

POLITECNICO DI TORINO

*Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del
Territorio e delle Infrastrutture*

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Specialistica

**Gli effetti delle proprietà reologiche del legante sul flow
number delle miscele bituminose**



Relatori

prof. Orazio Baglieri

prof. Ezio Santagata

ing. Pier Paolo Riviera

Candidato

Giuseppe Foti

Dicembre 2017

A mio nonno Giuseppe e
alla mia famiglia

Sommario

| | |
|---|-------------|
| INDICE DELLE FIGURE | IV |
| INDICE DELLE TABELLE..... | VIII |
| INTRODUZIONE..... | 1 |
| Struttura della tesi | 2 |
| CAPITOLO 1 RASSEGNA SUGLI AMMALORAMENTI DELLE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI CON APPROFONDIMENTO DEL FENOMENO DELL' ORMAIAMENTO | 3 |
| 1.1 Il degrado delle pavimentazioni..... | 3 |
| 1.2 Gli ammaloramenti delle pavimentazioni stradali flessibili | 3 |
| 1.2.1 Rottura per fatica | 4 |
| 1.2.2 Fessurazione a blocchi (<i>Block cracking</i>) | 5 |
| 1.2.3 Fessurazione di bordo (<i>Edge cracking</i>) | 6 |
| 1.2.4 Fessurazione longitudinale e trasversale..... | 6 |
| 1.2.5 Fessurazione da scorrimento | 6 |
| 1.2.6 Risalti e sacche (<i>Bumps and sags</i>) | 7 |
| 1.2.7 Ondulazioni | 7 |
| 1.2.8 Depressioni..... | 7 |
| 1.2.9 Buche (<i>Potholes</i>) | 8 |
| 1.2.10 Rigonfiamenti | 8 |
| 1.2.11 Scalinamento tra corsia e banchina..... | 9 |
| 1.2.12 Spostamento del manto per spinta orizzontale (<i>Shoving</i>)..... | 9 |
| 1.2.13 Essudazione di bitume..... | 9 |
| 1.2.14 Levigatura dell'aggregato..... | 10 |
| 1.2.15 Scagliatura della superficie..... | 10 |
| 1.2.16 Rappezzi..... | 10 |
| 1.2.17 Ormaiamento (<i>rutting</i>) | 10 |
| 1.2.18 Cause dell'ormaiamento | 12 |
| 1.2.19 Metodi per la valutazione della resistenza all'ormaiamento | 14 |
| CAPITOLO 2 DALL'ORIGINE DEL BITUME AI MODELLI REOLOGICI | 17 |
| 2.1 Origine del bitume | 17 |
| 2.2 Processi produttivi dei bitumi tradizionali..... | 18 |
| 2.2.1 La distillazione frazionata..... | 18 |
| 2.2.2 Trattamento termico dei residui | 20 |
| 2.2.3 Produzione per sintesi o ricostruzione | 21 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.2.4 | <i>L'ossidazione</i> | 22 |
| 2.3 | Composizione chimica del bitume | 23 |
| 2.3.1 | <i>Struttura del bitume</i> | 25 |
| 2.3.1.1 | <i>Comportamento del bitume: "sol" e "gel"</i> | 27 |
| 2.4 | Classificazione empirica dei bitumi | 28 |
| 2.4.1 | <i>Prova di rammollimento</i> | 28 |
| 2.4.2 | <i>Prova di penetrazione</i> | 29 |
| 2.4.3 | <i>Prova Fraass</i> | 29 |
| 2.4.4 | <i>Prova di duttilità</i> | 30 |
| 2.5 | Il bitume modificato con polimeri | 31 |
| 2.5.1 | <i>La modifica con SBS</i> | 32 |
| 2.6 | La reologia del bitume | 33 |
| 2.6.1 | <i>Modelli reologici elementari</i> | 33 |
| 2.6.2 | <i>Modelli reologici del bitume</i> | 35 |
| 2.6.2.1 | <i>Modello viscoelastico lineare di Maxwell</i> | 36 |
| 2.6.2.2 | <i>Modello viscoelastico lineare di Kelvin-Voigt</i> | 37 |
| 2.6.2.3 | <i>Modello di Burger</i> | 38 |
| 2.6.2.4 | <i>I modelli generalizzati</i> | 39 |
| CAPITOLO 3 STRUMENTI E METODOLOGIE DI PROVA UTILIZZATI NEL CORSO DELLA SPERIMENTAZIONE | | 41 |
| 3.1 | Analisi granulometrica degli aggregati | 41 |
| 3.2 | Carbolite | 44 |
| 3.3 | Massima Massa Volumica Teorica (MMVT) | 45 |
| 3.4 | Massima Massa Volumica Apparente (MMVA) | 48 |
| 3.5 | Compattazione con pressa a taglio giratorio | 49 |
| 3.6 | Dynamic Shear Rheometer | 51 |
| 3.7 | Single Shear Creep Recovery | 52 |
| 3.7.1 | <i>RTFOT Rolling Thin Film Oven Test</i> | 52 |
| 3.8 | Il Viscosimetro Rotazionale RV | 53 |
| 3.9 | Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) | 55 |
| 3.10 | Flow Number | 55 |
| CAPITOLO 4 INDAGINE SPERIMENTALE | | 57 |
| 4.1 | Obiettivi | 57 |
| 4.2 | Materiali | 57 |
| 4.3 | Caratterizzazione preliminare | 58 |
| 4.3.1 | <i>Analisi granulometrica di ogni classe di aggregato</i> | 58 |

| | | |
|--|--|------------|
| 4.3.2 | <i>Ottimizzazione della curva di progetto</i> | 61 |
| 4.4 | Mix Design | 62 |
| 4.5 | Verifica del contenuto di bitume | 64 |
| 4.6 | Calcolo della MMVT..... | 64 |
| 4.7 | Calcolo della massa effettiva da introdurre in fustella | 65 |
| 4.8 | Preparazione dei campioni per il test all'Ampt | 66 |
| 4.8.1 | <i>Compattazione con Pressa a Taglio Giratorio</i> | 66 |
| 4.8.2 | <i>Carotaggio e taglio dei campioni</i> | 66 |
| 4.8.3 | <i>Verifica dell'indice dei vuoti del "core"</i> | 68 |
| 4.9 | Test del Flow Number | 69 |
| 4.9.1 | <i>Impostazione dei parametri di prova e sistemazione del campione</i> | 69 |
| 4.9.2 | <i>Esecuzione del test e fitting del Flow Number</i> | 70 |
| 4.10 | Single Shear Creep Recovery (SSCR)..... | 71 |
| CAPITOLO 5 ANALISI DATI E INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI | | 74 |
| 5.1 | Analisi dati della procedura SSCR | 74 |
| 5.2 | Analisi dati della prova di Flow Number..... | 76 |
| 5.3 | Analisi della correlazione CCR-FN..... | 79 |
| CONCLUSIONI | | 89 |
| BIBLIOGRAFIA | | 91 |
| ALLEGATO 1: MASSIMA MASSA VOLUMICA TEORICA E CARBOLITE | | 93 |
| ALLEGATO 2: COMPATTAZIONE CON PRESSA A TAGLIO GIRATORIA | | 97 |
| ALLEGATO 3: FLOW NUMBER | | 103 |
| ALLEGATO 4: SINGLE SHEAR CREEP RECOVERY | | 119 |

Indice delle figure

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 rottura per fatica..... | 5 |
| Figura1.2 block cracking..... | 5 |
| Figura1.3 edge cracking | 6 |
| Figura1.4 fessurazione longitudinale e trasversale | 6 |
| Figura1.5 fessurazioni da scorrimento | 7 |
| Figura1.6 ondulazioni..... | 7 |
| Figura1.7 depressioni | 8 |
| Figura1.8 potholes..... | 8 |
| Figura1.9 rigonfiamenti..... | 8 |
| Figura1.10 shoving..... | 9 |
| Figura1.11 essudazione di bitume (Di Mascio P., Miseri F., Moretti L.) | 9 |
| Figura1.12 scagliatura della superficie (Di Mascio P., Miseri F., Moretti L.)..... | 10 |
| Figura1.13 rappezzi..... | 10 |
| Figura1.14 fenomeno di rutting..... | 11 |
| Figura1.15 formazione delle ormaie: I fase | 12 |
| Figura1.16 formazione delle ormaie: II fase | 12 |
| Figura1.17 plasticizzazione dovuta ad insufficienti spessori degli strati in conglomerato bituminoso o ad un'errata portanza del sottofondo..... | 13 |
| Figura1.18 ormaie dovute alla qualità del conglomerato bituminoso..... | 13 |
| Figura1.19 resistenza al taglio: influenza del bitume..... | 14 |
| Figura 2.1 bitume naturale | 17 |
| Figura 2.2 schema di frazionamento del bitume | 18 |
| Figura 2.3 schema di distillazione frazionata..... | 19 |
| Figura 2.4 produzione dei bitumi da visbreaking..... | 20 |
| Figura 2.5 produzione dei bitumi da impianto di deasfaltazione basi lubrificanti..... | 21 |
| Figura 2.6 schema di un impianto di ossidazione | 22 |
| Figura 2.7 classificazione degli idrocarburi | 24 |
| Figura 2.8 schema strutturale del bitume | 26 |
| Figura 2.9 struttura "sol" e "gel" del bitume | 27 |
| Figura 2.10 prova di rammollimento (UNI EN 1427) | 29 |
| Figura 2.11 penetrometro utilizzato per effettuare la prova di penetrazione (UNI EN 1426)..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.12 utensile per la prova Fraass (EN 12593) | 30 |
| Figura 2.13 prova di duttilità | 30 |
| Figura 2.14 stirene-butadiene-stirene | 32 |
| Figura 2.15 molla di Hooke | 33 |
| Figura 2.16 smorzatore viscoso di Newton | 34 |
| Figura 2.17 confronto tra comportamento elastico e viscoelastico di un materiale .. | 35 |
| Figura 2.18 modello di Maxwell..... | 36 |
| Figura 2.19 modello viscoelastico lineare di Kelvin-Voigt | 37 |
| Figura 2.20 modello di Burger..... | 39 |
| Figura 2.21 modello generalizzato di Kelvin-Voigt | 40 |
| Figura 2.22 modello generalizzato di Maxwell | 40 |
| Figura 3.1 schema di funzionamento del setacciature | 42 |
| Figura 3.2 pila di setacci in un agitatore meccanico..... | 42 |
| Figura 3.3 setacci utilizzati (2 e 0.063mm) | 43 |
| Figura 3.4 lavaggio degli aggregati post carbolite..... | 43 |
| Figura 3.5 cestello d'acciaio utilizzato per la prova..... | 44 |
| Figura 3.6 quartatura della miscela di bitume..... | 45 |
| Figura 3.7 confronto tra prima e dopo la carbolite | 45 |
| Figura 3.8 materiale disgregato (sx) e quartato (dx)..... | 46 |
| Figura 3.9 picnometro vuoto e picnometro pieno..... | 47 |
| Figura 3.10 fase di disaerazione | 47 |
| Figura 3.11 picnometro completo di menisco e dettaglio..... | 48 |
| Figura 3.12 massa secca (sx) e massa satura in acqua (dx) di un campione di miscela | 48 |
| Figura 3.13 schema di funzionamento e pressa a taglio girevole utilizzata..... | 49 |
| Figura 3.14 estrazione del campione dalla fustella..... | 50 |
| Figura 3.15 Dynamic Shear Rheometer..... | 51 |
| Figura 3.16 schema di funzionamento del DSR | 51 |
| Figura 3.17 esempio della fase di creep della SSCR | 52 |
| Figura 3.18 bitume versato in bicchieri cilindrici..... | 53 |
| Figura 3.19 Viscosimetro Rotazionale (dx) e sistema di acquisizione dati (sx)..... | 54 |
| Figura 3.20 contenitore del bitume | 54 |
| Figura 3.21 AMPT (a sinistra) e cella di carico triassiale (a destra) | 55 |
| Figura 3.22 tipica curva di Flow Number registrata dal software dell' AMPT | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.1 le 4 classi di aggregato impiegate: andando da sinistra verso destra si ha il pietrisco, la graniglia, la sabbia e il filler | 58 |
| Figura 4.2 il bitume 70/100 (a sinistra), il bitume 50/70 (al centro) ed il bitume modificato (a destra)..... | 58 |
| Figura 4.3 curve granulometriche delle classi di aggregato..... | 60 |
| Figura 4.4 curva granulometrica di progetto all'interno del fuso CIRS | 61 |
| Figura 4.5 materiale pesato correttamente e portato alla temperatura di miscelazione | 63 |
| Figura 4.6 produzione della miscela e versamento nei sacchi | 63 |
| Figura 4.7 campioni ottenuti dalla compattazione con la Pressa a Taglio Giratorio . | 66 |
| Figura 4.8 campione fissato e pronto ad essere carotato..... | 67 |
| Figura 4.9 carotaggio e campione carotato | 67 |
| Figura 4.10 macchina troncatrice e campione tagliato..... | 68 |
| Figura 4.11 campioni 100 x 150mm | 68 |
| Figura 4.12 impostazione dei parametri della prova di Flow Number..... | 70 |
| Figura 4.13 esecuzione del test e provini deformati a fine prova | 71 |
| Figura 4.14 curva del Flow Number di un campione esemplificativo | 71 |
| Figura 4.15 rappresentazione di J in funzione del tempo di carico..... | 72 |
| Figura 5.1 deformazione di scorrimento del bitume “Tal Quale” 50/70 al variare della temperatura..... | 74 |
| Figura 5.2 deformazione di scorrimento del bitume“Tal Quale” 70/100 al variare della temperatura..... | 75 |
| Figura 5.3deformazione di scorrimento del bitume modificato con SBS al variare della temperatura..... | 75 |
| Figura 5.4 rappresentazione grafica CCR-T | 76 |
| Figura 5.5 curve di Flow Number delle miscele realizzate con bitume 50/70..... | 77 |
| Figura 5.6 curve di Flow Number delle miscele realizzate con bitume 70/100..... | 77 |
| Figura 5.7 curve di Flow Number delle miscele realizzate con bitume modificato... | 78 |
| Figura 5.8 curve di Flow Number di miscele realizzate con bitumi differenti ma con la stessa % B..... | 79 |
| Figura 5.9 curve di Flow Number alle temperature di 52 e 58°C | 79 |
| Figura 5.10 relazione FN-%V dei campioni con 4% di bitume 70/100..... | 80 |
| Figura 5.11 relazione FN-%V dei campioni con 5% di bitume 70/100..... | 80 |
| Figura 5.12 relazione FN-%V dei campioni con 6% di bitume 70/100..... | 81 |
| Figura 5.13 relazione FN-%V dei campioni con 4% di bitume modificato con SBS | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.14 relazione FN-%V dei campioni con 5% di bitume modificato con SBS | 81 |
| Figura 5.15 relazione FN-%V dei campioni con 6% di bitume modificato con SBS | 82 |
| Figura 5.16 relazione FN-%V dei campioni con 4% di bitume 50/70 | 82 |
| Figura 5.17 relazione FN-%V dei campioni con 5% di bitume 50/70 | 82 |
| Figura 5.18 relazione FN-%V dei campioni con 6% di bitume 50/70 | 83 |
| Figura 5.19 CCR-FN di un campione con 4%B e 4%V | 83 |
| Figura 5.20 CCR-FN di un campione con 5%B e 4%V | 83 |
| Figura 5.21 CCR-FN di un campione con 6%B e 4%V | 84 |
| Figura 5.22 CCR-FN di un campione con 4%B e 6%V | 84 |
| Figura 5.23 CCR-FN di un campione con 5%B e 6%V | 84 |
| Figura 5.24 CCR-FN di un campione con 6%B e 6%V | 84 |
| Figura 5.25 Correlazione CCR-FN | 85 |
| Figura 5.26 rette con il 4% di bitume | 86 |
| Figura 5.27 rette con il 5% di bitume | 86 |
| Figura 5.28 rette con il 6% di bitume | 86 |
| Figura 5.29 rette con la stessa percentuale dei vuoti | 87 |
| Figura 5.30 pendenza in funzione della %B | 88 |

Indice delle tabelle

| | |
|---|----|
| Tabella 1.1 ammaloramenti di una pavimentazione stradale flessibile..... | 4 |
| Tabella 2.1 composizione elementare del bitume | 23 |
| Tabella 2.2 analisi chimica di bitumi estratti da petrolio avente origini differenti | 25 |
| Tabella 2.3 specifiche CNR per la classificazione dei bitumi ad uso stradale..... | 30 |
| Tabella 3.1 massa minima richiesta per l'analisi granulometrica degli aggregati | 41 |
| Tabella 3.2 quantitativi di materiale prescritti dalla normativa | 44 |
| Tabella 4.1 analisi granulometrica del pietrisco 5-15 | 59 |
| Tabella 4.2 analisi granulometrica della graniglia 3-8..... | 59 |
| Tabella 4.3 analisi granulometrica della sabbia 0-5 | 59 |
| Tabella 4.4 analisi granulometrica del filler..... | 60 |
| Tabella 4.5 distribuzione granulometrica di tutte le classi di aggregato | 60 |
| Tabella 4.6 curva del centro fuso, curva di progetto e loro differenza | 61 |
| Tabella 4.7 percentuali di aggregato della curva di progetto | 61 |
| Tabella 4.8 temperatura di miscelazione..... | 62 |
| Tabella 4.9 massa in kg di ciascun materiale della miscela | 62 |
| Tabella 4.10 risultato della carbolite per una miscela con il 5% di bitume | 64 |
| Tabella 4.11 prova al picnometro di una miscela con il 5% di bitume | 64 |
| Tabella 4.12 tempo di carico della prova SSCR | 72 |
| Tabella 5.1 tempo di carico della prova SSCR dei bitumi | 74 |
| Tabella 5.2 valori del CCR a tutte le temperature di prova..... | 76 |
| Tabella 5.3 valori di Flow Number delle miscele esaminate | 78 |
| Tabella 5.4 valori di FN in funzione della %V dei campioni realizzati con bitume 70/100..... | 80 |
| Tabella 5.5 valori di FN in funzione della %V dei campioni realizzati con bitume SBS | 81 |
| Tabella 5.6 valori di FN in funzione della %V dei campioni realizzati con bitume 50/70 | 82 |
| Tabella 5.7 parametro "b" delle rette..... | 87 |

Introduzione

Nel corso degli ultimi decenni l'infrastruttura stradale ha conosciuto un notevole sviluppo. In tutto il mondo, infatti, sono state costruite diverse migliaia di chilometri di nuove strade al fine di soddisfare le esigenze dei volumi di traffico in aumento. Inoltre, negli anni, la quantità di automezzi (autocarri, autotreni, autoarticolati) è aumentata in modo costante a causa della presenza di una quantità più elevata di merci, le quali, piuttosto che su rotaie vengono trasportate su strada, considerata la maggiore rapidità e flessibilità che questo tipo di trasporto offre. Il derivante incremento del traffico e delle sollecitazioni delle ruote, il maggiore carico per asse e il progredire degli anni sono tutti fattori che concorrono al deterioramento delle sedi stradali e quindi al decremento delle prestazioni in esercizio delle stesse. Pertanto, molti sono gli ammaloramenti che si possono verificare in una pavimentazione flessibile. Uno dei quali è la formazione delle ormaie, ovvero quel fenomeno chiamato ormaimento (rutting).

Quando parliamo di ormaie ci riferiamo alle depressioni longitudinali che si sviluppano sul piano viabile accompagnate da sollevamenti ai lati. Si tratta di veri e propri solchi che si formano ad alte temperature per accumulo di deformazioni permanenti in seguito al passaggio costante dei veicoli. Le suddette deformazioni permanenti, infatti, non si sviluppano alle basse temperature ed in assenza di traffico.

Il fenomeno è preoccupante poiché, oltre a provocare la compromissione della regolarità trasversale, i sollevamenti laterali delle ormaie impediscono l'allontanamento delle acque che invece si accumulano nei solchi, con la conseguente possibilità del verificarsi dell' "acqua planning". Pertanto, questo tipo di degrado della pavimentazione risulta essere particolarmente allarmante dal punto di vista della sicurezza stradale.

Come sopra riferito, la formazione delle ormaie è dovuta all'alta temperatura; le pavimentazioni flessibili sono costituite da più strati legati sovrapposti dei quali è lo strato superiore ad essere più sensibile e vulnerabile in quanto la temperatura a cui esso è soggetto è superiore, sia alla temperatura dell'aria, sia a quella dei vari strati sottostanti, a causa dell'attrito tra pneumatico e superficie stradale.

I fattori presi in considerazione per impedire o limitare il fenomeno oggetto della nostra attenzione sono le proprietà del bitume, le caratteristiche degli aggregati e la composizione volumetrica della miscela, ovvero tutte le componenti della miscela stessa. Tra questi è proprio il bitume che occupa un maggior ruolo in termini di resistenza al rutting attraverso il suo comportamento viscoelastico.

L'uso di leganti modificati come quelli contenenti polimeri SBS (stirene-butadiene-stirene) o gomma AR (asphalt rubber) può ridurre notevolmente la deformabilità della sovrastruttura in termini di ormaiamento. Ciò è dovuto alla maggiore rigidità ed elasticità fornita dalla modifica.

Tuttavia, poiché il miglioramento delle caratteristiche di base di un bitume può aumentare notevolmente il suo costo, è necessario avere metodi di prova affidabili di laboratorio e criteri di classificazione per stabilire, prima della sua messa in opera, quale miscela bituminosa risulta essere più idonea a limitare l'accumulo di deformazione permanente e al contempo la più economica.

Struttura della tesi

Il presente lavoro può essere suddiviso in due parti, la prima dedicata ad una rassegna letteraria dei diversi ammaloramenti di una sovrastruttura in conglomerato bituminoso con approfondimento, più nel dettaglio, del fenomeno dell'ormaiamento. Questa parte si completa con un'analisi del bitume: dalla sua origine ai modelli reologici che spiegano il loro comportamento viscoelastico. La seconda parte, invece, è dedicata all'indagine di laboratorio condotta in due fasi successive.

La prima fase si è focalizzata sui bitumi impiegati, sottoposti al DSR adottando il protocollo SSCR al fine di determinare il Creep Compliance Rate (CCR). Nella seconda fase della ricerca, le miscele di bitume, preparate dai leganti utilizzati nella prima fase, sono state sottoposte a test per la valutazione del Flow Number (FN) eseguiti alla temperatura di 52 e 58°C utilizzando l'asphalt mixture performance tester (AMPT).

Le miscele sono state confezionate con leganti diversi, cioè con due bitumi "Tal Quale", il primo con grado di penetrazione 50-70 dmm ed il secondo con 70-100 dmm, e un bitume modificato con polimero SBS, ciascuna delle quali con diverse percentuali di bitume (4%; 5%; 6%). Per ogni miscela sono stati realizzati 4 provini, caratterizzati da due diverse percentuali dei vuoti: due campioni con il 4% dei vuoti e gli altri due con il 6%.

I dati ottenuti dalla prima e seconda fase dell'indagine sono stati analizzati e confrontati tra loro per indagare sul legame tra il CCR e il FN e per verificare se sussiste una loro correlazione lineare.

A seguito del riscontro positivo si è cercato di comprendere l'influenza della percentuale di bitume sui parametri a e b , rispettivamente, intercetta e coefficiente angolare della retta.

Capitolo 1 Rassegna sugli ammaloramenti delle pavimentazioni flessibili con approfondimento del fenomeno dell'ormaiamento

1.1 Il degrado delle pavimentazioni

La struttura, la morfologia e la composizione chimica dei materiali tendono a trasformarsi nel corso del tempo sia a causa delle azioni compiute dall'uomo che dalla natura su cui essi sono esposti con conseguente peggioramento delle caratteristiche individuali e dell'opera nel suo complesso, compromettendone quindi la durabilità.

I fenomeni fisici e chimici sono i principali responsabili del degrado dei materiali costruttivi, le cui caratteristiche prestazionali vengono modificate. Infatti parliamo di degrado fisico quando il materiale è degradato da fattori esterni che esercitano su di esso un'azione meccanica e di degrado chimico quando il materiale è danneggiato da cause esterne che alterano negativamente la sua composizione.

Per questi motivi, particolare attenzione riveste la scelta dei materiali in fase di progettazione, tenendo in considerazione, infatti, non solo le resistenze meccaniche che possono offrire ma anche le capacità di resistere all'attacco degli agenti aggressivi ambientali. Inoltre, il degrado di un'opera può essere accentuato da un'errata esecuzione dei lavori che non ricalcano lo stato dell'arte e da una manutenzione scadente o inefficace.

I fenomeni che portano al degrado di una pavimentazione stradale sono spesso dovuti sia a carenze meccanico-strutturale del pacchetto stradale, del piano di posa (ad esempio insufficienti spessori degli strati impiegati per sopportare i carichi esterni o aggregati scelti per la miscela dello strato di usura che non presentano sufficiente resistenza all'abrasione) sia a fattori legati principalmente all'ambiente nel quale la pavimentazione si trova ad operare (ad esempio le alte temperature che portano al rammollimento del bitume o l'ossigeno che porta ad ossidazione della matrice bituminosa con conseguente invecchiamento).

1.2 Gli ammaloramenti delle pavimentazioni stradali flessibili

Sulla scorta delle precedenti considerazioni si possono suddividere gli ammaloramenti delle pavimentazioni stradali flessibili in funzione delle seguenti categorie:

- fessurazioni;
- deformazioni superficiali plasto-viscose;
- difetti superficiali;
- altri danni.

Per ciascuna di queste categorie vengono riportati in tabella gli ammaloramenti e le cause di ognuno di essi[1]:

| Categorie di ammaloramento | Ammaloramento | Causa |
|-----------------------------------|--|-------------------------------|
| Fessurazioni | Rottura per fatica | Carico |
| | Block cracking | Clima |
| | Edge cracking | Clima |
| | Fessurazione longitudinale e trasversale | Difetti di costruzione, clima |
| | Fessurazione da scorrimento | Traffico |
| Deformazioni plasto-viscose | Bumps e sags | Carico,clima o altro |
| | Ondulazioni | Carico e altro |
| | Depressioni | Altro |
| | Ormaiamento | Carico |
| | Buche | Traffico e carico |
| | Rigonfiamento | Clima |
| | Scalinamento tra corsia e banchina | Altro |
| | Shoving | Altro |
| Difetti superficiali | Essudazione del bitume | Altro |
| | Levigatura dell'aggregato | Traffico |
| | Scagliatura | Altro |
| Altri danni | Rappezzi | Altro |

Tabella 1.1 ammaloramenti di una pavimentazione stradale flessibile

Nelle seguenti pagine verranno forniti dei brevi cenni a questi fenomeni.

1.2.1 Rottura per fatica

Le fessure per fatica si verificano nelle pavimentazioni soggette a frequenti carichi di traffico e a temperature moderate. Tali aperture nascono poiché il conglomerato bituminoso ha un comportamento rigido e fragile a temperatura intermedia tendendo a fessurarsi sotto l'effetto dei ripetuti carichi piuttosto che a deformarsi. La prima crepa si origina sul fondo degli strati di conglomerato bituminoso dove le tensioni e le conseguenti deformazioni di trazioni indotte dalle sollecitazioni sono maggiori. A questo punto la fessura si propaga in superficie inizialmente parallelamente alla direzione del traffico e successivamente sono interconnesse formando aree irregolari il cui tipico aspetto è quello della "pelle di cocodrillo".

Quanto ho appena descritto si riferisce alle rotture per fatica di tipo bottom-up ma nel corso degli ultimi dieci anni è diventato evidente come le pavimentazioni siano soggette anche a fenomeni di fatica top-down e cioè le fessure si originano in corrispondenza della superficie e si propagano verso gli strati più profondi.

Le rotture per fatica sia del tipo bottom-up che top-down sono localizzate e non distribuite su tutta la superficie stradale in quanto si verificano solo nelle aree maggiormente sollecitate dal carico di traffico.

Al fine di salvaguardare la pavimentazione da tali fenomeni, la composizione della miscela gioca un ruolo davvero importante.

La percentuale di bitume (miscele con contenuti bassi risultano essere meno resistenti rispetto a quelle maggiormente legate), il contenuto dei vuoti (una elevata percentuale dei vuoti può agevolare la propagazione e può consentire all'acqua di penetrare negli strati più profondi della sovrastruttura, compromettendone l'integrità dell'intera struttura) e la compattazione sono i fattori che influenzano maggiormente la risposta della pavimentazione alle sollecitazioni indotte dai carichi.



Figura 1.1 rottura per fatica

1.2.2 Fessurazione a blocchi (Block cracking)

Nell'ipotesi in cui si presenti una fessurazione a blocchi, la pavimentazione risulta essere divisa in forme approssimativamente rettangolari le cui dimensioni variano generalmente tra $0,1\text{m}^2$ e 10m^2 . Le fessure a blocchi sono causate dal ritiro del conglomerato bituminoso dovuto alla variazione ciclica di temperatura. Differentemente dalle fessure per fatica, queste sono indipendenti dal carico di traffico, manifestano un indurimento del materiale superficiale e possono presentarsi anche su porzioni non trafficate.



Figura1.2 block cracking

1.2.3 Fessurazione di bordo (Edge cracking)

Le fessure di bordo si presentano sulla superficie con una forma abbastanza ricurva interessando il margine esterno della pavimentazione, con una estensione di circa 60 cm, adiacente alla banchina. Le cause di tali deformazioni ricadono sui fenomeni di gelo nel sottofondo o nella fondazione, all'estremità della pavimentazione.

La propagazione della fessurazione di bordo è favorita dal carico veicolare.



Figura1.3 edge cracking

1.2.4 Fessurazione longitudinale e trasversale

Le fessure longitudinali sono orientate parallelamente all'asse della carreggiata mentre quelle trasversali si presentano ortogonalmente alle prime.

Il fenomeno è provocato da difetti di costruzione, da escursioni termiche giornaliere e dal ritiro del conglomerato bituminoso per basse temperature e non è causato invece dal carico di traffico.

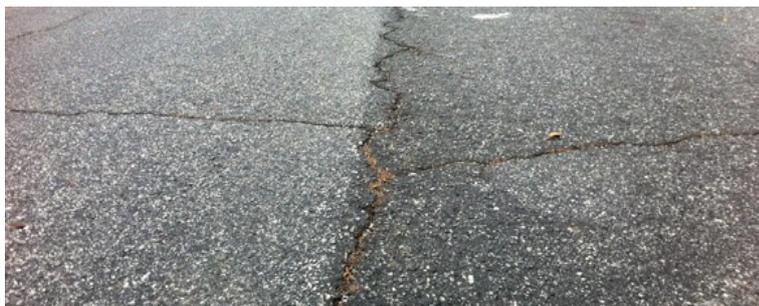


Figura1.4 fessurazione longitudinale e trasversale

1.2.5 Fessurazione da scorrimento

Lo scivolamento o le deformazioni indotte dal passaggio degli pneumatici sono le cause delle fessure da scorrimento che si presentano sulla superficie con delle forme ricurve. Generalmente si rilevano in curva, in salita o in corrispondenza delle intersezioni. Il fenomeno si manifesta più facilmente in presenza di strati di usura sottili e debolmente resistenti alle azioni tangenziali, di scarsa aderenza tra la superficie e lo strato di binder o di miscele di conglomerato bituminoso notevolmente fluide (emulsioni).

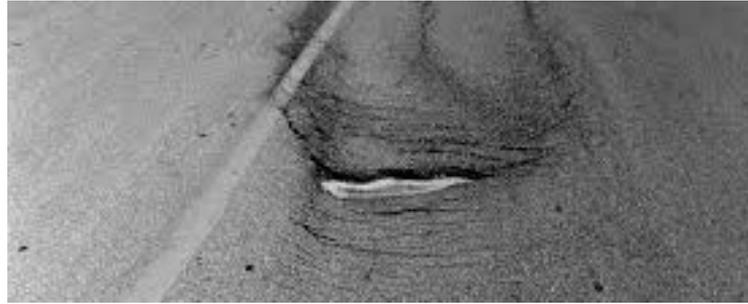


Figura1.5 fessurazioni da scorrimento

1.2.6 Risalti e sacche (Bumps and sags)

I risalti sono concentrati innalzamenti della superficie di piccole dimensioni causati dall'instabilità della pavimentazione, dalla formazione di lenti di ghiaccio, dall'infiltrazione e crescita di materiale all'interno di fessure combinate con il carico veicolare.

Le sacche invece sono piccoli ed improvvisi avvallamenti della superficie.

1.2.7 Ondulazioni

La successione delle ultime deformazioni appena descritte prendono il nome di ondulazioni. Queste si presentano lungo la superficie stradale con intervalli regolari, generalmente inferiori a 3m, orientate perpendicolarmente alla direzione del traffico. La causa di tale fenomeno è data dalla combinazione dell'azione del traffico con l'instabilità della superficie.



Figura1.6 ondulazioni

1.2.8 Depressioni

Le depressioni sono aree di pavimentazione la cui quota risulta essere inferiore rispetto a quella raggiunta dalla corretta superficie stradale. Le cause della loro origine sono da attribuire alle errate procedure di costruzione del pacchetto stradale ovvero ai cedimenti del terreno di sottofondo dovuti alla costruzione di strutture, o opere in generale, in prossimità della sovrastruttura stessa.



Figura1.7 depressioni

1.2.9 Buche (Potholes)

Le buche sono cavità della superficie stradale con forme approssimativamente circolari, di diametro generalmente inferiore al metro. Si presentano inoltre con bordi netti e spigolosi con lati pressoché verticali in corrispondenza della parte superiore perpendicolare al piano viabile.

La presenza di acqua che può ristagnare al loro interno favorisce la crescita della cavità. Inoltre, si vengono a formare quando, a causa del traffico veicolare, vengono asportate parti della pavimentazione.



Figura1.8 potholes

1.2.10 Rigonfiamenti

I rigonfiamenti sono graduali innalzamenti del piano stradale che si estendono per oltre 3m. Il principale responsabile di tale fenomeno è l'azione del gelo nel sottofondo; spesso si presenta con formazione di fessure da scorrimento.



Figura1.9 rigonfiamenti

1.2.11 Scalramento tra corsia e banchina

Lo scalramento tra corsia e banchina è la variazione di quota tra il piano stradale percorso dai veicoli ed il margine esterno della banchina limitrofo alla corsia.

Le cause di questo fenomeno sono da attribuire all'erosione della banchina o al suo assestamento e in alcuni casi è dovuto ad irregolari modalità di posa in opera del materiale superficiale.

1.2.12 Spostamento del manto per spinta orizzontale (Shoving)

Questo fenomeno si può osservare nelle pavimentazioni realizzate con miscele di conglomerato bituminoso molto fluide. Lo spostamento del manto per spinta orizzontale è causato dai carichi veicolari per mezzo dei quali si forma un'onda corta e brusca nella pavimentazione.



Figura1.10 shoving

1.2.13 Essudazione di bitume

Nelle pavimentazioni realizzate con miscele di conglomerato il cui contenuto di bitume risulta essere eccessivo si possono formare strati scivolosi, riflettenti e lucidi che diventano facilmente viscosi e appiccicosi. I raggi solari riscaldano il manto stradale e nel caso di raggiungimento di alte temperature la viscosità del materiale aumenta, favorendo dislocazioni interne. Nelle miscele con eccessivo contenuto di bitume o con scarsa presenza di vuoti, il bitume riempie i vuoti a causa delle alte temperature e si espande raggiungendo così la superficie: il fenomeno è quindi irreversibile e progressivo nel tempo.



Figura1.11 essudazione di bitume (Di Mascio P., Miseri F., Moretti L.)

1.2.14 Levigatura dell'aggregato

Il continuo e ripetitivo passaggio dei carichi di traffico provoca la levigatura dell'aggregato che nel tempo causa la riduzione della micro e macrotestitura della pavimentazione nonché l'aderenza tra pneumatico e manto stradale.

1.2.15 Scagliatura della superficie

La scagliatura del manto stradale è generata dall'usura della superficie con perdita della matrice bituminosa da cui ne consegue la fuoriuscita dell'aggregato. Questo fenomeno indica che la qualità della miscela risulta essere scarsa e può presentarsi con perdita di inerti fini e/o grossolani, conferendo alla superficie un aspetto grezzo.



Figura1.12 scagliatura della superficie (Di Mascio P., Miseri F., Moretti L.)

1.2.16 Rappezzi

Il rappezzo è la sostituzione di una porzione del manto stradale, precedentemente rimosso, con nuovo materiale necessario a riparare la pavimentazione esistente.

Tale fenomeno è considerato tra gli ammaloramenti perché la parte di pavimentazione rigenerata, anche se ben collocata, non può recuperare le caratteristiche tecnico-funzionali della porzione appartenente alla pavimentazione originale.



Figura1.13 rappezzi

1.2.17 Ormaiamento (rutting)

L'ormaiamento è uno dei più importanti fenomeni di ammaloramento di una sovrastruttura stradale flessibile ed è l'oggetto di studio della presente tesi. In questo capitolo oltre ad avere elencato e descritto brevemente tutti i casi di degrado a cui le

pavimentazioni sono soggette, si cercherà di approfondire il fenomeno di formazione delle ormaie, spiegandone le cause, le modalità con cui si sviluppa e infine descrivendo le prove necessarie per analizzarlo.

