Politecnico di Torino

Politecnico di Torino

FACOLTÀ DI INGEGNERIA CIVILE
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Utilizzo di plastiche di recupero per la preparazione di bitumi modificati

Candidato:
Elisa Cappuccio

Relatore:
Davide Dalmazzo

Correlatori:
Lucia Tsantilis
Ezio Santagata

Anno Accademico 2020-2021

Indice

Elenco delle tabelle **iv**

Elenco delle figure **vi**

Introduzione **1**

1 Plastiche di recupero per le pavimentazioni stradali **5**

1.1 Introduzione 6

1.2 Plastiche di recupero 7

1.2.1 Analisi dei costi 13

1.3 Metodi d'impiego delle plastiche di recupero nel bitume 14

2 Bitumi ad uso stradale **17**

2.1 Leganti bituminosi 18

2.1.1 Processi produttivi 18

2.1.2 Composizione chimica 20

2.1.3 Struttura del bitume: modello colloidale 20

2.2 La reologia 22

2.2.1 Viscosità 22

2.2.1.1 Modelli per le curve di viscosità 26

2.2.2 Teoria della viscoelasticità 27

2.2.3 Modelli viscoelastici 30
2.2.4 Prove reologiche 35
2.2.4.1 Prove in regime continuo 35
2.2.4.2 Prove in regime oscillatorio 36
2.2.5 Principio di equivalenza tempo-temperatura 40
2.2.6 Curve Maestre 41
2.2.6.1 Modello analitico di Christensen e Anderson (CA) 42
2.2.6.2 Modello analitico di Christensen, Anderson e Marasteanu (CAM) 44
2.2.7 Misure reometriche 44
2.2.7.1 Sistema piatto-piatto 45
2.2.7.2 Sistema piatto-cono 46
2.2.7.3 Sistema cilindri concentrici 47

3 Indagine bibliografica 49

3.1 Bitumi modificati con plastiche di recupero 50
3.2 Polietilene di recupero per bitumi modificati 51
3.3 Preparazione dei bitumi modificati con plastiche di recupero . 52
3.4 Caratterizzazione reologica dei bitumi modificati con plastiche di recupero 54
3.5 Analisi dei costi 62

4 Indagine sperimentale 64

4.1 Materiali 65
4.1.1 Polietilene di recupero 65
4.1.1.1 Processo di macinazione 66
4.1.1.2 Analisi granulometrica 67

4.1.2 Bitume di base 72
4.1.3 Bitumi modificati con plastiche di recupero 72
4.2 Strumentazione 74
4.2.1 Miscelatore Silverson 74
4.2.2 Dispositivo automatico palla-anello 75
4.2.3 DSR (Dynamic Shear Rheometer) 76
4.3 Programma sperimentale 78
4.3.1 Temperatura di rammollimento 79
4.3.2 Viscosità 81
4.3.2.1 Protocollo 1 82
4.3.2.2 Protocollo 2 83
4.3.3 Frequency sweep 83
4.3.4 Stabilità allo stoccaggio mediante tube test 85

5 Analisi dei risultati **87**
5.1 Temperatura di rammollimento 88
5.2 Viscosità 90
5.2.1 Protocollo 1 91
5.2.1.1 Ripetibilità 91
5.2.1.2 Confronto dei leganti bituminosi 93
5.2.1.3 Confronto dei sistemi di misura 95
5.2.2 Protocollo 2 99
5.2.2.1 Ripetibilità 99
5.2.2.2 Confronto dei leganti bituminosi 101
5.2.2.3 Confronto dei sistemi di misura 103
5.2.3 Confronto dei due protocolli di prova 104
5.3 Curve maestre 112
5.3.1 Ripetibilità 112

5.3.2 Confronto dei leganti bituminosi 114
5.4 Stabilità allo stoccaggio 119

Conclusioni **121**

Bibliografia **124**

Elenco delle tabelle

1.1 Proprietà del Polietilene (PE) 7
1.2 Proprietà del Polietilene ad alta densità (HDPE) 8
1.3 Proprietà del Polietilene a bassa densità (LDPE) 8
1.4 Proprietà del Polipropilene (PP) 9
1.5 Proprietà del Polistirene (PS) 10
1.6 Proprietà dell'Etilene Vinil Acetato (EVA) 10
1.7 Proprietà dell' Acrilonitrile butadiene stirene (ABS) 11
1.8 Proprietà del Cloruro di Polivinile (PVC) 12
1.9 Proprietà del Polietilen Teleftalato (PET) 13
1.10 Analisi dei costi plastiche di recupero 13

3.1 Caratteristiche dei polimeri 51
3.2 Analisi dei costi 62

4.1 Programma sperimentale con relativo numero di ripetizioni . . 79

5.1 Temperatura di rammollimento 88
5.2 Temperatura di rammollimento per stabilità allo stoccaggio . . 89
5.3 Differenze percentuali 93
5.4 Correzione di Rabinowitsch per fluidi non Newtoniani 99
5.5 Viscosità reale e apparente media 99

5.6 Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 135 °C BIT 70/100 . . 107
5.7 Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 135 °C PLASTPD . . 108
5.8 Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 135 °C PLASTPT . . 108
5.9 Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 160 °C BIT 70/100 . . 109
5.10 Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 160 °C PLASTPD . . 109
5.11 Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 160 °C PLASTPT . . 110
5.12 Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 170 °C BIT 70/100 . . 110
5.13 Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 170 °C PLASTPD . . 111
5.14 Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 170 °C PLASTPT . . 111
5.15 Parametri ottimizzati modello CAM 116

Elenco delle figure

1.1 Formula di struttura del PE 7
1.2 Formula di struttura del PP 9
1.3 Formula di struttura PS 10
1.4 Formula di struttura EVA 10
1.5 Formula di struttura ABS 11
1.6 Formula di struttura PVC 12
1.7 Formula di struttura PET 12
1.8 Processo secco e umido 15

2.1 Processo di frazionamento del petrolio 19
2.2 Modello colloidale di Nellensteyn 21
2.3 Flusso laminare 22
2.4 Curve di flusso per diverse tipologie di fluido 24
2.5 Curve di flusso di un materiale tissotropico 25
2.6 Viscosità in un fluido tissotropico 26
2.7 Modello di Hooke 28
2.8 Modello di Hooke: diagramma tensioni e deformazioni 28
2.9 Modello di Newton 29
2.10 Modello di Newton: diagramma tensioni e deformazioni 29
2.11 Modello di Maxwell 31

2.12 Prova di creep 32
2.13 Prova di rilassamento 32
2.14 Modello di Kelvin-Voigt 33
2.15 Prova di creep 34
2.16 Prova di rilassamento 34
2.17 Modello di Burger 34
2.18 Prova di creep 35
2.19 prova di creep e rilassamento 36
2.20 Prove in regime oscillatorio: carico e deformazione sinusoidale 37
2.21 Deformazione in fase δ=0° (elastico) e fuori fase δ=90° (viscoso) 38
2.22 Modulo complesso 38
2.23 Piano di Cole-Cole 39
2.24 Piano di Black 40
2.25 Curva maestra e shift factors 41
2.26 Curva maestra in funzione del tempo e della temperatura . . . 41
2.27 modello CA 43
2.28 Sistema Piatti paralleli 45
2.29 Sistema Piatto cono 46
2.30 Sistema cilindri concentrici 47

3.1 Concentrazioni differenti di LDPE di recupero 53
3.2 Processo di miscelazione 53
3.3 Caratterizzazione meccanica bitumi modificati con plastiche di recupero 55
3.4 Modulo complesso bitumi modificati 56
3.5 Piano di black bitumi modificati 57
3.6 Angolo di fase in funzione della temperatura 57
3.7 Modulo di restituzione elastica bitumi modificati 58

3.8 Modulo di dissipazione elastica bitumi modificati 58
3.9 Viscosità bitumi modificati con PE e PP di recupero a diverse temperature 59
3.10 Viscosità in funzione della temperatura 60
3.11 Viscosità bitumi modificati con PE di recupero 60
3.12 Viscosità 135 °C 61
3.13 Viscosità a varie temperature dopo il test di stabilità allo stoccaggio 62

4.1 Plastiche di recupero (PE) 66
4.2 Plastiche di recupero macinate 67
4.3 Campionamento 68
4.4 Scacchiera di riferimento 68
4.5 Raddrizzamento immagine 69
4.6 Parametro di scala 69
4.7 Immagine scalata 70
4.8 Immagine binaria 8 bit 70
4.9 Curva granulometrica 71
4.10 Processo 73
4.11 Modifica del bitume 73
4.12 Colatura bitume in casseri di alluminio 73
4.13 Miscelatore Silverson 74
4.14 Maglie utilizzate per i processi di macinazione e miscelazione . 75
4.15 Strumentazione palla e anello 75
4.16 DSR 76
4.17 PP50 82
4.18 CP50 82
4.19 CC17 82

4.20 PP08 84
4.21 PP25 84
4.22 Casseri per prove PP08 e PP25 85
4.23 Tubo utilizzato per l'esecuzione della prova 86
4.24 Chiusura e contrassegno 86

5.1 Prova palla e anello utilizzando l'acqua come bagno termico . 89
5.2 Prova palla e anello utilizzando la glicerina come bagno termico 90
5.3 Ripetibilità BIT 70/100 92
5.4 Ripetibilità PLASTPT 92
5.5 Viscosità 135 °C con PP50, CP50, CC17 93
5.6 Viscosità 160 °C con PP50, CP50, CC17 94
5.7 Viscosità 170 °C con PP50, CP50, CC17 95
5.8 Viscosità 135 °C 96
5.9 Viscosità 160 °C 97
5.10 Viscosità 170 °C 97
5.11 Ripetizioni PP50 PLASTPT Protocollo2 99
5.12 Ripetizioni CP50 PLASTPT Protocollo2 100
5.13 Ripetizioni PP50 BIT 70/100 Protocollo2 100
5.14 Ripetizioni CP50 BIT 70/100 Protocollo2 101
5.15 Protocollo2 Viscosità PP50 102
5.16 Protocollo2 Viscosità CP50 102
5.17 Protocollo 2 PLASTPD 103
5.18 Protocollo 2 PLASTPT 103
5.19 Protocollo 2 bitume 70/100 104
5.20 Confronto protocolli 135 °C 105
5.21 Confronto protocolli 160 °C 105
5.22 Confronto protocolli 170 °C 106

5.23 Diagramma di Black BIT70/100 113
5.24 Diagramma di Black PLASTPD 113
5.25 Diagramma di Black PLASTPT 114
5.26 Diagramma di Black: confronto 115
5.27 Curva maestra bitume 70/100 116
5.28 Angolo di fase bitume 70/100 117
5.29 Curva maestra PLASTPD 117
5.30 Angolo di fase PLASTPD 118
5.31 Curva maestra PLASTPT 118
5.32 Angolo di fase PLASTPT 119
5.33 Viscosità 135 °C PP50 $\mathrm{PLASTPT_{Bottom}}$ e $\mathrm{PLASTPT_{Top}}$ 120
5.34 Campione $PLASTPT_{Bottom}$ e $PLASTPT_{Top}$ a fine prova . . . 120

Introduzione

INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni, in relazione alla crescita demografica e allo sviluppo tecnologico, si è assistito ad un incremento nella domanda dei trasposti, che ha portato ad un'esigenza sempre maggiore di implementare la costruzione di infrastrutture stradali. Le infrastrutture stradali sono ancora oggi il più comune sistema di trasporto sia per passeggeri che per trasporto merci. L' incremento della domanda provoca d'altra parte un rapido deterioramento della pavimentazione stradale, poiché i materiali bituminosi, se sottoposti a carichi ripetuti, quali il passaggio dei veicoli, subiscono un decremento di rigidezza e resistenza.
Una pavimentazione flessibile può presentare tre diverse tipologie di degrado, fessurazione per fatica, fessurazione termica e ormaiamento, dal momento che il bitume, è un materiale dipendente dalla velocità e dalla temperatura. Ad alte velocità e basse temperature si comporta come un solido elastico, a basse velocità ed alte temperature si comporta come un fluido viscoso e in condizioni ambientali normali con un fluido viscoelastico.
Nel campo della ricerca, per cercare di ridurre il deterioramento e gli effetti dovuti anche all'aumento del traffico, si cerca di migliorare le proprietà dei materiali di uso stradale [1].
Una metodologia è quella di modificare il bitume con polimeri, in modo tale da creare una matrice bituminosa che migliori le prestazioni della pavimentazione.

D'altra parte, la produzione mondiale di plastica è passata da 15 milioni nel 1964 ad oltre 310 milioni attuali [2]. La plastica è infatti il terzo materiale più utilizzato al mondo, dopo acciaio e cemento, basti pensare che viene utilizzata nella maggior parte dei settori sia domestici che industriali,

dalle bottiglie per acque minerali, alla farmacia, alla cosmetica, al settore edilizio. La tematica ambientale in relazione all'inquinamento della plastica è strettamente connessa alla gestione e allo smaltimento di tali rifiuti, dal momento che purtroppo l'80% finisce in discarica e solo il 10% della plastica mondiale viene riciclata [2].

La modifica del bitume con plastiche di recupero permette sia di risparmiare sul materiale, considerati anche gli alti costi del polimero vergine, sia di ridurre l'inquinamento ambientale.

Questo lavoro di tesi si pone come primo obiettivo quello di definire le proprietà e le caratteristiche reologiche di un bitume modificato con plastiche di recupero (PE). In secondo luogo pone l'attenzione sul confronto da un lato con il bitume tradizionale e dall'altro con un bitume modificato con gli stessi materiali di provenienza ma da un altro operatore presso un altro laboratorio universitario.

Il primo capitolo è dedicato alla contestualizzazione dell'utilizzo delle plastiche di recupero nelle pavimentazioni stradali, andando ad indagare da un lato sulle tipologie e le proprietà delle plastiche e dall'altro sulle metodologie di utilizzo, mentre il secondo pone le basi sulla teoria del comportamento reologico del bitume.

Il terzo capitolo ha come obiettivo, quello di presentare il panorama di ricerca nel quale si colloca la tesi, analizzando le caratteristiche reologiche dei bitumi modificati con plastiche di recupero e in particolare con il polietilene, polimero utilizzato in questo percorso di tesi.

Nel quarto capitolo, seguendo il protocollo di prova definito dal RILEM, viene descritto il programma sperimentale e vengono descritti i materiali testati, gli strumenti utilizzati e le diverse tipologie di prove effettuate.

Il quinto capitolo è dedicato all'analisi dei dati e al confronto tra i bitumi analizzati in relazione alla temperatura di rammollimento, alle curve maestre con le misure del modulo complesso e dell'angolo di fase e ai valori di viscosità. L'analisi verte sul confronto dei materiali, sui diversi sistemi di misura utilizzati e per la viscosità, anche sui diversi protocolli di prova.

Nell'ultima parte dell'elaborato, sono esposte, infine, le conclusioni tratte dall'indagine bibliografica e dalla sperimentazione effettuata.

Capitolo 1

Plastiche di recupero per le pavimentazioni stradali

1.1 Introduzione

L' idea di utilizzare plastiche di recupero per le pavimentazioni stradali si è diffuso, negli anni 2000, in India [3], per ridurre l'inquinamento ambientale dello smaltimento delle plastiche, per migliorare la qualità della pavimentazione e per la riduzione dei costi.
Le plastiche di recupero possono sostituire gli aggregati o essere utilizzate per la modifica dei bitumi per la costruzione di pavimentazioni flessibili, dal momento che nel campo della ricerca si cerca di incentivare le proprietà reologiche del bitume attraverso la modifica con polimeri sintetici.
La sperimentazione in laboratorio ha rivelato che l'aggiunta di una piccola percentuale (5%–10% del peso del bitume) di plastiche di recupero incentiva le caratteristiche prestazionali della pavimentazione, andando a migliorare la stabilità, la resistenza a fatica e la durabilità [4].
Il tasso di deterioramento delle pavimentazioni in cui si utilizzano plastiche di recupero risulta essere più basso rispetto alle pavimentazioni tradizionali [5], in cui l'aggiunta dell'8.0% in peso di plastica lavorata per la preparazione del bitume modificato, si traduce in un risparmio dello 0.4% di bitume in peso della miscela o circa il 9.6% di bitume per metro cubo di miscela BC.
In Ghana è stato condotto uno studio, in cui si è dimostrato che l'utilizzo di polietilene di recupero ad alta densità ha portato ad un aumento del punto di rammollimento del bitume e ad un miglioramento delle caratteristiche reologiche, quali la viscosità dinamica del legante [3].

1.2 Plastiche di recupero

Di seguito vengono presentate le tipologie di plastiche di recupero maggiormente utilizzate nel campo dell'ingegneria civile per la modifica dei bitumi. Le plastiche di recupero maggiormente utilizzate nelle pavimentazioni sono il Polietilene (PE), includendo il polietilene a bassa (LDPE) e alta densità (HDPE), il polipropilene (PP) e polietilene tereftalato (PET).

- PE: Polietilene

  Il polietilene è un polimero termoplastico. È una delle materie plastiche più comuni e possiede un'elevata resistenza agli agenti chimici, è altamente elastico, è resistente agli urti alle basse temperature (tabella 1.1). Per la sua elevata cristallinità è molto stabile chimicamente. Per la produzione industriale si utilizzano HDPE e LDPE [6].

  Viene utilizzato nella maggior parte dei settori, dai sacchetti di plastica ai tubi per il trasporto di acqua e gas.

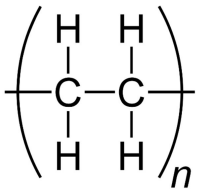


Figura 1.1: Formula di struttura del PE

Formula	Densità standard	T_m	T_g
$(C_2H_4)_n$	0.88–0.96 g/cm^3 (ISO 1183)	130–135 °C	−125 °C

Tabella 1.1: Proprietà del Polietilene (PE)

- HDPE: Polietilene ad alta densità

  Il polietilene ad alta densità è un polimero termoplastico prodotto dal monomero dell'etilene. L'HDPE è un materiale termoplastico parzialmente amorfo e parzialmente cristallino e il grado di cristallinità dipende dal peso molecolare, dalla quantità di comonomero presente e dal trattamento termico applicato (tabella 1.2). Ha proprietà meccaniche (rigidità, durezza e resistenza alla trazione) e resistenza chimica e termica migliori rispetto al polietilene a bassa densità, proprio in dipendenza della maggiore densità. È inoltre resistente alle basse temperature, impermeabile, inerte (al contenuto), con bassa stabilità dimensionale e atossico [7].

Formula	Densità standard	T_m	T_g
$(C_2H_4)_n$	0.94 g/cm^3 (ISO 1183)	125–135 °C	−130 °C

Tabella 1.2: Proprietà del Polietilene ad alta densità (HDPE)

- LDPE: Polietilene a bassa densità

  Il polietilene a bassa densità è un polimero termoplastico prodotto dal monomero dell'etilene. È prodotto da un processo ad alta pressione. La sua struttura è altamente ramificata e si presenta come un materiale semicristallino, non polare, morbido, resistente e flessibile (tabella 1.3). Per la sua elasticità, quando il prodotto è deformato può tornare alla sua forma originale [7].

Formula	Densità standard	T_m	T_g
$(C_2H_4)_n$	0.92 g/cm^3 (ISO 1183)	110 °C	−130 °C

Tabella 1.3: Proprietà del Polietilene a bassa densità (LDPE)

- PP: Polipropilene

  Il prolipropilene è un polimero termoplastico semicristallino,che a seconda della tatticità chimica presenta diverse proprietà meccaniche. Può essere utilizzato sia come plastica che come fibra (tabella 1.4). Questo materiale è caratterizzato da un elevato carico a rottura, elevata duttilità, bassa densità, ottima resistenza termica e all'abrasione [6].

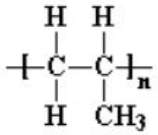


Figura 1.2: Formula di struttura del PP

Formula	Densità standard	T_m	T_g
$(C_3H_6)_n$	0.85–0.9 g/cm^3 (ISO 1183)	65–175 °C	−20 °C

Tabella 1.4: Proprietà del Polipropilene (PP)

- PS: Polistirene

  Il polistirene è un polimero aromatico termoplastico, ottenuto dalla polimerizzazione dello stirene. Può essere utilizzato sia come plastica che come fibra (tabella 1.5). Viene utilizzato come postirene espanso, molto utilizzato nell'imballaggio [7].

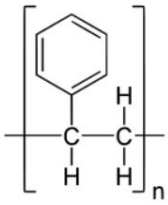


Figura 1.3: Formula di struttura PS

Formula	Densità standard	T_m	T_g
$(C_8H_8)_n$	1.050 g/cm^3 (ISO 1183)	70–100 °C	95 °C

Tabella 1.5: Proprietà del Polistirene (PS)

- EVA: Etilene Vinil Acetato

  L' etilene vinil acetato(EVA) è una materia plastica copolimerica di etilene e acetato di vinile (tabella 1.6). Si presenta come un polimero elastomerico con tenacità a bassa temperatura, proprietà impermeabili, resistenza alle radiazioni UV e resistenza alla trazione dovuta ad applicazioni elettriche [7].

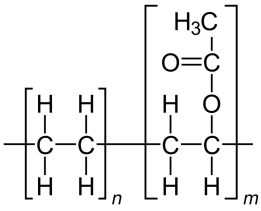


Figura 1.4: Formula di struttura EVA

Formula	Densità standard	T_m
$(C_2H_4)_n(C_4H_6O_2)_m$	0.93 g/cm^3 (ISO 1183)	112.5 °C

Tabella 1.6: Proprietà dell'Etilene Vinil Acetato (EVA)

- ABS: Acrilonitrile butadiene stirene

  L'acrilonitrile butadiene stirene è ottenuto dalla polimerizzazione del gruppo acrilonitrile-stirene con il butadiene È presente la fase continua di acrilonitrile-stirene (SAN) e la fase dispersa di gomma di butadiene. È un materiale termoplastico amorfo molto comune. È un terpolimero composto da: stirene 45-55%, butadiene 15-30% e acrilonitrile 25-35%. I blocchi di acrilonitrile forniscono rigidità, resistenza agli attacchi chimici, stabilità alle alte temperature e durezza (tabella 1.7). I blocchi di butadiene, che è un elastomero, forniscono tenacità a qualsiasi temperatura. Il blocco di stirene fornisce resistenza meccanica e rigidità [7].

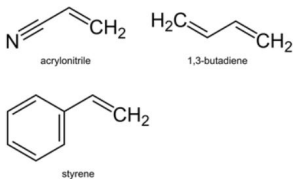


Figura 1.5: Formula di struttura ABS

Formula	Densità standard	T_m	T_g
$(C_8H_8)_x(C_4H_6)_y(C_3H_3N)_z$	1.07 g/cm^3 (ISO 1183)	200–280 °C	105 °C

Tabella 1.7: Proprietà dell' Acrilonitrile butadiene stirene (ABS)

- PVC: Cloruro di polivinile

  Il cloruro di polivinile (PVC) è il polimero del cloruro di vinile ed è una delle materie plastiche di maggior consumo al mondo. È un polimero ottenuto da due materie prime naturali cloruro di sodio o sale comune (NaCl) (57%) e petrolio o gas naturale (43%), proviene da materie rinnovabili (tabella 1.8). Le proprietà di questo materiale

termoplastico amorfo sono fortemente variabili a seconda degli additivi utilizzati [7].

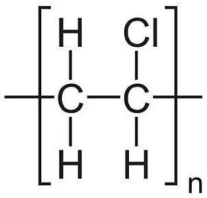


Figura 1.6: Formula di struttura PVC

Formula	Densità standard	T_m	T_g
$(CH_2CHCI)_n$	1.37–1.43 g/cm^3 (ISO 1183)	185–195 °C	81 °C

Tabella 1.8: Proprietà del Cloruro di Polivinile (PVC)

- PET: Polietilen Teleftalato

  PET è l'acronimo di polietilentereftalato una resina termoplastica, appartenente alla famiglia dei poliesteri, composta da ftalati, è ottenuto per condensazione dell'acido tereftalico con glicoletilenico (tabella 1.9). ll Polietilene tereftalato (PET) è un polimero termoplastico semicristallino con un tasso di cristallizzazione relativamente basso e può assumere una forma amorfa o semi-cristallina in base al tipo di processo produttivo e alle temperature di fusione [7].

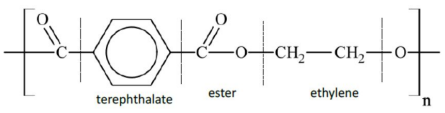


Figura 1.7: Formula di struttura PET

Formula	Densità standard	T_m	T_g
$(C_{10}H_8O_4)_n$	1.3–1.4 g/cm^3 (ISO 1183)	245–265 °C;	70–80 °C

Tabella 1.9: Proprietà del Polietilen Teleftalato (PET)

1.2.1 Analisi dei costi

Al giorno d'oggi, l'industria delle materie plastiche produce una quantità crescente di materiali polimerici di recupero. Per ragioni ambientali ed economiche è necessario che una gran parte di essi venga riciclata invece di essere smaltita nelle discariche. L'utilizzo di plastiche di recupero nei bitumi modificati riduce i costi anche del 30% rispetto ad un convenzionale bitume modificato e implementa la vita utile della pavimentazione [8, 9].
Di seguito vengono riportati i costi delle materie plastiche di recupero [6]:

Plastiche	costo materiale recupero	costo materiale vergine
PE	0.90 €/kg	2.20 €/kg
PP	0.90 €/kg	1.90 €/kg
PS	0.89 €/kg	3.00 €/kg
HDPE	1.20 €/kg	1.95 €/kg
LDPE	0.85 €/kg	1.85 €/kg
ABS	1.00 €/kg	2.80 €/kg
PVC	1.25 €/kg	2.75 €/kg
PET	0.55 €/kg	4.5 €/kg

Tabella 1.10: Analisi dei costi plastiche di recupero

1.3 Metodi d'impiego delle plastiche di recupero nel bitume

I metodi di inserimento delle plastiche di recupero nel conglomerato bituminoso sono principalmente due, processo umido e processo secco.

