a garantire determinate prestazioni in quel range di temperature.

Il sistema PG, dunque, utilizza una batteria comune di test (come fanno i vecchi sistemi di classificazione sulla base della penetrazione e della viscosità) specificando che un particolare legante bituminoso deve presentare determinate caratteristiche a temperature specifiche, che dipendono dalle condizioni climatiche proprie nell'area di utilizzo. Questo concetto non è nuovo se si pensa che la selezione dei leganti per conglomerato bituminoso, nelle classificazioni precedenti a quella del SUPERPAVE, con gradazione di penetrazione o viscosità, segue la stessa logica. Ma solo con quest'ultimo sistema di classificazione si ha una maggiore precisione e completezza dei parametri che entrano in gioco nella determinazione del bitume ottimale.

Il Performance Grade è basato su due fattori: traffico e temperatura della pavimentazione. In base alle condizioni e ai volumi di traffico, vengono apportati adeguamenti al grado di PG del bitume, al fine di migliorare la durata di progettazione della pavimentazione. Il sistema di classificazione PG è definito da due numeri, che rappresentano le temperature della pavimentazione. Prendendo come esempio un PG 64-22, il primo numero PG 64-XX rappresenta la temperatura, espressa in gradi Celsius, massima a cui quel bitume presenta ancora prestazioni idonee, mentre il secondo numero PG XX-22 rappresenta

la temperatura minima analogamente al caso precedente. Si noti che questi numeri sono le temperature estreme raggiunte dalla pavimentazione e non le temperature dell'aria (quelle della pavimentazione sono stimate sulla base dalle temperature dell'aria usando un algoritmo contenuto nel programma BTP LTPP). Più nello specifico, per temperatura massima di progetto $T_{max,p}$ è da considerare quella che si ha ad una profondità di 20 mm dalla superficie dello strato di pavimentazione che si vuole realizzare, prendendo in considerazione la massima temperatura registrata sulla media di sette giorni consecutivi. Per la minima $T_{min,p}$, invece, è da considerare la minima temperatura assoluta registrata sulla superficie della pavimentazione.

$$T_{min,p} = -1,56 + 0,72 \cdot T_{min,a} - 0,004 \cdot LAT^2 + 6,26 \cdot \log(H + 25) - z(4,4 + 0,52 \cdot \sigma_{min,a}^2)^{0,5} \quad (2.83)$$

$$T_{max,p} = 54,32 + 0,78 \cdot T_{max,a} - 0,0025 \cdot LAT^2 - 15,14 \cdot \log(H + 25) + z(9 + 0,61 \cdot \sigma_{max,a}^2)^{0,5} \quad (2.84)$$

Dove:

$T_{min,a}$ = temperatura minima dell'aria;

$T_{max,p}$ = temperatura massima dell'aria;

LAT = latitudine di intervento;

H = profondità a cui calcolare la temperatura;

z = coefficiente in funzione dell'affidabilità;

$\sigma_{min/min,a}$ = deviazione standard per la T calcolata.

Tutte le regolazioni del sistema di classificazione PG vengono effettuate con incrementi di 6 gradi. L'alta temperatura si riferisce agli effetti dell'ormaiamento e la bassa temperatura si riferisce alla rottura a fatica.

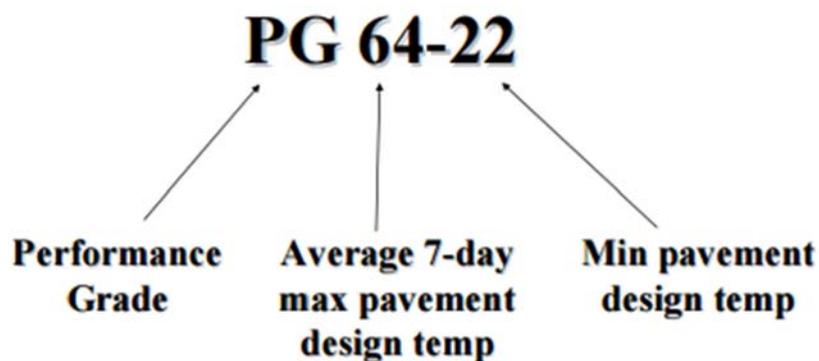


Figura 2.36 Classificazione SUPERPAVE

Le variabili che influenzano la selezione del legante bituminoso sono:

- Area geografica:
 - Temperatura dell'aria e radiazione solare;
 - Temperatura massima e minima del manto stradale;
- Volume del traffico;
- Velocità del traffico;
- Sforzi e tensioni nel manto stradale.

I sistemi tradizionali di classificazione del bitume di penetrazione e viscosità sono stati sviluppati conformemente alle esperienze passate. Lo scopo di queste procedure empiriche era quello di escludere le applicazioni che si erano rivelate non consone e di ripresentare, invece, quelle di maggior successo. I metodi empirici funzionano a condizione che tutto resti più o meno uguale tra una pavimentazione ed un'altra, quindi, con volumi di traffico ed escursioni termiche sempre uguali. Con un traffico che nell'ultimo periodo ha raggiunto livelli non prevedibili in passato e condizioni climatiche altrettanto diverse rispetto ad anni addietro (quando sono stati sviluppati i sistemi tradizionali di penetrazione e viscosità) appare evidente che occorre rivedere la classificazione dei leganti. Nel sistema SUPERPAVE è possibile utilizzare il volume di traffico effettivo e la velocità dei veicoli, velocità che rappresenta la durata dell'applicazione del carico.

Inoltre, I test convenzionali vengono condotti a una temperatura di test unica pari a 25 °C in penetrazione e di 60 °C nel test di viscosità, il che significa che il test di penetrazione non fornisce alcuna informazione sulle prestazioni a bassa e alta temperatura. La classificazione SUPERPAVE, invece, indica l'intervallo di temperatura di lavoro del legante (5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012, Istanbul).

Al contrario del sistema SUPERPAVE, il sistema di classificazione convenzionale non tiene in considerazione che il bitume è un materiale viscoelastico il cui comportamento è fortemente influenzato dalla velocità di applicazione del carico e dalla temperatura.

A parità del grado di penetrazione e della viscosità (parametri per la classificazione tradizionale del bitume), i leganti provenienti da una diversa fonte di petrolio possono avere un comportamento reologico diverso.

Altra caratteristica che differenzia i sistemi di classificazione tradizionale dal SUPERPAVE è che i primi non possono essere usati per bitumi modificati e quindi hanno, al contrario del sistema SUPERPAVE, un limitato campo di applicazione al giorno d'oggi, in quanto una larga fetta di mercato è coperta proprio dai bitumi modificati.

Altro vantaggio che offre il SUPERPAVE rispetto alla classificazione tradizionale è la possibilità di considerare anche l'invecchiamento dei bitumi, che rappresenta una delle proprietà più importanti nello studio della durata della pavimentazione stradale. Il SUPERPAVE permette di considerare sia l'invecchiamento a breve termine ottenuto mediante Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), sia quello a lungo termine mediante il Pressure Aging Vessel (PAV).

Ancora, il sistema di classificazione SUPERPAVE permette di classificare il bitume a diverse temperature siccome le proprietà di questo cambiano in base ad essa. A seconda della temperatura di esercizio, le proprietà del bitume contribuiscono in maniera differente alla resistenza di quest'ultimo. La parte di bitume che contribuisce alla resistenza alla *lacerazione* viene misurata alle massime temperature di esercizio della pavimentazione e richiede un legante più elastico e rigido. La parte di bitume che, invece, contribuisce alla resistenza alla *fatica* è più critica alle temperature medie della pavimentazione, perciò risulta necessario un legante elastico ma più morbido. Il contributo del bitume al *cracking* (fessurazione) termico è fondamentale solo alle temperature minime della pavimentazione e richiede un bitume meno elastico e morbido.

Infine, il sistema SUPERPAVE accerta (contrariamente ai metodi convenzionali che si basavano solo su due prove) l'esistenza di tre principali caratteristiche fisiche che influenzano le prestazioni delle pavimentazioni e queste sono lo strappo, la rottura a fatica e la rottura di origine termica.

Limitazioni sistemi di classificazione convenzionale come CA e AR	Superamento dei limiti mediante la classificazione SUPERPAVE
I test di penetrazione e duttilità sono empirici e non direttamente correlati alle prestazioni della pavimentazione.	Le proprietà fisiche misurate sono direttamente correlate alle prestazioni sul campo.
La gamma di temperature della pavimentazione in ogni sito non è adeguatamente coperta.	I criteri di prova rimangono costanti, tuttavia, la temperatura alla quale devono essere soddisfatti i criteri cambia in considerazione del grado di legante selezionato per le condizioni climatiche prevalenti.
I metodi di prova prendono in considerazione solo l'invecchiamento del legante di conglomerato bituminoso a breve termine (RTFOT) sebbene l'invecchiamento a lungo termine sia un fattore significativo nella rottura a fatica e nella rottura a bassa temperatura.	L'intera gamma di temperature della pavimentazione sperimentata in un determinato sito è coperta.
I leganti per conglomerato bituminoso possono avere caratteristiche significativamente diverse all'interno della stessa categoria di classificazione.	Tre età critiche del legante che vengono simulate e testate: 1. Legante per conglomerato bituminoso originale prima della miscelazione con aggregato (bitume vergine) 2. Legante per conglomerato bituminoso invecchiato dopo RTFOT. 3. Legante per conglomerato bituminoso invecchiato a lungo termine (PAV).
I leganti per conglomerato bituminoso modificati non sono adatti per questi sistemi di classificazione.	I test possono essere svolti sia su bitumi non modificati sia su bitumi modificati con l'aggiunta di polimeri.

Figura 2.37 Confronto sistemi prestazionali

In allegato (allegato A) si riporta la tabella per la classificazione SUPERPAVE secondo la specifica AASHTO.

Nel caso di bitumi modificati, non sempre l'approccio SUPERPAVE risulta essere efficace a causa di una possibile sottostima delle effettive proprietà dei materiali di nuova generazione (bitumi modificati con additivi). Per ovviare a questo problema, vengono oggi proposti nuovi metodi di prova relativi per lo più all'ormaiamento (Multiple Stress Creep Recovery Tests) e alla fatica (Time Sweep Tests) di cui se ne riporta un breve cenno:

- Il *Multiple Stress Creep Recovery Tests* (AASHTO TP 70-10) consiste in una prova eseguita al Dynamic Shear Rheometer a frequenza e temperatura costante, imponendo cicli ripetuti di creep-recovery a differenti livelli tensionali in cui simula un modello di traffico gravante sulla pavimentazione e che, tra il passaggio di una vettura e quella successiva, ci sia un lasso temporale in cui il materiale recupera deformazione.

La prova prevede una serie di 10 cicli di creep da un secondo l'uno, sia a 0,1 kPa sia a 3,2 kPa, e un recupero tra due di essi pari a 9 secondi.

Ciò che se ne ricava è l'*Indice Prestazionale* così espresso:

$$J_{nr} = \frac{(\gamma_{nr}/10)}{\tau} \quad (2.85)$$

Da cui ottenere:

$$J_{nr0,1}(0,1 \text{ kPa}) \quad e \quad J_{nr3,2}(3,2 \text{ kPa}) \quad (2.86)$$

Dove:

γ_{nr} = *deformazione*

τ = *tensioni tangenziali*

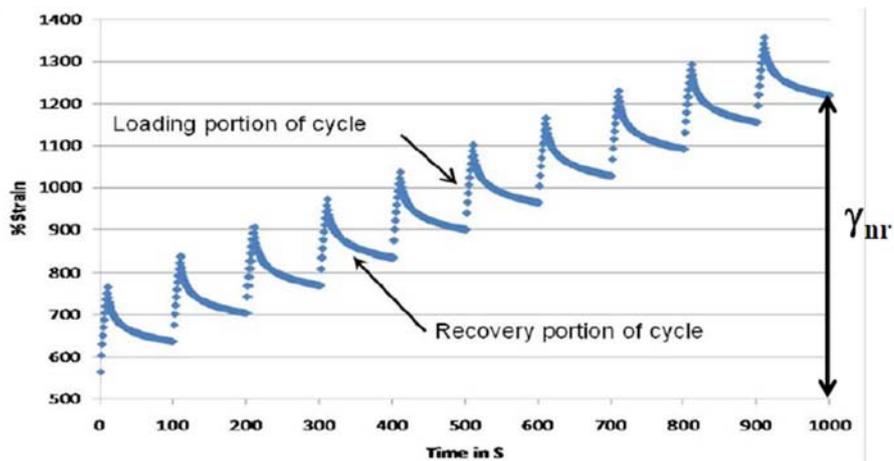


Figura 2.38 Multiple Stress Creep Recovery Tests

- Il *Time Sweep Tests* (NCHRP 9-10) è una prova eseguita al DSR con temperatura e frequenza costante fino al raggiungimento della rottura del materiale. Per effetto dell'accumulo di danno nel corso della prova, il Modulo Complesso G^* subisce una progressiva diminuzione con, sul finale, un rapido decadimento.

L'interpretazione dei dati avviene mediante un approccio di tipo energetico misurando:

- Energia specifica dissipata ad ogni ciclo di carico

$$W_i = \pi \tau_{0,i} \gamma_{0,i} \sin(\delta_i) \quad (2.87)$$

Dove:

$\gamma_{0,i}$ = deformazione dell' i – esimo ciclo

$\tau_{0,i}$ = tensione tangenziale dell' i – esimo ciclo

δ_i = d'angolo di fase dell' i – esimo ciclo

- Rapporto dell'energia dissipata (Dissipated Energy Ratio)

$$DER = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{W_n} \quad (2.88)$$

Dove:

W_n = energia totale dissipata

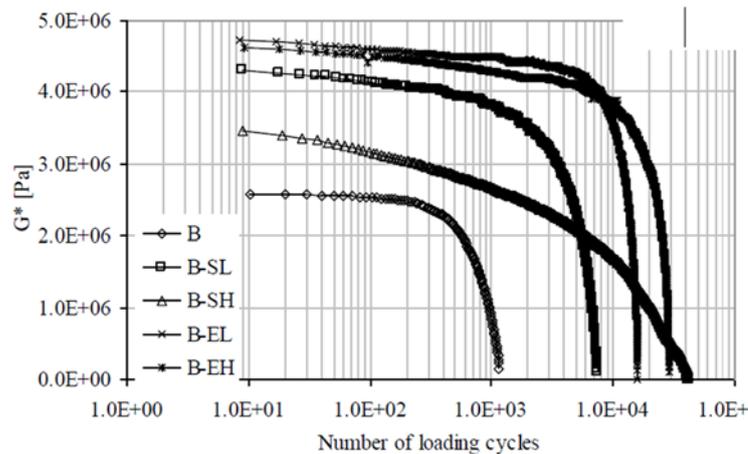


Figura 2.39 Time Sweep Tests

2.10.1 PARAMETRI DI CONTROLLO

I parametri di controllo su cui fonda il sistema di classificazione prestazionale SUPERPAVE sono, come già specificato in precedenza, dei parametri oggettivi e ripetibili, cioè, che forniscono risultati analoghi in qualsiasi contesto essi vengano effettuati, sia esso un'altra apparecchiatura o sia in un altro lasso temporale. Non dipenderanno, dunque, né dall'operatore da cui sono effettuate le prove né dalle condizioni esterne a quelle di prova. Il vantaggio dei valori forniti da queste prove rispetto a prove empiriche (come quelle analizzate per l'altro tipo di classificazione del bitume) risulta, quindi, essere scontato. Lì dove possibile, sono sempre da preferire prove di tipo obiettivo rispetto a prove empiriche, ed è appunto per questo che si preferisce adottare il sistema di classificazione prestazionale rispetto a quello empirico. Di seguito sono riportate le prove che richiede il sistema SUPERPAVE con relativi parametri di controllo.

2.10.1.1 ORMAIAMENTO

L'*ormaiamento* è un fenomeno di deformazione del manto stradale che può coinvolgere tutte le pavimentazioni di tipo elastico. Questo fenomeno compromette la percorrenza della strada da parte dell'utente in termini di sicurezza e comfort. Esso consiste nella formazione di depressioni longitudinali (nel senso di marcia dei veicoli) con spesso al margine degli avvallamenti di materiale che vanno a formare delle piccole cunette. Qualora questi accumuli laterali di materiale dovessero essere assenti, la causa dell'*ormaiatura* è da ricercare nell'eccessiva presenza di vuoti d'aria all'interno del conglomerato o ad una insufficiente compattazione di quest'ultimo. Queste deformazioni sono di tipo permanente in seguito all'accumulo di deformazioni plastiche e sono dovute ai ripetuti carichi impressi prevalentemente da mezzi pesanti. La deformazione, visibile solo sul manto stradale, coinvolge, però, tutti gli strati della pavimentazione, dai più superficiali fino anche al sottofondo. Questo fenomeno è del tutto assente, invece, nel caso in cui ci si trovasse davanti ad un'infrastruttura viaria del tipo rigido o semi-rigido proprio perché l'accumulo di deformazioni permanenti è caratteristico di una pavimentazione flessibile ed elastica. Il fenomeno dell'*ormaiamento* è facilmente visibile senza l'ausilio di strumentazione tecnica nel caso di pioggia in cui, per l'appunto, la deformazione creata va riempiendosi d'acqua. Ciò comporta un problema di smaltimento delle acque piovane verso i margini della carreggiata, riducendo la capacità drenante dell'intera infrastruttura ed innescando, così, il fenomeno dell'*aquaplaning* con conseguente perdita di aderenza.

Risulta opportuno, quindi, il controllo di tale deformazione, imponendo dei limiti prestazionali minimi da garantire. Il rispetto di tali limiti dipende dal bitume e la sperimentazione effettuata consiste in una prova al Dynamic Shear Rheometer in cui si impone un limite inferiore al valore di $G^*/\sin \delta$ sia per il bitume vergine sia per il bitume invecchiato a breve termine (trattato al RTFOT). La prova consiste nell'applicare una frequenza angolare ω pari a 10 rad/s ad una temperatura pari alla temperatura massima di progetto della pavimentazione da cui ricavare $G^*/\sin \delta$ e impostare i seguenti limiti:

$$G^*/\sin \delta \geq 1,00 \text{ kPa} \quad \text{per bitume vergine}$$

$$G^*/\sin \delta \geq 2,20 \text{ kPa} \quad \text{per bitume trattato al RTFOT}$$

Con la prova si vogliono simulare le condizioni più critiche della pavimentazione e cioè alle alte temperature di servizio (clima caldo) con traffico lento (70 km/h) e nella condizione di bitume appena steso (invecchiato a breve termine) per cui il bitume risulta essere più deformabile.

È necessario imporre una soglia minima al parametro $G^*/\sin \delta$ per garantire al contempo un sufficiente grado di rigidità ed elasticità al fine di contrastare l'accumulo di deformazioni permanenti.



Figura 2.40 Esempio di ormaimento

2.10.1.2 FATICA

Uno dei principali fenomeni di deterioramento dell'infrastruttura viaria è il fenomeno della *fatica* che comporta un danneggiamento dell'intera sovrastruttura stradale. Questa si verifica al ripetersi ciclico di carichi dovuti al passaggio dei vari veicoli e all'eccessivo deterioramento del legante bituminoso nel lungo periodo, circostanze che determinano, più nello specifico, la perdita di rigidità e, conseguenzialmente, la degradazione degli strati legati. L'accumulo delle sollecitazioni comporta la formazione di rottura a fatica.

Come per il fenomeno dell'ormaiamento, anche questo deterioramento della strada comporta ripercussioni sul comfort di percorrenza della stessa e della sicurezza degli utenti, oltre che provocare un incremento esponenziale nel degrado della pavimentazione già al formarsi delle prime crepe.

Le rotture a fatica possono essere raggruppate in due sottocategorie:

- Rottura a fatica di tipo *bottom-up*, denominata anche a pelle di coccodrillo per via della forma ramificata che assume la pavimentazione soggetta a questo deterioramento, che prende vita dal fondo dello strato interessato, diramandosi successivamente verso la superficie ed apparendo inizialmente come un'unica crepa longitudinale, che segue l'impronta degli pneumatici del veicolo, per diffondersi, successivamente, su tutto il manto stradale a formare segni poliedrici ad angoli acuti.

Alla base della rottura a fatica di tipo *bottom-up* vi è, da parte del traffico stradale, una continua e ripetuta sollecitazione a flessione dello strato interessato e, quindi, una

compressione della parte superiore e una trazione della parte inferiore che, a lungo andare, provoca fessure (si veda l'analogia di una trave in calcestruzzo armato sottoposta a carico uniformemente distribuito poco armata a flessione). Con l'aumentare del numero di carichi e l'invecchiamento del bitume, queste fessure avanzano risalendo tutto lo strato e manifestandosi sulla superficie quando ormai è già tardi per poter intervenire.

Alcune cause che portano alla formazione di tali fessure possono essere:

- inadeguata compattazione degli strati inferiori e quindi incapacità di questi di assorbire le sollecitazioni provenienti dagli strati più superficiali;
- spessori troppo esigui per il tipo di carichi agenti su di essi;
- carichi superiori a quelli ipotizzati in fase di progetto;
- impiego di materiali non idonei a sopportare tali carichi;
- innalzamento del livello della falda acquifera.



Figura 2.41 Tipica rottura a “pelle di coccodrillo”

- Rottura a fatica di tipo *top-down*. Anche in questo caso, l'invecchiamento del bitume innesca (o accelera) il processo di formazione di questo tipo di crepe che, a differenza di quelle precedenti, partono dalla superficie per poi propagarsi nel sottofondo. La concomitanza dell'aumento della rigidità con il carico in prossimità del bordo degli pneumatici rappresenta la causa principale di questo fenomeno. Ad oggi, in letteratura, sono ancora molti gli studiosi che portano avanti la ricerca in merito alla rottura a fatica di tipo *top-down*, quindi si preferisce non entrare nel dettaglio non essendo questo il caso studio del seguente elaborato. Si può,

però, affermare che, se nel caso precedente la rottura era per un carico flessionale, in questo caso si ha invece per carichi di taglio.



Figura 2.42 Rottura di tipo top-down

Anche in questo caso, il sistema di classificazione prestazionale SUPERPAVE impone il rispetto di alcuni limiti imposti al legante bituminoso idonei a garantire una durata ottimale nel tempo dell'intera infrastruttura. La strumentazione impiegata è il Dynamic Shear Rheometer a cui si impone una temperatura di prova pari a quella intermedia della pavimentazione valutata in fase di progetto ed una frequenza angolare ω pari a 10 rad/s da cui ricavare il valore di $G^* \cdot \sin \delta$ (modulo di dissipazione viscoso) ed imporre il seguente limite:

$$G^* \cdot \sin \delta \leq 5000 \text{ kPa} \quad \text{per bitume trattato al PAV}$$

Anche se il fenomeno coinvolge tutte le fasi della vita di esercizio, con la prova si vogliono simulare le condizioni di invecchiamento più rappresentative e, cioè, nella condizione di bitume invecchiato a lungo termine, siccome il fenomeno della fatica è un fenomeno che avviene nel lungo periodo e non nel breve.

È necessario imporre una soglia massima al parametro $G^* \cdot \sin \delta$ per evitare la rottura a fatica, limitando l'energia dissipata nel ciclo di carico e scarico della pavimentazione per garantire una sufficiente resistenza al danneggiamento per fatica.

2.10.1.3 ROTTURA DI ORIGINE TERMICA

La *rottura di origine termica* è quella che maggiormente caratterizza le pavimentazioni in misto-cementato (a causa della drastica riduzione di temperatura che si ha con il ritiro del calcestruzzo, a seguito dell'evaporazione dell'acqua data dalle alte temperature che si raggiungono per le reazioni chimiche alla base del processo di indurimento del calcestruzzo, è possibile vedere fessurazioni di origine termica anche a poche ore dalla stesa della pavimentazione se non opportunamente intervallata da giunti artificiali progettati ad opera d'arte) ma che si presenta assiduamente anche nelle pavimentazioni stradali di tipo flessibile - conglomerato bituminoso con sottofondo flessibile - e che può verificarsi sia nell'arco di un anno, sia nella singola giornata per via dell'escursione termica tra il giorno e la notte che, in alcuni casi particolari come quelli desertici, può essere davvero significativa (diverse decine di gradi) e provocare così delle coazioni all'interno del materiale con inevitabile rottura.

La fessura di origine termica appare come fessura che corre trasversalmente all'infrastruttura viaria, compromettendone così la corretta percorrenza da parte dei veicoli e il comfort degli utenti.

Anche in questo caso si può fare una distinzione della fessura di origine termica in base all'origine di quest'ultima e si distinguono in:

- *Low Temperature Cracking* che avviene quando si raggiungono temperature molto rigide per cui il bitume tende a ritirarsi creando così fessure. Ciò accade prevalentemente in regioni dal clima molto freddo;
- *Thermal Fatigue Cracking*, di gran lunga le più diffuse alle nostre latitudini, che si presentano per forti escursioni termiche cicliche che possono essere, come su accennato, giornaliere o stagionali.

A differenza delle altre fessurazioni, quelle termiche non necessitano di un carico applicato per manifestarsi ma è sufficiente una causa esclusivamente di natura geografica.

Come per gli altri tipi di fessura su analizzate, il sistema di classificazione prestazionale SUPERPAVE impone dei limiti sui parametri di controllo. In questo caso si fa ricorso al Bending Beam Rheometer (BBR) per valutare la rigidità flessionale S_{60} e il rilassamento m_{60} per bitume invecchiato a lungo termine per un tempo di carico pari a 60 s e una temperatura corrispondente a quella minima di progetto a cui sono da aggiungere 10 °C (Temperatura di Past Fail) per il principio di equivalenza tempo-temperatura che permette di passare ad un tempo di carico di 60 s da uno iniziale di 2 ore aumentando la temperatura a cui si effettua il test di 10 °C. I limiti imposti dal sistema SUPERPAVE sono:

$S_{60} \leq 300 \text{ MPa}$ per bitume trattato al PAV

$m_{60} \geq 0,3$ per bitume trattato al PAV

La limitazione alla rigidità flessionale S_{60} la si impone per garantire una rigidità sufficientemente ridotta ed evitare uno stato di coazione troppo elevato all'interno del bitume, così che questo possa essere dissipato il prima possibile per evitare che questa azione possa sommarsi alle altre in gioco durante la vita dell'infrastruttura. Per un motivo analogo si vuole che il valore di rilassamento m_{60} sia superiore al limite su imposto, ciò permette, per l'appunto, il rilassamento del bitume in un tempo accettabile

Le condizioni più gravose a cui può essere soggetta la pavimentazione sono riprodotte in laboratorio scegliendo di testare un materiale invecchiato a lungo termine a causa sempre dell'aumento della rigidità nella condizione di temperatura più gravosa che non corrisponde alla minima in termini assoluti ma c'è da considerare anche una possibile sovrapposizione delle azioni di origine termica con quelle date dai carichi veicolari. Siccome si presuppone che il traffico sia maggiore nelle ore diurne, la temperatura minima di progetto corrisponde alla temperatura più bassa registrata nell'arco dell'anno incrementata di 4 °C.

Vi è la possibilità che la prova al BBR non rispetti i requisiti riportati precedentemente o che, comunque, la rigidità non sia un fattore in assoluto necessario per controllare la fessurazione termica, si ricorre, allora, ad un'ulteriore analisi non di tipo reologico che consiste nel misurare il livello di deformazione necessario a portare a rottura il materiale (duttilità). Tale prova è nota con l'acronimo DTT (Direct Tension Test) che prevede una temperatura a cui sottoporre il campione pari alla minima incrementata di 10 °C, una velocità di elongazione di 1 mm/min e deve verificare che:

$$\varepsilon_f \geq 1 \text{ mm/min}$$

Dove:

$$\varepsilon_f = \text{deformazione finale}$$

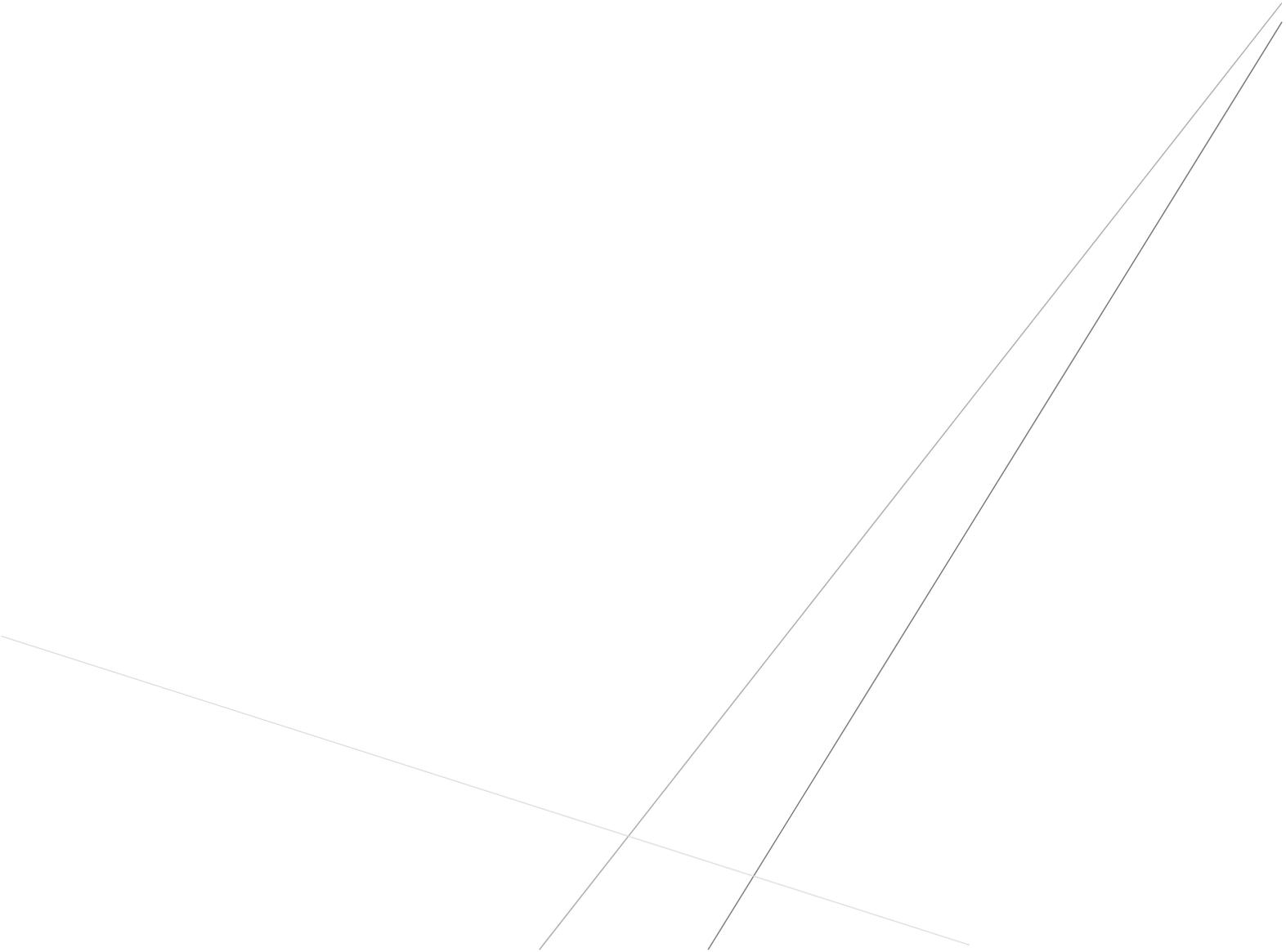
Resta comunque la restrizione della prova al BBR per cui si deve avere:

$S_{60} \leq 600 \text{ MPa}$



Figura 2.43 Fessura di origine termica

3. *INVECCHIAMENTO DEI BITUMI*

The page features decorative lines in the bottom right corner. A single thin line starts from the bottom left and extends towards the bottom right. Two parallel lines start from the bottom center and extend towards the top right corner.

3.1 INTRODUZIONE ALL'INVECCHIAMENTO DEL BITUME

Nel corso della vita di esercizio di una pavimentazione stradale, il bitume, per un naturale processo di invecchiamento, subisce una inevitabile e progressiva modifica delle proprie caratteristiche chimico-fisiche. L'invecchiamento fa sì che le proprietà di rivestimento dell'aggregato da parte del bitume siano ridotte, favorendo, così, la separazione del conglomerato. Altro aspetto negativo legato all'invecchiamento del bitume sono la scarsa adesione e l'aumento dell'elasticità, e quindi un comportamento sempre più rigido e meno viscoso. Sin da subito, è doveroso precisare che il fenomeno dell'invecchiamento del bitume è un processo irreversibile e che questo dipende in prima battuta sia dal percorso produttivo che il bitume ha subito, sia dall'origine della materia prima impiegata.

Pur se non argomento di tesi, è doveroso fare una precisazione sintetica sul riutilizzo del bitume invecchiato nell'ambito stradale.

Negli ultimi anni è sempre più al centro di studi, per via di una crescente sensibilità verso l'ambiente e la sostenibilità, la possibilità di riciclare il manto stradale per successive applicazioni, al fine di limitare l'impatto ambientale anche nel campo delle infrastrutture viarie. L'invecchiamento del bitume, con le conseguenze che si sono su elencate, rende questa operazione ancora più complessa, siccome non garantisce gli standard qualitativi richiesti per una nuova pavimentazione. Vi è dunque la necessità di aggiungere additivi al punto che il bitume possa riacquistare quelle proprietà iniziali perse nel tempo. I principali additivi a cui si fa ricorso sono di tipo ringiovanente e ammorbidente. I primi consentono il ripristino delle proprietà chimico-fisiche, i secondi, invece, permettono di ridurre la viscosità del bitume invecchiato.

L'invecchiamento del bitume è forse il parametro a cui bisogna prestare maggiore attenzione quando si vuole affrontare la progettazione di una nuova infrastruttura o, più semplicemente, il rifacimento di una già esistente.

Da questo, infatti, dipende la prestazione e la durata dell'opera nell'intera sua vita di esercizio. Una buona progettazione che, però, non ha preso in giusta considerazione gli effetti dell'invecchiamento, inesorabilmente porterà al riscontro di problematiche nel breve periodo, anche subito dopo la stesa.

Il sistema di classificazione prestazionale SUPERPAVE, di cui si è ampiamente trattato nei capitoli precedenti, infatti, prescrive delle limitazioni da dover rispettare sia per quanto riguarda bitumi vergini sia per quelli invecchiati. Un classico esempio è la prova di ormaiamento che vede le sue condizioni più critiche nel caso di bitume invecchiato a breve termine o anche della prova a fatica che, invece, è da

effettuarsi per bitume invecchiato a lungo termine, siccome si avrà un drastico aumento della rigidità (Derossi L. 2014).

Nell'invecchiamento del bitume sono da distinguere due diverse fasi contraddistinte da tempi e caratteristiche molto differenti e queste sono:

- invecchiamento del bitume a breve termine;
- invecchiamento del bitume a lungo termine.

Nei paragrafi successivi si andranno ad approfondire i tipi di invecchiamento.

3.2 INVECCHIAMENTO A BREVE TERMINE

Per *invecchiamento a breve termine* (short term aging) ci si riferisce a quel processo chimico che avviene già dai primi istanti della formazione del conglomerato bituminoso e che riguarda le fasi di miscelazione e costruzione (trasporto e stesa). In questa prima fase, il bitume tende ad avvolgere gli aggregati con una sottile patina, il tutto ad una temperatura compresa tra i 150 °C e i 180 °C. Le alte temperature portano al verificarsi di un processo fisico-chimico contraddistinto da tre fenomeni:

- *volatilizzazione*, comporta la perdita dei componenti volatili del bitume che sono a basso punto di evaporazione;
- *ossidazione*, si ha un irrigidimento del bitume al seguito della rottura dei legami covalenti da parte dell'ossigeno creando polarità all'interno dello stesso;
- *polimerizzazione*, porta alla formazione di catene a peso molecolare più alto.

Il processo di invecchiamento a breve termine, come già accennato, inizia dalla fase di miscelazione per poi proseguire per tutto il tempo del trasporto in situ e finire al termine delle operazioni di messa in opera da parte della finitrice stradale e compattazione da parte dei rulli meccanici.

Per rappresentare le condizioni di un bitume invecchiato a breve termine, è possibile fare ricorso al *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) che va a simulare i fenomeni che avvengono nella realtà, fornendo risultati abbastanza veritieri.

3.3 INVECCHIAMENTO A LUNGO TERMINE

Differente è, invece, il caso di *invecchiamento a lungo termine* (long Term Aging) che entra in gioco col finire del processo di invecchiamento a breve termine e che si protrae per tutta la durata della fase di esercizio dell'infrastruttura viaria. In questo caso, le temperature in gioco sono molto differenti (corrispondono alle temperature di esercizio della pavimentazione stradale) e mai elevate come le precedenti. Il deterioramento del bitume è distribuito su un lasso di tempo molto lungo e il processo sperimentale di laboratorio che meglio descrive il fenomeno è quello del *Pressure Aging Vessel* (PAV) riproducendo, al termine della prova, le condizioni che si avrebbero su un bitume invecchiato tra i 7 e i 10 anni.

I processi fisico-chimici derivanti dall'invecchiamento a lungo termine sono:

- *ossidazione*, si ha un irrigidimento del bitume a seguito della rottura dei legami covalenti da parte dell'ossigeno, creando polarità all'interno dello stesso;
- *polimerizzazione*, porta alla formazione di catene a peso molecolare più alto.

A differenza dell'invecchiamento a breve termine, non è presente il processo di volatilizzazione siccome tutte le componenti volatili sono andate perse nelle fasi precedenti (miscelazione e stesa).

I fattori che caratterizzano l'invecchiamento a lungo termine della pavimentazione sono differenti e possono essere sia di natura progettuale sia di natura ambientale. Il grado di invecchiamento dipenderà sicuramente dallo strato di conglomerato bituminoso che si analizza. Uno strato più superficiale (come ad esempio potrebbe essere il manto di usura rispetto al binder o alla base) sarà soggetto ad un invecchiamento molto più precoce di uno strato più profondo, questo sia perché lo strato superficiale è più a contatto con l'aria (quindi maggior grado di ossidazione), sia perché si hanno condizioni climatiche più accentuate, come l'esposizione diretta ai raggi UV provenienti dal sole e le rigide temperature dei mesi invernali, precisando che il gelo è un parametro che influisce considerevolmente sul processo dell'invecchiamento.

3.4 EFFETTI SULLA CHIMICA DEL BITUME

In seguito al processo di “aging”, il bitume subisce una sostanziale variazione dal punto di vista chimico, dettata dalle trasformazioni delle frazioni che lo compongono. L’invecchiamento comporta una diminuzione del contenuto degli aromatici e, conseguenzialmente, un aumento in percentuale del contenuto di asfalteni e resine, mentre resta pressoché invariato il quantitativo di oli saturi. Questa variazione è giustificabile se si considera che durante il processo di invecchiamento gli aromatici tendono a generare le resine che, a loro volta, si modificano dando così vita agli asfalteni (Wright, 1965).

Viene di seguito riportata una figura che mostra dei dati sperimentali di studi condotti da Francas nel 1998 in cui confronta quattro differenti bitumi per composizione chimica e provenienza e la relativa variazione dei componenti in seguito ad un’analisi SARA pre e post invecchiamento mediante il Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), rispettivamente dopo 85 minuti e 340 minuti (Francas, 1998).

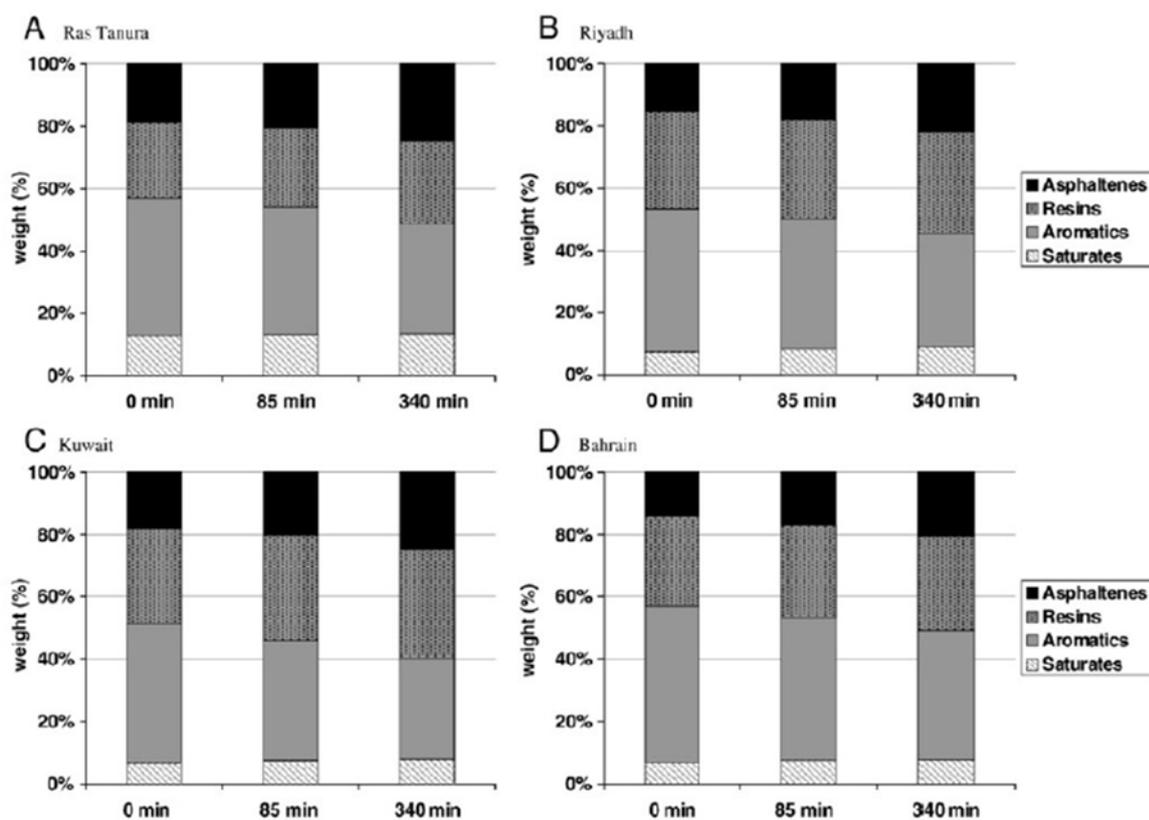


Figura 3.1 Variazione componenti bitume in funzione del tempo

3.5 EFFETTI SULLA REOLOGIA DEL BITUME

Conseguenzialmente alla variazione della composizione chimica del bitume, il fenomeno dell'invecchiamento comporta anche un inevitabile cambiamento del comportamento reologico del legante bituminoso. Mediante prove reologiche si può determinare il grado di invecchiamento di un bitume.

È possibile definire un parametro che si fonda sulla variazione della viscosità per determinare questo grado di invecchiamento. Tale parametro prende il nome di *indice di invecchiamento* (Aging Index) ed è definito come:

$$AI = \frac{\eta_r}{\eta_0} \quad (3.1)$$

Dove:

η_r = viscosità del bitume invecchiato

η_0 = viscosità del bitume non invecchiato

Dalla figura (Fig. 3.2) sotto riportata si può osservare come la variazione maggiore dell'indice di invecchiamento si ha durante la fase primaria, e cioè durante l'invecchiamento a breve termine, in seguito all'accelerazione dei fenomeni di ossidazione dati dalle elevate temperature che si raggiungono nella fase di miscelazione del bitume con gli aggregati lapidei, andando così a formare il conglomerato bituminoso. Oltre che con riferimento alle proprietà meccaniche, è possibile definire gli effetti dell'invecchiamento sulla base di variazioni che avvengono nella costituzione chimica (Montepara e Giuliani, 1998).

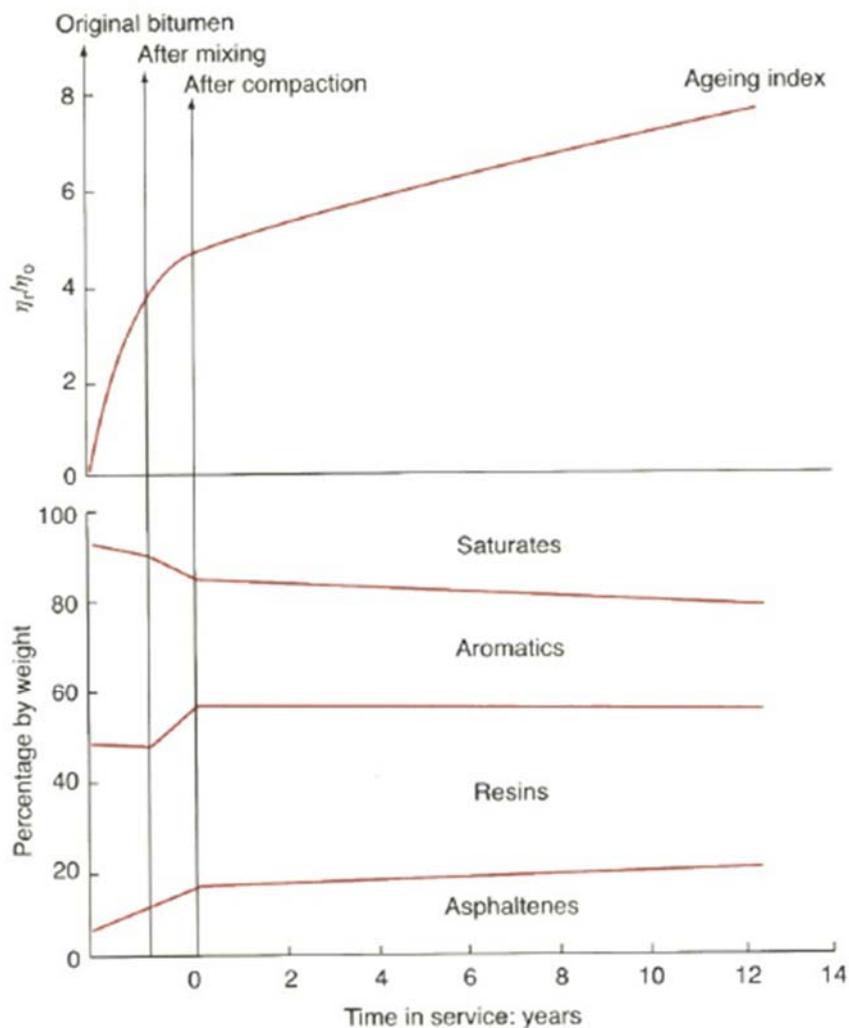
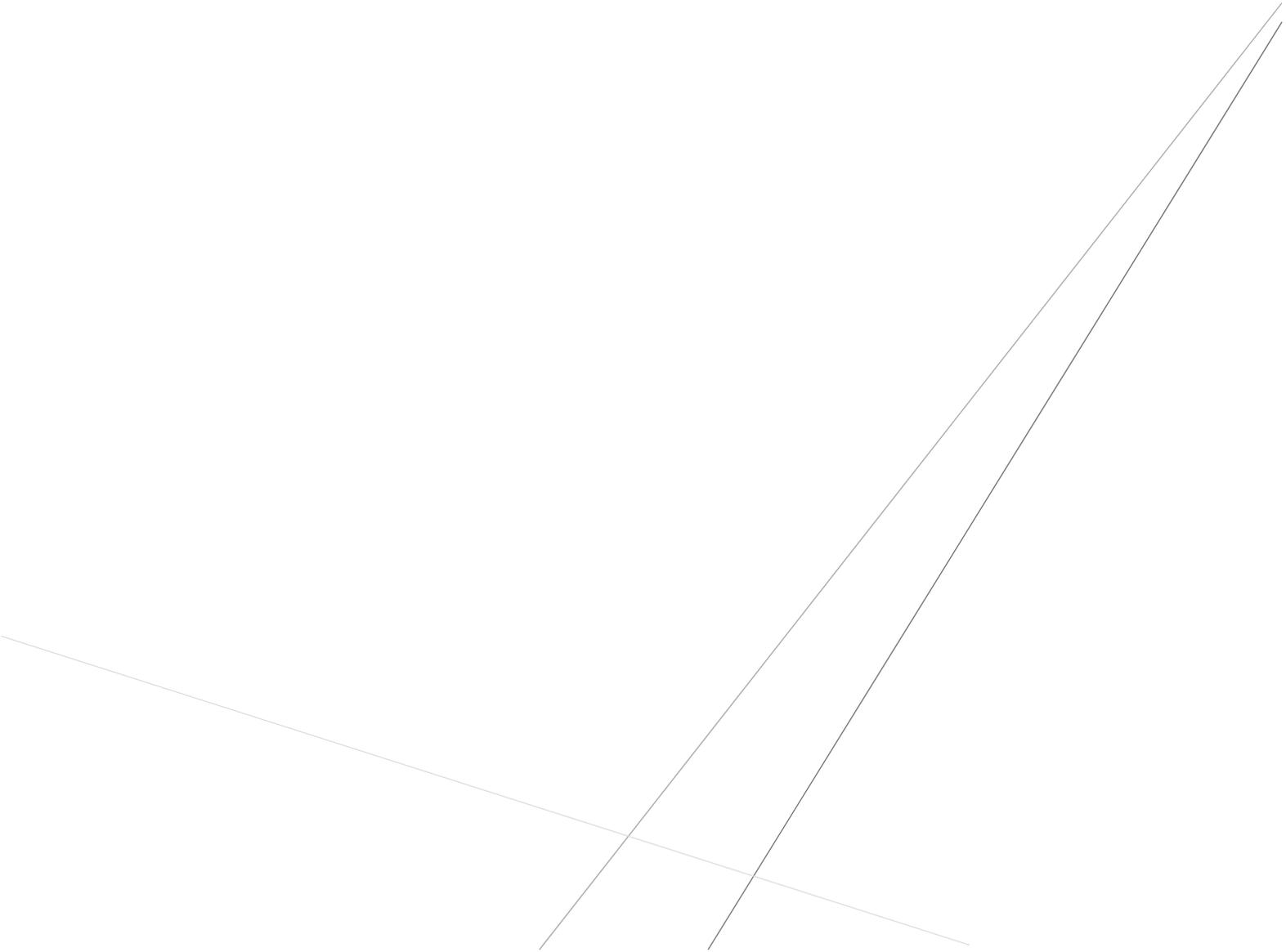


Figura 3.2 Aging Index (sopra) e variazione delle componenti del bitume (sotto)

Sempre dalla figura 3.2 si nota come quasi tutte le variazioni, sia in termini di indice di invecchiamento, sia per quanto riguarda la composizione chimica del bitume ricavata mediante analisi SARA, avvengono nel breve periodo e, quindi, sono conseguenza dell'invecchiamento a breve termine. Variazioni minori, invece, si registrano per lunghi periodi (invecchiamento a lungo termine). Ciò lascia intuire come l'invecchiamento a breve termine sia un processo molto più "gravoso" e importante rispetto a quello a lungo termine.