L'ormaiamento (rutting) è quella deformazione che si manifesta con la formazione delle ormaie: depressioni orientate lungo la direzione percorsa dagli pneumatici del veicolo ed accompagnati da innalzamenti laterali del conglomerato bituminoso.[2]

Questo fenomeno deve essere impedito o comunque limitato in quanto gli avvallamenti del piano viabile che vengono a formarsi conferiscono alla sovrastruttura una progressiva diminuzione della sicurezza stradale dettata da una crescente irregolarità trasversale e un progressivo accrescimento di aree di ristagno per le acque piovane, con la conseguente possibilità del problema di acqua planning. Di conseguenza, il livello di servizio della strada decresce non potendo più garantire un adeguato comfort di marcia.

Le principali cause di questo degrado sono imputabili all'elevata temperatura di esercizio e al passaggio di mezzi pesanti.

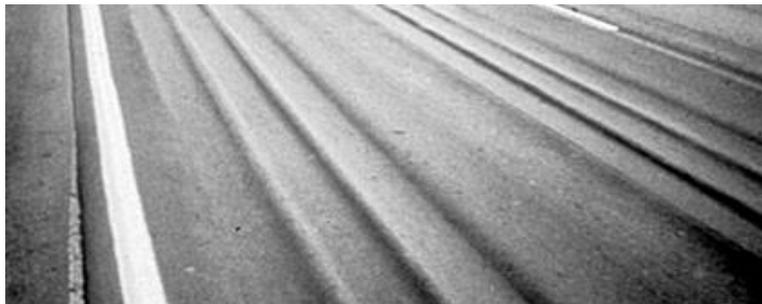


Figura1.14 fenomeno di rutting

Il fenomeno dell'ormaiamento può essere suddiviso in due fasi:

- una prima fase che si innesca subito dopo l'apertura al traffico della strada (dopo poche settimane) a causa del quale si manifesta soltanto l'addensamento o compressione verticale del materiale senza refluenti laterali dello stesso. L'addensamento, generalmente, è causato da un eccessivo contenuto di vuoti d'aria o da un'inadeguata compattazione sia degli strati legati, sia di quelli non legati. Infatti, al diminuire dei vuoti si verifica un omogeneo cedimento Δh di tutta la pavimentazione. Tale compattazione, nonostante sia una deformazione permanente non più recuperabile, non rappresenta il vero e proprio scorrimento che fa preoccupare perché esso si genera nella seconda fase.

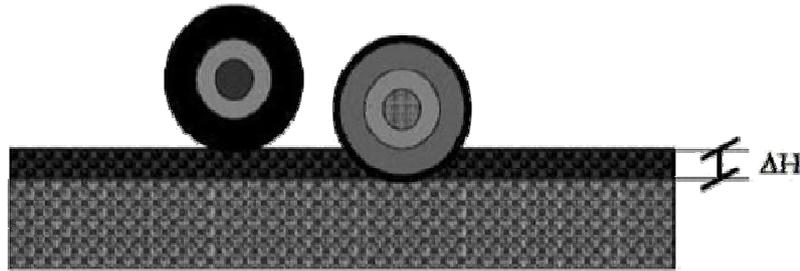


Figura1.15 formazione delle ormaie: I fase

- Una seconda fase in cui si ha il vero e proprio ormaiamento e cioè si ha lo scorrimento del materiale all'interno degli strati comportando un innalzamento di entrambi i lati della depressione, formatasi nella prima fase, provocato dal fatto che i vuoti sono stati tutti saturati ed i veicoli continuano a transitare ad alte temperature.

Questo scorrimento laterale si verifica in quelle miscele con basse resistenze al taglio o in quelle pavimentazioni interessate da elevati stati di stress da taglio dovuti alle sollecitazioni indotte dal traffico stradale.

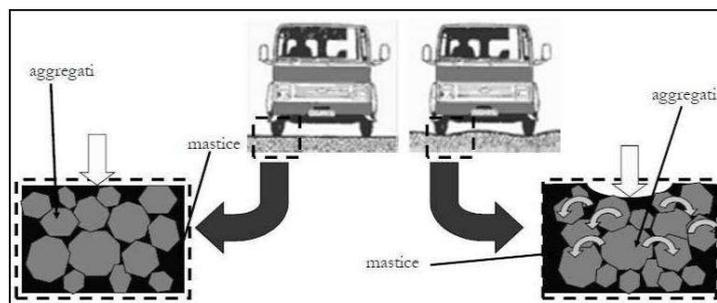


Figura1.16 formazione delle ormaie: II fase

1.2.18 Cause dell'ormaiamento

Come suddetto le principali cause di formazione delle ormaie sono l'alta temperatura e le sollecitazioni indotte dai carichi ma non sono da escludere gli errori progettuali, infatti:

- nel caso in cui si formasse sulla pavimentazione soltanto l'abbassamento senza refluentamento laterale, la causa del fenomeno deve essere attribuita ad un problema di sottodimensionamento dello spessore della sovrastruttura e non ad un problema di qualità della miscela bituminosa confezionata: gli strati di conglomerato bituminoso hanno cioè uno spessore insufficiente a far sì che le tensioni indotte dai carichi veicolari che giungano sul piano di appoggio della sovrastruttura stessa, siano inferiori a quelle massime ammissibili del

sottofondo. Di conseguenza il sottofondo e la fondazione cedono, così come tutta la parte di conglomerato bituminoso. Il problema però potrebbe anche essere quello di aver stimato erroneamente la portanza del sottofondo e progettato correttamente gli spessori della pavimentazione. L'effetto sarebbe il medesimo del caso precedente.

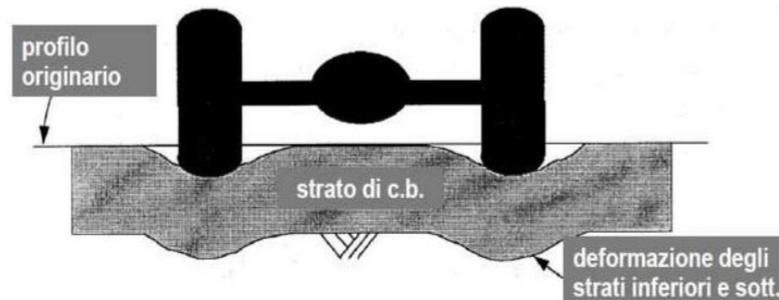


Figura1.17 plasticizzazione dovuta ad insufficienti spessori degli strati in conglomerato bituminoso o ad un'errata portanza del sottofondo

- nel caso in cui si formi il solco accompagnato da refluimenti laterali mentre la fondazione rimanga indeformata (non ceda) il problema non è da attribuire agli spessori della pavimentazione o alla portanza del sottofondo bensì imputabile ad una scarsa resistenza al taglio della miscela realizzata dovuta ad un'errata progettazione del conglomerato.

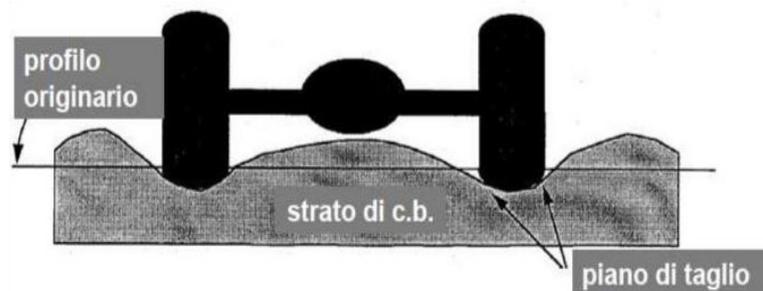


Figura1.18 ormaie dovute alla qualità del conglomerato bituminoso

La verifica di resistenza al taglio della miscela risulta quindi essere necessaria e viene espressa nel seguente modo:

$$\tau = c + \sigma * \tan \phi$$

dove:

c è a coesione del bitume;

σ è la tensione verticale;

ϕ è l'angolo di attrito dello scheletro litico dell'aggregato.

La relazione $\tau - \sigma$ è di tipo lineare e può essere rappresentata in un grafico con una retta la cui pendenza è la $\tan \phi$ mentre intercetta è la coesione c .

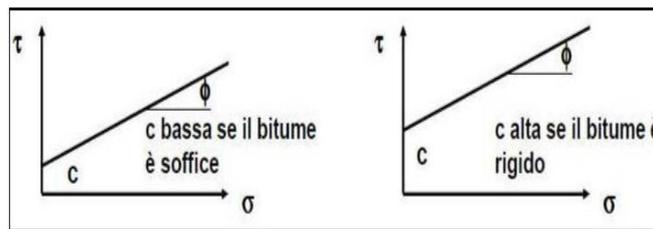


Figura1.19 resistenza al taglio: influenza del bitume

La Figura 1.20 mostra come, a parità di aggregato se si sceglie un bitume più rigido (pendenza della retta rappresentante il modulo complesso più elevata) si ottiene una retta che mantiene la stessa pendenza perché lo scheletro litico non è variato, ma traslata verso l'alto perché viene migliorata la coesione. Più è rigido il bitume, maggiore sarà la coesione e quindi migliore sarà la resistenza alle deformazioni permanenti.

La resistenza all'ormaiamento delle miscele di bitume può essere verificata in laboratorio con diverse prove delle quali si tratterà nel seguente sottoparagrafo.

1.2.19 Metodi per la valutazione della resistenza all'ormaiamento

Nella valutazione della risposta degli strati legati a bitume in merito all'accumulo di deformazione permanente, i leganti svolgono un ruolo importante a causa del loro comportamento dipendente dalla temperatura e dal tempo. Di conseguenza, essi devono essere selezionati ricorrendo ai risultati ottenuti da test di laboratorio affidabili, in grado di determinare la loro risposta in termini di deformazione non recuperabile sotto carico.

Secondo l'approccio originariamente proposto da Superpave sul sistema di classificazione dei leganti, il controllo delle prestazioni relativi al rutting si riferisce al parametro viscoelastico $G^*/\sin(\delta)$, che alla temperatura massima di progetto della pavimentazione deve essere confrontato con i valori limiti sia nello stato vergine che invecchiato a breve termine [3]:

$$\frac{G^*}{\sin \delta} \geq 1 \text{ Kpa (bitume vergine)}$$

$$\frac{G^*}{\sin \delta} \geq 2,20 \text{ Kpa (bitume invecchiato)}$$

Questo approccio però è risultato essere inadeguato per lo scopo sopramenzionato, soprattutto per i bitumi modificati con polimeri [4].

Di conseguenza, alcuni ricercatori [5], [6] hanno condotto studi a livello mondiale per superare i limiti del metodo Superpave e, il risultato di queste ricerche, ha portato a

differenti metodi e criteri per la valutazione delle proprietà di rutting dei leganti bituminosi [7], [8].

In particolare, sono due i metodi usati come procedura standard per la valutazione delle caratteristiche prestazionali dei leganti bituminosi in merito all'accumulo di deformazione permanente. Essi sono: il protocollo CEN/TS 15324 (2008), che si focalizza sulla determinazione della temperatura di equi-viscosità (EVT) basata sul concetto di Low-Shear Viscosity (LSV) e il protocollo AASHTO TP70-10 (2010), che descrive il procedimento del test Multiple Stress Creep-Recovery (MSCR). Tuttavia, recenti studi hanno dimostrato l'esistenza di inconvenienti significativi per entrambi i metodi quando sono applicati a leganti modificati. Infatti, nel caso del test LSV, le curve di viscosità ottenute per i leganti modificati con gomma (AR) non presentano un valore di plateau, il che implica che il valore di viscosità complessa η^* non può essere determinato in quanto esso continua ad aumentare con la diminuzione della velocità di deformazione [9] mentre nel caso del test MSCR, il protocollo attuale, che prevede l'applicazione di dieci cicli con una fase di carico pari ad 1s ed una fase di recupero di 9s, non garantisce il recupero elastico ritardato dei leganti modificati con stirene-butadiene-stirene (SBS) [10], [11].

Più recentemente [12] ha proposto una nuova procedura di prova che consiste in un solo ciclo creep-recovery (SSCR) eseguiti a temperature diverse e a tempi di carico e scarico predefiniti. I risultati ottenuti su un'ampia gamma di materiali stabiliscono l'efficacia di tale procedura per la valutazione delle caratteristiche prestazionali, ad alte temperature, di leganti bituminosi di diversa natura e origine. Inoltre, le informazioni sulla resistenza al rutting sono state ottenute facendo riferimento ad un nuovo parametro di controllo, il cosiddetto CCR (Creep Compliance Rate).

$$CCR = \frac{d\left(\frac{\gamma}{\tau_0}\right)}{dt} = \frac{dJ}{dt}$$

dove:

J è il creep compliance, γ è la deformazione di taglio e τ_0 è la tensione applicata.

Quanto alla resistenza all'ormaiamento delle miscele bituminose, è di tutta evidenza che, si tratta di un problema condizionato da diversi fattori, tra i quali vi sono le proprietà dei leganti, le caratteristiche degli aggregati e le proprietà volumetriche delle miscele stesse. Negli ultimi decenni molti ricercatori in tutto il mondo hanno prestato molta attenzione alla valutazione della resistenza al rutting delle miscele utilizzando diversi metodi di laboratorio tra cui il wheel tracking test, l'asphalt pavement analyzer,

il flow time ed infine il test di Flow Number il quale, tra tutti , è considerato quello più affidabile poiché i risultati sono paragonabili a quelli ottenuti sul campo. Il Flow Number studia il comportamento delle miscele bituminose sottoponendole a un test di creep dinamico con una fase di carico di 0.1s e una fase di scarico di 0.9s per diverse centinaia, migliaia di ripetizioni (cicli), registrando la deformazione permanente cumulata in funzione nel numero di cicli.

Capitolo 2 Dall'origine del bitume ai modelli reologici

2.1 Origine del bitume

Il bitume è un materiale conosciuto fin dall'antichità in quanto veniva utilizzato dai Romani come legante in edilizia (il termine bitumen è di origine latina) ma ancor prima era noto ai Sumeri e al popolo Egiziano che lo impiegava nelle pratiche di mummificazione. Oggi, invece, il bitume viene impiegato per risolvere problemi di varia natura sia nel campo delle impermeabilizzazioni che nel settore delle costruzioni stradali.

Il bitume è prodotto da processi di raffinazione del greggio di petrolio denominato "bitume industriale" o "bitume di petrolio" ma è presente anche allo stato naturale con la denominazione di "bitume asphaltico nativo". A quest'ultimo proposito, in zone dove l'alta permeabilità delle formazioni rocciose permette un processo di frazionamento naturale del greggio, esistono depositi di bitume naturale come ad esempio quello nello Stato Americano dello Utah, quello del lago Trinidad e di Selenizza (Albania), le rocce asfaltiche della Sicilia e dell'Abruzzo e le cosiddette "tar sands" canadesi.



Figura 2.1 bitume naturale

Tuttavia, il bitume naturale non è più un prodotto utilizzato nell'industria poiché i processi di raffinazione del petrolio producono bitumi di buona qualità a tutti gli usi per i quali è destinato, dall'impermeabilizzazione alla pavimentazione stradale. La qualità del bitume industriale dipende dal petrolio grezzo di provenienza e dal metodo di distillazione e lavorazione dal quale è ottenuto.

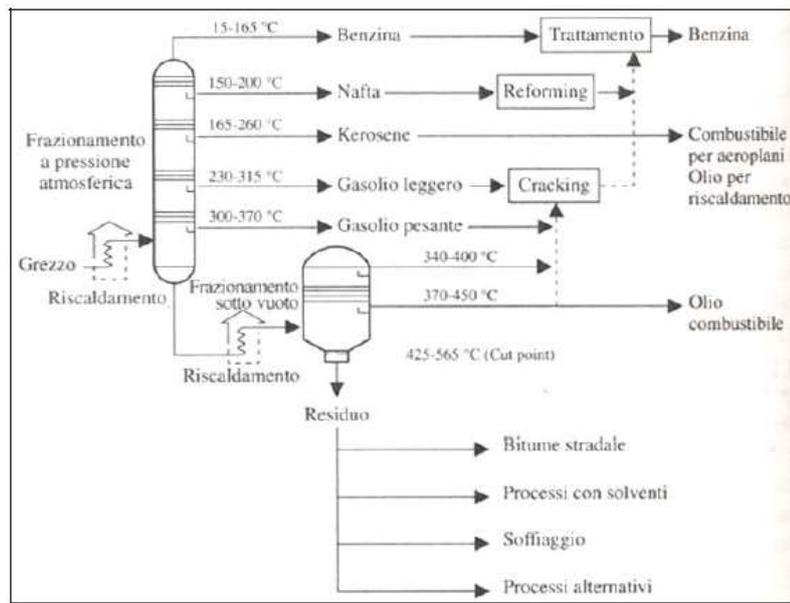


Figura 2.2 schema di frazionamento del bitume

Il prodotto ottenuto dalla distillazione può essere utilizzato “Tal Quale” oppure sottoposto a processi chimici e fisici che ne variano opportunamente la composizione, al fine di conferirgli determinate proprietà, i cosiddetti bitumi modificati [13].

2.2 Processi produttivi dei bitumi tradizionali

Come ho già detto sopra la qualità dei bitumi tradizionali presenti sul mercato dipende sia dalla provenienza del petrolio che dalla sua lavorazione nelle raffinerie. In questo paragrafo ci dedichiamo a descrivere quelle che sono le tecniche di lavorazione e produzione dei bitumi [14].

I procedimenti trattati sono i seguenti:

- distillazione frazionata;
- trattamento termico;
- produzione per sintesi o ricostruzione;
- ossidazione.

2.2.1 La distillazione frazionata

Tra le tecniche di produzione dei bitumi la distillazione frazionata è considerata un processo primario.

Il procedimento è mostrato nella seguente figura:

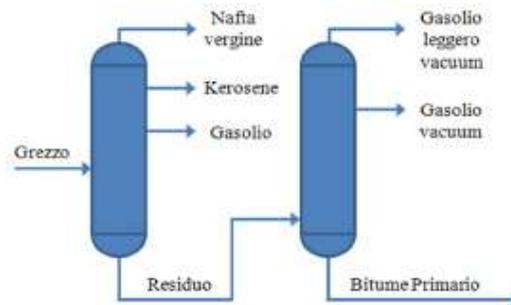


Figura 2.3 schema di distillazione frazionata

Lo schema mostra come il grezzo di petrolio viene riscaldato alla temperatura di circa 400°C ed immesso nella colonna di frazionamento a pressione atmosferica, attraverso la quale si ha la separazione delle varie componenti per mezzo dei loro differenti punti di ebollizione.

A questo punto, mediante speciali dispositivi posti lungo l'altezza della colonna chiamati piatti di frazionamento, i vapori entrano in contatto con una corrente fredda discendente, detta riflusso. Ciò che viene prodotto su ogni piatto, attraverso questo scambio termico, è la condensazione delle parti meno volatili dei vapori caldi e l'evaporazione di quelle più volatili del riflusso. Il processo di frazionamento a pressione atmosferica determina quindi la presenza delle frazioni più volatili sui piatti posti più in alto della colonna e quelle meno volatili sui piatti inferiori.

Queste ultime poste sul fondo della colonna prendono il nome di residuo atmosferico e possono essere impiegate per la preparazione degli oli combustibili oppure possono essere utilizzate per la produzione di bitume.

A causa della presenza di oli idrocarburici nel residuo atmosferico è necessario un successivo frazionamento all'interno di una seconda colonna denominata "colonna vacuum", ad una pressione inferiore a quella atmosferica e, quindi, in condizioni di sotto vuoto. L'estrazione delle frazioni più leggere viene agevolata dall'impiego di vapore acqueo introdotto dal fondo della colonna. Il bitume infine viene estratto dal fondo della colonna sottovuoto.

Il funzionamento di questo metodo dipende da alcune variabili che, combinate tra loro, permettono di ottenere bitumi con gradi di penetrazione differenti.

Esse sono:

- grado di vuoto applicato;
- caratteristiche, portata e temperatura del residuo atmosferico in entrata;

- temperatura del fondo colonna;
- portata e temperatura del vapore acqueo;
- condizioni di riflusso.

2.2.2 Trattamento termico dei residui

Il processo di raffinazione del petrolio grezzo, il cui scopo è quello di ottenere una maggiore resa di prodotti leggeri, prende il nome di “trattamento termico”. Differenti sono i trattamenti termici che possono essere adottati, tutti accumulati da valori di temperatura e pressione elevati tali da ottenere dalla colonna di distillazione dei residui con caratteristiche strutturali differenti. Si tratta di valori che variano in funzione del grado di severità con cui si vuole convertire la frazione “pesante” in “distillati leggeri” (maggiore è il grado di severità del processo e più il residuo si presenta duro e, di conseguenza, il bitume che ne deriva ha un comportamento reologico che varia da visco-elastico, ad alte temperature, a fragile a basse temperature). Il residuo ottenuto da questi trattamenti viene spesso impiegato nella produzione dei bitumi [15]. I processi previsti sono di seguito elencati:

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

Tra i quattro quello maggiormente più diffuso e largamente usato nelle raffinerie italiane è il trattamento di “visbreaking”. Processo che ha l’effetto di abbassare la viscosità del bitume diminuendone la resa e producendo una certa quantità di gas, benzina e gasolio. L’impianto è costituito da un forno e da una colonna di frazionamento come si evince dalla figura sottostante.

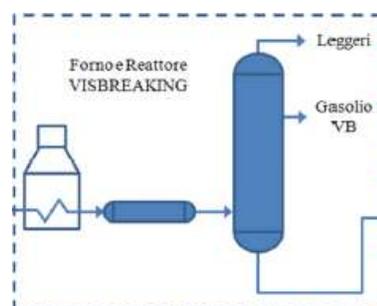


Figura 2.4 produzione dei bitumi da visbreaking

Le reazioni attraverso le quali è possibile ottenere una maggiore resa di prodotti leggeri avvengono grazie a temperature comprese tra 400-450 °C, mentre il grado di severità del processo dipende dalla stabilità degli asfalteni.

La diffusione del bitume da visbreaking, associata all'esperienza di circa due decenni, ha dimostrato che si tratta di un materiale che ben si adatta alle applicazioni stradali [14].

2.2.3 Produzione per sintesi o ricostruzione

La produzione dei bitumi per sintesi o ricostruzione consiste nel miscelare componenti idrocarburici quali asfalteni, resine ed oli. Nella maggior parte dei casi questi componenti si ottengono da processi di deasfaltazione o separazione degli oli di greggi paraffinici, naftenici oppure misti.

Nello schema riportato in figura 2.4 viene spiegata la produzione del bitume attraverso l'impianto di deasfaltazione: la separazione dei composti asfaltici dalle altre frazioni idrocarburiche avviene attraverso l'utilizzo di un solvente che, generalmente, è propano liquefatto o più raramente miscele di propano e butano liquefatti.

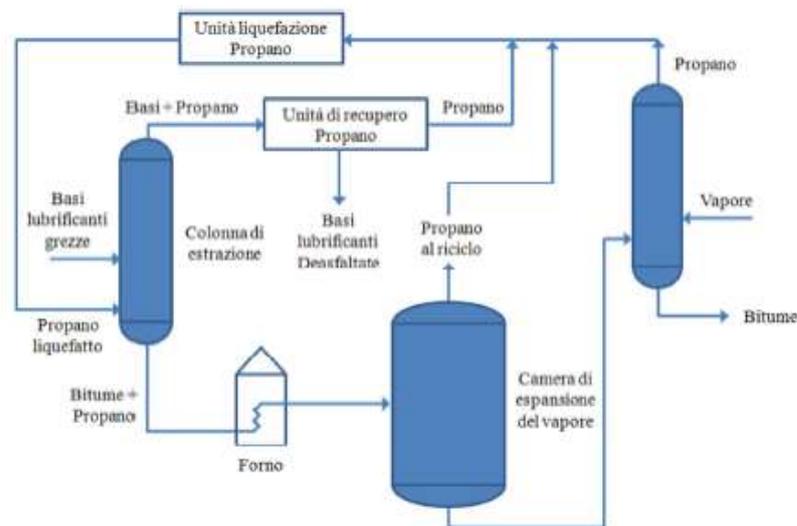


Figura 2.5 produzione dei bitumi da impianto di deasfaltazione basi lubrificanti

Per questo motivo i composti asfaltici utilizzati per la produzione di bitumi attraverso processi di sintesi prendono il nome di “asfalto al propano”; la loro consistenza è abbastanza variabile: si passa da valori di penetrazione molto bassi (1-5 dmm) a valori decisamente più alti (40-50 dmm).

I bitumi ottenuti per sintesi presentano alcuni vantaggi rispetto a quelli prodotti per distillazione frazionata:

- minore contenuto in paraffine, proprio dell'asfalto al propano;

- maggiore presenza di acidi organici che rendono i bitumi sintetici più facilmente emulsionabili.

Nonostante i susposti vantaggi, i bitumi sintetici possono considerarsi paragonabili a quelli ottenuti per distillazione frazionata ad eccezione del valore della viscosità alla temperatura di 60 °C ed, in alcuni casi, dell'indice di penetrazione negativo dovuto prevalentemente a valori del punto di rammollimento bassi [14].

2.2.4 L'ossidazione

L'ultimo metodo che descriverò in merito alla produzione dei bitumi è quello per ossidazione. La procedura consiste nell'ossidare, mediante soffiatura con aria in condizioni controllate ad alta temperatura (230-280 °C) e per un certo intervallo di tempo, i residui della distillazione primaria.

Si rammenta che la procedura in oggetto diverge nettamente dai tradizionali processi produttivi del bitume poiché si tratta di una trasformazione chimica degli idrocarburi. Infatti, per effetto dell'ossigeno si hanno le seguenti trasformazioni:

- alcuni idrocarburi appartenenti agli oli maltenici tendono ad assumere la struttura macromolecolare delle resine;
- alcune resine tendono a trasformarsi in asfalteni leggeri;
- gli asfalteni leggeri si trasformano in asfalteni pesanti.

Di seguito è riportato un tipico schema di impianto di ossidazione.

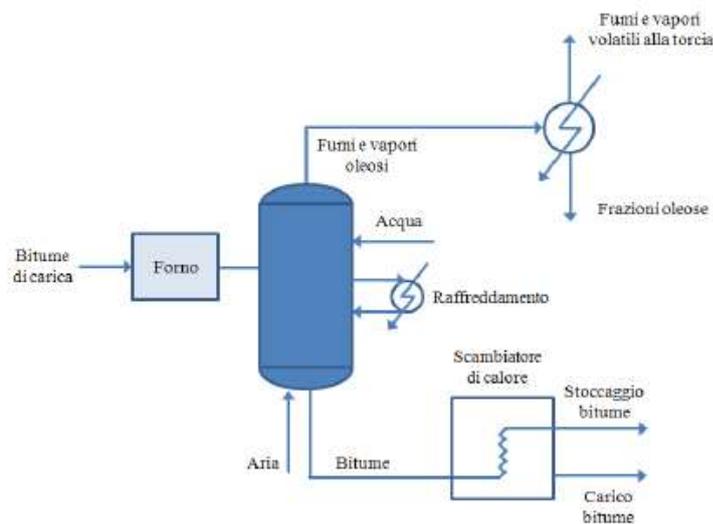


Figura 2.6 schema di un impianto di ossidazione

Ancor più manifesto è che le caratteristiche fisiche del bitume subiscono mutamenti che incidono sulla consistenza.

Nello specifico si nota:

- diminuzione della penetrazione;
- aumento sensibile del punto di rammollimento;
- riduzione della suscettibilità termica;
- aumento della viscosità.

Con l'impianto di ossidazione è possibile ottenere diverse gradazioni di bitumi ossidati e, inoltre, la loro ridotta suscettibilità termica permette di impiegarli in campi diversi da quelli stradali, come ad esempio, nel settore delle impermeabilizzazioni, nelle opere idrauliche e nelle coibentazioni termiche ed elettriche.

2.3 Composizione chimica del bitume

Le prestazioni in opera del bitume dipendono dalle proprie caratteristiche fisiche e reologiche che, a loro volta, discendono dalla composizione chimica e strutturale dello stesso bitume.

La variabile composizione elementare del bitume ottenuta da processi di raffinazione è generalmente compresa nei limiti riportati nella seguente figura:

| Elemento | % in peso |
|----------|-----------|
| Carbonio | 81-87 |
| Idrogeno | 10-14 |
| Zolfo | 0.06-8 |
| Ossigeno | 0-2 |
| Azoto | 0.02-1.7 |

Tabella 2.1 composizione elementare del bitume

È importante sottolineare che queste percentuali sono delle variabili dipendenti dall'origine del petrolio grezzo e dalla metodologia di raffinazione usata ma che, generalmente, risultano essere comprese all'interno dei range riportati in tabella.

Analizzare la chimica del bitume consiste nell'identificare la miscela di idrocarburi del petrolio da cui ne deriva. Questo studio è stato condotto negli Stati Uniti a partire dagli '80, all'interno dello Strategic Highway Research Program (SHRP). Si giunse alla conclusione che il petrolio da cui deriva il bitume è composto dalle percentuali di carbonio ed idrogeno in esso presenti (idrocarburi) e dalle diverse catene che si formano tra loro (figura 2.8).

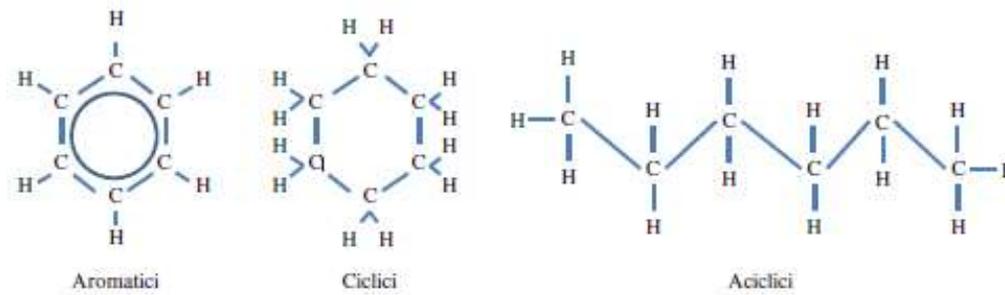


Figura 2.7 classificazione degli idrocarburi

Le catene idrocarburiche, componenti del petrolio, sono così definite:

- Paraffine (alcani): sono idrocarburi saturi in quanto la struttura molecolare che si forma non può inglobare al suo interno altri atomi di idrogeno; la natura dei loro legami è di tipo semplice.
La catena che nasce ha la formula C_nH_{2n+2} con una forma aperta (aciclici) lineare o ramificata; sono gli idrocarburi più comuni presenti nel petrolio. La più semplice catena paraffinica è data dal metano (CH_4) ma di questa categoria fanno parte anche l'etano (C_2H_6), il propano (C_3H_8) e il butano (C_4H_{10});
- Nafteni (cicloalcani): idrocarburi saturi a catena chiusa (ciclici) con formula generale C_nH_{2n} ;
- Aromatici: legame idrocarburico insaturo a catena chiusa, aventi formula generale C_nH_{2n-6} e generalmente non si riscontrano grandi quantità di esso nel petrolio.
- Resine e Asfalteni: catene idrocarburiche chiamate anche composti NSO perché nella molecola sono presenti uno o più eteroatomi, cioè atomi diversi dal carbonio e dall'idrogeno che solitamente sono azoto (N), zolfo (S) e ossigeno (O).

È importante sottolineare che non è possibile operare una generalizzazione geografica del bitume e cioè non possiamo dire che un determinato bitume abbia una composizione fissa, legata alla zona di provenienza del petrolio perché, come viene mostrato nella figura 2.8, prodotti provenienti dagli Stati Uniti o dal Canada possono avere composizioni molto diverse [16].

| | Canada AAA-1 | USA AAB-1 | Canada AAC-1 | USA AAD-1 | USA AAF-1 | USA AAG-1 | Venez. AAK-1 | USA AAM-1 |
|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|
| C [wt.%] | 83.9 | 82.3 | 86.5 | 81.6 | 84.5 | 85.6 | 83.7 | 86.8 |
| H [wt.%] | 10.0 | 10.6 | 11.3 | 10.8 | 10.4 | 10.5 | 10.2 | 11.2 |
| H + C [wt.%] | 93.9 | 92.9 | 97.8 | 92.4 | 94.9 | 96.1 | 93.9 | 98.0 |
| H/C [Molar] | 1.43 | 1.55 | 1.57 | 1.59 | 1.48 | 1.47 | 1.46 | 1.55 |
| O [wt.%] | 0.60 | 0.80 | 0.90 | 0.90 | 1.10 | 1.10 | 0.80 | 0.50 |
| N [wt.%] | 0.50 | 0.50 | 0.70 | 0.80 | 0.60 | 1.10 | 0.70 | 0.60 |
| S [wt.%] | 5.50 | 4.70 | 1.90 | 6.90 | 3.40 | 1.30 | 6.40 | 1.20 |
| V [ppm] | 174 | 22.0 | 146 | 310 | 87.0 | 37.0 | 1480 | 58.0 |
| Ni [ppm] | 86 | 56.0 | 63 | 145 | 35.0 | 95 | 142 | 36.0 |
| Mn [g/mol] | 790 | 840 | 870 | 700 | 840 | 710 | 860 | 1300 |

Tabella 2.2 analisi chimica di bitumi estratti da petrolio avente origini differenti

Si evince dalla figura che l'elemento maggiormente presente nel bitume è il carbonio (tra l'80-88% in peso) seguito dall'idrogeno con una percentuale compresa tra l'8-12% in peso. Si ha quindi una percentuale di idrocarburi superiore al 90% in peso. Inoltre vi sono all'interno del bitume oltre al carbonio, idrogeno e tracce di metalli pesanti (quali nichel, vanadio, ferro, magnesio, calcio, presenti in poche parti per milione sottoforma di sali inorganici ed ossidi o in strutture porfiriche), anche altre specie atomiche come lo zolfo, l'ossigeno e l'azoto.

2.3.1 Struttura del bitume

La struttura del bitume risulta essere abbastanza complessa quindi per semplificarne l'interpretazione si fa riferimento al modello proposto da Nellensteyn (1924). Nel predetto modello il bitume viene visto come un sistema colloidale costituito da una dispersione di micelle in un mezzo oleoso. Si può immaginare che le micelle siano costituite da particelle posizionate al centro della struttura, avente elevato peso molecolare, chiamate asfaltini, e che siano dispersi all'interno di un mezzo continuo oleoso tramite molecole ad elevato peso molecolare adsorbite sulla loro superficie, le resine.

Con il termine malteni, inoltre, è indicato l'insieme delle resine e degli oli.

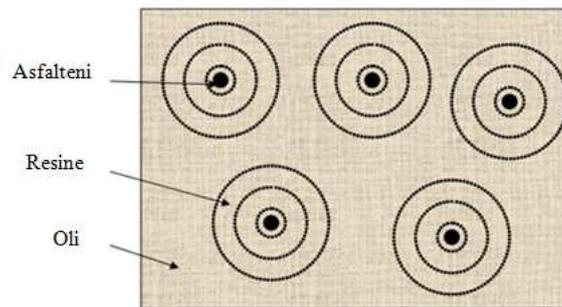


Figura 2.8 schema strutturale del bitume

Si può quindi definire la struttura bituminosa costituita da asfalti e malteni.

Asfalti

Gli asfalti, presenti con una percentuale compresa tra il 5 ed il 25 % in peso, sono i responsabili del comportamento viscoso del bitume. Sono miscele complesse di idrocarburi costituiti principalmente da:

- 1) composti aromatici con anelli condensati e catene alchiliche aventi fino a trenta atomi di carbonio;
- 2) composti eteroaromatici contenenti zolfo (presente in anelli benzotiofenici) e azoto in anelli pirrolici o piridinici.

Il peso molecolare delle molecole asfalteniche è uno degli aspetti più controversi degli studi sui materiali bituminosi: le diverse tecniche forniscono risultati che variano anche di più ordini di grandezza, in funzione della metodologia utilizzata. Una possibile spiegazione risiede nel fatto che quasi tutte le tecniche richiedono la diluizione del composto in appositi solventi, che in qualche modo ne alterano la morfologia, causando la dissoluzione delle molecole più pesanti o l'aggregazione di quelle più polari in nuove strutture.

La determinazione del suo peso molecolare deve essere effettuata per confronto con uno standard adeguato e questo non sempre risulta essere facilmente individuabile; pertanto, il peso molecolare di riferimento è considerato in un range di valori compreso tra 800 e 2500 U.M.A.

Malteni

I malteni possono, a loro volta, essere suddivisi in due sottogruppi:

- *Resine*
- *Oli*

Le resine sono i composti più polari. Esse svolgono un'azione disperdente degli asfalti e conferiscono flessibilità consentendo al bitume di comportarsi come un

corpo elastico quando viene sottoposto a rapide sollecitazioni, contribuendo, inoltre, a rendere il bitume duttile. La loro struttura è molto simile a quella degli asfalti.

Rispetto a quest'ultimi hanno un peso molecolare minore, stimato fra 500 e 1000 U.M.A., ed un rapporto carbonio alifatico/carbonio aromatico molto più elevato a causa del maggior numero di catene paraffiniche.

La frazione oleosa è costituita essenzialmente da anelli naftenici e aromatici collegati da lunghe catene alifatiche (si distinguono infatti oli saturi e aromatici), per cui il rapporto carbonio alifatico/carbonio aromatico è decisamente in favore delle paraffine. Gli oli hanno un peso molecolare più basso, inferiore a 500 U.M.A., e rappresentano il componente più fluido rendendo il bitume scorrevole a caldo, conferendogli la capacità di ricoprire estese superfici di altri materiali [17].