- **Processo umido**

  Nel processo umido le plastiche riciclate sono aggiunte al bitume come modificatori polimerici o in sostituzione del conglomerato bituminoso.
  Le plastiche di recupero vengono aggiunte direttamente al bitume, prima di aggiungere gli aggregati.
  In questo processo è necessaria una miscelazione uniforme di plastiche e bitume per ottenere un composto omogeneo e l'intervallo di temperature è compreso tra 155 °C e 165 °C.
  Le plastiche adatte per questo processo sono quelle con basso punto di fusione, come il polietilene (PE), il polietilene a bassa densità (LDPE) e il polietilene ad alta densità (HDPE) [10].
  In questo processo la percentuale di plastica aggiunta al bitume varia dal 2% all'8% in peso.

- **Processo secco**

  Nel processo a secco, la plastica viene aggiunta in sostituzione dell'aggregato direttamente nella miscela.
  Le plastiche subiscono un processo di macinazione fino a raggiungere una dimensione di 2–3 mm al fine di rivestire l'aggregato.
  In primo luogo le plastiche vengono aggiunte agli aggregati a 170 °C, e in seguito al bitume, anch'esso riscaldato a 160 °C.
  Questo processo è utilizzato per plastiche di recupero che hanno un

punto di fusione alto rispetto alla miscela, come polipropilene (PP), polietilen teleftalato (PET), polistirene (PS) [10].

Se per il processo a secco di utilizzano plastiche con un basso punto di fusione, bisogna scioglierli nella miscela con gli aggregati, in modo tale da avere degli aggregati plastificati con caratteristiche fisiche e chimiche migliori e la percentuale di plastiche varia dallo 0.2% all'1% in peso degli aggregati.

L'utilizzo di questo processo implica un miglioramento in vari parametri, come la stabilità Marshall e la resistenza alla trazione indiretta.

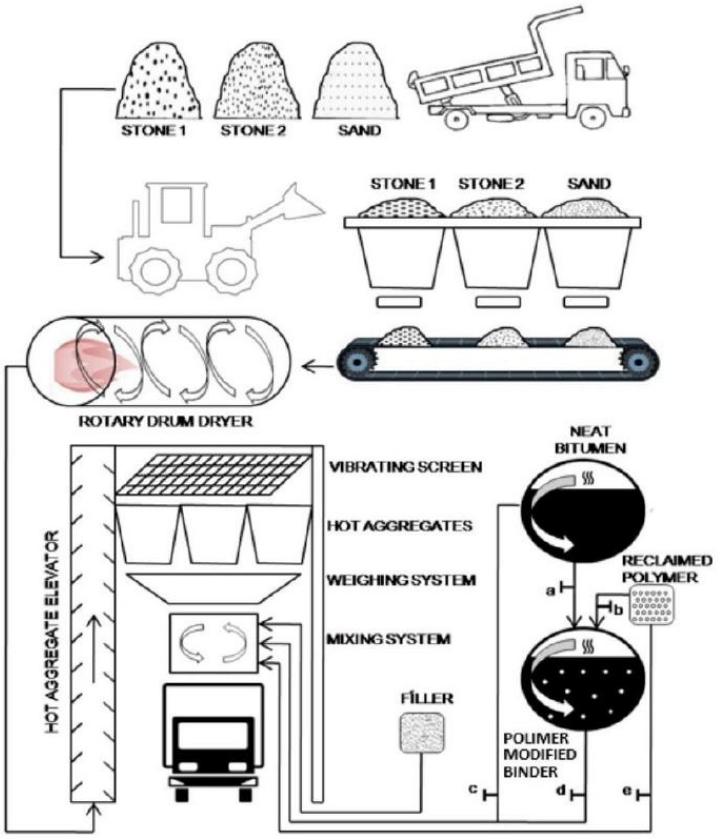


Figura 1.8: Processo secco e umido [4]

Nella figura (1.8) vengono analizzati i due processi. Nel processo secco le linee *a*, *b*, *d*sono aperte, mentre le linee *c* ed *e* sono chiuse, nel processo umido le linee *c* ed *e* sono aperte e *a*, *b*, *d* sono chiuse [4]. Il processo secco è maggiormente utilizzato per semplicità, costi e impatto ambientale, a differenza di quello umido che richiede dei macchinari più costosi e di difficile utilizzo [4].

In questo lavoro di tesi è stato utilizzato il processo umido e le plastiche sono state miscelate al bitume tradizionale.

Capitolo 2

Bitumi ad uso stradale

2.1 Leganti bituminosi

Il bitume (dal latino *bitumen-mĭnis*) è una miscela di idrocarburi paraffinici e aromatici, proveniente principalmente dalla raffinazione dalla distillazione del petrolio.
Il "catrame" e il "bitume" vengono utilizzati erroneamente come sinonimi, poiché presentano una composizione chimica di idrocarburi, ma i processi di trasformazione sono differenti, dal momento che il catrame proviene dalla distillazione distruttiva del carbon-fossile.
Il bitume viene utilizzato maggiormente per uso edilizio nelle pavimentazioni stradali o come impermeabilizzante di superfici, poiché è un materiale idrofobo e non volatile a temperatura ambiente.
Il bitume si può trovare in natura, soprattutto nei laghi neri delle Bermuda e in Venezuela, nell'isola di Trinidad, dove è presente il giacimento più importante di bitume, sotto forma di lago.
I bitumi artificiali, proviene invece, da un processo chimico di raffinazione del petrolio greggio.

2.1.1 Processi produttivi

La produzione del bitume può avvenire attraverso processi produttivi differenti.

- **Distillazione frazionata**: il petrolio viene frazionato a pressione atmosferica e a 300–350 °C in modo tale da separare i gas, il cherosene, la nafta e il gasolio. In seguito viene eseguita una seconda distillazione sottovuoto e il bitume stradale è residuo proveniente da questo processo.

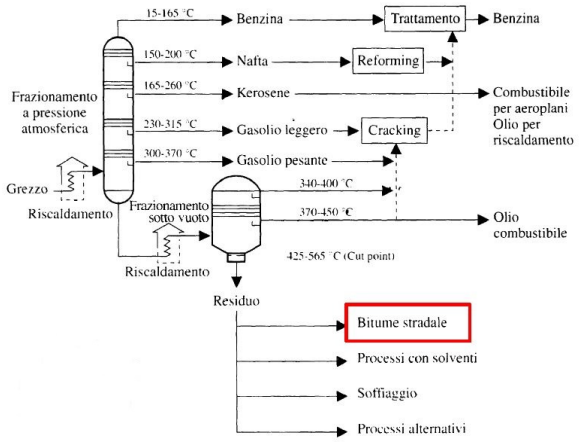


Figura 2.1: Processo di frazionamento del petrolio

- **Ossidazione**: il petrolio ridotto viene fatto passare attraverso un flusso d'aria ad alte temperature (240–320 °C) per un determinato periodo di tempo. Questo processo viene utilizzato maggiormente per le impermeabilizzazione, poiché avvengono dei processi chimici, come la polimerizzazione, che modificano la struttura e quindi le proprietà del bitume.

- **Trattamento termico**: in questo processo si utilizzato temperature e pressioni elevate, in modo tale da avere un minore scarto di prodotto. Nel campo stradale, il trattamento termico maggiormente utilizzato è il *visbreaking*, in cui è presente un forno e una colonna di frazionamento a 400–450 °C, nonostante tale processo abbatta la viscosità del bitume per produrre una maggiore quantità di gas.

- **Produzione per sintesi**: vengono miscelati residui di propano deasfaltati con solventi selettivi o con residui di distillazione pesanti, in modo tale da ottenere, in relazione ai quantitativi utilizzati diverse tipologie di bitume.

2.1.2 Composizione chimica

Il bitume può essere descritto come una miscela idrocarbica, composta principalmente da carbonio e idrogeno, con piccole quantità di eteroatomi di zolfo, ossigeno, azoto e atomi metallici.

- Carbonio (circa 80%)
- Idrogeno (10–14%)
- Zolfo (0–6%)
- Ossigeno (0–1.5%)
- Azoto (0–1%)

Gli idrocarburi presenti nel petrolio sono legati alle catene idrocarburiche che li compongono, e possiamo distinguere nel bitume tre classi più note:

- paraffine (alcani): sono degli idrocarburi saturi con struttura chimica semplice, a catena aperta lineare o ramificata, e sono i più numerosi nel petrolio;
- aromatici: idrocarburi insaturi a catena chiusa;
- nafteni (cicloalcani): idrocarburi saturi a catena chiusa e sono presenti in piccole quantità nel bitume;
- resine ed asfalteni: catene idrocarburiche che contengono eteroatomi come ossigeno (O), azoto (N) e zolfo (S).

2.1.3 Struttura del bitume: modello colloidale

Nellensteyn (1924) ha proposto una prima definizione della struttura del bitume, come modello colloidale, in cui gli asfaltemi si presentano come delle

micelle avvolte dalle resine, che fungono da peptizzanti ed evitanto agli asfaltemi di disperdersi e non flocculare. Tali micelle sono immerse in un mezzo oleoso costituito da idrocarburi saturi ed aromatici.

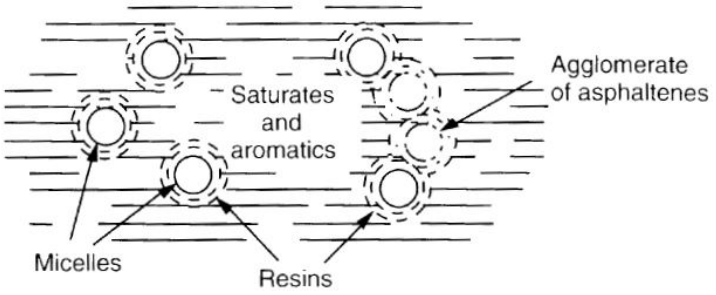


Figura 2.2: Modello colloidale di Nellensteyn

Il comportamento del bitume dipende dalle percentuali dei componenti, Gaestel ha definito un indice di instabilità colloidale, definito come il rapporto tra asfaltemi e oli saluti e aromatici e resine

$$I_c = \frac{A_s + S}{R + A_r}$$

Se l'indice risulta alto il sistema si comporta come un sistema "sol", se è basso come un sistema "gel". Nel sistema "sol" le resine sono presenti in quantità tali da mantenere gli asfalteni sono altamente disperso nella fase oleosa e il bitume si comporta come un fluido Newtoniano, in cui una dispersione di sfere indeformabili sono disperse in un liquido perfettamente viscoso.
Nel sistema "gel" le resine non sono riescono a peptizzare gli asfalteni, che tendono a reticolare fra loro con conseguente separazione delle fasi. In questo caso il bitume si comporta come un fluido non Newtoniano.
Al fine di poter analizzare i quantitativi, il metodo più utilizzato è l'analisi S.A.R.A., che consente di dividere il bitume in gruppi molecolari con proprietà simili.

2.2 La reologia

Il termine *reologia* deriva dal greco $\rho\varepsilon\omega$, scorrere, e -$\lambda o\gamma\iota\alpha$, ossia discorso, teoria ed è la scienza che studia i fenomeni connessi al flusso e alla deformazione dei materiali viscoelastici, caratterizzati da tempo-dipendenza, ossia quei materiali che non seguono le teorie sull'elasticità e la viscosità.
Il bitume è un materiale viscoelastico, il cui comportamento dipende principalmente da tre caratteristiche:

- tempo di carico o frequenza di carico;
- temperatura;
- invecchiamento.

2.2.1 Viscosità

Dopo aver definito le proprietà viscoelastiche, l'altra branchia principale della reologia, è dedicata al calcolo della viscosità del materiale.
"La viscosità è una proprietà della materia per la quale le particelle di un corpo (tipicamente di un fluido) incontrano resistenza nello scorrere le une rispetto alle altre" [13].

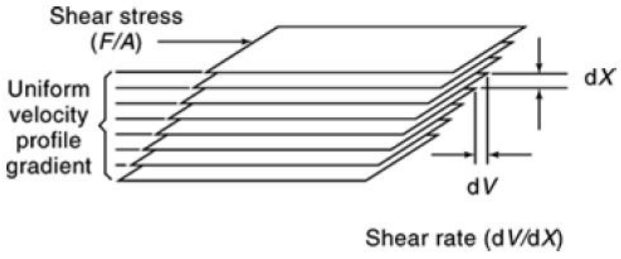


Figura 2.3: Flusso laminare [14]

Lo smorzatore viscoso di Newton è il modello che definisce la variabile η come viscosità dinamica [Pa $\cdot$ s] per i fluidi Newtoniani.
Dall'equazione (2.1) la velocità di deformazione $\mathrm{d}\epsilon/\mathrm{d}t$ dipende in modo lineare dallo sforzo applicato σ attraverso la viscosità η.

$$F = \eta \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \tag{2.1}$$

Bisogna considerare che in base alle diverse tipologie di fluidi, la viscosità dinamica dipende dalla pressione, dalla struttura chimica, storia reologica, gradiente della velocità di scorrimento, dalla temperatura.
Per i fluidi Newtoniani la viscosità è costante e varia solo al variare della temperatura, come definito dalla legge di Arrhenius.

$$\eta = Ae^{-E/T} \tag{2.2}$$

La viscosità è rappresentata dalla pendenza della retta tra lo sofrzo tangenziale e il gradiente della velocità di scorrimento.
Nei fluidi non Newtoniani la viscosità, definita come viscosità apparente, non dipende solo dalla temperatura, ma anche dalla velocità di scorrimento.
La legge di Newton (2.1) si può esprimere come:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \tag{2.3}$$

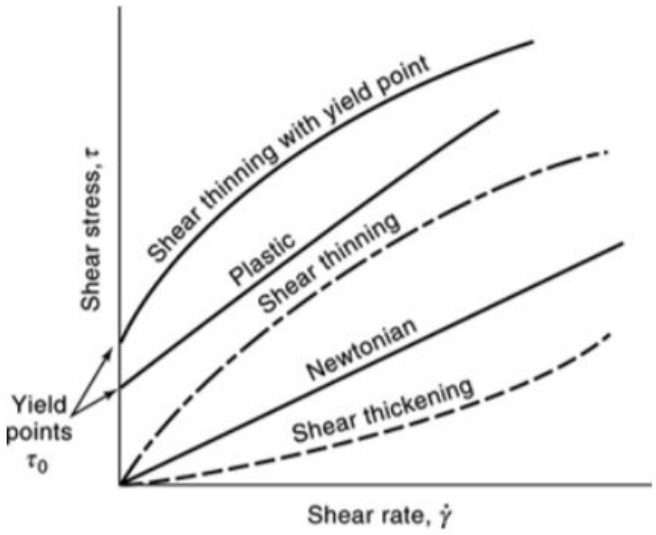


Figura 2.4: Curve di flusso per diverse tipologie di fluido [14]

- **Fluidi pseudoplastici (shear thinning)**

  I fluidi che presentano un comportamento pseudoplastico (*shear-thinning*), sono definiti da una viscosità che si riduce all'aumentare della velocità di scorrimento.

  La diminuzione della viscosità dall'aggregazione delle particelle che con l'aumentare della velocità di scorrimento, tengono a modificare la loro struttura, fino a disaggregarsi.

  All'inizio la viscosità sarà elevata, ma dopo una certa soglia, con il disgregarsi delle particelle, la viscosità tenderà a diminuire.

  Tale comportamento è tipico dei sistemi polimerici e sistemi eterofasici.

- **Fluidi dilatanti (shear thickening)**

  In questo tipo di fluidi la viscosità aumenta aumentando la la velocità di scorrimento.

  Questo comportamento è tipico delle sospensioni di solidi in liquidi, in

cui all'aumentare della velocità di scorrimento il liquido, non riuscendo più a bagnare tutte le particelle, provoca un maggiore attrito e di conseguenza la viscosità aumenta.

- **Fluidi tissotropici**

  I fluidi tissotropici sono legati al fenomeno della tempo-dipendenza [19].

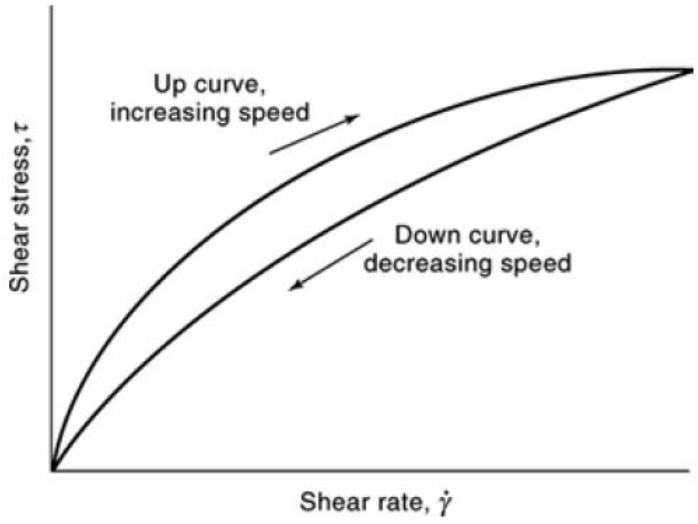


Figura 2.5: Curve di flusso di un materiale tissotropico [14]

L'equazione costitutiva che tiene conto della tissotropia considera un legame tra lo sforzo di taglio τ e la deformazione γ.

$$\tau = g(\gamma) + h(\dot{\gamma}) \tag{2.4}$$

dove g e h rappresentano il modulo di elasticità tangenziale e la viscosità, entrambi dipendenti da un parametro λ legato al potenziale.

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t} = k^*(\lambda, \dot{\gamma}) \tag{2.5}$$

Quando si raggiunge l'equilibrio il comportamento è definito ponendo

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t} = 0 \tag{2.6}$$

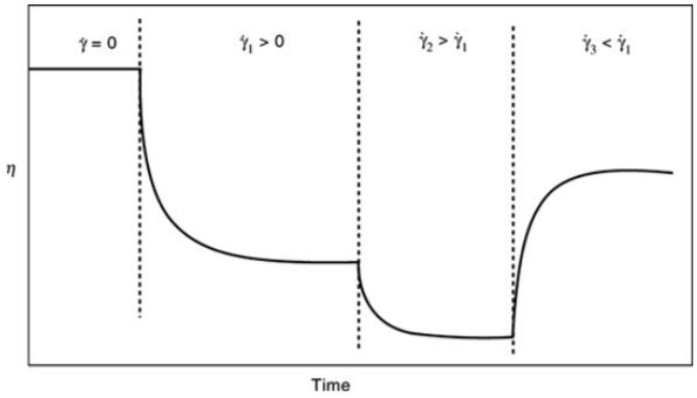


Figura 2.6: Viscosità in un fluido tissotropico [14]

2.2.1.1 Modelli per le curve di viscosità

In relazione alle diverse tipologie di fluido è possibile fare riferimento a determinati modelli per il calcolo della viscosità [14].
Per i fluidi newtoniani si utilizza l'equazione di Newton (2.1), come definito in precedenza.
Per i fluidi alla Bingham il modello definisce, in relazione alla tensione di snervamento τ_0, la viscosità plastica costante η_p.

$$\tau - \tau_0 = \eta\dot{\gamma} \tag{2.7}$$

La viscosità è definita come:

$$\eta_p = (\tau - \tau_0)\gamma \tag{2.8}$$

Per i fluidi non Newtoniano si possono utilizzare diversi modelli, considerando che per un'elevata velocità di deformazione $\dot{\gamma}$ il valore di viscosità tende a quella di un fluido Newtoniano, per velocità di deformazione intermedie è

possibile approssimare il comportamento con il modello di Casson, per basse velocità di deformazione tendono a uno snervamento o alla viscosità di un fluido newtoniano.
Per un fluido non Newtoniano si parte dall'equazione:

$$\tau = k\gamma^n \tag{2.9}$$

dove in relazione al parametro n, definito indice di flusso, è possibile descrivere il comportamento dei fluidi dilatanti (shear thickening) e dei fluidi pseudoplastici (shear thinning)
Per i fluidi Newtoniani tale parametro è uguale a 1, se è maggiore di 1 si fa riferimento ai fluidi dilatanti, se è minore di 1 ai fluidi pseudoplastici.
Dividendo τ per γ è possibile definire la viscosità:

$$\eta = k'\gamma^{(n-1)} \tag{2.10}$$

Da questo modello deriva quello di Herschel–Bulkley, che considera la tensione di snervamento.

$$\tau - \tau_0 = k\gamma^n \tag{2.11}$$

Per i fluidi pseudoplastici si utilizza il modello di Williamson.

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (|\tau|\tau_m)} \tag{2.12}$$

dove τ_m è lo sforzo di taglio dove è presente la viscosità media tra η_0 ed η_∞.

2.2.2 Teoria della viscoelasticità

Il concetto di viscoelasticità si riferisce a quei materiali che non seguono né il modello elastico lineare, molla di Hooke, né il modello viscoso, smorzatore viscoso di Newton, ma in dipendenza dalle condizioni al contorno, presentano sia una componente elastica che una componente viscosa.

I modelli analogici di riferimento analizzati il modello elastico lineare di Hooke e lo smorzatore viscoso di Newton.
La molla di Hooke è il modello elastico lineare per corpi perfettamente elastici.
La formulazione della molla di Hooke è la seguente.

$$F = kx \tag{2.13}$$

Figura 2.7: Modello di Hooke

Il comportamento può essere trasposto al caso continuo, andando a considerare le tensioni e le deformazioni.

$$\sigma = E\epsilon \tag{2.14}$$

La deformazione dipende in modo lineare dallo sforzo tramite il modulo elastico E. La legge costitutiva può essere espressa graficamente andando a considerare la pendenza della retta del diagramma sforzo-deformazione.

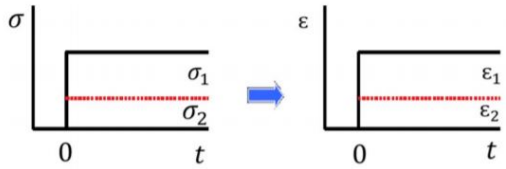


Figura 2.8: Modello di Hooke: diagramma tensioni e deformazioni

Questo comportamento risulta evidente nelle *prove di creep*, ossia prove di

sollecitazione a carico costante. Si impone istantaneamente una tensione, che viene mantenuta per un certo tempo. Quando la tensione smette di agire, la legge di carico presenta una coda negativa. Per la biunivocità del legame, nel momento in cui si applica una tensione, si ottiene istantaneamente un valore di deformazione non nullo, quindi non è presente tempo dipendenza (figura 2.8).

Lo smorzatore viscoso di Newton è utilizzato per fluidi Newtoniani, ossia quei fluidi per cui la velocità di deformazione $\mathrm{d}\epsilon/\mathrm{d}t$ dipende in modo lineare dallo sforzo applicato σ attraverso la viscosità η.

Figura 2.9: Modello di Newton

La formulazione dello smorzatore viscoso di Newton (equazione 2.1) può essere tradotta in tensioni e deformazioni.

$$\tau = \eta \frac{\mathrm{d}\epsilon}{\mathrm{d}t} \tag{2.15}$$

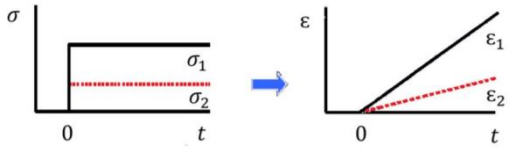


Figura 2.10: Modello di Newton: diagramma tensioni e deformazioni

La deformazione non viene recuperata alla rimozione del carico, ma dissipa in calore il lavoro.
Questo comportamento risulta nuovamente evidente nelle *prove di creep* (figura 2.10), considerando la legge di carico definita in precedenza.
Si nota che se all'inizio la deformazione è nulla, nel momento in cui è applicata la tensione, il materiale risponde con un valore

$$\frac{\mathrm{d}\epsilon}{\mathrm{d}t} = \frac{\tau}{\eta} \tag{2.16}$$

Il materiale inizia dunque a fluire, e a parità di tensione non cambia la velocità di deformazione, e dunque si ha un legame lineare. Quando viene annullata la tensione, si annulla anche la velocità di deformazione e il materiale risponde con un tratto orizzontale. In un materiale viscoso da luogo ad una viscosità irreversibile, per effetto dell'imposizione di una sollecitazione per un certo tempo e ad una certa temperatura.

2.2.3 Modelli viscoelastici

Il comportamento del bitume può essere considerato, in buona approssimazione, come un comportamento viscoelastico lineare, derivante dalla combinazione, per il principio di sovrapposizione degli effetti dalla combinazione dei singoli modelli analogici.
Sono stati considerati tre modelli di riferimento, il *modello di Maxwell*, *modello di Kevin-Voigt*, *modello di Burger*.
Nel modello di Maxwell si combinano in serie il modello di Hooke e lo smorzatore viscoso di Newton, in modo tale da poter costruire un legame costitutivo che proviene dai singoli modelli. All'interno del modello si conosce la deformazione totale come somma dei modelli individuali, mentre la tensione corrisponde a quella applicata al singolo modello, considerando che per equi-

librio e congruenza, le tensioni applicate alle due componenti devono essere le medesime.
Il modello di Maxwell può essere utilizzato per descrivere il comportamento dei bitumi solo in presenza di:

- tempi di carico lunghi
- alte temperature

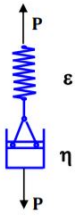


Figura 2.11: Modello di Maxwell

La legge costitutiva è cosi definita:

$$\gamma(t) = \left(\frac{1}{G} + \frac{t}{\eta}\right)\tau \tag{2.17}$$

In tale formulazione è possibile notare una dipendenza esplicita dal tempo, poiché lo smorzamento è funzione di quest'ultimo.
Dalla forma differenziale si può derivare ϵ

$$\epsilon(t) = \frac{1}{E}\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}t} + \frac{\tau}{\eta} \tag{2.18}$$

L'andamento delle sollecitazioni e delle deformazioni in funzione del tempo può essere descritto attraverso due tipologie di prove, *prove di creep* e *prove di rilassamento*.
Nella *prova di creep*, considerando un carico costante per tutta la prova, si avrà una deformazione istantanea per la presenza della molla e una deformazione dovuta al dissipatore (figura 2.12).