Andando più nel dettaglio, è possibile osservare nel tempo una progressiva diminuzione dei componenti del bitume, ad eccezione della frazione asfaltenica che beneficia, appunto, della diminuzione degli alti (Grilli A. N.D).

4. PROVE SPERIMENTALI



4.1 INTRODUZIONI ALLE PROVE SPERIMENTALI

Fondamentale per la stesura del presente elaborato è stata l'analisi e la raccolta di dati sulla base di sperimentazioni scientifiche oggettive, con la possibilità di replicare le prove in tempi differenti ed in altri luoghi ottenendo, con una variabilità che caratterizza le prove sperimentali, gli stessi risultati.

Le prove sperimentali che hanno portato ai risultati di questo studio sono state effettuate nel laboratorio di materiali stradali del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino. Per le diverse prove si è fatto riferimento alle normative europee ed americane sulla base di quelle indicate individualmente dalla specifica strumentazione.

4.2 MATERIALI IMPIEGATI

I bitumi analizzati nel corso della sperimentazione sono stati 8, classificati ognuno con una differente lettera:

- Bitume A;
- Bitume B;
- Bitume C;
- Bitume D;
- Bitume E;
- Bitume F;
- Bitume G;
- Bitume H.

La sola distinzione che si può fare sui bitumi è se sono stati modificati con additivi liquidi, con polimeri o, invece, sono bitumi non modificati.

I bitumi modificati con additivi liquidi sono i bitumi A, B e C, quelli con polimeri, invece, sono i bitumi F e H mentre i restanti D, E e G sono bitumi tal quali.

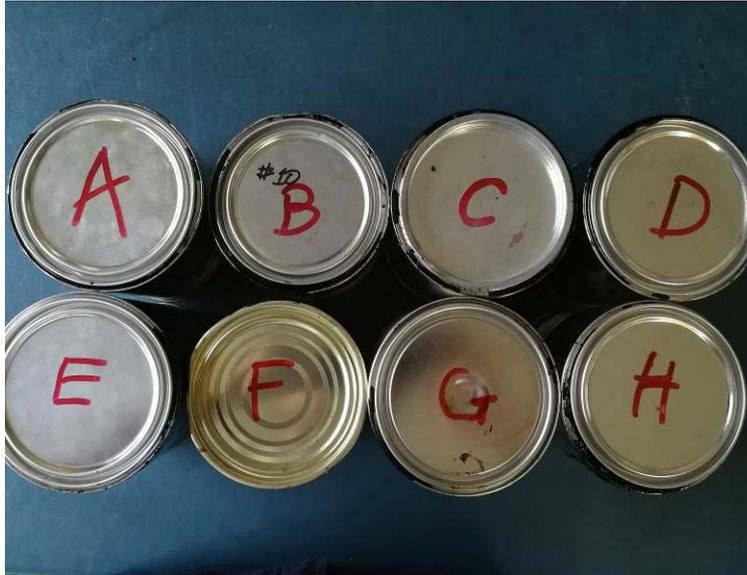


Figura 4.1 Bitumi adoperati

Tutti i bitumi hanno subito inizialmente un processo di invecchiamento a breve termine mediante Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) e successivamente un invecchiamento a lungo termine con il Pressure Aging Vessel (PAV). A seguito dell'eccessiva presenza di aria a causa del processo di invecchiamento a lungo termine, all'interno dei campioni di bitume, una volta terminata la prova al PAV, è stato doveroso procedere con la prova di degassing necessaria, appunto, a ridurre la presenza di aria all'interno di questo.



Figura 4.2 Prelievo campione bitume (Sx) e bitume scaldato (Dx)

Per motivazioni tecniche dettate dai macchinari del laboratorio, i campioni sono stati analizzati a coppia di quattro, quindi, prima i bitumi A, B, C e D e successivamente E, F, G, H.

Per motivi legati a brevetti industriali dietro ai bitumi analizzati non è possibile specificare la componente chimica che caratterizza ognuno di essi, si può però far presente che tra questi vi sono bitumi con additivi liquidi, bitumi modificati con polimeri e bitumi tal quali.

Si è optato di testare un gran numero di campioni di bitume differenti per garantire una miglior relazione dei dati sperimentali e uno spettro di casistica più ampio che potesse comprendere materiali con caratteristiche chimico-fisiche molto differenti l'uno dall'altro.

4.3 ATTREZZATURE ADOPERATE

Come anticipato nel paragrafo precedente, per l'invecchiamento del bitume, a breve termine prima e a lungo termine successivamente, si è fatto ricorso alla tradizionale strumentazione quale il Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) e il Pressure Aging Vessel (PAV) per poi eseguire un ciclo di degassing con un forno collegato ad una pompa, che permette di lavorare con pressione nulla (si crea il vuoto). Infine,

i materiali così invecchiati e degasati sono stati sottoposti a prove che ne determinassero parametri come il modulo complesso, l'angolo di fase, la temperatura, la deflessione, la forza ecc... ottenuti grazie al Bending Beam Rheometer (BBR) e al Dynamic Shear Rheometer (DSR), più comunemente indicato solo con il nome di reometro.

Si procederà, dunque, ad analizzare le varie strumentazioni attenendosi al seguente elenco:

- Rolling Thin Film Oven Test;
- Pressure Aging Vessel;
- Degassing;
- Bending Beam Rheometer;
- Dynamic Shear Rheometer.

4.3.1 ROLLING THIN FILM OVEN TEST

La prova del *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), elaborata nel 1963 in California, fu il frutto dell'evoluzione della precedente prova *Thin Film Oven Test* (TFOT). Quest'ultima prevedeva che si formasse con il bitume uno strato di spessore pari a 3 mm e che, successivamente, venisse tenuto alla temperatura di 163 °C per un tempo di 5 ore. Il motivo che portò all'elaborazione di una prova più evoluta è legato al fatto che nella prova TFOT non si raggiungeva un grado uniforme di invecchiamento nel bitume in quanto il processo di ossidazione riguardava maggiormente lo strato superficiale.

Con l'avvento del nuovo metodo RTFOT si è trovata una valida soluzione per risolvere il problema dell'ossidazione non omogenea. Il test consiste, infatti, nel posizionare il bitume all'interno di contenitori cilindrici con il bordo rialzato in cui colare dentro una determinata quantità di bitume, una volta posizionati i bicchieri in un forno, questi vengono messi in movimento rotazionale permettendo così al bitume di colare lungo le pareti e garantendo per tutto il materiale una buona omogeneizzazione.

Lo scopo della prova *Rolling Thin Film Oven Test*, come già detto, è quello di simulare l'invecchiamento del bitume a breve termine, cioè, l'invecchiamento che si ha nel caso reale durante tutti i processi produttivi fino alla stesa e compattazione del manto stradale. Nella fase di miscelazione del conglomerato bituminoso, il bitume forma sulla superficie dell'aggregato un film molto sottile che si ossida molto velocemente, da qui la necessità di riprodurre in laboratorio uno strato sottile durante l'esecuzione della prova (*Thin Film*).

Fino allo scorso secolo, per uso stradale si faceva ricorso esclusivamente a bitumi tradizionali e la prova del RTFOT venne improntata proprio su questa categoria di materiale che presentano una viscosità molto differente dai bitumi adoperati oggi arricchiti con additivi e agenti modificanti. La prova del RTFOT, dunque, non si presta bene per l'invecchiamento dei bitumi modificati per via della diversa temperatura necessaria a raggiungere lo stesso grado di viscosità. Può capitare che nell'invecchiamento dei bitumi modificati si vada incontro ad una non perfetta omogeneizzazione del grado di ossidazione a causa dell'incapacità del materiale stesso a fluire lungo le pareti laterali del bicchiere. Sempre per il motivo legato alla viscosità, un altro problema lo si riscontra nella preparazione dei campioni e nel prelievo del bitume una volta eseguita la prova. La norma stessa evidenzia come in caso di bitumi modificati o che comunque presentino una viscosità eccessiva non sia opportuno adoperare tale procedura non esprimendo, però, come comportarsi in questa circostanza. Una soluzione a questo inconveniente potrebbe essere quella di svincolare la prova da una specifica temperatura imposta a priori (in questo caso 163 °C) e di far variare questa in funzione delle proprietà fisico-reologiche del materiale.

Il processo di invecchiamento causa un indurimento nel materiale dovuto alla reazione dell'ossigeno con i componenti del bitume portando l'ossigeno a legarsi con le molecole e a creare dei gruppi carbossilici o carbonilici che, successivamente, vanno a formare strutture più complesse. Questo processo per il bitume determina una transizione dalla configurazione sol a quella gel e risulta essere irreversibile.

La norma a cui fa riferimento la prova RTFOT è l'UNI EN 12607-1 che dà specifiche informazioni sui macchinari da adoperare e il procedimento da seguire. Per prima cosa la norma descrive le caratteristiche che deve avere il forno e queste sono le dimensioni fisiche (340 x 405 x 445 ± 15 mm che rappresentano rispettivamente l'altezza, la larghezza e la profondità del forno con uno sportello frontale in vetro delle dimensioni di 320 x 215 mm), la velocità di rotazione del tamburo cilindrico su cui poggiano i bicchieri (15 giri/min), la precisione del termometro interno (precisione di ± 0,5 °C o superiore), le specifiche tecniche della resistenza e la limitazione che impone l'immissione tramite un ugello di un flusso d'aria ad una determinata temperatura e pressione pari a 4000 ml al minuto. Successivamente, la norma dà indicazioni anche sui contenitori di vetro, sul quantitativo di bitume per ogni campione (corrispondente a 35 ± 0,5 g) e sulla preparazione di quest'ultimo.



Figura 4.3 Forno per il RTFOT

La preparazione del campione prevede di versare il quantitativo di bitume indicato dalla norma all'interno del bicchiere preventivamente scaldato in forno, avendo l'accortezza di usare una bilancia con precisione al decimo di grammo, per poi ruotarlo tra le mani fino a distribuire omogeneamente il bitume su tutta la superficie laterale del bicchiere. In seguito a questa operazione è richiesto di lasciare il tutto a temperatura ambiente per un'ora e solo successivamente di inserirlo nel forno.



Figura 4.4 Bicchieri riempiti di bitume

La prova consiste nel mantenere in costante rotazione i bicchieri riempiti di bitume per un tempo di 85 minuti ad una temperatura di 163 ± 1 °C. Nel mentre si insuffla aria in un quantitativo pari a 4 l/min.

Degli 8 campioni immessi nel forno se ne prendono i due su cui è stata eseguita in precedenza una misurazione del peso di bitume colato nella fase di preparazione, per eseguire una nuova misura del peso e determinarne così la variazione in massa che si ha a seguito del processo di invecchiamento. Tale fenomeno provoca una perdita di peso dovuta alla volatilizzazione degli oli leggeri che si contrappone, invece, ad un incremento del quantitativo di ossigeno all'interno della miscela. Sul materiale rimanente nei sei campioni vengono eseguite le prove di caratterizzazione fisica per poi confrontarle con quelle ottenute per il bitume vergine.

Il primo parametro di interesse è l'aging index AI , col quale si definisce il rapporto tra la viscosità del bitume prima e dopo l'invecchiamento mediante RTFOT misurata a 60 °C come già indicato nell'eq. (3.1) (Asphalt Binder Testing, n.d).

Altro parametro che si prende in considerazione è l'innalzamento del *punto di rammollimento* RI definito come:

$$RI = T_2 - T_1 \quad (4.1)$$

Con:

$T_1 =$ temperatura di rammollimento bitume vergine;

$T_2 =$ temperatura di rammollimento bitume invecchiato.

Ancora, è possibile determinare la percentuale del valore di *penetrazione residua* PI a 25 °C espressa come:

$$PI = 100 \cdot \frac{P_2}{P_1} \quad (4.2)$$

Con:

P_1 = valore di penetrazione del bitume vergine;

P_2 = valore di penetrazione del bitume invecchiato.

Per concludere, poi, col definire la *variazione di massa* ΔM espressa in percentuale per entrambi i campioni di riferimento, ottenuta mediante l'eq. (4.3) di seguito riportata:

$$\Delta M = 100 \cdot \frac{(M_2 - M_1)}{(M_1 - M_0)} \quad (4.3)$$

Con:

M_0 = massa del bicchiere vuoto;

M_1 = massa del bicchiere vuoto + massa bitume vergine;

M_2 = massa del bicchiere vuoto + massa bitume invecchiato.

L'invecchiamento a breve termine ottenuto mediante la prova al RTFOT è stata eseguita per tutti gli 8 bitumi. I risultati così ottenuti vengono riportati nel capitolo successivo. Di seguito si riportano le fasi lavorative necessarie allo svolgimento della prova:

- 1) Si prendono i bicchieri numerandoli da 1 ad 8 (Fig. 4.5a), contrassegnando e pesando a temperatura ambiente mediante una bilancia con precisione di $\pm 0,001$ g i due che verranno poi usati per la misurazione della variazione di massa ΔM , per poi inserirli nel forno (Fig. 4.5b) ad una temperatura prossima a quella di prova (163 °C);
- 2) In un altro forno si mette a scaldare il bitume per un tempo sufficiente a raggiungere i 165 °C. Nel dunque si procede con la preparazione del banco di lavoro (Fig. 4.5c);
- 3) Con una bilancia precisa al decimo di grammo (Fig. 4.5d) si pesano i bicchieri prima e dopo essere riempiti prestando attenzione nel versare un quantitativo di bitume pari a $35 \pm 0,5$ g;
- 4) Il bitume viene fatto colare lungo le superfici del tubo andando a creare un film sottile lasciandoli poi riposare per un'ora (Fig. 4.5e);
- 5) I due bicchieri di riferimento (che verranno indicati successivamente con le lettere A e B), una volta riempiti con il bitume e lasciati raffreddare, verranno nuovamente pesati sempre a temperatura ambiente determinando così il peso lordo di bicchiere e bitume vergine;

- 6) Si inseriscono i bicchieri nel forno RTFOT lasciandoli per un tempo di 85 minuti conteggiati da quando si raggiunge nuovamente la temperatura di 163 °C, ripetendo la prova nel caso passassero più di 15 minuti da quando vengono inseriti i bicchieri a quando si ritorna alla temperatura prestabilita, sotto un flusso d'aria costante pari a 4 l/min;
- 7) Trascorsi gli 85 minuti si recupera il bitume così invecchiato in quantità pari almeno al 90% del materiale totale nei singoli bicchieri (eccezion fatta per i bicchieri A e B che vengono lasciati raffreddare) servendosi di una spatola (Fig. 4.5f);
- 8) Raffreddati i bicchieri A e B si procede col pesarli determinando così il peso lordo dei barattoli con il bitume invecchiato;
- 9) I bicchieri con ancora i residui di bitume (Fig. 4.5g) vengono inseriti nella carbolite che, raggiungendo i 540 °C, brucia il bitume ancora presente nei bicchieri (Fig. 4.5h);
- 10) Bruciato tutto il combustibile, i bicchieri vengono lasciati raffreddare gradualmente e, successivamente, estratti dalla carbolite per procedere con la pulizia (Fig. 4.5i) rimuovendo i residui rimasti all'interno del bicchiere (Fig. 4.5j).

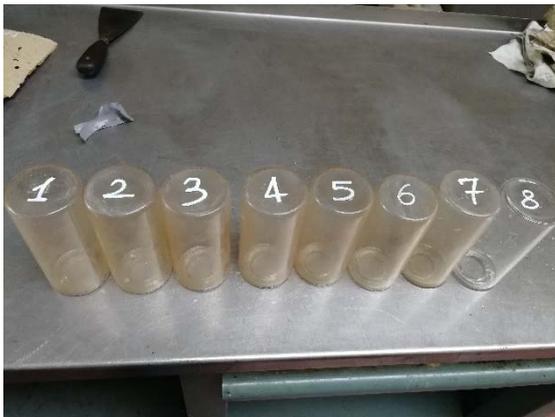




Figura 4.5 da sx a dx, dall'alto al basso: a) bicchieri; b) bicchieri in forno; c) banco di lavoro; d) bilancia; e) bitume a riposo; f) spatola; g) residui di bitume; h) carbolite; i) residui nel bicchiere; j) residuo.

4.3.2 PRESSURE AGING VESSEL

Con il termine PAV, acronimo di *Pressure Aging Vessel*, si fa riferimento ad una prova, normata dalla UNI EN 14769, atta a simulare l'invecchiamento del bitume nel lungo periodo (tempo compreso tra i 5 e i 10 anni) per simulare le condizioni del bitume al termine della vita ultima della pavimentazione

stradale. Tale prova consiste nel sottoporre il bitume precedentemente invecchiato a breve termine tramite RTFOT ad una pressione prefissata ed ad una temperatura prestabilita sulla base di quella determinata in fase progettuale della pavimentazione per un certo lasso di tempo.



Figura 4.6 Pressure Aging Vessel

Il dispositivo è composto da una camera a pressione con le pareti riscaldabili dentro cui inserire, mediante apposito sostegno, i provini (nel numero massimo di 10) precedentemente preparati e da un computer che indica tutti i parametri fondamentali per lo svolgimento della prova quali il tempo, la temperatura e la pressione. Questa è in grado di lavorare a diverse temperature: 85 °C, 90 °C, 100 °C e 115 °C, a cui corrispondono tempi di prova differenti (60 ore \pm 30 minuti nel caso di 85 °C, 20 ore \pm 10 minuti per le altre temperature). La scelta di una temperatura piuttosto che un'altra dipende dalle condizioni che si vogliono simulare.

La prova consiste innanzitutto nella realizzazione dei campioni versando il bitume, nella quantità di 50 g (con una tolleranza di \pm 0,5 g), in un recipiente cilindrico di diametro pari a 140 mm dai bordi bassi e distribuirlo uniformemente su tutta la base, andando così a creare uno strato sottile di alcuni millimetri. Completata la realizzazione di tutti i provini che si vogliono testare, si procede posizionando i piatti in un apposito contenitore che li tenga orizzontali per tutta la durata della prova, per inserirlo poi nel macchinario precedentemente portato alla temperatura desiderata. Conseguenzialmente all'inserimento dei provini si avrà un abbassamento significativo della temperatura all'interno del materiale, quando questa è nel range di 5 °C rispetto alla temperatura impostata si procede immettendo l'aria all'interno del macchinario portandolo così ad una pressione pari a $2,1 \pm 0,1$ MPa dando, di fatto, il via alla prova.



Figura 4.7 Piatto riempito con 50 g di bitume

La prova è da considerarsi non valida nei seguenti casi:

- La temperatura di test non viene raggiunta nelle prime due ore della prova;
- Per un periodo superiore ai 60 minuti vi è una differenza di temperatura di test maggiore di $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- La pressione è superiore a $2,1 + 0,2\text{ MPa}$ o inferiore a $2,1 - 0,2\text{ MPa}$ per un tempo superiore ai 30 minuti.

Intercorso il tempo programmato per la prova, il macchinario riduce gradualmente la pressione riportandola ai valori di quella atmosferica in un intervallo di tempo compreso tra gli 8 e i 15 minuti. Il tempo per la depressurizzazione non è da considerarsi nelle ore di prova.

Per le prove al PAV finalizzate alla realizzazione della sperimentazione trattata nel seguente elaborato, si è considerata una temperatura pari a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ corrispondente, quindi, ad una durata di 20 ore e una pressione di $2,1\text{ MPa}$.



Figura 4.8 Bitume invecchiato al PAV

Qualora al termine della prova il bitume presentasse un'eccessiva quantità di bolle d'aria (come nel caso specifico, mostrato in figura 4.9), la normativa prevede la possibilità di fare ricorso al processo di degassing che permette una drastica riduzione del contenuto d'aria intrappolato all'interno del bitume. Questa operazione è da considerarsi fondamentale nel caso in cui, successivamente all'operazione di invecchiamento, si andrà a testare il bitume così ottenuto.



Figura 4.9 Bolle d'aria sulla superficie del campione

Per concludere, il campione viene stoccato (prestando attenzione a recuperarne il più possibile) in contenitori di alluminio per procedere poi con le successive operazioni.



Figura 4.10 Stoccaggio degli otto bitumi

4.3.3 DEGASSING

La prova di *degassing*, come già accennato nel paragrafo precedente, è finalizzata a ridurre il quantitativo d'aria all'interno del bitume accumulatosi durante la prova al PAV per simulare l'invecchiamento a lungo termine.



Figura 4.11 Forno e contenitore ermetico

Per eseguire la prova è necessario prendere un contenitore a chiusura ermetica con un ugello da cui è possibile risucchiare l'aria per permettere di avere il vuoto all'interno del contenitore. La prova

consiste nello scaldare il bitume ad una temperatura pari a 170 °C per un periodo di 30 minuti e, successivamente, inserire il bitume all'interno di questo contenitore. Una volta assicurata la chiusura ermetica si lascia il tutto a stabilizzare termicamente nel forno sempre alla temperatura di 170 °C (con una tolleranza di 5 °C) per 10 minuti. Si procede a questo punto con l'estrarre l'aria al suo interno riducendo la pressione in modo graduale fino ad avere un valore di $15 \pm 2,5$ kPa e mantenendola per 30 minuti.



Figura 4.12 Pompa per il risucchio dell'aria

Il risultato che si ottiene al termine della prova è quello di un bitume pronto per le successive fasi sperimentali, con la totale assenza d'aria al suo interno. Tale operazione si è resa necessaria per tutti i differenti bitumi invecchiati al PAV. In figura 4.13 è possibile vedere l'eclatante differenza tra il prima e il dopo l'esecuzione del processo di degassing:



Figura 4.13 Bitume prima (sx) e dopo il degassing (dx)

4.3.4 BENDING BEAM RHEOMETER

Il *Bending Beam Rheometer*, abbreviato in BBR, è un macchinario finalizzato alla determinazione della rigidità a flessione dei leganti bituminosi sottoposti ad una prova di creep a basse e bassissime temperature. Risultato del programma SHRP, il BBR venne proposto come strumentazione necessaria alla caratterizzazione SUPERPAVE dei bitumi oltre che per la determinazione della temperatura minima del Performance Grade.



Figura 4.14 Bending Beam Rheometer

Mediante prova eseguita al BBR è possibile ricavare l'andamento della *rigidità flessionale* nel tempo $S(t)$ la quale si misura secondo la seguente equazione:

$$S(t)_{max} = \frac{P_{max}L^3}{4bh^3\delta(t)_{max}} \quad (4.4)$$

Dove:

P_{max} = carico di prova [mN];

L = interasse appoggi [mm];

h = spessore del provino [mm];

b = larghezza del provino [mm];

$\delta(t)_{max}$ = deflessione massima in mezz'ora al tempo t [mm].

E della sua *tangente*:

$$m - value = tg S(t) \quad (4.5)$$

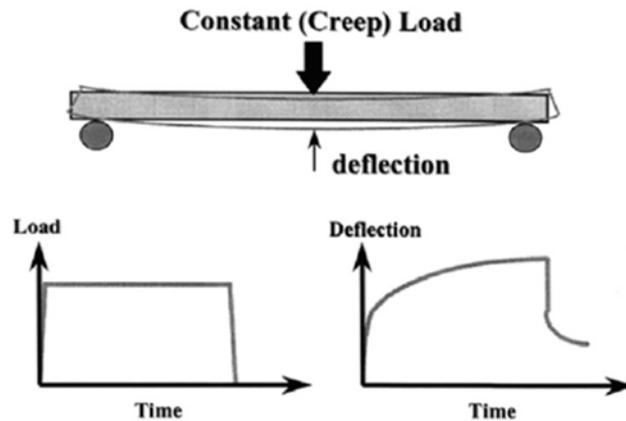


Figura 4.15 Prova di creep (flessione su 3 punti)

La prova consiste nell'applicare un carico costante nel tempo nella mezzeria di un travetto di forma prismatica, appoggiato agli estremi su due punti e immerso in un bagno di alcol etilico. Il test equivale, dunque, a condurre una prova di flessione su tre punti e misurarne la rigidezza. La macchina è capace di leggere deformazioni dell'ordine del millesimo di millimetro grazie ad un Trasformatore Differenziale Variabile Lineare (LVDT) e avere una precisione al decimo di millesimo di Newton per quanto riguarda il carico. La temperatura a cui si effettuano le prove è in funzione della temperatura minima di progetto dell'infrastruttura viaria. La prova prevede che il materiale da testare debba aver subito prima un processo di invecchiamento sia a breve termine (RTFOT) sia a lungo termine (PAV) per poter determinare le caratteristiche reali del bitume in fase di esercizio.

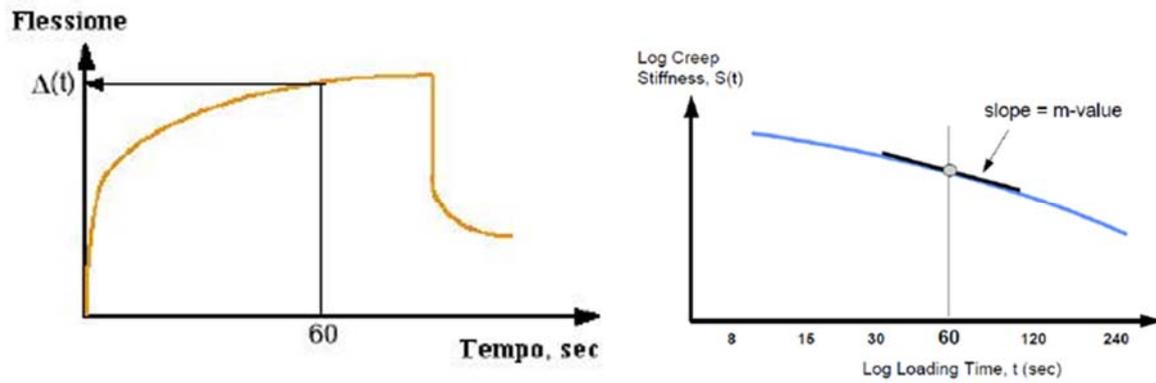


Figura 4.16 Rigidezza e m-value

L'apparecchiatura è composta da tre differenti componenti: una vasca termo-controllata riempita di alcol etilico, tenuta opportunamente pulita, che permetta di mantenere la temperatura costante anche per lunghi periodi (precisione del centesimo di grado centigrado) in cui immergere i campioni una volta realizzati; un reometro, vero cuore dell'intera apparecchiatura, che comprende un albero di carico a pistone pneumatico su cuscinetti ad aria allineato verticalmente, sorretto da un telaio metallico avente alla base due supporti su cui adagiare il travetto prima dell'inizio della prova e, infine, un sistema informatico di acquisizione dati che fornisce tutti i valori ricavati nel corso della prova.

La macchina è collegata ad un criostato ad acqua che permette la stabilizzazione della temperatura anche nelle condizioni più estreme e ad una condotta di aria compressa che ne permette il funzionamento. Il gas pressurizzato serve per la regolazione dell'unità di carico sia in fase di calibrazione della macchina sia durante tutta la fase di test. Durante tutta la fase di condizionamento del provino (che può variare da un minimo di un'ora ad anche oltre una settimana) la temperatura può subire variazioni rispetto a quella di test di $\pm 0,2$ °C, durante la fase di carico, quindi dall'inizio della prova, la massima variazione di temperatura accettabile è di $\pm 0,1$ °C.

Prima di eseguire una qualsiasi prova, è necessario procedere con l'operazione di calibrazione dello strumento che riguarda sia la temperatura mediante l'ausilio di un termometro di precisione (come mostrato in figura 4.17a), sia quella dell'intera parte relativa al carico e alla misurazione della deflessione tramite apparecchiatura apposita fornita con lo stesso BBR, comprendente: una trave metallica di dimensioni analoghe a quelle del travetto di bitume appositamente realizzato (thick beam), una più sottile (thin beam) che vuole riprodurre in modo approssimato la rigidezza che potrebbe avere un ipotetico travetto di bitume, un sistema di quattro pesi ognuno di 100 g e da un

disco rotante su un perno avente quattro diverse altezze, necessario per determinare lo zero nel sistema di riferimento (Fig. 4.17b).



Figura 4.17 a) termometro; b) strumenti per la calibrazione

I risultati che fornisce il software “BBRDAS” sono: il grafico in tempo reale della deformazione in funzione del tempo per tutto l’intervallo di durata del carico, che è compreso tra 0 secondi (inizio prova) e 240 secondi (fine prova); il valore di rigidezza $S(t)$ e la sua tangente $m - value$ a valori temporali specifici quali 8 s, 15 s, 30 s, 60 s, 120 s e 240 s.

L’operazione che precede il test è, ovviamente, la preparazione dei provini da sottoporre a questa prova. I provini, dalle dimensioni di 127 mm x 12,7 mm x 6,35 mm corrispondenti rispettivamente alla lunghezza, all’altezza e allo spessore, con una tolleranza di $\pm 0,05$ mm per dimensione (Fig. 4.18b), sono realizzati con l’ausilio di elementi parallelepipedi in alluminio con interposta una sottile lamina di plastica che impedisce il diretto contatto tra metallo e bitume, facilitando così le operazioni di scasso. La composizione di questi elementi metallici (5 in totale: uno che fa da base, due di contenimento laterale e altri due dalle dimensioni ridotte che operano come tappi alle due estremità), stretti agli estremi da una fascina metallica (Fig. 4.18a), permettono di realizzare una formina dentro cui colare il bitume precedentemente scaldato in forno ad una temperatura di 150 °C per un’ora. Qualora il bitume si presenti ancora poco liquido per permettere un’idonea colatura dello stesso all’interno dello stampo, si procede incrementando la temperatura a cui lo si scalda. Il passaggio della colatura prevede che il bitume venga versato tutto in un’unica colata, scorrendo da un estremo all’altro, senza passare per lo stesso punto due volte onde evitare di avere una sovrapposizione di strati e presenza di aria intrappolata all’interno del travetto che ne compromette l’utilità, facendo traboccare il bitume. Trascorsi 15 minuti da questa operazione, si procede con la rasatura del bitume in eccesso con l’ausilio

di una spatola, adeguatamente scaldata, fatta scorrere con continuità sulla superficie superiore del travetto. In seguito il provino viene lasciato a temperatura ambiente per i successivi 45 minuti per poi essere messo in freezer alla temperatura di -20°C circa per ulteriori 10 minuti. L'aver messo il provino in freezer ha permesso a questo di irrigidirsi sufficientemente garantendo, così, una più facile manovra di scasseratura, il che equivale a dire una minore probabilità di imprimere deformazioni al travetto prima del test. Eseguita questa manovra, il passo finale è quello di immergere il provino nel bagno di alcol alla temperatura prefissata per un tempo variabile a seconda della prova che si vuole condurre. Nel caso specifico, per tutti gli 8 bitumi testati e precedentemente invecchiati, il tempo di condizionamento nel bagno termostatico è stato pari ad un'ora, passata la quale si è proceduto con l'esecuzione del test al BBR vero e proprio, posizionando il travetto sui due appoggi cercando di far coincidere il più possibile il suo punto centrale con il punto di applicazione del carico. È da precisare che un'errata esecuzione dei provini in una qualsiasi fase di realizzazione, per quanto minima possa essere, dà luogo a errori non indifferenti nei risultati dei test. I risultati ottenuti da queste prove sono riportati nel capito successivo: elaborazione dati.



Figura 4.18 a) Cassero in acciaio pieno; b) Travetto di bitume

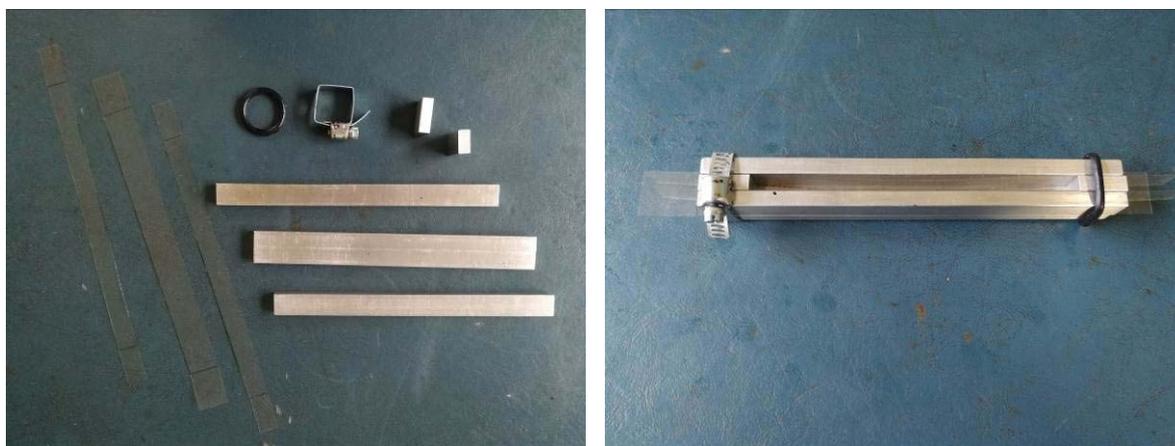


Figura 4.19 Cassero in acciaio con strisce di plastica

La realizzazione dei travetti prevede molta manualità e una buona capacità organizzativa del tempo qualora si realizzasse più di un provino per volta. Un'alternativa più pratica e sbrigativa per la realizzazione di questi è quella di ricorrere a stampi di silicone (Fig. 4.20) che, però, non sono previsti dalla normativa. Tale alternativa, quindi, la si è scartata per attenersi strettamente alle indicazioni date dalla normativa stessa.

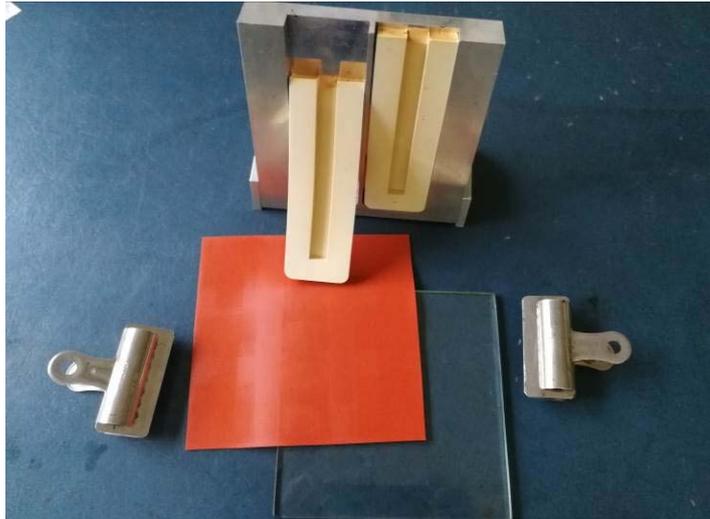


Figura 4.20 Cassero in silicone

La norma a cui fa riferimento la sperimentazione al BBR è la AASHTO T 313-12 (American Association of State Highway and Transportation Officials), che chiede di trovare il valore massimo della rigidità flessionale (stiffness) $S(t)$ per determinare la *temperatura critica di fessurazione* T_{CR} (Critical Temperature Cracking) in accordo alla norma AASHTO M320. Il Bending Beam Rheometer adoperato per le prove in questione è stato prodotto dalla Cannon Instrument Company® che permette una variazione di temperatura che va da 0° C fino a superare i -36 °C.

Tutti i parametri ricavabili da una prova al BBR sono i seguenti:

M' = Estimated Stiffness [MPa]

d = Deflection [mm]

M = Measured Stiffness [MPa]

a = Difference [%]

P = Force [mN]

m = m - value [-]

t = Time [s]

Per anni, il BBR e il DSR sono stati strumenti complementari per la determinazione delle caratteristiche meccaniche del legante bituminoso in un ampissimo spettro di temperature, il primo per le basse temperature e il secondo per le medie e le alte. L'evoluzione tecnologica che c'è stata negli ultimi anni che ha riguardato il reometro rotazionale ha portato questo macchinario a superare le sue limitazioni strutturali, permettendo così di analizzare le caratteristiche meccaniche del bitume anche alle basse temperature, prima di competenza esclusiva del BBR.

4.3.5 DYNAMIC SHEAR RHEOMETER

Il DSR, acronimo di *Dynamic Shear Rheometer* e traducibile come reometro dinamico a taglio, spesso identificato con il solo termine più generico "reometro", è un macchinario tecnologicamente molto avanzato e versatile che, sostanzialmente, imprime una sollecitazione torcente ad un provino cilindrico. Più nello specifico, permette di caratterizzare le proprietà elastiche e viscosive di un generico materiale (nel caso specifico del legante bituminoso) con un'accuratissima precisione in un esteso range di temperature e frequenze, adoperando in regime di taglio in condizioni di temperatura controllata. Il macchinario presenta un braccio meccanico in grado di alzarsi ed abbassarsi a seconda dell'input fornito dall'utente, alla cui estremità inferiore vi è un aggancio rotante che permette di montare il sistema di misura preferito (un cilindro che presenta una variazione di diametro alla punta di un valore specifico denominato piatto). In corrispondenza del sistema di misura, alla base del DSR, vi è un corpo metallico di forma circolare, con il compito di condizionare termicamente il campione da testare e al centro una filettatura in cui inserire il sistema di misura combaciante con quello superiore. L'apparecchio è collegato ad un criostato esterno che ne permette l'utilizzo a temperature di molto differenti a quella ambiente e ad un computer esterno da cui gestire tutta la macchina e i risultati da questa ottenuti.



Figura 4.21 Dynamic Shear Rheometer

È possibile fare una prima distinzione delle prove al DSR tra quelle eseguite in regime continuo e quelle in regime oscillatorio, per approfondimenti in merito si rimanda ai rispettivi paragrafi del capitolo 2. Un'ulteriore distinzione può essere fatta sulla base dei parametri su cui impostare la prova, si può, dunque, distinguere una prova in *controllo di deformazione* (strain controll) da una in *controllo di tensione* (stress controll). La prima consiste nell'applicare un determinato valore di deformazione e regolare la sollecitazione in funzione di questo e la seconda, invece, nel definire a priori uno sforzo di taglio e ricavarne le corrispettive deformazioni.

Bisogna precisare, però, che lo scopo di una sperimentazione per un materiale bituminoso è quello di determinarne il comportamento in campo viscoelastico lineare (LVE). A tal proposito, si rende necessario lavorare con specifici limiti sia in campo tensionale sia in quello deformativo. Nella fattispecie per le deformazioni, le prove al DSR prevedono valori di questa molto piccoli che vengono assunti, per prove a temperature basse, con valori inferiori allo 0,5% ma con la possibilità di aumentare il valore del limite all'incrementare della temperatura. Sulla base della ricerca SHRP, il limite per cui si è ancora in campo viscoelastico lineare è stato definito come quel valore per cui il modulo complesso $|G^*|$ raggiunge il 95% del suo valore iniziale. Tale valore è stato determinato sulla base di prove del tipo frequency sweep in cui si è gradualmente incrementato il valore della deformazione fintanto che questa non ha presentato un comportamento significativamente non lineare in funzione del carico applicato (Petersen et al., 1994; Wu, 2009).

Questo strumento deve la sua versatilità alla possibilità di adattare l'apparecchiatura in funzione della temperatura a cui si vogliono eseguire le indagini. Ciò è reso fattibile dalla possibilità fornita all'utente

di variare il sistema di misura adoperato mediante un semplice passaggio. Tra i vari tipi di piatti, vi è un'ampia gamma di scelta che va dall'opzione di adoperare un piatto piano inferiormente ed uno conico superiormente, a quella che presenta due piatti piani ma con una specifica rugosità, per passare ai più comuni che, invece, sono composti da due piatti piani lisci. Per ogni tipologia tra quelle viste in precedenza, vi è la possibilità di scegliere il diametro tra il piatto da 4 mm (PP04, Fig. 4.22a), quello da 8 mm (PP08, Fig. 4.22b), quello da 25 mm (PP25, Fig. 4.22c) e, infine, quello da 50 mm (PP50). La scelta di uno piuttosto che un altro è dettata dall'esigenza di adottare quello che meglio si presta all'esecuzione della prova in funzione della sola temperatura: ad una maggiore temperatura di sperimentazione corrisponde un maggiore diametro del piatto. Questo appare del tutto ovvio se si pensa che all'aumentare della temperatura il materiale è propenso ad assumere un comportamento più tendente al fluido, riducendo così la sua rigidità e le sollecitazioni in gioco per imprimere una specifica deformazione oltre al fatto che un piatto con superficie maggiore comporta inevitabilmente un quantitativo di bitume più importante che richiederebbe anche in questo caso, a parità di deformazione, uno sforzo molto maggiore da parte del macchinario. Ciò è la dimostrazione che per temperature basse non è possibile impiegare piatti di grande diametro, così come non è possibile il contrario, cioè usare piatti di piccolo diametro per alte temperature a causa della bassa precisione dei risultati, alla possibilità al bitume di defluire dai bordi del piatto e alla scarsa aderenza che si verrebbe a creare tra il piatto e il campione di bitume.



Figura 4.22 Piatti piani a) PP25; b) PP08; c) PP04

L'attuazione della sperimentazione inizia, come nel caso del BBR, con la preparazione del provino da testare pesando il giusto quantitativo di bitume da prelevare, frutto di un semplice calcolo che prevede di determinare il volume del campione prendendo in considerazione il raggio e la distanza tra i due

piatti in seguito leggermente incrementato. Nel caso specifico, si ricorda che il bitume testato è quello risultante dal processo di invecchiamento mediante RTFOT prima e PAV dopo, ma questo non compromette la possibilità di far ricorso al DSR per testare bitumi vergini. Il bitume così prelevato viene inserito in uno stampo di silicone (dalla forma cilindrica avente lo stesso diametro del piatto con cui si esegue il test) successivamente scaldato in forno per 10' ad una temperatura che oscilla tra i 135 °C e i 150 °C in modo tale da superare il punto di rammollimento del bitume stesso ed andare ad annullare quei fenomeni reversibili che si sviluppano nel tempo come il physical hardening e lo steric hardening. Passati i 10 minuti si lascia riposare il provino a temperatura ambiente per altri 15', nel dunque si avvia il DSR seguendo una specifica procedura qui non riportata, impostando i valori della prova e montando i sistemi di misura. Una volta indurito, si estrae il campione dallo stampo e lo si adagia sul piatto scaldato preventivamente alla temperatura di 45 °C (o maggiore fino a 60 °C nel caso di bitume molto rigido come nel caso del bitume H) diminuendo il gap tra i due piatti fino ad un valore prestabilito in funzione del piatto stesso (2,1 mm per PP08 e 1,05 mm per PP25) impostando una velocità di discesa consona ai limiti strumentali di sforzo normale. Raggiunto il gap desiderato, si procede eliminando il bitume in eccesso fuoriuscito dai piatti mediante paletta metallica rovente, facendo attenzione che questa venga passata su tutta la circonferenza del piatto con un'inclinazione di 45° rispetto alla tangente. Come ultimo passaggio si portano i piatti al gap specifico della prova (2 mm per PP08 e 1 mm per PP25), si abbassa la cappa e si dà il via alla prova. Nell'immagine sottostante si riporta un esempio di una prova realizzata con PP25:



Figura 4.23 Prova eseguita con il PP25

Nel caso si usasse il piatto da 4 mm, la procedura della preparazione del campione è diversa: nel caso specifico si è fatto ricorso ad uno stampo cilindrico aperto su un lato, confinato da un anello metallico e che presentasse una cavità all'interno di diametro pari allo stesso piatto. Il bitume, opportunamente modellato e nella quantità di 0,035 g circa, viene adagiato all'interno della cavità per poi poggiare il tutto sul piatto inferiore montato sul DSR. Si porta il reometro alla temperatura di 90 °C e si fa scendere il braccio superiore fino ad avere un gap tra i due pari a 1,855 mm. Conclusa l'operazione precedente, si toglie lo stampo di silicone facendolo scorrere verso l'alto ed estraendolo dal foro laterale, l'anello di confinamento verrà lasciato sulla base del reometro. Si prosegue impostando una temperatura pari a 30 °C e si tiene il provino a condizionare per 5 minuti, passati i quali si abbassa gradualmente il gap tra i piatti a 1,750 mm, prestando sempre attenzione che il valore dello sforzo normale durante tutta la procedura non oltrepassi il limite per cui si possa verificare un danneggiamento dell'attrezzatura (a tal proposito è stato impostato che si modifichi automaticamente la velocità di discesa del piatto superiore onde evitare di raggiungere suddetto limite). A questo punto è possibile abbassare la cappa di condizionamento e avviare la prova che consiste nel condizionare il provino per 5 minuti (comprensivo del tempo di transizione tra una temperatura e la successiva) alle diverse temperature. Nel mezzo del condizionamento, dopo 150 secondi, si impone che lo sforzo normale sia pari a 0 N (ciò comporta una riduzione del gap tra i piatti) onde evitare che nel campione, in seguito al ritiro termico dato dalla diminuzione della temperatura, si generino delle tensioni prima ancora che la prova vera e propria di sollecitazione cominci che ne condizionerebbero i risultati o, addirittura, che la trazione eccessiva possa portare al distacco del campione dal piatto. (Fig. 4.24).





Figura 4.24 Preparazione ed esecuzione della prova con PP04

Qualunque sia il tipo di prova e il piatto utilizzato, anche se non espressamente indicato dalla normativa, è buona norma che i valori tra due ripetizioni eseguite nelle medesime condizioni sulla stessa tipologia di bitume diano risultati che non differiscano di un valore maggiore del 15% l'una con l'altra.

I principali parametri misurati dal reometro sono il modulo complesso $[G^*]$, l'angolo di fase δ e i loro derivati: modulo elastico G' e modulo dissipativo G'' di cui si omette la trattazione dal momento che se n'è ampiamente parlato nella parte relativa alle prove in regime oscillatorio relative al capitolo 2.5. Per ottenere tali valori, nel caso in esame, si sono intervallate fasi di condizionamento ad una specifica temperatura T dalla durata variabile a seconda del quantitativo di bitume, con fasi di carico in cui si è impostata una frequenza angolare ω e una specifica deformazione (si è, dunque, eseguita una prova di controllo di deformazione). Si vuole, però, evidenziare l'importanza del ricavare il valore dell'angolo di fase che, oltre ad essere fondamentale per la determinazione dei moduli G' e G'' , esprime l'attitudine di un materiale a restituire le deformazioni conseguenziali ai carichi applicati. Sulla base di ciò, si può affermare come due bitumi che presentano gli stessi valori del modulo complesso ma con diverso angolo di fase, ad esempio, manifesteranno un diverso comportamento a fatica: quello caratterizzato da un valore di δ minore presenterà una migliore resistenza a fatica.