2.3.1.1 Comportamento del bitume: "sol" e "gel"

Le caratteristiche di un bitume sono definite di tipo "sol" quando la quantità di resine presenti in esso sono sufficienti a peptizzare (passaggio dallo stato solido "gel" allo stato disperso "sol" del colloide) totalmente gli asfalti. Le micelle, in questo caso, avendo facilità di movimento hanno un comportamento di tipo liquido newtoniano ad alte temperature e di fluido viscoso, ma non elastico, alle basse temperature (figura 2.10-sx).

Si parla invece di un bitume avente comportamento di tipo "gel" quando le resine sono insufficienti a peptizzare completamente gli asfalti e quest'ultimi si uniscono tra loro formando una rete continua in cui le frazioni più leggere si limitano soltanto a riempire i vuoti tra le micelle. Siamo di fronte ad un comportamento di tipo fluido non newtoniano alle alte temperature e di solido elastico alle basse temperature (figura 2.10-dx).

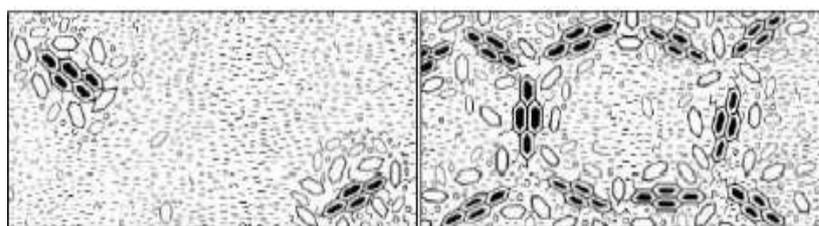


Figura 2.9 struttura "sol" e "gel" del bitume

Nella realtà, come dimostrato dai risultati di numerosi studi reologici, il comportamento del bitume è intermedio ai due casi estremi appena descritti ed è determinato dalla compatibilità e dalle interazioni tra i diversi componenti della miscela piuttosto che dalla quantità dell'uno o dell'altro componente. Per tale motivo sono stati proposti

diversi parametri sintetici che permettono di correlare la composizione chimica del bitume con il suo comportamento reologico.

Un primo parametro è chiamato *indice di instabilità colloidale* I_c , definito da Gaestel, Smadja e Lamminam (1971) come:

$$I_c = \frac{As + Sa}{Ar + Re}$$

dove al numeratore troviamo gli asfalteni e gli oli saturi mentre al denominatore si ha la somma delle percentuali di oli aromatici e delle resine. Con l'aumentare di questo rapporto si ha il passaggio da un comportamento del bitume di tipo "sol" a quello di tipo "gel".

Il secondo parametro è il *rapporto di compatibilità* R_c definito da Rostler e Sternbeg (1949) con la seguente formula:

$$R_c = \frac{\text{Basi azotate}}{\text{Paraffine}}$$

In questa seconda equazione si mettono in rapporto i componenti più reattivi con quelli meno reattivi. Sono considerati accettabili valori superiori allo 0,5.

2.4 Classificazione empirica dei bitumi

I bitumi impiegati in ambito stradale sono classificati secondo un sistema che prevede la determinazione di alcuni parametri attraverso una serie di prove empiriche:

- Prova di rammollimento;
- Prova di penetrazione;
- Prova Fraass;
- Prova di duttilità.

2.4.1 Prova di rammollimento

La prova di rammollimento detta anche prova "palla-anello" (UNI EN 1427) consiste nel determinare la temperatura raggiunta da due campioni di bitume al contatto con una piastra di base. I campioni sono colati all'interno di due anelli in ottone posti alla distanza di un pollice dalla piastra di base e soggetti ad un carico generato da sfere di acciaio da 3,5 g ciascuno. Tutto ciò è collocato all'interno di un bagno d'acqua, la cui temperatura iniziale è di 5°C e viene aumentata progressivamente di 5°C al minuto.

L'incremento di temperatura porta al rammollimento dei due dischi di bitume fino a toccare la piastra inferiore. A questo punto si determina la temperatura di rammollimento come la media delle due temperature che rappresenta il passaggio dallo stato viscoelastico a quello puramente viscoso.

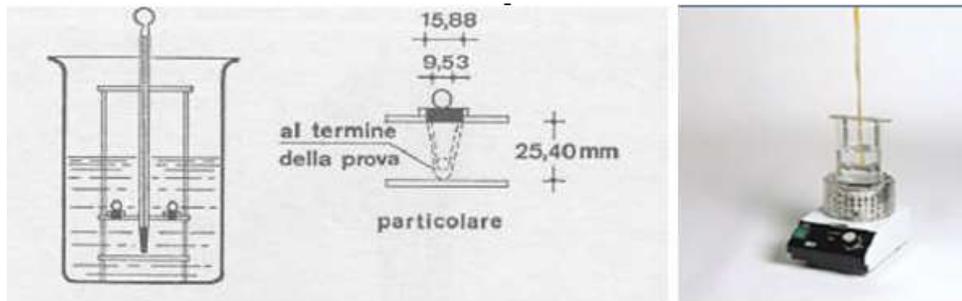


Figura 2.10 prova di rammollimento (UNI EN 1427)

2.4.2 Prova di penetrazione

La prova di penetrazione così come definita dalla norma UNI EN 1426 permette di determinare la consistenza del bitume per mezzo della penetrazione di un ago, misurata in decimi di millimetro. L'ago normalizzato è soggetto ad un carico di 100 gr per un tempo di prova pari a 5 secondi. Esso affonda all'interno di un campione di bitume mantenuto alla temperatura di 25°C.

La norma italiana suddivide i bitumi in classi di penetrazione, dal più duro (20/30) al più fluido (180/220).

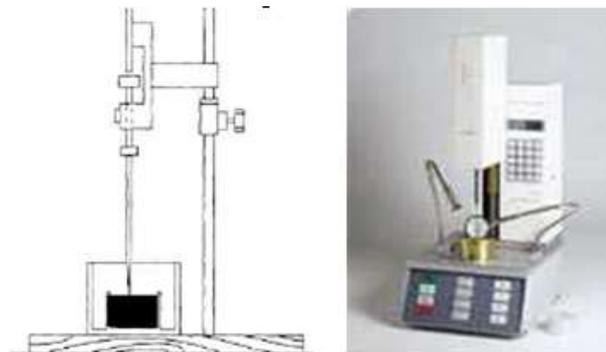


Figura 2.11 penetrometro utilizzato per effettuare la prova di penetrazione (UNI EN 1426)

2.4.3 Prova Fraass

La norma EN 12593 definisce la temperatura Fraass alla quale un film di bitume dello spessore di 0,5 mm, sottoposto a flessione, presenta fenomeni di rottura sulla sua superficie. La prova consiste nell'abbassare la temperatura di inizio prova, pari a 10°C, di un grado al minuto fino a quando, attraverso delle ripetute azioni di inflessione si raggiunge lo stato di rottura.



Figura 2.12 utensile per la prova Fraass (EN 12593)

2.4.4 Prova di duttilità

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

L'elongazione o duttilità è espressa in cm.

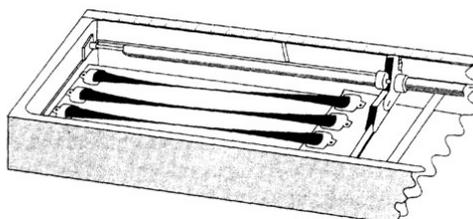


Figura 2.13 prova di duttilità

La norma CNR (B.U. n.24/71), utilizzata in Italia, classifica i bitumi per usi stradali in funzione della classe di penetrazione.

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

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

Tabella 2.3 specifiche CNR per la classificazione dei bitumi ad uso stradale

Come si evince dalla tabella un bitume 50/70 è un legante che presenta un affondamento compreso tra 50 e 70 decimi di millimetri, una temperatura di rammollimento compresa tra 47 e 56°C, una fragilità raggiunta alla temperatura di -7°C ed un allungamento di 80 cm. Si nota ancora come all'aumentare della penetrazione del bitume, si ha una diminuzione della temperatura Fraass e della temperatura di rammollimento mentre si verifica un incremento della duttilità.

2.5 Il bitume modificato con polimeri

Con il termine “bitume modificato” si intende un bitume le cui caratteristiche chimico-fisiche vengono modificate con opportuni polimeri.

La modifica del bitume con l'impiego di percentuali variabili di polimeri è iniziata nei primi anni '70 consentendo di abbassare la suscettività termica, di migliorare la coesione dell'asfalto e di modificarne in vario modo le caratteristiche reologiche, in funzione della temperatura utilizzata, della percentuale e del tipo di polimero selezionato. Inoltre, l'utilizzo dei polimeri come agenti modificanti altera la struttura del bitume e precisamente la inverte; durante la miscelazione bitume-polimero i composti maltenici vengono assorbiti dalla fase polimerica che lentamente rigonfia ed aumenta quindi di volume. Il processo continua fino a quando avviene l'inversione di fase che si verifica quando gli asfalteni sono intrappolati nella matrice polimerica, giungendo, infine, ad avere la fase polimerica come fase continua ed il bitume come fase dispersa.

Nonostante la percentuale in peso di polimero impiegato sia alquanto modesta, la nuova fase formatasi (fase polimerica) diventa quella che predomina volumetricamente e quella che conferisce alla miscela le proprietà chimico-fisiche.

Gli elastomeri e i plastomeri, infatti, formano una struttura reticolata con la matrice bituminosa riflettendo su di essa le caratteristiche reologiche e prestazionali.

Nello specifico, gli elastomeri trasmettono caratteristiche elastiche permettendo al bitume un recupero elastico dello stesso mentre i plastomeri conferiscono rigidità. In ogni caso il bitume diventa più resistente e consente una maggiore durabilità della pavimentazione.

Il bitume modificato presenta così i seguenti vantaggi:

- Maggiore flessibilità alle basse temperature;
- Maggiore rigidità alle alte temperature;
- Migliore correlazione tra viscosità e temperatura con riduzione della suscettività termica;

- maggiore resistenza ai carichi e alla fatica;
- maggiore recupero elastico;
- maggiore coesione ed adesione agli aggregati;
- maggiore resistenza all'invecchiamento.

2.5.1 La modifica con SBS

I polimeri SBS sono gli elastomeri termoplastici più impiegati nella modifica dei bitumi, grazie alla loro capacità di conferire una più alta resistenza alle sollecitazioni meccaniche, buona lavorabilità alle alte temperature ed un miglior comportamento elastico.

La sigla SBS denota la configurazione dell'elastomero, un copolimero a blocchi stirene-butadiene-stirene. Il peso molecolare medio del polistirene è compreso tra 10000-15000 U.M.A. e quello del polibutadiene tra 50000-70000 U.M.A. [13].

La struttura molecolare è costituita da tre parti: due lunghe catene di polistirene poste all'estremità del blocco centrale polibutadienico (figura 2.12).

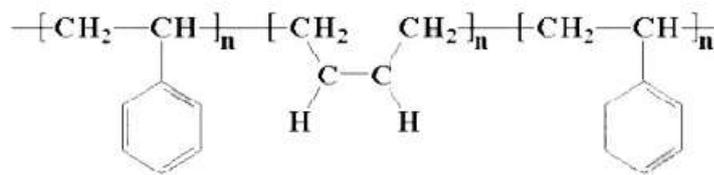


Figura 2.14 stirene-butadiene-stirene

Il polistirene è una plastica tenace e resistente ed attribuisce al polimero la sua durabilità, mentre il butadiene è un materiale gommoso [14].

Questa configurazione è dovuta alle differenti temperature di transizione vetrosa dei due polimeri: la temperatura di transizione vetrosa del polistirene è 95°C mentre quella del polibutadiene è -80°C quindi, alle normali condizioni di esercizio di una pavimentazione stradale, le unità stireniche si uniscono a formare nuclei tenuti insieme dal blocco butadienico ottenendo così la configurazione lineare mostrata in figura.

La struttura reticolata così formata è reversibile. Ciò significa che le proprietà fisiche e meccaniche dell'SBS sono sempre recuperate dopo ripetuti cicli di riscaldamento-raffreddamento; proprietà molto importante che viene trasmessa anche al bitume.

Un'ulteriore considerazione da fare è che la concentrazione dell'SBS fa variare la risposta del bitume: per valori bassi di copolimero (generalmente inferiori al 4%) la fase continua è data dal bitume mentre il modificante si disperde. In questo caso la miscela bitume-sbs assume le caratteristiche della base bituminosa avente però una discreta

resistenza alle basse temperature. Per valori di concentrazione compresi tra il 4 e 6 % invece si formano delle microstrutture nelle quali sia la fase bituminosa che quella polimerica risultano essere continue ed interconnesse.

Infine per elevate concentrazioni di SBS (superiori al 5-7%) si ha un risultato opposto a quello ottenuto per basse concentrazioni, ovvero la matrice bituminosa risulta essere dispersa all'interno della fase continua data dalla catena polimerica e funge da agente plastificante. In quest'ultimo caso si crea una rete tridimensionale polimerica che modifica totalmente le proprietà del bitume: miglior comportamento sia ad alte che basse temperature, maggior resistenza alla fatica e all'usura conferita dalle proprietà elastiche [13].

2.6 La reologia del bitume

Con il termine reologia si intende quella branca della fisica che studia il comportamento tenso-deformativo dei materiali, tenendo in considerazione come le variabili tempo e temperatura influiscano su di esso. Il bitume sia esso tradizionale che modificato con polimeri presenta un comportamento reologico di tipo viscoelastico: a temperatura ambiente mostra il carattere di un solido viscoelastico mentre ad elevate temperature quello di un fluido viscoelastico. In questo paragrafo si descrivono i modelli reologici attraverso i quali è possibile individuare delle formule matematiche che spiegano il comportamento visco-elastico dei bitumi.

2.6.1 Modelli reologici elementari

Come predetto, per spiegare il comportamento viscoelastico del bitume mediante schemi reologici è opportuno innanzitutto introdurre quelli che sono i modelli reologici elementari: si tratta del modello di elasticità lineare e del modello di viscosità lineare.

Il primo, rappresentato da una molla, descrive il comportamento del bitume come se fosse un solido perfettamente elastico, il cosiddetto comportamento alla Hooke dove la tensione applicata è direttamente proporzionale alla deformazione mediante una costante elastica che rappresenta il modulo di rigidezza della molla.

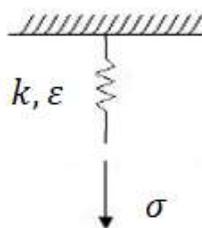


Figura2.15 molla di Hooke

La legge di Hooke, valida solo per materiali che stanno alla base della teoria dell'elasticità (comportamento omogeneo, isotropo ed elastico lineare), viene espressa nel seguente modo:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\tau = G \cdot \gamma$$

dove G è il modulo di elasticità tangenziale, E è il modulo di elasticità longitudinale o modulo di Young, τ è lo sforzo tangenziale, σ lo sforzo longitudinale, γ la deformazione di taglio ed infine ε la deformazione longitudinale.

Il secondo esprime invece il comportamento del bitume come se fosse un fluido perfettamente viscoso, schematizzato con lo smorzatore viscoso di Newton, in cui la tensione è direttamente proporzionale alla velocità di deformazione tramite una costante di viscosità dinamica che rappresenta la capacità di un materiale di opporsi ad un gradiente di deformazione.

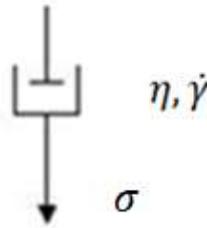


Figura2.16 smorzatore viscoso di Newton

L'equazioni che esprimono il legame tensione-deformazione di un fluido perfettamente viscoso è:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

$$\sigma = \lambda \cdot \dot{\varepsilon}$$

in cui λ è la costante di viscosità elongazionale, η è la costante di viscosità dinamica, $\dot{\gamma}$ e $\dot{\varepsilon}$ sono le velocità di deformazione, τ e σ sono rispettivamente le tensioni tangenziali e longitudinali.

La differenza tra i due comportamenti è che nel primo caso il materiale si deforma istantaneamente al carico applicato indipendentemente dal tempo di applicazione dello stesso. Durante la fase di scarico il materiale ritorna nella configurazione iniziale allo stesso modo con cui si era deformato durante la fase di carico e cioè istantaneamente, senza mostrare alcuna deformazione permanente.

Nel secondo caso, invece, la deformazione non viene in alcun modo recuperata, ovvero l'energia spesa per deformare è totalmente dissipata una volta cessato il carico. Lo stato finale raggiunto dal materiale dipende non dal carico applicato bensì dal suo tempo di applicazione. Infatti, piccole sollecitazioni applicate per lungo tempo possono provocare deformazioni del materiale rilevanti, viceversa, grandi sollecitazioni applicate per qualche istante possono, invece, mantenere inalterato lo stato iniziale del materiale.

A questo punto, una volta compreso il funzionamento di questi due modelli elementari, è possibile combinarli per descrivere i differenti comportamenti dei materiali.

2.6.2 Modelli reologici del bitume

Come già detto, nel solido elastico di Hooke esiste una relazione lineare tra tensioni e deformazioni e nel fluido viscoso di Newton un legame lineare tra tensioni e velocità di deformazione. Detto ciò, i bitumi sono definiti materiali viscoelastici perché manifestano contemporaneamente la natura di solidi elastici per temperature basse e di fluidi viscosi per alte temperature. Si parla quindi di viscoelasticità lineare.

Tale comportamento può essere rappresentato graficamente come segue (figura 2.18):

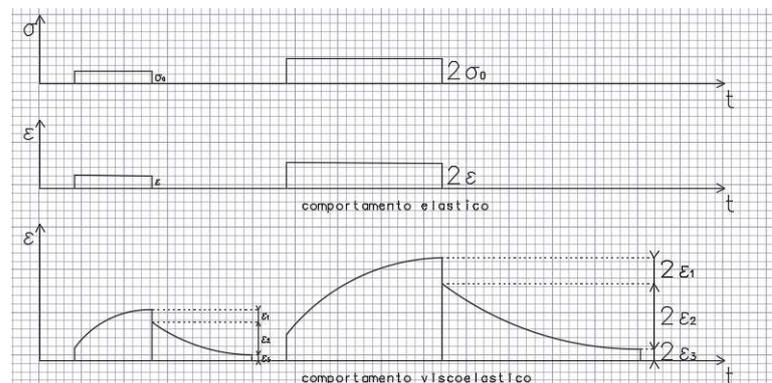


Figura 2.17 confronto tra comportamento elastico e viscoelastico di un materiale

Si riporta nella parte alta della figura l'andamento di una generica tensione applicata in funzione del tempo, mentre nella parte centrale ed inferiore si riportano rispettivamente l'andamento della deformazione di un materiale con comportamento elastico lineare e quello con comportamento viscoelastico.

La differenza di risposta tra i due comportamenti è evidente: il solido elastico ha un andamento che segue esattamente quello di carico ($\sigma; t$) mentre nel grafico sottostante si evidenziano tre contributi di deformazione. Il primo tratto rappresenta l'aliquota di deformazione reversibile data dal comportamento elastico del materiale, il secondo rappresenta la risposta elastica ritardata, ovvero il contributo di deformazione restituita nel tempo e, infine, l'ultimo tratto è l'aliquota di deformazione irreversibile.

A questo punto, il passo successivo è descrivere il comportamento viscoelastico dei bitumi attraverso modelli reologici ottenuti dalla sovrapposizione dei modelli elementari e, determinare, per ciascuno di essi, la legge costitutiva che descrive la relazione tensione-deformazione.

2.6.2.1 Modello viscoelastico lineare di Maxwell

Uno dei più semplici modelli viscoelastici è quello di Maxwell, costituito da una molla di rigidità G e da un dissipatore contenente un fluido di viscosità η , posizionati in serie. Il modello descrive esattamente il comportamento di un fluido viscoelastico.



Figura 2.18 modello di Maxwell

La risposta del modello è ottenuta dalla somma di due aliquote, la velocità di deformazione della molla e quella dello smorzatore:

$$\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_{tot} = \left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_{molla} + \left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_{smorzatore};$$

Derivando la legge di Hooke si ha:

$$\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_{molla} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt};$$

mentre dal modello di Newton:

$$\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_{smorzatore} = \frac{\tau}{\eta};$$

ne segue:

$$\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_{tot} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta};$$

Da questa equazione è possibile definire il tempo di rilassamento λ ovvero il decadimento nel tempo dello sforzo applicato: infatti, se applichiamo uno sforzo τ_0 all'istante $t=0$ si manifesta immediatamente una deformazione γ che noi la ipotizziamo mantenersi costante nel tempo. La variazione della deformazione nel tempo pertanto

risulta essere nulla, quindi il decadimento dello sforzo in funzione del tempo risulta essere:

$$\frac{\tau(t)}{\tau_0} = e^{-(t/\lambda)};$$

L'equazione mostra come lo sforzo $\tau(t)$ si annulla per tempi abbastanza lunghi e quindi solo in questo caso avremmo l'irreversibilità della deformazione imposta.

Se, invece, applichiamo una tensione τ_0 all'istante $t=0$, ipotizzata costante nel tempo, si svilupperebbe immediatamente una deformazione elastica ($\frac{\tau_0}{G}$) per effetto della molla, seguita da una deformazione dello smorzatore che, come già sappiamo, dipende dal tempo di applicazione del carico ($\frac{\tau_0}{\eta} t$).

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{G} + \frac{\tau_0}{\eta} t;$$

Tale modello non risulta essere valido per spiegare il complesso comportamento del bitume perché oltre ad essere troppo semplice non tiene in considerazione un parametro molto importante come la temperatura.

2.6.2.2 Modello viscoelastico lineare di Kelvin-Voigt

Nel modello di Kelvin-Voigt, una molla di rigidità G e un dissipatore con costante η sono posti in parallelo e non più in serie come nel modello di Maxwell. Differentemente da quest'ultimo il modello di Kelvin-Voigt descrive il comportamento di un solido viscoelastico.

Considerata la disposizione della molla e dello smorzatore, ne segue che la deformazione del sistema risulta essere identica a quella dei due elementi mentre la tensione globale applicata al modello è distribuita tra gli elementi stessi, nel rispetto della congruenza.

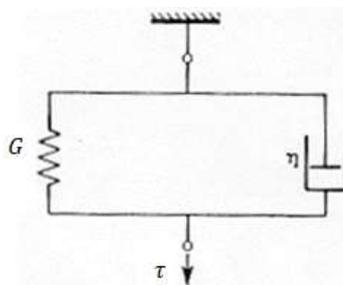


Figura 2.19 modello viscoelastico lineare di Kelvin-Voigt

Le equazioni a supporto del problema sono quindi:

$$\gamma_{tot} = \gamma_{molla} = \gamma_{smorzatore}$$

$$\tau_{tot} = \tau_{molla} + \tau_{smorzatore}$$

dalla legge di Hooke deriva che:

$$\tau = G \cdot \gamma$$

mentre da quella di Newton:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

L'equazione differenziale del modello vale:

$$\tau_{tot} = G \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Analogamente a quanto visto nel modello di Maxwell anche in questo caso è possibile definire una grandezza λ denominata “tempo di ritardo” del sistema.

Questa grandezza vale:

$$\lambda = \eta \cdot J$$

dove J è la cedevolezza della molla ($\frac{1}{G}$). Il tempo di ritardo esprime la misura temporale alla quale la cedevolezza diventa indipendente dal tempo.

A questo punto se ipotizziamo di eseguire una prova di creep, ovvero immaginiamo di imporre uno sforzo τ_0 all'istante $t=0$ e di mantenerlo costante nel tempo, è possibile notare il comportamento del modello:

$$\gamma = J \cdot \tau_0 [1 - e^{-(t/\lambda)}];$$

si evidenzia, infatti, come il modello di Kelvin-Voigt si comporta come un solido elastico solo per tempi infinitamente lunghi.

Applicando, invece, una deformazione iniziale γ_0 , ottenuta dalla rimozione di una tensione τ_0 al tempo $t=0$, è possibile notare il suo decadimento temporale fino ad annullarsi per tempi abbastanza lunghi:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\left(\frac{-t-t_0}{\lambda}\right)}$$

Questo modello non presenta quindi deformazioni irreversibili ma soltanto delle risposte elastiche ritardate. Pertanto, per le stesse ragioni del modello precedente (Maxwell) il modello di Kelvin-Voigt non risulta essere adeguato a descrivere il comportamento del bitume.

2.6.2.3 Modello di Burger

Analizzando il modello di Maxwell e quello di Kelvin-Voigt possiamo constatare che solo in determinate circostanze descrivono il reale comportamento viscoelastico dei bitumi: infatti, per tempi di carico abbastanza brevi e/o temperature basse si ha il comportamento di un solido viscoelastico, per tempi di carico sufficientemente lunghi e/o temperatura alte si ha il comportamento di un fluido viscoelastico.

Per poter descrivere realmente il comportamento viscoelastico dei materiali, è opportuno mettere insieme più elementi molla-smorzatore.

Il più semplice modello considerato è quello di Burger.

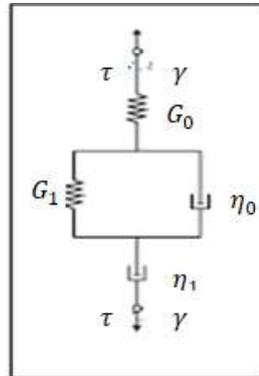


Figura 2.20 modello di Burger

Come mostra la figura 2.18 il modello di Burger è costituito dal modello di Maxwell messo in serie con quello di Kelvin-Voigt.

Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, è possibile determinare l'equazione costitutiva del sistema:

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{\eta_0} t + \frac{\tau_0}{G_0} + \frac{\tau_0}{G_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_1}} \right);$$

questa legge può essere interpretata nel seguente modo: all'applicazione del carico si verifica immediatamente una deformazione elastica istantanea $\left(\frac{\tau_0}{G_0}\right)$ e al contempo inizia a manifestarsi la deformazione viscosa; successivamente si verifica una deformazione elastica ritardata che, una volta esauritasi, dà luogo alla sola deformazione viscosa. Nel momento in cui il carico viene rimosso si ha il recupero elastico seguito dal recupero elastico ritardato fino al raggiungimento di uno stato di deformazione permanente [14], [18], [19].

2.6.2.4 I modelli generalizzati

Il comportamento del bitume è alquanto complesso che neanche il modello di Burger costituito da un solo modello di Kelvin-Voigt è in grado di ricoprire il lungo lasso in cui si manifesta la deformazione elastica ritardata. Pertanto è opportuno in questo caso considerare più modelli di Kelvin-Voigt disposti in serie, la cui generica equazione costitutiva è espressa come segue:

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{G_0} \cdot \left(1 + \frac{t}{\lambda_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\tau_0}{G_i} \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\lambda_i} \right) \right];$$

nella figura sottostante è riportato lo schema di un modello generalizzato di Kelvin-Voigt:

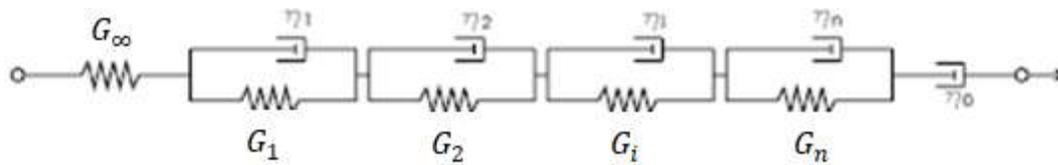


Figura 2.21 modello generalizzato di Kelvin-Voigt

Nel caso in cui il comportamento viscoelastico non sia determinabile con una sola coppia di molla-smorzatore, si rende necessario l'introduzione di una serie di modelli di Maxwell disposti in parallelo. Questo è il modello di Maxwell generalizzato (figura 2.23)[14]:

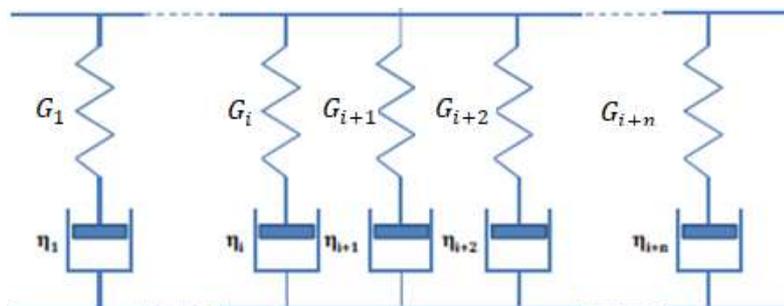


Figura 2.22 modello generalizzato di Maxwell

Capitolo 3 Strumenti e metodologie di prova utilizzati nel corso della sperimentazione

In questo capitolo si descrivono le attrezzature e le metodologie necessarie per caratterizzare i materiali impiegati nell'indagine sperimentale: gli aggregati, i bitumi e le miscele di conglomerato bituminoso.

3.1 Analisi granulometrica degli aggregati

L'analisi granulometrica è un insieme di operazioni dalle quali si definisce una curva granulometrica che indica la distribuzione dimensionale delle particelle di un campione. La prova viene eseguita sia alle differenti classi di aggregato al fine di determinare la curva granulometrica ottimale per il confezionamento della miscela, sia agli aggregati della miscela recuperati dopo l'estrazione del bitume attraverso la carbolite.

Nel primo caso la normativa a cui ci riferiamo è la UNI EN 933-1[20] mentre nel secondo caso la UNI EN 12697-2 [21].

Per quanto riguarda la distribuzione delle varie classi di aggregato, il primo step da compiere è quello del prelevamento di una quantità di materiale da esaminare, quartarlo ed essiccarlo in forno alla temperatura di 105-110°C fino al raggiungimento di un peso costante.

La quantità minima di materiale da esaminare, secondo quanto previsto dalla norma, dipende dalla dimensione massima dell'aggregato considerato, ovvero:

| Dimensione massima dell'aggregato D mm | Massa minima della porzione di prova Kg |
|---|--|
| 63 | 40 |
| 32 | 10 |
| 16 | 2,6 |
| 8 | 0,6 |
| ≤ 4 | 0,2 |

Tabella 3.1 massa minima richiesta per l'analisi granulometrica degli aggregati

A questo punto si lascia raffreddare il materiale per circa un'ora e si procede alla setacciatura: l'aggregato viene disposto nella parte superiore di una pila di setacci sistemati con dimensione delle aperture decrescenti dall'alto verso il basso e si imprime un movimento rotatorio-sussultorio per agevolare il passaggio attraverso i fori.

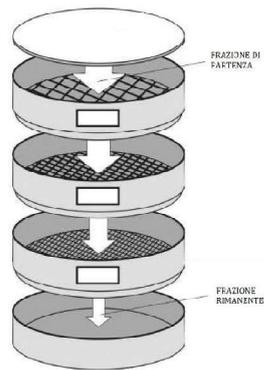


Figura 3.1 schema di funzionamento del setacciature

Questo movimento, compiuto da un agitatore meccanico (figura 3.2), ha una durata compresa tra i 10 ed i 30 minuti dipendente dalla dimensione, dalla natura e dalla composizione mineralogica dell'aggregato.



Figura 3.2 pila di setacci in un agitatore meccanico

Completata la fase di setacciatura si procede alla pesatura di ogni setaccio valutando la massa trattenuta in ciascuno di essi per differenza tra il peso lordo e la tara dello stesso setaccio, quindi il trattenuto percentuale.

$$m_i = \text{peso lordo}_i - \text{tara}_i;$$

$$t_i = \frac{100 \cdot m_i}{M};$$

dove $M = \sum m_i$;

noto l'iesimo trattenuto percentuale, è possibile calcolare il trattenuto progressivo sulla colonna (T_i), il cui complemento a 100 fornisce il passante progressivo (P_i).

$$T_i = T_{i-1} + t_i;$$

$$P_i = 100 - T_i;$$

È proprio quest'ultimo che inserito in un grafico semilogaritmico con le dimensioni di apertura dei setacci permette di costruire la curva granulometrica del materiale in esame [22].

Dopo la realizzazione della miscela, analizzando la distribuzione degli aggregati presenti in essa, si evince che la procedura di setacciatura è identica a quella sopra descritta, spiegata dalla norma UNI EN 933-1. Ciò che cambia invece è la fase preliminare, descritta dalla norma UNI EN 12697-2: gli aggregati, dopo essere estratti dalla carbolite (prova necessaria per determinare il quantitativo di bitume nella miscela), si lasciano raffreddare fino al raggiungimento di una massa costante. A questo punto, il materiale, privo di bitume, viene sottoposto a lavaggio impiegando, allo scopo di separare il fine dall'aggregato più grosso, due setacci le cui dimensioni delle aperture sono rispettivamente 2 e 0,063 mm, impilati l'uno sull'altro.



Figura 3.3 setacci utilizzati (2 e 0.063mm)

Il lavaggio continua fino a quando l'acqua uscente dai pori del setaccio inferiore risulta essere limpida.



Figura 3.4 lavaggio degli aggregati post carbolite

Subito dopo si procede ad essiccare il materiale mettendo in forno alla temperatura di 105°C. Una volta che la massa secca viene estratta dal forno e fatta raffreddare, si procede con l'analisi granulometrica così come spiegato sopra.

3.2 Carbolite

Prima di verificare che la distribuzione degli aggregati nella miscela di conglomerato bituminoso coincida o comunque si avvicini a quella di progetto è necessario dover estrarre il contenuto di bitume presente nella miscela.

La prova effettuata con la carbolite serve appunto a determinare il quantitativo di bitume nella miscela quindi, a verificare, che questo sia congruo a quello da noi atteso.

La procedura, secondo quanto riportato dalla norma UNI EN 12697-39 [23], consiste nel collocare all'interno di un cestello di acciaio, dotato di due ripiani sovrapposti per consentire un' omogenea distribuzione del materiale, un quantitativo di miscela (figura 3.5).



Figura 3.5 cestello d'acciaio utilizzato per la prova

La quantità di miscela da disporre all'interno del cestello è prescritta dalla seguente tabella fornita dalla normativa:

| Nominal maximum aggregate size [mm] | Mass of sample [g] | Maximum constant mass limit [g] |
|--|-----------------------|------------------------------------|
| 4 | 1000 to 1400 | 0,15 |
| 5,6 or 6,3 or 8 or 10 | 1000 to 1600 | 0,15 |
| 11,2 or 12,5 or 14 or 16 | 1000 to 1700 | 0,20 |
| 20 or 22,4 | 1000 to 2400 | 0,25 |
| 31,5 | 1000 to 3000 | 0,30 |
| 40 or 45 | 1000 to 4000 | 0,40 |

Tabella 3.2 quantitativi di materiale prescritti dalla normativa

Il conglomerato di bitume innanzitutto viene opportunamente quartato in modo da avere 4 porzioni di materiale il più omogeneo possibile (figura 3.6), da cui ne vengono selezionate due che sono, successivamente, sistemate all'interno del cestello.



Figura 3.6 quartatura della miscela di bitume

A questo punto, il cestello viene immesso nel forno che, dotato di una bilancia capace di monitorare le variazioni di peso subite dal campione durante il processo di combustione, si trova alla temperatura di 540 °C e da lì via alla prova.

Il processo ha una durata compresa tra i 20 ed i 60 minuti in funzione del quantitativo di miscela e di bitume e termina quando la bilancia non registra più variazioni di massa.

Nella figura sottostante è riportato un confronto del campione prima e dopo il processo di combustione.



Figura 3.7 confronto tra prima e dopo la carbolite

Il campione estratto dalla carbolite viene lasciato raffreddare e successivamente pesato. Noti, quindi, la massa del campione prima del processo di combustione M_i , quella post carbolite M_f e la tara del cestello T , si procede al calcolo della percentuale di bitume della miscela rispetto alla massa totale degli aggregati [22]:

$$\%B = \frac{(M_i - T) - (M_f - T)}{(M_f - T)} \cdot 100$$

3.3 Massima Massa Volumica Teorica (MMVT)

La Massima Massa Volumica Teorica (in inglese Theoretical Maximum Specific Gravity) è utilizzata per calcolare la massa per unità di volume di un materiale privo di

vuoti. Il termine “teorico” deriva dal fatto che, qualunque sia il materiale chiamato in causa, è impossibile fisicamente avere vuoti pari a zero.

Questa procedura, nel nostro lavoro, è stata eseguita sia per ogni classe di aggregato impiegato nel mix design, che per le miscele di conglomerato bituminoso al fine, in quest’ultimo caso, di calcolare il contenuto dei vuoti di un campione compattato.

Nel caso degli aggregati si è fatto riferimento alla norma UNI EN 1097-6 [24], mentre per le miscele bituminose alla norma UNI EN 12697-5 [25].

In entrambi i casi la procedura sperimentale è analoga e, riferendoci al caso delle miscele di conglomerato bituminoso, consiste in una serie di fasi:

Fase I: preparazione del materiale

Per poter eseguire la prova (si eseguono diverse ripetizione dello stesso materiale per avere alla fine un valore mediato di MMVT) il conglomerato di bitume viene posto su una superficie piana e successivamente quartato per avere porzioni di esso il più omogenee possibili. Inoltre ciascuna porzione (di circa 500 gr) deve essere costituita da elementi disgregati le cui dimensioni non devono superare i 6 mm e per poterlo realizzare il materiale deve essere caldo ma non troppo (la temperatura non deve essere superiore a 110°C).



Figura 3.8 materiale disgregato (sx) e quartato (dx)

Fase II: pesatura e riempimento del picnometro con il campione

A questo punto si pesa la tara di un picnometro considerando anche il tappo (m_1), i quali sono identificati da lettere e /o numeri per evitare errati. Di questo si conosce anche il volume V_p . Fatto ciò i picnometri vengono riempiti di materiale che si trova alla temperatura ambiente e si pesano nuovamente (m_2).