Nella *prova di rilassamento* invece si considera una deformazione impressa costante nel tempo, quindi si avrà una variazione di tensione, che è massima nell'istante di applicazione della deformazione per la presenza delle molla e in seguito subisce una riduzione per effetto sia dello smorzatore che del rilassamento della molla (figura 2.13).

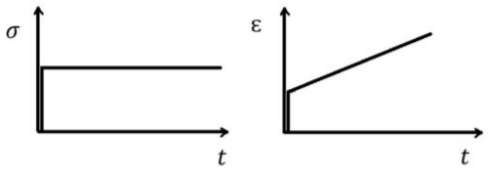


Figura 2.12: Prova di creep [11]

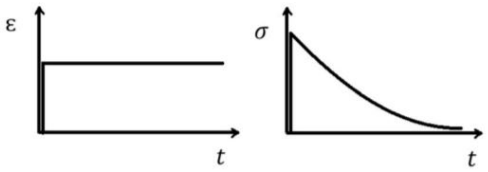


Figura 2.13: Prova di rilassamento [11]

Nel modello di Kelvin-Voigt il modello di Hooke e quello di Newton sono combinati in parallelo. Applicando i criteri di equilibrio e congruenza, la deformazione subita dai due elementi è la medesima, mentre per equilibrio, la somma delle tensioni portate dai singoli elementi corrisponde alla tensione portata dal modello complessivo.
Il modello di Kevin-Voigt può essere utilizzato per descrivere il comportamento dei bitumi solo in presenza di:

- tempi di carico brevi
- basse temperature

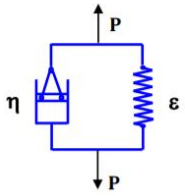


Figura 2.14: Modello di Kelvin-Voigt

La legge costitutiva è cosi definita:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \left(1 - e^{-t/\lambda}\right) \tag{2.19}$$

dove $\lambda = \eta/G$ è il tempo di rilassamento.
Dalla legge costitutiva si può ricavare la tensione σ

$$\sigma(t) = E\epsilon + \eta\frac{\mathrm{d}\epsilon}{\mathrm{d}t} \tag{2.20}$$

Come per il modello di Maxwell, si fa riferimento alla *prova di creep* e *prova di rilassamento*.

Nella *prova di creep*, applicando un carico costante per la durata della prova, si avrà una deformazione che aumenta progressivamente fino a raggiungere un asintoto orizzontale in cui la viscosità η è uguale a zero, ossia il punto di massima elongazione della molla (figura 2.15).
Nella *prova di rilassamento*, applicando una deformazione impressa costante, la tensione ha un picco nel momento di applicazione della deformazione e poi diminuisce (figura 2.16).

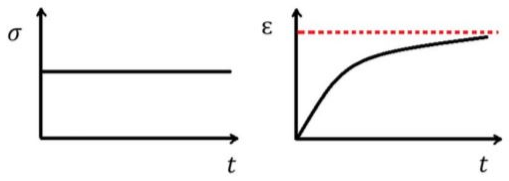


Figura 2.15: Prova di creep [11]

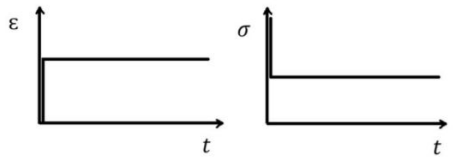


Figura 2.16: Prova di rilassamento [11]

Per analizzare il comportamento del bitume bisognerebbe combinare i due modelli di riferimento in modo casuale, in relazione alla natura e alla reale situazione. Un modello valido è il modello di Burger, in cui è presente sia la combinazione in serie che in parallelo del modello di Hooke e Newton.

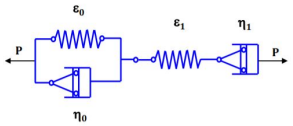


Figura 2.17: Modello di Burger

In questo caso la legge costitutiva è:

$$\gamma(t) = \frac{\tau}{G_0} + \frac{\tau}{\eta_0}(t - t_0) + \frac{\tau}{G_1} e^{(t-t_0)/\lambda_1} \tag{2.21}$$

Questo modello si avvicina al comportamento del bitume perché simula in genere il comportamento nelle *prove di creep*, in cui, applicando un carico istantaneo, si ha una certa quota di deformazione istantanea. La deformazione progredisce nel tempo e poi tende alle condizioni di scorrimento lineare.

Nella fase di scarico, c'è un recupero istantaneo, seguito da una transizione e da una deformazione residua (figura 2.18).

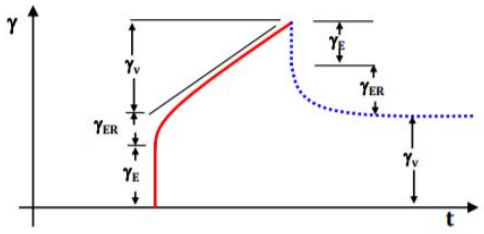


Figura 2.18: Prova di creep

In questo modo è possibile riconoscere:

- deformazione elastica;
- elasticità ritardata;
- deformazione viscosa.

Il modello di Burger, inoltre, simula la realtà della microstruttura, seppur utilizzando pochi parametri e senza perdere la fisica del modello.

2.2.4 Prove reologiche

Dopo aver analizzati i modelli costitutivi dei materiali viscoelastici, si fa riferimento a diverse tipologie di prove, per definirne il comportamento reologico.

2.2.4.1 Prove in regime continuo

Nelle prove in regime continuo la sollecitazione è costante,in questo modo una volta fissata la forzante, viene valutata in continuo la risposta del materiale. Un esempio di tali tipologie di prove e proprio la *prova di creep*, in cui è presente una fare di carico costante e una fase di recupero (*creep recovery*).

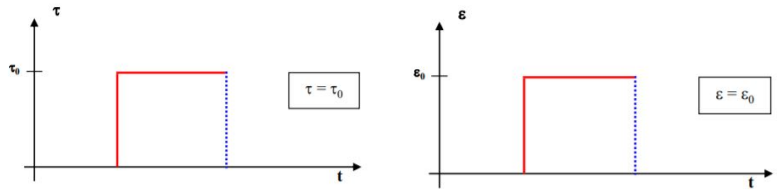


Figura 2.19: prova di creep e rilassamento

Dalla prova si estraggono due parametri:

- rigidezza

$$S(t) = \frac{\tau_0}{\gamma(t)} \tag{2.22}$$

- deformabilità o cedevolezza

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau_0} \tag{2.23}$$

2.2.4.2 Prove in regime oscillatorio

Nelle prove in regime oscillatorio la forzante esterna varia nel tempo con una legge oscillatoria sinusoidale, che varia tra due estremi di modulo τ_0.

$$\tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t) \tag{2.24}$$

dove ω è la pulsazione.

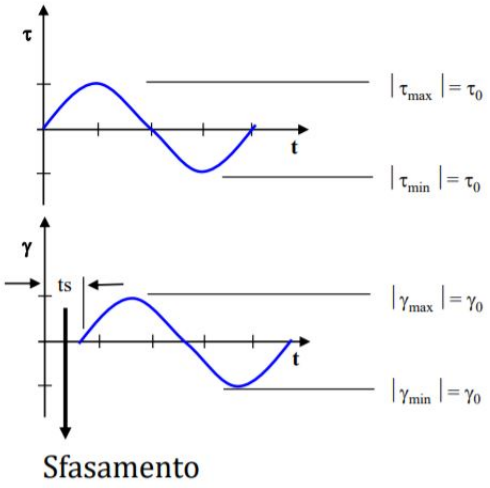


Figura 2.20: Prove in regime oscillatorio: carico e deformazione sinusoidale

Il materiale viscoelastico risponde con una sinusoide $\gamma(t)$ che varia tra gli estremi di modulo γ_0 e aventi la stessa lunghezza d'onda.
Bisogna considerare il fenomeno dello *sfasamento*, ossia il picco è raggiunto con un ritardo, esprimibile attraverso un contributo angolare, detto angolo di fase.

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t - \delta) \tag{2.25}$$

δ è funzione della temperatura e della frequenza di carico.
I valori estremi sono:

- $\delta = 0°$ materiale perfettamente elastico;
- $\delta = 90°$ materiale perfettamente viscoso.

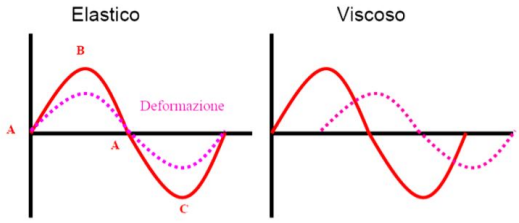


Figura 2.21: Deformazione in fase δ=0°(elastico) e fuori fase δ=90°(viscoso)

I materiali viscoelastici presentano valori intermedi di δ. La prima caratteristica reologica è δ, la seconda è la rigidezza, espressa attraverso il modulo complesso G^*.

$$G^* = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \tag{2.26}$$

La denominazione *complesso* implica che è possibile rappresentare questa grandezza attraverso la notazione dei numeri complessi.

- Modulo di restituzione elastica

$$G' = G^* \cos\delta$$

- Modulo di dissipazione viscosa

$$G'' = G^* \sin\delta$$

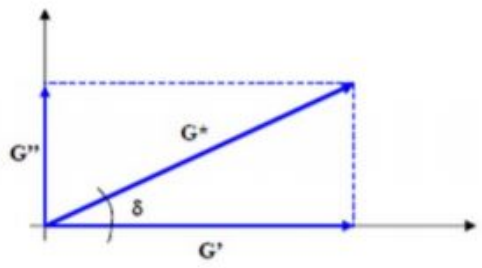


Figura 2.22: Modulo complesso

Le prove in regime oscillatorio possono essere rappresentate attraverso due metodologie principali:

- **Piano di Cole Cole**

  È una rappresentazione grafica del modulo di restituzione G' e del modulo di dissipazione viscosa G'' e necessita solamente dei dati sperimentali, quindi è un buon metodo per poter analizzare le prove di laboratorio.

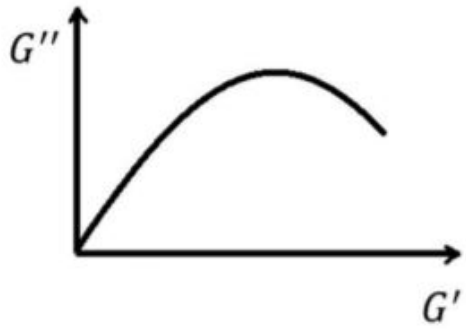


Figura 2.23: Piano di Cole-Cole [11]

- **Piano di Black**

  È una rappresentazione in forma grafica del modulo complesso G^* in scala logaritmica e dell'angolo di fase δ e anche in questo caso bastano solo i dati sperimentali.

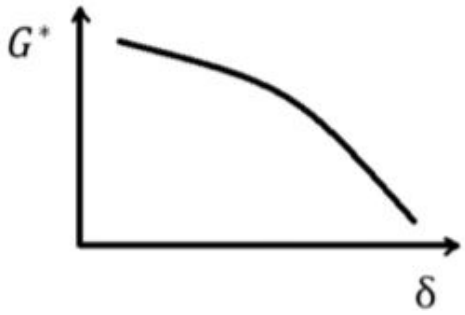


Figura 2.24: Piano di Black [11]

Tale grafico è definito in funzione di una temperatura, infatti, se è presente una curva continua è valido il principio di equivalenza tempo-temperatura, se la curva è discontinua bisogna valutare diversamente i dati sperimentali.

2.2.5 Principio di equivalenza tempo-temperatura

In campo elastico lineare è presente una correlazione tra il tempo e la temperatura, definito per l'appunto principio di equivalenza tempo-temperatura. Una risposta reologica corrispondente a una variazione della frequenza di carico si ottiene anche a seguito della variazione della temperatura di prova, per cui indagini a basse frequenze corrispondo ad indagini ad alte temperature e viceversa. Le misure effettuate a diverse temperature in prefissati valori di frequenze, posso essere definite per una temperatura di riferimento, attraverso un fattore chiamato shift factor, che le trasla orizzontalmente.

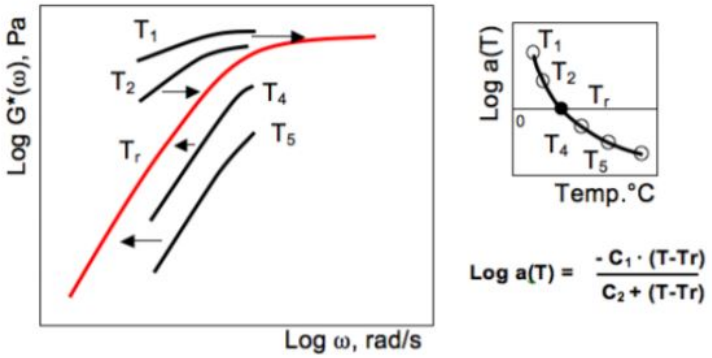


Figura 2.25: Curva maestra e shift factors

2.2.6 Curve Maestre

Le curve maestre sono una rappresentazione grafica del modulo complesso G^* e dell'angolo di fase δ, ad una data temperatura e in funzione della frequenza.

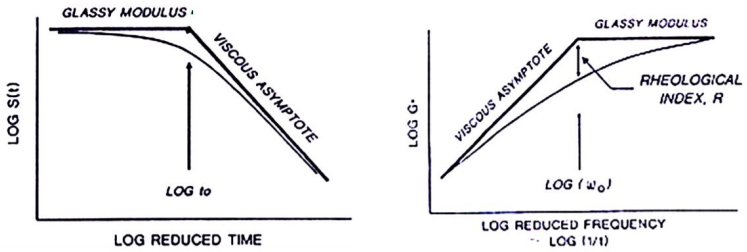


Figura 2.26: Curva maestra in funzione del tempo e della temperatura

Si nota che la curva presenta un asintoto obliquo inclinato a 45°, o asintoto viscoso, in cui il materiale si comporta come un fluido viscoso, e un asintoto orizzonte,o asintoto vetroso, dove la rigidezza assume un valore massimo e costante, indipendente dal tempo, ossia il materiale tende verso un comportamento elastico.

Le altre due caratteristiche della curva maestra sono la frequenza di crossover ω_c, che corrisponde all'intersezione dei due asintoti. In corrispondenza di tale valore il materiale subisce una transizione da comportamento preva-

lentemente elastico a viscoso, e l'indice reologico R, che è definito come la differenza tra il modulo vetroso e il modulo complesso valutato in ω_c.
Per la determinazione di tale fattore si fa riferimento a modelli empirici, un esempio è la legge di Williams-Lander-Ferry (WLF) o la legge di Arrhenius, in dipendenza dalla temperatura di transizione vetrosa del materiale. Per $T > T_g$ si usa l'equazione di WLF

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T_1 - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \tag{2.27}$$

dove C_1 e C_2 sono parametri che dipendono dal materiale, mentre per $T < T_g$ si usa la legge di Arrhenius

$$\log(a_T) = -\frac{E_f}{2.303R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \tag{2.28}$$

dove E_f è l'energia di attivazione ed R è la costante universale dei gas.

2.2.6.1 Modello analitico di Christensen e Anderson (CA)

Tale metodo è stato sviluppato all'interno del programma SHRP, da cui è stata proposta una formulazione per fittare i dati sperimentali.
Tale modello lega quattro parametri fondamentali:

- il modulo complesso G^*
- il modulo vetroso G_g
- la frequenza di crossover ω_c
- indice reologico R

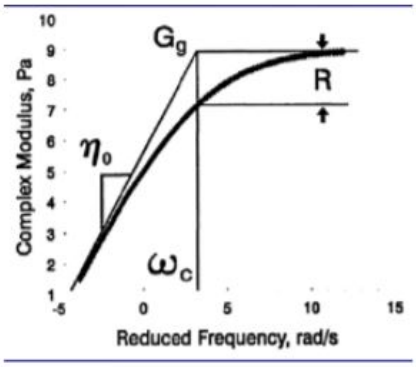


Figura 2.27: modello CA [12]

I parametri del modello sono:

- il modulo vetroso G_g, che è definito dal valore dell'asintoto orizzontale della norma del modulo complesso $|G^*|$ a basse temperature o alte frequenze. l'angolo di fase δ è uguale a 0°. Tale valore è assunto pari a 1 GPa per tutti i bitumi.
- Asintoto viscoso: definisce il comportamento del materiale ad alte temperature o basse frequenze. L' angolo di fase δ è circa 90°.
- la frequenza di crossover ω_c è l'intersezione tra i due asintoti
- l'indice reologico R è dato dalla differenza tra il modulo vetroso G_g e il valore di $|G^*|$ in corrispondenza della frequenza di crossover.

Le equazioni sono:

$$|G^*(\omega)| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^{\log 2/R}\right]^{-R/\log 2} \tag{2.29}$$

$$\delta(\omega) = \frac{90}{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^{\log 2/R}} \tag{2.30}$$

Tale modello non viene utilizzato per bitumi modificati.

2.2.6.2 Modello analitico di Christensen, Anderson e Marasteanu (CAM)

Nelle equazioni è introdotto un parametro m, che definisce la velocità di convergenza del modulo complesso ai due asintoti, quando la frequenza tende a zero o infinito. Le equazioni sono cosi modificate:

$$|G^*(\omega)| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^{\log 2/R}\right]^{-mR/\log 2} \tag{2.31}$$

$$\delta(\omega) = \frac{90m}{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^{\log 2/R}} \tag{2.32}$$

Tale metodo è valido anche per bitumi modificati.

2.2.7 Misure reometriche

Il calcolo della viscosità viene effettuato attraverso l'uso di reometri, rotazionali e non rotazionali, la cui differenza è data dalla cinematica del sistema di misura.

Nel caso dei reometri rotazionali, viene applicato o un momento torcente M, che può essere ricondotto a una forza di taglio, o una velocità angolare, ricondotta ad un gradiente di velocità.

Le geometrie maggiormente utilizzate sono:

- sistema piatto-piatto;
- sistema piatto cono;
- sistema cilindri concentrici.

2.2.7.1 Sistema piatto-piatto

Il sistema di misura a piatti paralleli è caratterizzato da due piatti, uno inferiore fisso e uno superiore, posti ad una distanza δ, in cui lo spessore del provino da testare sarà uniforme.

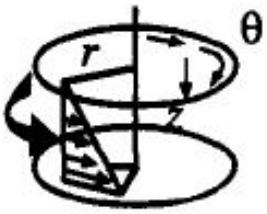


Figura 2.28: Piatti paralleli [15]

Per le misure di viscosità, si parte dall'equazione del moto, secondo la componente θ

$$\frac{\mathrm{d}\tau_{z\theta}}{\mathrm{d}z} = \frac{\mathrm{d}\tau_{\theta z}}{\mathrm{d}z} = \frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}z} = 0 \tag{2.33}$$

$$\frac{\mathrm{d}\dot{\gamma}_{\theta z}}{\mathrm{d}z} = \frac{\mathrm{d}\dot{\gamma}}{\mathrm{d}z} = 0 \tag{2.34}$$

Lo shear rate $\dot{\gamma}$ è

$$\dot{\gamma} = r\frac{\mathrm{d}\dot{\Omega}}{\mathrm{d}z} = \frac{\Omega r}{h} = \dot{\gamma}(r) \tag{2.35}$$

$$\dot{\gamma}(R) = \frac{\Omega R}{h} \tag{2.36}$$

Il momento torcente è calcolato come:

$$M = 2\pi \int_0^R \sigma r^2 \,\mathrm{d}r = 2\pi \int_0^R \eta\dot{\gamma} r^2 \,\mathrm{d}r = 2\pi \frac{R^3}{\dot{\gamma}_R^3} \int_0^{\dot{\gamma}_R} \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}^3 \,\mathrm{d}\dot{\gamma} \tag{2.37}$$

Da questa equazione è possibile ricavare la funzione incognita $\eta(\dot{\gamma})$. Nel caso di fluidi non Newtoniani, ricorrendo alla formula di Leibniz, si ottiene la relazione:

$$\eta = \frac{2Mh}{\pi R^4 \Omega}\left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4}\frac{\mathrm{d}\ln M}{\mathrm{d}\ln \dot{\gamma}_R}\right) \tag{2.38}$$

con

$$\dot{\gamma}_R = \frac{\Omega R}{h}$$

Per un fluido Newtoniano

$$\eta = \frac{2Mh}{\pi R^4 \Omega} \tag{2.39}$$

Per i fluidi non Newtoniani, poiché la distanza tra i due piatti è costante, la viscosità varia dal centro rispetto alla parte esterna del campione.

2.2.7.2 Sistema piatto-cono

Nel sistema di misura piatto-cono è presente un piatto inferiore fisso e un cono superiore che ruota, ed è caratterizzato da un diametro D, un gap fisso e un angolo di apertura.

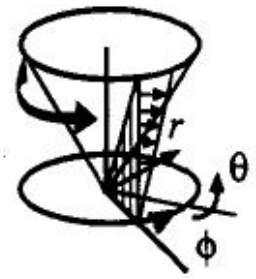


Figura 2.29: Piatto cono [15]

Lo spessore δ del provino varia linearmente con la coordinata radiale.

$$\delta = R \tan \alpha \tag{2.40}$$

L'angolo di apertura del cono è piccolo e può variare da 0.5° a 4°. Si può quindi approssimare $\tan \alpha \approx \alpha$ e ricavare la relazione:

$$\delta = R\alpha \tag{2.41}$$

Lo shear rate è costante in tutto il provino ed è uguale a

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega R}{\delta} = \frac{\Omega}{\alpha} \tag{2.42}$$

Essendo anche lo sforzo τ costante, è possibile ricavare il momento torcente M, integrando lo sforzo da 0 a R, ossia su tutta la superficie del provino e lo sforzo τ.

$$M = \int_0^R \tau r 2\pi r \, \mathrm{d}r = \frac{2\pi R^3}{3}\tau \qquad \Longrightarrow \qquad \tau = \frac{3M}{2\pi R^3} \tag{2.43}$$

Le equazioni (2.42) e (2.43) permettono di ricavare la viscosità η, sia per fluidi newtoniani che non newtoniani.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{3M\alpha}{2\pi R^3 \Omega} \tag{2.44}$$

2.2.7.3 Sistema cilindri concentrici

Il sistema a cilindri concentrici è formato da due cilindri di raggio differente. Un cilindro viene tenuto fermo , mentre l'altro ruota secondo una velocità angolare Ω.

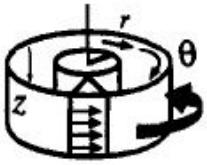


Figura 2.30: Cilindri concentrici [15]

Il momento torcente viene calcolato per i due raggi R_0 ed R_i

$$M(R_0) = \sigma_0 2\pi R_0^2 h \qquad\qquad M(R_i) = \sigma_i 2\pi R_i^2 h \tag{2.45}$$

Se lo spessore δ è molto minore rispetto al raggio si ha $R_0 \approx R_1 \approx R$

$$\sigma = \frac{M}{2\pi R^2 h} \tag{2.46}$$

Lo shear rate risulta uniforme in tutto il campo di moto:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega R}{\delta} \tag{2.47}$$

Infine, si determina la viscosità

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = \frac{M\delta}{2\pi R^3 h\Omega} \tag{2.48}$$

Capitolo 3

Indagine bibliografica

Il capitolo verte sull'analisi bibliografica effettuata, volta a descrivere le proprietà dei bitumi modificati con plastiche di recupero, focalizzando l'attenzione sul polietilene (PE) di recupero, polimero utilizzato in questo lavoro di tesi.
Questa analisi ha come scopo quello di fornire risultati sulla preparazione e sulla caratterizzazione reologica dei bitumi modificati rispetto a quelli tradizionali, andando a valutarne i benefici e gli svantaggi.

3.1 Bitumi modificati con plastiche di recupero

Varie tipologie di plastiche di recupero vengono utilizzate in campo stradale per la modifica dei bitumi.
Bisogna considerare che le proprietà chimiche e fisiche delle plastiche, possono non essere compatibili con la miscelazione con il bitume, a causa di una reazione negativa tra le componenti.
Quando un polimero viene aggiunto al bitume, bisogna considerare le caratteristiche del polimero, le caratteristiche del bitume, le condizioni di miscelazione e la compatibilità polimero bitume [16].
Nella figura sottostante vengono mostrati i vantaggi e gli svantaggi dei polimeri modificati con plastiche di recupero.

Polimero	Vantaggi	Svantaggi	Usi
PE	• Resistenza alle alte temperature • Resistenza all'invecchiamento • Basso costo	• Difficile da disperdere nel bitume • Problemi d'instabilità • Alte percentuali di polimero per migliori proprietà • No recupero elastico	• Usi industriali • Poche applicazioni stradali
PP	• Basso incremento di viscosità • Alta T di rammollimento • Bassa penetrazione • Allarga il range di plasticità e migliora la resistenza di carico della miscela	• Problemi di separazione • Nessun miglioramento in elasticità o proprietà meccaniche • Bassa resistenza alla fatica indotta da escursioni termiche	• PP atattico usato per roofing • PP isotattico non è applicato su scala commerciale
EVA	• Notevole compatibilità • Cambiamenti di viscosità minimi • Termicamente stabile alle normali temperature di miscelamento e trattamento • Bassi costi • Maggiore adesività	• Nessun miglioramento nel recupero elastico	• Paving • Roofing
SBS	• Maggiore elasticità a basse temperature • Migliore resistenza alla deformazione e alla dilatazione alle alte temperature • Elasticità molto buona • Incremento della resistenza al rutting • Maggiore adesività • Buona stabilità della miscela in basse percentuali	• Alto costo • Resistenza alla penetrazione ridotta • Maggiore viscosità alle temperature di processo • Resistenza al calore e all'ossidazione minore di quella delle poliolefine • Bitume idoneo per miscele con SBS deve avere alto contenuto di aromatici e basso di asfaltemi	• Paving • Roofing

Tabella 3.1: Caratteristiche dei polimeri [16]

3.2 Polietilene di recupero per bitumi modificati

Negli ultimi anni, è in costante aumento il numero di studi sull'utilizzo del polietilene di recupero per la modifica dei bitumi [17], essendo la materia plastica più comunemente impiegata e reperibile, tanto che il 70% del recupero delle plastiche è attribuibile proprio al polietilene (PE), includendo anche il polietilene a bassa densità (LDPE) e ad alta densità (HDPE) [18].