La normativa a cui si è fatto riferimento per l'esecuzione di sperimentazioni al Dynamic Shear Rheometer è la norma americana AASHTO T315-02. Il Dynamic Shear Rheometer adoperato per le prove in questione è stato prodotto dalla Anton Paar®

Vengono di seguito riportati tutti i parametri ricavabili da una sperimentazione realizzata tramite DSR:

ω = Angular Frequency [rad/s]

ν = Kinematic Viscosity [m^2/s]

φ = Deflection Angle [rad]

σ = Tensile Stress [Pa]

T = Temperature [$^{\circ}C$]

f = Frequency [Hz]

t = Time [s]

d = Gap [m]

$J(t)$ = Creep Compliance [1/Pa]

G^* = Complex Modulus [Pa]

F_N = Normal Force [N]

δ = Phase angle [rad]

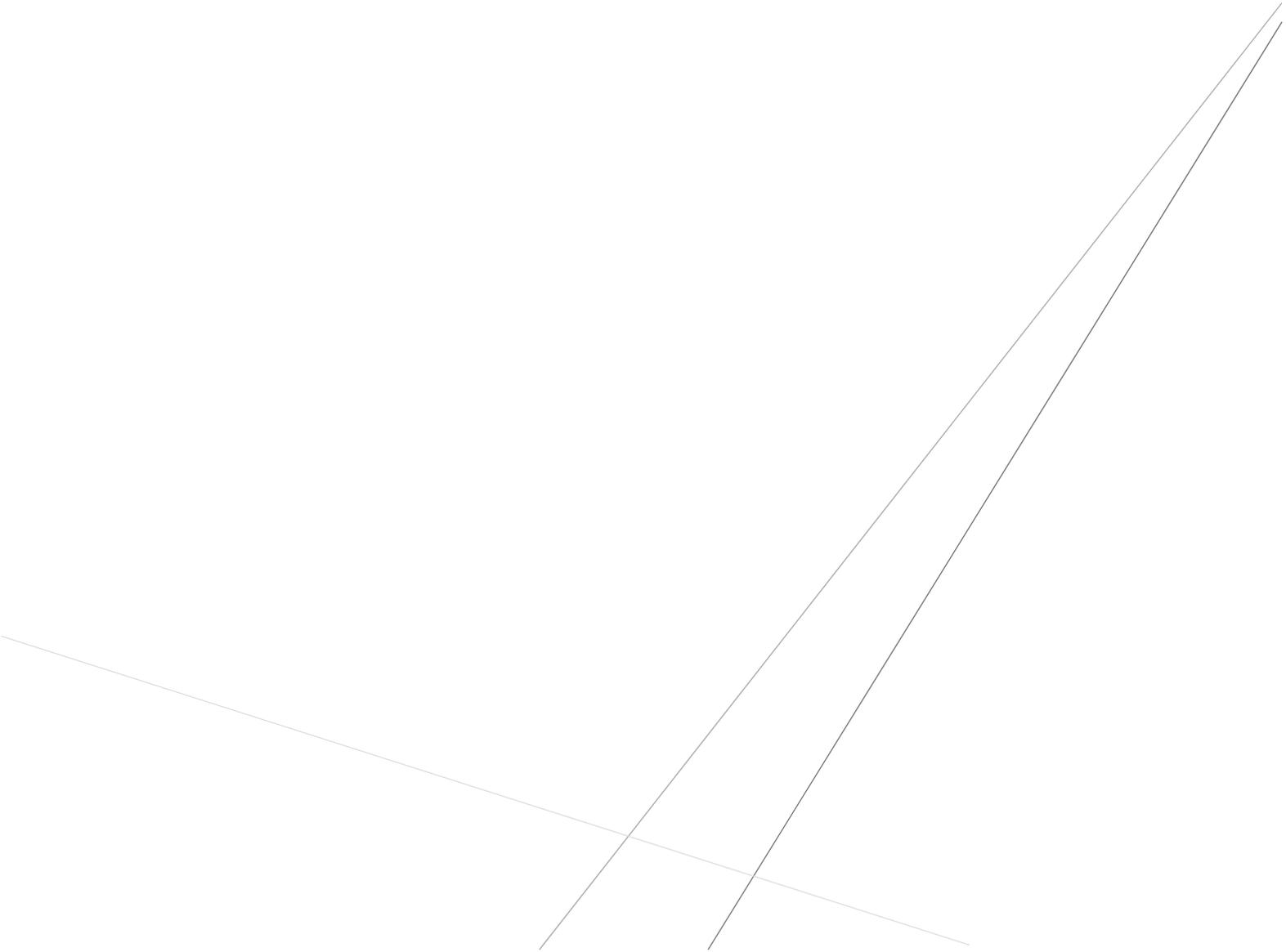
F_L = Normal Load [N]

τ = Shear Stress [Pa]

M = Torque [Nm]

γ = Strain [%]

5. ANALISI RISULTATI



5.1 INTRODUZIONE ALL'ANALISI SPERIMENTALE

Il seguente capitolo si prefigge di analizzare i risultati ottenuti dalle varie prove sperimentali e di elaborarli sulla base di modelli sperimentali. Il fine ultimo della sperimentazione è quello di trovare una relazione tra i dati ottenuti mediante prova al BBR e quelli mediante prova al DSR che permetta di determinare la temperatura minima del Performance Grade caratterizzante i bitumi con le sole prove eseguite attraverso il Dynamic Shear Rheometer.

5.2 STATO DELL'ARTE

Da ormai oltre un decennio vi sono studi che cercano di correlare il reometro torsionale (DSR) a quello flessionale (BBR) con risultati più o meno soddisfacenti. Questi studi si prefiggono l'obiettivo di trovare una relazione univoca, che possa portare ad errori trascurabili (o comunque prevedibili), nel passaggio tra dominio del tempo a quello delle frequenze e viceversa, mettendo a confronto la *rigidezza flessionale* S con la *norma del modulo complesso* $|G^*|$ e le rispettive pendenze.

Un primo studio che spiegasse come determinare i valori del BBR, quali la rigidezza flessionale e la sua *tangenza* m – *value*, con il DSR adoperando il piatto da 4 mm venne sviluppato da *Sui et al.* nel 2011. Egli mise in relazione il modulo complesso e la sua pendenza determinate a due ore (convertendo la frequenza in tempo mediante la relazione di Christensen espressa nel 1982), ad una temperatura corrispondente a quella minima stabilita dal Performance Grade, rispettivamente con la rigidezza flessionale e la sua pendenza a 60 secondi, ad una temperatura di 10 °C superiore rispetto a quella del PG.

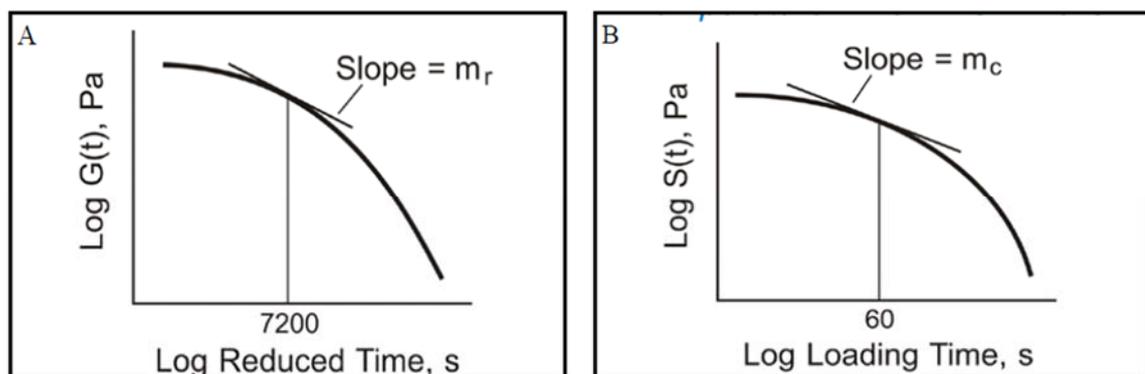


Figura 5.1 Correlazione tra prove al DSR (A) e BBR (B)

Sempre nello stesso studio, Sui et al. passarono dal considerare il modulo complesso determinato a 7200 secondi (2 ore) e alla temperatura minima del PG al medesimo ad una temperatura incrementata di 10 gradi rispetto a quella del PG e ad un tempo di 60 secondi, nel rispetto del principio di sovrapposizione tempo-temperatura per le curve maestre. Questo passaggio si è reso necessario per ridurre gli errori dal momento in cui il Dynamic Shear Rheometer non lavora bene a frequenze molto basse. Nel passaggio dai 7200 s ai 60 s si è osservato come l'errore che si commetteva era pari a circa il 10% per la rigidità e al 5% per la sua pendenza.

L'obiettivo di questo elaborato è stato quello di determinare la relazione che lega i due macchinari, sperimentando otto bitumi di natura molto differenti tra loro, sulla scia degli studi condotti da Sui et al. ampliando tali studi con considerazioni più approfondite in merito a determinate dinamiche oltre che a ricorrere a diversi metodi di correlazione.

5.3 RISULTATI RTFOT

Come già accennato nel paragrafo riguardante la prova al Rolling Thin Film Oven Test, questa prevede di misurare il peso del bitume prima e dopo tale processo di invecchiamento per determinarne la variazione di massa. Di seguito viene riportata una tabella con le varie pesate per i diversi bitumi:

Tabella 5.1 Risultati RTFOT

Bitume	Bicchiere	Peso tara bicchieri	Peso netto bitume	Peso lordo prima RTFOT	Peso lordo dopo RTFOT	Percentuale di variazione della massa	Δ
	[-]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	
A	1	163,789	35,216	199,005	199,08	0,21	0,04
	2	172,147	35,592	207,739	207,798	0,17	
B	3	164,862	35,733	200,595	200,586	-0,02	0,02
	4	163,125	35,354	198,479	198,492	0,04	
C	5	163,391	35,817	199,208	199,228	0,06	0,02
	6	161,284	35,345	196,629	196,658	0,08	
D	7	172,809	35,353	208,162	208,179	0,05	0,01
	8	163,732	35,234	198,966	198,988	0,06	
E	1	163,798	35,365	199,163	199,194	0,09	0,01
	2	172,153	35,198	207,351	207,379	0,08	
F	1	163,804	35,537	199,341	199,377	0,10	0,02
	2	172,164	35,543	207,707	207,749	0,12	
G	1	163,793	35,316	199,109	199,132	0,07	0,03
	2	172,156	35,242	207,398	207,412	0,04	
H	1	163,784	35,746	199,53	199,486	-0,12	0
	2	172,144	35,664	207,808	207,767	-0,12	

La tabella riporta per i vari bitumi nella prima colonna il tipo di bitume testato, nella seconda il bicchiere precedentemente segnato che si è scelto per la misurazione (se ne scelgono due degli otto totali sui quali si effettuano solo operazioni di peso, ciò significa che il bitume testato in quei bicchieri non verrà utilizzato per successive sperimentazioni), nella seguente il corrispettivo peso del bicchiere (si vuole far notare come, se anche il bicchiere pesato sia lo stesso per più misurazioni, vi può comunque essere una differenza di peso dovuta alla precisione della bilancia e alle diverse condizioni in cui si è effettuata la misurazione), nella quarta il peso del bitume versato all'interno del bicchiere, nella quinta il peso lordo di bitume e bicchiere prima che la prova venga effettuata, nella colonna successiva lo stesso campione a prova finita e nell'ultima la differenza percentuale che vi è tra le due misurazioni. La norma UNI EN 12607-1 a cui fa riferimento la prova RTFOT prescrive che la *ripetibilità* r (differenza in massa che vi è tra i due bicchieri per lo stesso bitume) sia inferiore allo 0,15:

$$r = \% \text{ variazione massa}_1 - \% \text{ variazione massa}_2 \leq 0,15 \quad (5.1)$$

Dove:

$\% \text{ variazione massa}_1 = \text{percentuale del primo bicchiere};$

$\% \text{ variazione massa}_2 = \text{percentuale del secondo bicchiere}.$

Qualora si volesse ripetere la sperimentazione sugli stessi materiali nelle stesse condizioni ma con macchinari o, comunque, in un tempo differente, tale valore prende il valore di *riproducibilità R* ed ha un valore massimo pari a 0,2.

Molto importante è precisare che tutte le misurazioni sono state fatte con i bicchieri e il bitume lasciato raffreddare fino al raggiungimento della temperatura ambiente.

5.4 RISULTATI BBR

L'analisi dei dati ricavati dal BBR riguarda la determinazione della rigidità flessionale S e della sua tangente $m - \text{value}$ entrambi in funzione del tempo a diverse temperature. Le temperature di riferimento a cui sono state eseguite le prove sono state di $-12\text{ }^\circ\text{C}$, $-18\text{ }^\circ\text{C}$ e $-24\text{ }^\circ\text{C}$ ma per due tipologie di bitume si è reso necessario testare i campioni, oltre che per le precedenti tre temperature, anche a $-6\text{ }^\circ\text{C}$. Per ognuna di queste si sono eseguiti dei test su travetti non alterati precedentemente (che non hanno subito nessun processo di carico in precedenza). L'obiettivo era quella di determinare la temperatura di riferimento a cui corrispondessero i seguenti parametri:

$$S = 300 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

$$m - \text{value} = 0,3 \quad (5.3)$$

L'assunzione di questi valori specifici è da assumersi tale in riferimento a quelli prescritti dalla normativa per la determinazione della temperatura critica caratterizzante il Performance Grade. In altri termini, come già spiegato nel paragrafo riguardante la classificazione dei bitumi secondo il sistema prestazionale SUPERPAVE, una volta determinata la temperatura minima di progetto per l'infrastruttura, si vuole garantire che il bitume presenti a quelle temperature delle proprietà meccaniche in relazione proprio ai valori espressi nell'eq. (5.2) e l'eq. (5.3). Lo studio condotto su

queste prove vuole seguire il processo inverso rispetto a quello precedentemente descritto, cioè si vuole partire dalle proprietà del materiale e, tramite queste, risalire alla temperatura critica minima per cui è valido utilizzare questo bitume.

Di seguito si vuole riportare un esempio dei risultati ottenuti al termine di una prova mediante l'apparecchiatura BBR adoperata:

CANNON® Instrument Company, USA 3.21 15/07/2019 16.56.34

Project:	Tesi Angiolini	Target Temp (°C):	-12,0	Conf Test (GPa):	222
Operator:	Angiol	Min. Temp (°C):	-12,1	Conf Date:	15/07/2019
Specimen:	PAV A	Max. Temp (°C):	-11,9	Force Const (mN/bit):	0,15
Test Time:	16.49.51	Temp Cal Date:	11/07/2019	Defl Const (µm/bit):	0,162
Test Date:	15/07/2019	Soak Time (min):	60,0	Cmpl (µm/N):	6,59
File Name:	19071502	Beam Width (mm):	12,70	Cal Date:	15/07/2019
BBR ID:	3725-A314	Thickness (mm):	6,28	Software Version:	BBRw 3.21

t Time (s)	P Force (mN)	d Deflection (mm)	Measured Stiffness (MPa)	Estimated Stiffness (MPa)	Difference (%)	m-value
8,0	992,1	0,36562	226	226	0,000	0,340
15,0	990,9	0,45793	180	181	0,556	0,367
30,0	991,5	0,59708	138	139	0,725	0,396
60,0	993,9	0,79155	105	104	-0,952	0,425
120,0	990,9	1,07242	77	76,9	-0,130	0,455
240,0	986,7	1,48217	55,5	55,6	0,180	0,484

A= 2,62 B= -0,253 C= -0,0485 R²= 0,999982

Force (t=0,0s) = 30,7 mN Deflection (t=0,0s) = 0,00000 mm

Force (t=0,5s) = 980,4 mN Deflection (t=0,5s) = 0,15411 mm

Max Force Deviation (t=0,5 - 5,0s) = -10,0, +2,3 mN

Max Force Deviation (t=5,0 - 240,0s) = -4,9, +4,2 mN

Average Force (t=0,5 - 240,0s) = 990,4 mN

Maximum Force (t=0,5 - 240,0s) = 994,6 mN

Minimum Force (t=0,5 - 240,0s) = 980,4 mN

Figura 5.2 Prova eseguita al BBR

È possibile osservare come nel titolo compaia, oltre al nome dell'apparecchiatura, anche la data e l'ora a cui è stato effettuato il test. Segue una lista di informazioni tecniche come nome del file, bitume testato, la temperatura media, massima e minima di prova, le misure geometriche del travetto ricavate automaticamente dalla macchina e ancora dati più tecnici. La tabella centrale rappresenta i risultati cardine dell'intero test: nella prima colonna vi è riportato il tempo t in secondi a cui è fatta

corrispondere la forza P applicata a quell'istante (in mN) nella colonna successiva, seguita dalla deflessione d in mezzeria misurata in mm, nella quarta e quinta colonna vi sono i valori di rigidità flessionale S rispettivamente misurata e stimata espressi in MPa con un'altra colonna a destra che esprime in percentuale la variazione tra questi due valori e, per concludere, il $m - value$.

Subito sotto la tabella sono presenti quattro coefficienti: A , B , C ed R^2 . I primi tre parametri sono quelli caratteristici per descrivere una funzione di secondo grado che grafichi il valore della rigidità nel tempo e l'ultimo il grado di approssimazione (più è vicino all'unità e più la curva descritta dai tre parametri approssima meglio il reale andamento). Seguono valori tecnici riguardante il carico e la deflessione al tempo 0 e subito dopo l'inizio della prova e il valore del carico medio, massimo e minimo nell'intero intervallo della prova di 240 secondi.

Per ogni prova sono state eseguite due ripetizioni distanziate l'una dall'altra solitamente 10 minuti, fatta eccezione il caso in cui si è reso necessario ripetere una ripetizione a seguito di differenze troppo elevate tra le due o di errori durante l'esecuzione della prova.

I dati di maggiore interesse sono i valori della rigidità e della sua tangente al tempo $t = 60$ s, la differenza di queste per entrambe le ripetizioni, lo spessore del travetto, i valori di A , B e C oltre che i valori massimi, minimi e medi della prova. Si ricorda come i massimi valori che possono assumere le differenze tra le due ripetizioni, espresse in percentuale, per quanto concerne i valori di S ed $m - value$, valutati entrambi a 60 secondi, sono:

$$d25\%(t_{60}) = \left| \frac{S(t_{60})_1 - S(t_{60})_2}{\text{media } S(t_{60})} \right| \cdot 100 \leq 7,2 \quad (5.4)$$

$$\% \Delta m(t_{60}) = \left| \frac{m(t_{60})_1 - m(t_{60})_2}{\text{media } m(t_{60})} \right| \cdot 100 \leq 2,9 \quad (5.5)$$

In allegato (Allegato B) si riporta una tabella schematizzante tutti i valori per i vari bitumi relativi alle prove al BBR. Di seguito, invece, si riportano le temperature critiche, rispettivamente per S e $m - value$, relative a tutti i materiali in accordo alle eq. (5.4) e (5.5):

Tabella 5.2 Temperature critiche per i vari bitumi

Bitume A	
	T_c [°C]
Stiffness=300 MPa	-18,93
m-value=0,3	-21,00

Bitume B	
	T_c [°C]
Stiffness=300 MPa	-20,41
m-value=0,3	-20,23

Bitume C	
	T_c [°C]
Stiffness=300 MPa	-19,07
m-value=0,3	-19,56

Bitume D	
	T_c [°C]
Stiffness=300 MPa	-17,20
m-value=0,3	-18,91

Bitume E	
	T_c [°C]
Stiffness=300 MPa	-11,65
m-value=0,3	-12,33

Bitume F	
	T_c [°C]
Stiffness=300 MPa	-16,70
m-value=0,3	-6,15

Bitume G	
	T_c [°C]
Stiffness=300 MPa	-17,10
m-value=0,3	-13,61

Bitume H	
	T_c [°C]
Stiffness=300 MPa	-18,42
m-value=0,3	-18,88

Dove, tenendo conto che per la rigidità varia in funzione della temperatura con scala logaritmica, le temperature critiche sono state calcolate con un'interpolazione lineare tra i due estremi comprendenti i valori cercati secondo le relazioni:

$$T_c(S) = T_1 + \left(\frac{\log(300) - \log(S_1)}{\log(S_1) - \log(S_2)} \cdot (T_1 - T_2) \right) \quad (5.6)$$

$$T_c(m) = T_1 + \left(\frac{0,3 - m_1}{m_1 - m_2} \cdot (T_1 - T_2) \right) \quad (5.7)$$

Dove si è indicato con il pedice 1 il valore di T , S ed m più basso e con il pedice 2, invece, il valore più alto.

5.5 RISULTATI DSR

Le prove che hanno riguardato questo elaborato sono state del tipo *frequency sweep* (in controllo di deformazione), in un intervallo di temperatura che va dai -36 °C ai +82 °C. Per temperature comprese tra i -34 °C e i +12 °C si è fatto ricorso al piatto da 4 mm (PP04), tra i +4 °C e i +34 °C al piatto da 8 mm (PP08) e, infine, tra i +34 °C e i +82 °C al piatto più grande da 25 mm (PP25).

Una volta impostato il tempo di condizionamento alla temperatura specifica e le frequenze angolari ω , è stato possibile da ogni prova e per ogni tipologia di bitume estrapolare i dati finali. Nell'esecuzione della prova, la frequenza angolare (anche questa in funzione della temperatura) è stata impostata sulla base di precedenti studi finalizzati a ricavare il valore ottimale di ω in funzione del modulo complesso G^* dello specifico materiale, ad una temperatura di 34 °C. La prima operazione che si è resa necessaria è stata, quindi, quella di determinare il valore di G^* alla temperatura di 34 °C per ogni bitume. Ciò è possibile servendosi indifferentemente del piatto da 8 mm o quello da 25 mm (forniscono gli stessi risultati) ed eseguendo una *frequency sweep*, previo condizionamento del campione di 30 minuti, impostando una frequenza angolare pari a 100 rad/s in controllo di deformazione γ espressa in percentuale e fissata ad un valore pari allo 0,2%. Il risultato ottenuto dalla prova corrisponde al valore del G^* da prendere in considerazione per l'esecuzione delle prove successive sulla base della seguente tabella che riporta i valori di γ da impostare alle diverse temperature nel range di frequenze ω compreso tra 1 e 100 rad/s:

Tabella 5.3 Valori di input PP25-PP08

		Valori limite in funzione di G* max			
		G*(34°C,100rad/s)		(kPa)	
Frequency	T	300	1000	3000	>3000
[rad/s]	(°C)	Strain (%)	Strain (%)	Strain (%)	Strain (%)
1	4,00	0,3	0,25	0,2	0,1
100	4,00	0,2	0,15	0,1	0,05
1	10,00	0,5	0,35	0,25	0,15
100	10,00	0,2	0,2	0,15	0,1
1	16,00	0,7	0,5	0,4	0,2
100	16,00	0,3	0,25	0,2	0,1
1	22,00	1	0,8	0,5	0,25
100	22,00	0,4	0,3	0,2	0,1
1	28,00	1,7	1	0,7	0,35
100	28,00	0,5	0,4	0,3	0,15
1	34,00	2,5	1,5	0,9	0,5
100	34,00	0,8	0,6	0,4	0,2
1	40,00	3,6	2,2	1,3	0,6
100	40,00	1,1	0,8	0,5	0,2
1	46,00	5	3	1,5	0,75
100	46,00	1,5	1	0,5	0,25
1	52,00	6	4	2	1
100	52,00	1,8	1,2	0,8	0,4
1	58,00	8	5	3	1,5
100	58,00	2,5	1,5	1	0,5
1	64,00	10	7	4	2
100	64,00	3	2	1	0,5
1	70,00	10	10	5	2,5
100	70,00	4	3	2	1
1	76,00	10	10	7	3,5
100	76,00	4	3	2	1
1	82,00	12	12	9	6
100	82,00	6	5	3	2

La deformazione di input per il piatto da 4 mm, invece, è stata assunta in maniera indipendente dal modulo complesso del bitume. Questa presenta valori molto più bassi in relazione alle temperature più rigide della prova per cui, a parità di sforzo applicato, si ha una deformazione molto più piccola data dalla maggiore rigidità del materiale. Le deformazioni γ impostate per il PP04 vanno dallo 0,1% – 0,05% per una temperatura di 12 °C (rispettivamente ad una frequenza pari a 0,1 rad/s e a 100 rad/s), allo 0,01% per la temperatura più estrema di -36 °C, indipendentemente dalla frequenza.

Tabella 5.4 Valori di input PP04

Frequency	T	Valori limite
[rad/s]	(°C)	Strain (%)
0,1	12	0,1
100	12	0,05
0,1	6	0,1
100	6	0,05
0,1	0	0,05
100	0	0,05
0,1	-6	0,05
100	-6	0,05
0,1	-12	0,025
100	-12	0,025
0,1	-18	0,025
100	-18	0,025
0,1	-24	0,025
100	-24	0,025
0,1	-30	0,01
100	-30	0,01
0,1	-36	0,01
100	-36	0,01

Anche in questo caso, come per il BBR, si sono eseguite minimo due ripetizioni per prova confrontandone la variazione in percentuale. Nel caso specifico, i parametri di interesse ai fini dell'analisi sono stati: l'angolo di fase δ , il modulo complesso G^* , tensione tangenziale τ , momento torcente M , angolo di deflessione φ , tempo t , gap tra i piatti d e lo sforzo normale F_N . Nello specifico, per quanto riguarda lo sforzo normale, più che un parametro utile al fine dell'elaborazione dati, è servito come parametro di controllo in quanto valori troppo elevati (nell'ordine di alcune decine di Newton) avrebbero potuto provocare dei danni al macchinario.

Le prove sono state eseguite inizialmente per i valori della temperatura più alti, facendo, dunque, ricorso al piatto da 25 mm (PP25) per cui si è reso necessario un quantitativo di bitume pari circa a 0,98 g. Successivamente si è passati al piatto da 8 mm (PP08) per le temperature intermedie, testando un quantitativo di bitume pari a 0,22 g, per arrivare, infine, alle prove a basse temperature adoperando il piatto da 4 mm (PP04) che richiede un quantitativo di bitume all'incirca pari a 0,04 g. Le prove per i tre diversi sistemi di misura sono durate rispettivamente 3 ore per il PP25, 2 ore per il PP08 e 3 per il PP04. Tutti i tempi includono, oltre al tempo del test vero e proprio, anche quello del condizionamento

iniziale, più lungo dei successivi, variabile dalla mezz'ora per i primi due piatti al quarto d'ora per il piatto più piccolo.

I dati ottenuti alle varie prove (in totale 48, 24 per ogni ripetizione) vengono riportati come allegato (Allegato C). Di seguito si rappresenta il grafico che si otterrebbe andando a rappresentare tutte le prove su un piano $G^* - \delta$:

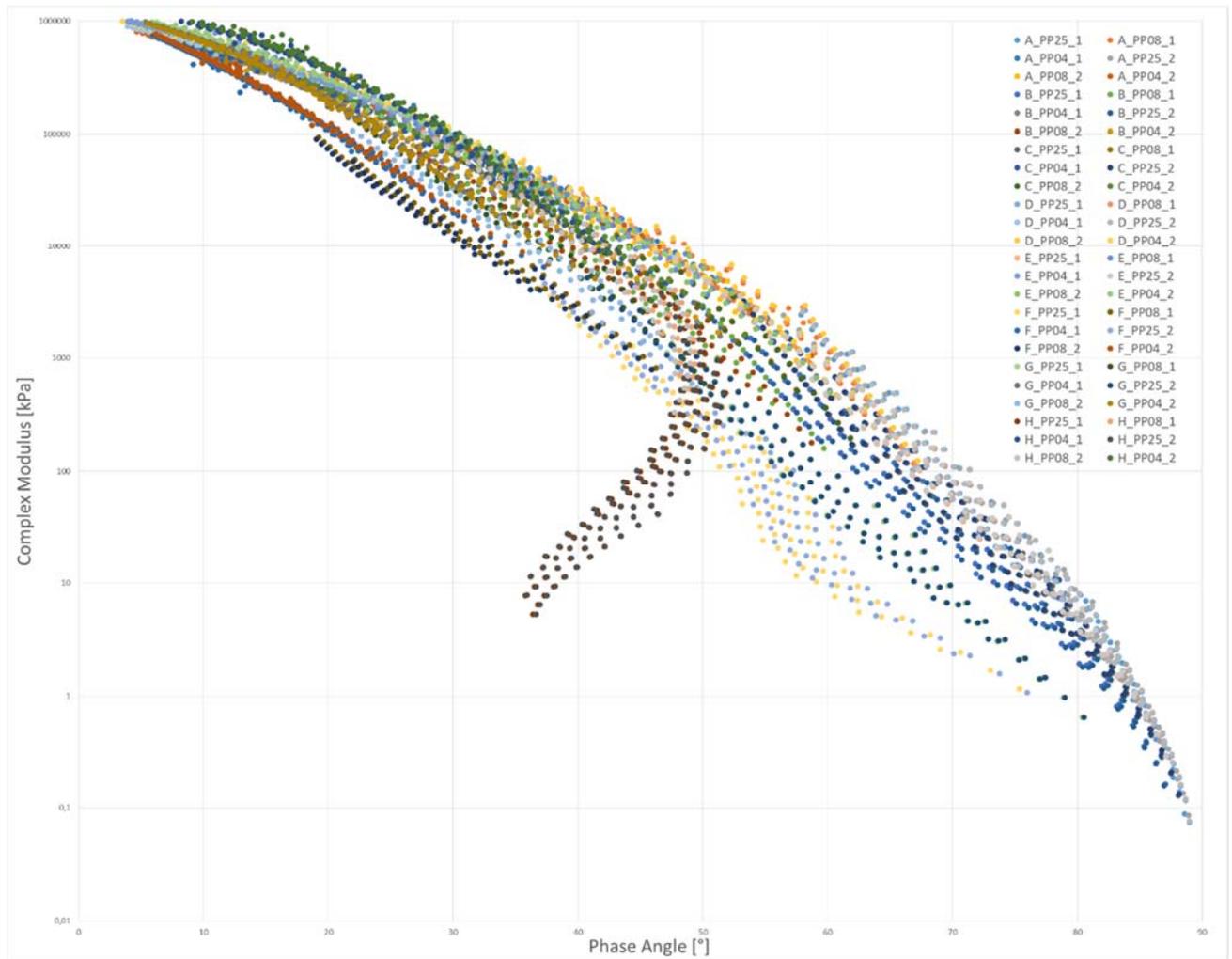


Figura 5.3 Grafico $G^* - \delta$ delle varie prove

Come si può evincere nell'osservare il grafico, i diversi bitumi presentano tutti uno stesso andamento, fatta eccezione per due in particolare. Il caso più eclatante è sicuramente quello del bitume H che presenta un'inversione di tendenza nell'intorno del valore $\delta = 50^\circ$ dovuto al fatto che, essendo un bitume modificato con polimeri, ad alte temperature vi è sì la variazione del comportamento del bitume che tenderebbe ad avere un comportamento tendente al viscoso, ma anche un'attivazione dei polimeri che ne modificano radicalmente il comportamento provocando un forte richiamo elastico,

assente nei bitumi tal quali ad alte temperature. Altro materiale che presenta un andamento anomalo è il bitume F, anch'esso modificato con l'aggiunta di polimeri. A differenza del caso precedente, per il bitume F si può ipotizzare una reazione dei polimeri solo in un intervallo di temperature più stretto, a supporto di questa teoria vi è la coda della curva che tende nuovamente ad assumere un andamento in tendenza con gli altri materiali.

Per le successive analisi dati, si è fatto riferimento alle sole prove eseguite con il piatto più piccolo da 4 mm siccome, per mettere in relazione le prove al BBR con quelle al DSR, vi è la necessità di lavorare a basse temperature.

Il primo passaggio è stato quello di adottare il modello di Christensen-Anderson (modello CA), descritto nel paragrafo omonimo del capitolo 2.9.1, per ricavare gli shift factor a_T da adottare per la costruzione delle curve maestre nel piano $G^* - \delta$. I parametri di riferimento per il modello CA sono stati ricavati tramite un processo iterativo impostando la funzione ricerca obiettivo del programma Excel. Il processo si è basato sull'ottimizzare i parametri stessi del modello ($\log(G_g)$, $\log(\omega_c)$, R) e minimizzando lo scarto tra i quadrati che c'è sia tra il modulo complesso derivante dalla prova stessa e quello del modello CA ($|G^*|$ e $|G^*|_{CA}$), sia tra gli equivalenti dell'angolo di fase (δ_0 e δ_{CA}), in modo tale che lo SQM di tutti questi valori assuma il valore minimo. Gli shift factor a_T e i vari coefficienti così ricavati sono riportati nella tabella sottostante:

Tabella 5.5 Shift factor di riferimento

Variabili		
$\log(G_g)$ [MPa]	$\log(\omega_c)$ [rad/s]	R [-]
3,095695687	-2,647	1,9172

Funzione obiettivo		
SQD C.M.	SQD P.A.	Somma SQD
0,033788884	0,261674497	0,295463381

SHIFT FACTOR		
Temperature	a_T	$\log a_T$
[°C]	[-]	[-]
-36	814,3	2,9108
-30	277,8	2,4437
-24	60,4	1,7810
-18	13,2	1,1199
-12	1,0	0,0000
-6	0,1	-1,0122
0	0,012	-1,9224
6	0,002	-2,7547
12	0,0003	-3,5460

La temperatura di riferimento che si è inizialmente tenuta in considerazione è stata -12 °C rispetto la quale si sono traslate tutte le prove a temperatura differente. Di seguito, a titolo di esempio, si riporta il grafico della rappresentazione della curva maestra del bitume A:

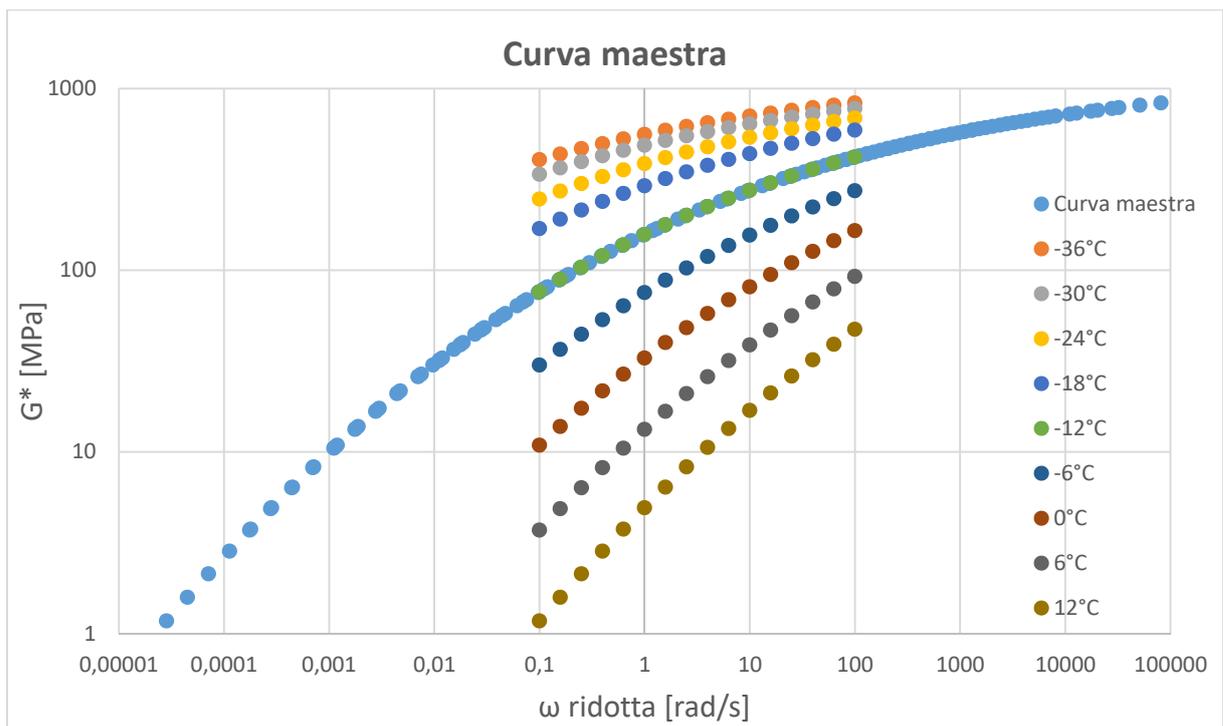


Figura 5.4 Curva maestra

È possibile ora rappresentare il valore degli shift factor in funzione della temperatura:

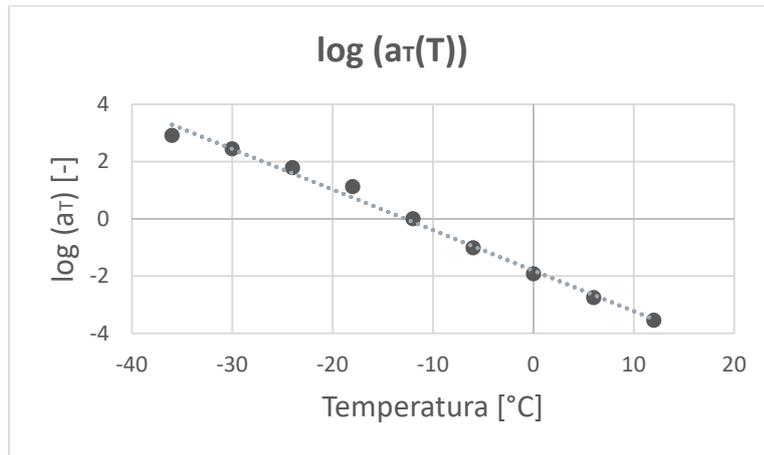


Figura 5.5 Shift factor

Se come in questo caso si riportano gli shift factor su una scala logaritmica, è possibile osservare dal grafico che questi, al variare della temperatura, hanno un andamento approssimabile con quello lineare. Questa caratteristica che presentano permette di stimare un valore approssimato di uno shift factor ad una qualsiasi temperatura.

Ancora, sempre per il bitume A, si riportano di seguito il diagramma di Black e quello di Cole-Cole già trattati nei paragrafi 2.5.1 e 2.5.2, entrambi indipendenti dagli shift factor:

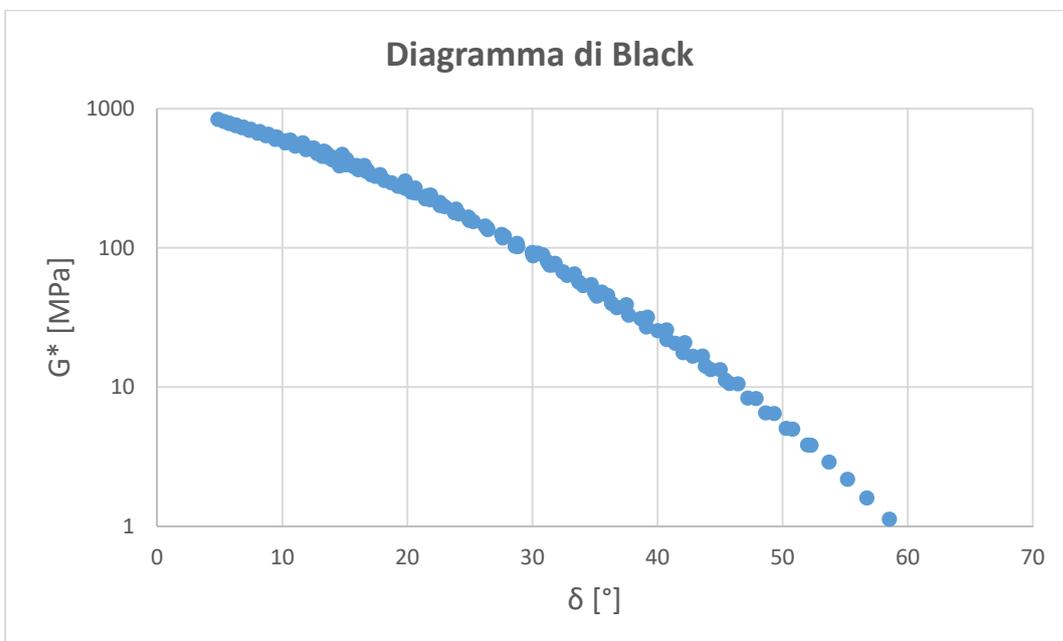


Figura 5.6 Diagramma di Black

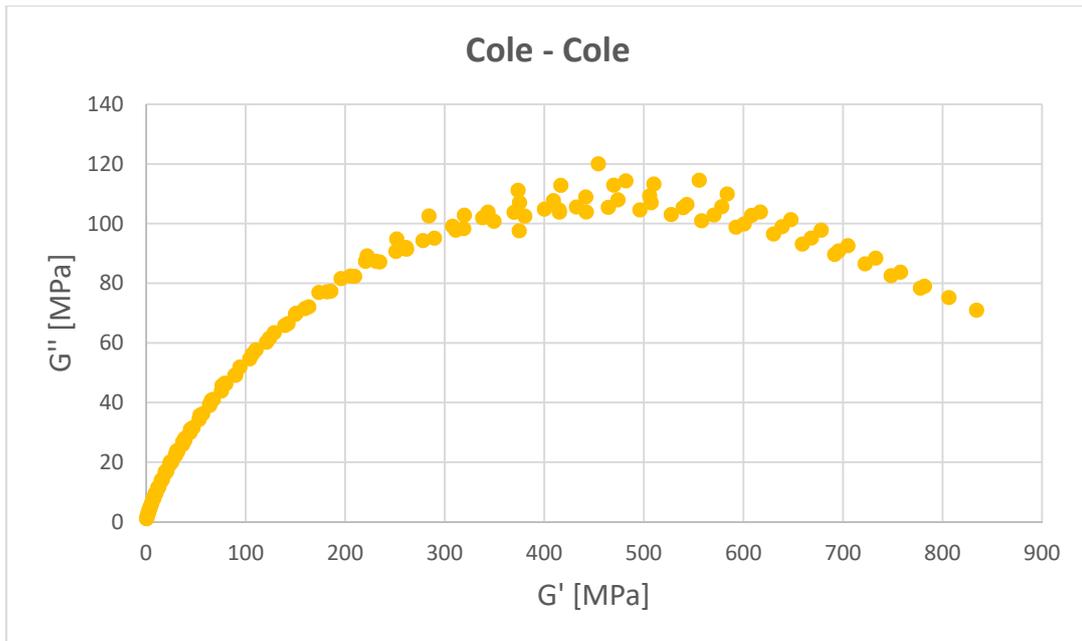


Figura 5.7 Diagramma di Cole-Cole

Il passaggio successivo alla determinazione degli a_T è quello di passare dal dominio delle frequenze a quello del tempo, cioè da $G'(\omega)$ a $G'(t)$ per poter confrontarlo con i valori del BBR espressi nel tempo. La relazione da seguire è data dall'equazione di Christensen di seguito riportata:

$$G(t) = G'(\omega) \quad (5.8)$$

Dove si è assunto con ω :

$$\omega = \frac{2}{\pi t} \quad (5.9)$$

Questa relazione afferma che il modulo complesso in funzione del tempo $G(t)$ equivale al modulo elastico $G'(\omega)$ in funzione della frequenza se si assume per la conversione dalla frequenza al tempo l'eq. (5.9).

A questo punto si è deciso di proseguire con due procedimenti differenti per poi confrontarne i risultati: il primo con l'obiettivo di determinare la temperatura critica del DSR in funzione dei valori

ottenuti al BBR per poi confrontare le due temperature critiche; il secondo, invece, intende determinare quei valori del modulo complesso G^* e dell'angolo di fase δ (e, al fine di avere un ulteriore confronto, anche il modulo elastico G' , parametro in funzione degli altri due) per cui si ottiene al DSR la stessa temperatura critica ottenuta al BBR.

5.5.1 DETERMINAZIONE DELLA TEMPERATURA CRITICA CON IL DSR

Per la determinazione della temperatura critica al DSR, effettuato il passaggio dal dominio delle frequenze a quello del tempo, si prosegue con la rappresentazione su un piano semi-logaritmico il modulo elastico in funzione del tempo come di seguito mostrato:

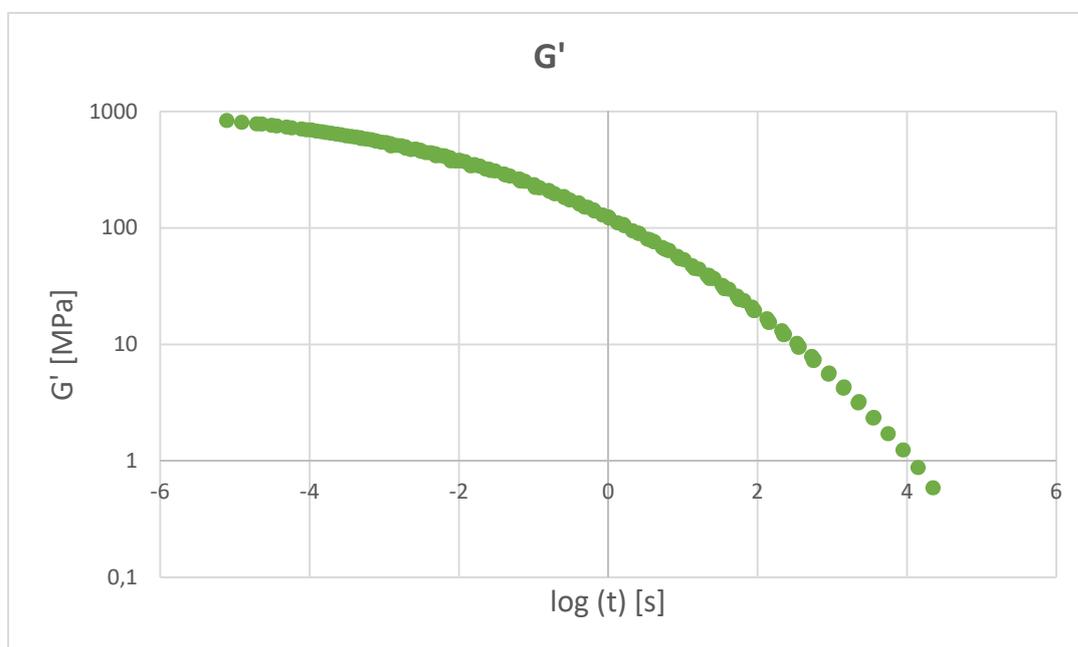
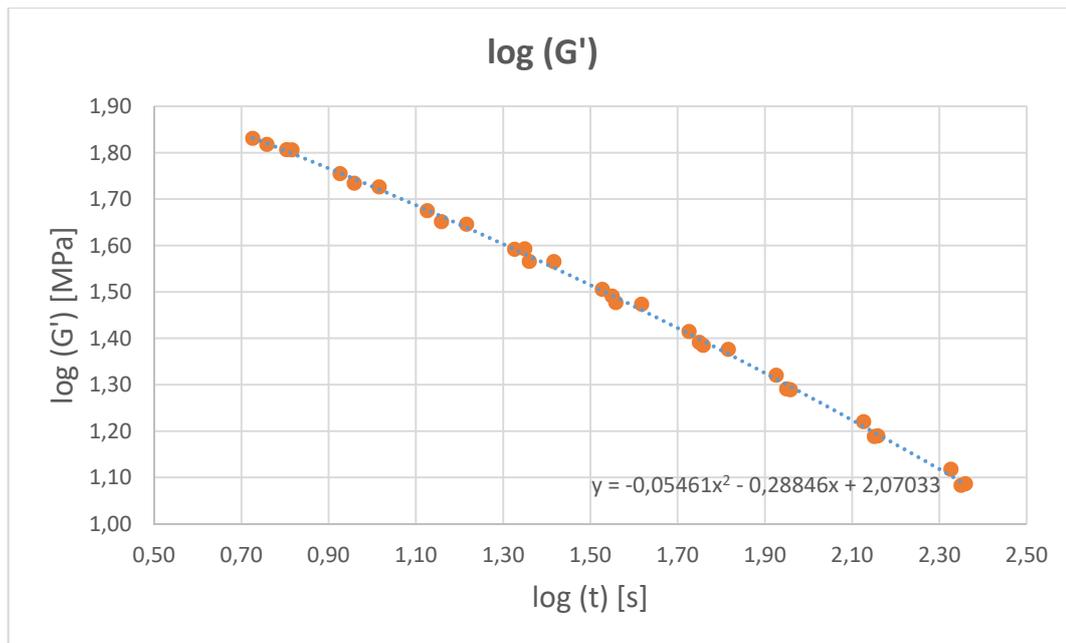


Figura 5.8 Modulo elastico nel dominio del tempo

Lo step successivo consiste nel limitare la funzione appena ricavata nell'intervallo del tempo di interesse, corrispondente a quello in comune alle prove eseguite al BBR che va dagli 8 secondi fino ai 240 secondi (in scala logaritmica corrispondenti rispettivamente a 0,9 e 2,4). Si riporta la curva nell'intervallo su prestabilito in scala bi-logaritmica:

Figura 5.9 $\log(G')$ in funzione del logaritmo del tempo

Si è deciso di prendere i valori in un intervallo leggermente più ampio rispetto a quello strettamente necessario per la correlazione tra i macchinari e, di seguito, di interpolare i punti così ottenuti con una funzione di secondo grado da cui estrapolare i coefficienti del ramo di parabola (A, B e C):

Tabella 5.6 Coefficienti parabola

A	B	C
-0,05461	-0,28846	2,07033

I coefficienti così ottenuti servono per la determinazione dei parametri di rigidità e della corrispettiva tangente a diversi intervalli di tempo: andando a sostituire A, B e C nell'equazione della parabola (eq. 5.10), è possibile ricavare i valori di $G(t)$ per i diversi intervalli temporali sostituendo alla x il corrispettivo del tempo:

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (5.10)$$

Ricordando che il $m - value$ corrisponde alla tangente del modulo della rigidità, derivando l'equazione della parabola su riportata, è immediata la sua determinazione per i diversi intervalli temporali di interesse:

$$y' = 2Ax + B \quad (5.11)$$

$$|y'| = m - value \quad (5.12)$$

Per materiali isotropi, come lo è il bitume, la relazione che correla il modulo di elasticità longitudinale S e il modulo di elasticità tangenziale G è espressa come:

$$G = \frac{S}{2(1 + \nu)} \quad (5.13)$$

Dove:

$\nu = coefficiente di Poisson.$

Per l'analisi di questo elaborato si è ipotizzato il coefficiente di Poisson ν costante ed uguale per tutti i bitumi con lo scopo di non incrementare le variabili di calcolo. Come noto, questo coefficiente può avere valori compresi tra lo 0 e lo 0,5. Al fine dell'analisi, si è deciso di adottare due diversi valori di ν per avere una più ampia casistica, i valori adottati sono stati:

- $\nu = 0,35;$
- $\nu = 0,5.$

La scelta di questi due valori è stata suggerita sulla base di studi recenti che hanno determinato il valore del coefficiente di Poisson per diversi bitumi, modificati e non, e per materiali viscoelastici lineare (A. Graziani, 2014 e N.W. Tschoegl, 2002).

Imposti questi valori, dunque, l'analisi è proceduta correlando da una parte i moduli di elasticità e dall'altra le loro tangenti a specifici intervalli temporali. I risultati ottenuti dall'analisi sono riportati nella tabella 5.7:

Tabella 5.7 Risultati analisi a diversi ν

T	t	Stiffness (BBR)	m-value (BBR)	G(t) = G'(ω)	S (ν=0,35) (DSR)	S (ν=0,5) (DSR)	y' (DSR)	diff S (ν=0,35)	diff S (ν=0,5)	diff y'
[°C]	[s]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[%]	[%]	[%]
-12	8	226	0,342	58,2	157,3	174,7	0,338	30,4	22,7	11,6
-12	15	181	0,367	45,2	122,2	135,7	0,353	32,5	25,0	12,0
-12	30	139	0,394	33,5	90,5	100,5	0,369	34,9	27,7	12,4
-12	60	104,5	0,421	24,3	65,5	72,8	0,386	37,3	30,4	12,8
-12	120	77,35	0,449	17,2	46,3	51,5	0,402	40,1	33,4	12,9
-12	240	56,2	0,476	11,9	32,0	35,6	0,418	43,0	36,7	13,2

Dove la prima colonna rappresenta la temperatura espressa in gradi centigradi (costante nel tempo), la seconda gli intervalli di tempo per cui si ha una misurazione al BBR espressi in secondi, la terza e la quarta i dati ottenuti mediante prova al BBR (contraddistinti dal colore dei titoli in rosso), la successiva dalla legge che lega il dominio delle frequenze a quello del tempo, la sesta e la settima i risultati della rigidezza ai due differenti valori di ν , seguiti dalla colonna della tangente (quest'ultima indipendente dal coefficiente di Poisson) frutto delle prove al DSR (contraddistinti, invece, dal colore blu) e, infine, le ultime tre rappresentano le differenze in termini di percentuale tra le prove del BBR e l'analisi dei dati del DSR.