Figura 3.9 picnometro vuoto e picnometro pieno

Fase III: riempimento dei picnometri con acqua distillata e successiva disaerazione

In questa fase il picnometro pieno di materiale viene riempito con dell'acqua distillata fino al raggiungimento di un livello sufficientemente tale da ricoprire il materiale e favorire l'estrapolazione dei vuoti d'aria. Si procede quindi alla disaerazione ovvero all'aspirazione dell'aria intergranulare con un'apposita apparecchiatura. La disaerazione dura circa 45 minuti, durante la quale, per facilitare l'espulsione dell'aria, si rende opportuno scuotere, facendo molta attenzione, il fondo dei picnometri.



Figura 3.10 fase di disaerazione

Fase IV: riempimento totale dei picnometri e pesature

Completata la fase di disaerazione, si pongono i tappi sui picnometri e si procede a completare il riempimento del picnometro versando dell'acqua disaerata. La procedura termina con la formazione di un menisco sul tappo del picnometro, il quale viene posto sulla bilancia e pesato (m_3). Inoltre per il calcolo della MMVT è necessario avere nota la densità dell'acqua ρ_w quindi, mediante un termometro, si rileva la temperatura da cui dipende.



Figura 3.11 picnometro completo di menisco e dettaglio

Fase V: calcolo della massima massa volumica teorica

A questo punto, noti tutti i parametri, si può calcolare la Massima Massa Volumica Teorica con la formula seguente [22]:

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

3.4 Massima Massa Volumica Apparente (MMVA)

Come ho già detto, per calcolare i vuoti esistenti in un campione di miscela compattato è necessario calcolare, oltre alla MMVT, anche la MMVA che rappresenta la massa per volume unitario di un campione con vuoti d'aria e ad una temperatura di prova nota.

Il calcolo è dettato dalla normativa UNI EN 12697-6 [26], che si rifà, per lo scopo, alla procedura chiamata “Superficie Saturata Secca” (SSD).

La procedura prevede inizialmente, prima di immergere il campione in un bagno d'acqua, di pesare la sua massa secca (m_1), (figura 3.12 sx).

Si immerge, pertanto, il campione in un bagno d'acqua per una durata sufficientemente lunga da saturare il provino (circa 45 minuti) e si valuta la massa satura in acqua (m_2), verificando che non ci siano bolle d'aria che fuoriescono dal provino durante la pesata (figura 3.12 dx).



Figura 3.12 massa secca (sx) e massa satura in acqua (dx) di un campione di miscela

Immediatamente dopo la pesata in acqua, si rimuove il provino dall'acqua stessa e, con una pelle di camoscio umida, si asciugano le gocce d'acqua presenti sulla superficie. Quindi si pesa la massa del campione saturo in aria (m_3).

Come visto per la MMVT anche la formula della Massima Massa Volumica Apparente è funzione della densità dell'acqua quindi, anche in questo caso, bisogna misurarne la temperatura.

Pertanto, la MMVA viene fornita dalla formula:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w;$$

Noti, a questo punto, la MMVT e la MMVA è possibile calcolare il contenuto dei vuoti dei provini di conglomerato bituminoso come segue [22]:

$$\%v = \left(1 - \frac{\rho_{bssd}}{\rho_{mw}}\right) \cdot 100$$

3.5 Compattazione con pressa a taglio giratorio

Lo stato di addensamento di carote prelevate in situ da pavimentazioni in conglomerato bituminoso può essere simulato in laboratorio con uno dei più importanti strumenti del metodo Superpave: la pressa a taglio giratorio. Questa, infatti, imprime sul campione una pressione verticale di 600 kPa che, insieme al movimento rotatorio della fustella (inclinata di 1,25° rispetto all'asse orizzontale e fatta ruotare attorno all'asse verticale), permette una continua riorganizzazione dei suoi costituenti, analogamente a quanto accade in situ per mezzo dei rulli compattatori.

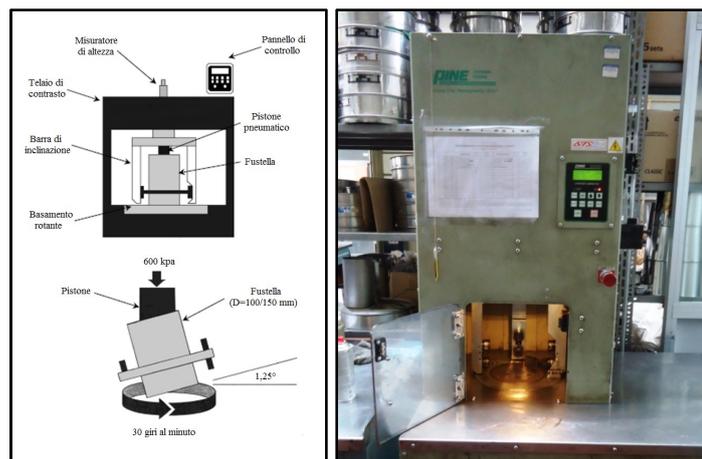


Figura 3.13 schema di funzionamento e pressa a taglio giratoria utilizzata

La compattazione con la pressa giratoria segue la normativa UNI EN 12697-31 che prevede le seguenti operazioni:

- 1) La fustella e la miscela vengono messi in forno alla temperatura di compattazione prevista;
- 2) Raggiunta la temperatura di compattazione, viene versato in fustella una quantità precisa di materiale dipendente dal contenuto dei vuoti che vogliamo ottenere, posizionando tra la miscela ed i piatti superiore ed inferiore dei filtri cartacei;
- 3) La fustella così riempita viene nuovamente condizionata inserendola nel forno sempre alla stessa temperatura di compattazione per la durata di circa un'ora per recuperare la temperatura persa nella seconda operazione;
- 4) Impostazione della macchina: bisogna selezionare la modalità di compattazione della macchina che può avvenire in due modi differenti. Nel caso di compattazione ad altezza (che è la modalità da noi usata) la macchina registra il numero di giri necessari al raggiungimento dell'altezza di riferimento, nel caso di compattazione a giri si definisce il numero di rotazioni limite che la macchina deve compiere;
- 5) La fustella viene inserita nella cella di carico della giratoria e si dà l'avvio alla prova. In questa fase la macchina, attraverso un sistema di rilevazione automatico, registra le altezze raggiunte dal provino ad ogni giro potendole visualizzare sul display di un computer;
- 6) Al termine della compattazione, la fustella viene rimossa dalla cella di carico, quindi il campione viene estratto e lasciato raffreddare a temperatura ambiente;



Figura 3.14 estrazione del campione dalla fustella

- 7) Infine, il lavoro svolto dalla pressa giratoria può essere rappresentato in un grafico semi-logaritmico in cui sull'asse delle ascisse abbiamo il logaritmo del numero di giri e sull'asse delle ordinate il grado di compattazione. Si definisce così la retta di lavorabilità la cui formula è:

$$C\% = C_1(\%) + k \cdot \ln(n_g);$$

con C_1 e k che indicano rispettivamente il grado di autocompattazione della miscela (parametro che indica quanto la miscela si compatta per effetto del solo peso proprio) e la lavorabilità della miscela [22].

3.6 Dynamic Shear Rheometer

Il comportamento reologico dei leganti bituminosi è determinato da una delle più innovative parti della normativa Superpave: il DSR.



Figura 3.15 Dynamic Shear Rheometer

Il Dynamic Shear Rheometer è un reometro rotazionale che lavora in regime oscillatorio, i cui parametri principali misurati sono il modulo complesso $|G^*|$ e la fase δ . Questi sono ottenuti da una relazione che lega la coppia torcente applicata T con la velocità angolare θ da cui, inoltre, è possibile risalire, considerando anche le dimensioni del campione di bitume (R ed h), ai valori delle tensioni τ e deformazioni γ (figura 3.15).

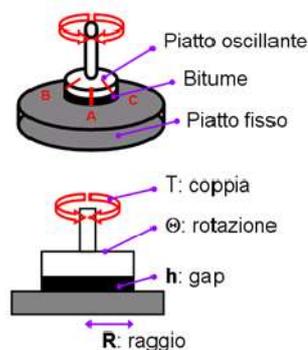


Figura 3.16 schema di funzionamento del DSR

Il principio di funzionamento della macchina può avvenire in due modi: in controllo di tensione oppure in controllo di deformazione. Nel nostro caso abbiamo utilizzato il DSR per effettuare delle prove a tensione controllata: un campione di bitume viene compresso tra due piatti (dimensione pari a 25mm), uno inferiore che rimane fisso ed

uno superiore in grado di ruotare attorno all'asse verticale fino al raggiungimento di un gap pari ad un millimetro. Si applica una tensione tangenziale τ e si monitora la variazione della deformazione tangenziale γ nel tempo [18].

3.7 Single Shear Creep Recovery

La capacità di un legante bituminoso di resistere all'accumulo di deformazione permanente è valutata, attraverso l'utilizzo del DSR, con la prova denominata Single Shear Creep Recovery.

Questa procedura sviluppata da Sant'Agata, Baglieri e altri, consiste nel sottoporre dei campioni di bitume ad un solo ciclo di creep-recovery, eseguito a tensione controllata ($\tau = 100 \text{ Pa}$) e con temperatura, tempo di carico e scarico predefiniti.

Il parametro fondamentale che questa prova fornisce, che ci permette di capire se un legante bituminoso è in grado di resistere all'accumulo di deformazione permanente, è il Creep Compliance Rate (CCR).

Il CCR è definito come segue:

$$CCR = \frac{d\left(\frac{\gamma}{\tau_0}\right)}{dt} = \frac{dJ}{dt}$$

dove:

J è il creep compliance, γ è la deformazione di taglio e τ_0 è la tensione applicata.

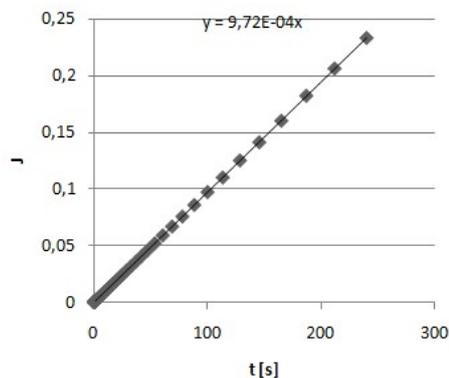


Figura 3.17 esempio della fase di creep della SSCR

Il CCR rappresenta la pendenza della retta di carico della prova Single Shear Creep Recovery. Nel caso in cui avessimo una curva di carico piuttosto che una retta, il Creep Compliance Rate va valutato considerando la tangente del tratto finale della curva. Pertanto, è sufficiente fermarsi alla sola fase di carico della procedura.

3.7.1 RTFOT Rolling Thin Film Oven Test

L'invecchiamento del bitume consiste in un aumento della sua rigidità a cui corrisponde una maggiore fragilità dello stesso.

Le prove a cui sottoponiamo i campioni di bitume vengono svolte nelle condizioni peggiori in cui possono trovarsi, pertanto i materiali che vengono impiegati nella procedura SSCR sono invecchiati al Rolling Thin Film Oven Test.

La prova RTFOT, che segue la norma 12607-1[27], consiste nel versare in bicchieri cilindrici $35 \pm 0,5$ g di bitume e di collocarli all'interno di un forno a tamburo rotante che si trova ad una temperatura di prova pari a $163 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 3.18 bitume versato in bicchieri cilindrici

Nel disporre i bicchieri di bitume all'interno del forno si ha, al contempo, una diminuzione della temperatura di prova, quindi la durata di questa procedura è di 75 minuti dal momento in cui il forno registra nuovamente il valore di $163 \text{ }^\circ\text{C}$. Questa variazione di temperatura, inoltre, deve essere recuperata in 15 minuti dalla chiusura del forno affinché la prova possa considerarsi valida.

In questo arco di tempo i campioni sono soggetti ad un getto di aria controllato dell'intensità pari a 4000 ml al minuto. Al termine della prova si recupera il bitume invecchiato versando nei cuki il 90 % del quantitativo contenuto nei bicchieri.

3.8 Il Viscosimetro Rotazionale RV

Allo scopo di determinare la temperatura di miscelazione dei conglomerati bituminosi che avviene ad alte temperature, è necessario capire quale sia la viscosità dei bitumi. Le misurazioni della viscosità infatti hanno lo scopo di simulare la lavorabilità dei bitumi alle alte temperature. Lo strumento a ciò predisposto è proprio il viscosimetro rotazionale.



Figura 3.19 Viscosimetro Rotazionale (dx) e sistema di acquisizione dati (sx)

La prova consiste nel misurare la coppia necessaria per mantenere costante la velocità di rotazione di una girante, di forma cilindrica, immersa in un campione di bitume a temperatura costante. Questa coppia viene convertita in viscosità e visualizzata sul display di un computer collegato al viscosimetro.

La quantità di bitume che viene versata in un apposito contenitore è di $8 \pm 0,2$ g ed è funzione del tipo di girante usata. Nel nostro caso è stata utilizzata una girante da 25mm.



Figura 3.20 contenitore del bitume

Questo contenitore viene collocato all'interno del viscosimetro e si dà inizio alla prova. Differenti sono le temperature a cui il bitume è sottoposto: si inizia da una temperatura di 125°C e si giunge ad una temperatura di 190°C , incrementandola di 25°C ad ogni step previsto. In questo modo si rilevano diversi valori di viscosità. Nello specifico, questa diminuisce all'aumentare della temperatura.

A questo punto è importante individuare un valore di viscosità ideale a cui corrisponde la corretta temperatura di miscelazione.

3.9 Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)

Le prove di tipo meccanico quali modulo dinamico, Flow Number, fatica, sui conglomerati bituminosi sono effettuate utilizzando una macchina servo idraulica compatta sviluppata durante un programma di ricerca compiuto dal NCHRP (National Cooperative Highway Research Program): l'AMPT.

L'Asphalt Mixture Performance Tester è costituita da una cella di confinamento triassiale, la cui pressione di confinamento è esercitata tramite aria compressa, una pompa idraulica per sollecitare verticalmente il provino, da una camera termostatica con unità di refrigerazione e riscaldamento ed infine da un sistema di controllo e acquisizione dati. La cella di carico è composta da tre elementi portanti e due piatti su cui viene collocato il provino. Nella figura sottostante si riporta la macchina dell'AMPT a sinistra e la cella triassiale a destra.

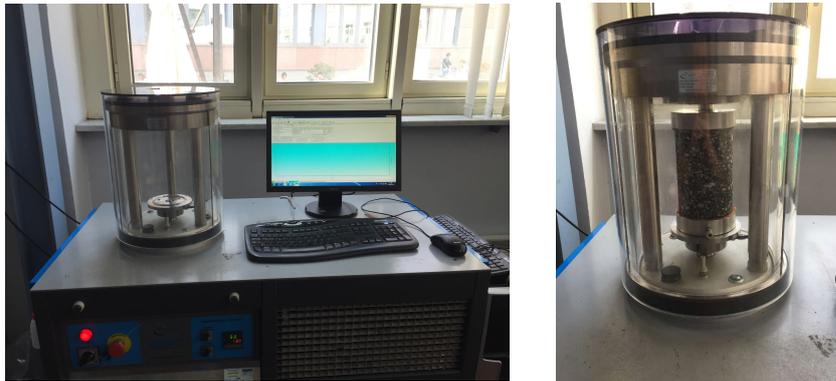


Figura 3.21 AMPT (a sinistra) e cella di carico triassiale (a destra)

3.10 Flow Number

Una delle prove meccaniche eseguibili con l'AMPT, come ho suddetto, è quella di Flow Number. Il Flow Number è l'indicatore utilizzato per valutare la capacità di resistenza all'accumulo di deformazione permanente dei conglomerati bituminosi, nonché argomento principale di questa tesi. I provini sottoposti a questa prova sono soggetti ad un carico impulsivo con frequenza pari ad 1 Hz, nello specifico, si alternano 0,1 secondi di carico e 0,9 secondi di riposo. Attraverso il software dell'AMPT si diagramma l'andamento della deformazione assiale cumulata ed il numero di cicli corrispondente definendo la curva del Flow Number (figura 3.16).

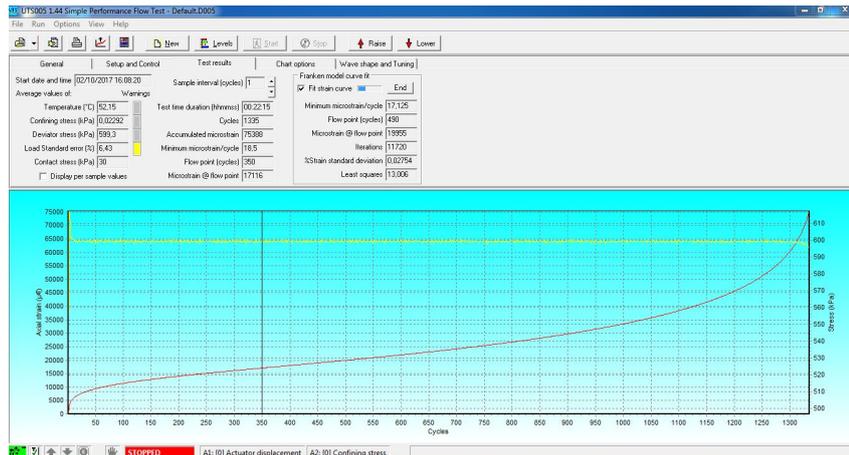


Figura 3.22 tipica curva di Flow Number registrata dal software dell' AMPT

Dal grafico si possono distinguere tre fasi di creep: primaria, secondaria e terziaria.

- La fase primaria è caratterizzata da una rapida deformazione permanente raggiunta immediatamente all'applicazione del carico.
- Nella fase secondaria si registra un andamento pressoché costante della deformazione accumulata permanente con il numero di cicli, si nota infatti un tratto lineare. La lunghezza di questo tratto dipende, inoltre, dalle condizioni di temperatura e di carico applicate.
- Nella fase di creep terziaria infine si ha una variazione di deformazione accumulata permanente che cresce molto velocemente rispetto al numero di cicli che porta rapidamente alla rottura del provino di conglomerato bituminoso.

Il Flow Number è definito come il numero di cicli di carico necessari per passare dalla fase di creep secondaria a quella terziaria.

Capitolo 4 Indagine sperimentale

4.1 Obiettivi

Con il lavoro sperimentale della presenti tesi, svolto nel laboratorio del DIATI del Politecnico di Torino, si è voluto indagare sul comportamento delle miscele di conglomerato bituminoso, confezionate per strati di usura, in merito all'accumulo di deformazione permanente.

Come ho già detto nel capitolo precedente, la risposta delle miscele, relativamente all'ormaiamento, è data dal valore di Flow Number.

Il lavoro di laboratorio è stato svolto sia su particolari bitumi che sulle rispettive miscele quindi l'obiettivo del presente elaborato è quello di analizzare i risultati ottenuti dalle singole prove (protocollo SSCR e test di FN) e comprendere se è possibile correlare il Creep Compliance Rate con il Flow Number giustificando il comportamento dei conglomerati a partire dai leganti.

Il risultato è stato conseguito a seguito dell'impiego di tre differenti bitumi per il confezionamento di diverse miscele. Nello specifico si sono realizzate 9 miscele:

- Tre miscele confezionate con il 4% di bitume;
- Tre miscele confezionate con il 5% di bitume;
- Tre miscele confezionate con il 6% di bitume.

Per ogni miscela sono stati realizzati quattro campioni: due con contenuti dei vuoti pari al 4% e due con contenuti dei vuoti uguale al 6%.

Pertanto, in questo lavoro di laboratorio sono stati sottoposti al test di Flow Number 36 provini cilindrici di dimensioni 100mm di diametro e 150mm di altezza.

4.2 Materiali

Per confezionare le miscele sopra descritte sono stati impiegati i seguenti materiali: gli aggregati grossi e fini, il filler ed il bitume.

Nello specifico sono state fornite dallo stabilimento Brillada (con sede a Borgaro Torinese) quattro classi di aggregati:

- Un pietrisco 5-15mm;
- Una graniglia 3-8mm;
- Una sabbia 0-5mm;
- Un filler cementizio.



Figura 4.1 le 4 classi di aggregato impiegate: andando da sinistra verso destra si ha il pietrisco, la graniglia, la sabbia e il filler

I tre differenti bitumi impiegati sono:

- Un bitume “Tal Quale” con grado di penetrazione 50/70;
- Un bitume “Tal Quale” con grado di penetrazione 70/100;
- Un bitume modificato con polimero SBS (stirene-butadiene-stirene).



Figura 4.2 il bitume 70/100 (a sinistra), il bitume 50/70 (al centro) ed il bitume modificato (a destra)

4.3 Caratterizzazione preliminare

4.3.1 Analisi granulometrica di ogni classe di aggregato

Il primo passo del lavoro svolto in laboratorio è stato quello di determinare la distribuzione granulometrica di ogni classe di aggregato.

Il procedimento è descritto nel paragrafo §3.1: ogni classe di aggregato, dopo essere stato essiccato alla temperatura di 110°C e raffreddato, è stato collocato in una pila di setacci e setacciato.

Si riportano di seguito le tabelle della distribuzione granulometrica di ogni classe di aggregato:

| D | Trattenuto | Trattenuto _{progressivo} | Trattenuto _{progressivo} | Passante |
|--------|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|
| [mm] | [g] | [g] | [%] | [%] |
| 20 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 16 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 12,5 | 206,1 | 206,1 | 7,4 | 92,6 |
| 10 | 740,9 | 947,0 | 34,2 | 65,8 |
| 8 | 861,7 | 1808,7 | 65,3 | 34,7 |
| 6,3 | 632,1 | 2440,8 | 88,2 | 11,8 |
| 4 | 278,7 | 2719,5 | 98,2 | 1,8 |
| 2 | 18,7 | 2738,2 | 98,9 | 1,1 |
| 1 | 2,2 | 2740,4 | 99,0 | 1,0 |
| 0,5 | 1,2 | 2741,6 | 99,0 | 1,0 |
| 0,25 | 1,8 | 2743,4 | 99,1 | 0,9 |
| 0,063 | 6,3 | 2749,7 | 99,3 | 0,7 |
| Filler | 18,8 | 2768,5 | 100,0 | 0,0 |
| Totale | 2768,5 | | | |

Tabella 4.1 analisi granulometrica del pietrisco 5-15

| D | Trattenuto | Trattenuto _{progressivo} | Trattenuto _{progressivo} | Passante |
|--------|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|
| [mm] | [g] | [g] | [%] | [%] |
| 20 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 16 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 12,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 10 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 6,3 | 322,6 | 322,6 | 12,8 | 87,2 |
| 4 | 2144,7 | 2467,3 | 97,8 | 2,2 |
| 2 | 24,2 | 2491,5 | 98,8 | 1,2 |
| 1 | 3,9 | 2495,4 | 98,9 | 1,1 |
| 0,5 | 3,4 | 2498,8 | 99,1 | 0,9 |
| 0,25 | 3,4 | 2502,2 | 99,2 | 0,8 |
| 0,063 | 6,3 | 2508,5 | 99,5 | 0,5 |
| Filler | 13,4 | 2521,9 | 100,0 | 0,0 |
| Totale | 2521,9 | | | |

Tabella 4.2 analisi granulometrica della graniglia 3-8

| D | Trattenuto | Trattenuto _{progressivo} | Trattenuto _{progressivo} | Passante |
|--------|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|
| [mm] | [g] | [g] | [%] | [%] |
| 20 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 16 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 12,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 10 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 6,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 4 | 232,4 | 232,3 | 9,2 | 90,8 |
| 2 | 723,8 | 956,1 | 37,9 | 62,1 |
| 1 | 586,6 | 1542,7 | 61,2 | 38,8 |
| 0,5 | 340,4 | 1883,1 | 74,7 | 25,3 |
| 0,25 | 223,8 | 2106,9 | 83,6 | 16,4 |
| 0,063 | 295,5 | 2402,4 | 95,3 | 4,7 |
| Filler | 117,9 | 2520,3 | 100,0 | 0,0 |
| Totale | 2520,3 | | | |

Tabella 4.3 analisi granulometrica della sabbia 0-5

| D | Trattenuto | Trattenuto _{progressivo} | Trattenuto _{progressivo} | Passante |
|--------|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|
| [mm] | [g] | [g] | [%] | [%] |
| 20 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 16 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 12,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 10 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 6,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 0,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 0,25 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 0,063 | 24,7 | 24,7 | 41,2 | 58,8 |
| Filler | 35,2 | 59,9 | 100,0 | 0,0 |
| Totale | 59,9 | | | |

Tabella 4.4 analisi granulometrica del filler

Tutti i dati sono stati riassunti in un'unica tabella:

| D | Passante [%] | | | |
|-------|----------------|---------------|------------|--------|
| | Pietrisco 5-15 | Graniglia 3-8 | Sabbia 0-5 | Filler |
| 20 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 16 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 12,5 | 92,6 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 10 | 65,8 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 8 | 34,7 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 4 | 1,8 | 2,2 | 90,8 | 100,0 |
| 2 | 1,1 | 1,2 | 62,1 | 100,0 |
| 1 | 1,0 | 1,1 | 38,8 | 100,0 |
| 0,5 | 1,0 | 0,9 | 25,3 | 100,0 |
| 0,063 | 0,7 | 0,5 | 4,7 | 58,8 |

Tabella 4.5 distribuzione granulometrica di tutte le classi di aggregato

Le curve granulometriche delle 4 classi di aggregato sono rappresentate in figura:

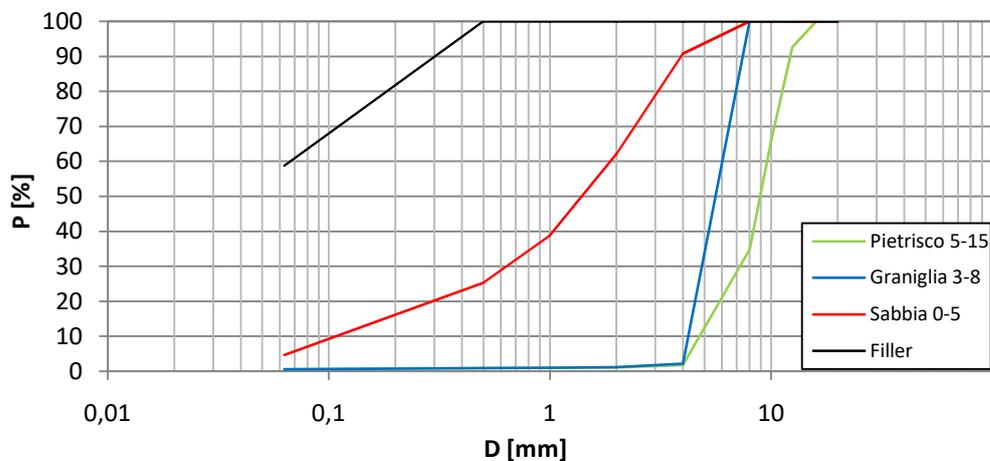


Figura 4.3 curve granulometriche delle classi di aggregato

4.3.2 Ottimizzazione della curva di progetto

Terminata l'analisi granulometrica di ogni aggregato si è proceduto alla ottimizzazione della curva granulometrica di progetto.

A questo scopo, sono state calcolate, attraverso il software Excel, le percentuali di ogni classe di aggregato (da cui si è ottenuta la curva granulometrica di progetto) affinché la differenza tra la curva granulometrica di progetto e quella di riferimento (curva centrale del fuso CIRS) risultasse minima (tabella4.6).

Le percentuali di ogni classe di aggregato che hanno ottimizzato la curva granulometrica di progetto sono riportati in tabella 4.7.

| D [mm] | Fuso CIRS | | | Curva di progetto[%] | Δ |
|--------|-----------|---------|-----------------|----------------------|---------|
| | Min [%] | Max [%] | Centro fuso [%] | | |
| 20 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 3,9E-14 |
| 16 | 95,3 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 3,9E-14 |
| 12,5 | 90,0 | 100,0 | 97,2 | 98,0 | 7,1E-01 |
| 10 | 80,0 | 95,0 | 92,4 | 91,0 | 1,9E+00 |
| 8 | 70,0 | 90,0 | 82,2 | 82,8 | 4,0E-01 |
| 4 | 40,0 | 55,0 | 44,1 | 44,5 | 1,3E-01 |
| 2 | 25,0 | 38,0 | 33,6 | 33,2 | 2,0E-01 |
| 1 | 19,0 | 30,2 | 24,6 | 24,3 | 1,0E-01 |
| 0,5 | 12,9 | 22,5 | 18,9 | 19,1 | 4,8E-02 |
| 0,063 | 5,6 | 9,0 | 7,1 | 7,4 | 9,4E-02 |
| | | | | | 3,6E+00 |

Tabella 4.6 curva del centro fuso, curva di progetto e loro differenza

| | % Classi |
|----------------|----------|
| Pietrisco 5-15 | 26 |
| Graniglia 3-8 | 27 |
| Sabbia 0-5 | 38 |
| Filler | 9 |

Tabella 4.7 percentuali di aggregato della curva di progetto

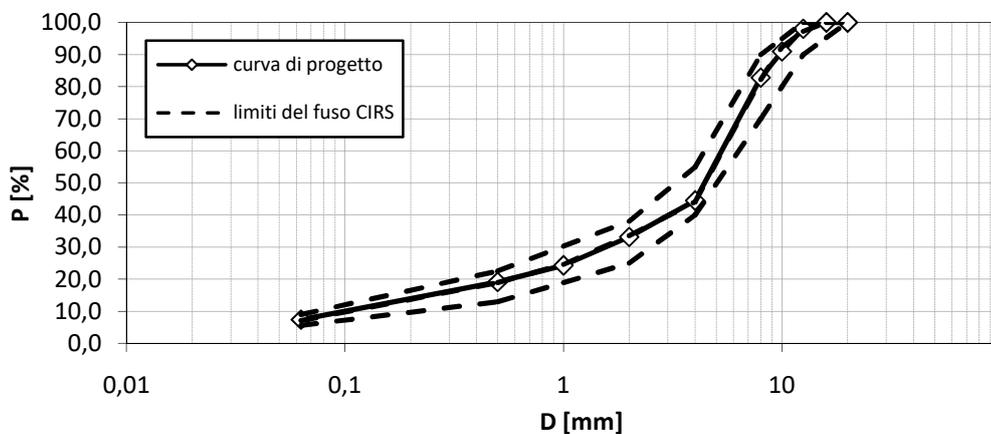


Figura 4.4 curva granulometrica di progetto all'interno del fuso CIRS

La curva granulometrica di progetto rappresenta lo scheletro litico delle miscele.

4.4 Mix Design

Dopo aver determinato lo scheletro litico dei conglomerati, nota la percentuale di bitume, si è passati alla produzione delle miscele di bitume.

Per fare ciò è stato necessario determinare la temperatura di miscelazione, che è stato possibile ottenere dalla prova con il viscosimetro rotazionale (paragrafo § 3.8):

| Bitume | Temperatura di miscelazione |
|--------------------|-----------------------------|
| “Tal Quale” 50/70 | 150 |
| “Tal Quale” 70/100 | 150 |

Tabella 4.8 temperatura di miscelazione

Per il bitume modificato con il polimero SBS è stata scelta una temperatura di miscelazione pari 160°C, fornita dallo stabilimento di produzione del bitume.

A questo punto, si è proceduto al confezionamento della miscela, la cui massa totale degli aggregati è di 60 kg. La percentuale di bitume della miscela è stata calcolata su questi 60 kg.

A titolo di esempio, per produrre una miscela con il 5% di bitume sono stati impiegati:

| Classe di aggregato | Percentuale | Massa [kg] |
|---------------------|-------------|------------|
| Pietrisco 5-15 | 26 | 15,6 |
| Graniglia 3-8 | 27 | 16,2 |
| Sabbia | 38 | 22,8 |
| Filler | 9 | 5,4 |
| Bitume | 5 | 3 |

Tabella 4.9 massa in kg di ciascun materiale della miscela

In questo caso è stata prodotta una miscela di 63 Kg.

La procedura di miscelazione prevede le seguenti fasi:

- 1) Eliminazione dell'umidità residua degli aggregati: il materiale è stato posto in forno alla temperatura di 105°C per un tempo di 20 ore al fine di garantire la completa evaporazione dell'umidità;
- 2) Riscaldamento alla temperatura di miscelazione: ogni classe di aggregato è stato pesato con il preciso quantitativo (tabella 4.7) ed è stato collocato in forno alla temperatura di miscelazione (tabella 4.8). Lo stesso procedimento è stato adottato per il bitume.



Figura 4.5 materiale pesato correttamente e portato alla temperatura di miscelazione

- 3) Condizionamento alla temperatura di miscelazione: il materiale dopo aver raggiunto la temperatura di miscelazione ed il mixer, dove è avvenuta l'operazione, sono stati condizionati per un'altra ora al fine di assicurarci la miscelazione alla temperatura voluta.
- 4) Miscelazione: a questo punto, abbiamo versato nel mixer gli aggregati partendo dalla pezzatura più grossa fino al filler, mescolando, tra un'aggiunta e l'altra, per un minuto. Per ultimo, abbiamo versato il bitume e miscelato il tutto per una durata di 6 minuti.

Prodotta la miscela, abbiamo prelevato dal mixer 4 kg di materiale per le operazioni successive (2 kg per verificare il contenuto di bitume e 2 kg per determinare la Massima Massa Volumica Teorica). Tutto il resto, è stato versato nei sacchi indicando, in ciascuno, la data di produzione ed il tipo di miscela.



Figura 4.6 produzione della miscela e versamento nei sacchi

4.5 Verifica del contenuto di bitume

Come detto nel precedente paragrafo, si sono prelevati due chili di conglomerato per verificare che il contenuto di bitume nella miscela fosse quello da noi richiesto.

Questa operazione è stata eseguita attraverso la carbolite (paragrafo § 3.2).

È stato separato e disgregato il materiale in due porzioni da un chilo ciascuno e disposto in due cestelli diversi, contrassegnati dai simboli + e O. Il materiale così distribuito è stato messo nella carbolite che ha eliminato il contenuto di bitume. È stata, infine, verificata la sua percentuale attraverso la differenza di peso del materiale, prima e dopo la prova. Nella tabella sottostante è riportato il risultato della carbolite nel caso di miscela con il 5% di bitume.

| campione | tara | netto (prima) | netto (dopo) | bitume | % B |
|----------|------|---------------|--------------|--------|------|
| 1 | 2828 | 1242,9 | 1181,9 | 61 | 5,16 |
| 2 | 2849 | 1487,4 | 1415,8 | 71,6 | 5,06 |

Tabella 4.10 risultato della carbolite per una miscela con il 5% di bitume

Notiamo come la percentuale di bitume, fatta la media delle due ripetizioni (5,1%), rientri nei limiti della tolleranza ammessa che è pari a $\pm 20\%$, è, cioè, un contenuto compreso tra il 4,8 e 5,2 %.

4.6 Calcolo della MMVT

Al contempo, gli altri due chili della miscela sono stati quartati e disgregati, ottenendo 4 porzioni da 500 gr circa. Queste sono state impiegate per eseguire 4 ripetizioni della prova al picnometro. Abbiamo determinato la Massima Massa Volumica Teorica con il valore medio delle quattro prove. A titolo esemplificativo sono stati riprodotti in tabella i risultati della prova al picnometro di una miscela con il 5 % di bitume.

| Campione | Picnometro | M_P | M_{P+M} | M_{P+M+H_2O} | V_P | T | ρ_w | ρ_{mw} |
|----------|------------|-------|-----------|----------------|-----------|------|--------------|--------------|
| - | - | (g) | (g) | (g) | (m^3) | (°C) | (kg/m^3) | (kg/m^3) |
| 1 | J+I | 901,0 | 1434,8 | 2619,3 | 0,0013938 | 20,5 | 998,2 | 2577 |
| 2 | K+F | 924,8 | 1466,6 | 2618,2 | 0,0013646 | 21,0 | 998,1 | 2570 |
| 3 | J+I | 901,0 | 1499,3 | 2658,1 | 0,0013938 | 21,1 | 998,0 | 2571 |
| 4 | K+F | 924,8 | 1376,2 | 2563,3 | 0,0013646 | 21,0 | 998,1 | 2576 |

| | |
|---------|------|
| Media | 2574 |
| Dev.St. | 4 |
| C.V. | 0,1 |
| MAX-min | 7,0 |

Tabella 4.11 prova al picnometro di una miscela con il 5% di bitume

dove M_P è la massa del picnometro, M_{P+M} è la massa del picnometro con l'aggregato aggiunto, M_{P+M+H_2O} è la massa del picnometro con l'aggregato e pieno d'acqua, V_P è il

volume del picnometro, T è la temperatura, ρ_w è la densità dell'acqua ed infine ρ_{mw} è la Massima Massa Volumica Teorica.

4.7 Calcolo della massa effettiva da introdurre in fustella

Una volta verificate le caratteristiche della miscela (contenuto di bitume, curva granulometrica che rispetta quella di progetto), e calcolata la MMVT, è necessario calcolare la quantità di miscela da inserire nelle fustelle per la produzione dei campioni. La massa da mettere in fustella dipende dalla percentuale dei vuoti che vogliamo ottenere nei nostri campioni.