Per quanto riguarda la struttura chimica, il polietilene ha un elevato grado

di cristallinità, data la sua struttura simmetrica e regolare, una temperatura di fusione che essendo più alta di 100 °C, è lontana dalla temperatura di servizio delle pavimentazioni stradali [19] ed inoltre risulta essere versatile, impermeabile e a basso costo [20].
Nella modifica dei bitumi, il vantaggio di utilizzarlo come agente modificante comporta una migliore stabilità termica, resistenza all'ormaiamento e rigidezza, con un range di plasticità maggiore, dato dall'aumento della temperatura di rammollimento e un incremento di viscosità [17].
D'altra parte presenta problemi d'instabilità alle alte temperature, essendo sottoposto ad una separazione di fase [21]. Sono stati testati nuovi processi di preparazione al fine di poter produrre una miscela ottimale allo stoccaggio, ma sono definiti in determinati casi specifici che ne limitano l'applicabilità.
Pertanto si possono utilizzare dei agenti come per esempio l'anidride maleica per incentivare la formazione di legami chimici tra il polietilene e il bitume per migliorarne la stabilità oppure combinare il bitume modificato con la gomma [22].
Sono necessarie, inoltre, alte percentuali di polimero per raggiungere migliori proprietà, ma il polietilene è difficile da disperdere nel bitume, incentivando ulteriormente la separazione di fase [16].

3.3 Preparazione dei bitumi modificati con plastiche di recupero

La metodologia di modifica dei bitumi tradizionali prevede la miscelazione dei polimeri di recupero con bitume ad alte temperature.
La temperatura della miscela deve essere maggiore della temperatura di fusione delle plastiche, per avere un prodotto finale omogeneo.

Il primo step è quello di decidere la percentuale di plastiche in relazione al peso del bitume, questa varia dall'1% al 10% in peso del bitume, anche se nella maggior parte degli studi si va dal 3–5% [17] (figura 3.1).

Sample name	R-LLDPE (wt.%)	Bitumen (wt.%)
Base Bitumen	0	100
R-LLDPE-3%	3	97
R-LLDPE-6%%	6	94
R-LLDPE-9%%	9	91
R-LLDPE-12%%	12	88

Figura 3.1: Concentrazioni differenti di LDPE di recupero [20]

Il bitume, prima della modifica, viene riscaldato alla temperatura di 160–180 °C in forno o in bagno termico di olio, in seguito si utilizza il Silverson Shear Mixer, con una velocità di 3500–5000 rpm per un tempo variabile da 1–2 h e temperature che vanno dai 170–200 °C in relazione alle plastiche utilizzate [17, 20] (figura 3.2).

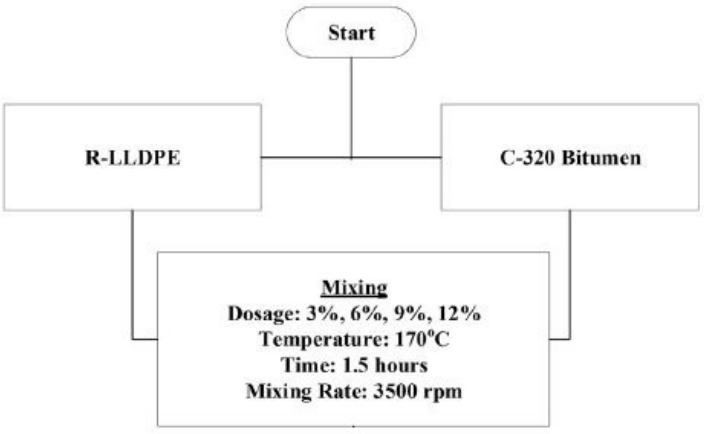


Figura 3.2: Processo di miscelazione [22]

Alcuni studi prevedono che dopo il processo di miscelazione il bitume può

essere posto in forno per un tempo variabile da 1.5 a 2 h, per garantire che non rimanga aria intrappolata prima di qualsiasi altro esperimento [17].

3.4 Caratterizzazione reologica dei bitumi modificati con plastiche di recupero

La classificazione dei bitumi si basa su prove di tipo empirico che determinano:

- grado di consistenza del bitume (durezza);
- temperatura di rammollimento.

La valutazione di tali parametri avviene attraverso l'esecuzione di due tipologie di prove:

- prova di penetrazione;
- prova palla e anello.

Nei bitumi modificati, la temperatura di rammollimento aumenta cosi come il range di plasticità, che implica un notevole miglioramento nelle proprietà del conglomerato bituminoso alle alte temperature [23].
Il grado di penetrazione invece diminuisce, il che indica una minore fluidità e suggerisce che l'aggiunta del polimero ha un effetto significativo sulle proprietà chimico fisiche del bitume modificato. La diminuzione del valore di penetrazione indice una maggiore resistenza del bitume modificato alle alte temperature [20].
Il cambiamento del grado di penetrazione e della temperatura di rammollimento dipende dalla viscosità del bitume, che con l'aggiunta di plastiche

di recupero aumenta per la formazione di una rete polimerica nella matrice bituminosa, modificando il comportamento reologico del bitume vergine.
Dalla figura (3.3) si nota che la variazione di tali parametri dipende dalla percentuale di modificante aggiunto, valutando che un bitume modificato con il 13% di di PE aumenta la sua temperatura di rammollimento di più del doppio rispetto al bitume vergine e l'indice di penetrazione varia anche di ordine di grandezza [24].

	Ring&ball softening point, °C	Fraas break point, °C	Penetration at 25°C, 0.1 mm
Bitumen 1	42	−25	154
+ 1 % PE	45	−25	92
+ 3 % PE	48	−27	54
+ 4 % PE	64	−21	38
+ 5 % PE	73	−20	31
+ 6 % PE	86	−18	25
+ 7 % PE	90	−15	16
+ 9 % PE	99	−13	13
+ 11 % PE	113	−8	11
+ 13 % PE	114	−6	10
Bitumen 2	44	−12	92
+ 1 % PE	52	−15	53
+ 3 % PE	65	−24	28
+ 5 % PE	67	−19	22
+ 7 % PE	99	−15	15
+ 9 % PE	106	−9	14
Standard	ASTM D36-95	GOST 11507-78	ASTM D5-05

Figura 3.3: Caratterizzazione meccanica bitumi modificati con plastiche di recupero [24]

Per la caratterizzazione reologica si eseguono test al DSR (Dynamyc Shear Rheometer), dove i parametri indagati sono:

- rigidezza G^*;
- angolo di fase δ;
- viscosità η.

Le prove eseguite sono:

- prove in regime oscillatorio;

- prove in regime continuo.

I bitumi modificati hanno un comportamento viscoelastico in un range di temperatura maggiore rispetto al bitume tradizionale e la temperatura di transizione solido-fluido avviene a temperature più alte.
L'aggiunta di polimero al bitume determina un aumento del modulo complesso G^* (figura 3.4) e una diminuzione dell'angolo di fase δ, implicando un aumento della rigidezza e dell'elasticità, che aumenta in relazione alle percentuale di polimero aggiunta [17].

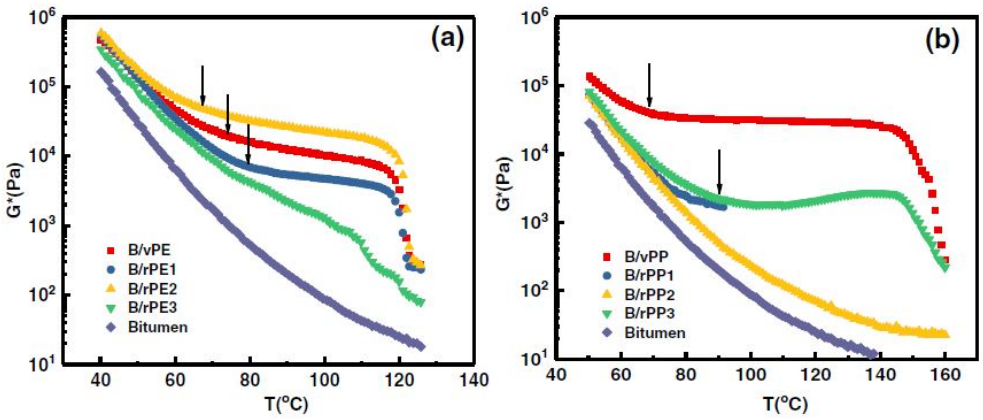


Figura 3.4: Modulo complesso bitumi modificati [20]

Dalla figura (3.5) si nota come le curva dei bitumi modificati siano spostate verso sinistra e mostrino un ritorno elastico alle alte temperature [23].

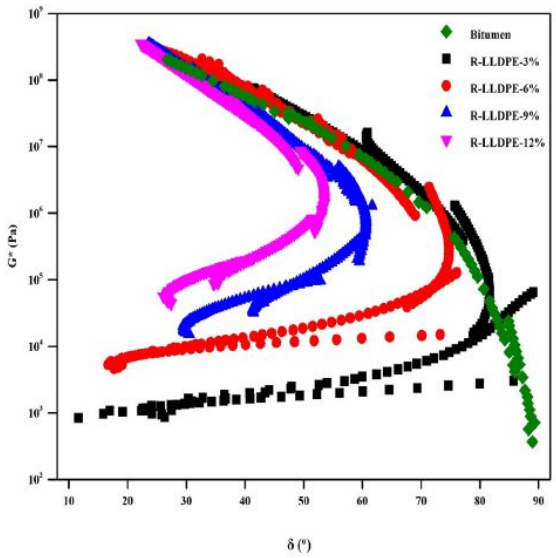


Figura 3.5: Piano di black bitumi modificati [23]

La struttura chimica e fisica del modificante influenzano l'angolo di fase δ (figura 3.6) [20].

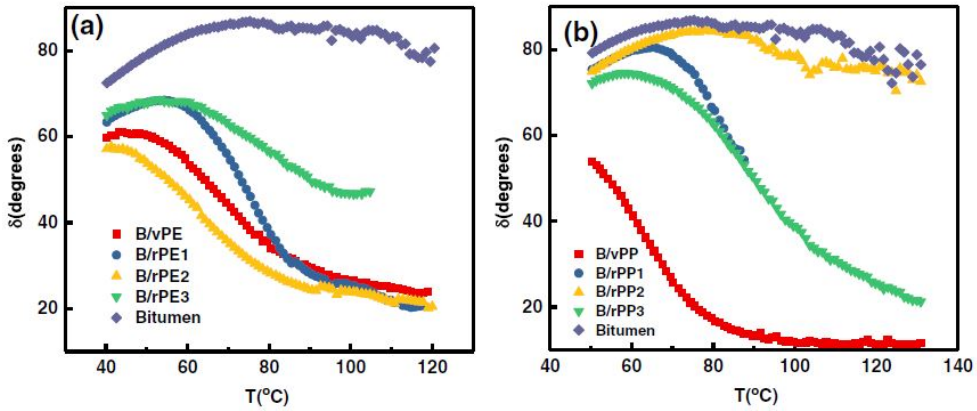


Figura 3.6: Angolo di fase in funzione della temperatura [20]

Con una bassa concentrazione di plastiche aggiunte il comportamento del bitume modificato è simile a quello del bitume vergine, mentre per alte concentrazioni di modificante, la variazione dei moduli è meno dipendente dalla temperatura [24].

Si può valutare l'elasticità del bitume nei modulo viscoelastici G' e G'', definendo un incremento rispettivamente nella temperatura di transizione solido-fluido (figure 3.7, 3.8).

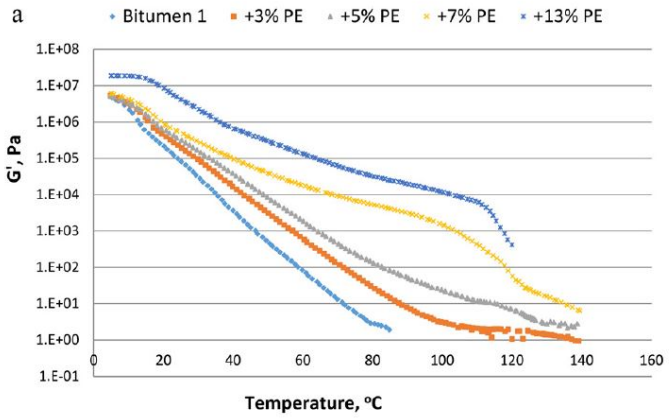


Figura 3.7: Modulo di restituzione elastica bitumi modificati [24]

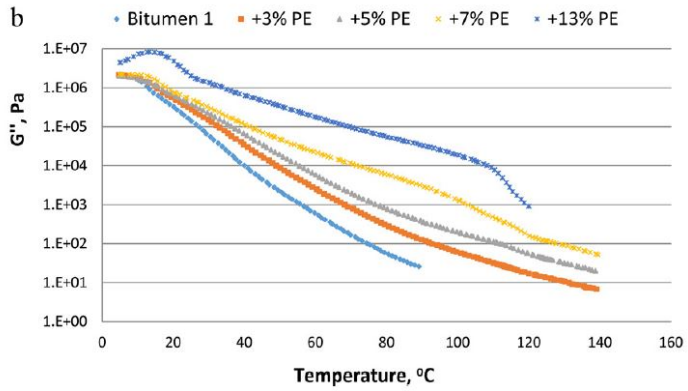


Figura 3.8: Modulo di dissipazione elastica bitumi modificati [24]

I test di viscosità vengono effettuati per comprendere con un materiale scorre alle diverse temperature. È una proprietà fondamentale, poiché definisce il comportamento del bitume durante la miscelazione, la compattazione, la posa.

Con l'esecuzione di test con shear rate costante è possibile notare come la viscosità sia maggiore a temperature più basse e diminuisca alle alte temperature [25].

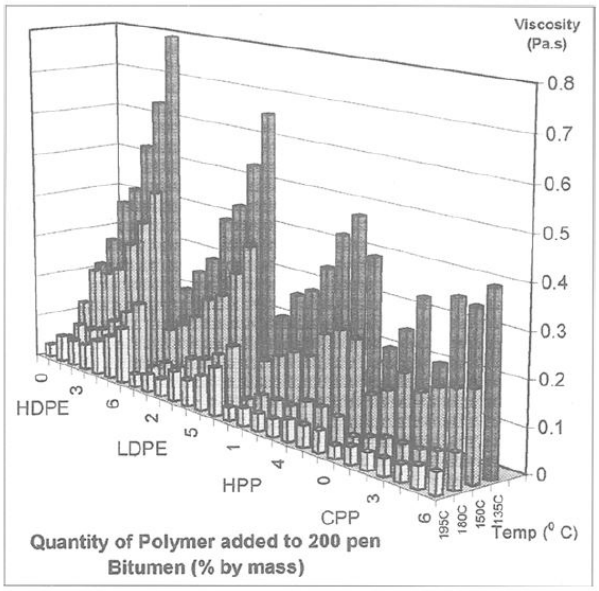


Figura 3.9: Viscosità bitumi modificati con PE e PP di recupero a diverse temperature [25]

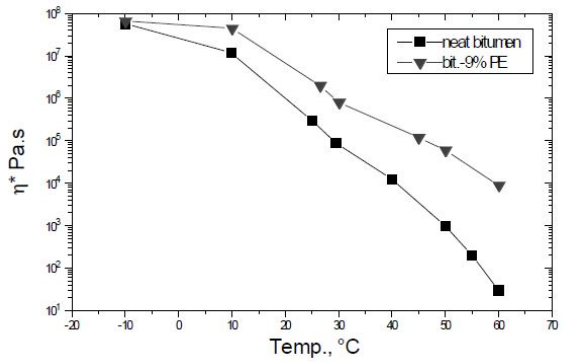


Figura 3.10: Viscosità in funzione della temperatura [26]

L'aggiunta del polietilene di recupero al bitume tradizionale inoltre, aumenta la viscosità dinamica a tutte le temperature e la differenza risulta essere maggiore alle alte temperature [26] (figura 3.10).
Il bitume modificato con plastiche di recupero risulta essere più rigido rispetto a un bitume tradizionale o a un bitume modificato con polimero (PE) (figura 3.11).

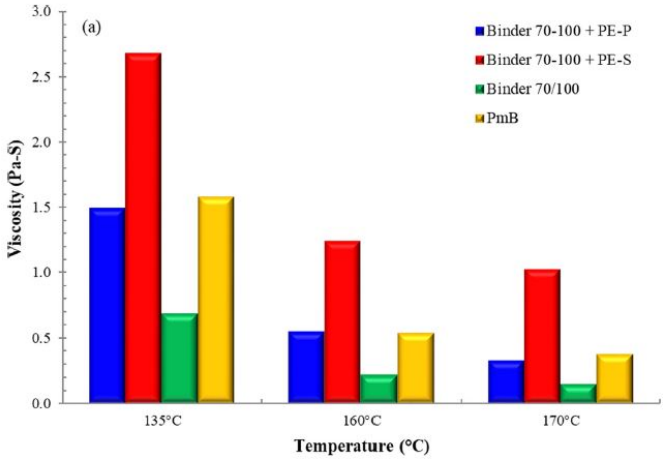


Figura 3.11: Viscosità bitumi modificati con PE di recupero [27]

Si può effettuare una valutazione in relazione alla concentrazione di polimero, evidenziando un incremento della viscosità all'aumentare della per-

centuale di polimero aggiunta [24].

Nella figura (3.12) è mostrata la viscosità a 135 °C in relazione alla concentrazione di polimero.

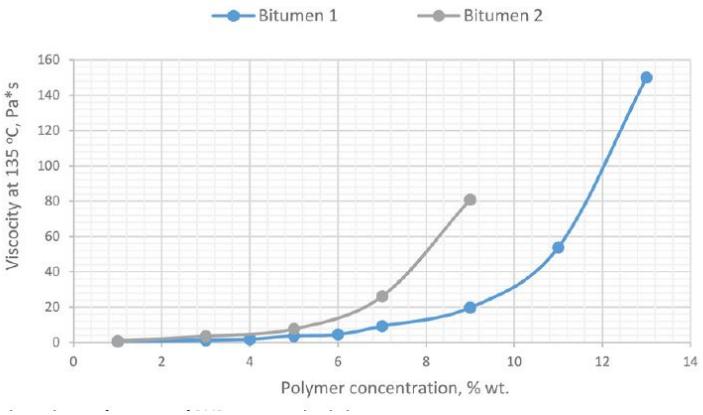


Figura 3.12: Viscosità 135 °C [24]

Il risultato della viscosità è influenzato dalla stabilità del polietilene di recupero all'interno del campione, che si valuta attraverso il test di stabilità allo stoccaggio.

Uno dei maggiori svantaggi dell'utilizzo del polietilene è la difficile da disperdere nel bitume e tende a separarsi dalle alte temperature [27].

La viscosità dei campioni superiori e inferiori, dopo il test di stabilità allo stoccaggio, risultano avere dei valori di viscosità molto differenti (figura 3.13).

Le particelle di plastica alle alte temperature tendono a migrare verso l'alto e a sedimentare, pertanto il bitume modificato risulta instabile [27].

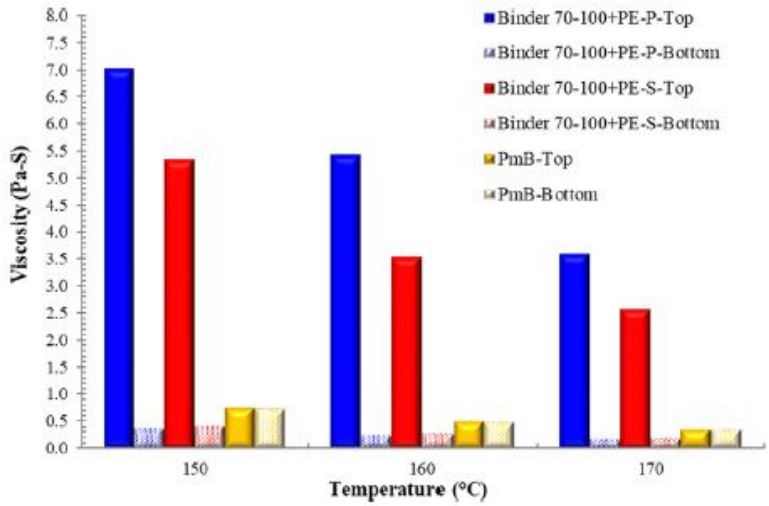


Figura 3.13: Viscosità a varie temperature dopo il test di stabilità allo stoccaggio [27]

3.5 Analisi dei costi

La tabella (3.2) sottostante è presente un'analisi dei costi per la produzione di una tonnellata di bitume modificato con plastiche di recupero (CR e PE). Il costo di un bitume modificato con materiali vergini è di circa \$650 per ton [19], riducendo il costo di \$100. Il beneficio economico quindi è riscontrabile non solo nelle materie prime utilizzate, ma anche nel costo totale della modifica del bitume.

Economic analysis	Base Bitumen	CR	PE	Operating cost
Price(\$/ton)	410	393	1060	106

Tabella 3.2: Analisi dei costi

Il costo finale in $/ton è:

$$\frac{410 + 393 \cdot 0.15 + 1060 \cdot 0.07}{1 + 0.15 + 0.07} + 106 = 551.2$$

Capitolo 4

Indagine sperimentale

L'obiettivo del capitolo è quello di presentare il programma sperimentale eseguito presso il laboratorio di reologia del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino. Il programma sperimentale, la modalità di preparazione delle plastiche e dei bitumi e l'esecuzione delle prove segue le impostazioni definite dal *RILEM Technical Committee 279 WMR, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*. In primo luogo si andranno a definire i materiali utilizzati e gli strumenti impiegati per l'esecuzione delle prove, in seguito verrà presentato il programma sperimentale effettuato.

4.1 Materiali

Per la sperimentazioni si sono utilizzate due diverse tipologie di materiali, plastiche di recupero (PE) in frammenti e un bitume vergine 70/100 fornito da Nynas.
Con questi materiali di origine sono stati modificati due bitumi, uno prodotto presso il Politecnico di Torino, denominato PLASTPT, e uno presso l'università di Padova, denominano PLASTPD.
I bitumi denominati PLASTPD e PLASTPT sono stati modificati da differenti operatori secondo la metodologia definita dal gruppo internazionale RILEM.

4.1.1 Polietilene di recupero

Il polietilene di recupero, proveniente da un centro di riciclaggio svizzero, si presenta sotto forma di frammenti di plastica di circa 5 mm.
I frammenti di plastica provengono da un processo di riciclaggio secondario,

in cui sono state triturate e pulite.
Dalla figura è possibile notare come le plastiche di recupero presentino dimensioni e forme molto differenti (figura 4.1).

Figura 4.1: Plastiche di recupero (PE)

4.1.1.1 Processo di macinazione

Al fine di poter facilitare la successiva modifica con il bitume tradizionale 70/100 le plastiche sono state ulteriormente triturate secondo il protocollo:

1. si è utilizzato il miscelatore Silverson con maglia verticale;
2. sono state pesate 5 g di plastiche;
3. si è riempito un contenitore con acqua fredda fino a $\frac{3}{4}$ di profondità;
4. si sono macinate le plastiche per 5 min ad una velocità di 5000 rpm;
5. le plastiche e l'acqua sono state setacciate;
6. sono state poste in forno a 100 °C per 1 h.

Nel caso specifico del bitume modificato presso il Politecnico di Torino e denominato PLASTPT, durante il processo di macinazione delle plastiche si sono riscontrate diverse problematiche, derivanti dalla dimensione elevata dei grani di plastica. La maglia dello strumento definita dalla procedura

non riusciva a macinare la plastica e si è pertanto deciso di suddividere tale operazione in due sottofasi. Nella prima si è utilizzata una maglia con dei fori di dimensioni maggiori, in modo tale da riuscire a sminuzzare i grani di plastica di dimensioni elevate. Nella seconda è stata utilizzata la maglia descritta nella procedura fornita dal RILEM, fino ad ottenere dei grani di plastica di dimensioni di circa 3 mm (figura 4.2).

Figura 4.2: Plastiche di recupero macinate

4.1.1.2 Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica del campione è stata eseguita in due diverse tipologie, empirica e con un software per l'*image processing*. Per l'analisi empirica il quantitativo di plastiche è stato fatto passare attraverso un setaccio con apertura della maglia 3 mm.

L'analisi con software è stata eseguita su un campione rappresentativo di plastiche, fotografato con una moneta da 50 centesimi, al fine di avere una scala di riferimento.

Figura 4.3: Campionamento

Il software utilizzato è image J, un open source per l'*image processing*. Prima di procedere all'analisi si è eseguito un raddrizzamento dell'immagine con il software Matlab R2021a. Si è utilizzata una funzione di Matlab, textitcamera calibration, in modo tale da stimare i parametri per correlare i punti dell'immagine a quelli reali.
Il primo step è quello di eseguire una serie di foto da tutte le angolazioni (circa 20) su una scacchiera di riferimento (figura 4.4).

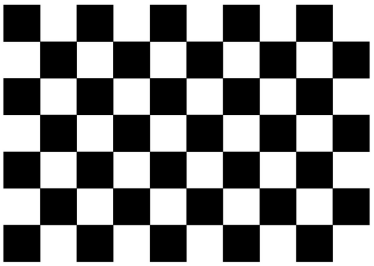


Figura 4.4: Scacchiera di riferimento

In seguito, attraverso la funzione *undistortImage* l'immagine è stata raddrizzata (figura 4.5).