Come si può notare, per il valore maggiore di Poisson (corrispondente a 0,5) si ha una percentuale più bassa rispetto all'equivalente con valore minore. Tale considerazione si è riscontrata anche in tutti i restanti 7 bitumi testati. In seguito a ciò, al fine dell'analisi, tuttavia, si è continuato ad analizzare le prove con entrambi i valori.

Al contrario, invece, si farà riferimento al solo intervallo temporale corrispondente a 60 secondi (quello per cui si ha la caratterizzazione del bitume in seguito alle prove al Bending Beam Rheometer) per la successiva analisi.

Nel caso appena analizzato si è fatto riferimento alla temperatura media di -12 °C prendendo in considerazione tutte le curve ottenute nel range di temperatura compreso tra i 6 °C e i -36 °C. Di seguito, invece, si è fatto riferimento alle tre temperature (o quattro nel caso di alcuni bitumi) alle quali si è lavorato al BBR che si ricorda essere -12 °C, -18 °C e -24 °C (oltre ai -6 °C per alcuni leganti) tenendo in considerazione solo le prime tre temperature maggiori rispetto a quella considerata. Si è deciso di adottare questa soluzione perché si è osservato come, nel passaggio da frequenze a tempo, le uniche curve di interesse fossero, per l'appunto, quelle a temperature più alte (con valori del modulo

complesso più basso a parità di frequenza), garantendo così una migliore approssimazione nell'interpolazione dei vari punti con l'equazione di secondo grado.

Si è quindi rifatta l'analisi precedentemente vista per la temperatura di -12 °C questa volta, però, considerando le sole temperature di -6 °C, 0 °C e +6 °C.

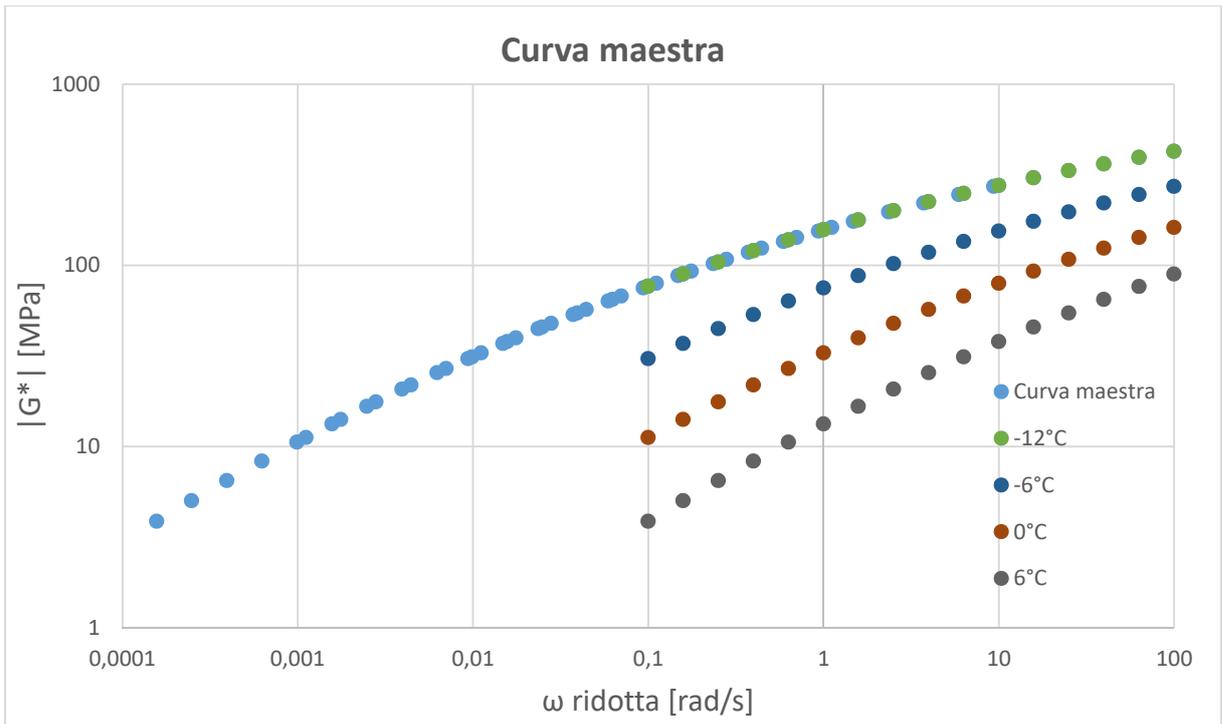
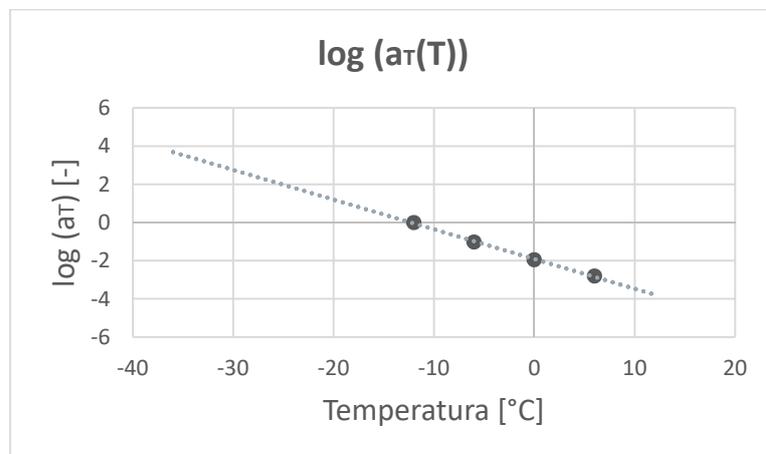
Essendo i passaggi del tutto analoghi ai precedenti, si riportano di seguito direttamente le tabelle e i grafici:

Tabella 5.8 Shift factor per $T = -12\text{ °C}$

Variabili		
log(G_g) [MPa]	log(ω_c) [rad/s]	R [-]
3,157546367	-2,851	2,0561

Funzione obiettivo		
SQD C.M.	SQD P.A.	Somma SQD
0,002835121	0,009664773	0,012499895

SHIFT FACTOR		
Temperature	a_T	log a_T
[°]	[-]	[-]
-36		
-30		
-24		
-18		
-12	1,0	0,0000
-6	0,1	-1,0280
0	0,011	-1,9532
6	0,002	-2,8043
12		

Figura 5.10 Curva maestra per $T = -12^\circ\text{C}$ Figura 5.11 Shift factor per $T = -12^\circ\text{C}$

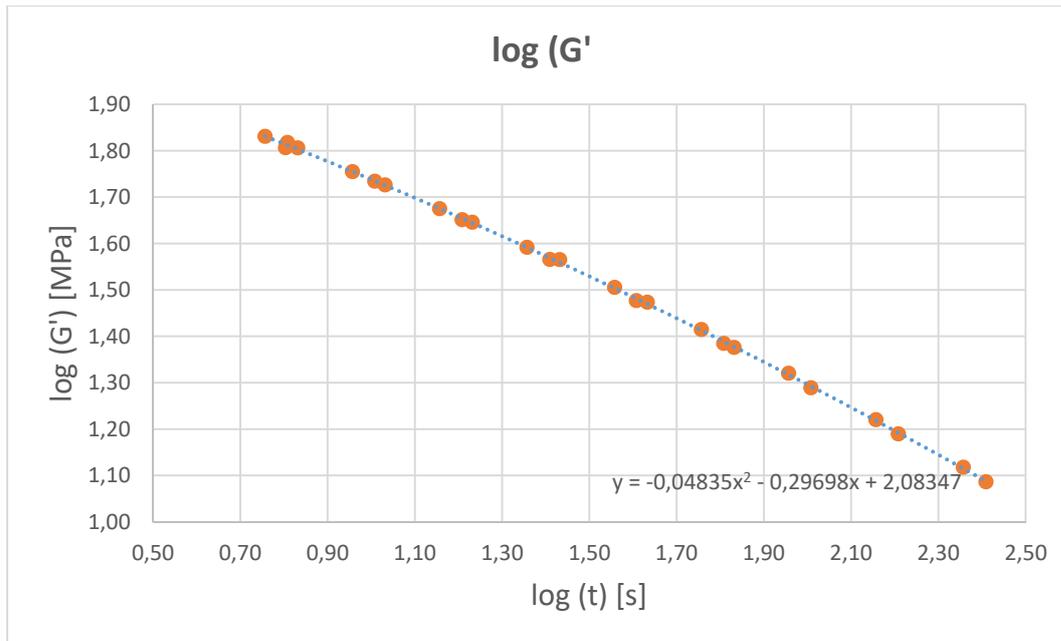


Figura 5.12 $\log(G')$ in funzione del logaritmo del tempo per $T = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabella 5.9 Coefficienti parabola per $T = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$

A	B	C
-0,04835	-0,29698	2,08347

Come si può notare confrontando le tabelle 5.6 e 5.9 nei due differenti casi, i parametri della parabola ottenuti considerando tutte le temperature sono diversi da quelli nel caso si prendessero esclusivamente le temperature superiori più prossime a quella in esame. Si noti come a variare siano anche i coefficienti che entrano in gioco nelle equazioni definite da Christensen-Anderson e lo scarto quadratico medio (tabella 5.5 e 5.8).

Di conseguenza, i valori finali che ne derivano risultano essere anch'essi differenti:

Tabella 5.10 Risultati analisi a diversi ν per $T = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$

T	t	Stiffness (BBR)	m-value (BBR)	G(t) = G'	S ($\nu=0,35$) (DSR)	S ($\nu=0,5$) (DSR)	y' (DSR)	diff S ($\nu=0,35$)	diff S ($\nu=0,5$)	diff y'
[$^{\circ}\text{C}$]	[s]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[%]	[%]	[%]
-12	8	226	0,342	58,2	161,1	179,0	0,341	28,7	20,8	11,0
-12	15	181	0,367	45,2	125,5	139,5	0,354	30,7	23,0	10,6
-12	30	139	0,394	33,5	93,5	103,9	0,368	32,8	25,3	10,4
-12	60	104,5	0,421	24,3	68,2	75,8	0,383	34,7	27,5	10,2
-12	120	77,35	0,449	17,2	48,8	54,2	0,398	36,9	29,9	9,8
-12	240	56,2	0,476	11,9	34,2	38,0	0,412	39,1	32,4	9,7

Da una rapida analisi, rispetto ai dati precedenti si nota una diminuzione della percentuale di errore che si commetterebbe in questo secondo caso dell'ordine medio di 4 punti percentuali.

Si fa lo stesso ragionamento per le temperature di $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ di cui, però, si riportano i dati in maniera più schematica:

Tabella 5.11 Shift factor per $T = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$

SHIFT FACTOR		
Temperature	a(t)	log a(t)
[$^{\circ}$]	[-]	[-]
-36		
-30		
-24		
-18	1,0	0,0000
-12	0,1	-1,1287
-6	0,007	-2,1499
0	0,001	-3,0673
6		
12		

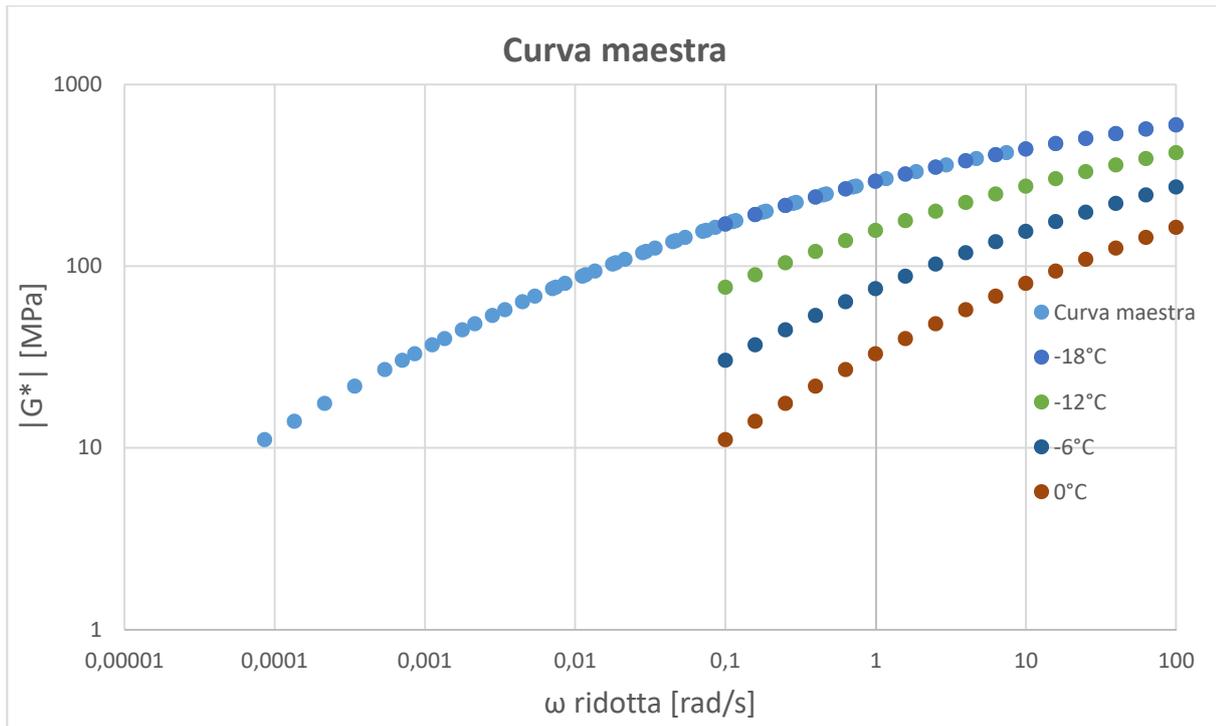


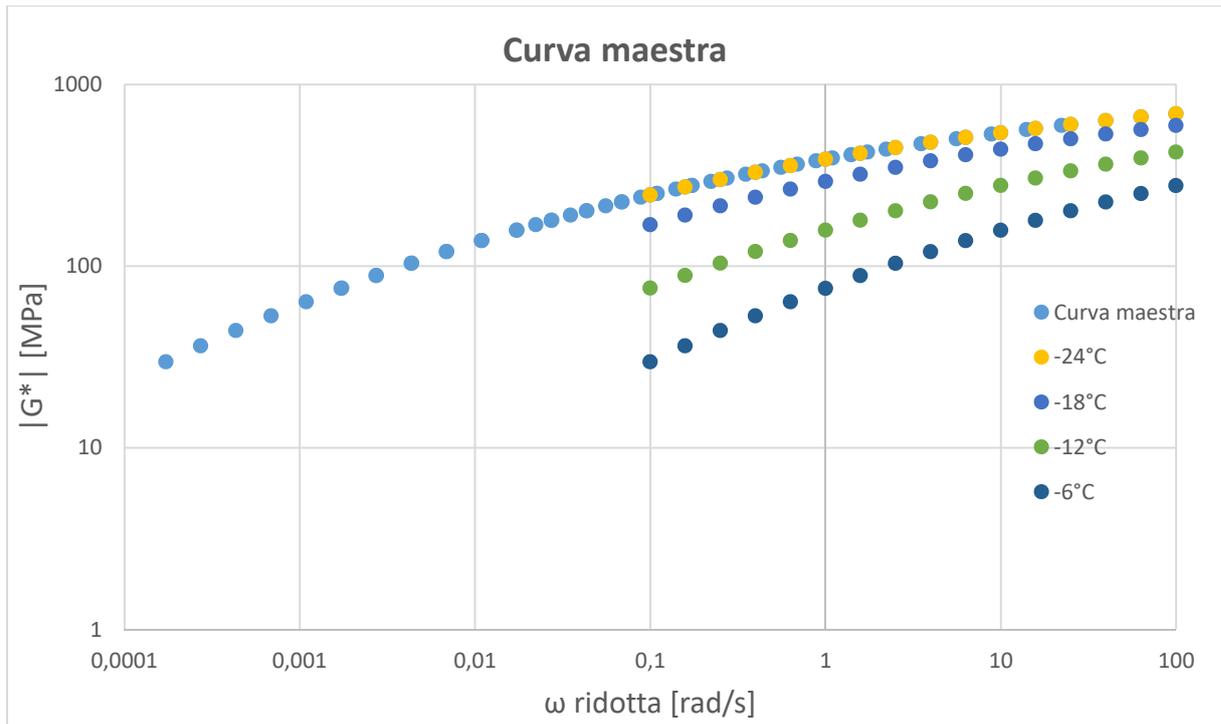
Figura 5.13 Curva maestra per $T = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabella 5.12 Coefficienti parabola per $T = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$

A	B	C
-0,04005	-0,22689	2,39817

Tabella 5.13 Shift factor per $T = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$

SHIFT FACTOR		
Temperature	a(t) input	log a(t) input
[$^{\circ}$]	[-]	[-]
-36		
-30		
-24	1,0	0,0000
-18	0,2	-0,6534
-12	0,017	-1,7603
-6	0,002	-2,7633
0		
6		
12		

Figura 5.14 Shift factor per $T = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tabella 5.14 Coefficienti parabola per $T = -24\text{ }^{\circ}\text{C}$

A	B	C
-0,04138	-0,17216	2,52061

I valori così elaborati al DSR corrispondenti alla rigidità e alla sua tangente per $t = 60\text{ s}$ a tutte le temperature, facendo riferimento d'ora in avanti al solo valore di 0,5 per quanto riguarda il coefficiente di Poisson, vengono tabellati di seguito:

Tabella 5.15 Valori DSR bitume A

DSR ($\nu=0,5$)	$t=60\text{ s}$	Bitume A		
T	[$^{\circ}\text{C}$]	-12	-18	-24
Stiffness (S)	[MPa]	75,8	221,4	363,7
m-value	[-]	0,469	0,369	0,319

Sempre in riferimento al tempo specifico di 60 secondi, si riportano in una tabella le differenze espresse in percentuale dei suddetti valori per le diverse temperature:

Tabella 5.16 Differenze percentuali DSR/BBR

T	diff y'	diff S (0,5)
[°C]	[%]	[%]
-12	10,2	27,5
-18	7,5	16,3
-24	19	38,9

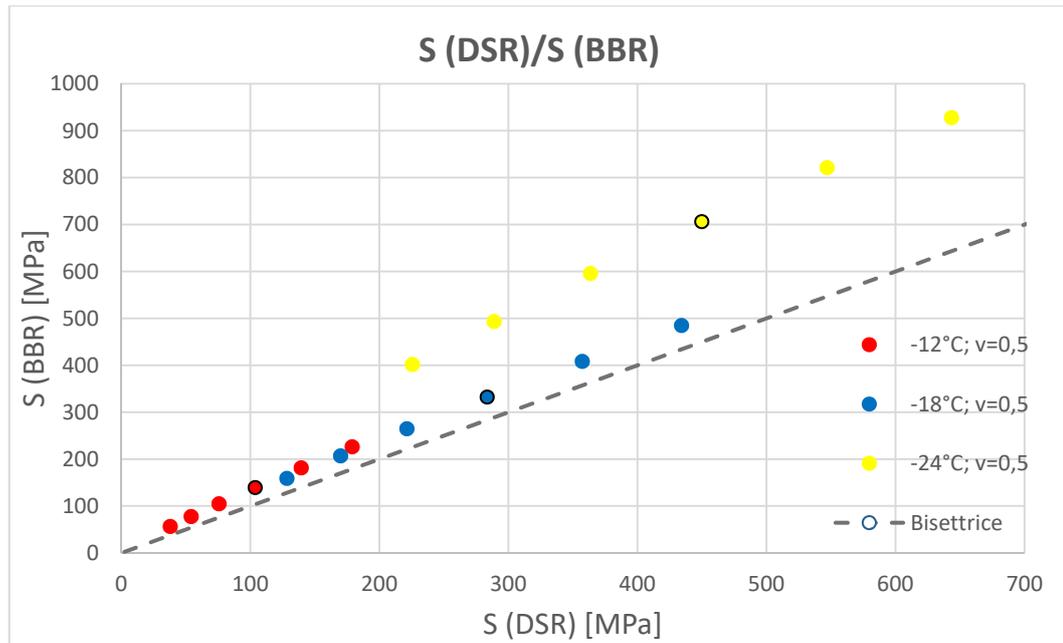
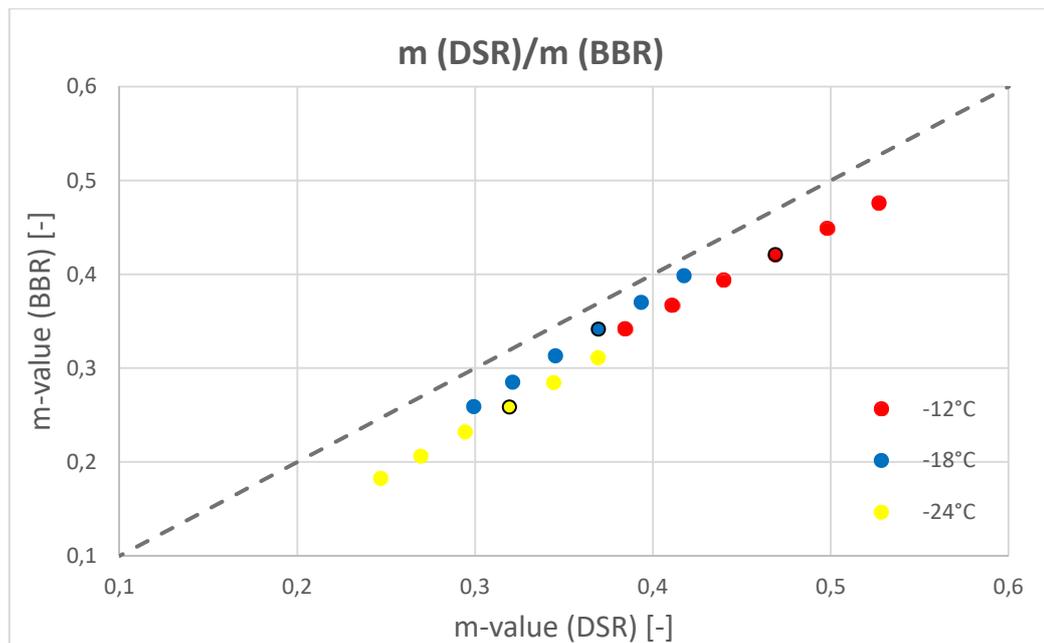
Dalla tabella 5.16 si può andare a determinare, tramite un processo di interpolazione lineare (contrariamente alla sua tangente, per la rigidità sempre su scala logaritmica), la temperatura critica misurata tramite sperimentazione al Dynamic Shear Rheometer per cui ad S corrisponde un valore pari a 300 MPa e ad m , invece, il valore di 0,3.

Eseguita l'operazione su spiegata, sarà possibile eseguire il vero confronto tra i due macchinari mettendo in relazione le corrispettive temperature critiche:

Tabella 5.17 Temperature critiche bitume A

	DSR	BBR	Diff T
	T cr [°C]	T cr [°C]	[°C]
Stiffness=300 MPa	-21,67	-18,93	2,7
m-value=0,3	-17,87	-21,00	3,1

Di seguito si riportano i grafici che mettono in correlazione diretta i valori delle due grandezze caratteristiche alle tre temperature di riferimento per il BBR e il DSR:

Figura 5.15 Relazione $S(DSR)/S(BBR)$ Figura 5.16 Relazione $m(DSR)/m(BBR)$

In entrambi i grafici sono riportati i valori corrispondenti a tutti gli intervalli di tempo, dove il risultato relativo a $t = 60 s$ è riconoscibile dal contorno nero.

Come si può notare dalla figura 5.15, i valori ottenuti mediante prova al DSR sembrano sovrastimare il corrispettivo ottenuto mediante BBR presentandosi essi tutti al di sopra della bisettrice. Inoltre, ancora più evidente, se per i dati corrispondenti alle temperature più alte (-12 °C e -18 °C) si ha un andamento generale molto prossimo alla bisettrice, per la temperatura più estrema (-24 °C) si ha un sostanziale scostamento dall'andamento descritto dai dati per le altre temperature essendo, questa, traslata a sinistra rispetto alla bisettrice. Nella figura successiva, analogamente al caso precedente, (Fig. 5.15) i valori della m ricavati tramite DSR tendono, al contrario, a sottostimare i valori ottenuti al BBR.

Sempre in riferimento alla figura 5.15, si traccia una retta che approssimi nel miglior modo possibile i valori corrispondenti alle temperature di -12 °C e -18 °C.

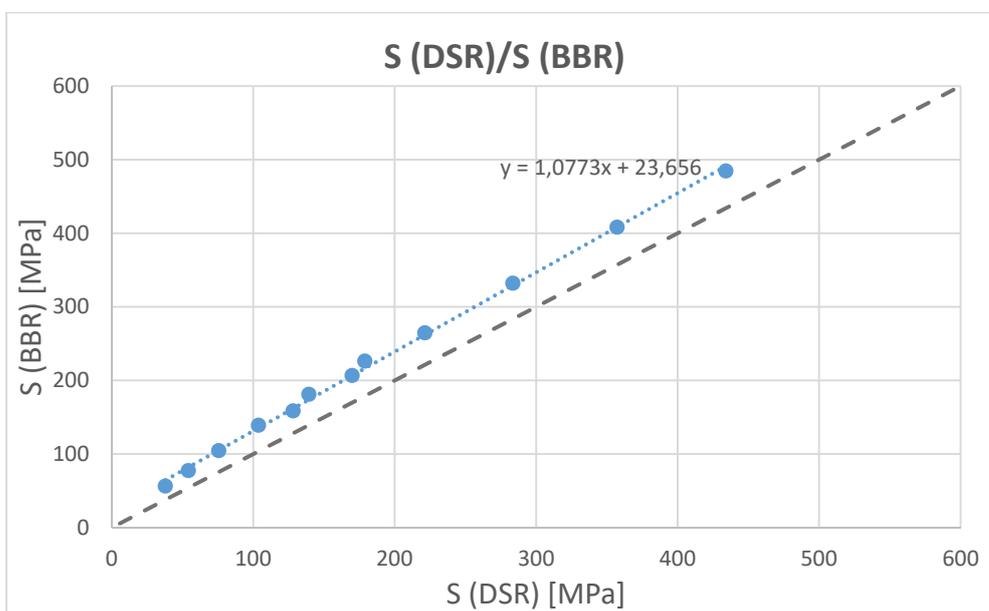


Figura 5.17 Retta interpolante i risultati sperimentali

Come si può osservare dai parametri della retta interpolante, questa presenta un coefficiente angolare prossimo all'unità, il che vuol significare una buona correlazione tra i due macchinari, e un'intercetta priva di significato fisico ma che riproduce un errore sistematico tra i due macchinari.

Vengono di seguito riportati tutti i parametri ottenuti dalle interpolazioni delle varie rette per i diversi bitumi:

Tabella 5.18 Parametri retta interpolante per tutti i bitumi

	A	B
Bitume A	1,0773	23,656
Bitume B	1,1007	7,5123
Bitume C	1,1771	16,215
Bitume D	0,9465	23,576
Bitume E	0,8215	38,093
Bitume F	0,9018	20,073
Bitume G	0,9286	0,1941
Bitume H	0,7204	12,877

Dalla media di questi valori è possibile determinare un'equazione del tipo:

$$y = 0,96 x + 17,78 \quad (5.14)$$

Dove si è indicato con la x il valore del modulo elastico in funzione del tempo $G'(t)$ del DSR e con la y il valore della rigidezza a flessione S per il BBR.

Essendo il bitume A un legante con l'aggiunta di additivi liquidi, si è preferito continuare l'analisi per uno studio più approfondito prendendo come riferimento un bitume tal quale (bitume D) per escludere che il comportamento alle varie temperature dipenda da altri fattori che non sia, appunto, la temperatura stessa.

Si riportano, infine, le differenze percentuali determinate per tutti i diversi bitumi applicando il modello così come precedentemente descritto:

Tabella 5.19 Differenze percentuali DSR/BBR per tutti i bitumi alle diverse T

t=60s		Bitume A		t=60s		Bitume B	
T	diff y'	diff S (0,35)	diff S (0,5)	T	diff y'	diff S (0,35)	diff S (0,5)
[°C]	[%]	[%]	[%]	[°C]	[%]	[%]	[%]
-12	9,0	34,7	27,5	-12	5,3	25,0	16,7
-18	12,7	24,7	16,3	-18	2,5	21,8	13,1
-24	4,9	45,0	38,9	-24	11,4	43,2	36,9

t=60s	Bitume C		
T	diff y'	diff S (0,35)	diff S (0,5)
[°C]	[%]	[%]	[%]
-12	9,9	34,4	27,1
-18	7,7	29,3	21,4
-24	14,4	43,7	37,5

t=60s	Bitume D		
T	diff y'	diff S (0,35)	diff S (0,5)
[°C]	[%]	[%]	[%]
-12	7,0	20,7	11,9
-18	6,5	12,8	3,1
-24	19,0	35,2	28,0

t=60s	Bitume E		
T	diff y'	diff S (0,35)	diff S (0,5)
[°C]	[%]	[%]	[%]
-6	12,3	15,9	6,6
-12	7,9	5,9	-4,6
-18	7,8	-2,6	-14,0
-24	20,0	13,9	4,3

t=60s	Bitume F		
T	diff y'	diff S (0,35)	diff S (0,5)
[°C]	[%]	[%]	[%]
-6	2,9	16,7	7,5
-12	1,8	13,5	3,9
-18	-4,7	4,0	-6,7
-24	5,3	20,1	11,2

t=60s	Bitume G		
T	diff y'	diff S (0,35)	diff S (0,5)
[°C]	[%]	[%]	[%]
-12	3,1	4,6	-6,0
-18	-4,8	3,1	-7,7
-24	6,0	22,3	13,7

t=60s	Bitume H		
T	diff y'	diff S (0,35)	diff S (0,5)
[°C]	[%]	[%]	[%]
-12	6,4	-11,6	-24,0
-18	4,1	-18,3	-31,5
-24	16,6	16,2	6,9

Dalla tabella 5.19 è possibile osservare come il modello si presti molto meglio ad essere applicato ai bitumi tal quali rispetto a quelli modificati con additivi liquidi (eccezion fatta per la temperatura di -24 °C per cui si procederà con una trattazione a parte nel paragrafo successivo) presentando una variazione percentuale intorno al 10%.

Infine, si procede riportando, sempre per tutti i bitumi, le temperature critiche ottenute dai due macchinari con il loro confronto:

Tabella 5.20 Temperature critiche bitume A

Bitume A t=60 s	DSR	BBR	Diff T
	T cr [°C]	T cr [°C]	[°C]
S=300 MPa	-21,67	-18,93	2,7
m-value=0,3	-17,87	-21,00	3,1

Bitume B t=60 s	DSR	BBR	Diff T
	T cr [°C]	T cr [°C]	[°C]
S=300 MPa	-23,98	-20,41	3,6
m-value=0,3	-20,87	-20,23	0,6

Bitume C t=60 s	DSR	BBR	Diff T
	T cr [°C]	T cr [°C]	[°C]
S=300 MPa	-22,70	-19,07	3,6
m-value=0,3	-21,24	-19,56	1,7

Bitume D t=60 s	DSR	BBR	Diff T
	T cr [°C]	T cr [°C]	[°C]
S=300 MPa	-17,46	-17,20	0,3
m-value=0,3	-20,18	-18,91	1,3

Bitume E t=60 s	DSR	BBR	Diff T
	T cr [°C]	T cr [°C]	[°C]
S=300 MPa	-11,41	-11,65	0,2
m-value=0,3	-14,27	-12,33	1,9

Bitume F t=60 s	DSR	BBR	Diff T
	T cr [°C]	T cr [°C]	[°C]
S=300 MPa	-16,30	-16,70	0,4
m-value=0,3	-7,37	-6,15	1,2

Bitume G t=60 s	DSR	BBR	Diff T
	T cr [°C]	T cr [°C]	[°C]
S=300 MPa	-16,53	-17,10	0,6
m-value=0,3	-14,02	-13,61	0,4

Bitume H t=60 s	DSR	BBR	Diff T
	T cr [°C]	T cr [°C]	[°C]
S=300 MPa	-16,59	-18,42	1,8
m-value=0,3	-20,27	-18,88	1,4

5.5.1.1 PROVA A DIVERSO CONDIZIONAMENTO

L'analisi implementare è consistita nell'eseguire una prova di frequency sweep con il piatto da 4 mm in cui si è cambiato il condizionamento a cui sottoporre il provino. In questo caso si è fatto riferimento ad un bitume tal quale come, ad esempio, il bitume D. L'analisi dei dati precedentemente descritta per il bitume A è stata la medesima che si è seguita per i restanti bitumi, compreso il bitume D. Si evita, pertanto, di ripetere la trattazione, riportando direttamente i risultati di interesse ottenuti al fine dell'analisi:

Tabella 5.21 Valori DSR bitume D

DSR (v=0,5)	t=60s	Bitume D		
		T	Stiffness (S)	m-value
T	[°C]	-12	-18	-24
Stiffness (S)	[MPa]	118,1	328,9	525,9
m-value	[-]	0,428	0,334	0,284

Tabella 5.22 Temperature critiche bitume D

	DSR	BBR	Diff T
	T cr [°C]	T cr [°C]	[°C]
Stiffness=300 Mpa	-17,46	-17,20	0,3
m-value=0,3	-20,18	-18,91	1,3

Se prima i 5 minuti di condizionamento erano comprensivi anche del tempo necessario al macchinario per passare da una temperatura all'altra, la prova eseguita come confronto prevedeva, invece, 5 minuti

di condizionamento alla temperatura prestabilita, escludendo da questi il tempo di transizione tra una temperatura e la successiva. Quindi, se nel primo caso si aveva il provino a condizionare alla specifica temperatura per un tempo inferiore ai 5 minuti in funzione della temperatura stessa, nel secondo caso i minuti effettivi erano sempre 5. Un primo riscontro osservabile dal confronto tra queste due prove è stato quello di determinare il tempo necessario al macchinario per avere una variazione termica di -6 °C partendo dalle varie temperature. I tempi di condizionamento alle varie temperature, espressi in secondi, sono espressi nella tabella sottostante:

Tabella 5.23 Tempi di transizione per il condizionamento

T	t [s]
12 °C → 6 °C	32
6 °C → 0 °C	36
0 °C → -6 °C	44
-6 °C → -12 °C	62
-12 °C → -18 °C	82
-18 °C → -24 °C	104
-24 °C → -30 °C	138
-30 °C → -36 °C	> 900

Com'è intuibile, al diminuire della temperatura, il macchinario impiega un tempo sempre maggiore a raggiungere quella desiderata. In relazione alla prova eseguita in precedenza e non considerando il passaggio alla T più estrema, il tempo di condizionamento complessivo per il passaggio dai -24 °C ai -30 °C è risultato essere fino ad un quasi +50 % nei due diversi metodi, passando da 300 secondi a 438 secondi. Un discorso differente è da fare per l'ultimo passaggio, in cui non si ha un tempo definito in quanto il DSR non riesce a raggiungere mai la temperatura di -36 °C. Per l'esecuzione della prova si è deciso di adottare un tempo di pre-condizionamento di 15 minuti (900 secondi) in cui si è registrata una temperatura minima raggiunta di -35,35 °C.

La prova così eseguita, non ha portato a risultati sostanzialmente differenti dalla precedente in termini di modulo complesso, angolo di fase e di tutti gli altri valori (qualche punto percentuale, la stessa che si potrebbe avere nella variabilità tra due ripetizioni). Una differenza, però, la si è osservata una volta analizzati i dati ottenuti attraverso la medesima modellazione adottata per il bitume A, andando ad

osservare il grafico che mette in relazione il valore della rigidità ottenuta al DSR con quella ottenuta al BBR riportato di seguito per le due differenti prove:

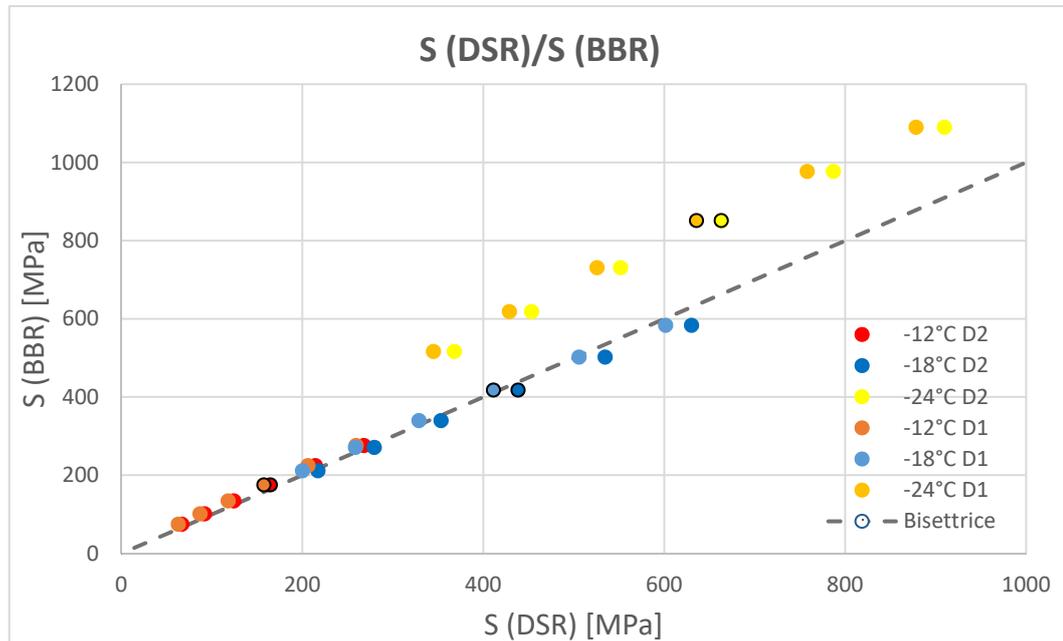


Figura 5.18 Confronto prove a diverso condizionamento

Si può notare dal grafico come per tutte le temperature ci sia una traslazione orizzontale dei dati tanto maggiore quanto più lungo è il tempo di condizionamento. Ulteriori considerazioni a riguardo sono riportate nel capitolo conclusivo del seguente elaborato.

5.5.2 PARAMETRI REOLOGICI PER LA TEMPERATURA CRITICA AL BBR

Oltre alla precedente, è stata condotta una seconda analisi in merito alle prove al DSR che tenesse in considerazione il modulo complesso e l'angolo di fase a diverse frequenze. L'obiettivo è stato quello di determinare per quale valore di questi parametri si riuscisse ad ottenere la stessa temperatura critica ottenuta con le prove al BBR.

Le frequenze di interesse considerate sono state:

- $\omega = 0,1 \text{ rad/s}$;
- $\omega = 1 \text{ rad/s}$;
- $\omega = 10 \text{ rad/s}$.

Che, secondo la relazione di Christensen (eq. 5.9), corrispondono rispettivamente ai seguenti tempi:

- $t = 6,37 \text{ s}$;
- $t = 0,637 \text{ s}$;
- $t = 0,0637 \text{ s}$.

Sempre prendendo a titolo di esempio il bitume A, come primo passaggio, si è ritrovato il valore della norma del modulo complesso $|G^*|$ (l'equivalente del modulo complesso G^*), del modulo elastico G' e dell'angolo di fase δ corrispondente alle tre frequenze in esame per le diverse temperature di prova:

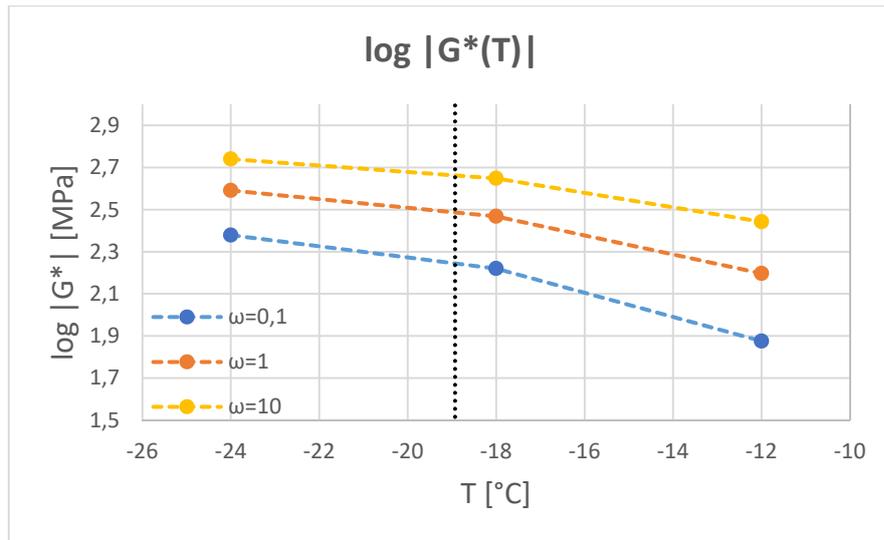
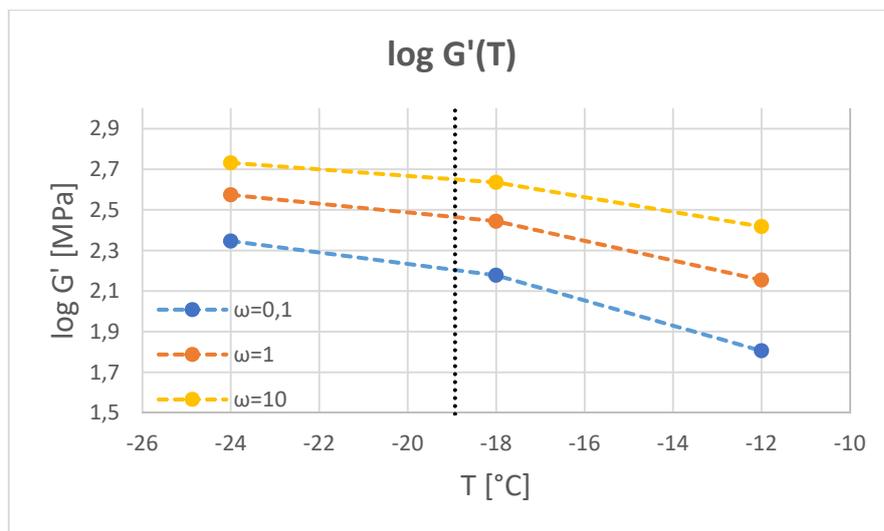
Tabella 5.24 Parametri in funzione di ω e T

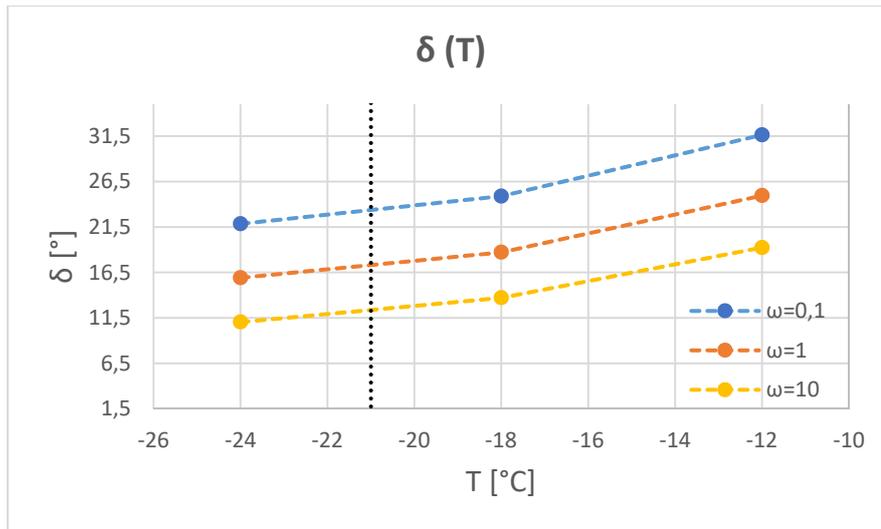
log $ G^* $ [MPa]			
T	$\omega=0,1$	$\omega=1$	$\omega=10$
-24	2,379	2,591	2,740
-18	2,220	2,468	2,648
-12	1,876	2,197	2,443

log G' [MPa]			
T	$\omega=0,1$	$\omega=1$	$\omega=10$
-24	2,347	2,574	2,732
-18	2,178	2,444	2,636
-12	1,806	2,154	2,418

δ [°]			
T	$\omega=0,1$	$\omega=1$	$\omega=10$
-24	21,9	15,9	11,0
-18	24,9	18,7	13,7
-12	31,6	25,0	19,2

Si è proseguito andando a riportare i valori su un diagramma in scala semi-logaritmica in funzione della temperatura per i differenti valori della frequenza:

Figura 5.19 Grafico $\log|G^*(T)|$ per diverse frequenzeFigura 5.20 Grafico $\log|G'(T)|$ per diverse frequenze

Figura 5.21 Grafico $\delta(T)$ per diverse frequenze

Costruiti i grafici, è possibile adesso entrare in questi con la temperatura di riferimento, rispettivamente di $-18,93$ °C per G^* e G' e di $-21,00$ °C per δ , ricavando così i corrispettivi valori:

Tabella 5.25 Parametri per la T_{cr} a diversa frequenza

G*(T cr) [MPa]	
$\omega=0,1$	175,5
$\omega=1$	306,7
$\omega=10$	459,6

G'(T cr) [MPa]	
$\omega=0,1$	159,7
$\omega=1$	291,1
$\omega=10$	447,2

δ [°]	
$\omega=0,1$	23,38
$\omega=1$	17,32
$\omega=10$	12,38

Riproponendo lo stesso ragionamento ai restanti sette bitumi, i risultati che ne vengono fuori sono:

Tabella 5.26 Parametri per la T_{cr} per tutti i bitumi a diversa frequenza

Bitume A	G*(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	175,5
	$\omega=1$	306,7
	$\omega=10$	459,6
	G'(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	159,7
	$\omega=1$	291,1
	$\omega=10$	447,2
	$\delta(T cr)$ [°]	
	$\omega=0,1$	23,38
$\omega=1$	17,32	
$\omega=10$	12,38	

Bitume B	G*(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	154,58
	$\omega=1$	262,98
	$\omega=10$	395,69
	G'(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	142,36
	$\omega=1$	249,85
	$\omega=10$	384,00
	$\delta(T cr)$ [°]	
	$\omega=0,1$	22,90
$\omega=1$	18,19	
$\omega=10$	13,96	

Bitume C	G*(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	156,76
	$\omega=1$	275,92
	$\omega=10$	418,29
	G'(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	142,96
	$\omega=1$	261,57
	$\omega=10$	405,69
	$\delta(T cr)$ [°]	
	$\omega=0,1$	23,99
$\omega=1$	18,26	
$\omega=10$	13,84	

Bitume D	G*(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	211,32
	$\omega=1$	361,12
	$\omega=10$	527,66
	G'(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	193,31
	$\omega=1$	344,48
	$\omega=10$	515,45
	$\delta(T cr)$ [°]	
	$\omega=0,1$	22,65
$\omega=1$	16,53	
$\omega=10$	11,59	

Bitume E	G*(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	215,96
	$\omega=1$	367,19
	$\omega=10$	541,18
	G'(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	197,59
	$\omega=1$	347,28
	$\omega=10$	524,25
	$\delta(T cr)$ [°]	
	$\omega=0,1$	23,07
$\omega=1$	16,99	
$\omega=10$	12,46	

Bitume F	G*(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	191,28
	$\omega=1$	262,97
	$\omega=10$	367,00
	G'(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	186,15
	$\omega=1$	280,86
	$\omega=10$	388,88
	$\delta(T cr)$ [°]	
	$\omega=0,1$	21,93
$\omega=1$	19,50	
$\omega=10$	16,54	

Bitume G	G*(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	189,99
	$\omega=1$	311,85
	$\omega=10$	459,85
	G'(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	177,20
	$\omega=1$	298,75
	$\omega=10$	447,23
	$\delta(T cr)$ [°]	
	$\omega=0,1$	21,76
$\omega=1$	17,40	
$\omega=10$	14,20	

Bitume H	G*(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	259,19
	$\omega=1$	447,12
	$\omega=10$	673,57
	G'(T cr) [MPa]	
	$\omega=0,1$	238,90
	$\omega=1$	423,88
	$\omega=10$	654,04
	$\delta(T cr)$ [°]	
	$\omega=0,1$	22,61
$\omega=1$	18,30	
$\omega=10$	13,60	

Da cui, andando a mediare tutti i valori così ottenuti, si possono determinare, con una certa approssimazione, i valori corrispondenti al modulo complesso $|G^*|$ e all'angolo di fase δ alle diverse frequenze ω (il modulo elastico è in funzione dei due parametri visti in precedenza secondo la relazione descritta nell'eq. (2.60), quindi lo si può assumere come parametro di controllo), da ricercare in una frequency sweep eseguita al DSR ricavando, così, la stessa temperatura critica che si avrebbe con una prova al BBR sullo stesso materiale.