La percentuale dei vuoti, è definita:

$$\%v = \frac{MMVT - \gamma_c}{MMVT};$$

da cui la densità del conglomerato:

$$\gamma_c = MMVT \cdot (1 - \%v);$$

quindi, considerando che il volume è quello della fustella, la massa da mettere in fustella risulta essere:

$$M = \frac{\pi \cdot H \cdot D^2 \cdot MMVT \cdot (1 - \%v)}{4};$$

in cui H è l'altezza del campione, che è uguale per tutti ed è pari a 180mm, D è il diametro della fustella che è pari a 150mm e $\%v$ è la percentuale dei vuoti che vogliamo ottenere che è un valore di input.

Tuttavia, la massa così determinata non consente di raggiungere la percentuale dei vuoti desiderata, in quanto bisogna tener conto del cosiddetto "effetto parete". Nella formula il volume che consideriamo è quello della fustella che presenta una superficie perfettamente liscia (senza vuoti) ma, la superficie laterale del provino che si otterrà dalla compattazione presenta dei vuoti. Ne deriva che i vuoti ottenuti dalla formula saranno minori rispetto a quelli auspicati.

Pertanto la procedura che consente di ottenere il valore dei vuoti più vicino all'obiettivo ricercato è quella di versare il materiale in fustella in modo iterativo: si ipotizza una percentuale dei vuoti del campione dalle dimensioni 150 x 180mm e si compatta. Attraverso il carotaggio ed il successivo taglio si ottiene il provino di dimensioni 100 x 150mm ed infine, si valuta la Massima Massa Volumica Apparente con la procedura SSD. Si confronta il volume geometrico del provino 150 x 180mm con il volume effettivo del suo "core" di dimensioni 100 x 150mm. Si tratta di una procedura molto

elaborata che difficilmente permette di centrare il valore richiesto con assoluta precisione. Per questo motivo è ammesso un errore di $\pm 0,5$ della %v.

4.8 Preparazione dei campioni per il test all'Ampt

I campioni di conglomerato bituminoso da testare con l'Ampt sono stati realizzati sulla base della norma AASHTO PP 60 [28]. Essa prescrive le seguenti operazioni:

4.8.1 Compattazione con Pressa a Taglio Giratorio

Il primo passo per ottenere i campioni di dimensioni 100 x 150mm che saranno successivamente sottoposti al test di Flow Number con l'Ampt è la compattazione con la Pressa Giratoria, la cui procedura è stata ampiamente descritta nel paragrafo § 3.5.

Come si è detto precedentemente, ottenere un provino con precise caratteristiche volumetriche risulta alquanto difficile quindi nella maggior parte delle miscele sono stati confezionati e compattati un numero di provini, delle dimensioni 150 x 180mm, superiori a quelli richiesti (due campioni con il 4% dei vuoti e due campioni per il 6% dei vuoti). Di questi ovviamente sono stati considerati le due coppie di provini la cui percentuale dei vuoti si avvicinava a quella richiesta.

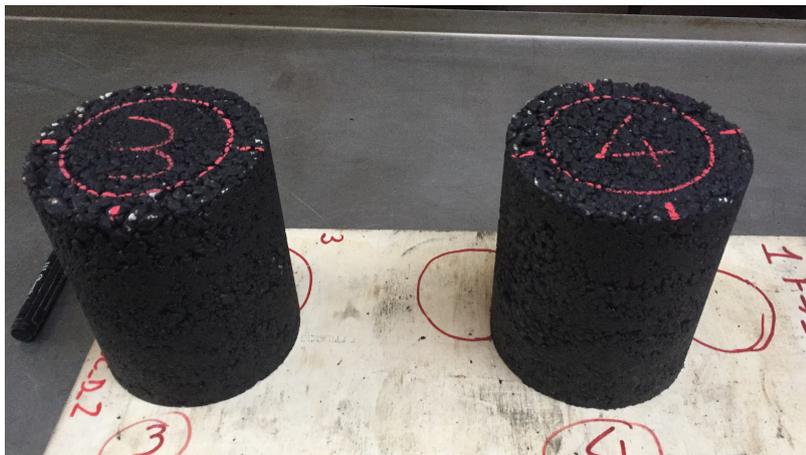


Figura 4.7 campioni ottenuti dalla compattazione con la Pressa a Taglio Giratorio

I risultati della compattazione di tutti i campioni realizzati per ogni miscela sono stati riportati nell'allegato.

4.8.2 Carotaggio e taglio dei campioni

I campioni ottenuti dalla compattazione sono stati fatti raffreddare per essere, poi, sottoposti al carotaggio ed al taglio.

In questa fase infatti l'obiettivo è quello di ottenere le dimensioni dei campioni prescritte dal protocollo usato per il Flow Number AASHTO PP 60[28].

Tale protocollo impone che le prove di Flow Number siano effettuate su campioni aventi diametro uguale a 100 ± 2 mm e altezza compresa tra 147,5 e 152,5 mm.

Inizialmente, i campioni vengono sistemati sul piano d'appoggio della macchina carotatrice, quindi bloccati in modo da non muoversi durante la prova.



Figura 4.8 campione fissato e pronto ad essere carotato

Il carotaggio avviene per mezzo di un cilindro diamantato che si abbassa con velocità costante fino a raggiungere il fondo dei provini.

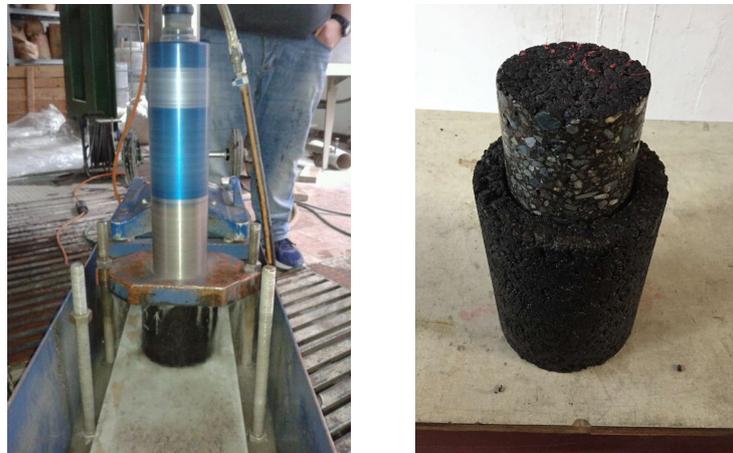


Figura 4.9 carotaggio e campione carotato

Ottenuti i campioni delle dimensioni 100 x 180 mm, la fase successiva prevede di tagliare i provini di 3 cm per ottenere le dimensioni sopra descritte. Vengono tagliati con una macchina troncatrice 2 cm della base ed un cm della testa.



Figura 4.10 macchina troncatrice e campione tagliato

È necessario ottenere campioni con facce parallele al fine di evitare sforzi di pressoflessione durante il test con l'Ampt, quindi nel caso non lo fossero sarà indispensabile levigarne le facce per renderle tali.



Figura 4.11 campioni 100 x 150mm

4.8.3 Verifica dell'indice dei vuoti del "core"

Prima di sottoporre i provini ottenuti dalle fasi precedenti all'Ampt, è necessario accertarsi che le caratteristiche volumetriche di questi rientrino nei limiti previsti dal protocollo.

La valutazione dell'indice dei vuoti è eseguita con la procedura "Superficie Saturata Secca" (SSD) descritta nel paragrafo §3.4.

Nella tabella sottostante è riportato il risultato del lavoro svolto a partire dal calcolo del materiale da mettere in fustella alla determinazione dell'indice dei vuoti di un campione esemplificativo.

L'obiettivo previsto era quello di raggiungere il 4% dei vuoti e si è ottenuto il 4,1%, rientrando quindi nei limiti stabiliti.

| obiettivo 4% di vuoti | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| provino 1 | | | | | | | | |
| MMVT | 2620 | | | | | | | |
| v [%] | 8,25 | | | | | | | |
| D [cm] | 15 | | | | | | | |
| h [cm] | 18 | | | | | | | |
| V [cm ³] | 3180,9 | | | | | | | |
| m [g] | 7645,4 | | | | | | | |
| vuoti geometrici | | | | | | | | |
| m [g] | D [mm] | h medio [mm] | V [mm ³] | MV [Kg/m ³] | MMVT [Kg/m ³] | v % | | |
| 7645,1 | 150,0 | 180,1 | 3,2E-03 | 2402,5 | 2619,7 | 8,3 | | |
| vuoti reali | | | | | | | | |
| Campione | M_{air} | M_{H2O} | M_{SSD} | T | ρ_w | ρ_{SSD} | ρ_{mv} | v_x |
| [-] | [g] | [g] | [g] | [°C] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [%] |
| 5_150x180 | 7645,1 | 4614,1 | 7737,1 | 22,2 | 997,8 | 2442,6 | 2619,7 | 6,8 |
| 5_100x150 | 2810,0 | 1704,0 | 2819,8 | 22,2 | 997,8 | 2512,8 | 2619,7 | 4,1 |
| | | | | | | | | ΔV 2,7 |
| h1[mm] | 149,8 | φ_1 [mm] | 97,8 | | | | | |
| h2[mm] | 150,5 | φ_2 [mm] | 97,8 | | | | | |
| h3 [mm] | 149,8 | φ_{medio} [mm] | 97,8 | | | | | |
| h4 [mm] | 150,3 | | | | | | | |
| h medio [mm] | 150,1 | | | | | | | |

In giallo si evidenzia la differenza tra i vuoti geometrici del provino 150x 180mm ed i vuoti effettivi del “core” 100x150mm.

4.9 Test del Flow Number

Il Flow Number è definito il numero di cicli necessario per passare dalla fase secondaria alla fase terziaria (paragrafo §3.1). Per la sua determinazione è stata utilizzata l'Ampt.

Il protocollo di prova è prescritto dalla norma AASHTO TP 79 che prevede:

- Impostazione dei parametri di prova e sistemazione del campione;
- Esecuzione del test e fitting del Flow Number.

4.9.1 Impostazione dei parametri di prova e sistemazione del campione

Prima di dare il via al test di Flow Number è necessario impostare i seguenti parametri:

- Temperatura di prova: nel nostro caso è stata impostata una temperatura di prova pari a 58°C per testare i campioni realizzati con il bitume “Tal Quale” 70/100 e quelli ottenuti impiegando il bitume modificato con SBS. Mentre, i provini

prodotti con il bitume “Tal Quale” 50/70 è stata impostata la temperatura di 52°C;

- Tensione assiale pari a 600kPa;
- Tensione di contatto uguale a 30kPa;
- Massimo numero di cicli consentito pari a 15000;
- Deformazione massima ammissibile pari al 7,5%.

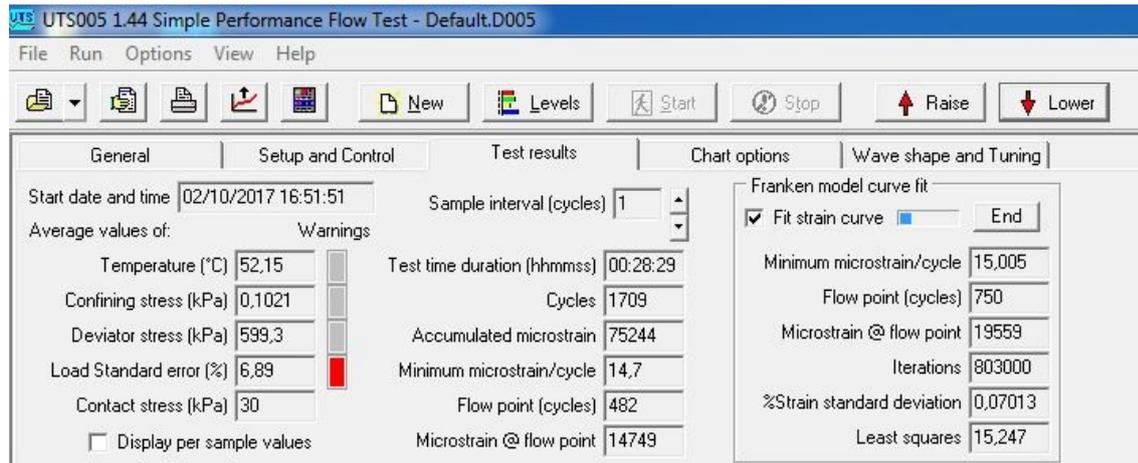


Figura 4.12 impostazione dei parametri della prova di Flow Number

La prova può essere eseguita con o senza tensione di confinamento. Nel caso di specie non è stata applicata nessuna tensione perché questa richiederebbe un'enorme quantità di tempo di esecuzione della prova.

Inoltre, prima di dare inizio al test, i campioni devono essere condizionati alla temperatura di prova. Vengono quindi messi in forno per un tempo di 5 ore.

4.9.2 Esecuzione del test e fitting del Flow Number

La prova inizia dopo aver sistemato con molta cura il provino tra i due piatti della cella di carico, centrandolo tra questi ed evitando scorrimenti laterali. Durante la prova è possibile monitorare la deformazione viscosa valutata in microstrain in funzione del numero di cicli. La durata massima della prova è di 4 ore circa in quanto è stato impostato un numero massimo di cicli pari a 15000. Si ha un ciclo al secondo.

Tuttavia, in tutti i nostri campioni testati la prova è sempre terminata prima a causa del raggiungimento della massima deformazione.



Figura 4.13 esecuzione del test e provini deformati a fine prova

Al termine della prova si procede al calcolo del Flow Number fittando la curva tramite l'utilizzo del modello di Francken la cui equazione è:

$$\varepsilon_p = A \cdot n^B + C \cdot (e^{D \cdot n} - 1)$$

dove ε_p è la deformazione permanente, n il numero di cicli, A,B,C,D sono i parametri di controllo del modello. Il Flow Number è ottenuto imponendo uguale a zero la derivata seconda della deformazione permanente.

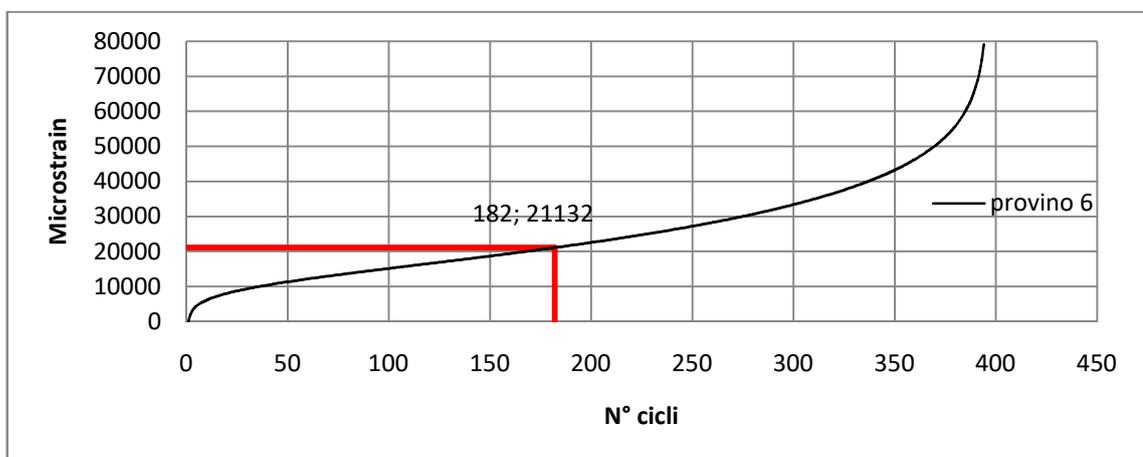


Figura 4.14 curva del Flow Number di un campione esemplificativo

In rosso si evidenzia il valore del Flow Number nella curva, uguale a 182 corrispondente ad una deformazione di 21132 μ_{strain} .

Con i risultati ottenuti da questa prova, riportati in allegato, si è concluso il lavoro di laboratorio relativo alle miscele di conglomerato bituminoso.

4.10 Single Shear Creep Recovery (SSCR)

L'ultima parte sperimentale è stata dedicata alla valutazione della resistenza all'accumulo di deformazione permanente dei bitumi. Come già detto, questa proprietà

dei bitumi è valutata sottoponendoli ad un test eseguito con il DSR: la prova Single Shear Creep Recovery, esaminata nel paragrafo §3.7.

Prima di avviare il test sono stati impostati i parametri della prova:

- Tensione applicata pari a 100kPa;
- Temperature di prova: 46, 52, 58, 64°C per i bitumi “Tal Quale” 50/70 e 70/100, e 58, 64, 70, 76 °C per il bitume modificato.
- Tempo di carico funzione della temperatura:

| Bitume | Temperatura [°C] | Durata della fase di carico [s] |
|---|------------------|---------------------------------|
| “Tal Quale” 50/70 “Tal Quale” 70/100 | 46 | 600 |
| | 52 | 240 |
| | 58 | 180 |
| | 64 | 120 |
| SBS | 58 | 10800 |
| | 64 | 1800 |
| | 70 | 600 |
| | 76 | 300 |

Tabella 4.12 tempo di carico della prova SSCR

Non è stato indicato il tempo di recupero in quanto ci si è limitati ad eseguire solo la fase di carico della prova, in accordo con la definizione del Creep Compliance Rate. Noto il protocollo da eseguire, si è versato il campione di bitume, invecchiato al RTFOT (paragrafo § 3.7.1), tra i due piatti (dimensioni pari a 25mm) del DSR e si è dato inizio alla prova. Per ogni tipo di bitume sono state eseguite due ripetizioni alle diverse temperature, monitorando la variazione del Creep Compliance J nel tempo.

Il CCR è il valore medio delle due ripetizioni.

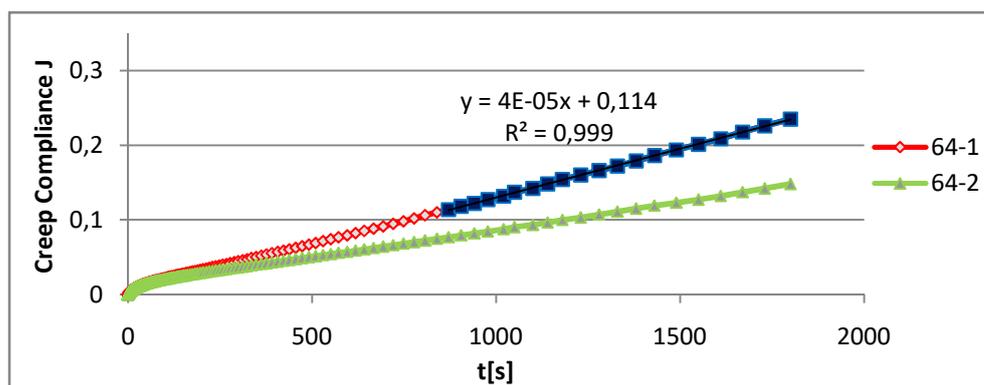


Figura 4.15 rappresentazione di J in funzione del tempo di carico

In rosso è indicato l’andamento di J nel tempo alla temperatura di 64°C, nella prima ripetizione; in verde la variazione di J nella seconda ripetizione e in azzurro è rappresentata la pendenza dell’ultimo tratto della curva della prima ripetizione, al fine di

far comprendere la modalità con la quale è stato calcolato il valore del CCR. La predetta procedura è stata eseguita a tutte le relazioni J-t non lineari.

Con i risultati del CCR ottenuti sui bitumi alle differenti temperature si è concluso il lavoro di laboratorio. In allegato è riportato il lavoro svolto su ogni singolo bitume.

Capitolo 5 Analisi dati e interpretazione dei risultati

Nel presente capitolo si entra in merito ai risultati di output ottenuti dalle varie prove. Inizialmente sono stati analizzati i dati ottenuti dalla prova al DSR e quella all'AMPT che descrivono il comportamento dei bitumi e delle miscele relativamente all'accumulo di deformazione permanente, attraverso, rispettivamente, il Creep Compliance Rate e il Flow Number. Successivamente, sono stati studiati i suddetti parametri al fine di comprenderne il loro legame e di definire l'espressione analitica che li correla nonché i parametri da cui essa dipende.

5.1 Analisi dati della procedura SSCR

Il bitume ha un comportamento viscoelastico che dipende, come già precisato, dal tempo di applicazione del carico e dalla temperatura: comportamento di un solido elastico a basse temperature e di un fluido viscoso ad alte temperature.

Questa prova ci ha permesso di ricavare la deformazione di scorrimento di tre bitumi a differenti temperature, a ciascuna delle quali corrisponde un tempo di applicazione del carico tale da far raggiungere al bitume una condizione di stato stazionario. Tale tempo di carico è stato fornito da esperienze precedenti in cui si notò che un campione di bitume raggiungeva prima la suddetta condizione per temperature più alte.

| Bitume | Temperatura [°C] | Tempo di carico [s] |
|---|------------------|---------------------|
| "Tal Quale" 50/70 "Tal Quale" 70/100 | 46 | 600 |
| | 52 | 240 |
| | 58 | 180 |
| | 64 | 120 |
| Modificato con SBS | 58 | 10800 |
| | 64 | 1800 |
| | 70 | 600 |
| | 76 | 300 |

Tabella 5.1 tempo di carico della prova SSCR dei bitumi

Per il bitume "Tal Quale" 50/70, si è ottenuto:

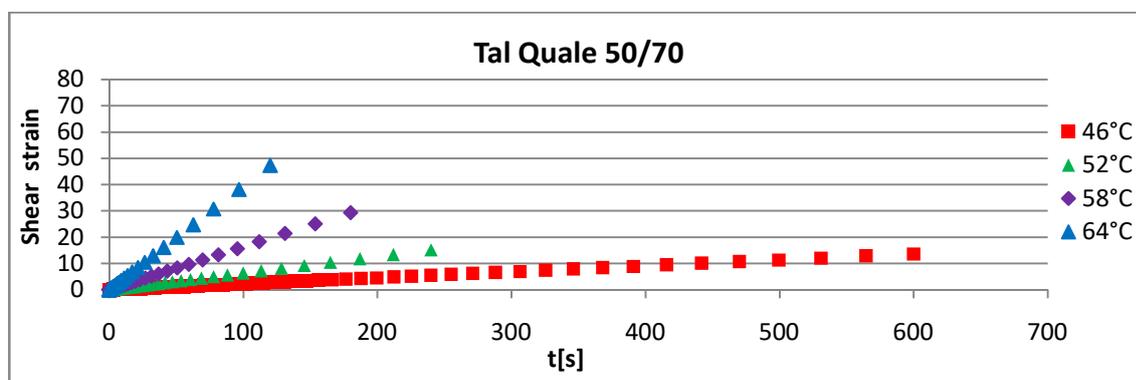


Figura 5.1 deformazione di scorrimento del bitume "Tal Quale" 50/70 al variare della temperatura

Per il bitume “Tal Quale” 70/100:

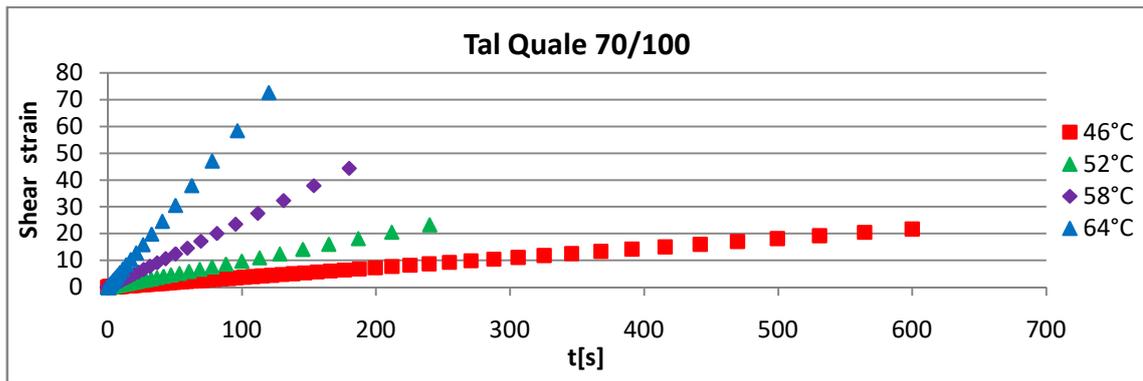


Figura 5.2 deformazione di scorrimento del bitume “Tal Quale” 70/100 al variare della temperatura

Per il bitume modificato con SBS:

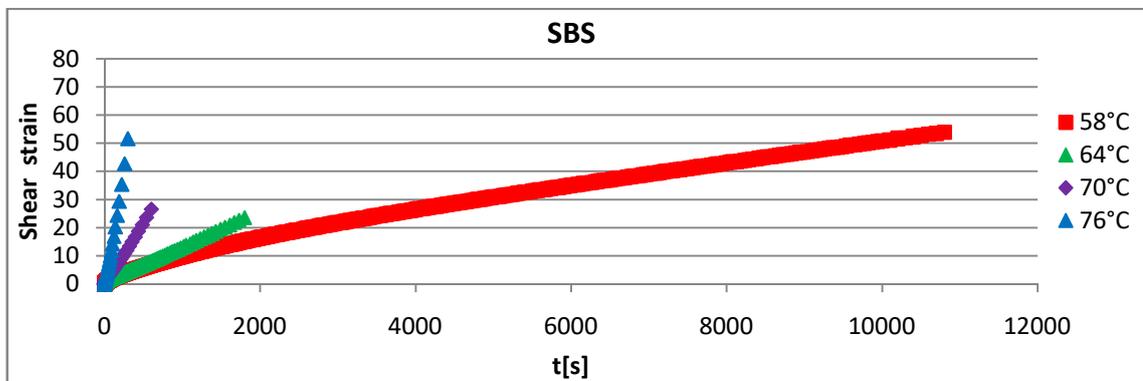


Figura 5.3 deformazione di scorrimento del bitume modificato con SBS al variare della temperatura

I tre grafici mostrano come, indipendentemente dal tipo di bitume considerato e a parità di tempo di carico, si raggiunge una maggiore deformazione a temperature più alte.

Inoltre è possibile fare un confronto tra il comportamento dei bitumi “Tal Quale” con il modificato: i bitumi tradizionali presentano sin da subito un comportamento lineare mentre il modificato, inizialmente, mostra una curvatura che è legata all’esistenza della matrice polimerica. Questo si traduce con il raggiungimento di uno scorrimento molto più rapido da parte dei bitumi “Tal Quale” rispetto al modificato, nelle medesime condizioni di tempo di carico e di temperatura. Il bitume modificato raggiungerà una condizione di flusso stazionario (scorrimento costante) con tempi di carico maggiori.

Detto ciò, il valore del CCR dei bitumi 50/70 e 70/100 è stato calcolato considerando tutti i punti ottenuti dalla prova (comportamento lineare) mentre per il bitume modificato analizzando solo l’ultimo tratto della curva.

I valori del CCR rilevati alle temperature di prova sono stati rappresentati in una scala semilogaritmica:

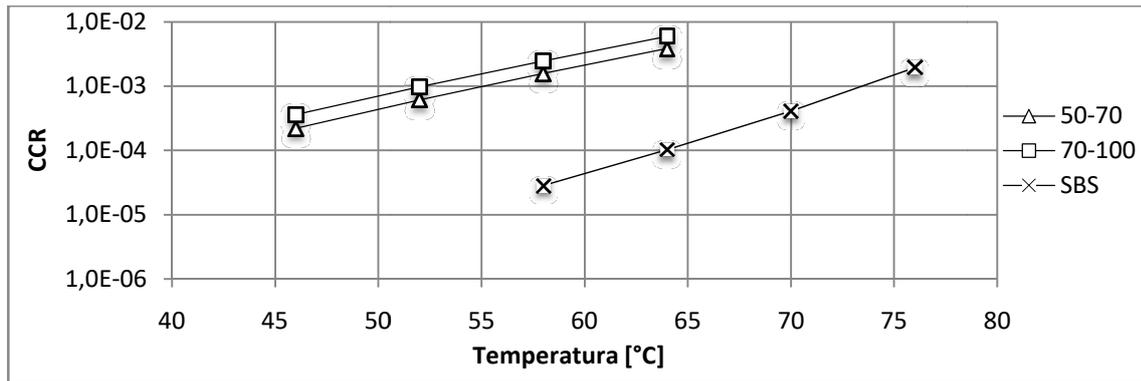


Figura 5.4 rappresentazione grafica CCR-T

La figura mostra come, in una tale rappresentazione, i dati sperimentali possono essere approssimati da funzioni lineari. Inoltre si evince ancora, confrontando i bitumi tradizionali con il modificato, come i primi presentino valori di CCR più grandi a tutte le temperature.

Si deduce, pertanto, che i bitumi modificati presentano una maggiore resistenza all'accumulo di deformazione permanente dei tradizionali.

In tabella si riportano i valori del CCR ottenuti per ogni classe di bitume, a tutte le temperature di prova:

| bitume | temperatura | CCR |
|--------|-------------|---------|
| 50-70 | 46 | 2,2E-04 |
| | 52 | 6,1E-04 |
| | 58 | 1,6E-03 |
| | 64 | 3,8E-03 |
| 70-100 | 46 | 3,6E-04 |
| | 52 | 9,7E-04 |
| | 58 | 2,5E-03 |
| | 64 | 6,0E-03 |
| SBS | 58 | 2,9E-05 |
| | 64 | 1,0E-04 |
| | 70 | 4,1E-04 |
| | 76 | 1,9E-03 |

Tabella 5.2 valori del CCR a tutte le temperature di prova

Dalla tabella si nota che, considerando una stessa temperatura di prova (58°C), il bitume modificato ha un valore di CCR che risulta essere due ordini di grandezza più piccolo rispetto ai bitumi 50/70 e 70/100, confermando quanto detto sopra.

5.2 Analisi dati della prova di Flow Number

La resistenza delle miscele di conglomerato bituminoso in merito all'accumulo di deformazione permanente è stata valutata con la prova del Flow Number.

Sono state realizzate 9 miscele, 3 per ogni bitume. Ogni miscela è caratterizzata da una percentuale diversa di bitume: la prima con il 4%, la seconda con il 5% e la terza con il 6% di bitume.

Per ogni miscela sono stati realizzati 4 campioni caratterizzati da una diversa percentuale dei vuoti (due campioni con il 4% e due con il 6% dei vuoti). Detto ciò, sono stati sottoposti al test di Flow Number 36 provini.

I risultati della prova hanno evidenziato migliori prestazioni delle miscele realizzate con meno quantitativo di bitume.

Sono state rappresentate graficamente le curve di Flow Number di una stessa miscela, prendendo in considerazione le stesse caratteristiche volumetriche ma con percentuali diverse di bitume (4, 5, 6%).

In figura 5.5 sono state rappresentate le curve di Flow Number ottenute per tre campioni della miscela realizzata con bitume “Tal Quale” 50/70, alla temperatura di 52°C.

In figura 5.6 e in quella successiva si rappresentano le curve di tre campioni delle miscele prodotte con bitume “Tal Quale” 70/100 e bitume modificato con SBS, alla temperatura di 58°C.

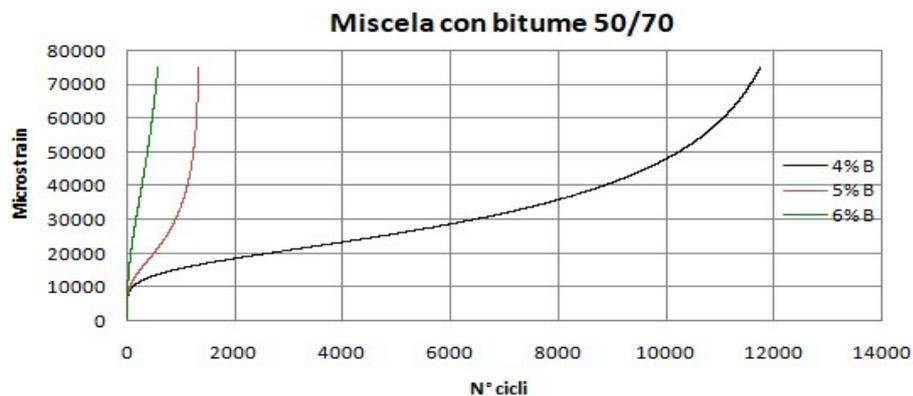


Figura 5.5 curve di Flow Number delle miscele realizzate con bitume 50/70

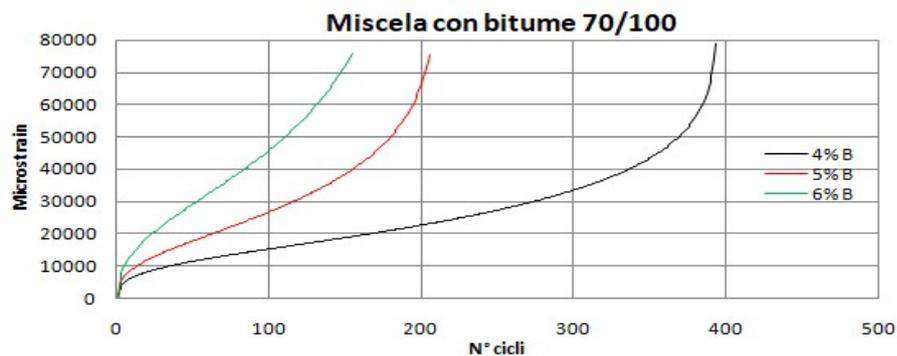


Figura 5.6 curve di Flow Number delle miscele realizzate con bitume 70/100

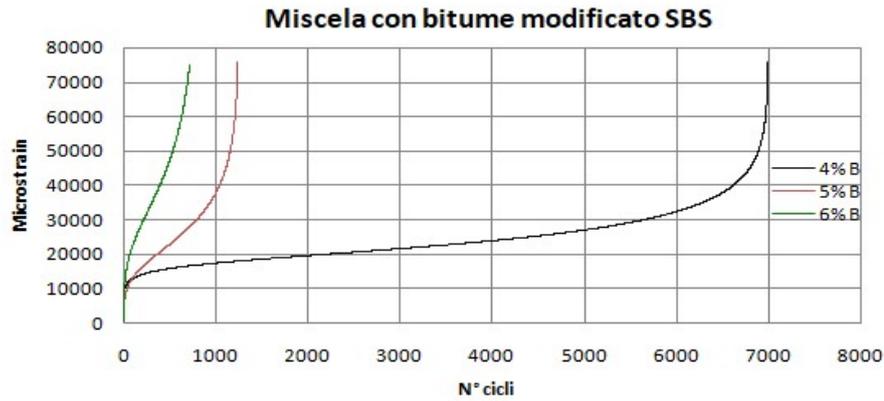


Figura 5.7 curve di Flow Number delle miscele realizzate con bitume modificato

In tutte e tre le rappresentazioni è evidente che le miscele realizzate con il 4% di bitume forniscono migliori prestazioni di resistenza allo scorrimento, indipendentemente dalla temperatura con cui è stata eseguita la prova. Ciò significa che, a parità di percentuale dei vuoti, le miscele con un quantitativo minore di bitume presentano un maggior scheletro litico che fornisce una maggiore rigidità.

| Miscela realizzata con bitume | % bitume | Flow Number |
|-------------------------------|----------|-------------|
| 50/70 | 4 | 1669 |
| | 5 | 405 |
| | 6 | 246 |
| 70/100 | 4 | 182 |
| | 5 | 85 |
| | 6 | 64 |
| SBS | 4 | 4200 |
| | 5 | 585 |
| | 6 | 289 |

Tabella 5.3 valori di Flow Number delle miscele esaminate

Mettendo insieme le curve di Flow Number ottenute su provini caratterizzati da una stessa percentuale di bitume e percentuale dei vuoti, ma appartenenti a miscele differenti, è possibile dedurre che i campioni realizzati con bitume modificato, presentano un minor accumulo di deformazione permanente, traducendosi in una maggior resistenza al rutting (figura 5.8).

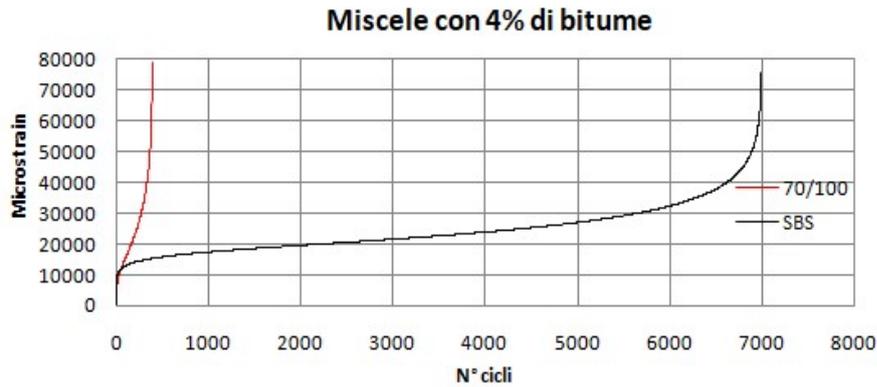


Figura 5.8 curve di Flow Number di miscele realizzate con bitumi differenti ma con la stessa % B

Infine, poiché i risultati delle prove eseguite al DSR (tabella 5.1) hanno mostrato valori di CCR dello stesso ordine di grandezza per i bitumi “Tal Quale” 50/70 e 70/100 (molto vicini tra loro), è stato possibile rappresentare le curve di Flow Number ottenute a temperature diverse.