Figura 4.5: Raddrizzamento immagine

L'immagine raddrizzata viene caricata nel programma ImageJ, un passaggio di cruciale importanza è quello di impostare la scala di misura, poiché il programma può contare i singoli pixel che compongono un granulo, ma non può sapere a quanto essi corrispondano nella realtà.
Per poter avere delle misure confrontabili è necessario stabilire, per ogni immagine ed a ogni ingrandimento, quanti millimetri corrispondono a ciascun pixel. Occorre quindi avere un riferimento di misura nota, per definire con un segmento a quanti pixel è estesa la scala riportata. Il valore ottenuto sarà poi impostato come scala dell'immagine. Nel nostro caso si è scelto di utilizzare una moneta da 50 centesimi, la quale misura 25 mm (figura 4.6).

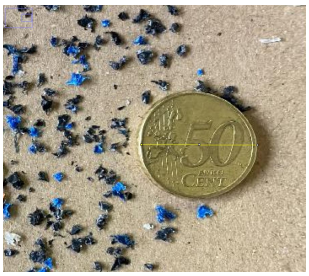


Figura 4.6: Parametro di scala

Figura 4.7: Immagine scalata

Per selezionare i granuli di plastica bisogna creare un'immagine binaria, dove i singoli granuli sono neri mentre il resto è bianco. Si utilizza il comando process – binary – make binary. Il tipo di immagine scelto è 8 bit (figura 4.8).

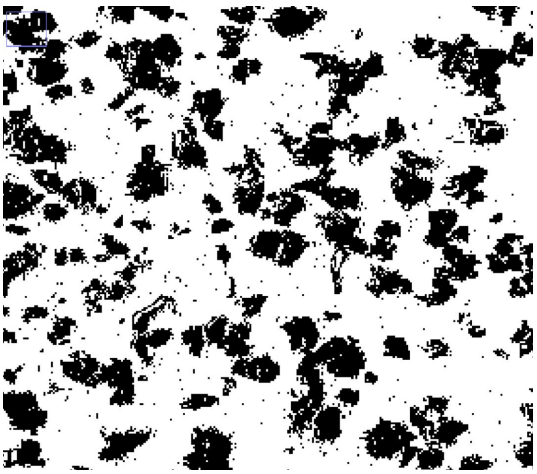


Figura 4.8: Immagine binaria 8 bit

Attraverso la funzione “Analyze Particles”, è possibile misurare una serie di parametri utili alla nostra indagine granulometrica, nel nostro caso viene calcolato il diametro di Feret. Il diametro di Feret è per definizione ”la distanza tra due rette tangenti ad opposte facce esterne la particella, parallele tra loro e a un asse che passa per il centro della particella”.
Il software ImageJ calcola il massimo e il minimo diametro di Feret, di cui si è poi fatta la media.
Dal volume sferico della particella, si è calcolato il peso di ogni particella, considerando un peso specifico del Polietilene pari a 0.95 g/cm^3 e il peso totale.
Sono stati scelti dei diametri di riferimento da cui si è calcolato il peso trattenuto in grammi e in seguito la percentuale di passante è stata calcolata come:

$$\left(\frac{P_{\text{tot}} - P}{P_{\text{tot}}}\right) \cdot 100$$

In seguito è stata costruita la curva granulometrica (figura 4.9).

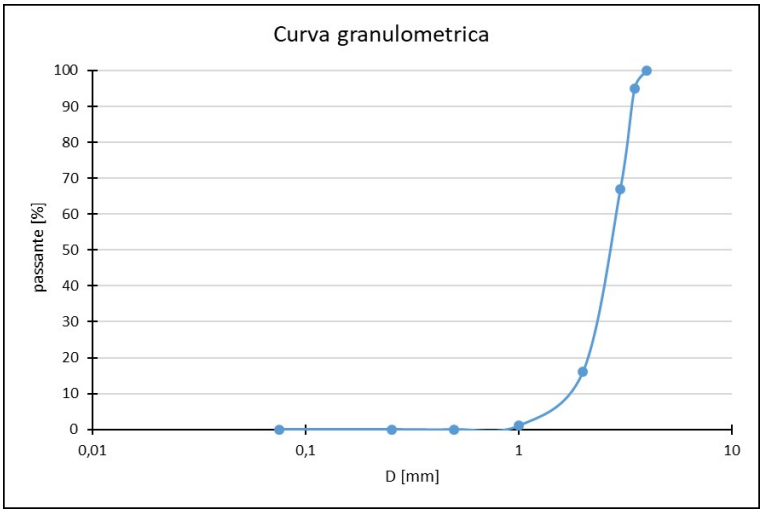


Figura 4.9: Curva granulometrica

4.1.2 Bitume di base

Il bitume preso in esame è il 70/100, materiale di utilizzo comune per uso stradale. Il materiale è stato classificato attraverso l'esecuzione della prova palla e anello (EN 1427:2015), al fine di determinare la temperatura di rammollimento del materiale. Per la caratterizzazione reologica sono state eseguite delle prove al DSR (Dynamic Shear Rheometer), in regime oscillatorio per i parametri viscoelastici e in regime continuo per la viscosità.

4.1.3 Bitumi modificati con plastiche di recupero

Con gli stessi materiali di provenienza sono stati modificati due bitumi presso laboratori universitari differenti.
Il bitume denominato PLASTPD, è un bitume modificato con le stesse tipologie di materiali e processi del bitume modificato presso il Politecnico di Torino.
Circa 20 g di materiale sono stati inviati presso il Politecnico di Torino, al fine di poter valutare un confronto nelle tipologie di prove effettuate da due diversi operatori.
Come per il bitume tradizionale 70/100, anche per il bitume modificato sono state effettuate le stesse tipologie di prove.
Il bitume denominato PLASTPT è stato modificato presso il Politecnico di Torino, secondo le direttive del RILEM. Per entrambi i bitumi è stato eseguito lo stesso processo di miscelazione, in cui un quantitativo pari al 5% di plastiche e al 95% di bitume 70/100 sono stati miscelati (figura 4.10), secondo il seguente protocollo:

1. si è utilizzato il miscelatore Silverson con maglia a fori tondi;
2. si è riscaldato il bitume in forno a 170 °C per 1 h;

3. si è riscaldato l'olio a 170 °C;
4. si è inserito il contenitore con in bitume nell'olio, attraverso il supporto laterale;
5. si sono poi aggiunte le plastiche al bitume;
6. il composto è stato miscelato a 3500 rpm per 1 h.

Figura 4.10: Processo

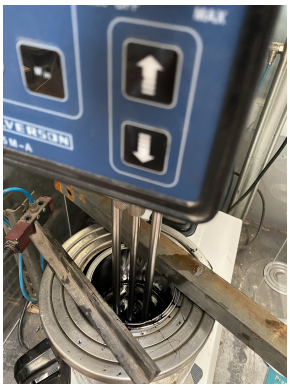


Figura 4.11: Modifica del bitume

Alla fine di tale procedura il bitume è stato colato all'interno di casseri di alluminio per le successive prove sperimentali (figura 4.12).

Figura 4.12: Colatura bitume in casseri di alluminio

4.2 Strumentazione

Come descritto nel paragrafo precedente, il bitume vergine 70/100 è stato modificato presso il Politecnico di Torino attraverso l'utilizzo di strumentazioni adeguate. In seguito per la caratterizzazione meccanica dei materiali è stato utilizzato lo strumento per la determinazione del punto di rammollimento e per la caratterizzazione reologica è stato utilizzato il DSR (Dynamic Shear Rheometer) o reometro rotazionale a taglio.

4.2.1 Miscelatore Silverson

Per il processo di macinazione delle plastiche e la successiva modifica del bitume è stato utilizzato il miscelatore Silverson in due diverse condizioni:macinazione e miscelazione e con l'utilizzo di due diverse tipologie di maglie. Per la macinazione il materiale è stato inserito in una soluzione acquosa ad una velocità di 5000 rpm, per la miscelazione il materiale è stato sottoposto ad una prova di 60 minuti con velocità 3500 rpm e ad una temperatura di 170 °C.

Figura 4.13: Miscelatore Silverson

Figura 4.14: Maglie utilizzate per i processi di macinazione e miscelazione

4.2.2 Dispositivo automatico palla-anello

La prova consiste nel determinare la temperatura di rammollimento, definita come la temperatura alla quale un campione di bitume posto in un anello subisce una deformazione pari a (25.0±0.4) mm da parte di una palla durante il riscaldamento. L'automatizzazione dello strumento permette di visualizzare sul display la suddetta temperatura. Il bitume viene posto in casseri con dei fori circolari,posti in supporti forati su cui si posano delle sfere di peso noto, all'interno di un bagno termostatico a 5 °C.

Figura 4.15: Strumentazione palla e anello

4.2.3 DSR (Dynamic Shear Rheometer)

Per la caratterizzazione reologica è stato utilizzato il reometro rotazionale a taglio MCR 301 B della casa Anton Paar.

Figura 4.16: DSR

Il reometro è costituito da un albero rotazionale attorno ad un asse, in cui la parte inferiore è fissa, la parte superiore invece presenta un braccio meccanico, capace di imprimere una sollecitazione, e in cui è possibile agganciare i diversi sistemi di misura. Alla base è presente una camera termostatica che condiziona il campione e permette di eseguire la prova in condizioni stabili, dal momento che il bitume è un isolante e non è semplice raggiungere una temperatura e mantenerla stabile. Il reometro è inoltre collegato ad un criostato, un sistema di circolazione dell'acqua che permette di lavorare a temperature diverse dalla temperatura ambiente (20 °C). I limiti strumentali considerati sono il momento torcente e l'angolo di deflessione. Il valore minimo strumentale del momento torcente è 0.001 μNm e dell'angolo di deflessione 0.001 μrad. Le prove possono essere condotte:

- in regime continuo: la sollecitazione è costante e si valuta in continuo la risposta del materiale;
- in regime oscillatorio: la forzante esterna varia nel tempo con legge oscillatoria sinusoidale.

Si può fare una distinzione inoltre sui parametri di impostazione della prova:

- in controllo di deformazione: la deformazione è costante e si definisce la sollecitazione in funzione di quest'ultima;
- in controllo di tensione: si applica uno sforzo di taglio e si deriva la sollecitazione.

In relazione alla modalità di esecuzione delle prove è possibile utilizzare diversi sistemi di misura:

- **sistema piatto-piatto** sistema piatto-piatto: per l'esecuzione delle prove in regime oscillatorio si è utilizzato il sistema a piatti paralleli da 8 mm e 25 mm di diametro, con gap fissato a 1 mm, per l'esecuzione delle prove in regime continuo per le misure di viscosità si è utilizzato il sistema a piatti paralleli da 50 mm con gap fissato a 1 mm;
- **sistema piatto-cono**: si è utilizzato per le misure di viscosità il sistema piatto-cono da 50 mm di diametro, con gap fisso a 0.05 mm e un angolo del cono pari a 1°.
- **sistema cilindri concentrici**: il sistema di misura presenta un diametro del cilindro inferiore pari a 17 mm.

4.3 Programma sperimentale

Il programma sperimentale oggetto della tesi pone le basi sul confronto delle tre tipologie di bitume definite in precedenza. L'obiettivo è quello di mostrare dal un lato la diversa caratterizzazione di un bitume tal quale con uno modificato con plastiche di recupero (PE) e dall'altro quello di valutare eventuali differenze e assonanze tra i due bitumi modificati con plastiche di recupero da operatori differenti, seppur seguendo le medesime procedure.
La tabella (4.1) mostra il programma sperimentale eseguito, considerando il numero di ripetizioni in relazione al bitume considerato, alle caratteristiche misurate e ai metodi di misura utilizzate.
I parametri misurati sono:

- temperatura di rammollimento (T_s);
- viscosità con protocollo di prova 1 (η_1);
- viscosità con protocollo di prova 1 (η_2);
- curve maestre (MC).

Per il bitume tradizionale e il bitume modificato presso il Politecnico di Torino (PLASTPT), sono state effettuate due ripetizioni per ogni tipologia di prova, per il bitume modificato presso l'Università di Padova, per le prove di viscosità è stata eseguita una sola ripetizione per mancanza di materiale.

Bitume	T_s	η_1				η_2		MC	
		T (°C)	PP50	CP50	CC17	PP50	CC17	PP08	PP25
BIT 70/100	2	135	2	2	2	2	2	2	2
		160	2	2	2				
		170	2	2	2				
PLASTPD	2	135	1	1	1	1	1	2	2
		160	1	1	1				
		170	1	1	1				
PLASTPT	2	135	2	2	2	2	2	2	2
		160	2	2	2				
		170	2	2	2				
$\text{PLASTPT}_{\text{Bottom}}$	2	135	1	-	-	-	-	-	-
$\text{PLASTPT}_{\text{Top}}$	2	135	1	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.1: Programma sperimentale con relativo numero di ripetizioni

4.3.1 Temperatura di rammollimento

La determinazione della temperatura di rammollimento [28], insieme alla prova di penetrazione con ago, sono le due prove per la caratterizzazione meccanica del bitume. È per definizione "la temperatura alla quale un campione di bitume posto in un anello subisce una deformazione pari a (25.0 ± 0.4) mm da parte di una palla durante il riscaldamento". Per l'esecuzione della prova si fa riferimento alla norma EN 1427-2015. I campioni, riscaldati in forno alla temperatura di 150 °C, devono essere colati all'interno di anelli di ottone preriscaldati. Gli anelli devono essere posti su piastre di colaggio coperte da un film di grasso, nel caso specifico si è utilizzata la glicerina. In seguito i campioni vengono rasati, facendo particolare attenzione a questa operazione in modo tale da ottenere una superficie uniforme. Gli anelli sono soggetti ad un carico noto di 3.5 g di sfere d'acciaio, avendo cura di controllare il peso

delle sfere di di utilizzarle. Il tutto viene posto all'interno di un bagno di acqua o glicerina, in relazione alla temperatura. Per temperature di rammollimento comprese tra i 28 °C e gli 80 °C si utilizza un bagno d'acqua, per temperature superiori agli 80 °C si utilizza un bagno di glicerina. Il bagno d'acqua parte ha una temperatura iniziale di 5 °C e aumenta di 5 °C/min, mentre per la glicerina bisogna aspettare il raggiungimento di una temperatura di 60 °C per l'inizio del test e poi anch'essa aumenta di 5 °C/min. l'aumento della temperatura porta al rammollimento del bitume che arriva a toccare la piastra inferiore. Dal momento che la temperatura di rammollimento utilizzando come bagno termico l'acqua, risulta essere 4 °C minore rispetto alla stessa temperatura con il glicerolo, sono presenti delle clausole sui risultati ottenuti:

- i provini in cui il film legante si rompe attorno alla palla o non aderisce all'anello prima che la prova sia completata devono essere scartati;
- per i punti di rammollimento superiori a 80 °C determinati in un bagno d'acqua, rifiutare il risultato come non valido e ripetere la determinazione in un bagno a glicerina;
- per i punti di rammollimento inferiori o uguali a 84 °C determinati in un bagno a glicerina, ripetere la determinazione nel bagno ad acqua. Se il risultato determinato con il bagno ad acqua è 80 °C o inferiore, riportare il risultato, altrimenti riportare il risultato ottenuto nel bagno a glicerina;
- punti di rammollimento inferiori o uguali a 80 °C, due risultati della prova sono validi se la differenza tra i due anelli testati non supera il valore di 1 °C;

- punti di rammollimento superiori a 80 °C e per bitume modificato, due risultati della prova sono validi se la differenza tra i due anelli testati non supera i 2 °C.

La temperatura di rammollimento è stata eseguita per tutte le tipologie di bitume analizzate in tale lavoro di tesi, e nel caso del bitume denominato PLASTPT, a seguito dell'esecuzione del "tube test", tale temperatura è stata calcolata nel primo terzo e nell'ultimo terzo del tubo, in modo tale da valutare la sedimentazione delle plastiche.

4.3.2 Viscosità

Le prove inerenti al calcolo della viscosità sono delle prove in regime continuo, definite da un'unica fase di carico del materiale, seguita da una di scarico ad una determinata temperatura.
Le misure reologiche indagate sono:

- viscosità η [Pa $\cdot$ s];
- tempo min.

Vengono utilizzati tre sistemi di misura:

- sistema piatto-piatto da 50 mm PP50;
- sistema piatto-cono da 50 mm CP50;
- sistema cilindri concentrici da 17 mm CC17.

Figura 4.17: PP50

Figura 4.18: CP50

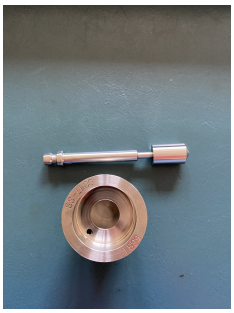


Figura 4.19: CC17

Per il calcolo della viscosità, dal momento che si indaga alle alte temperature, il campione viene posto sul piatto inferiore e riscaldato alla temperatura di esecuzione della prova, per entrambi i protocolli di prova.
Da casseri di alluminio è stato prelevato un quantitativo di bitume pari a:

- 2 g per il sistema piatto-piatto da 50 mm PP50;
- 0.6 g per il sistema piatto-cono da 50 mm CP50;
- 5 g per il sistema cilindri concentrici da 17 mm CC17.

Il quantitativo è stato calcolato mediamente proporzione, considerando il volume della sfera per entrambi i sistemi di misura e una densità del bitume pari a quella dell'acqua $\delta = 1$ g/cm^3.
Si è deciso di utilizzare due diversi protocolli di prova per effettuare le misure di viscosità.

4.3.2.1 Protocollo 1

Per il protocollo 1 sono stati utilizzati i tre diversi sistemi di misura precedentemente descritti e si sono indagate tre temperature di riferimento, 135 °C, 160 °C, 170 °C. La prova è eseguita in regime continuo, con una velocità di taglio fissata a 20 s^{-1}, indipendentemente dal sistema di misura.

Il campione è condizionato per 30 min e il tempo di prova è di 60 min, con il calcolo della misura ogni 30 s.

4.3.2.2 Protocollo 2

Nel protocollo 2 sono stati utilizzati due sistemi di misura, il PP50 e il CP50. Utilizzando lo stesso campione, le temperature vanno da 135 °C a 170 °C e da 170 °C a 135 °C. La prova è eseguita in regime continuo, con una velocità di taglio fissata a 20 s^{-1}, indipendentemente dal sistema di misura.
Il tempo di condizionamento è 30 min e il tempo di prova è 15 min, in cui si misura la viscosità come valore medio negli ultimi 5 min.

4.3.3 Frequency sweep

Il test in scansione di frequenza è una tipologia di prova in regime oscillatorio in cui l'ampiezza della deformazione rimane costante, facendo variare la frequenza in un range di temperature. Le misure reologiche indagate sono:

- rigidezza, espressa attraverso il modulo complesso G^*;
- sfasamento δ.

La modalità di esecuzione indaga due range di temperature, in cui si utilizza un diverso sistema di misura:

- basse temperature (da -6 °C a 34 °C): sistema piatto-piatto da 8 mm con gap 2 mm;

Figura 4.20: PP08

- medio-alte temperature (da 34 °C a 82 °C): sistema piatto-piatto da 25 mm con gap di 1 mm;

Figura 4.21: PP25

Per ogni temperatura si considerano 30 valori di frequenza: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.59, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 Hz.
Per l'esecuzione della prova si è preformato il campione con la seguente metodologia.
Da casseri di alluminio è stato prelevato un quantitativo di bitume pari a:

- 0.22 g per il sistema piatto-piatto da 8 mm;
- 1.074 g per il sistema piatto-piatto da 25 mm.

Il quantitativo è stato calcolato mediamente a partire dal volume della sfera per entrambi i sistemi di misura e una densità del bitume pari a quella dell'acqua $\delta = 1$ g/cm^3. In seguito il campione è posizionato nell'apposito cassero di silicone ed è preformato per l'esecuzione della prova:

1. 10 minuti in forno alla temperatura di 150 °C;
2. 5 minuti a temperatura ambiente (20 °C);
3. 3 minuti in freezer (−3 °C).

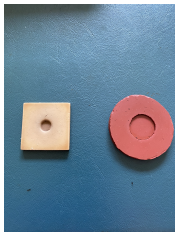


Figura 4.22: Casseri per prove PP08 e PP25

4.3.4 Stabilità allo stoccaggio mediante tube test

Per l'esecuzione di tale prova si fa riferimento alla norma BS EN 13399:2017 [29].

Lo scopo è quello di misurare la stabilità di stoccaggio di un bitume modificato alle alte temperature.

Per l'esecuzione della prova un campione omogeneo di bitume modificato, posto in un tubo, deve essere mantenuto in posizione verticale in forno a 180 °C per tre giorni.

Bisogna misurare l'altezza del campione nel tubo (100 o 120 mm) e contrassegnarlo in tre parti uguali, in seguito si procede alla chiusura di quest'ultimo, utilizzando delle forcipi.

Figura 4.23: Tubo utilizzato per l'esecuzione della prova

Figura 4.24: Chiusura e contrassegno

Dopo tre giorni bisogna rimuoverlo del forno e lasciarlo a temperatura ambiente sempre in posizione verticale.
In seguito, bisogna porre il campione in posizione orizzontale ed eseguire l'operazione di taglio, o andando a tagliare il tubo in tre parti uguali.
Dopodiché, sulla parte superiore e superiore del tubo si è deciso di eseguire la prova palla e anello per la temperatura di rammollimento e una prova al DSR per il calcolo della viscosità (Protocollo 1 a 135 °C).

Capitolo 5

Analisi dei risultati

Il quinto capitolo prevede l'analisi e l'elaborazione delle prove sperimentali effettuate in laboratorio. Lo scopo finale della sperimentazione è quello confrontare da un alto le proprietà del bitume modificato con plastiche di recupero rispetto al bitume tradizionale e dall'altro quello di valutare analogie e differenze tra bitumi modificati con le stesse tipologie di materiali da diversi operatori e in laboratori universitari differenti.

5.1 Temperatura di rammollimento

Di seguito vengono mostrati i risultati della prova palla e anello per le tre tipologie di bitume analizzate.

Bitume	T (°C)
BIT70/100	48.0
PLASTPD	56.0
PLASTPT	75.5

Tabella 5.1: Temperatura di rammollimento

Dalla tabella (5.1) è possibile notare come le temperature di rammollimento dei bitumi modificati siamo maggiori rispetto al bitume tradizionale, in conformità all'analisi bibliografica condotta nel capitolo 3.

Bitume	T (°C)
PLASTPT	75.5
$\text{PLASTPT}_{\text{Top}}$	54.0
$\text{PLASTPT}_{\text{Bottom}}$	122.5

Tabella 5.2: Temperatura di rammollimento per stabilità allo stoccaggio

Dopo aver effettuato la prova di stoccaggio del materiale, si sono analizzate le temperature di rammollimento della parte superiore ed inferiore del tubo di alluminio. Per la parte inferiore come bagno termico è stata utilizzata l'acqua, per la parte superiore il test è stato ripetuto, poiché la temperatura di rammollimento superava gli 80 °C ed è stata utilizzata la glicerina.

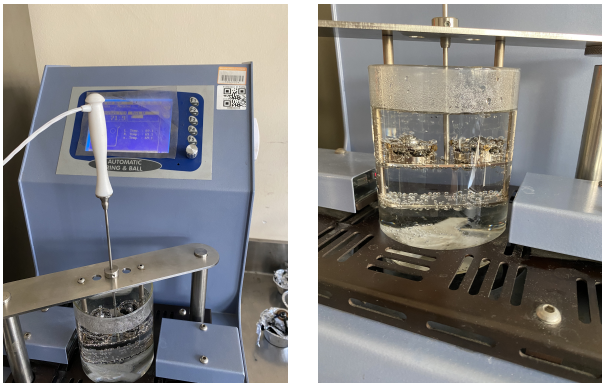


Figura 5.1: Prova palla e anello utilizzando l'acqua come bagno termico

Nella figura (5.1) si può notare che nell'esecuzione della prova per la parte superiore del bitume PLASTPT, se si usa come bagno termico l'acqua, non si riesce a calcolare la temperatura di rammollimento, che risulta essere 69.1 °C anche se il bitume non è sceso dagli anelli.
Questo tipo di errore strumentale deriva dal fatto che a circa 70 °C si cominciano a formare delle bolle nel bagno termico che falsano il risultato della prova.

Si è deciso di rieseguire la prova utilizzando come bagno termico la glicerica (figura 5.2)

Figura 5.2: Prova palla e anello utilizzando la glicerina come bagno termico

Dai risultati ottenuti è possibile notare una grande differenza tra le due temperature di rammollimento, a dimostrazione che il bitume modificato (PLASTPT) non risulta stabile.

5.2 Viscosità

Per effettuare le misure di viscosità si è utilizzato il DSR (Physica MCR301, Anton Paar) in regime continuo.
Secondo le direttive del RILEM le misurazioni sono state definite per tre diverse configurazioni, sistema piatto-piatto da 50 mm (PP50), sistema piatto-cono da 50 mm (CP50) e sistema a cilindri concentrici (CC17) e per tre differenti temperature 135 °C, 160 °C e 170 °C.
Come descritto nel capitolo 4 si è deciso di utilizzare due diversi protocolli di prova al fine di poter effettuare le valutazioni.
Le valutazioni sono state effettuate in relazione alla ripetibilità della tipo-

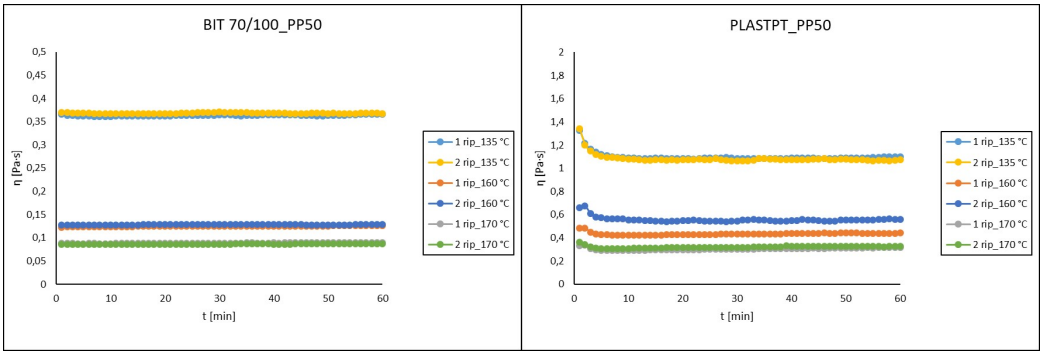
logia di prova, al materiale testato, al sistema di misura utilizzato e ai due protocolli di prova.