Tabella 5.27 Valori medi e variabilità dei vari coefficienti

$ G^*(T_{cr}) $ [Mpa]		max [%]	min [%]
$\omega=0,1$ [rad/s]	194,3	25,0	20,5
$\omega=1$ [rad/s]	324,5	27,4	19,0
$\omega=10$ [rad/s]	480,4	28,7	23,6
$ G'(T_{cr}) $ [Mpa]		max [%]	min [%]
$\omega=0,1$ [rad/s]	179,8	24,7	20,8
$\omega=1$ [rad/s]	312,2	26,3	20,0
$\omega=10$ [rad/s]	470,8	28,0	18,4
$\delta(T_{cr})$ [-]		max [%]	min [%]
$\omega=0,1$ [rad/s]	22,8	5,0	4,5
$\omega=1$ [rad/s]	17,8	8,6	7,2
$\omega=10$ [rad/s]	13,6	18,0	14,6

Nella tabella 5.26, a destra è riportata la media di tutti gli otto bitumi, a sinistra si mostrano, invece, le variabilità tra il valore massimo e quello minimo rispetto alla media.

Volendo fare l'analogo confronto prendendo in considerazione solo i bitumi tal quali, i risultati che si ottengono vengono riportati nella tabella di seguito:

Tabella 5.28 Valori medi e variabilità per bitumi tal quali

G*(T cr) [Mpa]		max [%]	min [%]
$\omega=0,1$ [rad/s]	205,8	4,7	7,7
$\omega=1$ [rad/s]	346,7	5,6	10,1
$\omega=10$ [rad/s]	509,6	5,8	9,8
G'(T cr) [Mpa]		max [%]	min [%]
$\omega=0,1$ [rad/s]	189,4	4,2	6,4
$\omega=1$ [rad/s]	330,2	4,9	9,5
$\omega=10$ [rad/s]	495,6	5,5	9,8
$\delta(T cr)$ [-]		max [%]	min [%]
$\omega=0,1$ [rad/s]	22,5	2,5	3,2
$\omega=1$ [rad/s]	17,0	2,5	2,6
$\omega=10$ [rad/s]	12,7	10,2	9,1

Si può notare come il valore massimo raggiunto in questo secondo caso sia molto più basso rispetto al precedente (28,7 % prima contro il 10,2 % dopo). Ulteriori considerazioni sui diversi valori vengono riportate nel capitolo conclusivo della tesi.

5.6 TEMPERATURA DI TRANSIZIONE VETROSA

L'analisi è proseguita determinando la temperatura di transizione vetrosa che, come espresso nel paragrafo 2.8, corrisponde a quella specifica temperatura per cui si ha il perfetto bilanciamento tra componente viscosa e componente elastica. Per determinarla, si è considerato il valore del modulo viscoso G'' alla frequenza più prossima ad 1 Hz, ricavata dalle prove sperimentali (pari a 6,31 rad/s), per le diverse temperature.

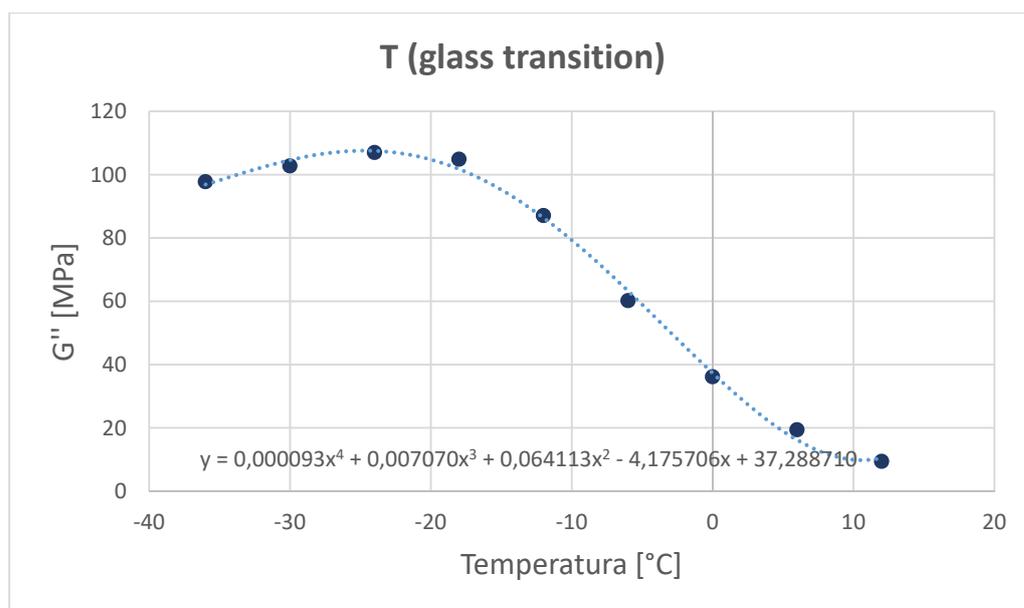


Figura 5.22 Temperatura di transizione vetrosa

Il passaggio successivo è consistito nell'interpolare i punti così ottenuti mediante un'equazione di quarto grado. La temperatura di transizione è quella corrispondente al valore più elevato di G'' , calcolabile trovando lo zero della derivata prima della funzione interpolante (equazione di terzo grado).

Si riportano di seguito le varie temperature di transizione ottenute per i vari bitumi:

Tabella 5.29 Temperature di transizione vetrosa

	T transizione
Bitume A	-27,4
Bitume B	-29,6
Bitume C	-27,9
Bitume D	-20,8
Bitume E	-14,8
Bitume F	-31,3
Bitume G	-28,4
Bitume H	-26,6

La temperatura di transizione è stata ottenuta anche con un secondo metodo, al fine di avere un riscontro con quella ricavata con il metodo precedente. Sulla base del risultato ottenuto alle prove ad DSR, secondo cui il gap tra i due piatti diminuisce al decrescere della temperatura per soddisfare la

richiesta di uno sforzo normale nullo ad inizio di ogni frequency sweep, la temperatura di transizione vetrosa può essere determinata andando a determinare graficamente quel punto per cui non si ha più una variazione lineare del gap con la temperatura. Di seguito si riporta la sua determinazione grafica sempre prendendo come esempio il bitume A:

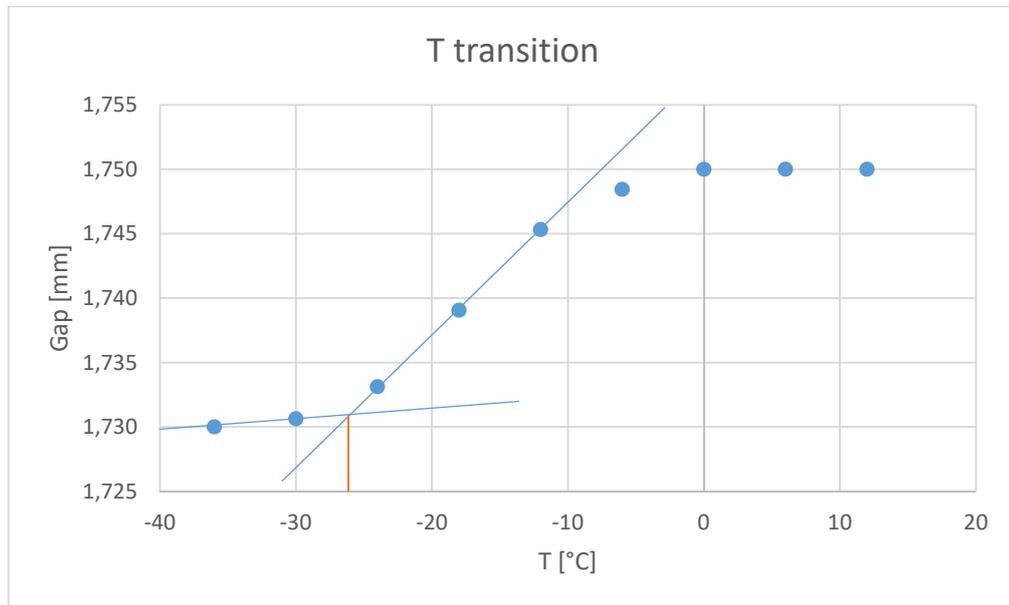
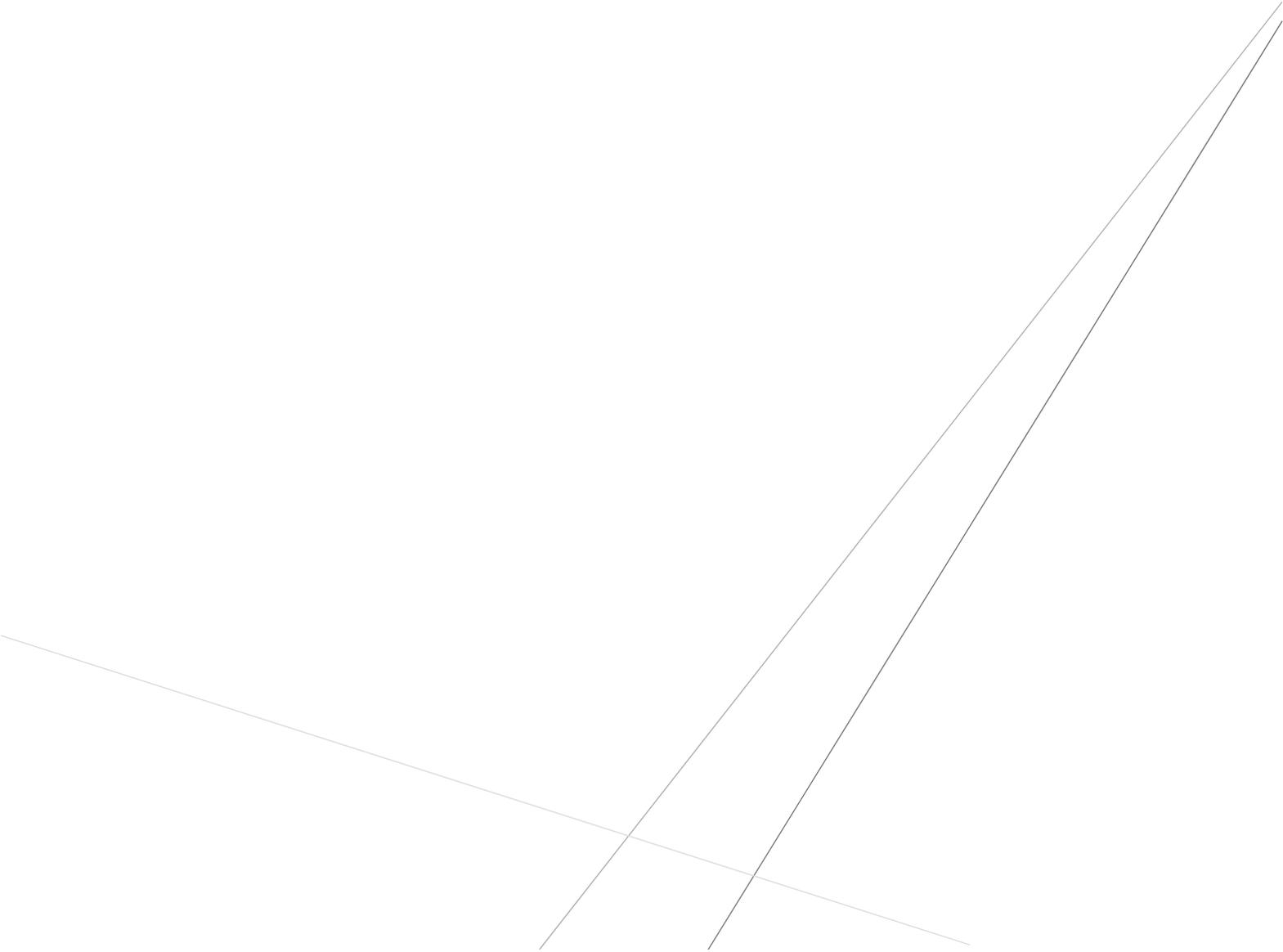


Figura 5.23 Gap in funzione di T

Dalla figura 5.22 è possibile osservare come, successivamente ad un tratto con variazione nulla, dovuto al rilassamento delle tensioni all'interno del provino per le temperature più elevate, la riduzione del gap segue un andamento lineare, per poi deviare da questo per le basse temperature. L'intersezione delle due rette riportate nel grafico fornisce un valore approssimativo della temperatura di transizione vetrosa, corrispondente a circa -27 °C, molto simile a quella ricavata col metodo precedente.

6. *CONCLUSIONI*



Questo capitolo conclusivo si prefigge l'obiettivo di giungere ad una sintesi dei vari risultati ottenuti nella sperimentazione e di dare spunti di riflessione per studi futuri in merito all'argomento trattato.

Dalla lettura del capitolo precedente può derivare la considerazione che il procedimento da adottare per la correlazione tra i due reometri non è uno solo e che ogni metodo ha un suo campo di applicazione preferenziale rispetto agli altri. Il solo fatto di aver analizzato un elevato numero di campioni di bitume differenti gli uni dagli altri ha portato a poter affermare con certezza che ogni tipo di legante bituminoso presenta comportamenti e specifiche fisiche molto differenti tra loro e che non esiste un modello univoco capace di descrivere il comportamento di tutti senza che venga fatta un'approssimazione.

Per la discrepanza che ha come oggetto il confronto tra i dati al *BBR* e quelli al *DSR* in merito alla *rigidezza*, che si ottiene prendendo in considerazione la temperatura di riferimento di -24 °C (Fig. 5.14), e tenendo conto dei risultati acquisiti variando il *tempo di condizionamento* (Fig. 5.16), si può trarre la conclusione che, per avere una buona relazione tra questi due strumenti, è fondamentale impostare un tempo di condizionamento al *Dynamic Shear Rheometer* (non potendo variare quello del *Bending Beam Rheometer* che è rigorosamente fissato ad un'ora) in funzione della temperatura di riferimento. Nello specifico, per temperature più alte come -12 °C e -18 °C , un condizionamento di 5 minuti è sufficiente a garantire una buona corrispondenza tra i dati dei due. Per temperature più estreme, come -24 °C in esame, il tempo di condizionamento deve essere sensibilmente esteso poiché, al crescere di questo, si registra una traslazione dei risultati verso destra: questo fenomeno corrisponde all'irrigidimento del bitume, spiegabile con il fenomeno del *physical hardening* (trattato nel paragrafo 2.11 modifica delle proprietà del bitume).

Uno spunto per degli studi futuri potrebbe essere quello di determinare il *tempo di condizionamento* a cui sottoporre un provino al *DSR* per permetterne il confronto con il *BBR*.

Guardando, invece, al procedimento mediante il cui si sono trovati i parametri reologici al *DSR* corrispondenti alla temperatura critica precedentemente ricavata tramite prove al *BBR* adottato nell'analisi dei dati, dai risultati finali si può notare come la *variabilità* sia molto più bassa se si considerano solo i bitumi non modificati. Quindi, è possibile affermare come questo secondo modello si adatti molto bene per la determinazione della temperatura critica dei *bitumi tradizionali*, presentando una variabilità non superiore al 10%, ma che sia poco preciso, invece, per i *bitumi modificati*.

Analizzando i risultati ottenuti dall'interpolazione dei valori a -12 °C e a -18 °C con una retta (Fig. 5.16), i risultati che si ottengono sono in linea con quelli ottenuti da altre sperimentazioni (tra cui anche quella condotta da *Sui et al.* nel 2011). Dalla tabella 5.18 riportante i parametri delle rette interpolanti è, inoltre, possibile determinare una *legge univoca*, cioè indipendente dal tipo di bitume, espressa dall'equazione 5.16 che metta in correlazione i risultati ottenuti con una prova eseguita al *Dynamic Shear Rheometer* con una al *Bending Beam Rheometer*. Nell'adoperare la legge di legame su citata, l'errore che si commetterebbe nell'usare una strumentazione piuttosto che l'altra è dell'ordine di una decina di punti percentuali. Tale percentuale è perfettamente ammissibile se i dati devono essere successivamente impiegati per la determinazione della *temperatura critica*, così come descritto dal *Performance Grade*, in quanto questa classificazione va a scaglioni di 6 gradi centigradi per la determinazione della classe del legante bituminoso (es PG 52-22 e PG 58-28) e, quindi, un errore di uno o due gradi centigradi non ne influenza la classe di appartenenza se non nei casi limite in cui ci si trova vicino ad uno dei due estremi.

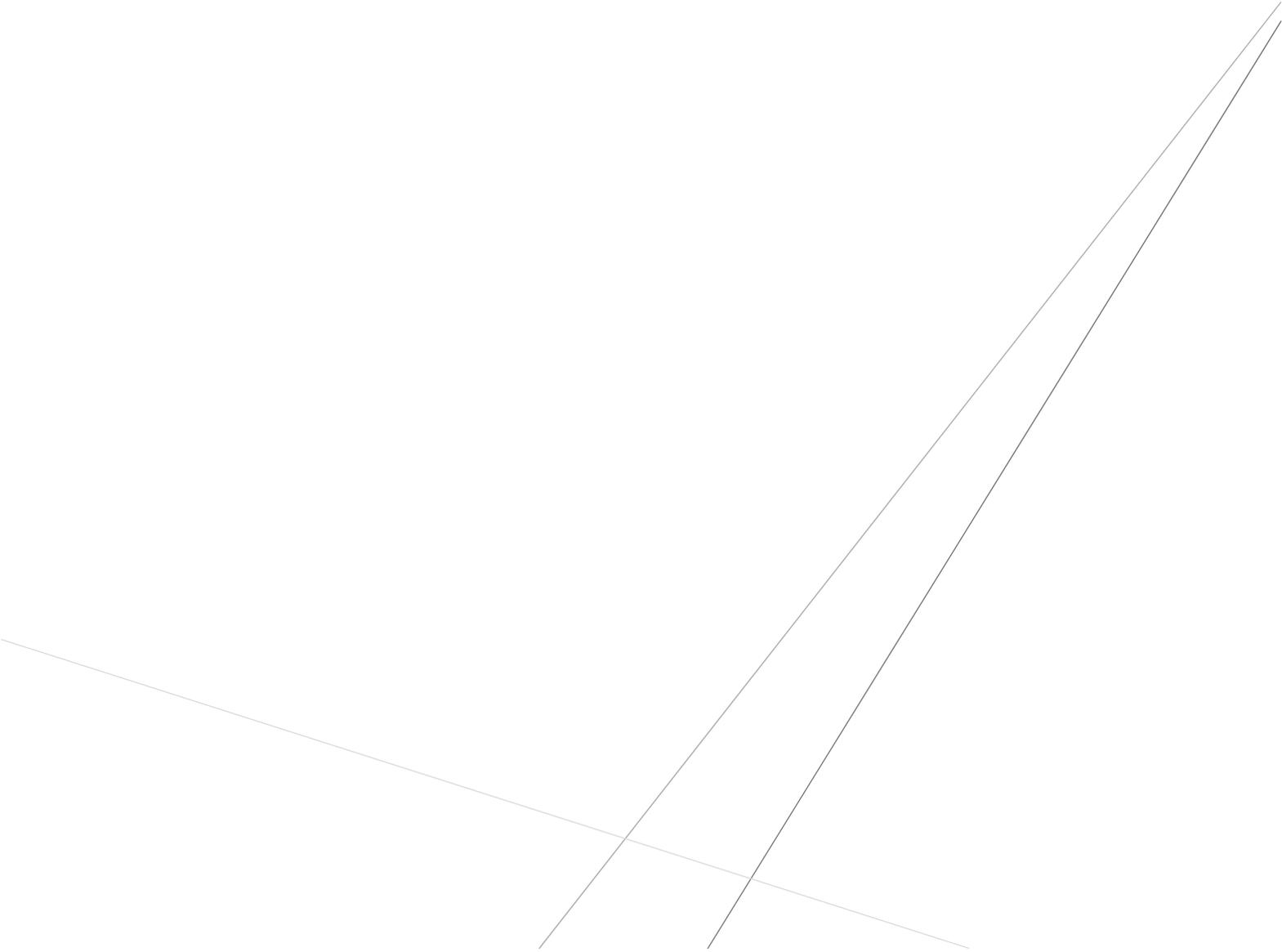
BIBLIOGRAFIA

- Anderson D., Christensen D., Bahia H.U., Dongre R., Sharma M., Antle C., Button J. “Binder Characterization And Evaluation Vol. 3: Physical Characterization. Shrp-369”, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994.
- Andrea Grilli, Marco Iorio Gnisci, “Effetto del processo di invecchiamento e potenzialità di recupero del bitume ad uso stradale”, Università degli Studi della Repubblica di San Marino.
- Asphalt Binder Testing – “Technician’s Manual For Specification Testing Of Asphalt Binders”, Ms-25 First Edition, Asphalt Institute.
- Barnes H.A., Hutton J.F., Walters K. “An Introduction To Rheology”, Elsevier, 1989.
- Bergonzoni M. “Valorizzazione Dei Pneumatici Fuori Uso (Pfu) Attraverso Il Recupero E Riciclaggio Per La Produzione Di Prodotti Innovativi”, Università Degli Studi Di Ferrara, 2009.
- Castiglioni M., Volpe P. “Influence Of Volatile Metal Carbonyls On The Reactions Of Thermal Radicals In The C₄H₁₀+ Recoil T System”. *Inorganica Chimica Acta*, 1980.
- Christensen R. M. “Theory of Viscoelasticity – an Introduction”, Academic Press, New York, 1982.
- Derossi Lidia, “La Caratterizzazione Sperimentale Dell'invecchiamento Dei Bitumi”, Padova, 2014.
- Doolittle A.K. “Studies In Newtonian Flow. Ii The Dependence Of Viscosity Of Liquids On Free-Space”, *Journal Of Applied Physics* 22 (12), 1951.
- Farcas F. “Étude D'une Méthode De Simulation Du Vieillissement Des Bitumes Sur Route”, Lcpc Research Report Cr21, Paris (France): Lcpc Ed., 1998.
- Findley W.N., Lai J.S. “ Creep And Recovery Of 2618 Aluminum Alloy Under Combined Stress With A Representation By A Viscous-Viscoelastic Model”, 1978.
- Graziani A. Et Al. “Complex Poisson’s Ratio Of Bituminous Mixtures: Measurement And Modeling”, 2014.
- Grizzuti N. “Reologia Dei Materiali Polimerici”. *Scienza Ed Ingegneria*. Vol. 7. Edizioni Nuova Cultura, 2012.

- Harrigan E.T., Leahy R.B., Youtcheff J.S. "The Superpave Mix Design System. Manual Of Specifications, Test Methods And Practices", Shrp Report A-379, National Research Council, Washington D.C., 1994.
- Hicks R.G., Finn F.N. Et Al. "Stage1 Validation Of The Relationships Between Asphalt Properties And Asphalt-Aggregate Mix Performance", Shrp-A-398 Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C., 1994.
- Larson R.G., "The Structure and Rheology of Complex Fluids", Oxford University Press, New York 1999.
- Macosko C.W. "Rheology – Principles, Measurement And Applications", Wileyvch, 1994.
- Martelli Luca, "Studio Delle Proprietà Reologiche Di Leganti Bituminosi Modificati Ad "Alta Lavorabilità" Mediante Dynamic Shear Rheometer", Bologna, 2010.
- Mewis, Jan, Norman J. Wagner. "Thixotropy." *Advances In Colloid And Interface Science* 147, 2009.
- Montepara A., Giuliani F. "L'invecchiamento Primario Dei Bitumi Stradali: Analisi Sperimentale Sulle Proporzioni E Sull'evoluzione Chimica Dei Gruppi Costituenti". X Convegno Nazionale Della Società Italiana Infrastrutture Viarie (Siiv), Milano, 1998.
- Olli, Ville Laukkanen, "Low-temperature rheology of bitumen and its relationship with chemical and thermal properties", Espoo 2015.
- Petersen, Ian R., Duncan C. Mcfarlane "Optimal Guaranteed Cost Control And Filtering For Uncertain Linear Systems". *Ieee Transactions On Automatic Control*, 1994.
- Petratto F. "La Reologia Dei Leganti Bituminosi Stradali: Studio Delle Proprietà Meccaniche A Seguito Di Processi Di "Aging" In Laboratorio", Università Degli Studi Di Bologna, 2012.
- Pipkin A. C. "Large Deformations With Small Strains. In: *Lectures On Viscoelasticity Theory*". Springer, New York, Ny, 1986.
- Sala G., Di Landra L., Airoldi A., Bettini P. "Tecnologie E Materiali Aereospaziali", Politecnico Di Milano, Milano.
- Scott Blair G.W. "A Survey And General Applied Rheology", Sir Isaac Pitman And Sons, London, 1944.
- Shenoy A. "Stress Relaxation Can Perturb And Prevent Physical Hardening In A Constrained Binder At Low Temperatures". *Road Mater Pavement Des*, 2002.

- Sui C., Farrar M. J., Harnsberger P. M., Tuminello W. H., & Turner T. F. "New low-temperature performance-grading method: Using 4-mm parallel plates on a dynamic shear rheometer". Transportation Research Record, 2207(1), 2011.
- Tschoegl N.W. Et Al. "Poisson's Ratio In Linear Viscoelasticity – A Critical Review", 2002.
- Wright J.R., Weathering "Theoretical And Practical Aspects Of Asphalt Durability." Hoiberg Aj, Editor. Bituminous Materials: Asphalts, Tars And Pitches. New York: Interscience Publishers, 1965.
- Wu, Zhaohua, Norden E. Huang "Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise Assisted Data Analysis Method". Advances In Adaptive Data Analysis, 2009.
- <http://Rahabitumen.Com/Performance-Grade-PG-Bitumen/>
- <http://Www.Treccani.It/Enciclopedia/Viscoelasticita/>

ALLEGATI

Abstract geometric lines in the bottom right corner, consisting of several thin, intersecting lines that create a sense of depth and movement.

ALLEGATO B

PROVE BBR (t=60 s)

PROVE BBR (t=60 s)											
Temperatura -6°C											
Bitume A											
1° ripetizione (-/-/---)			2° ripetizione (-/-/---)			Media					
Stiffness	[MPa]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m-value	[-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thickness	[mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		max	min	max	min						
Temperature	[°C]	-	-	-	-						
Force	[mN]	-	-	-	-						
Average force	[mN]	-	-	-	-						
A	[-]	-	-	-	-						
B	[-]	-	-	-	-						
C	[-]	-	-	-	-						

Temperatura -12°C												
Bitume A												
1° ripetizione (15-07 16:56)			2° ripetizione (15-07 17:13)			Media						
Stiffness	[MPa]	104	105	104,50								
m-value	[-]	0,425	0,417	0,42								
Thickness	[mm]	6,28	6,38	6,33								
		max	min	max	min							
Temperature	[°C]	-11,9	-12,1	-11,9	-12,1							
Force	[mN]	994,6	980,4	995,1	984,6							
Average force	[mN]	990,4	988,4									
A	[-]	2,62	2,63									
B	[-]	-0,253	-0,268									
C	[-]	-0,0485	-0,0421									

Temperatura -18°C												
Bitume A												
1° ripetizione (07-08 12:46)			2° ripetizione (07-08 12:25)			Media						
Stiffness	[MPa]	268	261	264,50								
m-value	[-]	0,343	0,34	0,34								
Thickness	[mm]	6,31	6,37	6,34								
		max	min	max	min							
Temperature	[°C]	-18	-18	-17,9	-18							
Force	[mN]	1000,5	989,4	1000,5	989,4							
Average force	[mN]	996,8	997,7									
A	[-]	2,88	2,88									
B	[-]	-0,167	-0,18									
C	[-]	-0,0493	-0,0452									

Temperatura -24°C												
Bitume A												
1° ripetizione (18-09 15:27)			2° ripetizione (12-09 11:45)			Media						
Stiffness	[MPa]	606	585	595,50								
m-value	[-]	0,259	0,258	0,26								
Thickness	[mm]	6,3	6,31	6,31								
		max	min	max	min							
Temperature	[°C]	-23,9	-24,1	-23,9	-24,1							
Force	[mN]	978,6	967,7	970,4	957,8							
Average force	[mN]	976,9	968,9									
A	[-]	3,09	3,1									
B	[-]	-0,0902	-0,117									
C	[-]	-0,0474	-0,0397									

Bitume A		Tc [°C]
Stiffness=300 Mpa		-8,93
m-value=0,3		-11,00

Temperatura -6°C											
Bitume B											
1° ripetizione (-/-/---)			2° ripetizione (-/-/---)			Media					
Stiffness	[MPa]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m-value	[-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thickness	[mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		max	min	max	min						
Temperature	[°C]	-	-	-	-						
Force	[mN]	-	-	-	-						
Average force	[mN]	-	-	-	-						
A	[-]	-	-	-	-						
B	[-]	-	-	-	-						
C	[-]	-	-	-	-						

Temperatura -12°C												
Bitume B												
1° ripetizione (05-08 13:44)			2° ripetizione (05-08 13:50)			Media						
Stiffness	[MPa]	95,3	92,3	93,80								
m-value	[-]	0,382	0,379	0,38								
Thickness	[mm]	6,26	6,3	6,28								
		max	min	max	min							
Temperature	[°C]	-11,9	-12,1	-11,9	-12,1							
Force	[mN]	935,2	926,2	938,6	929,9							
Average force	[mN]	929,3	936,6									
A	[-]	2,54	2,52									
B	[-]	-0,25	-0,245									
C	[-]	-0,037	-0,0376									

Temperatura -18°C												
Bitume B												
1° ripetizione (07-08 15:16)			2° ripetizione (07-08 15:43)			Media						
Stiffness	[MPa]	222	218	220,00								
m-value	[-]	0,321	0,328	0,32								
Thickness	[mm]	6,26	6,3	6,28								
		max	min	max	min							
Temperature	[°C]	-17,9	-18	-17,9	-18,1							
Force	[mN]	995,9	985,6	1001,4	990,1							
Average force	[mN]	992,1	998,8									
A	[-]	2,8	2,77									
B	[-]	-0,192	-0,161									
C	[-]	-0,0365	-0,0471									

Temperatura -24°C												
Bitume B												
1° ripetizione (12-09 11:55)			2° ripetizione (12-09 12:05)			Media						
Stiffness	[MPa]	481	472	476,50								
m-value	[-]	0,258	0,259	0,26								
Thickness	[mm]	6,2	6,26	6,23								
		max	min	max	min							
Temperature	[°C]	-23,9	-24,1	-23,9	-24,1							
Force	[mN]	971	960,8	970,3	959,8							
Average force	[mN]	967,1	966,5									
A	[-]	3,03	3,02									
B	[-]	-0,138	-0,133									
C	[-]	-0,0339	-0,0355									

Bitume B		Tc [°C]
Stiffness=300 Mpa		-10,41
m-value=0,3		-10,23

Temperatura -6°C											
Bitume C											
1° ripetizione (-/-/---)			2° ripetizione (-/-/---)			Media					
Stiffness	[MPa]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m-value	[-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thickness	[mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		max	min	max	min						
Temperature	[°C]	-	-	-	-						
Force	[mN]	-	-	-	-						
Average force	[mN]	-	-	-	-						
A	[-]	-	-	-	-						
B	[-]	-	-	-	-						
C	[-]	-	-	-	-						

Temperatura -12°C												
Bitume C												
1° ripetizione (06-08 13:05)			2° ripetizione (06-08 12:56)			Media						
Stiffness	[MPa]	116	110	113,00								
m-value	[-]	0,377	0,379	0,38								
Thickness	[mm]	6,28	6,27	6,28								
		max	min	max	min							
Temperature	[°C]	-11,9	-12	-12	-12,1							
Force	[mN]	993,1	982,9	989,1	979,1							
Average force	[mN]	985,5	983									
A	[-]	2,62	2,59									
B	[-]	-0,245	-0,237									
C	[-]	-0,0373	-0,0401									

Temperatura -18°C												
Bitume C												
1° ripetizione (11-09 11:30)			2° ripetizione (11-09 11:41)			Media						
Stiffness	[MPa]	265	265	265,00								
m-value	[-]	0,313	0,318	0,32								
Thickness	[mm]	6,33	6,29	6,31								
		max	min	max	min							
Temperature	[°C]	-18	-18,1	-18	-18							
Force	[mN]	971,2	959	974,8	964,1							
Average force	[mN]	968,9	970,1									
A	[-]	2,87	2,87									
B	[-]	-0,191	-0,786									
C	[-]	-0,0344	-0,0371									

Temperatura -24°C												
Bitume C												
1° ripetizione (13-09 12:17)			2° ripetizione (18-09 15:35)			Media						
Stiffness	[MPa]	542	519	530,50								
m-value	[-]	0,255	0,257	0,26								
Thickness	[mm]	6,28	6,33	6,31								
		max	min	max	min							
Temperature	[°C]	-23,9	-24	-23,9	-24,1							
Force	[mN]	953,6	942,6	976,9	964,6							
Average force	[mN]	949,6	974,2									
A	[-]	3,07	3,03									
B	[-]	-0,118	-0,0951									
C	[-]	-0,0385	-0,0456									

Bitume C		Tc [°C]
Stiffness=300 Mpa		-9,07
m-value=0,3		-9,56

Temperatura -6°C											
Bitume D											
1° ripetizione (-/-/---)			2° ripetizione (-/-/---)			Media					
Stiffness	[MPa]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m-value	[-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Thickness	[mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		max	min	max	min						
Temperature	[°C]	-	-	-	-						
Force	[mN]	-	-	-	-						
Average force	[mN]	-	-	-	-						
A	[-]	-	-	-	-						
B	[-]	-	-	-	-						
C	[-]	-	-	-	-						

Temperatura -12°C											
Bitume D</											

PROVE BBR (t=60 s)

Temperatura -6°C												Temperatura -12°C												Temperatura -18°C												Temperatura -24°C												Bitume E									
Bitume E												Bitume E												Bitume E												Bitume E												Bitume E									
			1° ripetizione (18/09 12:16)				2° ripetizione (18/09 12:25)				Media						1° ripetizione (17-09 12:46)				2° ripetizione (17-09 12:40)				Media						1° ripetizione (16-09 11:58)				2° ripetizione (16-09 12:20)				Media						1° ripetizione (13-09 15:45)				2° ripetizione (13-09 15:55)				Media			Tc [°C]	
Stiffness	[MPa]		142				139				140,50						316				313				314,50						634				649				641,50						1110				1070				1090,00				
m-value	[-]		0,358				0,359				0,36						0,305				0,303				0,30						0,23				0,232				0,23						0,169				0,169				0,17			Stiffness=300 Mpa	-1,65
Thickness	[mm]		6,31				6,29				6,30						6,32				6,33				6,33						6,34				6,32				6,33						6,21				6,31				6,26			m-value=0,3	-2,33
			max		min		max		min					max		min		max		min					max		min		max		min					max		min																			
Temperature	[°C]		-5,9		-6,1		-5,9		-6,1					-11,9		-12,1		-11,9		-12,1					-17,9		-18,1		-17,9		-18					-23,9		-24,1		-23,9		-24,1															
Force	[mN]		966,2		956,5		968,2		958,6					975,2		964,6		973,8		963,4					970,2		958,3		973		962,9					965,4		955,9		968		957,5															
Average force	[mN]		964,6				966,3							974,1				971,8							968,1				972							963,8				966,6																	
A	[-]		2,68				2,67							2,92				2,91							3,12				3,11							3,24				3,22																	
B	[-]		-0,236				-0,237							-0,165				-0,166							-0,123				0,103							-0,048				-0,0481																	
C	[-]		-0,0343				-0,0343							-0,0393				-0,0387							-0,03				-0,0363							-0,0341				-0,034																	

Temperatura -6°C												Temperatura -12°C												Temperatura -18°C												Temperatura -24°C												Bitume F									
Bitume F												Bitume F												Bitume F												Bitume F												Bitume F									
			1° ripetizione (18/09 12:35)				2° ripetizione (18/09 12:58)				Media						1° ripetizione (17-09 15:43)				2° ripetizione (17-09 16:08)				Media						1° ripetizione (16-09 12:14)				2° ripetizione (16-09 12:26)				Media						1° ripetizione (13-09 16:07)				2° ripetizione (13-09 16:14)				Media			Tc [°C]	
Stiffness	[MPa]		108				108				108,00						198				200				199,00						345				327				336,00						561				561				561,00				
m-value	[-]		0,297				0,305				0,30						0,262				0,26				0,26						0,231				0,233				0,23						0,188				0,187				0,19			Stiffness=300 Mpa	-6,70
Thickness	[mm]		6,38				6,27				6,33						6,25				6,28				6,27						6,26				6,27				6,27						6,28				6,28				6,28			m-value=0,3	3,85
			max		min		max		min					max		min		max		min					max		min		max		min					max		min																			
Temperature	[°C]		-6		-6,1		-5,9		-6,1					-12		-12,1		-11,9		-12,1					-18		-18		-17,9		-18					-23,9		-24,1		-23,9		-24,1															
Force	[mN]		973		963,3		971,8		959,7					976,1		966,6		982,3		971,2					973,9		963,4		974,3		962					966,8		958		967,4		957,5															
Average force	[mN]		967,6				968,7							974,9				981							971,3				972,8							965,1				966																	
A	[-]		2,47				2,47							2,67				2,68							2,86				2,83							3				2,99																	
B	[-]		-0,193				-0,19							-0,159				-0,164							-0,126				-0,127							-0,0964				-0,0897																	
C	[-]		-0,0293				-0,0323							-0,029				-0,0267							-0,0296				-0,0298							-0,0257				-0,0273																	

Temperatura -6°C												Temperatura -12°C												Temperatura -18°C												Temperatura -24°C												Bitume G									
Bitume G												Bitume G												Bitume G												Bitume G												Bitume G									
			1° ripetizione (-/-/-/-)				2° ripetizione (-/-/-/-)				Media						1° ripetizione (17-09 12:51)				2° ripetizione (17-09 13:03)				Media						1° ripetizione (16-09 14:59)				2° ripetizione (16-09 14:51)				Media						1° ripetizione (13-09 16:25)				2° ripetizione (13-09 16:46)				Media			Tc [°C]	
Stiffness	[MPa]		-				-				-						157				162				159,50						337				334				335,50						614				621				617,50				
m-value	[-]		-				-				-						0,308				0,31				0,31						0,275				0,276				0,28						0,218				0,219				0,22			Stiffness=300 Mpa	-7,10
Thickness	[mm]		-				-				-						6,29				6,3				6,30						6,27				6,25				6,26						6,29				6,28				6,29			m-value=0,3	-3,61
			max		min		max		min					max		min		max		min					max		min		max		min					max		min																			
Temperature	[°C]		-		-		-		-					-11,9		-12		-11,9		-12					-17,9		-18		-17,9		-18					-23,9		-24,1		-23,9		-24,1															
Force	[mN]		-		-		-		-					975,8		962,6		978,8		967,5					975,3		965,6		975		963,5					968,6		959,5		969,8		959															
Average force	[mN]		-				-							973,7				975,9							972,9				973,9							966				967,2																	
A	[-]		-				-							2,65				2,67							2,91				2,9							3,08				3,08																	
B	[-]		-				-							-0,203				-0,202							-0,15				-0,151							-0,116				-0,104																	
C	[-]		-				-							-0,0295				-0,0306							-0,0351				-0,0352							-0,0289				-0,0322																	

Temperatura -6°C												Temperatura -12°C												Temperatura -18°C												Temperatura -24°C												Bitume H									
Bitume H												Bitume H												Bitume H												Bitume H												Bitume H									
			1° ripetizione (-/-/-/-)				2° ripetizione (-/-/-/-)				Media						1° ripetizione (17-09 15:50)				2° ripetizione (17-09 16:35)				Media						1° ripetizione (16-09 15:08)				2° ripetizione (16-09 16:51)				Media						1° ripetizione (16-09 18:33)				2° ripetizione (16-09 18:42)				Media			Tc [°C]	
Stiffness	[MPa]		-				-				-						119				119				119,00						277				290				283,50						644				632				638,00				
m-value	[-]		-				-				-						0,364				0,359				0,36						0,31				0,311				0,31						0,237				0,24				0,24			Stiffness=300 Mpa	-8,42
Thickness	[mm]		-				-				-						6,25				6,26				6,26						6,24				6,15				6,20						6,15				6,19				6,17			m-value=0,3	-8,88
			max		min		max		min					max		min		max		min					max		min		max		min					max		min																			
Temperature	[°C]		-		-		-		-					-11,9		-12,1		-11,9		-12,1					-17,9		-18,1		-18		-18					-23,9		-24,1		-23,9		-24,1															
Force	[mN]		-		-		-		-					982,2		971,4		982,8		974,5					976,2		966,6		974,1		964,1					977,4		966,2		977,3		966,5															
Average force	[mN]		-				-							976,9				981,1							975				972,6							975,6				974,6																	
A	[-]		-				-							2,63				2,62							2,89				2,9							3,13				3,11																	
B	[-]		-				-							-0,26				-0,252							-0,19				-0,182							-0,128				-0,113																	
C	[-]		-				-							-0,029				-0,0303							-0,0337				-0,0363							-0,0308				-0,0357																	

ALLEGATO C

A MEDIA															B MEDIA														
Meas.	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	γ [%]	M [mNm]	φ [μrad]	ε [h]	δ [mm]	F _n [N]	Meas.	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	γ [%]	M [mNm]	φ [μrad]	ε [h]	δ [mm]	F _n [N]						
1	34.0	100.0	2415,81	1309,90	2029,9	57,17	9650,0	0,40	29,50	32,0	0,25	1,00	-0,01	1	34.0	100.0	3069,39	1994,84	2332,8	49,47	12285,0	0,40	37,50	32,0	0,50	1,00	-0,24		
2	34.0	63.1	1799,37	947,25	1529,85	58,24	7821,0	0,43	23,90	34,8	0,26	1,00	-0,01	2	34.0	63.1	2381,61	1513,13	1839,17	50,56	10345,0	0,43	31,60	34,8	0,51	1,00	-0,24		
3	34.0	39.8	1332,07	680,88	1144,91	59,26	6271,0	0,47	19,15	37,7	0,26	1,00	-0,02	3	34.0	39.8	1835,24	1139,96	1438,27	51,60	8640,5	0,47	26,40	37,7	0,51	1,00	-0,20		
4	34.0	25.1	981,37	486,82	852,11	60,26	5008,5	0,51	15,30	40,9	0,26	1,00	-0,02	4	34.0	25.1	1406,07	853,82	1117,15	52,61	7177,0	0,51	21,90	40,9	0,51	1,00	-0,21		
5	34.0	15.8	719,46	346,33	630,62	61,23	3981,0	0,55	12,20	44,3	0,27	1,00	-0,01	5	34.0	15.8	1071,74	635,99	862,64	53,99	5931,0	0,55	18,15	44,3	0,52	1,00	-0,21		
6	34.0	10.0	525,01	245,18	464,24	62,16	3150,0	0,60	9,63	48,1	0,27	1,00	-0,01	6	34.0	10.0	812,93	471,32	662,36	54,57	4878,0	0,60	14,90	48,1	0,52	1,00	-0,22		
7	34.0	6.3	381,44	172,72	340,09	63,08	2482,0	0,65	7,59	52,1	0,28	1,00	-0,01	7	34.0	6.3	613,64	347,44	505,81	55,52	3993,5	0,65	12,20	52,1	0,53	1,00	-0,20		
8	34.0	4.0	275,94	121,07	247,96	63,98	1947,5	0,71	5,96	56,5	0,29	1,00	0,00	8	34.0	4.0	461,23	254,84	384,44	56,46	3255,0	0,71	9,93	56,5	0,54	1,00	-0,21		
9	34.0	2.5	198,77	84,35	179,99	64,89	1521,0	0,77	4,65	61,3	0,29	1,00	0,00	9	34.0	2.5	345,08	185,95	290,70	57,40	2641,0	0,77	8,07	61,3	0,54	1,00	-0,22		
10	34.0	1.6	142,54	58,32	130,07	65,85	1183,0	0,83	3,62	66,5	0,30	1,00	0,01	10	34.0	1.6	256,93	134,78	218,74	58,36	2132,5	0,83	6,52	66,5	0,56	1,00	-0,24		
11	34.0	1.0	101,76	39,99	93,57	66,86	915,7	0,90	2,80	72,1	0,32	1,00	-0,01	11	34.0	1.0	190,48	97,09	163,87	59,36	1714,5	0,90	5,24	72,1	0,57	1,00	-0,26		
1	40.0	100.0	1096,57	526,28	962,03	61,32	5475,5	0,50	16,70	40,0	0,57	1,00	0,01	1	40.0	100.0	1478,95	869,83	1196,12	53,98	7391,0	0,50	22,55	40,0	0,82	1,00	-0,02		
2	40.0	63.1	798,44	374,07	706,44	62,23	4401,5	0,55	13,45	44,1	0,57	1,00	0,01	2	40.0	63.1	1118,16	642,79	914,94	54,91	6188,0	0,55	18,80	44,1	0,82	1,00	-0,01		
3	40.0	39.8	578,35	261,57	515,81	63,11	3503,0	0,61	10,70	48,5	0,58	1,00	0,01	3	40.0	39.8	841,10	472,59	695,78	55,82	5094,5	0,61	15,60	48,5	0,83	1,00	-0,03		
4	40.0	25.1	417,16	183,03	374,86	63,98	2799,0	0,67	8,50	53,4	0,58	1,00	0,01	4	40.0	25.1	629,98	345,83	526,58	56,71	4197,5	0,67	12,65	53,4	0,83	1,00	-0,06		
5	40.0	15.8	259,85	122,47	271,19	64,83	2196,0	0,73	6,71	58,7	0,58	1,00	0,01	5	40.0	15.8	470,33	252,16	397,03	57,58	3447,0	0,73	10,50	58,7	0,84	1,00	-0,07		
6	40.0	10.0	174,35	89,24	195,34	65,69	1728,5	0,81	5,18	64,6	0,59	1,00	0,01	6	40.0	10.0	350,00	183,13	298,16	58,45	2821,5	0,81	8,63	64,6	0,84	1,00	-0,08		
7	40.0	6.3	152,71	60,72	152,14	66,58	1354,5	0,89	4,14	71,1	0,60	1,00	0,01	7	40.0	6.3	259,34	132,25	223,09	59,34	2301,0	0,89	7,04	71,1	0,85	1,00	-0,09		
8	40.0	4.0	108,35	41,46	100,11	67,51	1057,5	0,98	3,23	78,2	0,60	1,00	0,02	8	40.0	4.0	191,13	94,86	165,93	60,25	1865,5	0,98	5,71	78,2	0,85	1,00	-0,08		
9	40.0	2.5	76,56	28,03	71,24	68,52	822,1	1,07	2,51	86,0	0,61	1,00	0,01	9	40.0	2.5	140,14	67,52	122,80	61,20	1504,5	1,07	4,60	86,0	0,86	1,00	-0,06		
10	40.0	1.6	53,82	18,75	50,45	69,62	635,9	1,18	1,95	94,6	0,62	1,00	0,01	10	40.0	1.6	102,38	47,75	90,57	62,20	1209,5	1,18	3,70	94,6	0,87	1,00	-0,10		
11	40.0	1.0	37,64	12,37	35,55	70,82	489,3	1,30	1,50	106,0	0,63	1,00	0,00	11	40.0	1.0	74,52	33,51	66,56	63,28	968,0	1,30	2,96	106,0	0,88	1,00	-0,08		
1	46.0	100.0	490,59	209,31	443,70	64,75	2450,0	0,50	7,49	40,0	0,89	1,00	0,01	1	46.0	100.0	699,65	371,84	592,65	57,90	3496,5	0,50	10,65	40,0	1,14	1,00	-0,08		
2	46.0	63.1	351,54	145,39	320,07	65,57	1965,5	0,56	6,01	44,7	0,89	1,00	0,01	2	46.0	63.1	519,26	269,57	443,80	58,73	2901,0	0,56	8,87	44,7	1,14	1,00	-0,07		
3	46.0	39.8	250,73	100,44	229,73	66,39	1562,5	0,62	4,78	49,9	0,89	1,00	0,01	3	46.0	39.8	383,92	194,65	330,91	59,54	2395,0	0,62	7,32	49,9	1,14	1,00	-0,06		
4	46.0	25.1	178,18	68,99	164,29	67,22	1239,0	0,70	3,79	55,7	0,90	1,00	0,01	4	46.0	25.1	282,80	139,90	245,77	60,95	1967,0	0,70	6,02	55,7	1,15	1,00	-0,05		
5	46.0	15.8	126,12	47,08	117,00	68,08	978,7	0,78	2,99	62,2	0,90	1,00	0,01	5	46.0	15.8	207,50	100,03	181,80	61,18	1610,5	0,78	4,92	62,2	1,15	1,00	-0,04		
6	46.0	10.0	88,92	31,86	83,01	69,01	770,0	0,87	2,35	69,4	0,91	1,00	0,01	6	46.0	10.0	151,55	71,02	133,88	62,06	1313,0	0,87	4,01	69,4	1,16	1,00	-0,07		
7	46.0	6.3	62,37	21,33	58,61	70,00	602,9	0,97	1,85	77,4	0,91	1,00	0,01	7	46.0	6.3	110,16	50,07	98,13	62,97	1065,0	0,97	3,26	77,4	1,16	1,00	-0,09		
8	46.0	4.0	43,53	14,11	41,18	71,09	469,6	1,08	1,44	86,4	0,92	1,00	0,01	8	46.0	4.0	79,81	35,02	71,71	63,97	861,0	1,08	2,63	86,4	1,17	1,00	-0,05		
9	46.0	2.5	30,21	9,19	28,78	72,29	363,7	1,20	1,11	96,4	0,92	1,00	0,01	9	46.0	2.5	57,51	24,26	52,14	65,05	692,4	1,20	2,12	96,4	1,18	1,00	-0,03		
10	46.0	1.6	20,83	5,89	19,98	73,57	279,9	1,34	0,86	108,0	0,93	1,00	0,00	10	46.0	1.6	41,18	16,58	37,70	66,26	553,5	1,34	1,69	108,0	1,19	1,00	-0,07		
11	46.0	1.0	14,26	3,70	13,77	74,95	213,8	1,50	0,65	120,0	0,95	1,00	0,01	11	46.0	1.0	29,32	11,19	27,10	67,57	439,8	1,50	1,34	120,0	1,20	1,00	-0,08		
1	52.0	100.0	224,72	85,02	208,02	67,77	1796,0	0,80	5,49	64,1	1,20	1,00	0,01	1	52.0	100.0	333,65	159,61	293,05	61,42	2688,0	0,80	8,16	64,1	1,45	1,00	-0,06		
2	52.0	63.1	158,66	57,96	147,69	68,58	1394,0	0,88	4,28	70,3	1,20	1,00	0,01	2	52.0	63.1	243,33	113,60	215,19	62,17	2136,0	0,88	6,53	70,3	1,45	1,00	-0,07		
3	52.0	39.8	111,90	39,22	104,38	69,41	1072,0	0,96	3,28	77,6	1,21	1,00	0,00	3	52.0	39.8	176,87	80,45	157,52	62,95	1700,9	0,96	5,20	77,6	1,46	1,00	-0,07		
4	52.0	25.1	78,10	26,32	73,53	70,31	822,8	1,05	2,52	84,4	1,21	1,00	0,01	4	52.0	25.1	128,15	56,63	114,96	63,78	1350,0	1,05	4,13	84,4	1,46	1,00	-0,07		
5	52.0	15.8	54,45	17,48	51,57	71,28	628,3	1,15	1,92	92,4	1,21	1,00	0,01	5	52.0	15.8	92,46	39,57	85,56	64,66	1067,9	1,15	3,26	92,4	1,46	1,00	-0,07		
6	52.0	10.0	37,76	11,45	35,98	72,34	477,7	1,26	1,45	101,0	1,22	1,00	0,01	6	52.0	10.0	66,32	27,36	60,41	65,64	838,9	1,26	2,57	101,0	1,47	1,00	-0,06		
7	52.0	6.3	26,05	7,40	24,98	73,50	361,1	1,39	1,11	111,0	1,22	1,00	0,01	7	52.0	6.3	47,37	18,73	43,51	67,11	656,7	1,39	2,01	111,0	1,47	1,00	-0,07		
8	52.0	4.0	17,85	4,70	17,22	74,75	271,2	1,52	0,83	122,0	1,23	1,00	0,01	8	52.0	4.0	33,66	11,67	31,19	67,89	511,4	1,52	1,57	122,0	1,48	1,00	-0,06		
9	52.0	2.5	12,15	2,92	11,79	76,07	202,3	1,66	0,62	139,0	1,24	1,00	0,01	9	52.0	2.5	23,75	8,44	22,20	69,18	395,5	1,62	1,21	139,0	1,49	1,00	-0,06		
10	52.0	1.6	8,21	1,79	8,01	77,44	149,8	1,82	0,46	146,0	1,24	1,00	0,01	10	52.0	1.6	16,65	5,54	15,71	70,58	303,9	1,82	0,93	146,0	1,50	1,00	-0,05		
11	52.0	1.0	5,50	1,07	5,40	78,82	110,1	2,00	0,34	160,0	1,26	1,00	0,00	11	52.0	1.0	11,58	3,57	11,03	72,08	231,0	2,00	0,71	160,0	1,51	1,00	-0,05		
1	58.0	100.0	106,67	35,53	100,58	70,55	1066,0	1,00	3,28	80,1	1,51	1,00	0,00	1	58.0	100.0	161,50	69,05	145,99	64,69	1614,5	1,00							