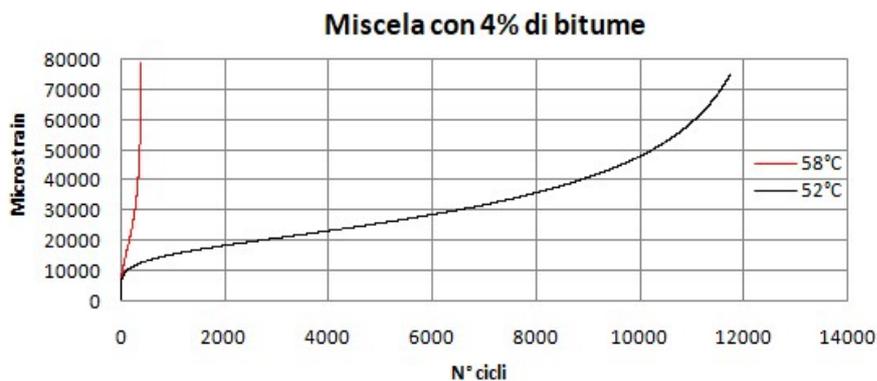


Figura 5.9 curve di Flow Number alle temperature di 52 e 58°C

La figura mostra come due provini di miscela aventi le stesse caratteristiche compositive (%V e %B) hanno comportamenti diversi a temperature differenti: nello specifico, il campione presenta migliori prestazioni a temperature di esercizio della pavimentazione più basse in quanto il comportamento della miscela risulta essere più rigido.

5.3 Analisi della correlazione CCR-FN

In questa fase della tesi, è stata analizzata la correlazione tra CCR e FN di campioni caratterizzati da tre percentuali diverse di bitume (4, 5, 6%) e due percentuali dei vuoti (4 e 6%).

Come già riferito nel capitolo relativo all'indagine sperimentale, ottenere campioni con il valore preciso dei vuoti è molto difficile. Anche se nella maggior parte dei casi non è

stato raggiunto l'obiettivo prefissato il valore ottenuto è comunque rientrato nei limiti stabiliti dal protocollo. Pertanto, il valore di Flow Number non è preciso.

E' stato possibile comunque ottenere i valori corretti di Flow Number corrispondenti al 4 e 6% dei vuoti perché è stato dimostrato che i dati sperimentali, ottenuti dalla prova di Flow Number, possono essere approssimati da funzioni lineari.

Si riportano in tabella i valori di Flow Number ottenuti testando tutti i campioni delle varie miscele e, attraverso rappresentazione grafica, quanto espresso sopra:

| N° campioni | %B | %V | CCR | FN |
|-------------|-----|-----|----------|-----|
| 1 | 4,1 | 4,6 | 2,48E-03 | 115 |
| 2 | 4,1 | 4,3 | 2,48E-03 | 182 |
| 3 | 4,1 | 3,8 | 2,48E-03 | 255 |
| 4 | 4,1 | 6,0 | 2,48E-03 | 57 |
| 5 | 4,1 | 6,0 | 2,48E-03 | 89 |
| 1 | 5,1 | 3,3 | 2,48E-03 | 94 |
| 2 | 5,1 | 4,7 | 2,48E-03 | 151 |
| 3 | 5,1 | 3,4 | 2,48E-03 | 153 |
| 4 | 5,1 | 5,8 | 2,48E-03 | 69 |
| 5 | 5,1 | 4,1 | 2,48E-03 | 134 |
| 6 | 5,1 | 5,4 | 2,48E-03 | 90 |
| 7 | 5,1 | 6,4 | 2,48E-03 | 50 |
| 8 | 5,1 | 4,1 | 2,48E-03 | 85 |
| 1 | 6,3 | 4,3 | 2,48E-03 | 54 |
| 2 | 6,3 | 4,1 | 2,48E-03 | 64 |
| 5 | 6,3 | 5,8 | 2,48E-03 | 41 |
| 6 | 6,3 | 6,0 | 2,48E-03 | 28 |

Tabella 5.4 valori di FN in funzione della %V dei campioni realizzati con bitume 70/100

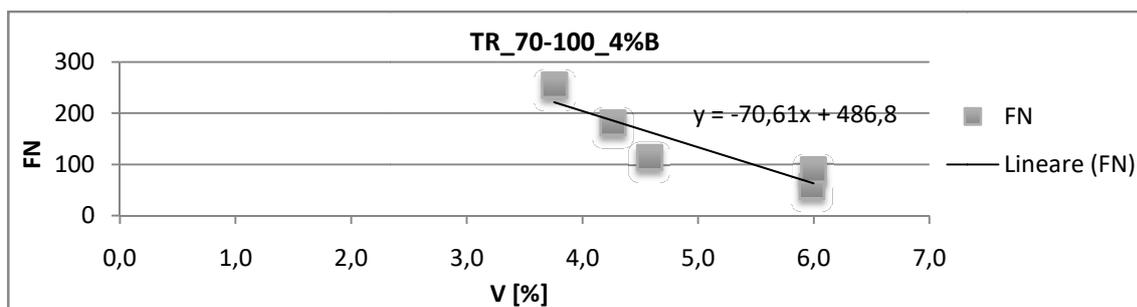


Figura 5.10 relazione FN-%V dei campioni con 4% di bitume 70/100

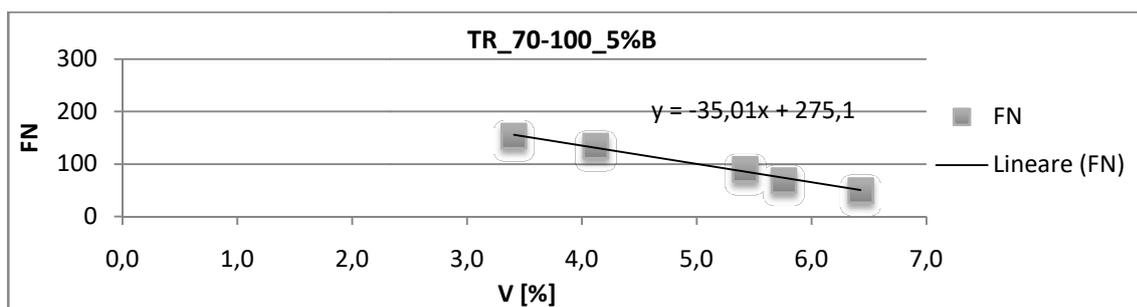


Figura 5.11 relazione FN-%V dei campioni con 5% di bitume 70/100

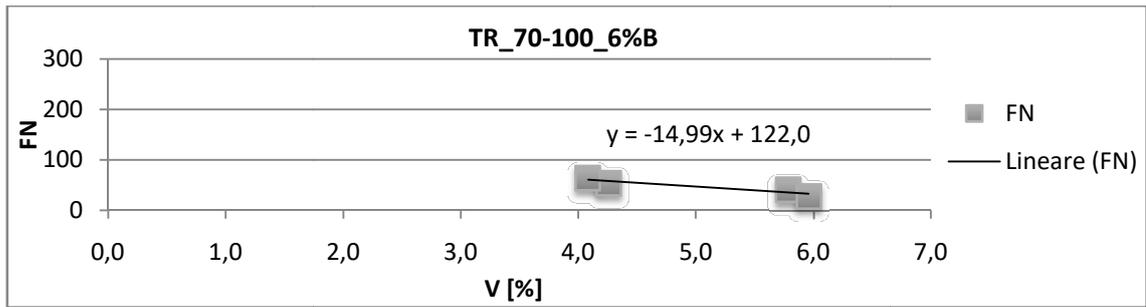


Figura 5.12 relazione FN-%V dei campioni con 6% di bitume 70/100

| N° campioni | %B | %V | CCR | FN |
|-------------|-----|-----|----------|------|
| 1 | 4,0 | 4,5 | 2,86E-05 | 3813 |
| 2 | 4,0 | 6,0 | 2,86E-05 | 1346 |
| 3 | 4,0 | 4,5 | 2,86E-05 | 4200 |
| 7 | 4,0 | 6,2 | 2,86E-05 | 1136 |
| 1 | 5,0 | 4,2 | 2,86E-05 | 585 |
| 2 | 5,0 | 6,0 | 2,86E-05 | 321 |
| 3 | 5,0 | 3,9 | 2,86E-05 | 984 |
| 4 | 5,0 | 6,1 | 2,86E-05 | 315 |
| 1 | 5,8 | 3,7 | 2,86E-05 | 313 |
| 2 | 5,8 | 6,2 | 2,86E-05 | 168 |
| 3 | 5,8 | 3,8 | 2,86E-05 | 396 |
| 4 | 5,8 | 6,4 | 2,86E-05 | 156 |
| 5 | 5,8 | 4,1 | 2,86E-05 | 289 |
| 6 | 5,8 | 5,8 | 2,86E-05 | 198 |

Tabella 5.5 valori di FN in funzione della %V dei campioni realizzati con bitume SBS

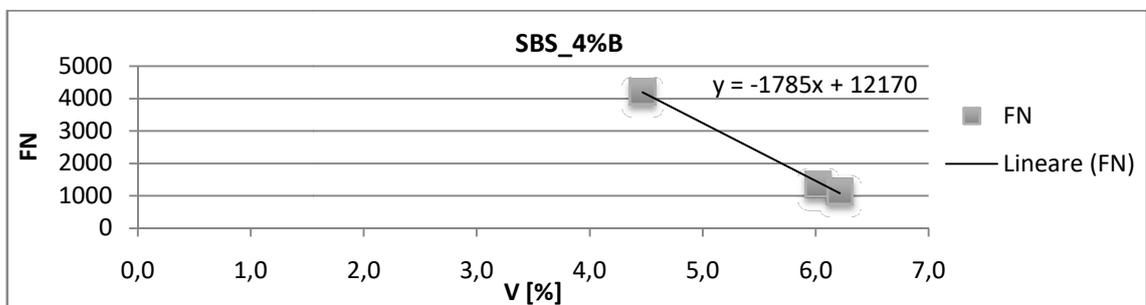


Figura 5.13 relazione FN-%V dei campioni con 4% di bitume modificato con SBS

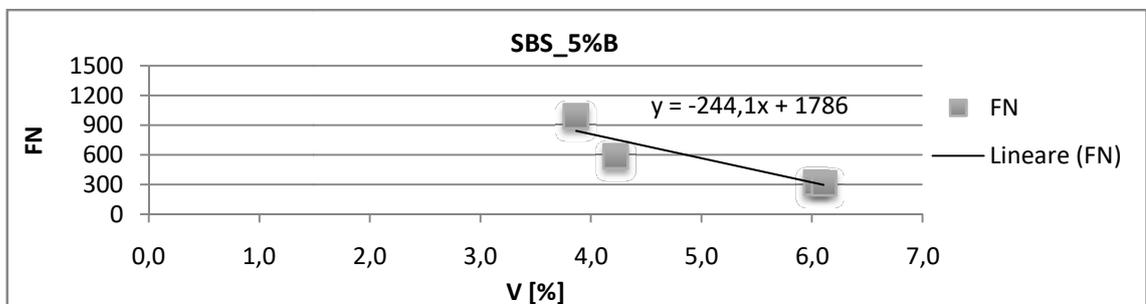


Figura 5.14 relazione FN-%V dei campioni con 5% di bitume modificato con SBS

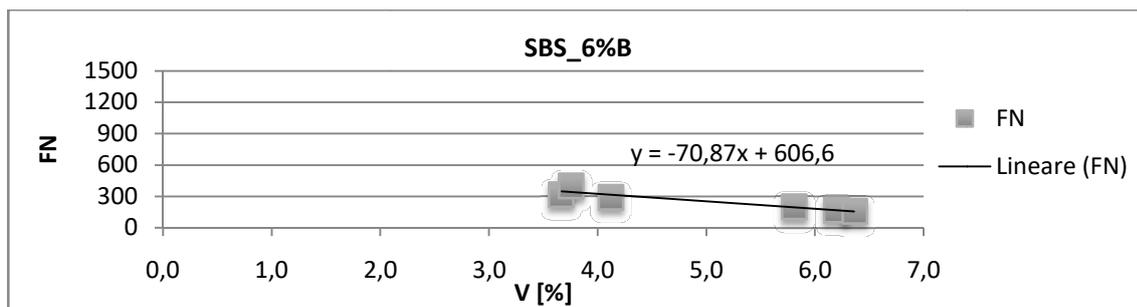


Figura 5.15 relazione FN-%V dei campioni con 6% di bitume modificato con SBS

| N° campioni | %B | %V | CCR | FN |
|-------------|-----|-----|----------|------|
| 1 | 4,1 | 4,1 | 6,13E-04 | 1554 |
| 2 | 4,1 | 6,9 | 6,13E-04 | 187 |
| 3 | 4,1 | 4,7 | 6,13E-04 | 961 |
| 4 | 4,1 | 6,4 | 6,13E-04 | 408 |
| 5 | 4,1 | 4,0 | 6,13E-04 | 1669 |
| 6 | 4,1 | 6,2 | 6,13E-04 | 752 |
| 7 | 4,1 | 5,9 | 6,13E-04 | 557 |
| 1 | 4,9 | 4,1 | 6,13E-04 | 405 |
| 2 | 4,9 | 6,6 | 6,13E-04 | 222 |
| 3 | 4,9 | 4,1 | 6,13E-04 | 384 |
| 4 | 4,9 | 6,0 | 6,13E-04 | 272 |
| 5 | 4,9 | 6,1 | 6,13E-04 | 198 |
| 1 | 5,9 | 4,3 | 6,13E-04 | 232 |
| 2 | 5,9 | 6,3 | 6,13E-04 | 134 |
| 3 | 5,9 | 4,4 | 6,13E-04 | 249 |
| 4 | 5,9 | 5,6 | 6,13E-04 | 186 |
| 5 | 5,9 | 3,8 | 6,13E-04 | 265 |
| 6 | 5,9 | 4,2 | 6,13E-04 | 246 |
| 7 | 5,9 | 5,9 | 6,13E-04 | 171 |

Tabella 5.6 valori di FN in funzione della %V dei campioni realizzati con bitume 50/70

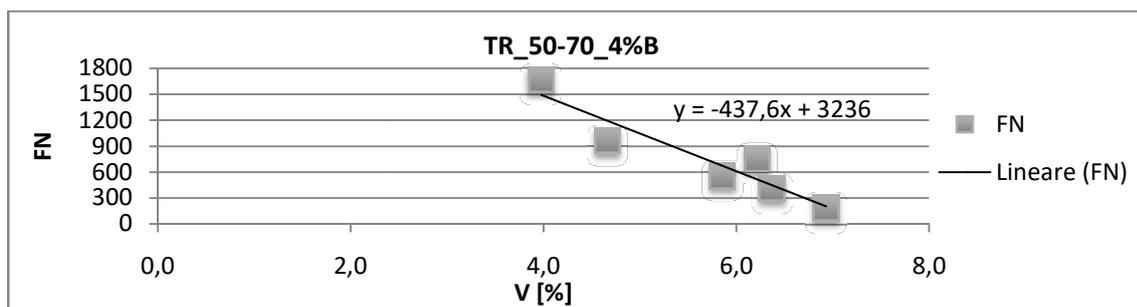


Figura 5.16 relazione FN-%V dei campioni con 4% di bitume 50/70

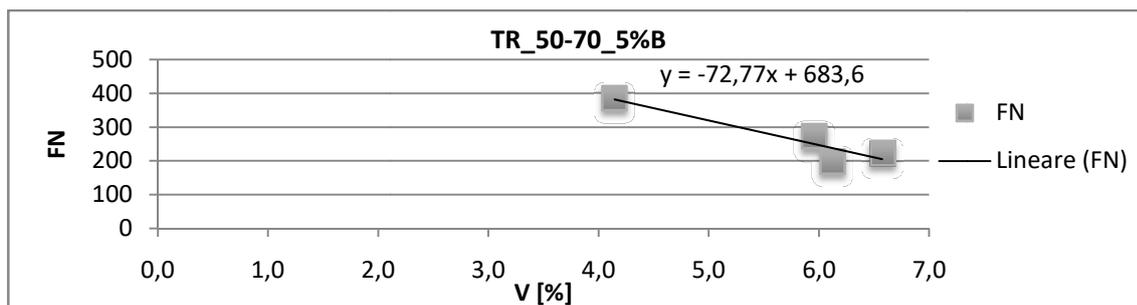


Figura 5.17 relazione FN-%V dei campioni con 5% di bitume 50/70

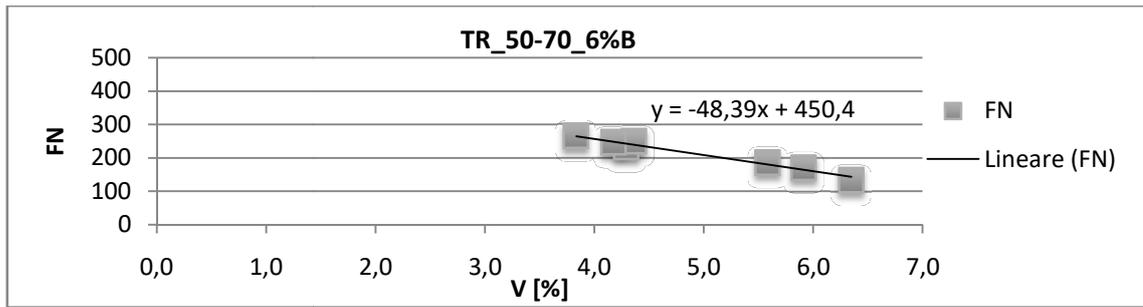


Figura 5.18 relazione FN-%V dei campioni con 6% di bitume 50/70

Come si può notare graficamente i dati ottenuti possono essere approssimati da rette quindi, note le loro equazioni, è stato possibile calcolare con precisione il valore di Flow Number corrispondente al 4 e 6% dei vuoti di tutti i campioni caratterizzati da diverse percentuali di bitume. Dunque, sono stati inseriti in uno stesso grafico i valori del Creep Compliance Rate dei bitumi impiegati (per il “Tal Quale” 70/100 e quello modificato si è utilizzato il valore ottenuto alla temperatura di 58°C mentre per il “Tal Quale” 50/70 quello alla temperatura di 52°C) con i corrispettivi Flow Number dei campioni di conglomerato bituminoso caratterizzati dalla stessa percentuale di bitume e vuoti. Nello specifico, è stato inserito nell’asse delle ascisse il logaritmo del Flow Number e nell’asse delle ordinate il Creep Compliance Rate.

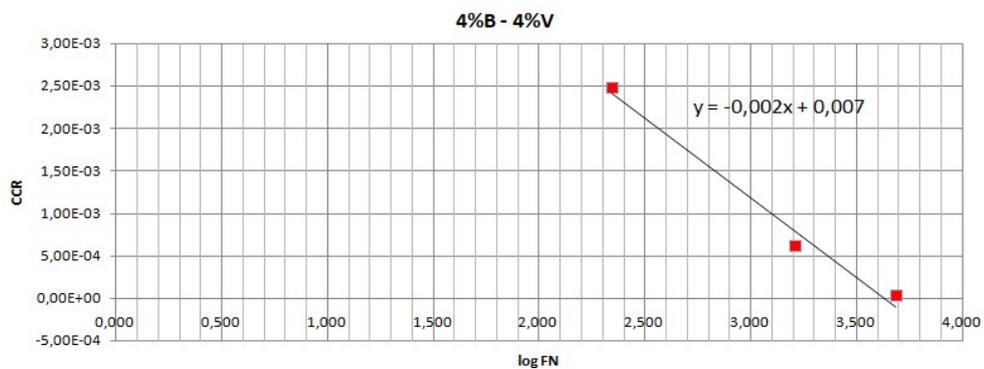


Figura 5.19 CCR-FN di un campione con 4%B e 4%V

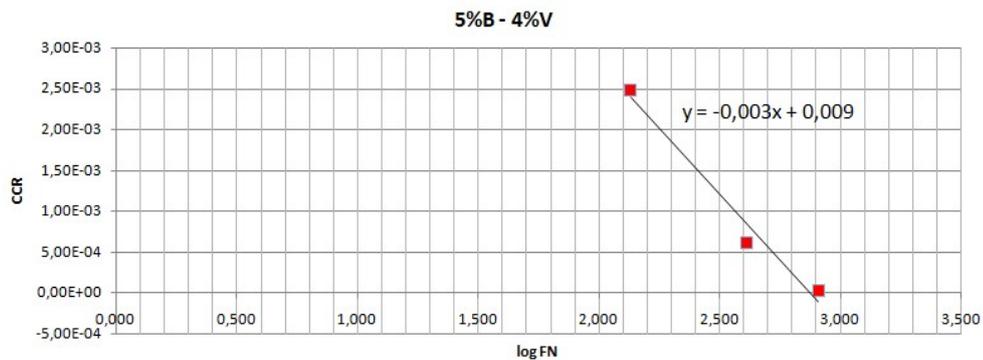
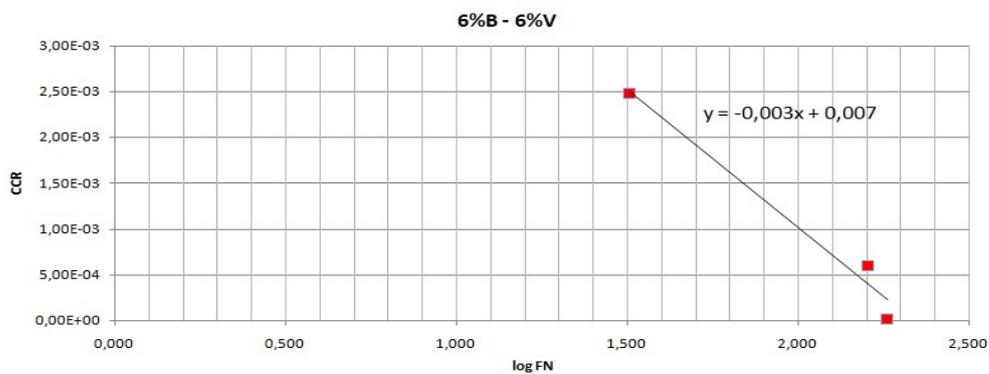
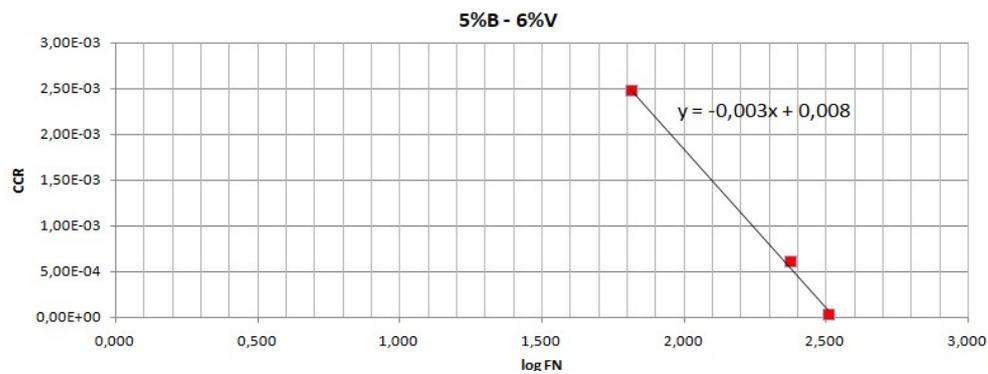
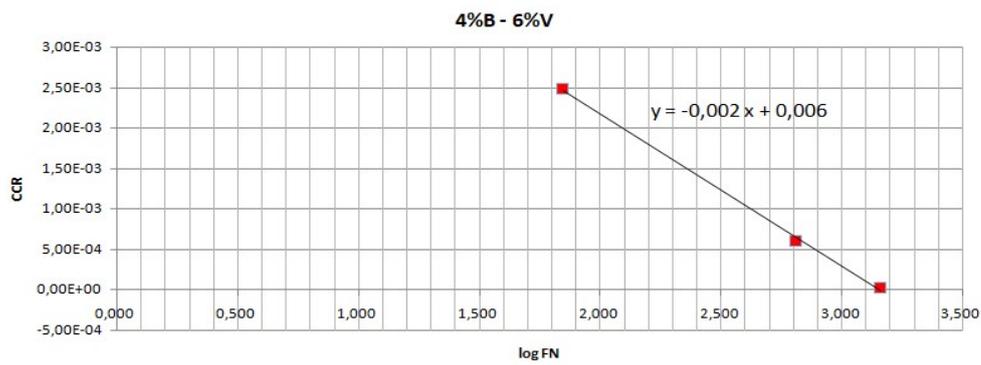
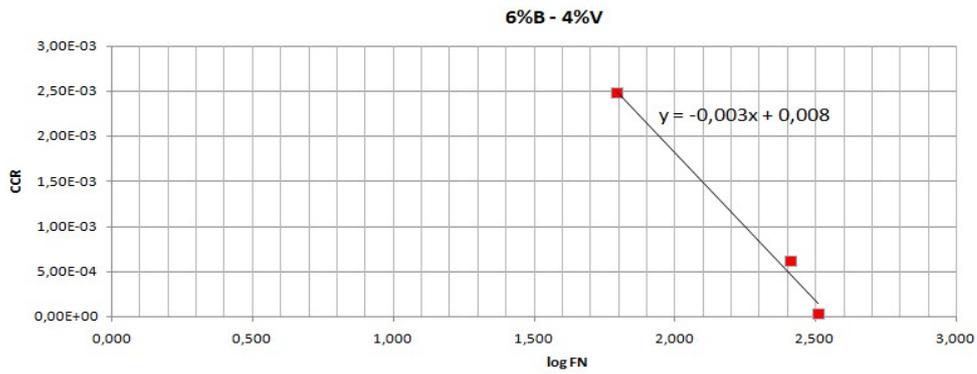


Figura 5.20 CCR-FN di un campione con 5%B e 4%V



Le figure mostrano come in una tale rappresentazione (scala semilogaritmica) i punti si allineano ad una retta, affermando quindi l'esistenza di una correlazione lineare tra CCR e log FN di campioni realizzati con percentuali diverse di bitume e stesso contenuto dei vuoti.

Le rette mostrate nelle figure soprastanti sono state inserite tutte in uno stesso grafico al fine di comprendere gli effetti portati dalle caratteristiche compositive delle miscele.

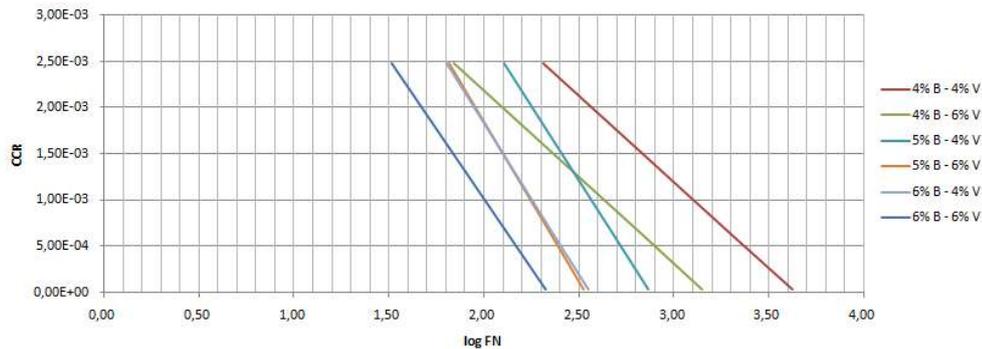


Figura 5.25 Correlazione CCR-FN

E' possibile notare dalla figura un parallelismo tra le rette aventi la stessa percentuale di bitume che mostrano una simile pendenza e una diversa intercetta.

Differente è il comportamento che si evince considerando una stessa percentuale dei vuoti; si ha infatti una diversa pendenza delle rette.

In conclusione si può affermare che, qualunque sia la composizione volumetrica di un dato scheletro litico della miscela, il rapporto CCR-FN, in una scala semilogaritmica, rimane costante mentre varia nelle miscele caratterizzate da una stessa composizione volumetrica e diversa percentuale di bitume. Ciò permette di comprendere che la percentuale dei vuoti influenza l'intercetta delle rette mentre la percentuale di bitume la pendenza delle stesse.

I successivi grafici aiutano la comprensione del concetto appena espresso.

Sono stati rappresentati in primis le rette che hanno diversa percentuale dei vuoti e successivamente le rette che hanno diversa percentuale di bitume.

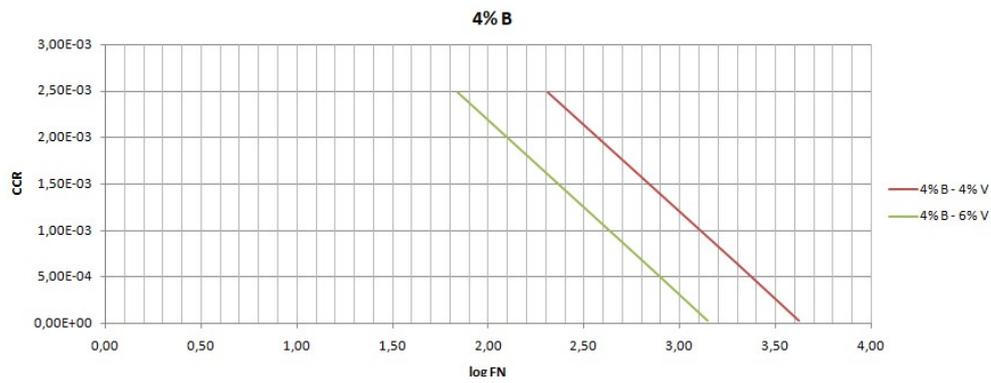


Figura 5.26 rette con il 4% di bitume

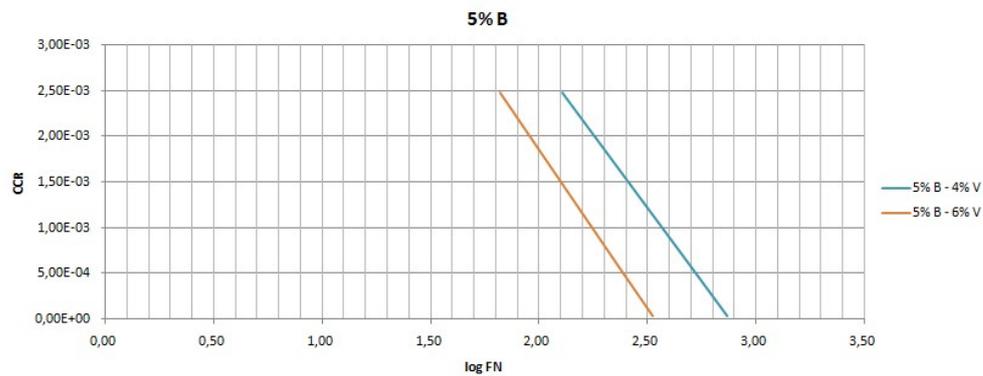


Figura 5.27 rette con il 5% di bitume

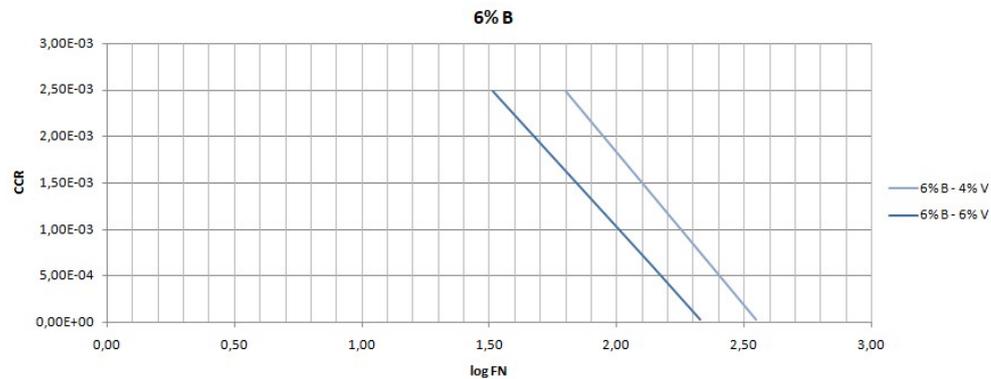


Figura 5.28 rette con il 6% di bitume

Si evidenzia come le due rette caratterizzate da una diversa percentuale dei vuoti abbiano la stessa pendenza ma diversa intercetta, confermando quanto detto sopra.

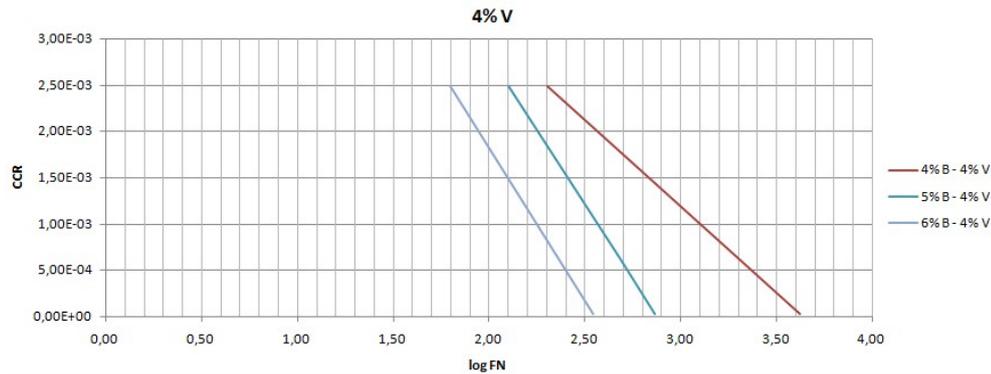


Figura 5.29 rette con la stessa percentuale dei vuoti

Rappresentando invece le rette che hanno una diversa percentuale di bitume e stessa percentuale dei vuoti si comprende come il coefficiente angolare delle rette vari notevolmente passando dal 4 al 5% di bitume e rimanga pressoché costante passando dal 5 al 6%.

Si constata quindi che, in una tale rappresentazione, l'equazione che correla CCR con il FN è del tipo:

$$CCR = -b \cdot \log(FN) + a$$

dove a è l'intercetta della retta che dipende dalla percentuale dei vuoti e b è la pendenza della retta funzione della percentuale di bitume.

A questo punto è stato interessante conoscere la modalità con la quale la percentuale di bitume influisce sulla pendenza, se esiste una legge che permette di legarli.

A tal fine, dalle equazioni che correlano CCR-FN è stato possibile estrapolare da queste, mediante la funzione PENDENZA del software Excel, il parametro b :

| B - V | B [%] | V [%] | b (pendenza) |
|-------|-------|-------|--------------|
| 4-4 | 4 | 4 | -1,81E-03 |
| 5-4 | 5 | 4 | -3,23E-03 |
| 6-4 | 6 | 4 | -3,29E-03 |
| 4-6 | 4 | 6 | -1,82E-03 |
| 5-6 | 5 | 6 | -3,43E-03 |
| 6-6 | 6 | 6 | -3,02E-03 |

Tabella 5.7 parametro "b" delle rette

In tabella sono stati inseriti i valori del parametro "b" calcolati per tutte le rette rappresentate in figura 5.25.

La rappresentazione grafica è di conseguenza:

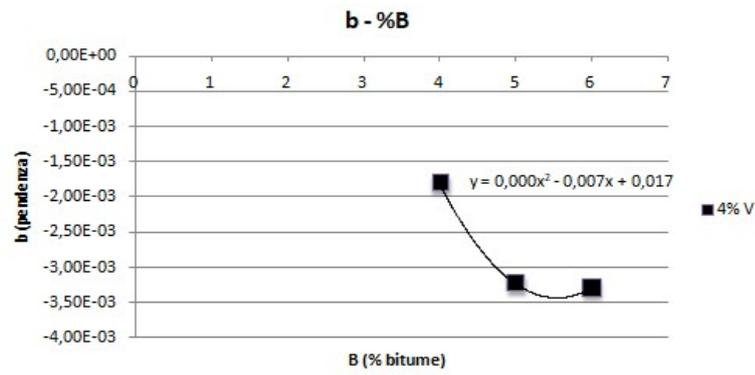


Figura 5.30 pendenza in funzione della %B

Dal grafico si percepisce che la funzione che meglio approssima i dati è un'equazione di secondo grado associabile ad una parabola con concavità rivolta verso l'alto.

Si conclude l'analisi confermando quanto già osservato nel grafico 5.25 ovvero che si ha una sostanziale variazione di pendenza tra il 4 e 5% di bitume e una minima variazione invece tra il 5 e 6%.

Conclusioni

Nell'indagine sperimentale della presente tesi è stato valutato il comportamento dei conglomerati bituminosi in merito all'accumulo di deformazione permanente, attraverso il test di Flow Number eseguito con l'Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).

Nello specifico, si è cercato di comprendere quali fossero gli effetti delle proprietà reologiche del bitume (CCR) sul Flow Number delle corrispettive miscele.

A tal fine, sono stati impiegati tre differenti bitumi per produrre nove miscele di conglomerato bituminoso: il bitume "Tal Quale" 50/70, il bitume "Tal Quale" 70/100 e il bitume modificato con polimero SBS. Per ciascun bitume sono state prodotte tre miscele aventi lo stesso scheletro litico ma percentuali diverse di legante (4, 5, 6%). Infine, per ogni miscela sono stati realizzati quattro campioni caratterizzati da due percentuali dei vuoti (4 e 6%).

In definitiva sono stati sottoposti al test di Flow Number 36 provini dei quali, quelli realizzati con il bitume 70/100 e SBS sono stati testati alla temperatura di 58°C, i 12 campioni prodotti con il "Tal Quale" 50/70 sono stati testati invece alla temperatura di 52°C. L'uso di due diverse temperature è dovuto al simile comportamento presentato dai due bitumi tradizionali. Infatti il loro valore di CCR è dello stesso ordine di grandezza a qualsiasi temperatura.