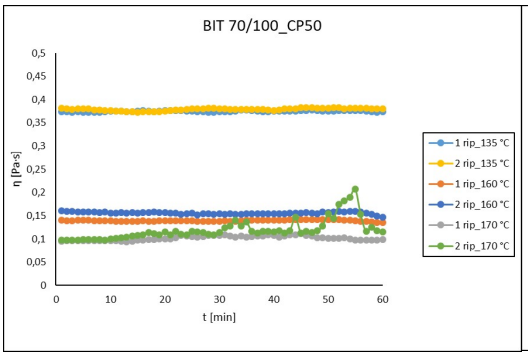
5.2.1 Protocollo 1

La prima analisi è stata eseguita in funzione del materiale, in modo tale da poter valutare la ripetibilità delle prove effettuate dallo stesso operatore.

5.2.1.1 Ripetibilità

Per ogni tipologia di prova sono state calcolate le differenze percentuali tra le due ripetizioni.
Per il bitume tradizionale 70/100 e per il bitume modificato presso il Politecnico di Torino (PLASTPT), sono state effettuate due ripetizioni per entrambi i protocolli di prova.
In seguito si è deciso di prendere il valore medio delle misurazioni delle due ripetizioni per le successive analisi.
Per il bitume modificato presso l'Università di Padova (PLASTPD) si è potuta effettuare solo una ripetizione per mancanza di materiale.





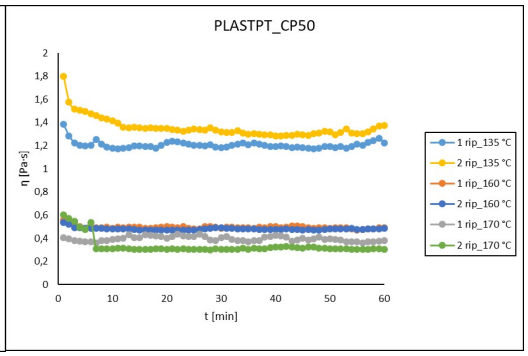
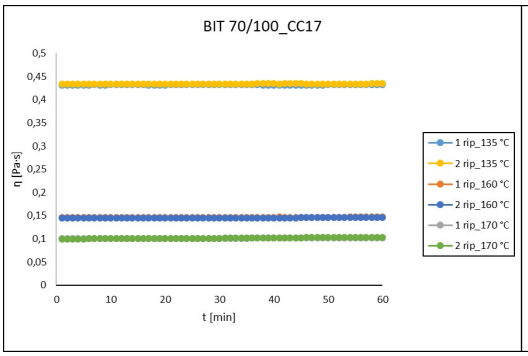


Figura 5.3: Ripetibilità BIT 70/100



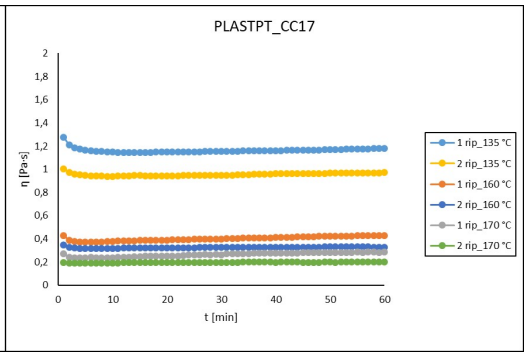


Figura 5.4: Ripetibilità PLASTPT

Dalla tabella (5.3) è possibile notare come per il bitume modificato c'è una grande variabilità tra le ripetizioni delle prove a differenza del bitume modificato.

Questo comportamento è indice di minore stabilità per la presenza delle plastiche di recupero.

	BIT 70/100			PLASTPT		
T (°C)	PP50	CP50	CC17	PP50	CP50	CC17
135	1%	1%	1%	1%	10%	20%
160	2%	1%	1%	20%	5%	25%
170	3%	7%	1%	3%	15%	30%

Tabella 5.3: Differenze percentuali

5.2.1.2 Confronto dei leganti bituminosi

La seconda analisi effettuata, pone a confronto i valori di viscosità dei tre diversi bitumi testati per i due protocolli di prova.

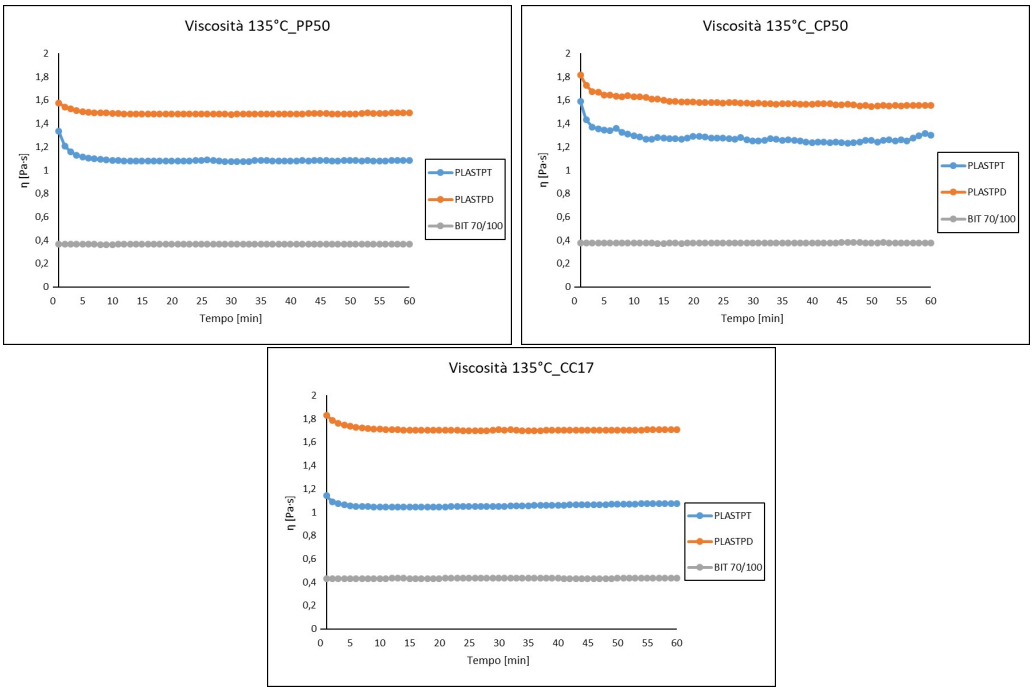


Figura 5.5: Viscosità 135 °C con PP50, CP50, CC17

Nella figura (5.5) la viscosità a 135 °C risulta essere maggiore per i bitumi modificati con plastiche di recupero (PLASTPD e PLASTPT).

Si nota inoltre che nonostante i due bitumi siano stati modificati secondo le stesse procedure la viscosità del bitume PLASTPD è maggiore di quella del bitume PLASTPT.

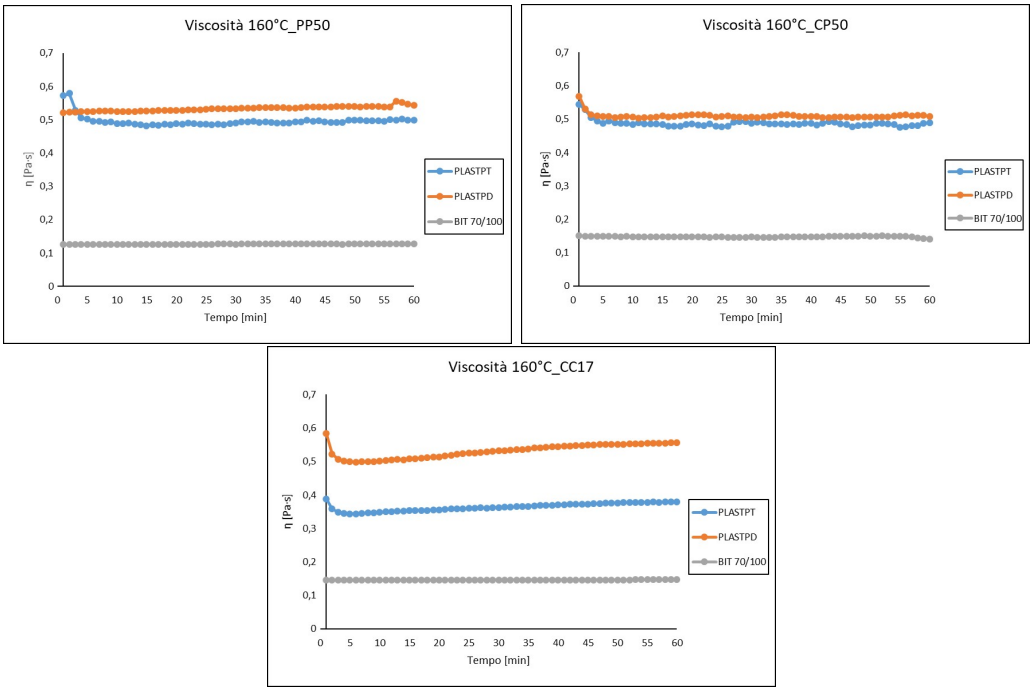


Figura 5.6: Viscosità 160 °C con PP50, CP50, CC17

La viscosità a 160 °C risulta essere maggiore per il bitume PLASTPD per i tre sistemi di misura.

Si nota dalla (figura 5.6) che per il sistema di misura CP50 la viscosità tra PLASTPD e PLASTPT hanno dei valori similari e si evince che la viscosità dei bitumi modificati con il CC17 dopo circa 30 minuti dall'inizio della prova, risulta non essere costante, ma aumenta nel tempo.

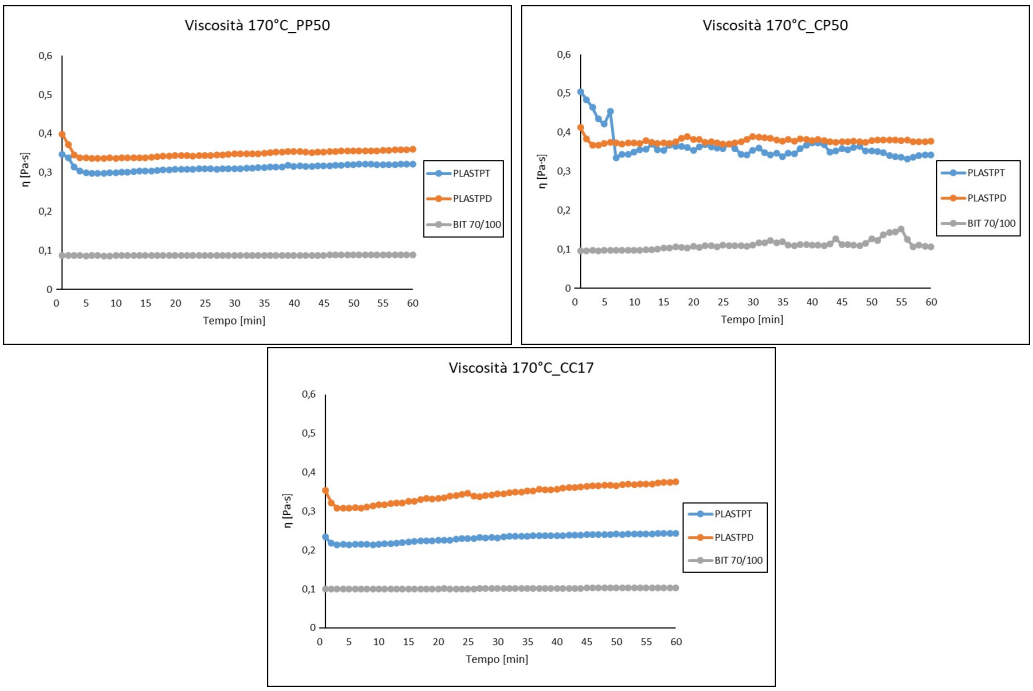


Figura 5.7: Viscosità 170 °C con PP50, CP50, CC17

Dalla figura (5.7) si evince che la viscosità a 170 °C aumenta nel tempo per i sistemi di misura PP50 e CC17.
Inoltre con il sistema di misura CP50 la viscosità a 170 °C non risulta essere costante sia per PLASTPD che per PLASTPT, anche se per quest'ultimo in modo molto più marcato, andando da un valore di 0.45 [Pa · s] a 0.35 [Pa · s].

5.2.1.3 Confronto dei sistemi di misura

Di seguito sono state effettuate valutazioni per ogni tipologia di bitume analizzato, inerenti al sistema di misura utilizzato.
A 135 °C la viscosità risulta essere maggiore con il sistema CC17 per BIT 70/100 e PLASTPD, mentre per PLASTPT risulta essere maggiore con CP50 (figura 5.8).
A 160 °C per il bitume tradizionale il valore di viscosità maggiore si ha con

il sistema CC17,per PLASTPD il PP50 e per PLASTPT il CP50 come a 135 °C.

A 135 °C, il valore più basso di viscosità tra i tre sistemi di misura risultava essere il PP50, a 160 °C invece per il bitume tradizionale risulta ancora esserlo, per PLASTPD risulta essere il CP50 e per PLASTPT il CC17 (figura 5.9).

A 170 °C la viscosità con CP50 è molto più variabile rispetto agli altri due sistemi di misura e risulta essere maggiore per PLASTPD e PLASTPT (figura 5.10).

Per il bitume tradizionale, inizialmente è maggiore con CC17, dopo 30 minuti di prova risulta essere maggiore la misura con CP50, per poi tornare a diminuire alla fine prova (figura 5.10).

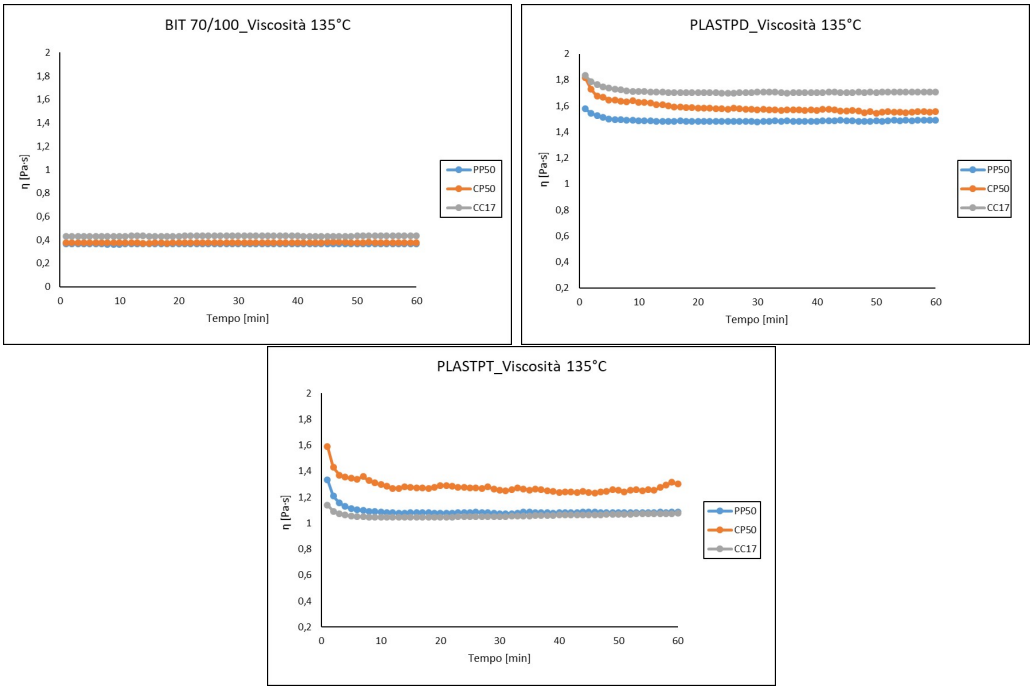


Figura 5.8: Viscosità 135 °C

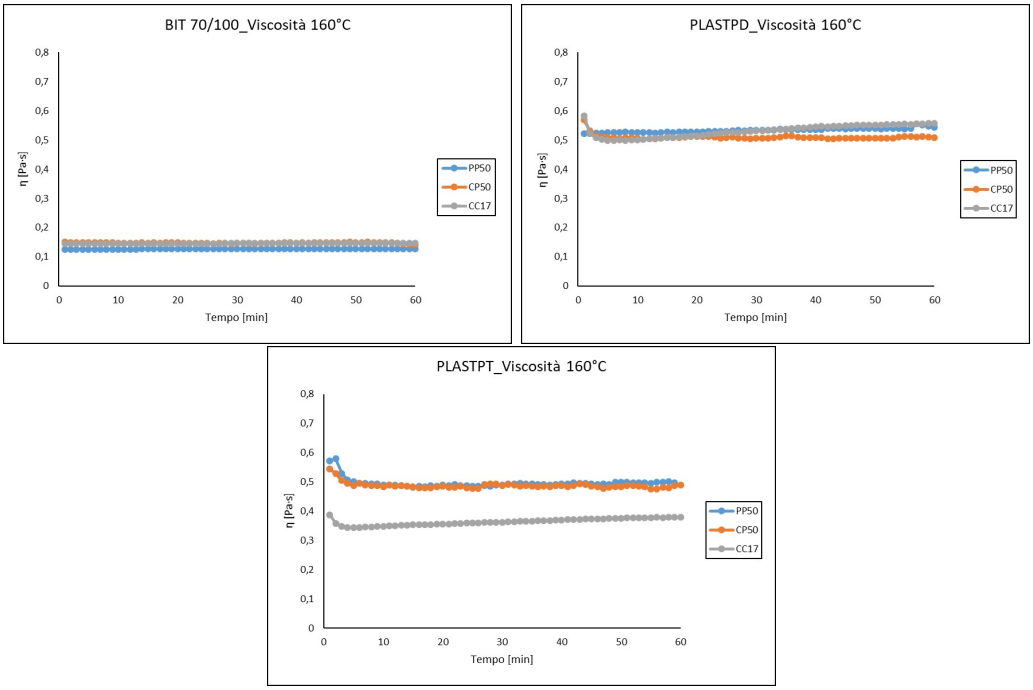


Figura 5.9: Viscosità 160 °C

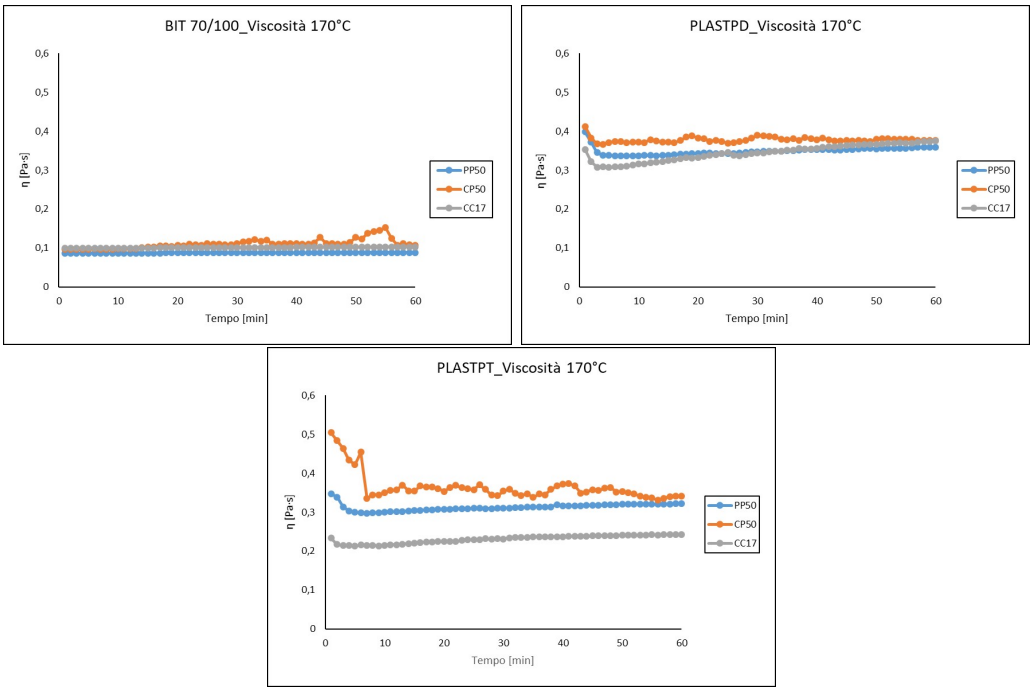


Figura 5.10: Viscosità 170 °C

Si può effettuare un'ulteriore valutazione secondo cui la viscosità per i bitumi modificati con plastiche di recupero (PLASTPD e PLASTPT) aumenta nel tempo con i tre sistemi di misura utilizzati, effetto maggiormente visibile nel PP50 e CC17, rispetto al CP50, in cui si ha un incremento e un decremento, poiché la misura risulta essere meno stabile.
Trascurando gli errori dovuti a perturbazioni geometriche ed errori di allineamento, dal punto di vista reometrico la viscosità ottenuta con il DSR è valida anche per fluidi non Newtoniani (2.44), poiché lo shear rate è costante in tutto il provino. Il sistema di misura PP50 invece, non permette la misura diretta della viscosità per fluidi non Newtoniani, dal momento che la distanza tra i due piatti è costante e lo shear rate varia lungo le superfici di flusso.
La viscosità quindi varia dal centro del provino alla parte esterna, ed è possibile utilizzare diverse metodologie per poter stimare la viscosità reale. In questo elaborato si è deciso di utilizzare l'equazione (2.38), dove si applica la correzione di Rabinowitsch, che corregge il gradiente di velocità apparente e quello reale, attraverso un fattore di forma n che dipende dal materiale (tabella 5.4). Per ottenere i valori di viscosità reale, si parte dall'ipotesi di comportamento Newtoniano e si applicano le varie correzione nel modo che segue.
Si costruisce un diagramma in scala logaritmica tra lo shear rate $\dot{\gamma}$ apparente e lo sforzo di taglio τ, da cui si ottiene il valore n come la pendenza del grafico.
Da qui si applica la correzione di Rabinowitsch e si calcola la viscosità reale. Nel nostro caso si è deciso di considerare i valori mediati negli ultimi 30 minuti, poiché nonostante il condizionamento di 30 min la viscosità non risultava stabile.

	BIT 70/100	PLASTPD	PLASTPT
n	0.9	0.8	0.5

Tabella 5.4: Correzione di Rabinowitsch per fluidi non Newtoniani

BIT 70/100		PLASTPD		PLASTPT	
η_{app}	η_{reale}	η_{app}	η_{reale}	η_{app}	η_{reale}
0.37	0.35	1.48	1.41	1.08	0.95

Tabella 5.5: Viscosità reale e apparente media

Dalla tabella (5.5) è possibile notare che le differenze percentuali per il bitume tradizionale sono circa il 3%, per PLASTPD il 5% e per PLASTPT circa il 13%.

5.2.2 Protocollo 2

5.2.2.1 Ripetibilità

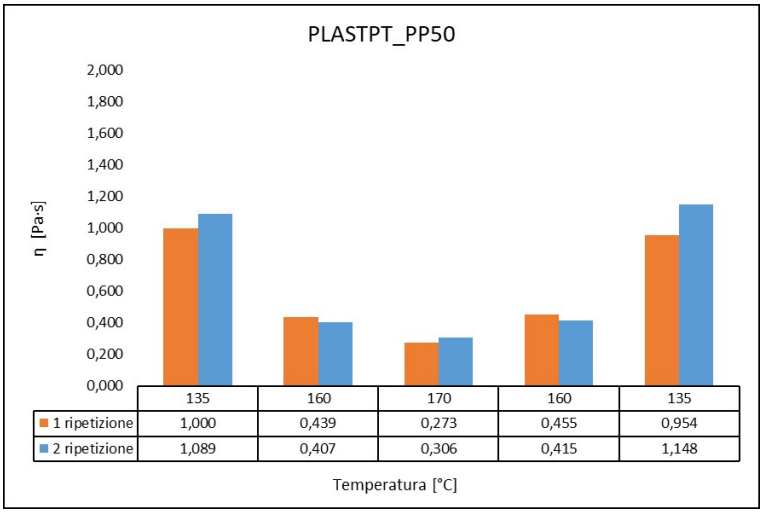


Figura 5.11: Ripetizioni PP50 PLASTPT Protocollo2

La figura (5.11) mostra una differenza tra le prove maggiore del 10% soprattutto per la prova di ritorno a 135 °C.

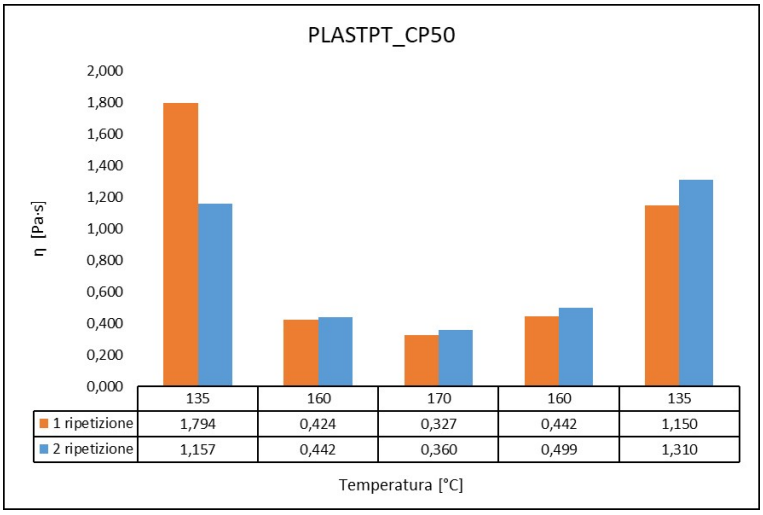


Figura 5.12: Ripetizioni CP50 PLASTPT Protocollo2

La figura (5.12) mostra una differenza del 40% a 135 °C.