Meas.	C MEDIA														D MEDIA													
	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	T [Pa]	γ [%]	M [mNm]	φ [μrad]	t [h]	d [mm]	F _n [N]	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	T [Pa]	γ [%]	M [mNm]	φ [μrad]	t [h]	d [mm]	F _n [N]				
1	34.0	100.0	3220.24	1924.72	2581.77	53.30	12850.0	0.40	39.36	370	0.50	1.00	-0.04	1	34.0	100.0	2617.15	1383.39	2221.8	58.09	10405.0	0.40	31.90	370	0.25	1.00	-0.04	
2	34.0	63.1	2452.12	1440.11	1984.69	54.04	10670.0	0.44	32.60	348	0.51	1.00	-0.04	2	34.0	63.1	1943.27	1002.60	1664.66	58.94	8457.0	0.44	25.85	348	0.26	1.00	-0.04	
3	34.0	39.8	1858.58	1070.42	1519.38	54.84	8749.5	0.47	26.75	377	0.51	1.00	-0.05	3	34.0	39.8	1435.09	721.34	1240.62	59.83	6755.5	0.47	20.65	377	0.26	1.00	-0.05	
4	34.0	25.1	1402.84	791.14	1158.47	55.67	7159.5	0.51	21.85	409	0.51	1.00	-0.02	4	34.0	25.1	1054.82	515.81	920.10	60.73	5383.5	0.51	16.45	409	0.26	1.00	-0.03	
5	34.0	15.8	1054.30	581.60	879.37	56.52	5834.0	0.55	17.00	443	0.52	1.00	-0.04	5	34.0	15.8	771.57	366.80	678.80	61.62	4269.5	0.55	13.05	443	0.27	1.00	-0.03	
6	34.0	10.0	788.66	425.02	664.33	57.39	4732.0	0.60	14.50	481	0.52	1.00	-0.05	6	34.0	10.0	561.73	259.29	496.30	62.51	3370.5	0.60	10.30	481	0.27	1.00	-0.04	
7	34.0	6.3	587.44	308.90	499.67	58.28	3822.5	0.65	11.70	521	0.53	1.00	-0.01	7	34.0	6.3	407.13	182.33	364.02	63.40	2649.0	0.65	8.10	521	0.28	1.00	-0.04	
8	34.0	4.0	435.55	223.22	374.01	59.17	3074.0	0.71	9.40	565	0.54	1.00	-0.04	8	34.0	4.0	293.87	127.55	264.74	64.28	2074.0	0.71	6.34	565	0.28	1.00	-0.03	
9	34.0	2.5	321.57	160.37	278.72	60.09	2460.5	0.77	7.52	613	0.54	1.00	-0.01	9	34.0	2.5	211.18	88.65	191.68	65.18	1616.0	0.77	4.94	613	0.29	1.00	-0.03	
10	34.0	1.6	236.35	114.49	206.77	61.03	1961.5	0.83	6.00	665	0.55	1.00	-0.02	10	34.0	1.6	151.17	61.26	138.20	66.10	1254.5	0.83	3.84	665	0.30	1.00	-0.02	
11	34.0	1.0	172.95	81.22	152.69	61.99	1556.0	0.90	4.78	721	0.57	1.00	-0.01	11	34.0	1.0	107.75	41.98	99.23	67.07	969.5	0.90	2.96	721	0.32	1.00	-0.02	
1	40.0	100.0	1481.04	806.42	1242.25	57.01	7389.0	0.50	22.60	400	0.82	1.00	0.01	1	40.0	100.0	1133.33	533.48	999.93	61.92	5655.0	0.50	17.30	400	0.57	1.00	-0.01	
2	40.0	63.1	1105.68	588.86	935.82	57.82	6102.5	0.55	18.65	441	0.82	1.00	0.02	2	40.0	63.1	824.08	377.01	732.79	62.78	4548.0	0.55	13.90	441	0.57	1.00	-0.01	
3	40.0	39.8	821.35	427.38	701.40	58.65	4975.0	0.61	15.20	485	0.83	1.00	0.03	3	40.0	39.8	596.05	264.84	533.98	63.62	3610.0	0.61	11.00	485	0.58	1.00	-0.02	
4	40.0	25.1	607.85	308.73	523.60	59.48	4049.5	0.67	12.40	534	0.83	1.00	0.02	4	40.0	25.1	429.37	185.12	387.41	64.46	2860.5	0.67	8.74	534	0.58	1.00	-0.01	
5	40.0	15.8	448.01	221.90	389.20	60.31	3283.5	0.73	10.03	587	0.83	1.00	0.02	5	40.0	15.8	308.07	128.73	279.88	65.30	2257.5	0.73	6.90	587	0.58	1.00	0.00	
6	40.0	10.0	328.94	158.62	288.06	61.16	2651.5	0.81	8.10	646	0.84	1.00	0.01	6	40.0	10.0	220.17	89.04	201.36	66.15	1775.0	0.81	5.43	646	0.59	1.00	0.00	
7	40.0	6.3	240.38	112.72	212.31	62.04	2132.5	0.88	6.52	711	0.84	1.00	0.02	7	40.0	6.3	156.72	61.20	144.27	67.03	1390.0	0.88	4.25	711	0.59	1.00	0.00	
8	40.0	4.0	174.94	79.57	155.80	62.95	1707.5	0.98	5.21	782	0.85	1.00	0.01	8	40.0	4.0	111.08	41.73	102.95	67.94	1084.0	0.98	3.32	782	0.60	1.00	-0.01	
9	40.0	2.5	125.73	55.75	113.82	63.91	1361.0	1.07	4.16	860	0.85	1.00	0.00	9	40.0	2.5	78.44	28.21	73.20	68.93	842.3	1.07	2.58	860	0.61	1.00	-0.01	
10	40.0	1.6	91.35	38.67	82.78	64.96	1079.5	1.18	3.30	945	0.87	1.00	0.01	10	40.0	1.6	55.11	18.87	51.78	69.98	651.1	1.18	1.99	945	0.62	1.00	-0.01	
11	40.0	1.0	65.51	28.54	59.89	66.10	851.5	1.30	2.60	1040	0.88	1.00	0.02	11	40.0	1.0	38.52	12.45	36.45	71.14	500.7	1.30	1.53	1040	0.63	1.00	0.00	
1	46.0	100.0	686.46	336.67	598.23	60.83	3425.0	0.50	10.90	400	1.13	1.00	0.00	1	46.0	100.0	495.71	206.23	450.78	63.42	2474.0	0.50	7.56	400	0.88	1.00	-0.02	
2	46.0	63.1	502.61	240.56	441.31	61.41	2814.0	0.56	8.60	447	1.14	1.00	0.01	2	46.0	63.1	354.03	142.78	323.96	66.22	1981.5	0.56	6.06	447	0.89	1.00	-0.01	
3	46.0	39.8	366.30	170.84	324.02	62.20	2283.5	0.62	6.98	499	1.14	1.00	0.01	3	46.0	39.8	251.68	98.32	231.68	67.01	1568.5	0.62	4.80	499	0.89	1.00	-0.01	
4	46.0	25.1	266.00	120.76	237.01	63.00	1850.0	0.70	5.66	557	1.14	1.00	0.01	4	46.0	25.1	178.27	67.30	165.07	67.82	1240.0	0.70	3.79	557	0.89	1.00	-0.01	
5	46.0	15.8	192.41	84.85	172.70	63.84	1493.0	0.78	4.57	622	1.15	1.00	0.02	5	46.0	15.8	125.82	45.78	117.20	68.67	976.4	0.78	2.99	622	0.90	1.00	-0.01	
6	46.0	10.0	138.65	59.22	125.37	64.72	1201.0	0.87	3.67	694	1.15	1.00	0.02	6	46.0	10.0	88.49	30.89	82.92	69.57	766.3	0.87	2.34	694	0.90	1.00	-0.01	
7	46.0	6.3	99.45	41.00	90.61	65.66	961.3	0.97	2.94	774	1.16	1.00	0.01	7	46.0	6.3	61.93	20.63	58.40	70.55	597.7	0.97	1.83	774	0.91	1.00	-0.01	
8	46.0	4.0	71.02	28.10	65.23	66.69	766.2	1.08	2.34	864	1.16	1.00	0.01	8	46.0	4.0	43.14	13.61	40.94	71.61	465.4	1.08	1.43	864	0.91	1.00	-0.01	
9	46.0	2.5	50.46	19.06	46.72	67.81	607.6	1.20	1.86	964	1.17	1.00	0.00	9	46.0	2.5	29.89	8.86	28.55	72.77	359.9	1.20	1.10	964	0.92	1.00	-0.02	
10	46.0	1.6	35.65	12.78	33.29	69.03	479.1	1.34	1.47	1080	1.18	1.00	0.01	10	46.0	1.6	20.59	5.67	19.79	74.01	276.6	1.34	0.85	1080	0.93	1.00	-0.02	
11	46.0	1.0	25.03	8.42	23.58	70.35	375.4	1.50	1.15	1200	1.19	1.00	0.01	11	46.0	1.0	14.08	3.57	13.62	75.32	211.2	1.50	0.65	1200	0.94	1.00	-0.01	
1	52.0	100.0	320.99	141.17	288.28	63.91	2563.5	0.80	7.84	641	1.45	1.00	-0.01	1	52.0	100.0	222.36	81.40	206.92	68.53	1776.5	0.80	5.43	641	1.19	1.00	-0.01	
2	52.0	63.1	231.30	98.94	209.07	64.68	2034.5	0.88	6.22	703	1.45	1.00	0.00	2	52.0	63.1	156.44	55.27	146.35	69.31	1376.0	0.88	4.21	703	1.20	1.00	-0.02	
3	52.0	39.8	165.92	68.90	150.94	65.47	1595.5	0.96	4.88	776	1.45	1.00	0.00	3	52.0	39.8	109.54	37.26	103.01	70.12	1035.0	0.96	3.22	776	1.20	1.00	-0.02	
4	52.0	25.1	118.59	47.65	108.60	66.31	1249.5	1.05	3.82	844	1.46	1.00	-0.01	4	52.0	25.1	76.47	24.91	72.30	70.99	805.6	1.05	2.47	844	1.20	1.00	-0.01	
5	52.0	15.8	84.47	32.71	77.88	67.22	974.9	1.15	2.98	924	1.46	1.00	-0.01	5	52.0	15.8	53.14	16.47	50.52	71.94	615.2	1.15	1.88	924	1.21	1.00	-0.01	
6	52.0	10.0	59.80	22.18	55.53	68.23	765.4	1.26	2.31	1010	1.46	1.00	0.00	6	52.0	10.0	36.75	10.76	35.14	72.98	464.9	1.26	1.42	1010	1.21	1.00	-0.01	
7	52.0	6.3	42.14	14.88	39.43	69.33	584.2	1.39	1.75	1110	1.47	1.00	-0.01	7	52.0	6.3	25.28	6.92	24.33	74.11	350.5	1.39	1.07	1110	1.22	1.00	-0.01	
8	52.0	4.0	29.52	9.84	27.83	70.53	448.5	1.52	1.37	1220	1.47	1.00	-0.01	8	52.0	4.0	17.25	4.38	16.72	75.33	262.7	1.52	0.80	1220	1.22	1.00	-0.01	
9	52.0	2.5	20.55	6.40	19.53	71.86	342.1	1.67	1.05	1330	1.48	1.00	-0.01	9	52.0	2.5	11.74	2.72	11.42	76.62	195.5	1.67	0.60	1330	1.23	1.00	-0.01	
10	52.0	1.6	14.20	4.08	13.60	73.29	259.1	1.82	0.79	1460	1.49	1.00	-0.01	10	52.0	1.6	7.92	1.66	7.74	77.94	145.5	1.82	0.44	1460	1.24	1.00	-0.02	
11	52.0	1.0	9.74	2.56	9.40	74.74	194.8	2.00	0.60	1600	1.50	1.00	-0.02	11	52.0	1.0	5.30	0.99	5.21	79.28	106.0	2.00	0.32	1600	1.25	1.00	-0.02	
1	58.0	100.0	152.45	59.79	140.24	66.91	1522.5	1.00	4.65	801	1.75	1.00	-0.01	1	58.0	100.0	103.08	32.89	97.69	71.39	1029.0	1.00	3.15	801	1.50	1.00	-0.02	
2	58.0	63.1	108.16	40.99	100.09	67.73	1211.0	1.12																				

E MEDIA															F MEDIA														
Meas.	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [Pa]	M [nNm]	φ [μrad]	h [h]	β [mm]	F _n [N]		Meas.	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [Pa]	M [nNm]	φ [μrad]	h [h]	β [mm]	F _n [N]	
1	34.0	100.0	7727,77	5206,37	5710,7	47,85	15450,0	0,20	47,20	32,0	0,50	1,00	-0,81		1	34.0	100.0	4467,61	3556,47	2703,9	37,25	8949,0	0,20	27,35	32,0	0,50	1,00	-3,50	
2	34.0	63.1	6048,48	3965,77	4566,92	49,03	13280,0	0,22	40,60	34,8	0,51	1,00	-0,81		2	34.0	63.1	3691,21	2911,29	2269,23	37,94	8115,0	0,22	24,80	34,8	0,51	1,00	-3,47	
3	34.0	39.8	4693,73	2993,79	3615,01	50,37	11290,0	0,24	34,50	37,7	0,51	1,00	-0,81		3	34.0	39.8	3038,69	2372,15	1899,09	38,68	7318,5	0,24	22,35	37,7	0,51	1,00	-3,44	
4	34.0	25.1	3616,03	2241,64	2837,39	51,69	9527,5	0,26	29,10	40,9	0,51	1,00	-0,78		4	34.0	25.1	2491,57	1923,39	1583,83	39,47	6575,0	0,26	20,00	40,9	0,51	1,00	-3,41	
5	34.0	15.8	2765,88	1665,90	2207,91	52,97	7985,5	0,29	24,40	44,3	0,52	1,00	-0,76		5	34.0	15.8	2034,54	1551,33	1316,32	40,32	5883,0	0,29	17,95	44,3	0,52	1,00	-3,39	
6	34.0	10.0	2101,14	1228,78	1704,38	54,21	6647,5	0,32	20,30	48,1	0,52	1,00	-0,76		6	34.0	10.0	1654,46	1089,45	1089,45	41,19	5242,0	0,32	16,05	48,1	0,52	1,00	-3,34	
7	34.0	6.3	1586,01	900,38	1305,66	55,41	5499,0	0,35	16,80	52,1	0,53	1,00	-0,65		7	34.0	6.3	1339,48	994,09	897,76	42,09	4651,5	0,35	14,20	52,1	0,53	1,00	-3,29	
8	34.0	4.0	1189,73	655,44	992,90	56,57	4521,5	0,38	13,80	56,5	0,54	1,00	-0,64		8	34.0	4.0	1079,64	789,47	736,45	43,01	4109,0	0,38	12,60	56,5	0,54	1,00	-3,25	
9	34.0	2.5	887,08	474,08	749,77	57,70	3694,5	0,42	11,25	61,3	0,55	1,00	-0,63		9	34.0	2.5	866,25	623,76	601,09	43,94	3613,0	0,42	11,05	61,3	0,55	1,00	-3,20	
10	34.0	1.6	658,08	341,00	562,84	58,79	3003,5	0,46	9,18	66,5	0,56	1,00	-0,63		10	34.0	1.6	691,65	490,31	487,83	44,86	3161,9	0,46	9,67	66,5	0,56	1,00	-3,12	
11	34.0	1.0	485,96	243,59	420,04	59,89	2428,0	0,50	7,42	72,1	0,57	1,00	-0,63		11	34.0	1.0	549,38	383,07	393,79	45,79	2751,9	0,50	8,41	72,1	0,57	1,00	-3,03	
1	40.0	100.0	3587,94	2160,34	2854,24	52,98	7173,5	0,20	21,90	40,0	0,62	1,00	-0,68		1	40.0	100.0	2475,32	1869,99	1821,84	40,94	4947,9	0,20	15,15	40,0	0,64	1,00	-3,34	
2	40.0	63.1	2724,48	1591,78	2211,12	54,25	6089,0	0,22	18,60	44,1	0,63	1,00	-0,68		2	40.0	63.1	2000,46	1495,75	1332,89	41,71	4476,5	0,22	13,70	44,1	0,64	1,00	-3,30	
3	40.0	39.8	2056,21	1165,69	1659,86	55,47	5126,5	0,25	15,65	48,5	0,63	1,00	-0,68		3	40.0	39.8	1615,38	1190,77	1091,52	42,51	4026,5	0,25	12,30	48,5	0,63	1,00	-3,27	
4	40.0	25.1	1542,18	848,15	1288,00	56,64	4290,5	0,28	13,10	53,4	0,64	1,00	-0,66		4	40.0	25.1	1297,01	943,30	890,17	43,34	3607,0	0,28	11,00	53,4	0,63	1,00	-3,26	
5	40.0	15.8	1149,99	613,57	972,63	57,76	3570,0	0,31	10,90	58,7	0,64	1,00	-0,66		5	40.0	15.8	1037,23	743,60	723,12	44,20	3219,0	0,31	9,94	58,7	0,63	1,00	-3,26	
6	40.0	10.0	853,16	441,58	729,99	58,83	2955,5	0,35	9,03	64,6	0,65	1,00	-0,66		6	40.0	10.0	826,18	583,59	584,81	45,06	2861,5	0,35	8,75	64,6	0,64	1,00	-3,24	
7	40.0	6.3	629,62	316,05	544,55	59,87	2434,5	0,39	7,44	71,1	0,65	1,00	-0,65		7	40.0	6.3	655,22	455,85	470,65	45,92	2533,0	0,39	7,74	71,1	0,64	1,00	-3,23	
8	40.0	4.0	462,27	224,93	403,86	60,89	1995,0	0,43	6,10	78,2	0,66	1,00	-0,61		8	40.0	4.0	517,46	354,46	377,00	46,77	2232,5	0,43	6,83	78,2	0,65	1,00	-3,27	
9	40.0	2.5	337,86	159,24	297,98	61,88	1627,5	0,48	4,98	86,0	0,67	1,00	-0,68		9	40.0	2.5	406,79	274,33	300,37	47,60	1959,0	0,48	5,99	86,0	0,66	1,00	-3,33	
10	40.0	1.6	245,79	112,08	218,75	62,87	1321,5	0,54	4,04	94,6	0,68	1,00	-0,63		10	40.0	1.6	318,45	211,51	238,06	48,38	1711,5	0,54	5,23	94,6	0,67	1,00	-3,30	
11	40.0	1.0	177,79	78,16	159,68	63,92	1066,5	0,60	3,28	104,0	0,69	1,00	-0,62		11	40.0	1.0	248,18	162,38	187,19	49,14	1488,5	0,60	4,55	104,0	0,68	1,00	-3,30	
1	46.0	100.0	1632,31	871,14	1380,41	57,79	4078,5	0,25	12,50	40,0	1,14	1,00	-0,07		1	46.0	100.0	1320,44	938,65	928,71	44,76	3296,0	0,25	10,10	40,0	1,13	1,00	-0,85	
2	46.0	63.1	1210,59	626,12	1036,10	58,86	3381,5	0,28	10,35	44,7	1,15	1,00	-0,07		2	46.0	63.1	1048,67	735,02	747,96	45,50	2928,0	0,28	8,95	44,7	1,14	1,00	-0,85	
3	46.0	39.8	892,79	447,81	772,36	59,90	2782,0	0,31	8,51	49,9	1,15	1,00	-0,07		3	46.0	39.8	829,21	572,78	599,59	46,31	2583,5	0,31	7,90	49,9	1,14	1,00	-0,87	
4	46.0	25.1	655,05	318,67	572,31	60,89	2277,5	0,35	6,96	55,7	1,15	1,00	-0,07		4	46.0	25.1	653,01	444,35	478,51	47,12	2269,5	0,35	6,94	55,7	1,15	1,00	-0,87	
5	46.0	15.8	478,38	225,65	421,81	61,86	1856,0	0,39	5,68	62,2	1,16	1,00	-0,02		5	46.0	15.8	512,17	343,27	380,11	47,92	1986,5	0,39	6,07	62,2	1,15	1,00	-0,85	
6	46.0	10.0	347,68	158,95	309,22	62,80	1505,5	0,43	4,60	69,4	1,16	1,00	-0,02		6	46.0	10.0	400,08	264,11	300,52	48,69	1731,5	0,43	5,29	69,4	1,15	1,00	-0,89	
7	46.0	6.3	251,61	111,32	225,64	63,74	1216,5	0,48	3,72	77,4	1,17	1,00	-0,03		7	46.0	6.3	311,27	202,49	236,41	49,42	1503,5	0,48	4,60	77,4	1,16	1,00	-0,87	
8	46.0	4.0	181,22	77,46	163,83	64,70	977,5	0,54	2,99	86,4	1,18	1,00	-0,04		8	46.0	4.0	241,21	154,72	185,05	50,10	1300,5	0,54	3,98	86,4	1,17	1,00	-0,93	
9	46.0	2.5	130,00	53,49	118,49	65,71	782,7	0,60	2,39	96,4	1,18	1,00	-0,02		9	46.0	2.5	186,26	117,91	144,18	50,73	1121,0	0,60	3,43	96,4	1,17	1,00	-0,89	
10	46.0	1.6	92,84	36,82	85,32	66,77	623,9	0,67	1,91	108,0	1,19	1,00	-0,05		10	46.0	1.6	143,46	89,77	111,91	51,27	960,4	0,67	2,95	108,0	1,18	1,00	-0,83	
11	46.0	1.0	65,94	24,80	61,10	67,91	494,5	0,75	1,51	120,0	1,21	1,00	-0,04		11	46.0	1.0	110,21	68,21	86,56	51,76	826,0	0,75	2,52	120,0	1,20	1,00	-0,73	
1	52.0	100.0	743,99	352,13	656,45	61,79	2978,0	0,40	9,11	64,1	1,46	1,00	-0,08		1	52.0	100.0	769,04	480,16	528,51	48,47	2822,5	0,40	8,63	64,1	1,45	1,00	-0,30	
2	52.0	63.1	540,64	247,78	480,53	62,73	2372,5	0,44	7,25	70,3	1,46	1,00	-0,08		2	52.0	63.1	549,76	358,96	416,38	49,24	2412,0	0,44	7,38	70,3	1,45	1,00	-0,36	
3	52.0	39.8	390,77	173,52	350,08	63,64	1879,5	0,48	5,75	77,0	1,47	1,00	-0,04		3	52.0	39.8	426,24	274,12	326,40	49,98	2049,0	0,48	6,27	77,0	1,46	1,00	-0,29	
4	52.0	25.1	281,42	123,04	254,06	64,53	1482,5	0,53	4,53	84,4	1,47	1,00	-0,03		4	52.0	25.1	329,26	208,64	254,72	50,68	1734,0	0,53	5,30	84,4	1,46	1,00	-0,29	
5	52.0	15.8	201,97	84,00	183,68	65,43	1166,0	0,58	3,57	92,4	1,48	1,00	-0,04		5	52.0	15.8	253,51	158,40	197,93	51,33	1463,0	0,58	4,47	92,4	1,46	1,00	-0,29	
6	52.0	10.0	144,41	57,91	132,23	66,36	913,5	0,63	2,80	101,0	1,48	1,00	-0,03		6	52.0	10.0	194,54	120,01	153,11	51,91	1230,5	0,63	3,76	101,0	1,47	1,00	-0,29	
7	52.0	6.3	102,73	39,57	94,81	67,35	712,1	0,69	2,18	110,0	1,48	1,00	-0,04		7	52.0	6.3	148,81	90,77	117,91	52,41	1031,5	0,69	3,15	110,0	1,47	1,00	-0,26	
8	52.0	4.0	72,71	28,76	67,60	68,41	552,3	0,76	1,69	122,0	1,49	1,00	-0,04		8	52.0	4.0	113,55	68,61	90,99	52,83	862,5	0,76	2,64	122,0	1,48	1,00	-0,26	
9	52.0	2.5	51,15	17,86	47,93	69,56	425,8	0,83	1,30	133,0	1,50	1,00	-0,05		9	52.0	2.5	86,52	51,87	69,25	53,17	720,2	0,83	2,20	133,0	1,49	1,00	-0,26	
10	52.0	1.6	35,76	11,75	33,77	70,81	326,3	0,91																					

Meas.	G MEDIA													H MEDIA													
	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [mNm]	φ [μrad]	ε [h]	d [mm]	F _n [N]	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [mNm]	φ [μrad]	ε [h]	d [mm]	F _n [N]	
1	34,0	100,0	5250,06	3997,00	3465,4	40,93	10590,0	0,20	32,35	3,20	0,50	1,00	-3,25	1	34,0	100,0	3834,58	2615,66	2804,0	46,99	7899,0	0,20	23,50	3,20	0,50	0,99	-8,00
2	34,0	63,1	4290,08	3197,40	2860,32	41,82	9429,5	0,22	28,80	3,48	0,51	1,00	-3,22	2	34,0	63,1	3008,61	2030,46	2220,13	47,56	6630,0	0,22	20,25	3,48	0,51	0,99	-7,89
3	34,0	39,8	3458,69	2540,61	2346,88	42,73	8329,0	0,24	25,45	3,77	0,51	1,00	-3,19	3	34,0	39,8	2353,40	1574,27	1749,33	48,02	5682,5	0,24	17,40	3,77	0,52	0,99	-7,82
4	34,0	25,1	2773,98	2007,67	1914,21	43,64	7319,5	0,26	22,35	4,09	0,51	1,00	-3,18	4	34,0	25,1	1836,31	1219,77	1372,65	48,38	4858,0	0,26	14,85	4,09	0,53	0,99	-7,73
5	34,0	15,8	2214,22	1578,61	1552,65	44,53	6401,5	0,29	19,60	4,43	0,52	1,00	-3,13	5	34,0	15,8	1430,57	945,68	1073,41	48,62	4146,5	0,29	12,65	4,43	0,54	0,99	-7,58
6	34,0	10,0	1759,06	1235,02	1252,60	45,41	5573,0	0,32	17,05	4,81	0,52	1,00	-3,08	6	34,0	10,0	1112,94	733,96	836,62	48,74	3535,0	0,32	10,85	4,81	0,56	0,99	-7,45
7	34,0	6,3	1391,05	961,49	1005,26	46,28	4830,0	0,35	14,80	5,21	0,53	1,00	-3,07	7	34,0	6,3	865,07	570,49	650,29	48,74	3011,0	0,35	9,20	5,21	0,57	0,99	-7,33
8	34,0	4,0	1095,34	745,06	802,90	47,14	4168,0	0,38	12,75	5,65	0,54	1,00	-3,06	8	34,0	4,0	672,64	444,69	504,67	48,62	2566,0	0,38	7,85	5,65	0,58	0,99	-7,28
9	34,0	2,5	858,91	574,67	638,34	48,01	3582,0	0,42	10,95	6,13	0,55	1,00	-2,99	9	34,0	2,5	523,55	347,87	391,27	48,38	2189,0	0,42	6,69	6,13	0,59	1,00	-7,19
10	34,0	1,6	671,09	441,55	505,36	48,86	3067,5	0,46	9,38	6,65	0,56	1,00	-2,91	10	34,0	1,6	408,14	273,18	303,24	47,99	1870,0	0,46	5,72	6,65	0,60	1,00	-7,05
11	34,0	1,0	521,97	337,32	398,33	49,74	2613,5	0,50	7,99	7,21	0,57	1,00	-2,83	11	34,0	1,0	319,69	215,41	235,32	47,53	1601,5	0,50	4,90	7,21	0,62	1,00	-7,04
1	40,0	100,0	2718,22	1920,87	1923,25	45,04	5434,5	0,20	16,60	4,00	0,82	1,00	-0,33	1	40,0	100,0	1905,73	1233,11	1433,01	49,68	3814,0	0,20	11,35	4,00	0,87	1,00	-2,39
2	40,0	63,1	2153,27	1499,30	1454,54	45,87	4813,0	0,22	14,75	4,41	0,83	1,00	-0,30	2	40,0	63,1	1471,91	948,39	1125,65	49,89	3293,5	0,22	10,10	4,41	0,87	1,00	-2,31
3	40,0	39,8	1698,14	1164,83	1235,66	46,69	4234,5	0,25	12,95	4,85	0,83	1,00	-0,31	3	40,0	39,8	1136,21	731,03	869,81	49,96	2836,5	0,25	8,67	4,85	0,88	1,00	-2,30
4	40,0	25,1	1333,87	901,23	983,35	47,50	3711,5	0,28	11,30	5,34	0,83	1,00	-0,32	4	40,0	25,1	877,35	565,24	671,00	49,89	2443,5	0,28	7,47	5,34	0,88	1,00	-2,23
5	40,0	15,8	1043,70	694,50	779,08	48,29	3240,5	0,31	9,92	5,87	0,84	1,00	-0,34	5	40,0	15,8	678,04	438,60	517,08	49,70	2107,5	0,31	6,44	5,87	0,89	1,00	-2,21
6	40,0	10,0	813,70	533,08	614,78	49,07	2819,5	0,35	8,62	6,46	0,84	1,00	-0,35	6	40,0	10,0	525,30	342,16	398,58	49,36	1822,0	0,35	5,57	6,46	0,89	1,00	-2,18
7	40,0	6,3	632,01	407,60	483,01	49,84	2444,0	0,39	7,47	7,11	0,85	1,00	-0,37	7	40,0	6,3	407,93	268,22	307,36	49,36	1579,5	0,39	4,83	7,11	0,90	1,00	-2,13
8	40,0	4,0	489,18	310,43	378,06	50,61	2111,5	0,43	6,45	7,82	0,85	1,00	-0,31	8	40,0	4,0	317,83	211,39	237,34	48,31	1373,5	0,43	4,20	7,82	0,90	1,00	-2,14
9	40,0	2,5	377,15	235,27	294,77	51,41	1816,5	0,48	5,56	8,60	0,86	1,00	-0,26	9	40,0	2,5	248,41	167,39	183,54	47,64	1197,5	0,48	3,66	8,60	0,91	1,00	-2,07
10	40,0	1,6	289,67	177,52	228,90	52,21	1557,0	0,54	4,76	9,46	0,87	1,00	-0,30	10	40,0	1,6	194,81	133,18	142,17	46,87	1048,5	0,54	3,20	9,46	0,92	1,00	-2,01
11	40,0	1,0	221,53	133,20	177,02	53,04	1329,5	0,60	4,06	10,40	0,89	1,00	-0,33	11	40,0	1,0	153,45	106,62	110,37	45,99	921,5	0,60	2,82	10,40	0,93	1,00	-1,89
1	46,0	100,0	1348,68	888,00	1015,07	48,82	3385,5	0,25	10,30	4,00	1,14	1,00	-0,02	1	46,0	100,0	956,66	598,54	746,29	51,27	2388,0	0,25	7,30	4,00	1,19	1,00	1,39
2	46,0	63,1	1048,00	679,93	797,50	49,55	2927,5	0,28	8,95	4,47	1,14	1,00	0,01	2	46,0	63,1	733,05	460,93	570,01	51,04	2046,0	0,28	6,26	4,47	1,19	1,00	1,42
3	46,0	39,8	811,31	518,62	623,91	50,27	2528,5	0,31	7,73	4,99	1,14	1,00	0,00	3	46,0	39,8	563,30	357,05	435,69	50,67	1754,0	0,31	5,36	4,99	1,20	1,00	1,48
4	46,0	25,1	626,37	394,44	486,57	50,97	2178,0	0,35	6,66	5,57	1,15	1,00	0,00	4	46,0	25,1	434,44	278,41	333,50	50,15	1509,5	0,35	4,62	5,57	1,20	1,00	1,52
5	46,0	15,8	482,02	298,98	378,09	51,67	1870,5	0,39	5,72	6,22	1,15	1,00	0,00	5	46,0	15,8	336,60	218,63	255,93	49,50	1305,0	0,39	3,99	6,22	1,20	1,00	1,55
6	46,0	10,0	369,72	225,71	292,82	52,38	1601,0	0,43	4,90	6,94	1,16	1,00	0,00	6	46,0	10,0	261,79	172,69	196,75	48,73	1133,0	0,43	3,46	6,94	1,21	1,00	1,59
7	46,0	6,3	282,52	169,67	225,90	53,09	1365,5	0,48	4,18	7,74	1,16	1,00	0,00	7	46,0	6,3	204,47	137,19	151,62	47,86	987,3	0,48	3,02	7,74	1,21	1,00	1,61
8	46,0	4,0	215,09	128,93	173,65	53,84	1160,0	0,54	3,55	8,64	1,17	1,00	0,03	8	46,0	4,0	160,31	109,51	117,07	46,91	863,9	0,54	2,64	8,64	1,22	1,00	1,59
9	46,0	2,5	163,12	94,46	132,99	54,62	982,0	0,60	3,00	9,64	1,18	1,00	0,02	9	46,0	2,5	126,11	87,75	90,58	45,91	758,5	0,60	2,32	9,64	1,23	1,00	1,57
10	46,0	1,6	123,25	69,88	101,52	55,46	828,1	0,67	2,53	10,80	1,19	1,00	0,04	10	46,0	1,6	95,77	70,71	70,38	44,87	669,7	0,67	2,05	10,80	1,24	1,00	1,66
11	46,0	1,0	92,26	51,33	77,15	56,38	695,7	0,75	2,13	12,01	1,20	1,00	0,08	11	46,0	1,0	79,54	57,43	55,06	43,80	559,9	0,75	1,82	12,01	1,25	1,00	1,73
1	52,0	100,0	668,41	409,53	528,25	52,22	2672,5	0,40	8,17	6,41	1,45	1,00	-0,04	1	52,0	100,0	500,09	309,70	392,65	51,74	1396,0	0,40	6,10	6,41	1,50	1,00	3,19
2	52,0	63,1	510,49	308,29	406,89	52,85	2240,5	0,44	6,85	7,03	1,46	1,00	-0,05	2	52,0	63,1	384,15	241,41	298,81	51,07	1083,0	0,44	5,15	7,03	1,51	1,00	3,24
3	52,0	39,8	388,77	231,36	312,43	53,48	1869,0	0,48	5,72	7,70	1,46	1,00	-0,08	3	52,0	39,8	296,10	189,32	227,67	50,25	1421,0	0,48	4,35	7,70	1,51	1,00	3,25
4	52,0	25,1	295,37	173,11	239,32	54,12	1556,0	0,53	4,76	8,44	1,46	1,00	-0,06	4	52,0	25,1	229,11	149,31	173,78	49,33	1205,0	0,53	3,69	8,44	1,51	1,00	3,24
5	52,0	15,8	223,86	129,12	182,87	54,78	1292,0	0,58	3,95	9,24	1,47	1,00	-0,04	5	52,0	15,8	177,99	118,37	132,93	48,32	1025,0	0,58	3,14	9,24	1,52	1,00	3,23
6	52,0	10,0	169,13	95,87	139,34	55,47	1095,0	0,63	3,27	10,14	1,47	1,00	-0,05	6	52,0	10,0	139,65	94,42	102,08	47,23	877,8	0,63	2,69	10,14	1,52	1,00	3,25
7	52,0	6,3	127,38	70,83	105,87	56,22	883,0	0,69	2,70	11,10	1,48	1,00	-0,02	7	52,0	6,3	109,32	75,81	78,76	46,10	756,3	0,69	2,32	11,10	1,52	1,00	3,29
8	52,0	4,0	95,56	52,61	80,16	57,03	725,9	0,76	2,22	12,20	1,48	1,00	0,00	8	52,0	4,0	86,62	61,32	61,18	44,94	656,6	0,76	2,01	12,20	1,53	1,00	3,26
9	52,0	2,5	71,39	37,91	60,49	57,92	594,3	0,83	1,82	13,30	1,49	1,00	0,02	9	52,0	2,5	69,16	49,95	47,84	43,76	574,7	0,83	1,76	13,30	1,54	1,00	3,27
10	52,0	1,6	53,09	27,41	45,47	58,92	484,4	0,91	1,48	14,60	1,50	1,00	0,04	10	52,0	1,6	55,54	40,89	37,58	42,59	505,7	0,91	1,55	14,60	1,55	1,00	3,31
11	52,0	1,0	39,20	19,67	34,05	59,99	393,2	1,00	1,20	16,00	1,51	1,00	-0,02	11	52,0	1,0	44,82	33,61	29,66	41,43	447,3	1,00	1,37	16,00	1,56	1,00	3,30
1	58,0	100,0	336,47	191,64	276,56	55,28	1681,5	0,50	5,14	8,00	1																

Meas.	C MEDIA													D MEDIA													
	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [mNm]	φ [μrad]	κ [h]	δ [mm]	F _n [N]	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [mNm]	φ [μrad]	κ [h]	δ [mm]	F _n [N]	
1	34,0	100,0	2563	2162	2832	52,64	7124	0,20	0,72	2000	0,25	2,00	0,00	1	34,0	100,0	2908	1537	2469	58,18	11630	0,40	1,17	2000	0,50	2,00	-0,01
2	34,0	63,1	2740	1637	2198	53,32	6001	0,22	0,60	2160	0,26	2,00	0,00	2	34,0	63,1	2178	1131	1861	58,71	9440	0,43	0,95	2160	0,51	2,00	-0,01
3	34,0	39,8	2091	1225	1695	54,15	5021	0,24	0,50	2350	0,26	2,00	0,00	3	34,0	39,8	1618	820	1395	59,53	7607	0,47	0,76	2350	0,51	2,00	-0,01
4	34,0	25,1	1586	908	1300	55,06	4175	0,26	0,42	2550	0,26	2,00	0,00	4	34,0	25,1	1193	589	1038	60,44	6086	0,51	0,61	2550	0,51	2,00	-0,01
5	34,0	15,8	1196	669	991	56,00	3450	0,29	0,35	2770	0,27	2,00	0,00	5	34,0	15,8	875	419	768	61,38	4839	0,55	0,49	2770	0,52	2,00	-0,01
6	34,0	10,0	896	489	751	56,96	2835	0,32	0,28	3000	0,27	2,00	0,00	6	34,0	10,0	638	296	565	62,33	3826	0,60	0,38	3000	0,52	2,00	-0,01
7	34,0	6,3	669	355	566	57,91	2318	0,35	0,23	3260	0,27	2,00	0,00	7	34,0	6,3	463	208	413	63,26	3010	0,65	0,30	3260	0,53	2,00	-0,01
8	34,0	4,0	496	257	425	58,88	1885	0,38	0,19	3530	0,28	2,00	0,00	8	34,0	4,0	334	145	301	64,20	2357	0,71	0,24	3530	0,53	2,00	-0,01
9	34,0	2,5	367	184	317	59,84	1527	0,42	0,15	3830	0,29	2,00	0,00	9	34,0	2,5	240	101	218	65,14	1838	0,77	0,18	3830	0,54	2,00	-0,01
10	34,0	1,6	269	131	235	60,84	1230	0,46	0,12	4150	0,30	2,00	-0,01	10	34,0	1,6	172	70	157	66,11	1426	0,83	0,14	4150	0,55	2,00	-0,01
11	34,0	1,0	197	93	174	61,84	986	0,50	0,10	4500	0,31	2,00	-0,01	11	34,0	1,0	122	48	113	67,14	1101	0,90	0,11	4500	0,56	2,00	-0,01
1	28,0	100,0	7520	5990	5535	47,40	11275	0,15	1,13	1500	0,56	2,00	-0,01	1	28,0	100,0	6599	4040	5217	52,25	19790	0,30	1,99	1500	0,81	2,00	-0,02
2	28,0	63,1	5916	3938	4416	48,28	9650	0,16	0,97	1630	0,56	2,00	-0,01	2	28,0	63,1	5062	3025	4059	53,30	16510	0,33	1,66	1630	0,81	2,00	-0,02
3	28,0	39,8	4621	3017	3501	49,25	8207	0,18	0,82	1780	0,57	2,00	-0,01	3	28,0	39,8	3953	2242	3133	54,42	13585	0,36	1,38	1780	0,82	2,00	-0,02
4	28,0	25,1	3585	2294	2760	50,27	6939	0,19	0,70	1930	0,57	2,00	-0,01	4	28,0	25,1	2913	1647	2401	55,55	11266	0,39	1,13	1930	0,82	2,00	-0,02
5	28,0	15,8	2770	1732	2162	51,31	5831	0,21	0,59	2110	0,57	2,00	-0,01	5	28,0	15,8	2186	1200	1826	56,69	9201	0,42	0,92	2110	0,82	2,00	-0,02
6	28,0	10,0	2124	1298	1682	52,36	4868	0,23	0,49	2290	0,58	2,00	-0,01	6	28,0	10,0	1631	899	1380	57,81	7475	0,46	0,75	2290	0,83	2,00	-0,02
7	28,0	6,3	1621	966	1301	53,40	4042	0,25	0,41	2500	0,58	2,00	-0,01	7	28,0	6,3	1210	625	1036	58,89	6036	0,50	0,61	2500	0,83	2,00	-0,02
8	28,0	4,0	1231	716	1002	54,44	3342	0,27	0,34	2720	0,59	2,00	-0,01	8	28,0	4,0	893	447	773	59,94	4848	0,54	0,49	2720	0,84	2,00	-0,02
9	28,0	2,5	929	527	766	55,47	2746	0,30	0,28	2960	0,59	2,00	-0,01	9	28,0	2,5	656	318	573	60,96	3875	0,59	0,39	2960	0,85	2,00	-0,02
10	28,0	1,6	699	386	582	56,50	2246	0,32	0,23	3220	0,60	2,00	-0,01	10	28,0	1,6	479	225	423	61,98	3082	0,64	0,31	3220	0,86	2,00	-0,02
11	28,0	1,0	522	281	441	57,52	1829	0,35	0,18	3500	0,62	2,00	-0,01	11	28,0	1,0	349	159	319	62,95	2440	0,70	0,24	3500	0,87	2,00	-0,02
1	22,0	100,0	15408	11436	10326	42,08	15400	0,10	1,55	999	0,87	2,00	-0,03	1	22,0	100,0	14657	10125	10598	46,31	29905	0,20	2,94	999	1,12	2,00	-0,02
2	22,0	63,1	12426	9067	8497	43,14	13620	0,11	1,37	1100	0,87	2,00	-0,03	2	22,0	63,1	11572	7799	8550	47,63	25375	0,22	2,56	1100	1,12	2,00	-0,02
3	22,0	39,8	9967	7153	6941	44,14	11995	0,12	1,21	1200	0,87	2,00	-0,03	3	22,0	39,8	9062	5966	6821	48,83	21805	0,24	2,19	1200	1,12	2,00	-0,02
4	22,0	25,1	7935	5924	5629	45,18	10450	0,13	1,09	1320	0,87	2,00	-0,03	4	22,0	25,1	7031	4515	5390	50,05	18050	0,26	1,86	1320	1,13	2,00	-0,02
5	22,0	15,8	6286	4346	4541	46,26	9068	0,14	0,91	1440	0,88	2,00	-0,03	5	22,0	15,8	5423	3390	4233	51,32	15650	0,29	1,57	1440	1,13	2,00	-0,03
6	22,0	10,0	4949	3353	3540	47,35	7825	0,16	0,79	1580	0,88	2,00	-0,03	6	22,0	10,0	4159	2528	3302	52,57	13150	0,32	1,32	1580	1,13	2,00	-0,02
7	22,0	6,3	3873	2568	2899	48,46	6712	0,17	0,67	1730	0,89	2,00	-0,03	7	22,0	6,3	3169	1872	2557	53,79	10985	0,35	1,11	1730	1,14	2,00	-0,02
8	22,0	4,0	3017	1957	2296	49,56	5730	0,19	0,58	1900	0,89	2,00	-0,03	8	22,0	4,0	2399	1377	1965	54,99	9114	0,38	0,91	1900	1,14	2,00	-0,02
9	22,0	2,5	2339	1483	1809	50,65	4868	0,21	0,49	2080	0,90	2,00	-0,03	9	22,0	2,5	1806	1006	1500	56,17	7519	0,42	0,75	2080	1,15	2,00	-0,02
10	22,0	1,6	1801	1115	1414	51,76	4108	0,23	0,41	2280	0,91	2,00	-0,03	10	22,0	1,6	1352	731	1138	57,30	6169	0,46	0,62	2280	1,16	2,00	-0,02
11	22,0	1,0	1380	834	1100	52,83	3450	0,25	0,35	2500	0,92	2,00	-0,03	11	22,0	1,0	1007	527	858	58,43	5032	0,50	0,51	2500	1,17	2,00	-0,02
1	16,0	100,0	30449	24332	18306	36,96	30435	0,10	3,06	999	1,17	2,00	-0,07	1	16,0	100,0	31128	23723	20154	40,35	62235	0,20	6,24	999	1,42	2,00	-0,03
2	16,0	63,1	25212	19879	15506	37,96	27070	0,11	2,72	1080	1,18	2,00	-0,07	2	16,0	63,1	25277	18695	16791	41,63	54265	0,22	5,45	1080	1,43	2,00	-0,03
3	16,0	39,8	20731	16119	13037	38,97	23835	0,12	2,40	1150	1,18	2,00	-0,07	3	16,0	39,8	20371	14923	13867	42,90	46940	0,23	4,70	1150	1,43	2,00	-0,04
4	16,0	25,1	16548	12982	10895	40,01	20875	0,12	2,09	1230	1,18	2,00	-0,07	4	16,0	25,1	16313	11897	11371	44,19	40185	0,25	4,03	1230	1,44	2,00	-0,04
5	16,0	15,8	13778	10390	9046	41,06	18190	0,13	1,83	1320	1,18	2,00	-0,07	5	16,0	15,8	12983	9102	9258	45,49	34275	0,26	3,44	1320	1,44	2,00	-0,04
6	16,0	10,0	11132	8255	7468	42,14	15745	0,14	1,58	1420	1,19	2,00	-0,07	6	16,0	10,0	10251	7020	7470	46,78	28998	0,28	2,91	1420	1,44	2,00	-0,04
7	16,0	6,3	8956	6527	6133	43,22	13575	0,15	1,37	1520	1,19	2,00	-0,07	7	16,0	6,3	8043	5374	5985	48,08	24385	0,30	2,45	1520	1,44	2,00	-0,04
8	16,0	4,0	7174	5132	5013	44,33	11655	0,16	1,17	1630	1,20	2,00	-0,07	8	16,0	4,0	6273	4084	4761	49,38	20380	0,33	2,05	1630	1,45	2,00	-0,04
9	16,0	2,5	5714	4069	4071	45,44	9947	0,17	1,00	1740	1,21	2,00	-0,07	9	16,0	2,5	4861	3082	3759	50,65	16925	0,35	1,70	1740	1,46	2,00	-0,04
10	16,0	1,6	4519	3106	3283	46,59	8433	0,19	0,85																		