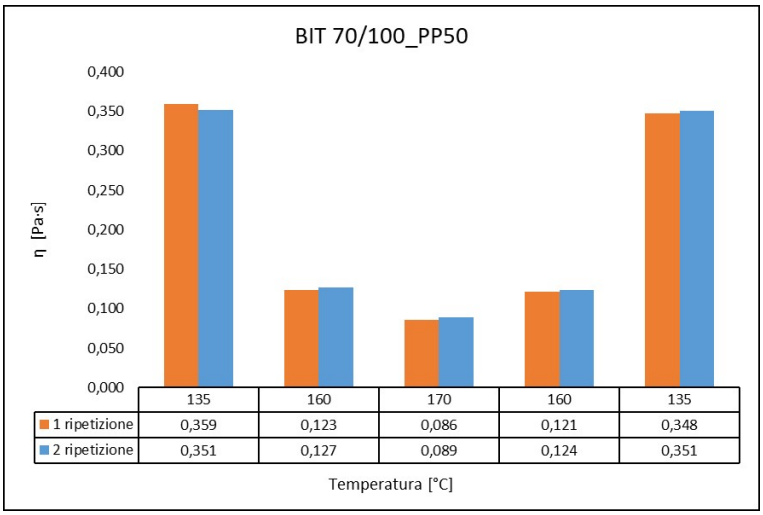


Figura 5.13: Ripetizioni PP50 BIT 70/100 Protocollo2

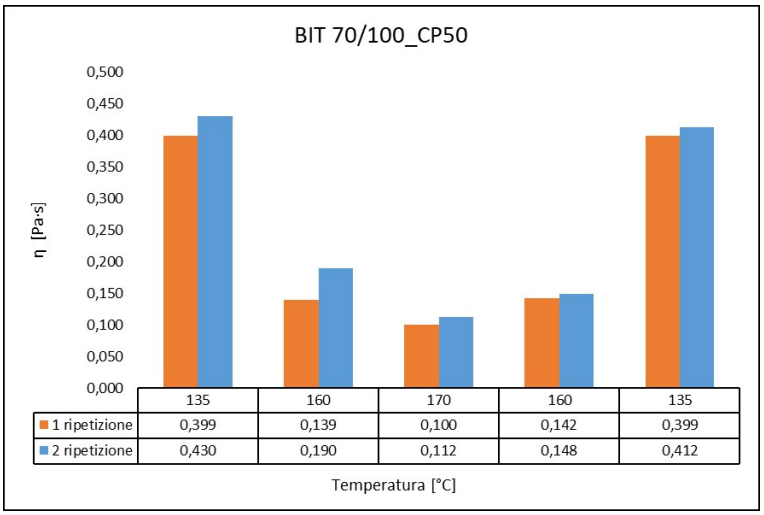


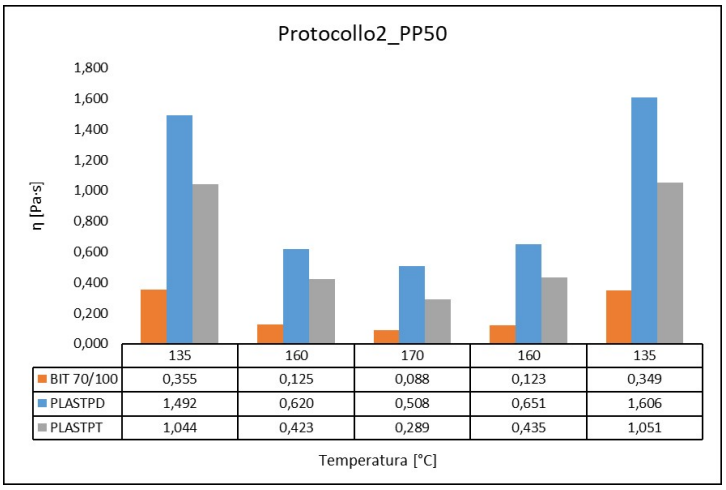
Figura 5.14: Ripetizioni CP50 BIT 70/100 Protocollo2

Le figure (5.13, 5.14) non mostrano grandi differenze tra le ripetizioni per il bitume tradizionale.

Le due ripetizioni per le misure di viscosità per il bitume modificato con plastiche di recupero presso il Politecnico di Torino (PLASTPT) risultano molto variabili, come nel protocollo 1, anche dell'ordine del 30%, a differenza del bitume tradizione 70/100, in cui, sono dell'ordine dell'1%.

5.2.2.2 Confronto dei leganti bituminosi

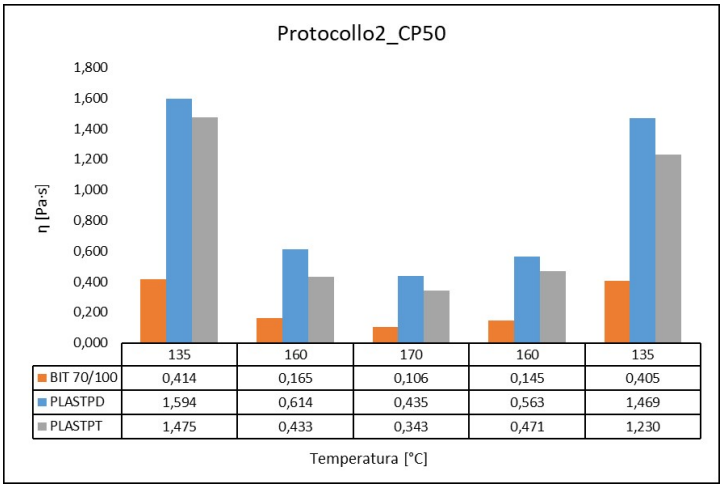
La seconda analisi effettuata, pone a confronto i valori di viscosità dei tre diversi bitumi testati per il protocollo di prova 2.



	135	160	170	160	135
BIT 70/100	0,355	0,125	0,088	0,123	0,349
PLASTPD	1,492	0,620	0,508	0,651	1,606
PLASTPT	1,044	0,423	0,289	0,435	1,051

Figura 5.15: Protocollo2 Viscosità PP50

Dalla figura (5.15) si nota che PLASTPD presenta un valore di viscosità più alto per le tre temperature indagate, sia in senso crescente che decrescente nei valori di temperatura.



	135	160	170	160	135
BIT 70/100	0,414	0,165	0,106	0,145	0,405
PLASTPD	1,594	0,614	0,435	0,563	1,469
PLASTPT	1,475	0,433	0,343	0,471	1,230

Figura 5.16: Protocollo2 Viscosità CP50

Dalla figura (5.16) si nota che PLASTPD presenta un valore di viscosità più alto per le tre temperature indagate, sia in senso crescente che decrescente nei valori di temperatura e per entrambi i sistemi di misura (CC50 e PP50).

5.2.2.3 Confronto dei sistemi di misura

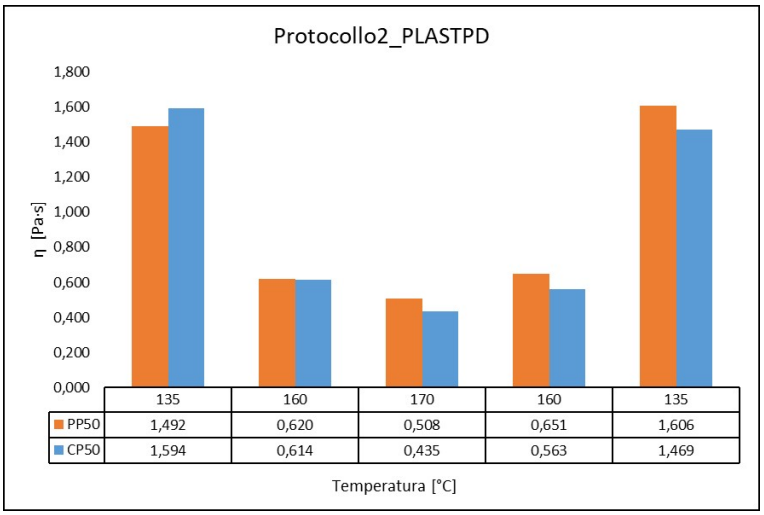


Figura 5.17: Protocollo 2 PLASTPD

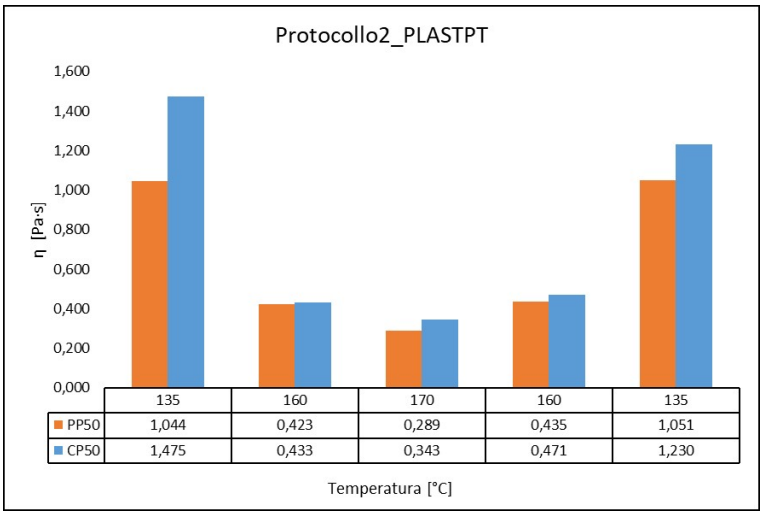


Figura 5.18: Protocollo 2 PLASTPT

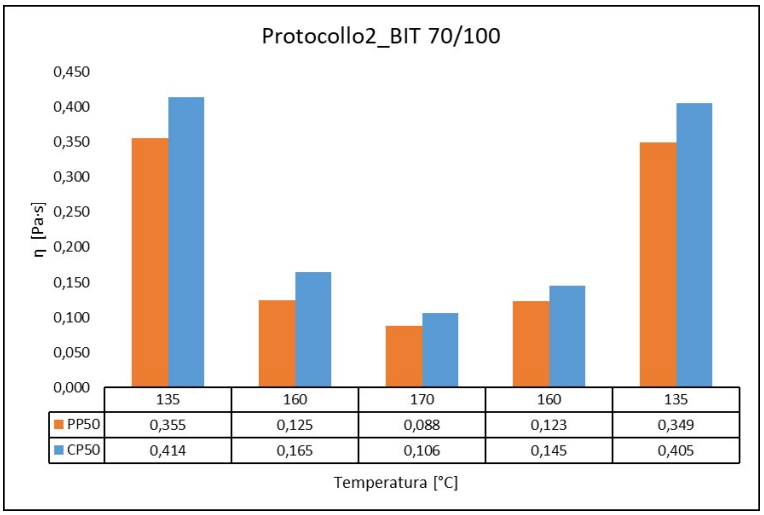


Figura 5.19: Protocollo 2 bitume 70/100

Per il secondo protocollo di prova si evince che la viscosità per PLASTPD e PLASTPT aumenta dal primo al secondo step, sia alla temperatura di 135 °C sia a 160 °C, con il sistema di misura PP50, mentre per il CP50 diminuisce (figura 5.17, 5.18).

Per il bitume tradizione 70/100 la viscosità rimane costante tra i due step e per entrambi i sistemi di misura (figura 5.19).

5.2.3 Confronto dei due protocolli di prova

Si andranno a confrontare le prove sperimentali effettuate con i due diversi protocolli.

A 135 °C la viscosità calcolata con il protocollo di prova 1 e il protocollo di prova 2 presenta valori simili per le tre tipologie di bitume, indipendentemente dal sistema di misura (figura 5.20).

La viscosità a 160 °C presenta valori conformi per il protocollo 1 e 2 per PLASTPT e BIT 70/100, per il bitume PLASTPD invece, si ha un incremento per il protocollo di prova 2 (figura 5.21).

La viscosità a 170 °C, in relazione ai due protocolli di prova, per PP50 presenta valori similari per PLASTPD e un decremento per PLASTPT e BIT 70/100 (figura 5.22).

Per il sistema di misura CP50, aumenta per PLASTPD, diminuisce per PLASTPT e risulta essere conforme per BIT 70/100 (figura 5.22).

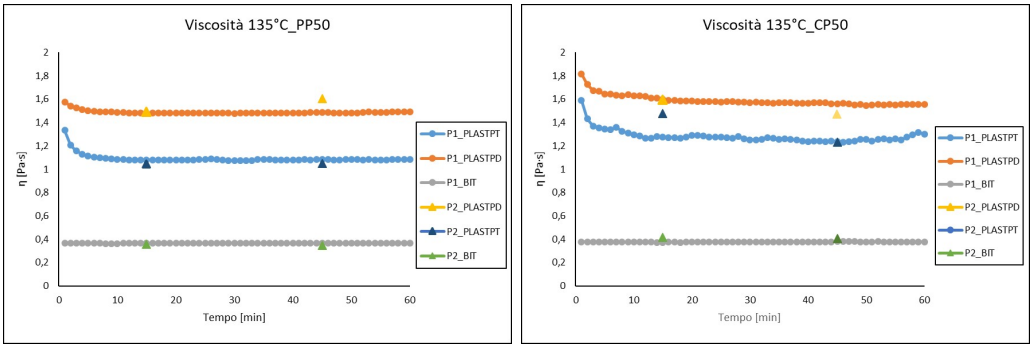


Figura 5.20: Confronto protocolli 135 °C

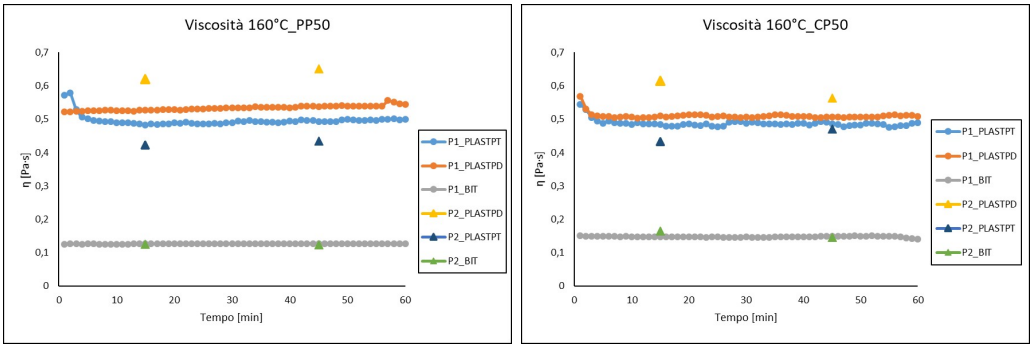


Figura 5.21: Confronto protocolli 160 °C

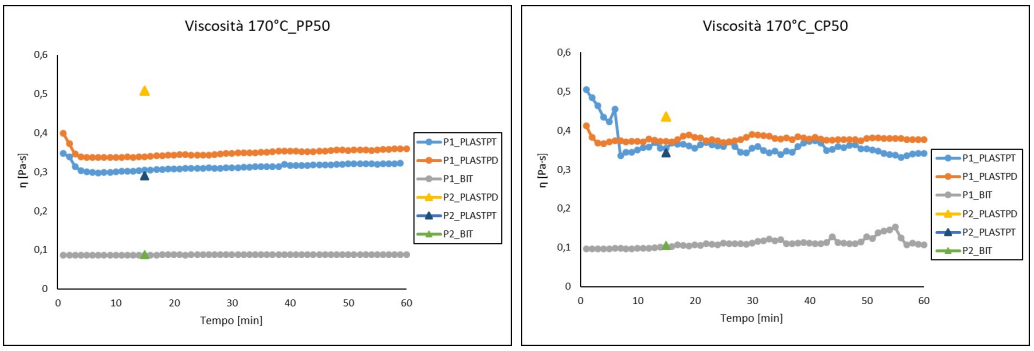


Figura 5.22: Confronto protocolli 170 °C

Dalle precedenti analisi è possibile notare inoltre che per i bitumi modificati con plastiche di recupero (PLASTPD e PLASTPT) con il sistema di misura PP50 e CC17 la viscosità aumenta nel tempo, effetto maggiormente visibile a temperature più elevate.
Con il sistema di misura CP50, la viscosità risulta essere poco stabile nel protocollo di prova 1 e diminuisce tra l'andata e il ritorno del protocollo di prova 2.
Tale effetto è dovuto a due processi che agiscono sulla viscosità durante le misurazioni:

- invecchiamento;
- separazione del materiale.

Per il primo processo la viscosità aumenta nel tempo, per il secondo processo la viscosità diminuisce nel tempo.
Da Tali valutazioni è possibile giustificare le misurazioni poco stabili ottenute con il CP50, e il fatto che la viscosità diminuisca nel protocollo di prova 2, soprattutto a 160 °C.

Al fine di poter confrontare numericamente i due protocolli di prova si è

deciso di mediare i valori degli ultimi 30 minuti di prova effettuata con il protocollo 1.

Di seguito è presente una rappresentazione tabellare dei valori medi dei due protocolli di prova per ogni materiale e ogni temperatura.

Dalle tabelle relative al bitume tradizionale 70/100 si nota che non presenta differenze sostanziali nei valori medi dei due protocolli di prova, poiché le misurazioni risultano poco variabili, come già evidenziato nelle valutazioni precedenti (tabelle 5.6, 5.9, 5.12).

	BIT 70/100			
	Viscosità media [Pa · s]			
	135 [°C]			
	PP50		**CP50**	
	1 rip	2 rip	1 rip	2 rip
Protocollo 1	0.36	0.37	0.38	0.38
Protocollo 2 andata	0.36	0.35	0.40	0.43
Protocollo 2 ritorno	0.35	0.35	0.40	0.41

Tabella 5.6: Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 135 °C BIT 70/100

	PLASTPD	
	Viscosità media [Pa · s]	
	135 [°C]	
	PP50	**CP50**
	1 rip	1 rip
Protocollo 1	1.48	1.56
Protocollo 2 andata	1.48	1.59
Protocollo 2 ritorno	1.61	1.47

Tabella 5.7: Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 135 °C PLASTPD

Il valore medio di viscosità del protocollo 1 a 135 °C per il PP50 risulta simile al valore di andata del protocollo 2, dal momento che il valore di ritorno ha un incremento di viscosità. Per il CP50, il valore del protocollo 1 è una media tra il valore di andata e ritorno del protocollo 2 (tabella 5.7)

	PLASTPT			
	Viscosità media [Pa · s]			
	135 [°C]			
	PP50		**CP50**	
	1 rip	2 rip	1 rip	2 rip
Protocollo 1	1.09	1.07	1.20	1.31
Protocollo 2 andata	1.00	1.09	1.79	1.16
Protocollo 2 ritorno	0.95	1.15	1.15	1.31

Tabella 5.8: Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 135 °C PLASTPT

Come per il bitume PLASTPD, il valore di viscosità a 135 °C con PP50 è conforme al valore di andata del protocollo 2, sia per la prima che per la

seconda ripetizione. Per il CP50, invece, dal momento che la viscosità nel secondo protocollo diminuisce tra l'andata e il ritorno, il valore medio del protocollo 1 risulta simile al valore di ritorno del protocollo 2 (tabella 5.8)

	BIT 70/100			
	Viscosità media [Pa · s]			
	160 [°C]			
	PP50		**CP50**	
	1 rip	2 rip	1 rip	2 rip
Protocollo 1	0.13	0.13	0.14	0.16
Protocollo 2 andata	0.12	0.13	0.14	0.19
Protocollo 2 ritorno	0.12	0.12	0.14	0.15

Tabella 5.9: Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 160 °C BIT 70/100

	PLASTPD	
	Viscosità media [Pa · s]	
	160 [°C]	
	PP50	**CP50**
	1 rip	1 rip
Protocollo 1	0.54	0.51
Protocollo 2 andata	0.62	0.61
Protocollo 2 ritorno	0.65	0.56

Tabella 5.10: Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 160 °C PLASTPD

Per il bitume PLASTPD, anche a 160 °C il valore di viscosità del protocollo 1 è simile al valore di andata del protocollo 2, poiché la viscosità aumenta nel ritorno del protocollo 2.

Per il CP50 succede l'opposto, poiché la viscosità diminuisce tra l'andata e il ritorno del protocollo 2 (tabella 5.10).

	PLASTPT			
	Viscosità media [Pa · s]			
	160 [°C]			
	PP50		**CP50**	
	1 rip	2 rip	1 rip	2 rip
Protocollo 1	0.44	0.55	0.49	0.48
Protocollo 2 andata	0.44	0.41	0.42	0.44
Protocollo 2 ritorno	0.45	0.42	0.44	0.50

Tabella 5.11: Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 160 °C PLASTPT

Per il bitume PLASTPT è possibile notare che i valori medi del protocollo 2 a 160 °C per il PP50 risultano essere quasi uguali, quindi è possibile eseguire un confronto con entrambi i valori.
Per il CP50, come per il bitume PLASTPD i valori risultano similari con il ritorno del protocollo 2 (tabella 5.10, 5.11).

	BIT 70/100			
	Viscosità media [Pa · s]			
	170 [°C]			
	PP50		**CP50**	
	1 rip	2 rip	1 rip	2 rip
Protocollo 1	0.09	0.09	0.10	0.13
Protocollo 2	0.09	0.09	0.10	0.11

Tabella 5.12: Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 170 °C BIT 70/100

	PLASTPD	
	Viscosità media [Pa · s]	
	170 [°C]	
	PP50	**CP50**
	1 rip	1 rip
Protocollo 1	0.35	0.38
Protocollo 2	0.51	0.43

Tabella 5.13: Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 170 °C PLASTPD

A 170 °C i valori di viscosità tra i due protocolli differiscono del 30% per il PP50 e del 15% con il CP50 (tabella 5.13).

	PLASTPT			
	Viscosità media [Pa · s]			
	170 [°C]			
	PP50		**CP50**	
	1 rip	2 rip	1 rip	2 rip
Protocollo 1	0.31	0.32	0.39	0.31
Protocollo 2	0.27	0.31	0.33	0.36

Tabella 5.14: Valori medi di viscosità Protocollo1 e 2 170 °C PLASTPT

Per il bitume PLASTPT, i valori differiscono di circa il 15% per entrambi i sistemi di misura e le ripetizioni, ad eccezione della seconda ripetizione con il PP50 in cui differiscono del 5% (tabella 5.14). È possibile notare inoltre che tenendo conto dei valori medi, il bitume PLASTPT, risulta avere meno variabilità nelle due ripetizioni.

Dall'analisi effettuata è emerso che per il bitume PLASTPT e PLASTPD, in

cui la viscosità non risulta costante nel tempo, il protocollo 1 risulta essere più adatto, poiché si osserva l'andamento per 60 minuti, per il bitume tradizionale, invece, dal momento che la viscosità risulta costante nel tempo, non sono presenti differenze tra il protocollo di prova 1 e 2.

5.3 Curve maestre

La prova effettuata è di tipo frequency sweep, in cui è stato impostato il range di frequenza e temperatura da analizzare secondo le direttive del gruppo internazionale RILEM. Per temperature da -6 °C a 34 °C si è utilizzato il sistema piatto-piatto da 8 mm (PP08), mentre per temperature da 34 °C a 82 °C si è utilizzato il sistema piatto-piatto da 25 mm (PP25).
Lo scopo di tale prova è quello di andare a reperire la norma del modulo complesso $|G^*|$ e l'angolo di fase δ per la costruzione delle curve maestre.
I limiti strumentali considerati riguardano il momento torcente e l'angolo di deflessione.
Il valore minimo strumentale del momento torcente è 0.001 μNm, ma a favore di sicurezza si è scelto di considerare 1 μNm (tabella Le misure che non rientrano in tali limiti sono state elise.

5.3.1 Ripetibilità

Nella valutazione dei risultati delle prove sperimentali si è tenuto conto da un alto delle specifiche dello strumento, al fine di considerare i limiti strumentali, dall'altro della ripetibilità delle prove, attraverso le differenze percentuali tra le due ripetizioni, che non devono eccedere più del 20%. Le differenze percentuali riguardano il modulo complesso G^* e l'angolo di fase δ.