		E MEDIA														F MEDIA													
Meas.	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [mNm]	φ [μrad]	k [h]	d [mm]	F _n [N]	Meas.	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [mNm]	φ [μrad]	k [h]	d [mm]	F _n [N]		
																												1	2
PP08	1	34,0	100,0	8307	5474	6248	48,78	166,10	0,20	1,66	2000	0,25	2,00	0,00	1	34,0	100,0	6453	5190	3834	36,46	12905	0,20	1,28	2000	0,00	2,00	0,05	
	2	34,0	63,1	6464	4159	4948	49,95	141,55	0,22	1,41	2160	0,25	2,00	0,00	2	34,0	63,1	5365	4274	3243	37,20	11750	0,22	1,17	2160	0,01	2,00	0,05	
	3	34,0	39,8	5001	3137	3894	51,15	120,05	0,24	1,20	2350	0,26	2,00	0,00	3	34,0	39,8	4442	3499	2736	38,02	10665	0,24	1,06	2350	0,01	2,00	0,05	
	4	34,0	25,1	3839	2346	3039	52,34	101,04	0,26	1,01	2550	0,26	2,00	0,00	4	34,0	25,1	3657	2846	2297	38,91	9625	0,26	0,96	2550	0,01	2,00	0,05	
	5	34,0	15,8	2930	1742	2356	53,53	84,54	0,29	0,84	2770	0,26	2,00	0,00	5	34,0	15,8	2996	2300	1920	39,85	8645	0,29	0,86	2770	0,01	2,00	0,05	
	6	34,0	10,0	2222	1285	1813	54,69	70,27	0,32	0,70	3000	0,27	2,00	0,00	6	34,0	10,0	2442	1847	1597	40,84	7722	0,32	0,77	3000	0,02	2,00	0,05	
	7	34,0	6,3	1674	940	1385	55,83	58,02	0,35	0,58	3260	0,27	2,00	0,00	7	34,0	6,3	1979	1474	1320	41,85	6858	0,35	0,68	3260	0,02	2,00	0,05	
	8	34,0	4,0	1254	684	1051	56,95	47,62	0,38	0,47	3530	0,29	2,00	0,00	8	34,0	4,0	1595	1169	1086	42,89	6060	0,38	0,60	3530	0,03	2,00	0,05	
	9	34,0	2,5	933	494	792	58,04	38,86	0,42	0,39	3830	0,29	2,00	0,00	9	34,0	2,5	1279	921	888	43,95	5325	0,42	0,53	3830	0,04	2,00	0,05	
	10	34,0	1,6	692	355	594	59,10	31,57	0,46	0,31	4150	0,30	2,00	0,00	10	34,0	1,6	1020	721	722	45,03	4654	0,46	0,46	4150	0,04	2,00	0,05	
	11	34,0	1,0	511	254	443	60,18	25,93	0,50	0,25	4500	0,31	2,00	0,00	11	34,0	1,0	810	562	584	46,09	4052	0,50	0,40	4500	0,06	2,00	0,05	
PP08	1	28,0	100,0	17375	12647	11914	43,29	260,95	0,15	2,60	1500	0,56	2,00	-0,01	1	28,0	100,0	11759	9938	6286	32,32	17630	0,19	1,76	1500	0,31	2,00	-0,01	
	2	28,0	63,1	13919	9911	9772	44,40	227,65	0,16	2,27	1630	0,56	2,00	-0,01	2	28,0	63,1	9981	8373	5433	32,98	16285	0,16	1,62	1630	0,31	2,00	-0,01	
	3	28,0	39,8	11062	7718	7925	45,76	197,90	0,18	1,97	1780	0,56	2,00	-0,01	3	28,0	39,8	8444	7024	4687	33,72	15005	0,18	1,50	1780	0,31	2,00	-0,01	
	4	28,0	25,1	8710	5944	6366	46,97	168,95	0,19	1,68	1930	0,57	2,00	-0,01	4	28,0	25,1	7102	5853	4021	34,50	13735	0,19	1,37	1930	0,32	2,00	-0,01	
	5	28,0	15,8	6819	4544	5085	48,22	143,90	0,21	1,43	2110	0,57	2,00	-0,01	5	28,0	15,8	5946	4850	3439	35,34	12515	0,21	1,25	2110	0,32	2,00	-0,01	
	6	28,0	10,0	5314	3454	4039	49,46	121,75	0,23	1,22	2290	0,57	2,00	-0,01	6	28,0	10,0	4961	4002	2932	36,23	11365	0,23	1,13	2290	0,32	2,00	-0,01	
	7	28,0	6,3	4115	2606	3155	50,71	102,65	0,25	1,03	2500	0,58	2,00	-0,01	7	28,0	6,3	4119	3282	2829	37,18	10270	0,25	1,03	2500	0,33	2,00	-0,01	
	8	28,0	4,0	3166	1952	2493	51,99	85,94	0,27	0,86	2760	0,58	2,00	-0,01	8	28,0	4,0	3403	2676	2102	38,16	9235	0,27	0,92	2760	0,33	2,00	-0,01	
	9	28,0	2,5	2422	1453	1938	53,14	71,57	0,30	0,71	2920	0,59	2,00	-0,01	9	28,0	2,5	2799	2170	1768	39,18	8270	0,30	0,82	2920	0,34	2,00	-0,01	
	10	28,0	1,6	1841	1074	1496	54,33	59,20	0,32	0,59	3220	0,60	2,00	-0,01	10	28,0	1,6	2290	1748	1479	40,24	7364	0,32	0,73	3220	0,35	2,00	-0,01	
	11	28,0	1,0	1391	789	1148	55,48	48,69	0,35	0,48	3500	0,61	2,00	-0,01	11	28,0	1,0	1865	1401	1231	41,33	6527	0,35	0,65	3500	0,36	2,00	-0,01	
PP08	1	22,0	100,0	35055	27720	21475	37,77	350,95	0,10	3,49	999	0,88	2,00	-0,04	1	22,0	100,0	20844	18315	9952	28,52	20835	0,10	2,08	999	0,62	2,00	-0,10	
	2	22,0	63,1	28826	22421	18117	38,94	316,50	0,11	3,15	1100	0,87	2,00	-0,04	2	22,0	63,1	18033	15755	8773	29,11	19755	0,11	1,97	1100	0,62	2,00	-0,10	
	3	22,0	39,8	23530	17989	15617	40,14	282,85	0,12	2,82	1200	0,87	2,00	-0,04	3	22,0	39,8	15557	13509	7715	29,73	18720	0,12	1,87	1200	0,62	2,00	-0,10	
	4	22,0	25,1	19087	14327	12611	41,36	251,40	0,13	2,51	1320	0,87	2,00	-0,04	4	22,0	25,1	13357	11521	6758	30,40	17610	0,13	1,75	1320	0,62	2,00	-0,09	
	5	22,0	15,8	15394	11334	10417	42,59	222,30	0,14	2,21	1440	0,88	2,00	-0,04	5	22,0	15,8	11425	9780	5905	31,12	16485	0,14	1,64	1440	0,62	2,00	-0,09	
	6	22,0	10,0	12320	8887	8533	43,84	194,75	0,16	1,94	1580	0,88	2,00	-0,04	6	22,0	10,0	9741	8270	5148	31,90	15400	0,16	1,54	1580	0,63	2,00	-0,09	
	7	22,0	6,3	9803	6920	6944	45,10	169,90	0,17	1,70	1730	0,88	2,00	-0,04	7	22,0	6,3	8273	6960	4472	32,72	14335	0,17	1,43	1730	0,63	2,00	-0,09	
	8	22,0	4,0	7756	5352	5614	46,37	147,30	0,19	1,47	1930	0,89	2,00	-0,04	8	22,0	4,0	6997	5828	3873	33,59	13285	0,19	1,32	1900	0,64	2,00	-0,09	
	9	22,0	2,5	6101	4110	4509	47,65	126,95	0,21	1,27	2080	0,90	2,00	-0,03	9	22,0	2,5	5892	4856	3338	34,51	12260	0,21	1,22	2080	0,65	2,00	-0,09	
	10	22,0	1,6	4771	3136	3595	48,91	108,85	0,23	1,09	2280	0,91	2,00	-0,03	10	22,0	1,6	4937	4020	2866	35,48	11260	0,23	1,13	2280	0,65	2,00	-0,09	
	11	22,0	1,0	3707	2373	2848	50,20	92,67	0,25	0,92	2500	0,92	2,00	-0,03	11	22,0	1,0	4122	3314	2450	36,48	10300	0,25	1,03	2500	0,67	2,00	-0,09	
PP08	1	16,0	100,0	67029	56704	35743	32,23	670,00	0,10	6,68	999	1,17	2,00	-0,13	1	16,0	100,0	35535	32173	19088	25,13	35520	0,10	3,54	999	0,92	2,00	-0,34	
	2	16,0	63,1	56634	47292	31160	33,38	607,85	0,11	6,09	1080	1,17	2,00	-0,13	2	16,0	63,1	31288	28201	13551	25,67	33615	0,11	3,35	1080	0,92	2,00	-0,34	
	3	16,0	39,8	47594	39180	26968	34,34	546,80	0,12	5,45	1150	1,18	2,00	-0,11	3	16,0	39,8	27436	24618	12097	26,17	31560	0,12	3,15	1150	0,92	2,00	-0,34	
	4	16,0	25,1	39728	32259	23185	35,71	489,95	0,12	4,88	1230	1,18	2,00	-0,11	4	16,0	25,1	23992	21026	10797	26,75	29560	0,12	2,94	1230	0,93	2,00	-0,34	
	5	16,0	15,8	32991	26386	19804	36,89	435,40	0,13	4,34	1320	1,18	2,00	-0,12	5	16,0	15,8	20937	18595	9621	27,36	27660	0,13	2,76	1320	0,93	2,00	-0,34	
	6	16,0	10,0	27234	21436	16796	38,09	385,20	0,14	3,84	1420	1,19	2,00	-0,14	6	16,0	10,0	18200	16066	8550	28,02	25745	0,14	2,56	1420	0,93	2,00	-0,34	
	7	16,0	6,3	22325	17277	14139	39,30	338,40	0,15	3,37	1520	1,19	2,00	-0,11	7	16,0	6,3	15775	13835	7581	28,72	23910	0,15	2,38	1520	0,94	2,00	-0,34	
	8	16,0	4,0	18186	13822	11819	40,54	295,45	0,16	2,94	1630	1,20	2,00	-0,11	8	16,0	4,0	13626	11864	6701	29,46	22135	0,16	2,21	1630	0,9			

		G MEDIA														H MEDIA													
Meas.	T [°C]	ω [rad/s]	G* [kPa]	G' [kPa]	G'' [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [mNm]	φ [μrad]	k [h]	d [mm]	Fn [N]	Meas.	T [°C]	ω [rad/s]	G* [kPa]	G' [kPa]	G'' [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [mNm]	φ [μrad]	k [h]	d [mm]	Fn [N]		
																												1	2
PP08	1	34,0	100,0	6152	4600	4085	41,61	12300	0,20	1,22	2000	0,25	2,00	-0,01	1	34,0	100,0	4046	2728	2988	47,66	8089	0,20	0,81	1000	0,25	2,00	0,22	
	2	34,0	63,1	4974	3677	3350	42,34	10895	0,22	1,08	2160	0,26	2,00	-0,01	2	34,0	63,1	3158	2106	2352	48,16	6915	0,22	0,69	2160	0,26	2,00	0,22	
	3	34,0	39,8	4000	2921	2733	43,09	9604	0,24	0,95	2350	0,26	2,00	-0,01	3	34,0	39,8	2462	1628	1847	48,60	5911	0,24	0,59	2350	0,26	2,00	0,22	
	4	34,0	25,1	3201	2307	2219	43,88	8426	0,26	0,83	2550	0,26	2,00	-0,01	4	34,0	25,1	1918	1261	1446	48,91	5048	0,26	0,50	2550	0,26	2,00	0,22	
	5	34,0	15,8	2550	1813	1793	44,68	7356	0,29	0,73	2770	0,26	2,00	-0,02	5	34,0	15,8	1492	977	1128	49,11	4305	0,29	0,43	2770	0,26	2,00	0,22	
	6	34,0	10,0	2023	1418	1443	45,49	6398	0,32	0,63	3000	0,27	2,00	-0,02	6	34,0	10,0	1159	758	878	49,20	3667	0,32	0,37	3000	0,27	2,00	0,22	
	7	34,0	6,3	1600	1105	1157	46,31	5546	0,35	0,55	3260	0,27	2,00	-0,02	7	34,0	6,3	900	588	681	49,16	3119	0,35	0,31	3260	0,27	2,00	0,22	
	8	34,0	4,0	1262	858	925	47,13	4792	0,38	0,47	3530	0,28	2,00	-0,02	8	34,0	4,0	698	458	527	49,02	2652	0,38	0,26	3530	0,28	2,00	0,22	
	9	34,0	2,5	991	664	736	47,95	4126	0,42	0,41	3830	0,29	2,00	-0,02	9	34,0	2,5	542	357	408	48,76	2257	0,42	0,23	3830	0,29	2,00	0,22	
	10	34,0	1,6	775	511	583	48,80	3537	0,46	0,35	4150	0,30	2,00	-0,02	10	34,0	1,6	422	280	315	48,39	1924	0,46	0,19	4150	0,30	2,00	0,21	
	11	34,0	1,0	604	391	460	49,63	3017	0,50	0,30	4900	0,31	2,00	-0,02	11	34,0	1,0	325	221	244	47,93	1647	0,50	0,16	4900	0,31	2,00	0,21	
PP08	1	28,0	100,0	11806	9374	7176	37,44	17700	0,15	1,75	1500	0,56	2,00	-0,03	1	28,0	100,0	8044	5749	5626	44,38	12060	0,15	1,20	1500	0,56	2,00	0,19	
	2	28,0	63,1	9746	7657	6029	38,22	15895	0,16	1,57	1630	0,56	2,00	-0,03	2	28,0	63,1	6388	4514	4520	45,04	10415	0,16	1,04	1630	0,56	2,00	0,19	
	3	28,0	39,8	8015	6229	5045	39,01	14240	0,18	1,41	1780	0,56	2,00	-0,03	3	28,0	39,8	5957	3534	3517	45,67	8961	0,18	0,89	1780	0,57	2,00	0,19	
	4	28,0	25,1	6558	5039	4197	39,80	12685	0,19	1,26	1930	0,57	2,00	-0,03	4	28,0	25,1	3992	2761	2883	45,23	7718	0,19	0,77	1930	0,57	2,00	0,19	
	5	28,0	15,8	5341	4055	3477	40,61	11245	0,21	1,11	2110	0,57	2,00	-0,03	5	28,0	15,8	3143	2154	2289	46,74	6616	0,21	0,66	2110	0,57	2,00	0,19	
	6	28,0	10,0	4332	3247	2867	41,45	9925	0,23	0,98	2290	0,57	2,00	-0,03	6	28,0	10,0	2471	1680	1812	47,17	5661	0,23	0,56	2290	0,58	2,00	0,19	
	7	28,0	6,3	3498	2588	2354	42,29	8724	0,25	0,86	2500	0,58	2,00	-0,03	7	28,0	6,3	1939	1310	1430	47,52	4836	0,25	0,48	2500	0,58	2,00	0,19	
	8	28,0	4,0	2812	2052	1923	43,15	7634	0,27	0,75	2720	0,58	2,00	-0,03	8	28,0	4,0	1520	1021	1126	47,79	4126	0,27	0,41	2720	0,59	2,00	0,19	
	9	28,0	2,5	2252	1620	1565	44,01	6654	0,30	0,66	2960	0,59	2,00	-0,03	9	28,0	2,5	1190	797	884	47,96	3516	0,30	0,35	2960	0,59	2,00	0,19	
	10	28,0	1,6	1796	1272	1268	44,90	5775	0,32	0,57	3220	0,60	2,00	-0,03	10	28,0	1,6	931	623	692	48,01	2993	0,32	0,30	3220	0,60	2,00	0,19	
	11	28,0	1,0	1428	996	1023	45,76	4997	0,35	0,49	3500	0,61	2,00	-0,03	11	28,0	1,0	727	487	541	47,99	2546	0,35	0,25	3500	0,62	2,00	0,19	
PP08	1	22,0	100,0	22346	18660	12294	33,38	22335	0,10	2,21	990	0,87	2,00	-0,08	1	22,0	100,0	15940	12105	10370	40,59	15930	0,10	1,59	999	0,87	2,00	0,15	
	2	22,0	63,1	18829	15580	10572	34,16	20650	0,11	2,04	1100	0,87	2,00	-0,08	2	22,0	63,1	12927	9700	8544	41,38	14160	0,11	1,41	1100	0,87	2,00	0,15	
	3	22,0	39,8	15805	12966	9038	34,88	19045	0,12	1,88	1200	0,87	2,00	-0,08	3	22,0	39,8	10442	7751	6997	42,08	12560	0,12	1,26	1200	0,87	2,00	0,15	
	4	22,0	25,1	13193	10723	7687	35,64	17395	0,13	1,72	1320	0,87	2,00	-0,07	4	22,0	25,1	8384	6155	5692	42,77	11035	0,13	1,10	1320	0,87	2,00	0,15	
	5	22,0	15,8	10968	8825	6513	36,43	15825	0,14	1,57	1440	0,87	2,00	-0,07	5	22,0	15,8	6709	4871	4614	43,45	9679	0,14	0,96	1440	0,88	2,00	0,15	
	6	22,0	10,0	9087	7233	5500	37,25	14365	0,16	1,42	1580	0,88	2,00	-0,07	6	22,0	10,0	5354	3844	3464	44,11	8465	0,16	0,84	1580	0,88	2,00	0,15	
	7	22,0	6,3	7501	5904	4627	38,09	12995	0,17	1,28	1730	0,88	2,00	-0,07	7	22,0	6,3	4259	3026	2997	44,73	7381	0,17	0,74	1730	0,89	2,00	0,15	
	8	22,0	4,0	6164	4794	3876	38,96	11705	0,19	1,16	1900	0,89	2,00	-0,07	8	22,0	4,0	3280	2378	2402	45,29	6419	0,19	0,64	1900	0,89	2,00	0,15	
	9	22,0	2,5	5045	3874	3232	39,84	10500	0,21	1,04	2080	0,90	2,00	-0,07	9	22,0	2,5	2676	1866	1919	45,80	5570	0,21	0,55	2080	0,90	2,00	0,15	
	10	22,0	1,6	4133	3117	2684	40,74	9383	0,23	0,93	2280	0,91	2,00	-0,07	10	22,0	1,6	2115	1463	1527	46,24	4824	0,23	0,48	2280	0,91	2,00	0,15	
	11	22,0	1,0	3340	2496	2219	41,64	8348	0,25	0,83	2500	0,92	2,00	-0,07	11	22,0	1,0	1670	1147	1213	46,59	4173	0,25	0,42	2500	0,92	2,00	0,15	
PP08	1	16,0	100,0	40410	35166	19908	29,52	40395	0,10	3,99	999	1,17	2,00	-0,16	1	16,0	100,0	30657	24857	18218	36,46	30649	0,10	3,05	999	1,17	2,00	0,08	
	2	16,0	63,1	34750	30024	17496	30,23	37375	0,11	3,70	1080	1,17	2,00	-0,16	2	16,0	63,1	25379	20193	15372	37,28	27259	0,11	2,72	1080	1,18	2,00	0,09	
	3	16,0	39,8	29697	25479	15255	30,91	34150	0,12	3,38	1150	1,17	2,00	-0,16	3	16,0	39,8	20697	16454	12883	38,06	24025	0,12	2,39	1150	1,18	2,00	0,09	
	4	16,0	25,1	25318	21555	13281	31,64	31190	0,12	3,09	1230	1,18	2,00	-0,16	4	16,0	25,1	17142	13350	10753	38,85	21115	0,12	2,10	1230	1,18	2,00	0,09	
	5	16,0	15,8	21508	18164	11518	32,38	28400	0,13	2,81	1320	1,18	2,00	-0,16	5	16,0	15,8	14612	10792	8936	39,63	18500	0,13	1,84	1320	1,18	2,00	0,08	
	6	16,0	10,0	18199	15236	9953	33,16	25740	0,14	2,55	1420	1,18	2,00	-0,16	6	16,0	10,0	11397	8680	7385	40,39	16120	0,14	1,61	1420	1,19	2,00	0,08	
	7	16,0	6,3	15339	12724	8567	33,95	23250	0,15	2,30	1520	1,19	2,00	-0,16	7	16,0	6,3	9440	6959	6079	41,14	14005	0,15	1,40	1520	1,19	2,00	0,09	
	8	16,0	4,0	12883	10581	7349	34,78	20930	0,16	2,07	1630	1,19	2,00	-0,16	8	16,0	4,0	7465	5559	4983	41,88	12125	0,16	1,21	1630	1,20	2,00	0,08	
	9	16,0	2,5	10776	8759	6277	35,63	18760	0,17	1,86	1740	1,20	2,00	-0,15	9	16,0	2,5	6011	4425	4068	42,60	10455	0,17	1,05	1740	1,20	2,00	0,08	
	10	16,0	1,6	8975	7214	5339	36,51	16750	0,19	1,66	1870	1,21	2,00	-0,15	10	16,0	1,6	4825	3514	3308	43,27	9004	0,19	0,90	1870	1,21	2,00	0,08	
	11	16,0	1,0	7449	5918	4524	37,40	14900	0,20	1,47	2000	1,22	2,00	-0,16	11	16,0	1,0	3862	2782	2678	43,91	7722	0,20	0,77	2000	1,23	2,00	0,08	
PP08	1	10,0	100,0	69986	63018	30444	25,79	69955	0,10	6,91	749	1,47	2,00	-0,33	1	10,0	100,0	57283	48507	30470	32,14	57250	0,10	5,70	749	1,48	2,00	-0,07	
	2	10,0	63,1	61275	54864	27288	26,45	63915	0																				

Meas.	A MEDIA														B MEDIA													
	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [nNm]	φ [μrad]	κ [h]	β [mm]	F _n [N]	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [nNm]	φ [μrad]	κ [h]	β [mm]	F _n [N]		
1	12.0	0.1	1124	588	959	58.55	11.24	0.10	0.01	883	0.15	1.75	-0.03	1	12.0	0.1	1640	1025	1280	51.31	1640	0.10	0.02	883	0.15	1.75	-0.05	
2	12.0	0.2	1595	875	1334	56.75	15.24	0.10	0.02	843	0.20	1.75	-0.03	2	12.0	0.2	2230	1449	1695	49.49	2130	0.10	0.03	843	0.20	1.75	-0.04	
3	12.0	0.3	2170	1238	1782	55.20	19.78	0.09	0.02	805	0.23	1.75	-0.03	3	12.0	0.3	2919	1953	2170	48.01	2662	0.09	0.03	805	0.23	1.75	-0.04	
4	12.0	0.4	2890	1710	2329	53.73	25.16	0.09	0.03	768	0.25	1.75	-0.03	4	12.0	0.4	3752	2575	2729	46.66	3268	0.09	0.04	768	0.25	1.75	-0.03	
5	12.0	0.6	3812	2332	3015	52.28	31.69	0.08	0.04	733	0.26	1.75	-0.03	5	12.0	0.6	4767	3350	3392	45.36	3964	0.08	0.05	733	0.26	1.75	-0.03	
6	12.0	1.0	4977	3145	3857	50.81	39.51	0.08	0.05	700	0.27	1.75	-0.02	6	12.0	1.0	6008	4316	4180	44.09	4770	0.08	0.06	700	0.27	1.75	-0.03	
7	12.0	1.6	6441	4197	4886	49.34	48.82	0.08	0.06	668	0.28	1.75	-0.02	7	12.0	1.6	7516	5508	5114	42.88	5697	0.08	0.07	668	0.28	1.75	-0.03	
8	12.0	2.5	8269	5245	6134	47.89	59.84	0.07	0.07	639	0.29	1.75	-0.02	8	12.0	2.5	9339	6972	6213	41.71	6759	0.07	0.08	639	0.29	1.75	-0.03	
9	12.0	4.0	10533	7528	7633	46.44	72.78	0.07	0.09	609	0.29	1.75	-0.02	9	12.0	4.0	11555	8762	7652	40.57	7971	0.07	0.10	609	0.29	1.75	-0.03	
10	12.0	6.3	13312	9411	9416	45.02	87.84	0.07	0.11	583	0.30	1.75	-0.02	10	12.0	6.3	14159	10927	9005	39.49	9342	0.07	0.11	583	0.30	1.75	-0.03	
11	12.0	10.0	16699	12093	11516	43.60	105.18	0.06	0.13	557	0.30	1.75	-0.02	11	12.0	10.0	17281	13533	10746	38.45	10890	0.06	0.13	557	0.30	1.75	-0.03	
12	12.0	15.8	20800	15414	13967	42.18	125.10	0.06	0.15	531	0.30	1.75	-0.02	12	12.0	15.8	20981	16661	12752	37.43	12625	0.06	0.15	531	0.30	1.75	-0.03	
13	12.0	25.1	25794	19513	16802	40.73	147.95	0.06	0.18	506	0.31	1.75	-0.02	13	12.0	25.1	25352	20403	15498	36.41	14566	0.06	0.18	506	0.31	1.75	-0.03	
14	12.0	39.8	31743	24599	20063	39.40	174.25	0.05	0.21	483	0.31	1.75	-0.02	14	12.0	39.8	30531	24888	17684	35.40	16755	0.05	0.21	483	0.31	1.75	-0.03	
15	12.0	63.1	39035	30955	23769	37.51	205.05	0.05	0.25	464	0.31	1.75	-0.02	15	12.0	63.1	38664	30285	20667	34.31	19265	0.05	0.24	464	0.31	1.75	-0.03	
16	12.0	100.0	48082	39125	27949	35.54	241.10	0.05	0.30	443	0.31	1.75	-0.02	16	12.0	100.0	43931	36789	24010	33.13	22025	0.05	0.27	443	0.31	1.75	-0.03	
1	6.0	0.1	3830	2358	3019	52.01	38.30	0.10	0.05	883	0.46	1.75	-0.06	1	6.0	0.1	4921	3495	3464	44.75	4921	0.10	0.06	883	0.46	1.75	-0.13	
2	6.0	0.2	5046	3223	3882	50.11	48.18	0.10	0.06	843	0.51	1.75	-0.03	2	6.0	0.2	6257	4557	4287	43.26	5975	0.10	0.07	843	0.51	1.75	-0.13	
3	6.0	0.3	6519	4306	4895	48.66	59.44	0.09	0.07	805	0.54	1.75	-0.03	3	6.0	0.3	7849	5841	5243	41.92	7156	0.09	0.09	805	0.54	1.75	-0.11	
4	6.0	0.4	8339	5662	6121	47.23	72.61	0.09	0.09	768	0.56	1.75	-0.04	4	6.0	0.4	9705	7363	6322	40.65	8451	0.09	0.10	768	0.56	1.75	-0.11	
5	6.0	0.6	10588	7387	7859	45.76	88.02	0.08	0.11	733	0.58	1.75	-0.03	5	6.0	0.6	11930	9210	7583	39.47	9917	0.08	0.12	733	0.58	1.75	-0.11	
6	6.0	1.0	13318	9537	9297	44.27	105.71	0.08	0.13	700	0.59	1.75	-0.04	6	6.0	1.0	14560	11423	9029	38.33	11560	0.08	0.14	700	0.59	1.75	-0.11	
7	6.0	1.6	16631	12197	11305	42.83	126.05	0.08	0.15	668	0.59	1.75	-0.04	7	6.0	1.6	17664	14069	10681	37.21	13390	0.08	0.16	668	0.59	1.75	-0.09	
8	6.0	2.5	20620	15461	13643	41.43	149.25	0.07	0.18	639	0.60	1.75	-0.04	8	6.0	2.5	21312	17203	12581	36.18	15425	0.07	0.19	639	0.60	1.75	-0.09	
9	6.0	4.0	25387	19440	16327	40.03	175.40	0.07	0.21	609	0.61	1.75	-0.04	9	6.0	4.0	25584	20915	14734	35.17	17680	0.07	0.22	609	0.61	1.75	-0.09	
10	6.0	6.3	31033	24231	19388	38.67	204.70	0.07	0.25	583	0.61	1.75	-0.03	10	6.0	6.3	30542	25262	17165	34.20	20150	0.07	0.25	583	0.61	1.75	-0.09	
11	6.0	10.0	37684	29960	22857	37.34	237.40	0.06	0.29	557	0.61	1.75	-0.02	11	6.0	10.0	36279	30334	19899	33.27	22855	0.06	0.28	557	0.61	1.75	-0.10	
12	6.0	15.8	45441	36751	26726	36.03	273.35	0.06	0.33	531	0.62	1.75	-0.02	12	6.0	15.8	42888	36240	22954	32.35	25800	0.06	0.32	531	0.62	1.75	-0.10	
13	6.0	25.1	54453	44763	31007	34.71	312.70	0.06	0.38	506	0.62	1.75	-0.02	13	6.0	25.1	50483	43067	26340	31.45	28995	0.06	0.36	506	0.62	1.75	-0.10	
14	6.0	39.8	64912	54213	35700	33.37	355.85	0.05	0.44	483	0.62	1.75	-0.02	14	6.0	39.8	59209	50998	30082	30.54	32480	0.05	0.40	483	0.62	1.75	-0.10	
15	6.0	63.1	77298	65681	40756	31.82	406.45	0.05	0.50	463	0.62	1.75	-0.01	15	6.0	63.1	69314	60289	34200	29.57	36425	0.05	0.45	463	0.62	1.75	-0.09	
16	6.0	100.0	91690	79068	46426	30.42	459.80	0.05	0.56	443	0.62	1.75	-0.01	16	6.0	100.0	80773	70886	38721	28.65	40500	0.05	0.50	443	0.62	1.75	-0.08	
1	0.0	0.1	11210	7868	7985	45.43	56.05	0.05	0.07	442	0.77	1.75	-0.21	1	0.0	0.1	12740	9903	8015	38.99	6370	0.05	0.08	442	0.78	1.75	-0.44	
2	0.0	0.2	14124	10190	9781	43.83	70.62	0.05	0.09	442	0.81	1.75	-0.16	2	0.0	0.2	15662	12431	9527	37.47	7831	0.05	0.10	442	0.82	1.75	-0.41	
3	0.0	0.3	17645	13101	11821	42.96	86.23	0.05	0.11	442	0.86	1.75	-0.17	3	0.0	0.3	18997	15320	11323	36.25	9495	0.05	0.12	442	0.84	1.75	-0.43	
4	0.0	0.4	21906	16594	14301	40.76	109.90	0.05	0.13	442	0.86	1.75	-0.22	4	0.0	0.4	22859	18886	13167	35.17	11340	0.05	0.14	442	0.86	1.75	-0.37	
5	0.0	0.6	26938	20898	18998	39.13	134.65	0.05	0.17	442	0.87	1.75	-0.11	5	0.0	0.6	27266	22886	15282	34.09	13630	0.05	0.17	442	0.87	1.75	-0.30	
6	0.0	1.0	32806	25953	20066	37.71	164.05	0.05	0.20	442	0.88	1.75	-0.11	6	0.0	1.0	32365	27117	17667	33.09	16180	0.05	0.20	442	0.88	1.75	-0.31	
7	0.0	1.6	39731	32002	23546	36.35	198.65	0.05	0.24	442	0.88	1.75	-0.22	7	0.0	1.6	38271	32424	20332	32.09	19135	0.05	0.23	442	0.88	1.75	-0.31	
8	0.0	2.5	47672	39506	27337	34.99	238.35	0.05	0.29	442	0.89	1.75	-0.21	8	0.0	2.5	44959	38477	23256	31.15	22475	0.05	0.28	442	0.89	1.75	-0.28	
9	0.0	4.0	56835	47278	31543	33.71	284.15	0.05	0.35	442	0.89	1.75	-0.21	9	0.0	4.0	52591	45433	26490	30.25	26295	0.05	0.32	442	0.89	1.75	-0.27	
10	0.0	6.3	67340	56829	36127	32.45	336.65	0.05	0.41	442	0.90	1.75	-0.21	10	0.0	6.3	61233	53363	30032	29.37	30615	0.05	0.37	442	0.90	1.75	-0.28	
11	0.0	10.0	79183	67723	41031	31.21	395.90	0.05	0.48	442	0.90	1.75	-0.20	11	0.0	10.0	70967	62367	33862	28.50	35480	0.05	0.43	442	0.90	1.75	-0.30	
12	0.0	15.8	92528	80135	46257	30.00	462.25	0.05	0.57	440	0.90	1.75	-0.11	12	0.0	15.8	81856	72498	38006	27.67	40900	0.05	0.50	440	0.90	1.75	-0.29	
13	0.0	25.1	107701	94397	51852	28.78	537.95	0.05	0.66	440	0.90	1.75	-0.18	13	0.0	25.1	93999	83887	42411	26.82	46905	0.05	0.57	440	0.90	1.75	-0.30	
14	0.0	39.8	124626	110494	57642	27.55	622.50	0.05	0.76	440	0.91	1.75	-0.17	14	0.0	39.8	107829	96945	47210	25.97	53855	0.05	0.66	440	0.91	1.75	-0.31	
15	0.0	63.1	143429	128671	63370	26.22	715.05	0.05	0.88	440	0.91	1.75	-0.15	15	0.0	63.1	123188	111760	51818	24.88	615							

ALLEGATO C

PPD4													PPD4														
16	-24,0	100,0	697537	691759	89598	7,38	175150	0,03	2,15	218	2,08	1,73	-2,48	16	-24,0	100,0	596985	589724	92223	8,95	149950	0,03	1,84	218	2,07	1,73	-2,15
1	-30,0	0,1	335846	319733	102778	17,82	33510	0,01	0,41	86	2,25	1,73	-3,16	1	-30,0	0,1	259897	246553	82208	18,44	25980	0,01	0,32	86	2,24	1,73	-1,49
2	-30,0	0,2	355199	340155	102278	16,74	35525	0,01	0,44	86	2,29	1,73	-4,52	2	-30,0	0,2	292664	275827	97838	19,53	29275	0,01	0,36	86	2,28	1,73	-1,49
3	-30,0	0,3	389909	373746	111099	16,56	38950	0,01	0,48	87	2,32	1,73	-5,23	3	-30,0	0,3	308601	296129	86847	16,35	30840	0,01	0,38	87	2,30	1,73	-2,06
4	-30,0	0,4	431714	416720	112791	15,15	43005	0,01	0,53	87	2,34	1,73	-4,06	4	-30,0	0,4	343016	331039	89848	15,19	34265	0,01	0,42	87	2,32	1,73	-2,66
5	-30,0	0,6	454244	442216	103843	13,22	45540	0,01	0,56	87	2,35	1,73	-4,32	5	-30,0	0,6	366393	353272	97175	15,38	36640	0,01	0,45	87	2,33	1,73	-3,40
6	-30,0	1,0	483285	469932	112821	13,50	48420	0,01	0,59	87	2,36	1,73	-3,90	6	-30,0	1,0	392358	379997	97708	14,42	39240	0,01	0,48	87	2,34	1,73	-3,18
7	-30,0	1,6	522542	510136	113188	12,51	52295	0,01	0,64	87	2,38	1,73	-3,72	7	-30,0	1,6	423411	411850	98268	13,42	42335	0,01	0,52	87	2,35	1,73	-3,30
8	-30,0	2,5	553479	543162	106367	11,08	55350	0,01	0,68	87	2,37	1,73	-3,70	8	-30,0	2,5	452639	441694	98933	12,63	45250	0,01	0,55	87	2,35	1,73	-3,42
9	-30,0	4,0	587789	578225	105603	10,35	58800	0,01	0,72	87	2,37	1,73	-3,76	9	-30,0	4,0	482195	471893	99142	11,87	48220	0,01	0,59	87	2,36	1,73	-3,59
10	-30,0	6,3	617019	608405	102740	9,59	61685	0,01	0,76	87	2,38	1,73	-3,55	10	-30,0	6,3	511571	501932	98839	11,14	51155	0,01	0,63	87	2,36	1,73	-3,83
11	-30,0	10,0	646482	638872	98903	8,80	64660	0,01	0,79	87	2,38	1,73	-3,68	11	-30,0	10,0	540768	531850	97805	10,42	54070	0,01	0,66	87	2,36	1,73	-3,82
12	-30,0	15,8	675029	668294	95112	8,10	67490	0,01	0,83	87	2,38	1,73	-3,68	12	-30,0	15,8	568341	560199	95857	9,71	56800	0,01	0,70	87	2,37	1,73	-3,72
13	-30,0	25,1	701524	695626	90778	7,44	70060	0,01	0,86	87	2,39	1,73	-3,62	13	-30,0	25,1	596231	588817	93734	9,05	59570	0,01	0,73	87	2,37	1,73	-3,95
14	-30,0	39,8	727499	722343	86454	6,83	72645	0,01	0,89	87	2,39	1,73	-2,87	14	-30,0	39,8	623090	616382	91184	8,42	62235	0,01	0,76	87	2,37	1,73	-4,10
15	-30,0	63,1	752987	748454	82498	6,29	75060	0,01	0,92	87	2,39	1,73	-2,60	15	-30,0	63,1	649462	643438	88254	7,81	64745	0,01	0,79	87	2,37	1,73	-4,14
16	-30,0	100,0	781811	777878	78328	5,75	78665	0,01	0,97	87	2,39	1,73	-2,35	16	-30,0	100,0	679328	673896	85730	7,25	68305	0,01	0,84	87	2,37	1,73	-4,17
1	-35,4	0,1	387388	374913	97518	14,58	38655	0,01	0,47	86	1,37	1,73	-1,50	1	-35,2	0,1	322236	307991	96040	17,34	32250	0,01	0,40	86	2,54	1,72	-1,26
2	-35,4	0,2	427830	414867	104515	14,14	42765	0,01	0,52	87	1,41	1,73	-1,33	2	-35,3	0,2	328270	309259	110092	19,60	32930	0,01	0,40	87	2,58	1,72	-0,82
3	-35,4	0,3	469875	454286	120028	14,80	46925	0,01	0,57	86	1,44	1,73	-1,84	3	-35,3	0,3	360159	349740	86002	13,82	36110	0,01	0,44	86	2,61	1,72	-0,62
4	-35,4	0,4	495356	482000	114251	13,34	49525	0,01	0,61	87	1,46	1,73	-2,35	4	-35,3	0,4	393968	379213	106806	15,73	39295	0,01	0,48	87	2,63	1,72	0,58
5	-35,4	0,6	517476	505818	109223	12,19	51805	0,01	0,63	87	1,47	1,73	-1,31	5	-35,3	0,6	432672	419975	104050	13,92	43295	0,01	0,53	87	2,64	1,72	0,67
6	-35,4	1,0	567384	555716	114476	11,04	56720	0,01	0,69	87	1,48	1,73	-1,59	6	-35,3	1,0	461649	450399	101295	12,68	46165	0,01	0,57	87	2,65	1,72	0,57
7	-35,4	1,6	593954	583704	109870	10,66	59395	0,01	0,73	87	1,49	1,73	-1,79	7	-35,3	1,6	491244	480784	100835	11,85	49095	0,01	0,60	87	2,65	1,72	0,32
8	-35,4	2,5	625715	617035	103865	9,56	62515	0,01	0,77	87	1,49	1,73	-2,08	8	-35,3	2,5	521337	511784	99342	10,99	52085	0,01	0,64	87	2,66	1,72	0,09
9	-35,4	4,0	655707	647839	101275	8,89	65555	0,01	0,80	87	1,50	1,73	-1,91	9	-35,3	4,0	548326	539387	98607	10,36	54835	0,01	0,67	87	2,66	1,72	0,29
10	-35,4	6,3	685132	678127	97720	8,20	68520	0,01	0,84	87	1,50	1,73	-1,74	10	-35,3	6,3	577810	569600	97057	9,67	57755	0,01	0,71	87	2,67	1,72	0,34
11	-35,4	10,0	711104	705052	92572	7,48	71075	0,01	0,87	87	1,50	1,73	-1,99	11	-35,3	10,0	609935	598491	94685	8,99	60565	0,01	0,74	87	2,67	1,72	0,30
12	-35,4	15,8	738163	732855	88361	6,88	73795	0,01	0,90	87	1,51	1,73	-2,16	12	-35,3	15,8	633634	626901	92125	8,36	63340	0,01	0,78	87	2,67	1,72	0,39
13	-35,4	25,1	762459	757855	83668	6,30	76140	0,01	0,93	87	1,51	1,73	-2,24	13	-35,3	25,1	659541	653509	88997	7,76	65900	0,01	0,81	87	2,67	1,72	0,47
14	-35,4	39,8	785787	781813	78931	5,77	78410	0,01	0,96	87	1,51	1,73	-2,46	14	-35,3	39,8	684744	679360	85703	7,19	68370	0,01	0,84	87	2,68	1,72	0,68
15	-35,4	63,1	809879	806384	75161	5,33	80785	0,01	0,99	87	1,51	1,73	-2,50	15	-35,3	63,1	709987	705152	82712	6,69	70785	0,01	0,87	87	2,68	1,72	0,80
16	-35,4	100,0	837283	834273	70935	4,86	84295	0,01	1,03	87	1,51	1,73	-2,47	16	-35,3	100,0	738357	734087	79294	6,17	74290	0,01	0,91	87	2,68	1,72	0,89

Meas.	C MEDIA														D MEDIA													
	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [nNm]	φ [μrad]	κ [h]	β [mm]	F _n [N]	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [nNm]	φ [μrad]	κ [h]	β [mm]	F _n [N]		
1	12.0	0.1	1570	938	1260	53.39	1570	0.10	0.02	883	0.15	1.75	-0.05	1	12.0	0.1	1602	883	1336	56.53	1602	0.10	0.02	883	0.15	1.75	-0.04	
2	12.0	0.2	2176	1362	1697	51.26	2078	0.10	0.03	843	0.20	1.75	-0.04	2	12.0	0.2	2233	1292	1821	54.63	2132	0.10	0.03	843	0.20	1.75	-0.04	
3	12.0	0.3	2874	1847	2201	50.00	2620	0.09	0.03	805	0.23	1.75	-0.03	3	12.0	0.3	2966	1799	2396	53.11	2372	0.09	0.03	805	0.23	1.75	-0.04	
4	12.0	0.4	3729	2472	2792	48.48	3247	0.09	0.04	768	0.25	1.75	-0.03	4	12.0	0.4	3944	2448	3093	51.65	3435	0.09	0.04	768	0.25	1.75	-0.03	
5	12.0	0.6	4790	3257	3513	47.17	3982	0.08	0.05	733	0.26	1.75	-0.03	5	12.0	0.6	5138	3288	3948	50.21	4272	0.08	0.05	733	0.26	1.75	-0.03	
6	12.0	1.0	6096	4246	4374	45.85	4839	0.08	0.06	700	0.27	1.75	-0.03	6	12.0	1.0	6642	4377	4995	48.78	5272	0.08	0.06	700	0.27	1.75	-0.03	
7	12.0	1.6	7692	5480	5398	44.57	5830	0.08	0.07	668	0.28	1.75	-0.03	7	12.0	1.6	8512	5764	6264	47.38	6452	0.08	0.06	668	0.28	1.75	-0.03	
8	12.0	2.5	9646	7018	6817	43.32	6981	0.07	0.09	639	0.29	1.75	-0.03	8	12.0	2.5	10825	7521	7785	45.99	7834	0.07	0.10	639	0.29	1.75	-0.03	
9	12.0	4.0	12014	8915	8054	42.10	8301	0.07	0.10	609	0.29	1.75	-0.02	9	12.0	4.0	13665	9727	9977	44.62	9442	0.07	0.12	609	0.29	1.75	-0.03	
10	12.0	6.3	14865	11231	9737	40.93	9809	0.07	0.12	583	0.30	1.75	-0.02	10	12.0	6.3	17120	12461	11739	43.29	11299	0.07	0.14	583	0.30	1.75	-0.03	
11	12.0	10.0	18275	14044	11694	39.79	11515	0.06	0.14	557	0.30	1.75	-0.02	11	12.0	10.0	21297	15829	14248	41.99	13419	0.06	0.16	557	0.30	1.75	-0.03	
12	12.0	15.8	22338	17440	13957	38.67	13440	0.06	0.16	531	0.30	1.75	-0.02	12	12.0	15.8	26318	19953	17162	40.70	15839	0.06	0.19	531	0.30	1.75	-0.03	
13	12.0	25.1	27148	21549	16551	37.57	15595	0.06	0.19	506	0.31	1.75	-0.02	13	12.0	25.1	32297	24948	20511	39.43	18566	0.06	0.23	506	0.31	1.75	-0.03	
14	12.0	39.8	32842	26409	19524	36.48	18025	0.06	0.22	483	0.31	1.75	-0.02	14	12.0	39.8	39411	30997	24340	38.14	21650	0.06	0.27	483	0.31	1.75	-0.03	
15	12.0	63.1	39538	32243	22884	35.37	20770	0.05	0.25	464	0.31	1.75	-0.02	15	12.0	63.1	47938	38278	28693	36.86	25130	0.05	0.31	464	0.31	1.75	-0.03	
16	12.0	100.0	47315	39094	28653	34.29	23725	0.05	0.29	453	0.31	1.75	-0.02	16	12.0	100.0	57603	46817	35664	35.64	28885	0.05	0.35	443	0.31	1.75	-0.03	
1	6.0	0.1	4893	3358	3561	46.70	4894	0.10	0.06	883	0.46	1.75	-0.11	1	6.0	0.1	5458	3542	4152	49.53	5458	0.10	0.07	883	0.46	1.75	-0.13	
2	6.0	0.2	6304	4458	4557	45.00	6020	0.10	0.07	843	0.51	1.75	-0.09	2	6.0	0.2	7136	4792	5288	47.82	6815	0.10	0.08	843	0.51	1.75	-0.11	
3	6.0	0.3	7963	5763	5495	43.64	7160	0.09	0.09	805	0.54	1.75	-0.07	3	6.0	0.3	9132	6319	6593	46.22	8326	0.09	0.10	805	0.54	1.75	-0.08	
4	6.0	0.4	9920	7321	6894	42.44	8638	0.09	0.11	768	0.56	1.75	-0.06	4	6.0	0.4	11539	8181	8138	44.85	10047	0.09	0.12	768	0.56	1.75	-0.09	
5	6.0	0.6	12262	9246	8053	41.06	10194	0.08	0.12	733	0.58	1.75	-0.07	5	6.0	0.6	14478	10520	9947	43.40	12035	0.08	0.15	733	0.57	1.75	-0.09	
6	6.0	1.0	15095	11886	9677	39.87	11985	0.08	0.15	700	0.59	1.75	-0.09	6	6.0	1.0	18022	13388	12065	42.03	14305	0.08	0.18	700	0.59	1.75	-0.09	
7	6.0	1.6	18449	14402	11530	38.68	13980	0.08	0.17	668	0.59	1.75	-0.08	7	6.0	1.6	22274	16893	14517	40.68	16880	0.08	0.21	668	0.59	1.75	-0.09	
8	6.0	2.5	22421	17777	13663	37.55	16225	0.07	0.20	639	0.60	1.75	-0.08	8	6.0	2.5	27343	21135	17348	39.38	19785	0.07	0.24	639	0.60	1.75	-0.09	
9	6.0	4.0	27105	21809	16096	36.43	18730	0.07	0.23	609	0.61	1.75	-0.08	9	6.0	4.0	33355	26250	20579	38.10	23650	0.07	0.28	609	0.61	1.75	-0.08	
10	6.0	6.3	32573	26564	18850	35.36	21490	0.07	0.26	583	0.61	1.75	-0.06	10	6.0	6.3	40033	32325	24235	36.86	26565	0.07	0.33	583	0.61	1.75	-0.08	
11	6.0	10.0	38928	32152	21945	34.32	24525	0.06	0.30	557	0.61	1.75	-0.06	11	6.0	10.0	48637	39527	28340	35.64	30640	0.06	0.38	557	0.61	1.75	-0.08	
12	6.0	15.8	46279	38683	25405	33.30	27835	0.06	0.34	531	0.62	1.75	-0.06	12	6.0	15.8	58187	47991	32903	34.44	35000	0.06	0.43	531	0.62	1.75	-0.08	
13	6.0	25.1	54712	46249	29232	32.30	31420	0.06	0.38	506	0.62	1.75	-0.09	13	6.0	25.1	69150	57830	37915	33.25	39700	0.06	0.49	506	0.62	1.75	-0.09	
14	6.0	39.8	64382	55029	33419	31.27	35305	0.05	0.43	483	0.62	1.75	-0.05	14	6.0	39.8	81690	69254	43325	32.03	44765	0.05	0.55	483	0.62	1.75	-0.09	
15	6.0	63.1	75561	65309	38003	30.20	39715	0.05	0.49	463	0.62	1.75	-0.06	15	6.0	63.1	96209	82875	48866	30.53	50610	0.05	0.62	463	0.62	1.75	-0.09	
16	6.0	100.0	88025	76790	43040	29.27	44145	0.05	0.54	443	0.62	1.75	-0.06	16	6.0	100.0	112360	97672	55542	29.63	56345	0.05	0.69	443	0.62	1.75	-0.09	
1	0.0	0.1	13143	10020	8505	40.33	6571	0.05	0.08	442	0.77	1.75	-0.41	1	0.0	0.1	18149	11877	10941	42.65	8074	0.05	0.10	442	0.77	1.75	-0.40	
2	0.0	0.2	16330	12704	10260	38.93	8165	0.05	0.10	442	0.82	1.75	-0.38	2	0.0	0.2	20222	15262	13267	41.00	10111	0.05	0.12	442	0.81	1.75	-0.38	
3	0.0	0.3	19328	15740	12212	37.83	9962	0.05	0.12	442	0.84	1.75	-0.35	3	0.0	0.3	24931	19191	15525	39.67	12465	0.05	0.15	442	0.84	1.75	-0.33	
4	0.0	0.4	24117	19336	14413	36.70	12055	0.05	0.15	442	0.86	1.75	-0.32	4	0.0	0.4	30447	23014	18846	38.24	15235	0.05	0.19	442	0.86	1.75	-0.31	
5	0.0	0.6	29022	23680	16779	35.32	14510	0.05	0.18	442	0.87	1.75	-0.27	5	0.0	0.6	36988	29528	22126	36.85	18445	0.05	0.23	442	0.87	1.75	-0.21	
6	0.0	1.0	34708	28587	19536	34.26	17359	0.05	0.21	442	0.88	1.75	-0.30	6	0.0	1.0	44407	36116	25838	35.58	22205	0.05	0.27	442	0.88	1.75	-0.32	
7	0.0	1.6	41247	34530	22561	33.16	20620	0.05	0.25	442	0.88	1.75	-0.33	7	0.0	1.6	53149	43909	29947	34.30	26575	0.05	0.33	442	0.88	1.75	-0.30	
8	0.0	2.5	48708	41248	25905	32.13	24350	0.05	0.30	442	0.89	1.75	-0.22	8	0.0	2.5	63119	52879	34465	33.10	31555	0.05	0.39	442	0.89	1.75	-0.29	
9	0.0	4.0	57296	49050	29612	31.12	28645	0.05	0.35	442	0.89	1.75	-0.23	9	0.0	4.0	74553	63290	39402	31.91	37275	0.05	0.46	442	0.89	1.75	-0.27	
10	0.0	6.3	66994	57943	33629	30.13	33500	0.05	0.41	442	0.90	1.75	-0.24	10	0.0	6.3	87520	75227	44729	30.74	43760	0.05	0.54	442	0.90	1.75	-0.27	
11	0.0	10.0	77923	68044	37974	29.17	38960	0.05	0.48	442	0.90	1.75	-0.16	11	0.0	10.0	102063	88756	50390	29.59	51020	0.05	0.62	442	0.90	1.75	-0.20	
12	0.0	15.8	90132	79422	42613	28.22	45030	0.05	0.55	440	0.90	1.75	-0.27	12	0.0	15.8	118279	104005	56329	28.44	59070	0.05	0.72	440	0.90	1.75	-0.31	
13	0.0	25.1	103920	92382	47590	27.26	51900	0.05	0.64	440	0.90	1.75	-0.24	13	0.0	25.1	136590	121326	62567	27.28	68205	0.05	0.84	440	0.90	1.75	-0.31	
14	0.0	39.8	119256	106911	52839	26.30	59565	0.05	0.73	440	0.91	1.75	-0.27	14	0.0	39.8	156503	140514	68913	26.13	78175	0.05	0.96	440	0.91	1.75	-0.30	
15	0.0	63.1	136125	123174	57948	25.20	67915	0.05	0.83	440	0.91	1.75	-0.28	15	0.0	63.1	176244	161844	75118	24.93	88835	0.05	1.09</					