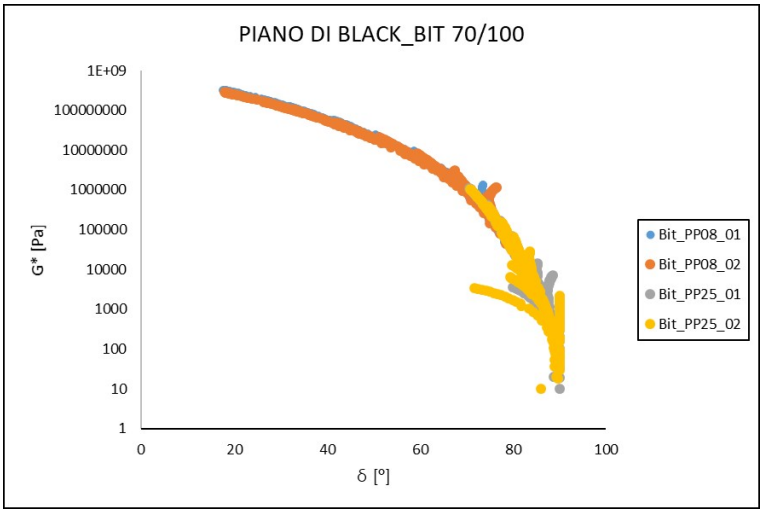


Figura 5.23: Diagramma di Black BIT70/100

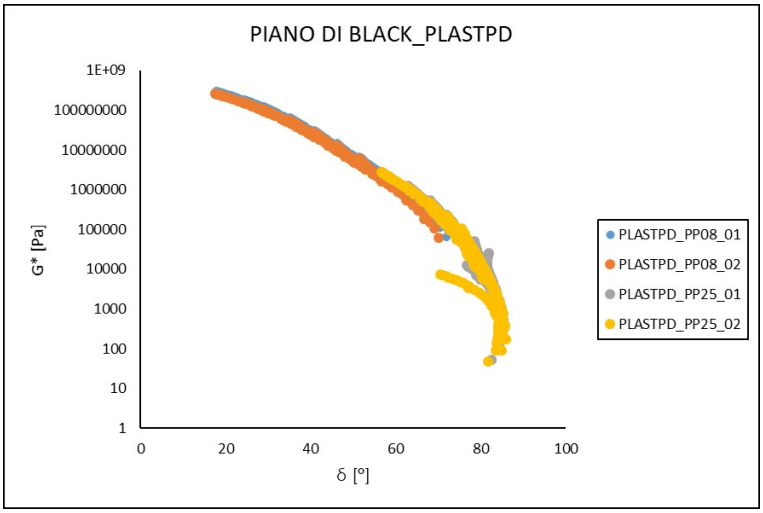


Figura 5.24: Diagramma di Black PLASTPD

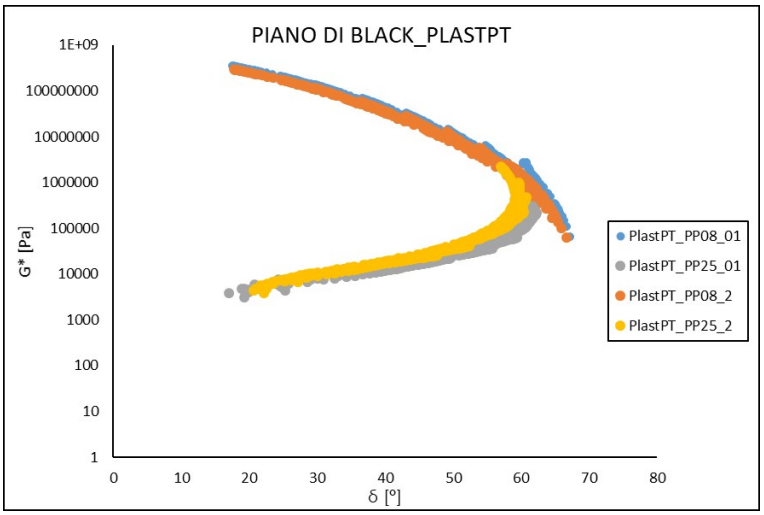


Figura 5.25: Diagramma di Black PLASTPT

Dalle figure (5.23, 5.24, 5.25) è possibile notare che per il bitume tradizionale 70/100 e il bitume PLASTPD, le differenze percentuali tra le due ripetizioni risulta essere circa il 10%, mentre il bitume PLASTPT presenta una maggiore variabilità, soprattutto alle alte temperature, con una differenza che oscillano tra il 15 e il 20%.

5.3.2 Confronto dei leganti bituminosi

Al fine di poter effettuare un' analisi sui diversi materiali si è deciso di sovrapporre graficamente i valori dei tre piani di Black.(figura 5.26)
Da tale sovrapposizione è possibile notare che il bitume modificato con plastiche di recupero (PE) denominato PLASTPD presenta un quantitativo di plastiche inferiore rispetto al bitume PLASTPT.
Il bitume denominato PLASTPT presenta di tendenza nell'intorno $\delta = 50$ °C, dovuto al fatto che i bitumi modificati con polimeri alle alte temperature risentono del richiamo elastico.

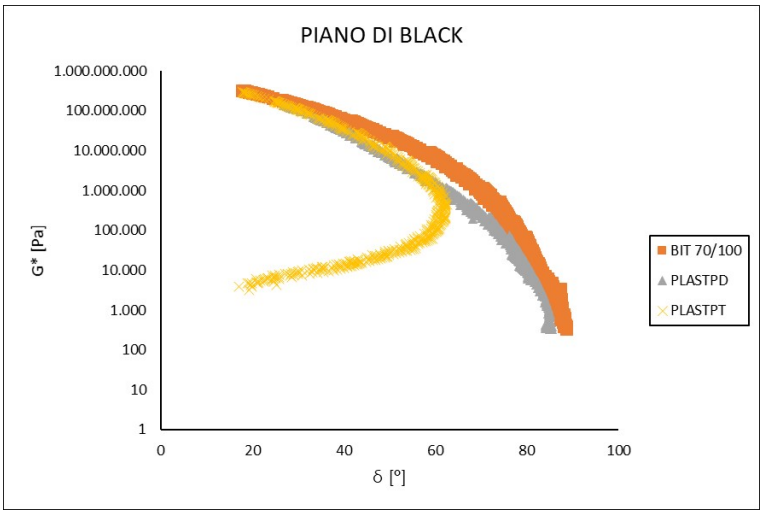


Figura 5.26: Diagramma di Black: confronto

Per l'analisi dei dati si è deciso di utilizzare il modello analitico di Christensen-Anderson-Marasetanu (CAM), descritto nel paragrafo (2.4.3).
Gli shift factors sono stati ricavati attraverso la formula di Williams-Landel-Ferry (2.27), scegliendo come parametri dipendenti dal materiale $C_1 = 19$ e $C_2 = 92$.
I parametri del modello sono stati calcolati con il risolutore di excel, attraverso un processo iterativo di ottimizzazione dei parametri C_1, C_2, $\log(G_g)$, $\log(\omega_c)$, R e andando a minimizzare lo scarto tra i quadrati del modulo complesso e dell'angolo di fase dei valori sperimentali $|G^*|$, δ e quelli ricavati dal modello $|G^*|_{CAM}$, δ_{CAM}. La temperatura di riferimento scelta è 20 °C con frequenza 10 Hz. I parametri ottimizzati sono (tabella 5.15):

	Parametri ottimizzati					
	$\log(G_g)$	$\log(\omega_c)$	R	m	C_1	C_2
BIT 70/100	2.87	2.96	1.32	1.01	13.5	119.2
PLASTPD	2.99	1.67	1.84	1.07	15.2	134.2
PLASTPT	2.49	4.12	0.75	0.61	14.8	121.2

Tabella 5.15: Parametri ottimizzati modello CAM

Di seguito verranno mostrate le curve maestre per i tre bitumi analizzati, valutando i dati provenienti dal modello e quelli provenienti dalla sperimentazione.

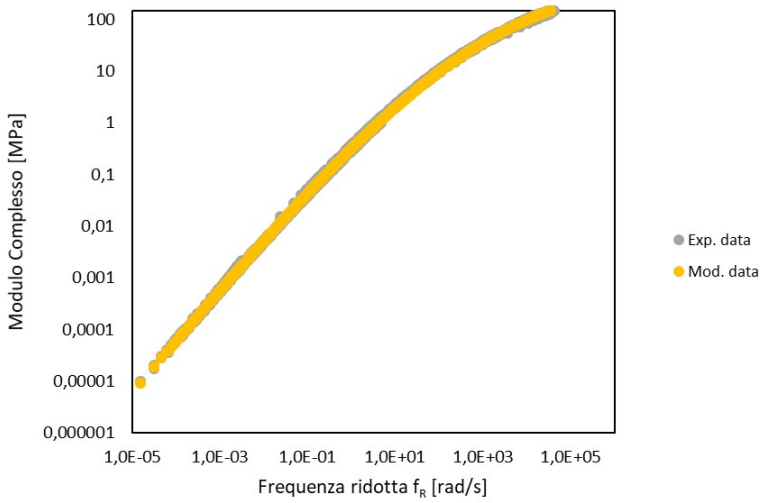


Figura 5.27: Curva maestra bitume 70/100

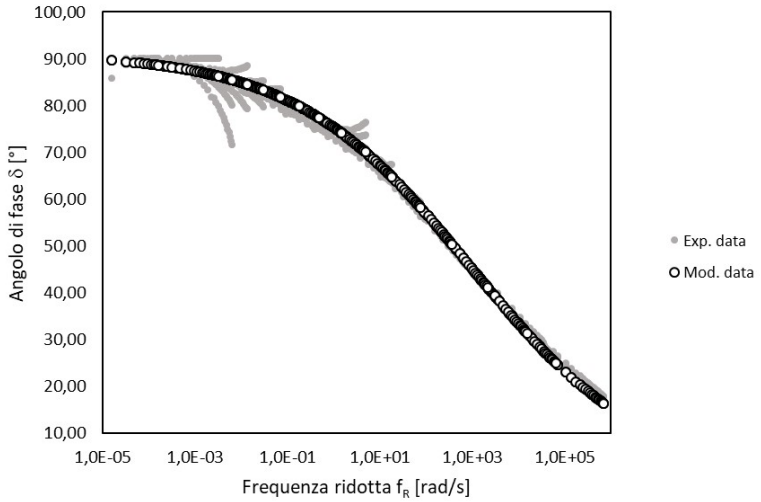


Figura 5.28: Angolo di fase bitume 70/100

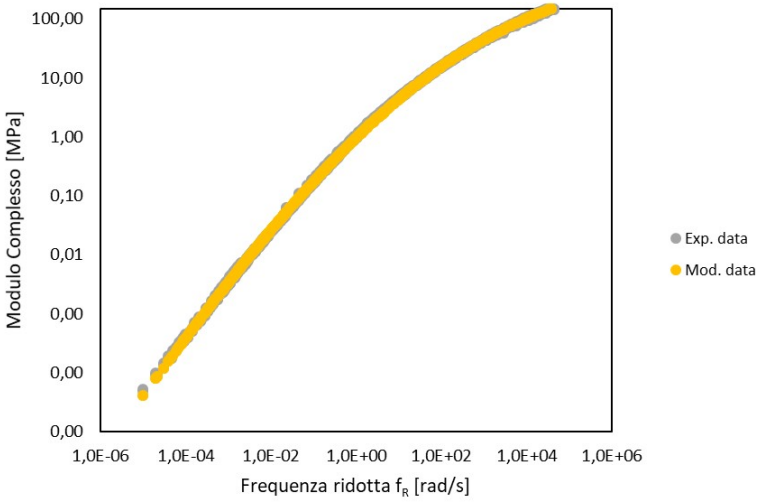


Figura 5.29: Curva maestra PLASTPD

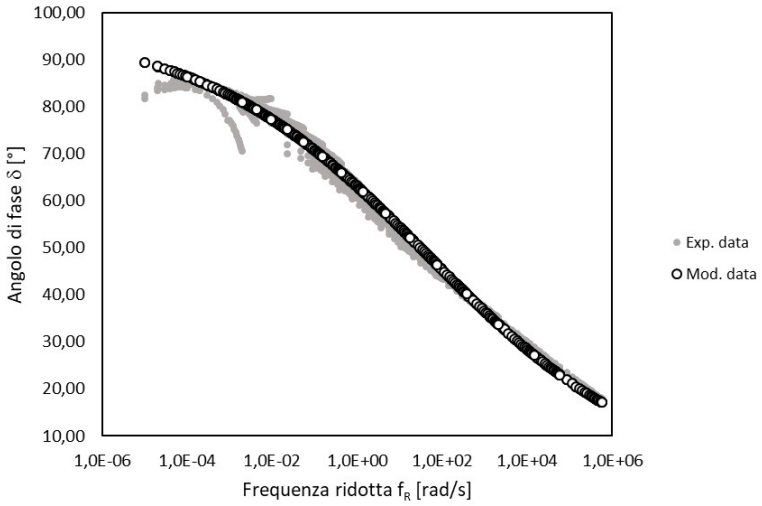


Figura 5.30: Angolo di fase PLASTPD

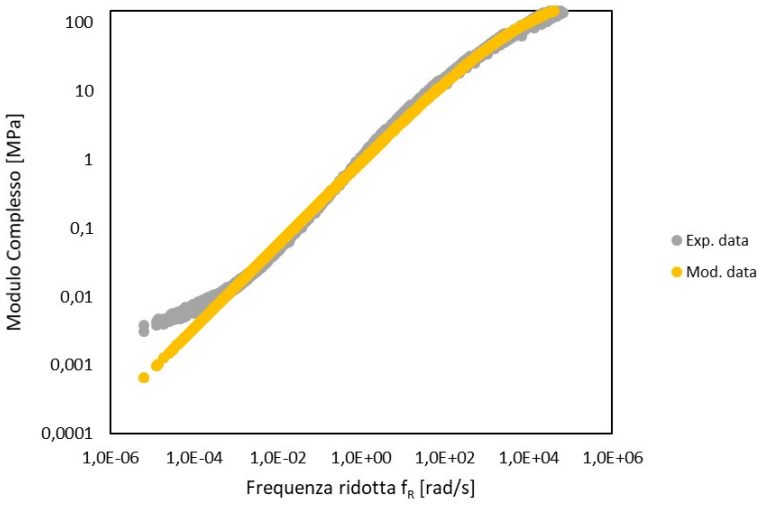


Figura 5.31: Curva maestra PLASTPT

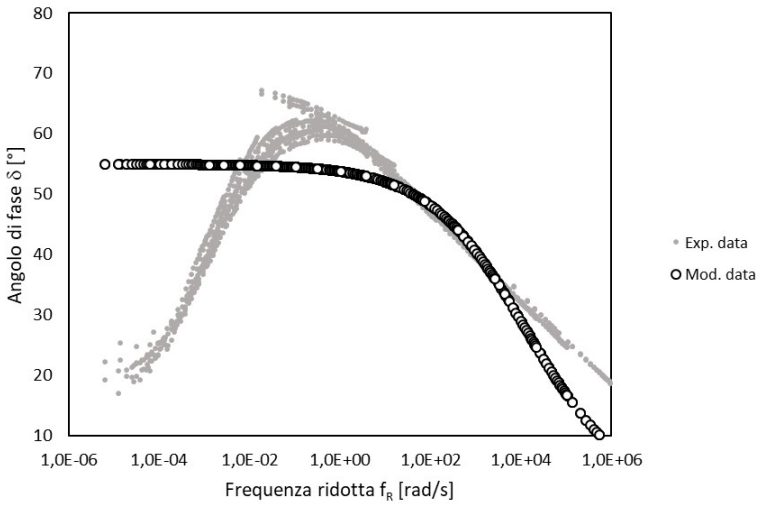


Figura 5.32: Angolo di fase PLASTPT

Dalla figura (5.32) si nota che non è stato possibile trovare una corrispondenza tra l'angolo di fase del modello e quello sperimentale, poiché alle alte temperature presenta un ritorno elastico.

5.4 Stabilità allo stoccaggio

Dalla prova di stoccaggio "tube test", si è deciso di analizzare la parte inferiore e superiore del tubo di alluminio con la prova palla e anello e con una prova al DSR, la viscosità a 135 °C con PP50 utilizzando il primo protocollo. I risultati ottenuti con la prova palla e anello presentano una differenza di temperatura di rammollimento di quasi 70 °C, definendo che il bitume modificato con plastiche di recupero presso il Politecnico di Torino (PLASTPT), non risulta stabile.

Questo risultato è stato ulteriormente avvalorato con l'esecuzione delle prove con il DSR, in cui per la parte superiore, la viscosità a 135 °C risulta essere talmente elevata da non rispettare la norma EN 13302, secondo cui un bitu-

me utilizzato per uso stradale non deve superare il valore 3 Pa · s.
Di seguito è riportato il grafico relativo alla viscosità della parte inferiore e superiore (figura 5.33).

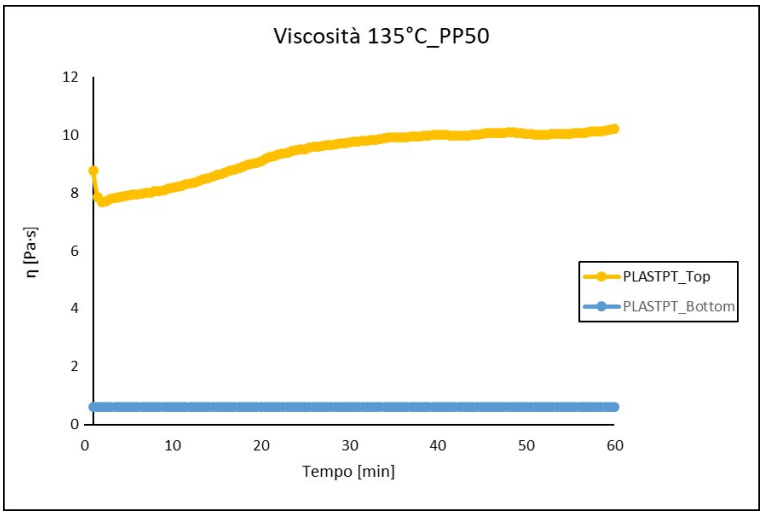


Figura 5.33: Viscosità 135 °C PP50 $\text{PLASTPT}_{\text{Bottom}}$ e $\text{PLASTPT}_{\text{Top}}$

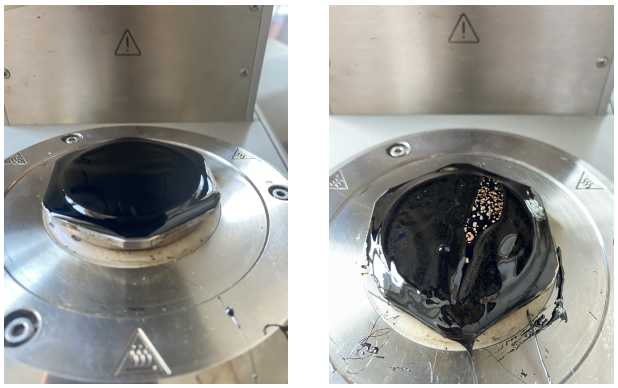


Figura 5.34: Campione $PLASTPT_{Bottom}$ e $PLASTPT_{Top}$ a fine prova

Dalla figura (5.34) si nota che a fine prova nel campione $PLASTPT_{Top}$ le plastiche si sono separate dal bitume, a differenza del campione $PLASTPT_{Bottom}$, che risulta essere simile ad un bitume tradizionale.

Conclusioni

CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi, attraverso l'indagine bibliografica e l'analisi sperimentale, è stato valutato il potenziale utilizzo del polietilene di recupero per la modifica dei bitumi.
La valutazione dei risultati ottenuti si basa sul confronto delle caratteristiche reologiche di due bitumi modificati con polietilene di recupero, prodotti presso due differenti laboratori di ricerca, rispetto al bitume tradizionale.
I principali risultati ottenuti determinano le seguenti conclusioni:

- nonostante i granuli di plastica siano stati aggiunti al bitume ad una temperatura maggiore di quella di fusione del polietilene, il materiale risulta eterogeneo e le fasi tendono a separarsi. Questo risultato è stato comprovato dal test di stabilità, che ha permesso di osservare una separazione di fase alle alte temperature, in cui le plastiche di recupero migrano verso la parte superiore del campione di legante;

- l'impiego del polietilene nei bitumi comporta una modifica delle caratteristiche meccaniche del materiale. In particolare si osserva un incremento della temperatura di rammollimento, della viscosità, del modulo complesso e una riduzione dell'angolo di fase. Ciò evidenzia come il legante modificato con PE risulti caratterizzato da una maggiore rigidezza e da una maggiore risposta elastica;

- dal confronto dei bitumi modificati si osserva che sono presenti differenze importanti tra i materiali, probabilmente dovute a diverso contenuto di plastica nei bitumi modificati. Si ipotizza che il campione ricevuto sia stato prelevato da un lotto non omogeneo e che avesse un quantitativo di plastiche minore. Questo risultato si evidenzia sia nella temperatura di rammollimento, sia nell'analisi viscoelastica, dove con i diagrammi di Black e la successiva costruzione delle curve maestre, si evince che

il bitume modificato presso il Politecnico di Torino è caratterizzato da una maggiore elasticità alle alte temperature;

- per quanto concerne l'impiego delle tecniche di misura normalmente adottate per la caratterizzazione dei bitumi convenzionali, si è osservato che l'andamento della prova dipende dalla rappresentatività del campione, dai sistemi di misura utilizzati e in particolare per la viscosità, dal protocollo di prova. Dalle misurazioni di viscosità si nota che il sistema di misura CP50 non risulta essere rappresentativo per i bitumi modificati, poiché la viscosità risulta molto variabile, a differenza degli altri due sistemi di misura.
  Bisogna considerare inoltre che durante la prova, nel provino agiscono due fenomeni, l'invecchiamento e la separazione del materiale alle alte temperature, per cui la viscosità non rimane costante nel tempo.

- dal confronto tra i due protocolli di prova utilizzati per la viscosità, si evince che per il bitume tradizionale è possibile utilizzarli entrambi, poiché la differenza tra i valori risulta trascurabile. Per i bitumi modificati, è preferibile utilizzare il protocollo in cui viene evidenziato l'andamento della viscosità nel tempo e non solo il valore medio (protocollo 1);

La stabilità allo stoccaggio nel bitume modificato con polietilene di recupero risulta problematica per l'impiego, per cui una soluzione potrebbe essere quella di impiegarlo dopo la miscelazione senza effettuare lo stoccaggio.

Bibliografia

[1] Köfteci, S., Ahmedzade, P., Kultayev, B.
Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics,(2014) Construction and Building Materials, 73, pp. 592-602.

[2] *www.wwf.it*

[3] Biswas, A., Goel, A., Potnis, S.
"Performance comparison of waste plastic modified versus conventional bituminous roads in Punecity: A case study", (2020) Case Studies in Construction Materials, 13, art. no. e00411. Cited 2 times.

[4] Manu Sasidharan, Dr Mehran Eskandari Torbaghan, Dr Michael Burrow.
"Using waste plastics in road construction", (2019) University of Birmingham

[5] Gawande Amit, G.S. Zamre, V.C. Renge, G.R. Bharsakale
"Utilization of waste plastic in asphalting of roads- A Review", (2012) Scientific Reviews and Chemical Compositions,pp. 147–157.

[6] *www.plasticfinder.it*

[7] *www.xpolymers.it*

[8] Karmakar, S., Roy, T.K.
"Effect of waste plastic and waste tires ash on mechanical behavior of bitumen", (2016) Journal of Materials in Civil Engineering, 28 (6), art. no. 04016006.

[9] Yao, Z., Zhang, J., Gao, F., Liu, S., Yu, T.
Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen(2018) Construction and Building Materials, 170, pp. 217-224.

[10] Richard Willis, PhD, Fan Yin, PhD, PE, Raquel Moraes, PhD
"Recycled Plastics in Asphalt Part A: State of the Knowledge" (2020), National Asphalt Pavement Association

[11] Angiolini Marco
Tesi magistrale "Utilizzo Del Reometro Rotazionale Per La Valutazione Della Temperatura Minima Del "Performance Grade" Di Bitumi Ad Uso Stradale"

[12] Anderson D., Christensen D., Bahia H.U., Dongre R., Sharma M., Antle C., Button J.
""Binder Characterization And Evaluation Vol. 3: Physical Characterization. Shrpa-369", Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994."

[13] *www.treccani.it*

[14] Schoff, C. and P. Kamarchik
. "Rheology and Rheological Measurements." (2005).

[15] Christopher W. Macosko
"Rheology Principles, Measurements and Applications." (2004)

[16] Y. Becker, M.P. Mèndez, Y. Rodriguez
"Polymer modified asphalt" Vision tecnologica/ Vol9 N°1, 2001.

[17] Joohari, I.B., Giustozzi, F.
"Chemical and high-temperature rheological properties of recycled plastics-polymer modified hybrid bitumen",(2020) Journal of Cleaner Production, 276, art. no. 123064, . Cited 4 times.

[18] Nizamuddin, S., Jamal, M., Santos, J., Giustozzi, F.
"Recycling of low-value packaging films in bitumen blends: A grey-based multi criteria decision making approach considering a set of laboratory performance and environmental impact indicators", (2021) Science of the Total Environment, 778, art. no. 146187.

[19] Yao, Z., Zhang, J., Gao, F., Liu, S., Yu, T.
"Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen",(2018) Construction and Building Materials, 170, pp. 217-224. Cited 33 times.

[20] Xia, T., Zhang, A., Xu, J., Chen, X., Xia, X., Zhu, H., Li, Y.
"Rheological behavior of bitumen modified by reclaimed polyethylene and polypropylene from different recycling sources", (2021) Journal of Applied Polymer Science, 138 (20), art. no. 50435.

[21] Fang, C., Liu, P., Yu, R., Liu, X., 2014.
"Preparation process to affect stability in waste polyethylene-modified bitumen", (2014). Construct. Build. Mater.

[22] Zhang, H., Wu, X., Cao, D., Zhang, Y., He, M.,.
"Effect of linear low densitypolyethylenegrafted with maleic anhydride (LLDPE-g-MAH) on properties of high density-polyethylene/styrene

e butadiene e styrene (HDPE/SBS) modified asphalt.", (2013). Construct. Build. Mater. 47, 192e198.

[23] Nizamuddin, S., Jamal, M., Gravina, R., Giustozzi, F.
"Recycled plastic as bitumen modifier: The role of recycled linear low-density polyethylene in the modification of physical, chemical and rheological properties of bitumen",(2020) Journal of Cleaner Production, 266, art. no. 121988. Cited 11 times.

[24] Okhotnikova, E.S., Frolov, I.N., Ganeeva, Y.M., Firsin, A.A., Yusupova, T.N.
"Rheological behavior of recycled polyethylene modified bitumens", (2019) Petroleum Science and Technology, 37 (10), pp. 1136-1142. Cited 1 time.

[25] M. Murphy, M. O'Mahony, C. Lycett and I.Jamieson.
"Bitumens modified with recycled polymers", (2000) Materials and Structures, Vol.3,3, pp 438-444

[26] Abdel-Goad, M.
"Waste plastic-modified bitumen: Rheological study" (2009) Journal of Engineering Research, 6 (1), pp. 76-81. Cited 1 time.

[27] Kakar, M.R., Mikhailenko, P., Piao, Z., Bueno, M., Poulikakos, L.
"Analysis of waste polyethylene (PE) and its by-products in asphalt binder",(2021) Construction and Building Materials, 280, art. no. 122492, . Cited 1 time.

[28] *EN 1427:2015, BSI Standars Publication*

[29] *EN 13399:2017, BSI Standars Publication*