ALLEGATO C

PPD4													PPD4														
16	-24,0	100,0	649406	642629	93578	8,29	163150	0,03	2,00	218	2,08	1,73	-3,47	16	-24,0	100,0	798901	794452	84201	6,05	200900	0,03	2,46	218	2,05	1,73	-3,78
1	-30,0	0,1	284543	268206	95029	19,51	28510	0,01	0,35	86	2,24	1,73	-2,64	1	-30,0	0,1	419390	400265	125205	17,37	41830	0,01	0,51	86	2,25	1,72	-1,94
2	-30,0	0,2	308354	291903	99372	18,80	30880	0,01	0,38	86	2,28	1,73	-2,81	2	-30,0	0,2	457637	441794	119371	15,12	45800	0,01	0,56	86	2,29	1,72	-1,88
3	-30,0	0,3	346687	328521	110751	18,63	34655	0,01	0,42	87	2,31	1,73	-2,67	3	-30,0	0,3	492344	479414	112093	13,16	49230	0,01	0,60	87	2,32	1,72	-2,85
4	-30,0	0,4	372055	360663	91362	14,22	37235	0,01	0,46	87	2,33	1,73	-0,55	4	-30,0	0,4	535875	521993	121183	13,07	53590	0,01	0,66	87	2,34	1,72	-2,34
5	-30,0	0,6	408325	394714	104546	14,84	40785	0,01	0,50	87	2,34	1,73	-1,24	5	-30,0	0,6	567250	553535	123983	12,63	56675	0,01	0,69	87	2,35	1,72	-3,28
6	-30,0	1,0	442178	429230	106224	13,90	44140	0,01	0,54	87	2,35	1,73	-2,03	6	-30,0	1,0	607420	596829	112934	10,72	60630	0,01	0,74	87	2,36	1,72	-3,58
7	-30,0	1,6	469287	456785	107601	13,26	46925	0,01	0,57	87	2,35	1,73	-2,17	7	-30,0	1,6	635784	625259	115208	10,44	63570	0,01	0,78	87	2,37	1,72	-3,72
8	-30,0	2,5	502035	490390	107505	12,37	50205	0,01	0,61	87	2,36	1,73	-2,17	8	-30,0	2,5	669411	660298	110081	9,47	66915	0,01	0,82	87	2,37	1,72	-4,11
9	-30,0	4,0	532136	521397	106364	11,53	53210	0,01	0,65	87	2,36	1,73	-1,92	9	-30,0	4,0	701940	693900	105934	8,68	70200	0,01	0,86	87	2,37	1,72	-4,28
10	-30,0	6,3	564763	554961	104761	10,69	56460	0,01	0,69	87	2,37	1,73	-1,50	10	-30,0	6,3	732309	725245	101475	7,97	73235	0,01	0,90	87	2,38	1,72	-4,11
11	-30,0	10,0	595028	586132	102507	9,92	59490	0,01	0,73	87	2,37	1,73	-1,15	11	-30,0	10,0	759281	753194	95952	7,26	75880	0,01	0,93	87	2,38	1,72	-4,08
12	-30,0	15,8	624548	616522	99800	9,20	62440	0,01	0,76	87	2,37	1,73	-1,03	12	-30,0	15,8	787129	781905	90639	6,61	78705	0,01	0,96	87	2,38	1,72	-3,87
13	-30,0	25,1	652871	645699	96500	8,50	65250	0,01	0,80	87	2,38	1,73	-1,04	13	-30,0	25,1	811396	806921	85096	6,02	81010	0,01	0,99	87	2,39	1,72	-3,62
14	-30,0	39,8	679934	673579	92748	7,84	67910	0,01	0,83	87	2,38	1,73	-1,15	14	-30,0	39,8	834654	830839	79708	5,48	83270	0,01	1,02	87	2,39	1,72	-3,50
15	-30,0	63,1	705774	700131	89068	7,25	70375	0,01	0,86	87	2,38	1,73	-1,31	15	-30,0	63,1	857474	854165	75256	5,04	85575	0,01	1,05	87	2,39	1,72	-3,56
16	-30,0	100,0	734508	729529	85377	6,68	72895	0,01	0,90	87	2,38	1,73	-1,46	16	-30,0	100,0	883000	880180	70508	4,58	88960	0,01	1,09	87	2,39	1,72	-3,60
1	-34,8	0,1	344331	326279	110027	18,64	34445	0,01	0,42	86	2,59	1,73	-1,75	1	-35,6	0,1	515854	499456	129029	14,49	51540	0,01	0,63	86	2,56	1,72	1,07
2	-34,8	0,2	382869	368504	103894	15,75	38260	0,01	0,47	87	2,60	1,73	0,33	2	-35,7	0,2	548708	534817	122686	12,92	54790	0,01	0,67	87	2,61	1,72	2,56
3	-34,7	0,3	406941	390783	113533	16,20	40720	0,01	0,50	86	2,62	1,73	-1,13	3	-35,8	0,3	589452	573666	135503	13,29	59140	0,01	0,72	86	2,64	1,72	0,60
4	-34,7	0,4	434337	421555	104598	13,94	43440	0,01	0,53	87	2,64	1,73	-0,52	4	-35,7	0,4	641986	631939	113134	10,15	63950	0,01	0,78	87	2,66	1,72	0,67
5	-34,7	0,6	466037	452135	112981	14,03	46600	0,01	0,57	87	2,65	1,73	-0,16	5	-35,7	0,6	655522	644587	119234	10,48	65500	0,01	0,80	87	2,67	1,72	0,61
6	-34,7	1,0	504863	492838	109530	12,53	50420	0,01	0,62	87	2,66	1,73	-0,30	6	-35,7	1,0	689345	679641	115258	9,63	68890	0,01	0,84	87	2,68	1,72	-0,01
7	-34,7	1,6	536194	524910	109420	11,78	53620	0,01	0,66	87	2,67	1,73	-0,56	7	-35,7	1,6	715191	707243	106329	8,55	71605	0,01	0,88	87	2,69	1,72	0,24
8	-34,7	2,5	567150	556964	107002	10,88	56730	0,01	0,69	87	2,67	1,73	-0,70	8	-35,7	2,5	751578	744810	100636	7,70	75060	0,01	0,92	87	2,69	1,72	0,00
9	-34,7	4,0	598291	588992	105075	10,12	59795	0,01	0,73	87	2,68	1,73	-1,25	9	-35,7	4,0	778961	772621	99181	7,32	77825	0,01	0,95	87	2,70	1,72	0,05
10	-34,7	6,3	628511	620152	102165	9,36	62865	0,01	0,77	87	2,68	1,73	-1,30	10	-35,6	6,3	806629	801316	92432	6,58	80710	0,01	0,99	87	2,70	1,72	0,24
11	-34,7	10,0	657428	649890	99273	8,69	65730	0,01	0,80	87	2,69	1,73	-1,30	11	-35,6	10,0	830657	826197	85962	5,94	83080	0,01	1,02	87	2,70	1,72	0,91
12	-34,7	15,8	685590	678910	95475	8,01	68530	0,01	0,84	87	2,69	1,73	-1,23	12	-35,6	15,8	853941	850172	80140	5,39	85255	0,01	1,05	87	2,70	1,72	0,97
13	-34,7	25,1	711997	706107	91394	7,38	71140	0,01	0,87	87	2,69	1,73	-1,27	13	-35,6	25,1	877731	874524	74973	4,90	87585	0,01	1,07	87	2,71	1,72	1,00
14	-34,7	39,8	737892	732740	87050	6,78	73670	0,01	0,90	87	2,69	1,73	-1,42	14	-35,6	39,8	897342	894619	69858	4,47	89535	0,01	1,10	87	2,71	1,72	0,90
15	-34,7	63,1	761893	757322	83342	6,28	76035	0,01	0,93	87	2,69	1,73	-1,35	15	-35,6	63,1	918200	915850	65649	4,10	91705	0,01	1,13	87	2,71	1,72	0,85
16	-34,7	100,0	789736	785762	79122	5,75	79510	0,01	0,97	87	2,69	1,73	-1,28	16	-35,6	100,0	941188	939205	61065	3,72	94905	0,01	1,17	87	2,71	1,72	0,88

Meas.	E MEDIA														F MEDIA													
	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	G ⁴ [kPa]	γ [%]	M [mNm]	φ [μrad]	ε [h]	δ [mm]	F _n [N]	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	G ⁴ [kPa]	γ [%]	M [mNm]	φ [μrad]	ε [h]	δ [mm]	F _n [N]				
1	12.0	0.1	6051	3944	4589	49.32	6051	0.10	0.07	883	0.15	1.75	-0.24	1	12.0	0.1	6722	5336	4088	37.46	6722	0.10	0.08	883	0.15	1.75	-0.36	
2	12.0	0.2	8181	5562	5999	47.17	7812	0.10	0.10	843	0.20	1.75	-0.19	2	12.0	0.2	8589	6990	4992	35.53	8203	0.10	0.10	843	0.20	1.75	-0.31	
3	12.0	0.3	10551	7406	9619	45.42	9619	0.09	0.12	805	0.23	1.75	-0.15	3	12.0	0.3	10549	8728	5924	34.17	9618	0.09	0.12	805	0.23	1.75	-0.21	
4	12.0	0.4	13310	9603	9217	43.83	11590	0.09	0.14	768	0.25	1.75	-0.13	4	12.0	0.4	12650	10611	6887	32.99	11015	0.09	0.14	768	0.25	1.75	-0.25	
5	12.0	0.6	16683	12327	11241	42.36	13865	0.08	0.17	733	0.26	1.75	-0.13	5	12.0	0.6	15011	12743	7935	31.91	12480	0.08	0.15	733	0.26	1.75	-0.24	
6	12.0	1.0	20676	15627	13539	40.91	16410	0.08	0.20	700	0.27	1.75	-0.13	6	12.0	1.0	17684	15174	9082	30.90	14035	0.08	0.17	700	0.27	1.75	-0.22	
7	12.0	1.6	25412	19600	16175	39.53	19260	0.08	0.24	668	0.28	1.75	-0.13	7	12.0	1.6	20704	17935	10344	29.98	15690	0.08	0.19	668	0.28	1.75	-0.22	
8	12.0	2.5	31021	24374	19188	38.21	22445	0.07	0.27	639	0.29	1.75	-0.13	8	12.0	2.5	24099	21051	11731	29.13	17440	0.07	0.21	639	0.29	1.75	-0.22	
9	12.0	4.0	37617	30076	22594	36.92	25995	0.07	0.32	609	0.29	1.75	-0.13	9	12.0	4.0	27937	24596	13274	28.31	19300	0.07	0.24	609	0.29	1.75	-0.22	
10	12.0	6.3	45297	36790	26426	35.69	29885	0.07	0.37	583	0.30	1.75	-0.12	10	12.0	6.3	32223	28569	14904	27.55	21255	0.07	0.26	583	0.30	1.75	-0.22	
11	12.0	10.0	54220	44695	30695	34.48	34160	0.06	0.42	557	0.30	1.75	-0.12	11	12.0	10.0	37027	33041	16712	26.83	23330	0.06	0.29	557	0.30	1.75	-0.21	
12	12.0	15.8	64848	53893	39408	33.31	38789	0.06	0.47	531	0.30	1.75	-0.12	12	12.0	15.8	42399	38057	18689	26.16	25500	0.06	0.31	531	0.30	1.75	-0.21	
13	12.0	25.1	78245	64525	46563	32.16	43755	0.06	0.54	506	0.31	1.75	-0.12	13	12.0	25.1	48400	43681	20844	25.51	27800	0.06	0.34	506	0.31	1.75	-0.21	
14	12.0	39.8	89577	75790	46122	30.99	49070	0.05	0.60	483	0.31	1.75	-0.12	14	12.0	39.8	55158	50043	23197	24.87	30265	0.05	0.37	483	0.31	1.75	-0.21	
15	12.0	63.1	104964	91370	51663	29.49	55175	0.05	0.68	454	0.31	1.75	-0.12	15	12.0	63.1	62867	57349	25756	24.19	33035	0.05	0.40	454	0.31	1.75	-0.21	
16	12.0	100.0	122325	107353	58640	28.65	61345	0.05	0.75	424	0.31	1.75	-0.12	16	12.0	100.0	71823	65681	28566	23.51	35910	0.05	0.44	424	0.31	1.75	-0.20	
1	6.0	0.1	18223	13513	12116	41.67	18225	0.10	0.22	883	0.46	1.75	-0.53	1	6.0	0.1	16420	13570	8630	31.71	16420	0.10	0.20	883	0.46	1.75	-0.68	
2	6.0	0.2	22785	17487	14606	39.87	21755	0.10	0.27	843	0.51	1.75	-0.43	2	6.0	0.2	19591	16897	9913	30.40	18710	0.10	0.23	843	0.51	1.75	-0.73	
3	6.0	0.3	28037	21960	17431	38.44	25560	0.09	0.31	805	0.54	1.75	-0.34	3	6.0	0.3	23048	20071	11330	29.45	21015	0.09	0.26	805	0.54	1.75	-0.60	
4	6.0	0.4	34003	27138	20487	37.05	29610	0.09	0.36	768	0.56	1.75	-0.35	4	6.0	0.4	28802	23591	12721	28.34	23340	0.09	0.29	768	0.56	1.75	-0.54	
5	6.0	0.6	40955	33251	23911	35.72	34050	0.08	0.42	733	0.57	1.75	-0.35	5	6.0	0.6	30990	27495	14298	27.48	25765	0.08	0.32	733	0.57	1.75	-0.60	
6	6.0	1.0	49024	40438	27715	34.43	38915	0.08	0.48	700	0.58	1.75	-0.35	6	6.0	1.0	35597	31819	15958	26.64	28255	0.08	0.35	700	0.58	1.75	-0.57	
7	6.0	1.6	58312	48771	31963	33.24	44190	0.08	0.54	668	0.59	1.75	-0.29	7	6.0	1.6	40731	36655	17759	25.85	30870	0.08	0.38	668	0.59	1.75	-0.52	
8	6.0	2.5	68912	58409	36569	32.05	49870	0.07	0.61	639	0.60	1.75	-0.31	8	6.0	2.5	46392	42001	19701	25.13	33575	0.07	0.41	639	0.60	1.75	-0.52	
9	6.0	4.0	80950	69471	41553	30.89	55935	0.07	0.68	609	0.60	1.75	-0.33	9	6.0	4.0	52675	47959	21785	24.43	36395	0.07	0.45	609	0.60	1.75	-0.51	
10	6.0	6.3	94511	82029	46941	29.78	62355	0.07	0.76	583	0.61	1.75	-0.35	10	6.0	6.3	59560	54501	24021	23.79	39295	0.07	0.48	583	0.61	1.75	-0.49	
11	6.0	10.0	109754	96289	52673	28.68	69140	0.06	0.85	557	0.61	1.75	-0.35	11	6.0	10.0	67149	61733	26420	23.17	42300	0.06	0.52	557	0.61	1.75	-0.49	
12	6.0	15.8	126722	112301	58710	27.60	76195	0.06	0.93	531	0.61	1.75	-0.35	12	6.0	15.8	75457	69666	28992	22.60	45385	0.06	0.56	531	0.61	1.75	-0.48	
13	6.0	25.1	145470	130153	64977	26.53	83390	0.06	1.02	506	0.61	1.75	-0.33	13	6.0	25.1	84564	78390	31719	22.03	48555	0.06	0.59	506	0.62	1.75	-0.48	
14	6.0	39.8	166180	150042	71438	25.46	90855	0.05	1.12	483	0.62	1.75	-0.33	14	6.0	39.8	94592	88025	34630	21.48	51865	0.05	0.64	483	0.62	1.75	-0.48	
15	6.0	63.1	188270	171698	77236	24.22	98130	0.05	1.21	463	0.62	1.75	-0.33	15	6.0	63.1	105910	98965	37022	20.87	55670	0.05	0.68	463	0.62	1.75	-0.45	
16	6.0	100.0	214531	197175	84530	23.21	107900	0.05	1.32	443	0.62	1.75	-0.32	16	6.0	100.0	118827	110882	41520	20.32	59250	0.05	0.73	443	0.62	1.75	-0.47	
1	0.0	0.1	46188	37679	26713	35.34	23095	0.05	0.28	442	0.77	1.75	-1.54	1	0.0	0.1	33772	29998	15513	27.35	16885	0.05	0.21	442	0.77	1.74	-1.83	
2	0.0	0.2	55788	46523	30787	33.50	27890	0.05	0.34	442	0.81	1.75	-1.63	2	0.0	0.2	39178	35069	17466	26.48	19590	0.05	0.24	442	0.81	1.74	-1.77	
3	0.0	0.3	66391	56137	35447	32.27	33195	0.05	0.41	442	0.84	1.75	-1.58	3	0.0	0.3	45231	40889	19337	25.31	22615	0.05	0.28	442	0.84	1.74	-1.65	
4	0.0	0.4	78220	67027	40187	30.92	39105	0.05	0.48	442	0.86	1.75	-1.41	4	0.0	0.4	51295	46667	21292	24.53	25645	0.05	0.31	442	0.86	1.74	-1.71	
5	0.0	0.6	91387	79338	45354	29.76	45695	0.05	0.56	442	0.86	1.75	-1.09	5	0.0	0.6	58191	53228	23287	23.59	28095	0.05	0.36	442	0.87	1.74	-1.63	
6	0.0	1.0	106263	93986	50704	28.50	53120	0.05	0.65	442	0.87	1.75	-1.11	6	0.0	1.0	65801	60375	25659	23.03	32800	0.05	0.40	442	0.88	1.74	-1.68	
7	0.0	1.6	127207	108931	56489	27.41	61345	0.05	0.75	442	0.88	1.75	-1.09	7	0.0	1.6	73732	68211	27996	22.32	36860	0.05	0.45	442	0.88	1.74	-1.67	
8	0.0	2.5	140665	126093	62347	26.31	70320	0.05	0.86	442	0.88	1.75	-1.11	8	0.0	2.5	82537	76706	30471	21.67	41265	0.05	0.51	442	0.89	1.74	-1.67	
9	0.0	4.0	164042	145131	68448	25.25	80225	0.05	0.98	442	0.89	1.75	-1.09	9	0.0	4.0	92048	85903	33070	21.06	46020	0.05	0.56	442	0.89	1.74	-1.62	
10	0.0	6.3	182051	166052	74627	24.20	91015	0.05	1.11	442	0.89	1.75	-1.11	10	0.0	6.3	102354	95890	35795	20.47	51175	0.05	0.63	442	0.90	1.74	-1.58	
11	0.0	10.0	205394	188842	80782	23.16	102635	0.05	1.26	442	0.89	1.75	-1.18	11	0.0	10.0	113455	106677	38627	19.91	56715	0.05	0.69	442	0.90	1.74	-1.56	
12	0.0	15.8	230668	213668	86914	22.14	115250	0.05	1.41	440	0.90	1.75	-1.12	12	0.0	15.8	125343	118241	41593	19.38	62610	0.05	0.77	440	0.90	1.74	-1.56	
13	0.0	25.1	257581	240303	92749	21.11	128750	0.05	1.58	440	0.90	1.75	-1.09	13	0.0	25.1	138296	130871	44705	18.86	69070	0.05	0.85	440	0.90	1.74	-1.54	
14	0.0	39.8	286191	268778	98306	20.09	143000	0.05	1.75	440	0.90	1.75	-1.09	14	0.0	39.8	152235	144490	47939	18.35	76025	0.05	0.93	440	0.91	1.74	-1.54	
15	0.0	63.1	316201	298839	103336	19.08	157550	0.05	1.93	440																		

ALLEGATO C

PPD4		PPD4																PPD4															
16	-24,0	100,0	1018121	1015505	72882	4,11	256400	0,03	3,14	218	2,10	1,72	-3,69	16	-24,0	100,0	605541	599582	84746	8,05	152250	0,03	1,87	218	2,08	1,72	-2,61						
1	-30,0	0,1	667143	651505	143600	12,43	66650	0,01	0,82	86	2,27	1,71	-1,97	1	-30,0	0,1	309440	299919	90472	17,00	30955	0,01	0,38	86	2,24	1,71	-2,92						
2	-30,0	0,2	701687	689521	130699	10,69	70100	0,01	0,86	86	2,31	1,71	-2,64	2	-30,0	0,2	342028	332909	78451	13,26	34175	0,01	0,42	86	2,29	1,71	-3,87						
3	-30,0	0,3	750986	742640	111651	8,55	74985	0,01	0,92	87	2,34	1,71	-2,84	3	-30,0	0,3	370628	362582	76805	11,96	36955	0,01	0,45	87	2,31	1,71	-3,89						
4	-30,0	0,4	785160	775792	120931	8,86	78315	0,01	0,96	87	2,35	1,71	-2,78	4	-30,0	0,4	395575	386830	82717	12,07	39490	0,01	0,48	87	2,33	1,71	-3,91						
5	-30,0	0,6	819796	811322	117564	8,25	81895	0,01	1,00	87	2,36	1,71	-3,38	5	-30,0	0,6	409422	402488	79033	10,56	40935	0,01	0,50	87	2,34	1,71	-2,98						
6	-30,0	1,0	852536	845077	112532	7,59	85170	0,01	1,04	87	2,37	1,71	-3,25	6	-30,0	1,0	436421	428684	81815	10,81	43650	0,01	0,53	87	2,35	1,71	-2,76						
7	-30,0	1,6	882907	876714	104387	6,79	88245	0,01	1,08	87	2,38	1,71	-3,23	7	-30,0	1,6	461061	453824	81370	10,17	46090	0,01	0,56	87	2,36	1,71	-3,26						
8	-30,0	2,5	913428	907806	101185	6,36	91300	0,01	1,12	87	2,39	1,71	-3,20	8	-30,0	2,5	485239	478273	81925	9,72	48510	0,01	0,59	87	2,36	1,71	-3,58						
9	-30,0	4,0	941641	936829	95077	5,80	94120	0,01	1,15	87	2,39	1,71	-3,24	9	-30,0	4,0	507971	501129	83096	9,42	50785	0,01	0,62	87	2,37	1,71	-4,03						
10	-30,0	6,3	967181	963038	89423	5,31	96730	0,01	1,19	87	2,39	1,71	-3,06	10	-30,0	6,3	532972	526504	82778	8,94	53285	0,01	0,65	87	2,37	1,71	-4,30						
11	-30,0	10,0	991688	988161	83326	4,82	99065	0,01	1,22	87	2,40	1,71	-3,11	11	-30,0	10,0	556087	549849	83059	8,59	55575	0,01	0,68	87	2,37	1,71	-4,27						
12	-30,0	15,8	1015642	1012656	77831	4,40	101500	0,01	1,24	87	2,40	1,71	-2,92	12	-30,0	15,8	581647	575672	83161	8,22	58130	0,01	0,71	87	2,37	1,71	-4,15						
13	-30,0	25,1	1034974	1032421	72647	4,03	103290	0,01	1,27	87	2,40	1,71	-2,84	13	-30,0	25,1	606006	600284	83033	7,88	60550	0,01	0,74	87	2,38	1,71	-4,32						
14	-30,0	39,8	1055363	1053181	67829	3,69	105350	0,01	1,29	87	2,40	1,71	-2,73	14	-30,0	39,8	629895	624398	83035	7,58	62910	0,01	0,77	87	2,38	1,71	-4,43						
15	-30,0	63,1	1075533	1073628	63973	3,41	107490	0,01	1,32	87	2,40	1,71	-2,65	15	-30,0	63,1	654870	649627	82701	7,26	65305	0,01	0,80	87	2,38	1,71	-4,52						
16	-30,0	100,0	1099111	1097477	59918	3,13	110890	0,01	1,36	87	2,40	1,71	-2,80	16	-30,0	100,0	683800	678761	82860	6,96	68780	0,01	0,84	87	2,38	1,71	-4,66						
1	-35,7	0,1	765600	754177	131761	9,91	76675	0,01	0,94	86	2,58	1,71	0,41	1	-35,4	0,1	382110	372562	84883	12,84	38170	0,01	0,47	86	2,55	1,71	-1,03						
2	-35,8	0,2	813704	800629	145283	10,29	81095	0,01	0,99	87	2,62	1,71	0,21	2	-35,5	0,2	401650	393670	79664	11,44	40090	0,01	0,49	87	2,59	1,71	-1,30						
3	-35,8	0,3	841319	832905	118688	8,11	84165	0,01	1,03	86	2,65	1,71	0,38	3	-35,5	0,3	427733	421130	74863	10,08	42700	0,01	0,52	86	2,61	1,71	-1,89						
4	-35,8	0,4	876646	868274	120869	7,99	87610	0,01	1,07	87	2,67	1,71	1,12	4	-35,5	0,4	452876	444563	86374	11,00	45375	0,01	0,56	87	2,64	1,71	-0,80						
5	-35,8	0,6	897103	891932	96186	6,16	89700	0,01	1,10	87	2,68	1,71	1,73	5	-35,5	0,6	474506	467102	83498	10,14	47460	0,01	0,58	87	2,65	1,71	-0,68						
6	-35,8	1,0	945370	939414	109953	6,44	94365	0,01	1,16	87	2,69	1,71	1,37	6	-35,5	1,0	498042	490125	88452	10,23	49785	0,01	0,61	87	2,66	1,71	-0,24						
7	-35,8	1,6	970491	965531	97990	5,80	97080	0,01	1,19	87	2,70	1,71	1,45	7	-35,5	1,6	522189	515355	84208	9,28	52170	0,01	0,64	87	2,66	1,71	0,04						
8	-35,8	2,5	993772	989729	89550	5,17	99385	0,01	1,22	87	2,70	1,71	1,27	8	-35,5	2,5	544897	538284	84630	8,94	54480	0,01	0,67	87	2,67	1,71	-0,19						
9	-35,8	4,0	1019031	1015553	84118	4,74	101920	0,01	1,25	87	2,71	1,71	1,18	9	-35,5	4,0	572641	566461	83900	8,43	57270	0,01	0,70	87	2,67	1,71	-0,41						
10	-35,8	6,3	1041124	1038213	77790	4,29	104100	0,01	1,27	87	2,71	1,71	1,04	10	-35,5	6,3	596947	591087	83440	8,04	59710	0,01	0,73	87	2,68	1,71	-0,37						
11	-35,8	10,0	1062696	1060222	72465	3,91	106290	0,01	1,30	87	2,71	1,71	1,04	11	-35,5	10,0	626026	614450	82968	7,69	61935	0,01	0,76	87	2,68	1,71	-0,69						
12	-35,8	15,8	1082070	1079970	67378	3,57	108100	0,01	1,33	87	2,72	1,71	1,10	12	-35,5	15,8	644518	639215	82509	7,36	64430	0,01	0,79	87	2,68	1,71	-0,85						
13	-35,8	25,1	1099927	1098147	62550	3,26	109850	0,01	1,35	87	2,72	1,71	1,13	13	-35,5	25,1	668425	663372	82039	7,09	66775	0,01	0,82	87	2,68	1,71	-0,95						
14	-35,8	39,8	1116736	1115226	58056	2,98	111550	0,01	1,37	87	2,72	1,71	1,12	14	-35,5	39,8	691740	686924	81485	6,77	69040	0,01	0,85	87	2,69	1,71	-0,84						
15	-35,8	63,1	1135869	1134532	55091	2,78	113590	0,01	1,39	87	2,72	1,71	1,11	15	-35,5	63,1	716141	711502	81380	6,53	71445	0,01	0,87	87	2,69	1,71	-0,78						
16	-35,8	100,0	1153966	1152828	51241	2,59	116400	0,01	1,43	87	2,72	1,71	1,06	16	-35,5	100,0	745411	741037	80633	6,21	74965	0,01	0,92	87	2,69	1,71	-0,58						

Meas.	G MEDIA													H MEDIA													
	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [mNm]	φ [μrad]	κ [h]	β [mm]	F _n [N]	T [°C]	ω [rad/s]	G ¹ [kPa]	G ² [kPa]	G ³ [kPa]	δ [°]	τ [Pa]	ν [%]	M [mNm]	φ [μrad]	κ [h]	β [mm]	F _n [N]	
1	12.0	0.1	5255	3940	3477	41.43	5255	0.10	0.06	883	0.15	1.75	-0.30	1	12.0	0.1	3298	2297	2366	45.83	3298	0.10	0.04	883	0.15	1.75	-0.13
2	12.0	0.2	6884	5307	4385	39.57	6574	0.10	0.08	843	0.20	1.75	-0.23	2	12.0	0.2	4354	3092	3066	44.76	4158	0.10	0.05	843	0.20	1.75	-0.10
3	12.0	0.3	8609	6763	5328	38.23	7850	0.09	0.10	805	0.23	1.75	-0.26	3	12.0	0.3	5561	3999	3865	44.02	5071	0.09	0.06	805	0.23	1.75	-0.10
4	12.0	0.4	10543	8414	6352	37.05	9180	0.09	0.11	768	0.25	1.75	-0.22	4	12.0	0.4	6996	5100	4789	43.20	6092	0.09	0.07	768	0.25	1.75	-0.08
5	12.0	0.6	12796	10356	7516	35.97	10635	0.08	0.13	733	0.26	1.75	-0.20	5	12.0	0.6	8748	6465	5893	42.35	7273	0.08	0.09	733	0.26	1.75	-0.08
6	12.0	1.0	15397	12624	8816	34.93	12220	0.08	0.15	700	0.27	1.75	-0.19	6	12.0	1.0	10881	8155	7204	41.46	8638	0.08	0.11	700	0.27	1.75	-0.07
7	12.0	1.6	18418	15270	10298	34.00	13960	0.08	0.17	668	0.28	1.75	-0.18	7	12.0	1.6	13438	10199	8751	40.63	10185	0.08	0.13	668	0.28	1.75	-0.07
8	12.0	2.5	21901	18343	11965	33.12	15850	0.07	0.19	639	0.29	1.75	-0.18	8	12.0	2.5	16529	12701	10578	39.79	11960	0.07	0.15	639	0.29	1.75	-0.07
9	12.0	4.0	25920	21920	13833	32.26	17910	0.07	0.22	609	0.29	1.75	-0.18	9	12.0	4.0	20238	15740	14271	38.95	13985	0.07	0.17	609	0.29	1.75	-0.07
10	12.0	6.3	30523	26037	15930	31.46	20140	0.07	0.25	583	0.30	1.75	-0.18	10	12.0	6.3	24660	19399	17524	38.13	16270	0.07	0.20	583	0.30	1.75	-0.07
11	12.0	10.0	35801	30783	18278	30.70	22555	0.06	0.28	557	0.30	1.75	-0.18	11	12.0	10.0	29920	23799	21834	37.31	18850	0.06	0.23	557	0.30	1.75	-0.07
12	12.0	15.8	41811	36222	20883	29.97	25190	0.06	0.31	531	0.30	1.75	-0.17	12	12.0	15.8	36153	29068	26497	36.49	21750	0.06	0.27	531	0.30	1.75	-0.07
13	12.0	25.1	48653	42443	23784	29.27	27940	0.06	0.34	506	0.31	1.75	-0.17	13	12.0	25.1	43501	35346	32557	35.65	24985	0.06	0.31	506	0.31	1.75	-0.07
14	12.0	39.8	56442	49570	26984	28.56	30955	0.05	0.38	483	0.31	1.75	-0.16	14	12.0	39.8	51271	42859	39756	34.78	28624	0.05	0.35	483	0.31	1.75	-0.07
15	12.0	63.1	65349	57774	30538	27.86	34335	0.05	0.42	464	0.31	1.75	-0.17	15	12.0	63.1	62492	51908	47959	33.84	32840	0.05	0.40	464	0.31	1.75	-0.07
16	12.0	100.0	75256	66922	34423	27.22	37735	0.05	0.46	443	0.31	1.75	-0.18	16	12.0	100.0	74582	62621	54011	32.90	37400	0.05	0.46	443	0.31	1.75	-0.06
1	6.0	0.1	13618	11031	7985	35.90	13620	0.10	0.17	883	0.46	1.75	-0.59	1	6.0	0.1	9089	6772	6062	41.83	9089	0.10	0.11	883	0.46	1.75	-0.29
2	6.0	0.2	16553	13759	9381	34.29	15900	0.10	0.19	843	0.51	1.75	-0.56	2	6.0	0.2	11402	8441	7440	40.73	10885	0.10	0.13	843	0.51	1.75	-0.26
3	6.0	0.3	19999	16723	10968	33.26	18235	0.09	0.22	805	0.54	1.75	-0.51	3	6.0	0.3	14100	10845	9121	39.73	12855	0.09	0.16	805	0.54	1.75	-0.25
4	6.0	0.4	23760	20093	12680	32.26	20690	0.09	0.25	768	0.56	1.75	-0.45	4	6.0	0.4	17277	13469	10820	38.78	15045	0.09	0.18	768	0.56	1.75	-0.21
5	6.0	0.6	28020	23921	14590	31.38	23295	0.08	0.29	733	0.57	1.75	-0.44	5	6.0	0.6	21048	16615	12922	37.88	17500	0.08	0.21	733	0.57	1.75	-0.21
6	6.0	1.0	32853	28326	16642	30.44	26075	0.08	0.32	700	0.58	1.75	-0.45	6	6.0	1.0	25521	20382	15359	37.00	20260	0.08	0.25	700	0.58	1.75	-0.20
7	6.0	1.6	38326	33316	18945	29.63	29045	0.08	0.36	668	0.59	1.75	-0.45	7	6.0	1.6	30769	24847	18149	36.15	23320	0.08	0.29	668	0.59	1.75	-0.21
8	6.0	2.5	44514	38985	21486	28.86	32215	0.07	0.39	639	0.60	1.75	-0.46	8	6.0	2.5	36955	30160	21355	35.30	26745	0.07	0.33	639	0.60	1.75	-0.21
9	6.0	4.0	51524	45448	24272	28.11	35600	0.07	0.44	609	0.60	1.75	-0.48	9	6.0	4.0	44202	36445	25011	34.46	30540	0.07	0.37	609	0.60	1.75	-0.20
10	6.0	6.3	59369	52706	27326	27.41	39170	0.07	0.48	583	0.61	1.75	-0.48	10	6.0	6.3	52614	43800	29150	33.65	34710	0.07	0.43	583	0.61	1.75	-0.18
11	6.0	10.0	68180	60905	30645	26.71	42950	0.06	0.53	557	0.61	1.75	-0.49	11	6.0	10.0	62403	52430	33841	32.84	39310	0.06	0.48	557	0.61	1.75	-0.18
12	6.0	15.8	78013	70088	34260	26.05	46920	0.06	0.57	531	0.61	1.75	-0.50	12	6.0	15.8	73678	62462	39076	32.03	44320	0.06	0.54	531	0.61	1.75	-0.19
13	6.0	25.1	88959	80363	38151	25.40	51070	0.06	0.63	506	0.62	1.75	-0.50	13	6.0	25.1	86628	74087	44899	31.22	49275	0.06	0.61	506	0.62	1.75	-0.18
14	6.0	39.8	101112	91828	42324	24.75	55410	0.05	0.68	483	0.62	1.75	-0.50	14	6.0	39.8	101436	87531	51262	30.36	55540	0.05	0.68	483	0.62	1.75	-0.17
15	6.0	63.1	114921	105010	46688	23.97	60430	0.05	0.74	463	0.62	1.75	-0.50	15	6.0	63.1	118499	103552	57612	29.09	62175	0.05	0.76	463	0.62	1.75	-0.18
16	6.0	100.0	129772	119027	51705	23.48	65080	0.05	0.80	443	0.62	1.75	-0.50	16	6.0	100.0	138356	121567	68028	28.52	69295	0.05	0.85	443	0.62	1.75	-0.19
1	0.0	0.1	30217	25871	15612	31.11	15105	0.05	0.19	442	0.77	1.75	-1.41	1	0.0	0.1	22672	18010	13772	37.41	11335	0.05	0.14	442	0.77	1.75	-0.72
2	0.0	0.2	35912	31137	17894	29.89	17955	0.05	0.22	442	0.81	1.75	-1.32	2	0.0	0.2	27734	22340	16435	36.34	13870	0.05	0.17	442	0.81	1.75	-0.64
3	0.0	0.3	41849	36551	20340	29.10	20915	0.05	0.26	442	0.86	1.75	-1.40	3	0.0	0.3	33512	27542	19377	35.33	16755	0.05	0.21	442	0.84	1.75	-0.58
4	0.0	0.4	48600	42992	23016	28.33	24445	0.05	0.30	442	0.86	1.75	-1.38	4	0.0	0.4	39983	32968	22592	34.41	19985	0.05	0.24	442	0.86	1.75	-0.63
5	0.0	0.6	56043	49762	25778	27.39	28020	0.05	0.34	442	0.87	1.75	-1.27	5	0.0	0.6	47596	39708	26242	33.46	23795	0.05	0.29	442	0.87	1.75	-0.61
6	0.0	1.0	64413	57622	28786	26.55	32205	0.05	0.39	442	0.88	1.75	-1.13	6	0.0	1.0	56416	47539	30396	32.60	28210	0.05	0.35	442	0.88	1.75	-0.64
7	0.0	1.6	73729	66382	32083	25.80	36860	0.05	0.45	442	0.88	1.75	-1.15	7	0.0	1.6	66609	56654	35031	31.73	33300	0.05	0.41	442	0.88	1.75	-0.64
8	0.0	2.5	83990	76068	35584	25.07	41990	0.05	0.51	442	0.89	1.75	-1.25	8	0.0	2.5	78224	67124	40165	30.90	39110	0.05	0.48	442	0.89	1.75	-0.63
9	0.0	4.0	95303	86802	39348	24.39	47650	0.05	0.58	442	0.89	1.75	-1.25	9	0.0	4.0	91496	79178	45852	30.08	45750	0.05	0.56	442	0.89	1.75	-0.63
10	0.0	6.3	107796	98694	43354	23.72	53895	0.05	0.66	442	0.90	1.75	-1.22	10	0.0	6.3	106500	92916	52046	29.26	53250	0.05	0.65	442	0.89	1.75	-0.66
11	0.0	10.0	121463	111757	47576	23.06	60715	0.05	0.74	442	0.90	1.75	-1.26	11	0.0	10.0	123440	108553	58768	28.43	61700	0.05	0.76	442	0.90	1.75	-0.66
12	0.0	15.8	136362	126032	52062	22.45	68095	0.05	0.83	440	0.90	1.75	-1.20	12	0.0	15.8	142393	121618	65981	27.61	71090	0.05	0.87	440	0.90	1.75	-0.65
13	0.0	25.1	152854	141903	56815	21.82	76370	0.05	0.93	440	0.90	1.75	-1.13	13	0.0	25.1	163952	146418	73769	26.74	81925	0.05	1.00	440	0.90	1.75	-0.63
14	0.0	39.8	170667	159106	61745	21.21	85245	0.05	1.05	440	0.90	1.75	-1.19	14	0.0	39.8	187733	168927	81899	25.87	93775	0.05	1.15	440	0.91	1.75	-0.62
15	0.0	63.1	189908	177859	66569	20.52	94685	0.05	1.16	440	0.91	1.75	-1.15	15	0.0</												

ALLEGATO C

PP04													PP04														
16	-24,0	100,0	778503	771040	107538	7,94	195300	0,03	2,39	218	2,08	1,72	-6,68	16	-24,0	100,0	1056632	1047141	141300	7,69	264550	0,03	3,24	218	2,10	1,73	-5,45
1	-30,0	0,1	389228	375343	103034	15,35	38855	0,01	0,48	86	2,25	1,71	-2,82	1	-30,0	0,1	522871	498478	157839	17,57	52060	0,01	0,64	86	2,26	1,72	-1,68
2	-30,0	0,2	419153	407392	98596	13,61	41890	0,01	0,51	86	2,29	1,71	-3,17	2	-30,0	0,2	550854	523550	171274	18,12	54965	0,01	0,67	86	2,31	1,72	-0,61
3	-30,0	0,3	451850	441250	97298	12,44	45180	0,01	0,55	87	2,32	1,71	-2,45	3	-30,0	0,3	596409	574144	161439	15,71	59660	0,01	0,73	87	2,34	1,72	-0,38
4	-30,0	0,4	481450	467432	115331	13,86	48135	0,01	0,59	87	2,33	1,71	-2,39	4	-30,0	0,4	645383	623406	166983	15,00	64540	0,01	0,79	87	2,35	1,72	-0,46
5	-30,0	0,6	518895	506585	112354	12,51	51865	0,01	0,64	87	2,35	1,71	-2,20	5	-30,0	0,6	705331	682197	179162	14,72	70420	0,01	0,86	87	2,37	1,72	-0,06
6	-30,0	1,0	555524	543152	116890	12,12	55505	0,01	0,68	87	2,35	1,71	-1,69	6	-30,0	1,0	753510	733497	172513	13,24	75250	0,01	0,92	87	2,38	1,72	-0,34
7	-30,0	1,6	591671	580313	115379	11,25	59165	0,01	0,72	87	2,36	1,71	-1,71	7	-30,0	1,6	797312	777606	176168	12,77	79640	0,01	0,97	87	2,38	1,72	-0,41
8	-30,0	2,5	625566	614638	116415	10,73	62535	0,01	0,77	87	2,37	1,71	-1,63	8	-30,0	2,5	844513	827618	168080	11,48	84460	0,01	1,04	87	2,39	1,72	-0,42
9	-30,0	4,0	660302	650080	115738	10,10	66005	0,01	0,81	87	2,37	1,71	-1,73	9	-30,0	4,0	897457	881954	166089	10,67	89760	0,01	1,10	87	2,39	1,72	-0,13
10	-30,0	6,3	693809	684294	114512	9,90	69385	0,01	0,85	87	2,37	1,71	-2,00	10	-30,0	6,3	942097	928265	166040	9,83	94150	0,01	1,15	87	2,40	1,72	-0,32
11	-30,0	10,0	726480	717654	112895	8,94	72630	0,01	0,89	87	2,38	1,71	-1,96	11	-30,0	10,0	991354	978767	157474	9,14	99185	0,01	1,22	87	2,40	1,72	-0,28
12	-30,0	15,8	759291	751174	110723	8,39	75880	0,01	0,93	87	2,38	1,71	-1,70	12	-30,0	15,8	1033376	1022303	150869	8,40	103250	0,01	1,27	87	2,41	1,72	-0,15
13	-30,0	25,1	791131	783708	108121	7,86	79050	0,01	0,97	87	2,38	1,71	-1,70	13	-30,0	25,1	1076788	1067003	144833	7,73	107600	0,01	1,32	87	2,41	1,72	-0,06
14	-30,0	39,8	822124	815369	105174	7,35	82090	0,01	1,00	87	2,39	1,71	-1,66	14	-30,0	39,8	1117461	1108904	138023	7,10	111600	0,01	1,37	87	2,41	1,72	-0,04
15	-30,0	63,1	852385	846176	102698	6,92	84965	0,01	1,04	87	2,39	1,71	-1,58	15	-30,0	63,1	1155513	1148086	130808	6,50	115200	0,01	1,41	87	2,41	1,72	-0,14
16	-30,0	100,0	885293	879733	99067	6,43	88900	0,01	1,09	87	2,39	1,71	-1,40	16	-30,0	100,0	1197980	1191406	125327	6,01	120150	0,01	1,47	87	2,41	1,72	-0,00
1	-35,3	0,1	456854	442372	114117	14,47	45775	0,01	0,56	86	2,59	1,71	-1,42	1	-35,3	0,1	601058	575767	172519	16,68	59930	0,01	0,73	86	2,58	1,72	-1,02
2	-35,4	0,2	495296	480678	119445	13,96	49515	0,01	0,61	87	2,59	1,71	-1,86	2	-35,3	0,2	649841	628368	165670	14,77	65005	0,01	0,80	87	2,63	1,72	-0,90
3	-35,4	0,3	536066	521817	122776	13,24	53595	0,01	0,66	86	2,62	1,71	-1,88	3	-35,3	0,3	748571	723081	193821	15,00	74650	0,01	0,91	86	2,66	1,72	-0,74
4	-35,4	0,4	568466	556453	116249	11,80	56785	0,01	0,70	87	2,64	1,71	-1,41	4	-35,3	0,4	795978	735731	188835	14,40	79545	0,01	0,93	87	2,68	1,72	-0,03
5	-35,4	0,6	604373	592739	118011	11,26	60455	0,01	0,74	87	2,65	1,71	-1,68	5	-35,3	0,6	815216	795567	177903	12,61	81550	0,01	1,00	87	2,69	1,72	-0,35
6	-35,4	1,0	639239	628279	117863	10,63	63870	0,01	0,78	87	2,66	1,71	-1,16	6	-35,3	1,0	876579	857534	181727	11,97	87410	0,01	1,07	87	2,70	1,72	-0,25
7	-35,3	1,6	675398	665362	116005	9,89	67590	0,01	0,83	87	2,66	1,71	-1,25	7	-35,3	1,6	918275	902649	168682	10,59	91825	0,01	1,13	87	2,70	1,72	-0,64
8	-35,3	2,5	710029	700484	116027	9,41	70945	0,01	0,87	87	2,67	1,71	-1,41	8	-35,3	2,5	965707	951572	164622	9,82	96470	0,01	1,18	87	2,71	1,72	-0,56
9	-35,3	4,0	740993	731991	115150	8,94	74155	0,01	0,91	87	2,67	1,71	-1,48	9	-35,3	4,0	1012895	1000480	158102	8,98	101300	0,01	1,24	87	2,71	1,72	-0,22
10	-35,3	6,3	775899	767792	111872	8,29	77560	0,01	0,95	87	2,68	1,71	-1,14	10	-35,3	6,3	1059664	1048324	154616	8,39	106050	0,01	1,30	87	2,72	1,72	-0,26
11	-35,3	10,0	807088	799726	108767	7,75	80675	0,01	0,99	87	2,68	1,71	-1,07	11	-35,3	10,0	1102294	1092303	148073	7,72	110250	0,01	1,35	87	2,72	1,72	-0,32
12	-35,3	15,8	839787	833100	105762	7,24	83970	0,01	1,03	87	2,68	1,71	-0,97	12	-35,3	15,8	1143644	1134936	140861	7,08	114250	0,01	1,40	87	2,73	1,72	-0,38
13	-35,3	25,1	869185	863160	102162	6,75	86800	0,01	1,06	87	2,69	1,71	-1,16	13	-35,3	25,1	1184003	1176427	133725	6,49	118300	0,01	1,45	87	2,73	1,72	-0,20
14	-35,3	39,8	898655	893190	98136	6,27	89720	0,01	1,10	87	2,69	1,71	-1,32	14	-35,3	39,8	1220330	1213800	126076	5,93	121900	0,01	1,49	87	2,73	1,72	-0,22
15	-35,3	63,1	927301	922455	94676	5,86	92410	0,01	1,13	87	2,69	1,71	-1,35	15	-35,3	63,1	1256396	1250768	118783	5,43	125250	0,01	1,53	87	2,73	1,72	-0,18
16	-35,3	100,0	958217	953886	91009	5,45	96345	0,01	1,18	87	2,69	1,71	-1,33	16	-35,3	100,0	1294113	1289188	112789	5,00	129950	0,01	1,59	87	2,73	1,72	-0,14