Dall'analisi dei dati ottenuti dalle prove di SSCR e FN, è possibile concludere:

- Il CCR di ciascun bitume aumenta con l'innalzamento della temperatura, come c'era da aspettarsi noto il suo comportamento di fluido viscoso alle alte temperature;
- I valori di CCR di un qualsiasi bitume considerato, ottenuti alle varie temperature, possono essere approssimati con una funzione lineare in un grafico semilogaritmico;
- I bitumi tradizionali 50/70 e 70/100 presentano, all'applicazione del carico, immediatamente un comportamento lineare mentre il modificato con SBS, inizialmente, mostra una curvatura legata alla presenza di una matrice polimerica che gli permette di raggiungere una condizione di stato stazionario (scorrimento costante nel tempo) a tempi di carico maggiori;
- I valori di CCR del bitume modificato con SBS sono più bassi rispetto ai tradizionali, qualunque sia la temperatura considerata. Si può affermare,

pertanto, che i bitumi modificati hanno maggiori resistenze allo scorrimento quindi all'ormaiamento;

- Le miscele che, a parità di scheletro litico e contenuto dei vuoti, hanno una percentuale minore di bitume presentano un valore di Flow Number più grande. Questo è dovuto alla maggior quantità di aggregato presente nelle miscele con minor contenuto di bitume che, a parità di massa e contenuto di vuoti, gli conferisce maggior rigidità;
- Le miscele realizzate con bitume modificato mostrano migliori resistenze all'accumulo di deformazione permanente rispetto a quelle prodotte con i "Tal Quale" (valore di FN più grande), confermando i risultati ottenuti sui relativi bitumi. Il motivo deriva dalla maggior resistenza alle sollecitazioni meccaniche dell'elastomero SBS;
- Miscele con le stesse caratteristiche compositive e scheletro litico presentano un valore di Flow Number maggiore a temperature più basse;
- Correlazione lineare tra CCR e FN in una scala semilogaritmica;
- La percentuale di bitume influisce sulla pendenza della funzione CCR-FN;
- La pendenza della retta che correla il valore del CCR con il FN in un grafico semilogaritmico varia con una legge polinomiale del secondo ordine associabile, sembrerebbe, all'equazione di una parabola con concavità rivolta verso l'alto.

E' necessario sottolineare che i risultati perseguiti sono stati ottenuti con soli tre punti sperimentali, sarebbe, pertanto, opportuno confermare questa tesi con più dati. A tal fine, si consiglia di realizzare miscele impiegando più bitumi e/o eseguire il test di Flow Number a più temperature. In questo modo, inoltre, si riuscirebbe a definire con più precisione la curva che lega il parametro b con la variazione della percentuale di bitume e ricavare, di conseguenza, con esattezza, la sua equazione. Infine sarebbe interessante capire il legame che unisce il parametro a (intercetta) con la variazione della percentuale dei vuoti affinché sia possibile, mettere insieme, in uno stesso grafico, i parametri della retta (a e b) con le caratteristiche compositive della miscela (%V e %B). Se si riuscisse, quindi, a determinare l'equazione di tale grafico, sarebbe possibile calcolare analiticamente il valore del Flow Number di qualsiasi miscela, qualunque siano le proprie caratteristiche volumetriche e il valore del Creep Compliance Rate del bitume caratterizzante. Si ricorda infatti che l'equazione che unisce il valore del Flow Number con il Creep Compliance Rate, in un grafico semilogaritmico, è di tipo lineare.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ing. Paola Di Mascio; Ing. Fabio Miseri; Ing. Laura Moretti, “APPROFONDIMENTI SULLE PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO: un modello per confrontare i costi di primo impianto e manutenzione.” pp. 43–48, 2010.
- [2] M. Casarin, “ANALISI SPERIMENTALE DI CONGLOMERATI BITUMINOSI TIEPIDI PRODOTTI CON ADDITIVI CHIMICI,” Università degli studi di Padova, 2015.
- [3] J. C. Petersen *et al.*, *Binder Characterization and Evaluation. Volume 1. No SHRP-A-367*. 1994.
- [4] H. Bahia U, D. Hanson I, M. Zeng, H. Zhai, M. Khatri A, and R. Anderson M, “Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design,” *NCHRP Report*. p. 176, 2001.
- [5] E. Masad, C. Huang, J. D’Angelo, and D. Little, “Characterization of asphalt binder resistance to permanent deformation based on nonlinear viscoelastic analysis of multiple stress creep recovery (MSCR) test,” in *Asphalt Paving Technology 2009, AAPT*, 2009, pp. 535–562.
- [6] M. D. I. Domingos and A. L. Faxina, “Susceptibility of Asphalt Binders to Rutting: Literature Review,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 2, p. 4015134, 2016.
- [7] D. Sybilski, “Zero-Shear Viscosity of Bituminous Binder and Its Relation to Bituminous Mixture’s Rutting Resistance,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 1535, no. 1, pp. 15–21, 1996.
- [8] M. C. Phillips and C. Robertus, “Binder rheology and asphaltic pavement permanent Deformation; the zero shear viscosity,” in *Eurasphalt & Eurobitume Congress, Stansbourg, Ma 1996. (3) .5.134, pp 7-10*, 1996.
- [9] S. E. Zoorob, J. P. Castro-Gomes, and L. A. Pereira Oliveira, “Assessing low shear viscosity as the new bitumen Softening Point test,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 357–367, 2012.
- [10] F. Merusi and F. Giuliani, “Rheological characterization of wax-modified asphalt binders at high service temperatures,” *Mater. Struct.*, vol. 44, no. 10, pp. 1809–1820, 2011.
- [11] S. E. Zoorob, J. P. Castro-Gomes, L. A. Pereira Oliveira, and J. O’Connell, “Investigating the Multiple Stress Creep Recovery bitumen characterisation test,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 734–745, 2012.
- [12] E. Santagata, O. Baglieri, D. Dalmazzo, and L. Tsantilis, “Evaluation of the anti-rutting potential of polymer-modified binders by means of creep-recovery shear tests,” *Mater. Struct.*, vol. 46, no. 10, pp. 1673–1682, 2013.
- [13] Bergonzoni marco, “VALORIZZAZIONE DEI PNEUMATICI FUORI USO (PFU) ATTRAVERSO IL RECUPERO E RICICLAGGIO PER LA PRODUZIONE DI PRODOTTI INNOVATIVI,” Università degli studi di Ferrara, 2009.
- [14] F. Petretto, “Le reologia dei leganti bituminosi stradali: studio delle proprietà meccaniche a seguito di processi di ‘aging’ in laboratorio,” Università degli studi di Bologna, 2012.
- [15] J. Read and D. Whiteoak, “The Shell bitumen handbook,” *Read, J., & Whiteoak, D. (2003). The Shell bitumen handbook. Thomas Telford*. p. 29, 2003.
- [16] D. Lesueur, “The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification,” *Advances in Colloid and*

- Interface Science*, vol. 145, no. 1–2. pp. 42–82, 2009.
- [17] D. G. U. Zecchini Andrea, “Le Pavimentazioni Stradali. Corso base.” p. 27.
- [18] Luca Martelli, “STUDIO DELLE PROPRIETA’ REOLOGICHE DI LEGANTI BITUMINOSI MODIFICATI AD ‘ALTA LAVORABILITA’ MEDIANTE DYNAMIC SHEAR RHEOMETER,” Università di Bologna., 2010.
- [19] Pier Paolo Riviera, “Analisi sperimentale e modellazione reologica della lavorabilità dei conglomerati bituminosi,” Politecnico di Torino., 2006.
- [20] “UNI EN 933-1 (1999) - Analisi granulometrica per stacciatura.” .
- [21] “UNI EN 12697-2 - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo. Determinazione curva granulometrica.,” 2005.
- [22] M. Tundo, “Indagine sperimentale sul comportamento meccanico di miscele bituminose per strati di usura del tipo Stone Mastic Asphalt (SMA),” 2016.
- [23] “UNI EN 12697-39 (2004) - Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 39: Contenuto di legante mediante ignizione,” 2004.
- [24] “UNI EN 1097-6:2002 - Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Determinazione della massa volumica dei granuli e dell’assorbimento d’acqua,” 2002.
- [25] “UNI EN 12697-5:2003 - 01-05-2003 - Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Determinazione della massa volumica massima,” 2003.
- [26] “UNI EN 12697-6 (2003)-Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi,” 2003.
- [27] “Norma 12607-1(1997)- Invecchiamento del bitume con Rolling Thin Film Oven Test RTFOT,” pp. 1–13, 1997.
- [28] “AASHTO PP 60: Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).” .

Allegato 1: Massima Massa Volumica Teorica e Carbolite

Si allegano di seguito i risultati ottenuti dalla prova al picnometro e dalla carbolite di ogni miscela realizzata.

Miscela 1 realizzata con 5% di bitume "Tal Quale" 70/100:

| Campione | Picnometro | M _P | M _{P+M} | M _{P+M+H2O} | V _P | T | ρ _w | ρ _{mw} |
|----------|------------|----------------|------------------|----------------------|-------------------|------|----------------------|----------------------|
| - | - | (g) | (g) | (g) | (m ³) | (°C) | (kg/m ³) | (kg/m ³) |
| 1 | J+I | 901,0 | 1434,8 | 2619,3 | 0,0013938 | 20,5 | 998,2 | 2577 |
| 2 | K+F | 924,8 | 1466,6 | 2618,2 | 0,0013646 | 21,0 | 998,1 | 2570 |
| 3 | J+I | 901,0 | 1499,3 | 2658,1 | 0,0013938 | 21,1 | 998,0 | 2571 |
| 4 | K+F | 924,8 | 1376,2 | 2563,3 | 0,0013646 | 21,0 | 998,1 | 2576 |

| | |
|---------|------|
| Media | 2574 |
| Dev.St. | 4 |
| C.V. | 0,1 |
| MAX-min | 7,0 |

Tabella 1: risultati della prova al picnometro

| Campione | Tara [g] | Netto (prima) [g] | Netto (dopo) [g] | Bitume perso [g] | % B |
|----------|----------|-------------------|------------------|------------------|------|
| 1 | 2828 | 1242,9 | 1181,9 | 61 | 5,16 |
| 2 | 2849 | 1487,4 | 1415,8 | 71,6 | 5,06 |
| | | | | Media | 5,11 |

Tabella 1.1: risultati della carbolite

Miscela 2 realizzata con 6% di bitume "Tal Quale" 70/100:

| Campione | Picnometro | M _P | M _{P+M} | M _{P+M+H2O} | V _P | T | ρ _w | ρ _{mw} |
|----------|------------|----------------|------------------|----------------------|-------------------|------|----------------------|----------------------|
| - | - | (g) | (g) | (g) | (m ³) | (°C) | (kg/m ³) | (kg/m ³) |
| 1 | K+A | 921,3 | 1485,1 | 2623,4 | 0,0013653 | 26,6 | 996,7 | 2526 |
| 2 | J+F | 927,6 | 1432,3 | 2610,0 | 0,0013814 | 26,6 | 996,7 | 2527 |
| 3 | K+A | 921,3 | 1582,9 | 2681,8 | 0,0013653 | 26,4 | 996,7 | 2518 |
| 4 | J+F | 927,6 | 1522,4 | 2663,8 | 0,0013814 | 26,4 | 996,7 | 2518 |

| | |
|---------|------|
| Media | 2522 |
| Dev.St. | 5 |
| C.V. | 0,2 |
| MAX-min | 9,0 |

Tabella 2: risultati della prova al picnometro

| Campione | Tara [g] | Netto (prima) [g] | Netto (dopo) [g] | Bitume perso [g] | % B |
|----------|----------|-------------------|------------------|------------------|------|
| 1 | 2839,5 | 1122,8 | 1056,7 | 66,1 | 6,26 |
| 2 | 2835,20 | 1019,4 | 959,1 | 60,3 | 6,29 |
| | | | | Media | 6,27 |

Tabella 2.1: risultati della carbolite

Miscela 3 realizzata con 4% di bitume "Tal Quale" 70/100:

| Campione | Picnometro | M _P | M _{P+M} | M _{P+M+H2O} | V _P | T | ρ _w | ρ _{mw} |
|----------|------------|----------------|------------------|----------------------|-------------------|------|----------------------|----------------------|
| - | - | (g) | (g) | (g) | (m ³) | (°C) | (kg/m ³) | (kg/m ³) |
| 1 | K+A | 921,2 | 1373,3 | 2560,5 | 0,0013653 | 26,7 | 996,7 | 2597 |
| 2 | J+F | 927,5 | 1364,5 | 2573,4 | 0,0013814 | 26,7 | 996,7 | 2595 |
| 3 | K+A | 921,2 | 1413,4 | 2585,6 | 0,0013653 | 26,6 | 996,7 | 2602 |
| 4 | J+F | 927,5 | 1504,7 | 2660,5 | 0,0013814 | 26,7 | 996,7 | 2604 |

| | |
|---------|------|
| Media | 2599 |
| Dev.St. | 4 |
| C.V. | 0,2 |
| MAX-min | 8,8 |

Tabella 3: risultati della prova al picnometro

| Campione | Tara [g] | Netto (prima) [g] | Netto (dopo) [g] | Bitume perso [g] | % B |
|----------|----------|----------------------|---------------------|---------------------|------|
| 1 | 2840,4 | 971,6 | 933,4 | 38,2 | 4,09 |
| 2 | 2835,6 | 920,6 | 884,2 | 36,4 | 4,12 |
| | | | | Media | 4,10 |

Tabella 3.1: risultati della carbolite

Miscela 4 realizzata con 4% di bitume modificato:

| Campione | Picnometro | M _P (g) | M _{P+M} (g) | M _{P+M+H2O} (g) | V _P (m ³) | T (°C) | ρ _w (kg/m ³) | ρ _{mw} (kg/m ³) |
|----------|------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------|--|---|
| - | - | | | | | | | |
| 1 | K+A | 921,8 | 1499,2 | 2641,4 | 0,0013653 | 25,2 | 997,1 | 2628 |
| 2 | J+F | 928,2 | 1386,0 | 2589,3 | 0,0013814 | 25,4 | 997,0 | 2624 |
| 3 | K+A | 921,8 | 1461,3 | 2617,8 | 0,0013653 | 25,1 | 997,1 | 2627 |
| 4 | J+F | 928,2 | 1390,6 | 2592,8 | 0,0013814 | 25,4 | 997,0 | 2634 |

| | |
|---------|------|
| Media | 2628 |
| Dev.St. | 4 |
| C.V. | 0,2 |
| MAX-min | 9,7 |

Tabella 4: risultati della prova al picnometro

| Campione | Tara [g] | Netto(prima) [g] | Netto (dopo) [g] | Bitume perso [g] | % B |
|----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|------|
| 1 | 2842 | 1015 | 974,1 | 40,9 | 4,20 |
| 2 | 2834,4 | 995,1 | 957,8 | 37,3 | 3,89 |
| | | | | Media | 4,05 |

Tabella 4.1: risultati della carbolite

Miscela 5 realizzata con 5% di bitume modificato:

| Campione | Picnometro | M _P (g) | M _{P+M} (g) | M _{P+M+H2O} (g) | V _P (m ³) | T (°C) | ρ _w (kg/m ³) | ρ _{mw} (kg/m ³) |
|----------|------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------|--|---|
| - | - | | | | | | | |
| 1 | W+F | 927,0 | 1468,7 | 2629,3 | 0,0013757 | 24,2 | 997,3 | 2556 |
| 2 | K+A | 921,8 | 1437,0 | 2600,1 | 0,0013653 | 23,0 | 997,6 | 2584,1 |
| 3 | J+F | 928,1 | 1442,0 | 2621,0 | 0,0013814 | 23,0 | 997,6 | 2575,5 |
| 4 | K+A | 921,8 | 1425,3 | 2591,0 | 0,0013653 | 22,6 | 997,7 | 2557,4 |
| 5 | J+F | 928,1 | 1440,2 | 2619,8 | 0,0013814 | 22,8 | 997,7 | 2573,5 |

| | |
|---------|------|
| Media | 2569 |
| Dev.St. | 12 |
| C.V. | 0,5 |
| MAX-min | 28,1 |

Tabella 5: risultati della prova al picnometro

| Campione | Tara [g] | Netto (prima) [g] | Netto (dopo) [g] | Bitume perso [g] | % B |
|----------|----------|----------------------|---------------------|---------------------|------|
| 1 | 2834,5 | 1316,7 | 1253,5 | 63,2 | 5,04 |
| 2 | 2841,8 | 1022 | 973,7 | 48,3 | 4,96 |
| | | | | Media | 5,00 |

Tabella 5.1: risultati della carbolite

Miscela 6 realizzata con 6% di bitume modificato:

| Campione | Picnometro | M _P (g) | M _{P+M} (g) | M _{P+M+H2O} (g) | V _P (m ³) | T (°C) | ρ _w (kg/m ³) | ρ _{mw} (kg/m ³) |
|----------|------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------|--|---|
| - | - | | | | | | | |
| 1 | K+A | 921,8 | 1440,9 | 2597,5 | 0,0013653 | 23,7 | 997,4 | 2524 |
| 2 | J+F | 928,1 | 1446,9 | 2620,6 | 0,0013814 | 23,7 | 997,4 | 2535 |
| 3 | K+A | 921,8 | 1502,8 | 2635,6 | 0,0013653 | 23,3 | 997,5 | 2530 |
| 4 | J+F | 928,1 | 1511,0 | 2659,2 | 0,0013814 | 23,1 | 997,6 | 2530 |

| | |
|---------|------|
| Media | 2530 |
| Dev.St. | 5 |
| C.V. | 0,2 |
| MAX-min | 11,5 |

Tabella 6: risultati della prova al picnometro

| Campione | Tara [g] | Netto (prima) [g] | Netto (dopo) [g] | Bitume perso [g] | % B |
|----------|----------|----------------------|---------------------|---------------------|------|
| 1 | 2842,1 | 1024,5 | 968,6 | 55,9 | 5,77 |
| 2 | 2834,4 | 1075,2 | 1015,2 | 60 | 5,91 |
| | | | | Media | 5,84 |

Tabella 6.1: risultati della carbolite

Miscela 7 realizzata con 4% di bitume "Tal Quale" 50/70:

| Campione | Picnometro | M _p (g) | M _{P+M} (g) | M _{P+M+H2O} (g) | V _p (m ³) | T (°C) | ρ _w (kg/m ³) | ρ _{mw} (kg/m ³) |
|----------|------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------|--|---|
| - | - | (g) | (g) | (g) | (m ³) | (°C) | (kg/m ³) | (kg/m ³) |
| 1 | K+A | 921,8 | 1481,2 | 2630,7 | 0,0013653 | 21,1 | 998,0 | 2620 |
| 2 | J+F | 928,1 | 1401,1 | 2598,9 | 0,0013814 | 21,2 | 998,0 | 2611 |
| 3 | K+A | 921,8 | 1490,8 | 2636,7 | 0,0013653 | 21,1 | 998,0 | 2621 |
| 4 | J+F | 928,1 | 1538,7 | 2685,4 | 0,0013814 | 21,1 | 998,0 | 2627 |

| | |
|---------|------|
| Media | 2620 |
| Dev.St. | 7 |
| C.V. | 0,3 |
| MAX-min | 16,6 |

Tabella 7: risultati della prova al picnometro

| Campione | Tara [g] | Netto (prima) [g] | Netto (dopo) [g] | Bitume perso [g] | % B |
|----------|----------|----------------------|---------------------|---------------------|------|
| 1 | 2835,9 | 1188,5 | 1142,7 | 45,8 | 4,01 |
| 2 | 2842,7 | 1014,3 | 973,6 | 40,7 | 4,18 |
| | | | | Media | 4,09 |

Tabella 7.1: risultati della carbolite

Miscela 8 realizzata con 5% di bitume "Tal Quale" 50/70:

| Campione | Picnometro | M _p (g) | M _{P+M} (g) | M _{P+M+H2O} (g) | V _p (m ³) | T (°C) | ρ _w (kg/m ³) | ρ _{mw} (kg/m ³) |
|----------|------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------|--|---|
| - | - | (g) | (g) | (g) | (m ³) | (°C) | (kg/m ³) | (kg/m ³) |
| 1 | K+A | 921,8 | 1508,8 | 2643,1 | 0,0013653 | 23,0 | 997,6 | 2572 |
| 2 | J+F | 928,1 | 1611,4 | 2725,4 | 0,0013814 | 23,1 | 997,6 | 2582 |
| 3 | K+A | 921,8 | 1549,9 | 2617,0 | 0,0013653 | 23,1 | 997,6 | 2125 |
| 4 | J+F | 928,1 | 1465,1 | 2686,6 | 0,0013814 | 23,3 | 997,5 | 3424 |

| | |
|---------|------|
| Media | 2577 |
| Dev.St. | 7 |
| C.V. | 0,3 |
| MAX-min | 10,0 |

Tabella 8: risultati della prova al picnometro

| Campione | Tara [g] | Netto (prima) [g] | Netto (dopo) [g] | Bitume perso [g] | % B |
|----------|----------|----------------------|---------------------|---------------------|------|
| 1 | 2835,4 | 1176,9 | 1121,5 | 55,4 | 4,94 |
| 2 | 2842,7 | 1343,6 | 1282 | 61,6 | 4,80 |
| | | | | Media | 4,9 |

Tabella 8.1: risultati della carbolite

Miscela 9 realizzata con 6% di bitume "Tal Quale" 50/70:

| Campione | Picnometro | M _p (g) | M _{P+M} (g) | M _{P+M+H2O} (g) | V _p (m ³) | T (°C) | ρ _w (kg/m ³) | ρ _{mw} (kg/m ³) |
|----------|------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------|--|---|
| - | - | (g) | (g) | (g) | (m ³) | (°C) | (kg/m ³) | (kg/m ³) |
| 1 | K+A | 921,8 | 1650,0 | 2726,4 | 0,0013653 | 22,3 | 997,8 | 2542 |
| 2 | J+F | 928,1 | 1648,9 | 2745,1 | 0,0013814 | 22,0 | 997,8 | 2549 |
| 3 | K+A | 921,8 | 1594,0 | 2693,6 | 0,0013653 | 22,7 | 997,7 | 2555 |
| 4 | J+F | 928,1 | 1581,2 | 2702,5 | 0,0013814 | 22,7 | 997,7 | 2537 |

| | |
|---------|------|
| Media | 2545 |
| Dev.St. | 5 |
| C.V. | 0,2 |
| MAX-min | 6,9 |

Tabella 9: risultati della prova al picnometro

| Campione | Tara [g] | Netto (prima) [g] | Netto (dopo) [g] | Bitume perso [g] | % B |
|----------|----------|----------------------|---------------------|---------------------|------|
| 1 | 2834,2 | 1112,1 | 1050,6 | 61,5 | 5,85 |
| 2 | 2842,6 | 1010,4 | 953,5 | 56,9 | 5,97 |
| | | | | Media | 5,9 |

Tabella 9.1: risultati della carbolite

Allegato 2: Compattazione con Pressa a Taglio Giratoria

Si rappresentano di seguito le curve di compattazione dei provini di ogni miscela aventi il 4 ± 0.5 e il $6 \pm 0.5\%$ dei vuoti.

Miscela 1 realizzata con il 5% di bitume "Tal Quale" 70/100:

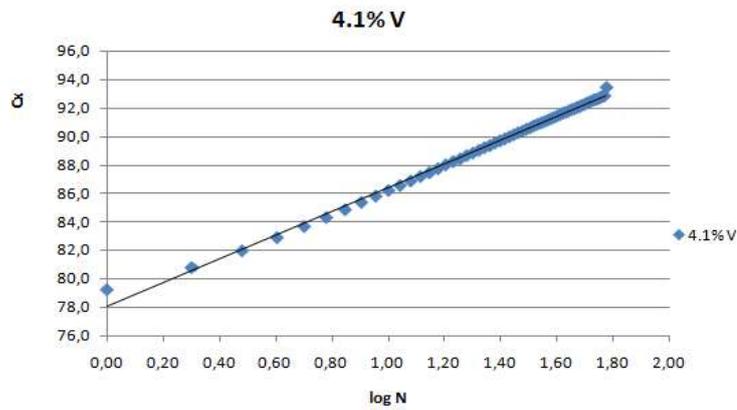


Tabella 1: curva di compattazione del provino con 4.1% V

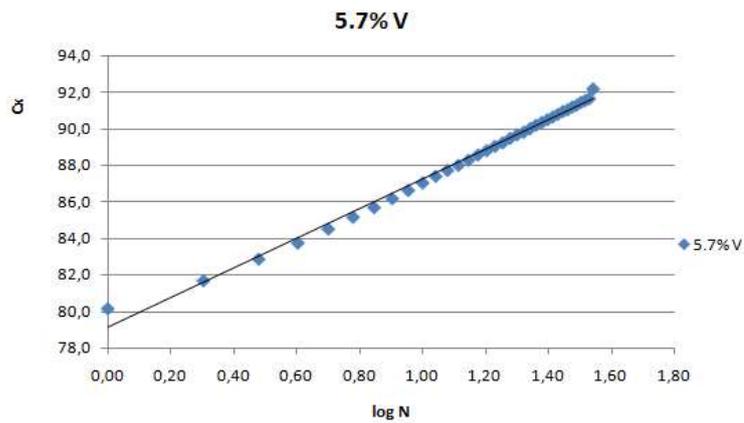


Tabella 1.1: curva di compattazione del provino con 5.7% V

Miscela 2 realizzata con il 6% di bitume "Tal Quale" 70/100:

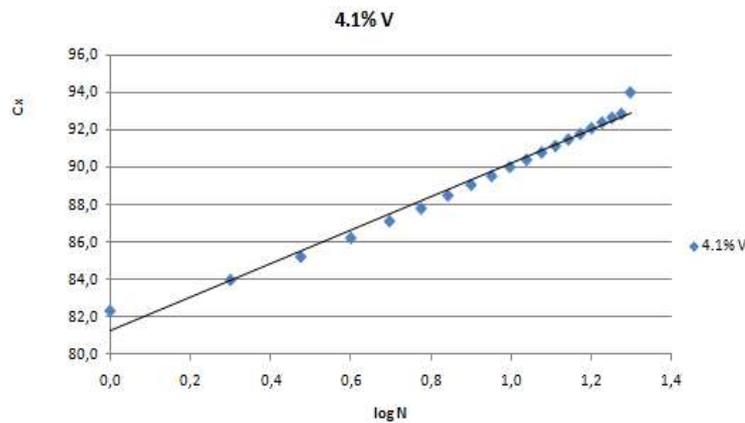


Tabella 2: curva di compattazione del provino con 4.1% V

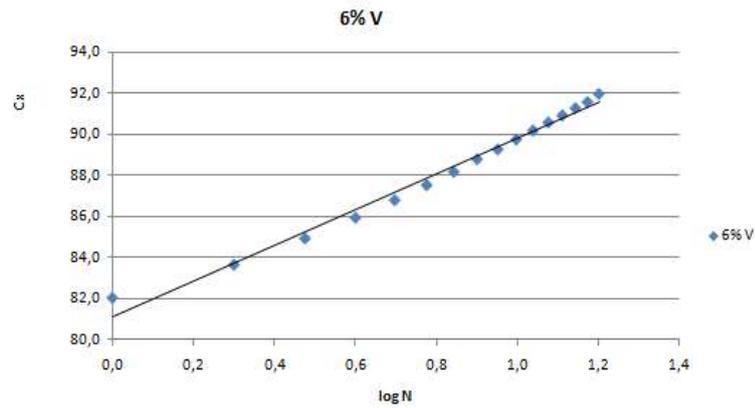


Tabella 2.1: curva di compattazione del provino con 6% V

Miscela 3 realizzata con il 4% di bitume "Tal Quale" 70/100:

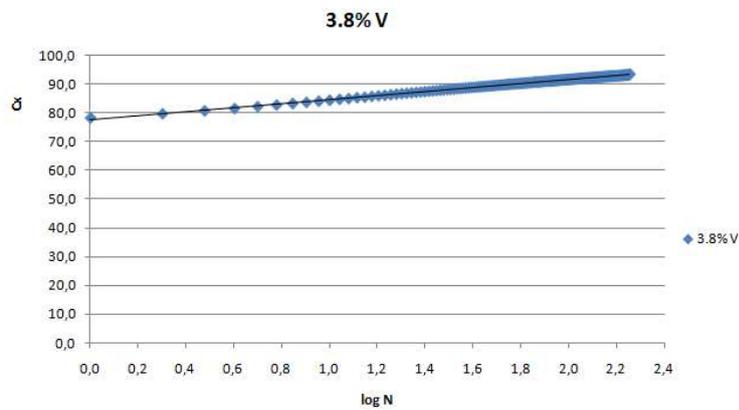


Tabella 3: curva di compattazione del provino con 3.8% V

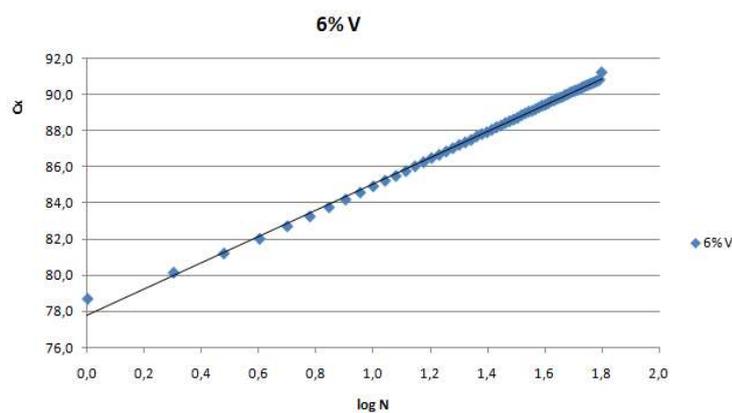


Tabella 3.1: curva di compattazione del provino con 6% V

Miscela 4 realizzata con il 4% di bitume modificato:

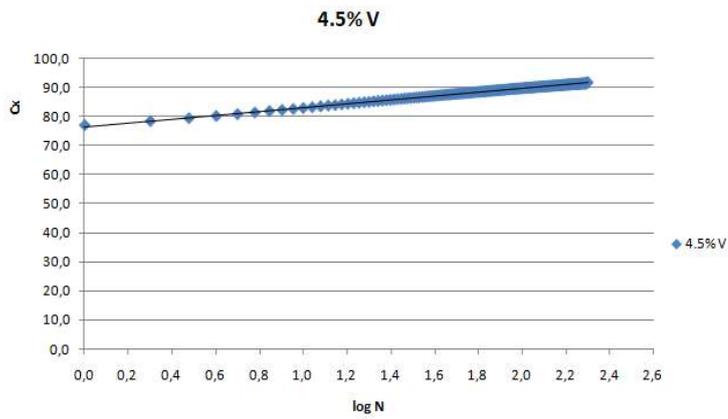


Tabella 4: curva di compattazione del provino con 4.5% V

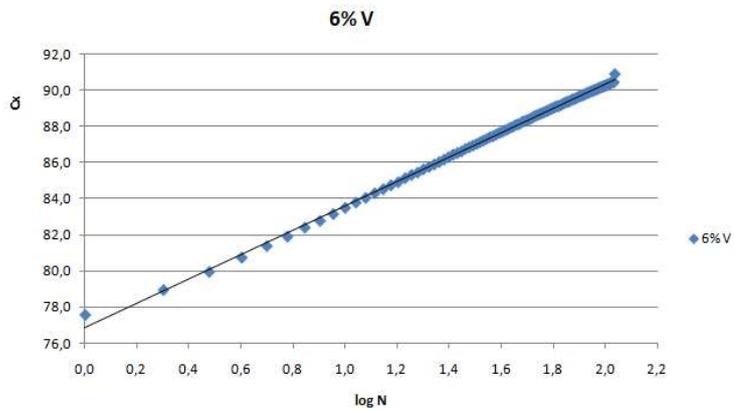


Tabella 4.1: curva di compattazione del provino con 6% V

Miscela 5 realizzata con il 5% di bitume modificato:

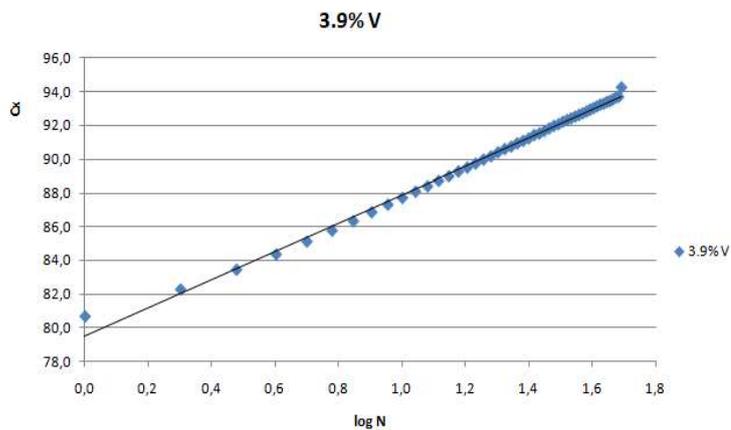


Tabella 5: curva di compattazione del provino con 3.9% V

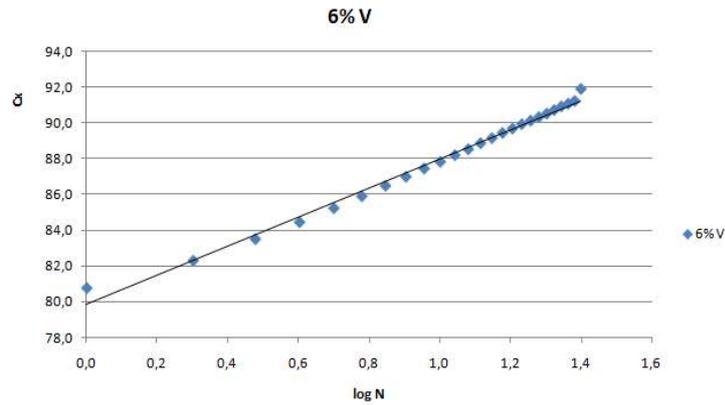


Tabella 5.1: curva di compattazione del provino con 6% V

Miscela 6 realizzata con il 6% di bitume modificato:

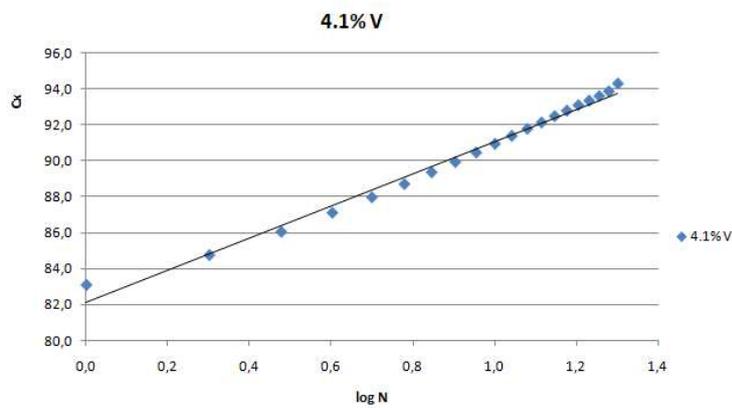


Tabella 6: curva di compattazione del provino con 4.1% V

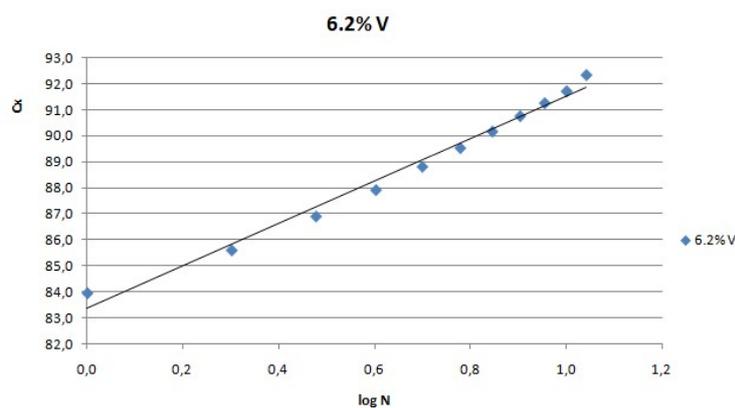


Tabella 6.1: curva di compattazione del provino con 6.2% V

Miscela 7 realizzata con il 4% di bitume "Tal Quale" 50/70:

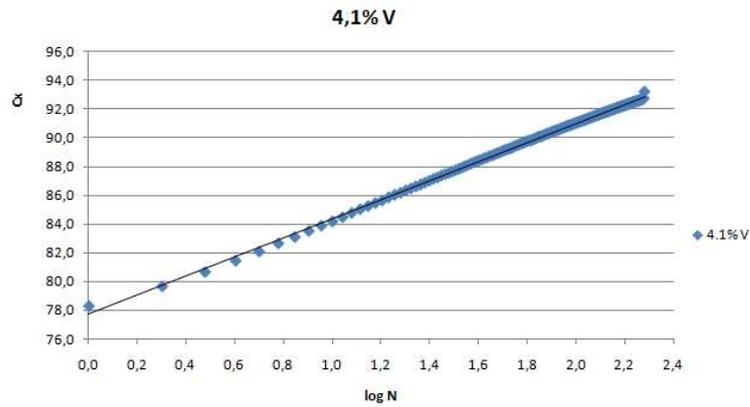


Tabella 7: curva di compattazione del provino con 4.1% V

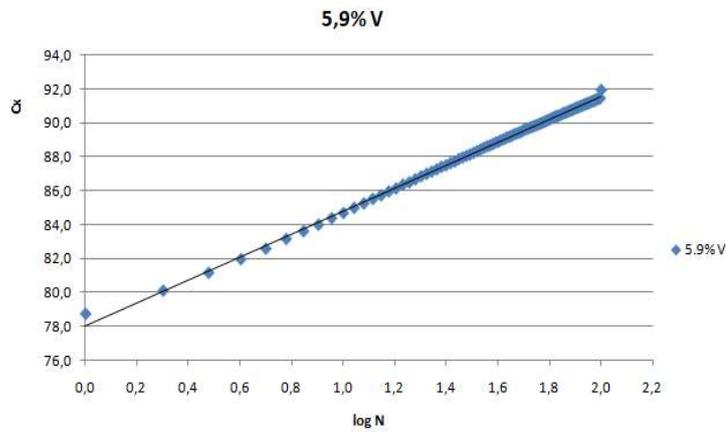


Tabella 7.1: curva di compattazione del provino con 5.9% V

Miscela 8 realizzata con il 5% di bitume "Tal Quale" 50/70:

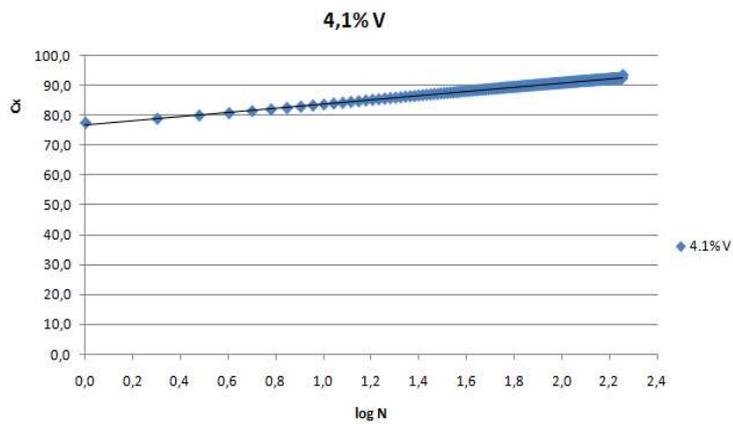


Tabella 8: curva di compattazione del provino con 4.1% V

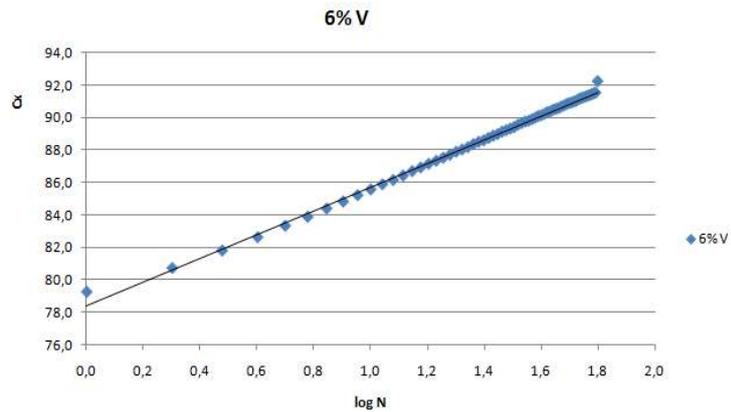


Tabella 8.1: curva di compattazione del provino con 6% V

Miscela 9 realizzata con il 6% di bitume "Tal Quale" 50/70:

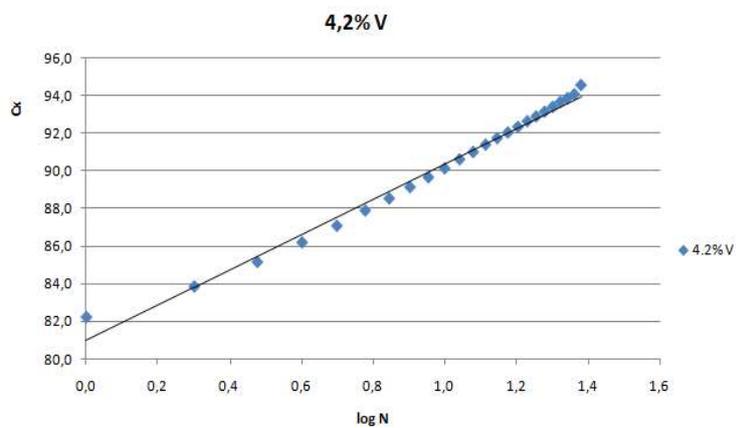


Tabella 9: curva di compattazione del provino con 4.2% V

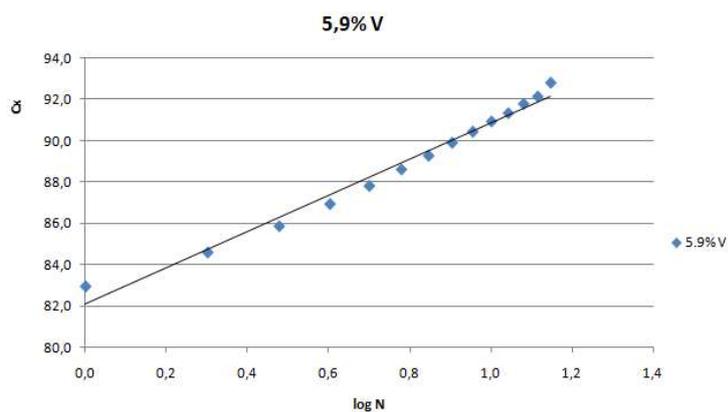


Tabella 9.1: curva di compattazione del provino con 5.9% V

Allegato 3: Flow Number

Di seguito sono riportate le curve di Flow Number dei provini testati con l'Ampt, con i valori analitici inseriti in tabella:

Per le miscele realizzate con il bitume "Tal Quale" 70/100 i valori di FN ottenuti sono:

| N° campioni | %B | %V | CCR | FN |
|-------------|-----|-----|----------|-----|
| 1 | 4,1 | 4,6 | 2,48E-03 | 115 |
| 2 | 4,1 | 4,3 | 2,48E-03 | 182 |
| 3 | 4,1 | 3,8 | 2,48E-03 | 255 |
| 4 | 4,1 | 6,0 | 2,48E-03 | 57 |
| 5 | 4,1 | 6,0 | 2,48E-03 | 89 |
| 3 | 5,1 | 3,4 | 2,48E-03 | 153 |
| 4 | 5,1 | 5,8 | 2,48E-03 | 69 |
| 6 | 5,1 | 5,4 | 2,48E-03 | 90 |
| 7 | 5,1 | 6,4 | 2,48E-03 | 50 |
| 1 | 6,3 | 4,3 | 2,48E-03 | 54 |
| 2 | 6,3 | 4,1 | 2,48E-03 | 64 |
| 5 | 6,3 | 5,8 | 2,48E-03 | 41 |
| 6 | 6,3 | 6,0 | 2,48E-03 | 28 |

Miscela 1 realizzata con il 5% di bitume "Tal Quale" 70/100:

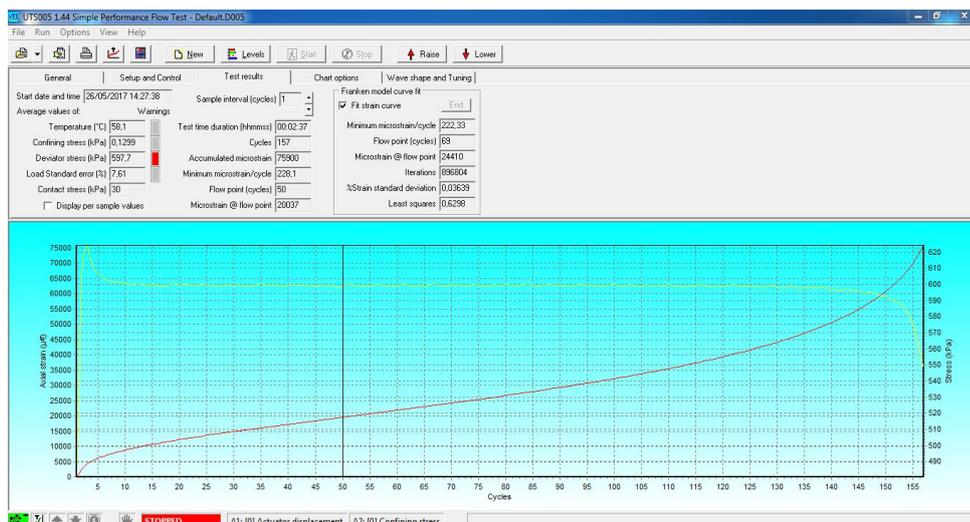


Figura 1: curva di Flow Number del campione 4

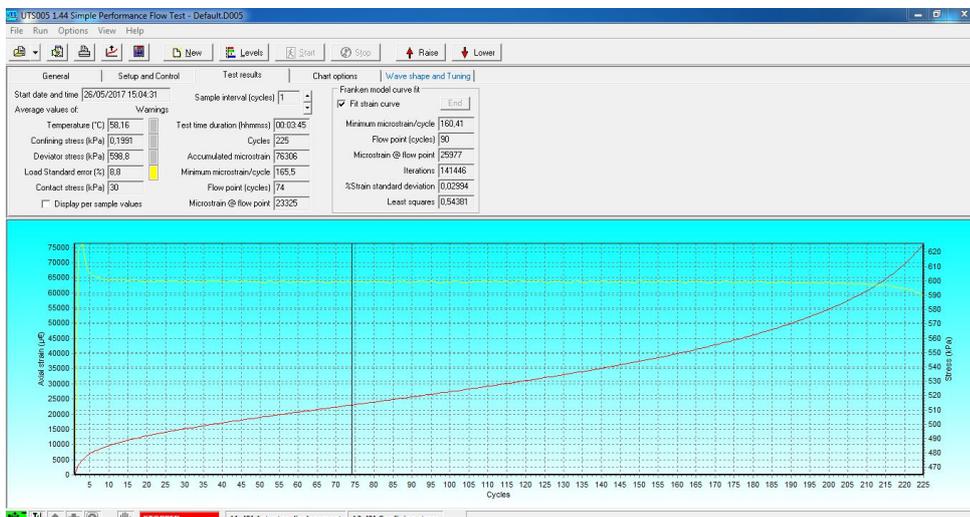


Figura 1.1: curva di Flow Number del campione 6

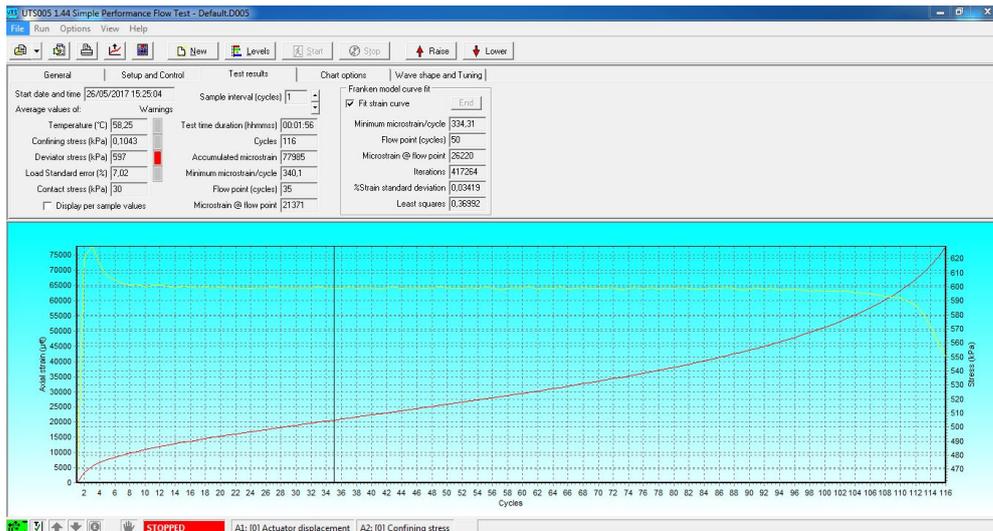


Figura 1.2: curva di Flow Number del campione 7

Miscela 2 realizzata con il 6% di bitume "Tal Quale" 70/100:

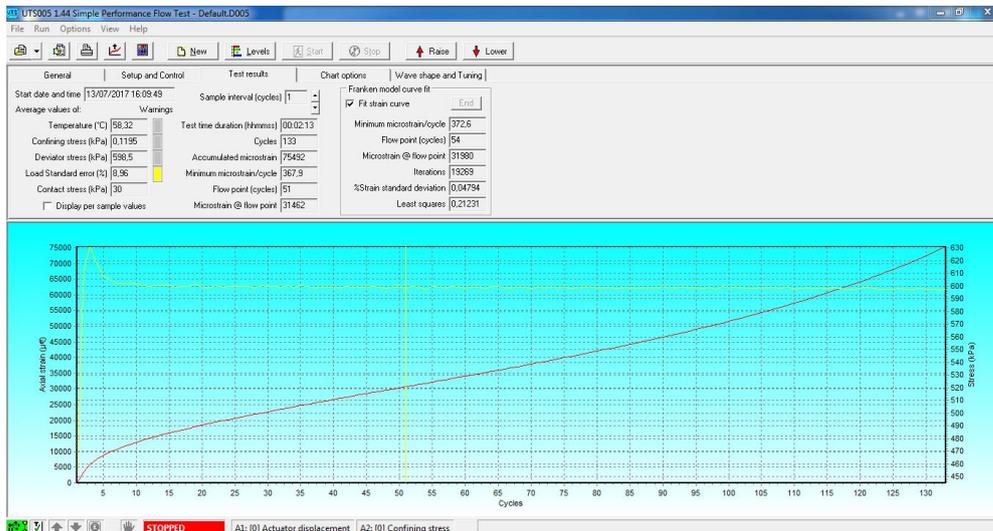


Figura 2: curva di Flow Number del campione 1

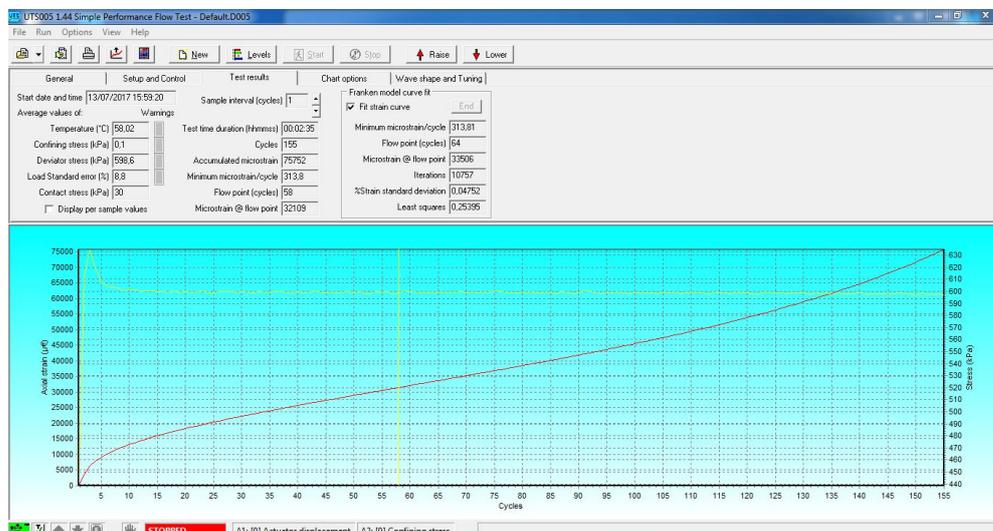


Figura 2.1: curva di Flow Number del campione 2

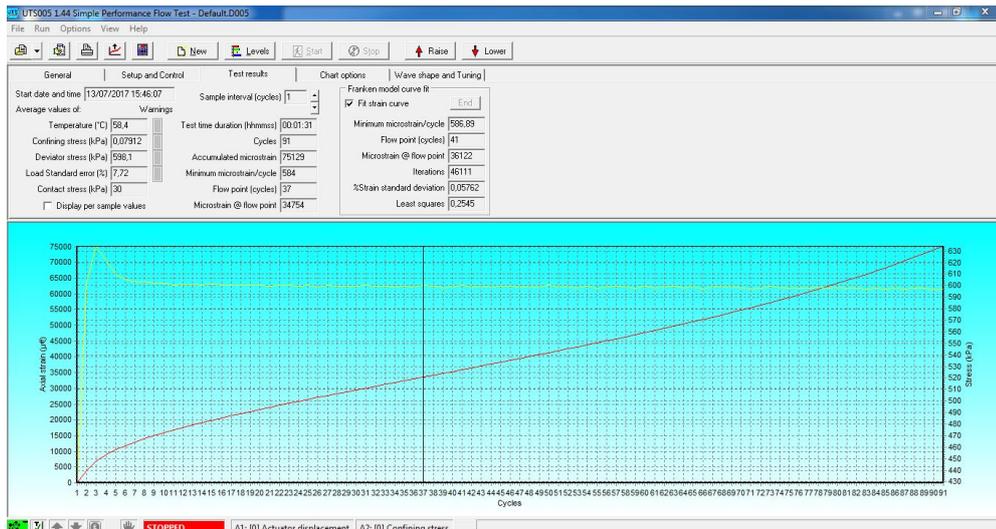


Figura 2.2: curva di Flow Number del campione 5

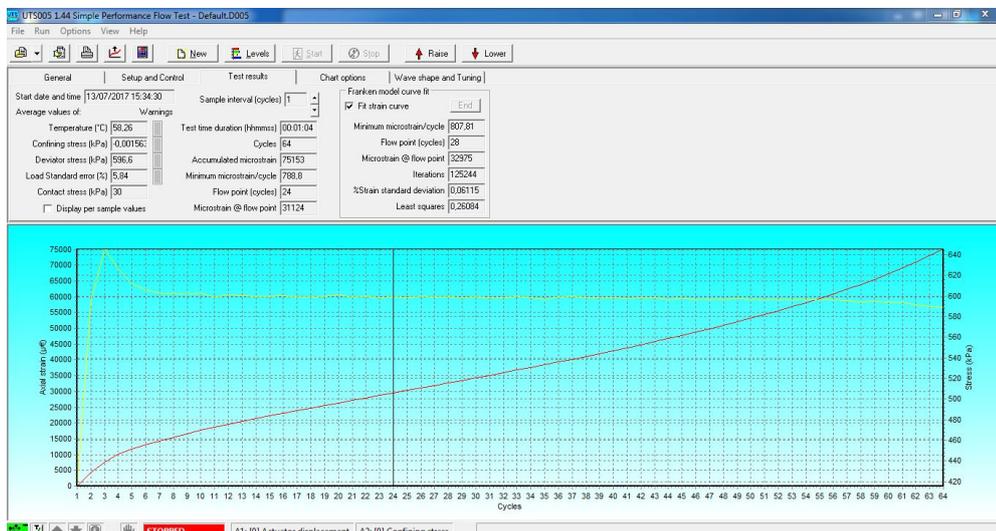


Figura 2.3: curva di Flow Number del campione 6

Miscela 3 realizzata con il 4% di bitume "Tal Quale" 70/100:

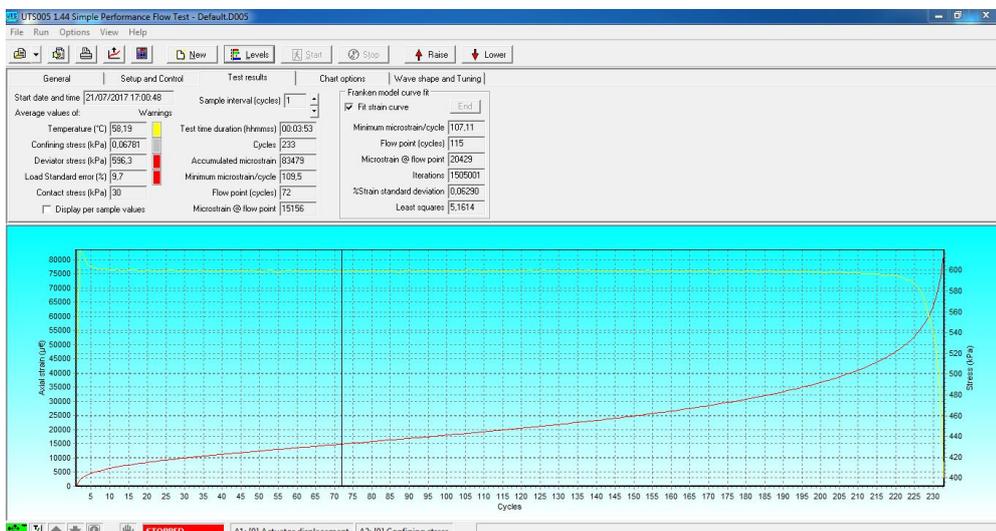


Figura 3: curva di Flow Number del campione 1

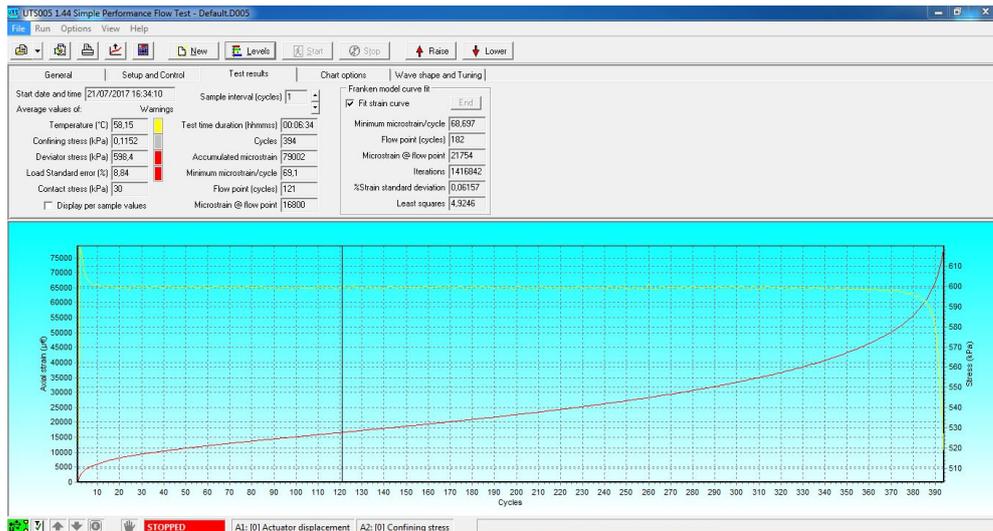


Figura 3.1: curva di Flow Number del campione 2

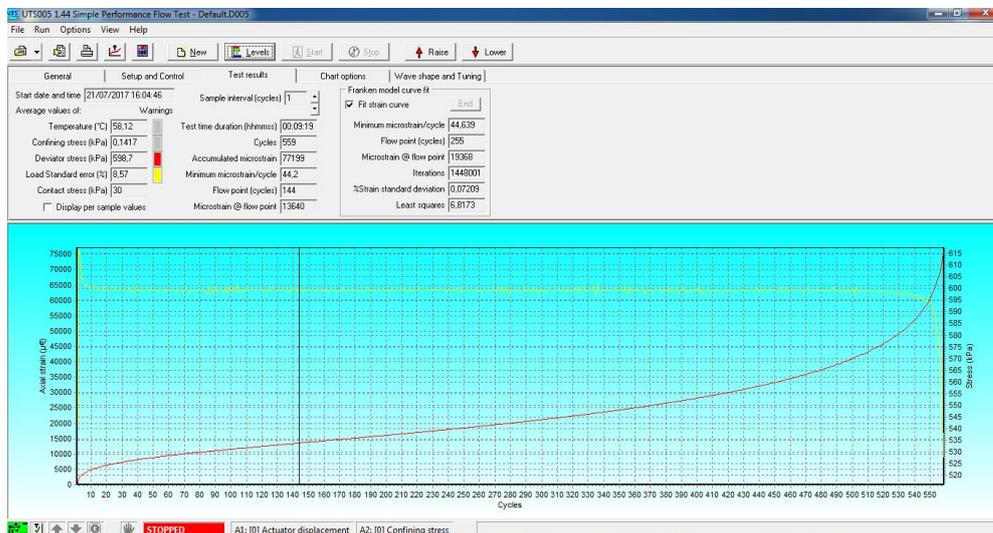


Figura 3.2: curva di Flow Number del campione 3

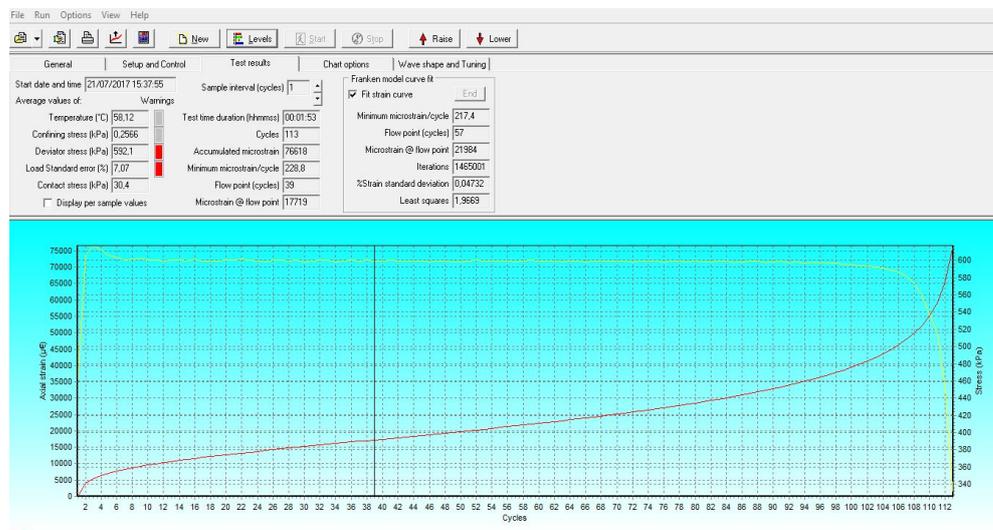


Figura 3.3: curva di Flow Number del campione 4

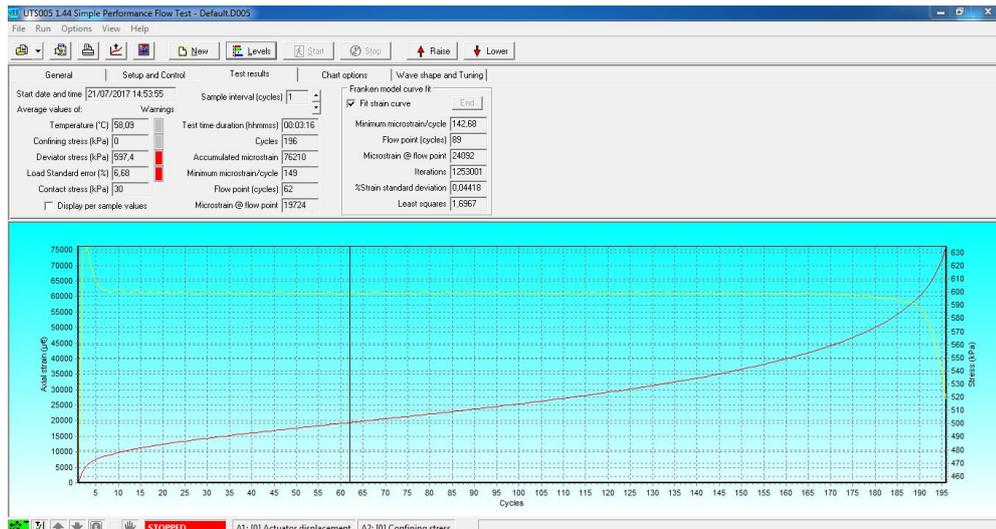


Figura 3.4: curva di Flow Number del campione 5

Per le miscele realizzate con il bitume modificato, i valori di FN ottenuti sono:

| N° campioni | %B | %V | CCR | FN |
|-------------|-----|-----|----------|------|
| 1 | 4,0 | 4,5 | 2,86E-05 | 3813 |
| 2 | 4,0 | 6,0 | 2,86E-05 | 1346 |
| 3 | 4,0 | 4,5 | 2,86E-05 | 4200 |
| 7 | 4,0 | 6,2 | 2,86E-05 | 1136 |
| 1 | 5,0 | 4,2 | 2,86E-05 | 585 |
| 2 | 5,0 | 6,0 | 2,86E-05 | 321 |
| 3 | 5,0 | 3,9 | 2,86E-05 | 984 |
| 4 | 5,0 | 6,1 | 2,86E-05 | 315 |
| 1 | 5,8 | 3,7 | 2,86E-05 | 313 |
| 2 | 5,8 | 6,2 | 2,86E-05 | 168 |
| 3 | 5,8 | 3,8 | 2,86E-05 | 396 |
| 4 | 5,8 | 6,4 | 2,86E-05 | 156 |
| 5 | 5,8 | 4,1 | 2,86E-05 | 289 |
| 6 | 5,8 | 5,8 | 2,86E-05 | 198 |

Miscela 4 realizzata con il 4% di bitume modificato:

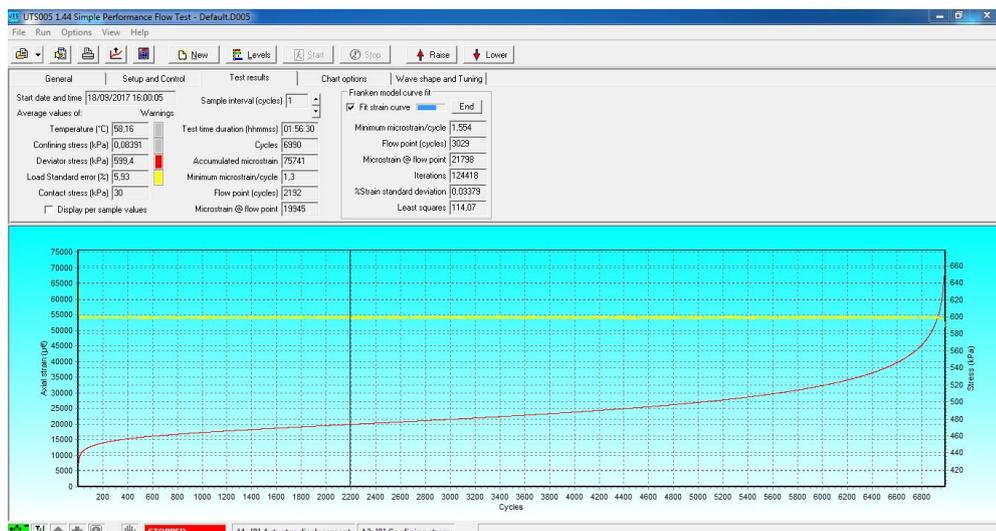


Figura 4: curva di Flow Number del campione 1

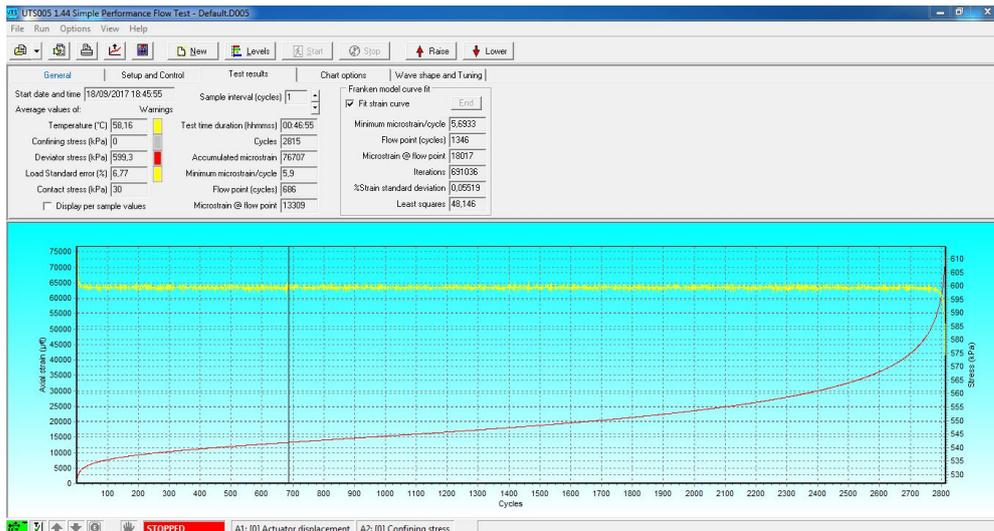


Figura 4.1: curva di Flow Number del campione 2

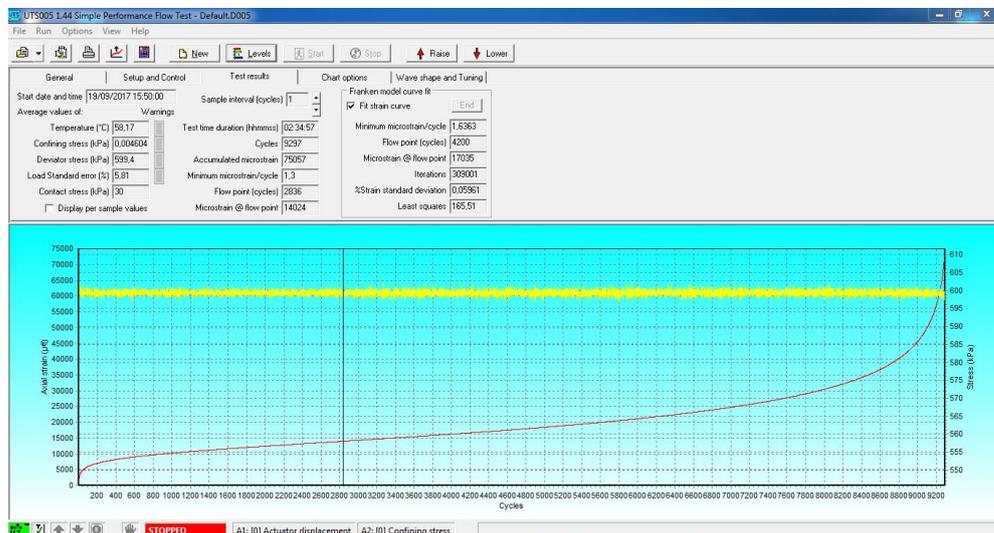


Figura 4.2: curva di Flow Number del campione 3

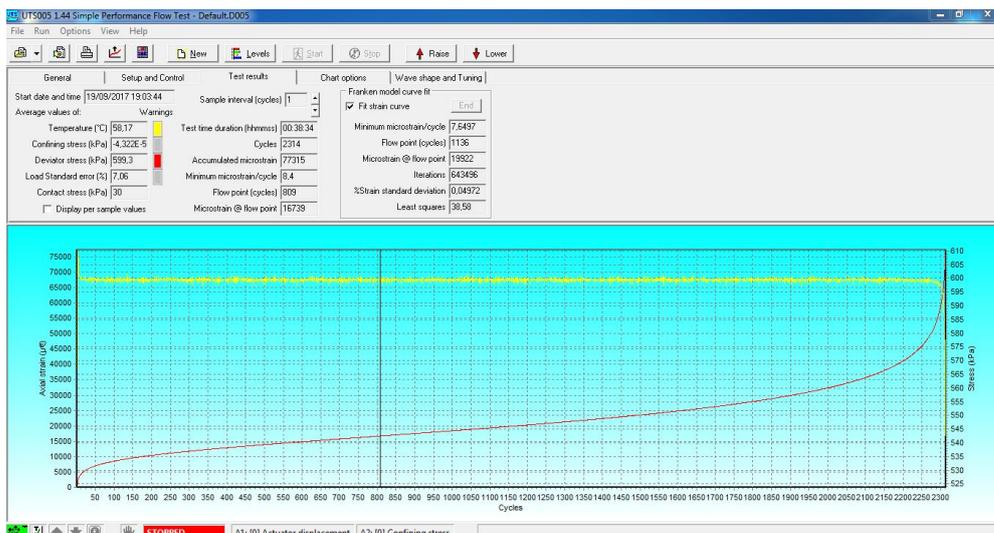


Figura 4.3: curva di Flow Number del campione 7

Miscela 5 realizzata con il 5% di bitume modificato:

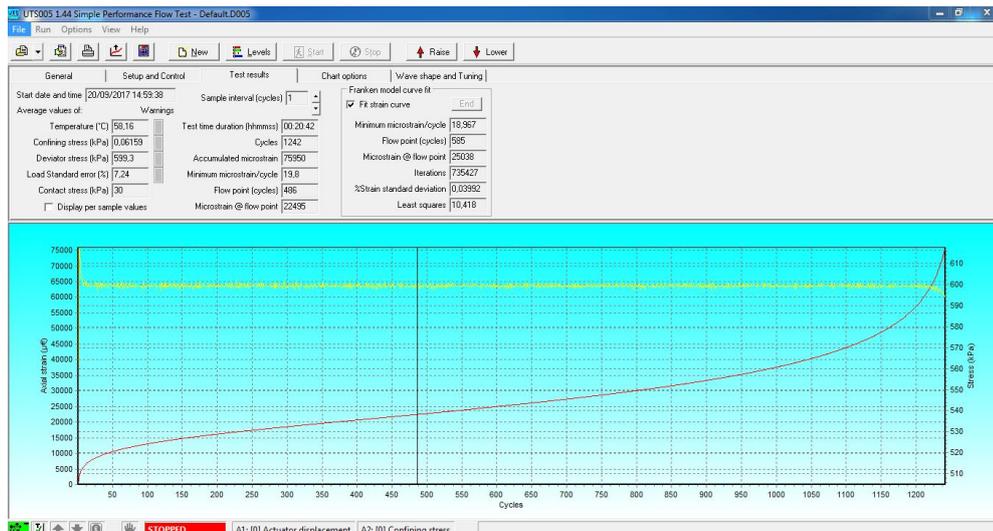


Figura 5: curva di Flow Number del campione 1

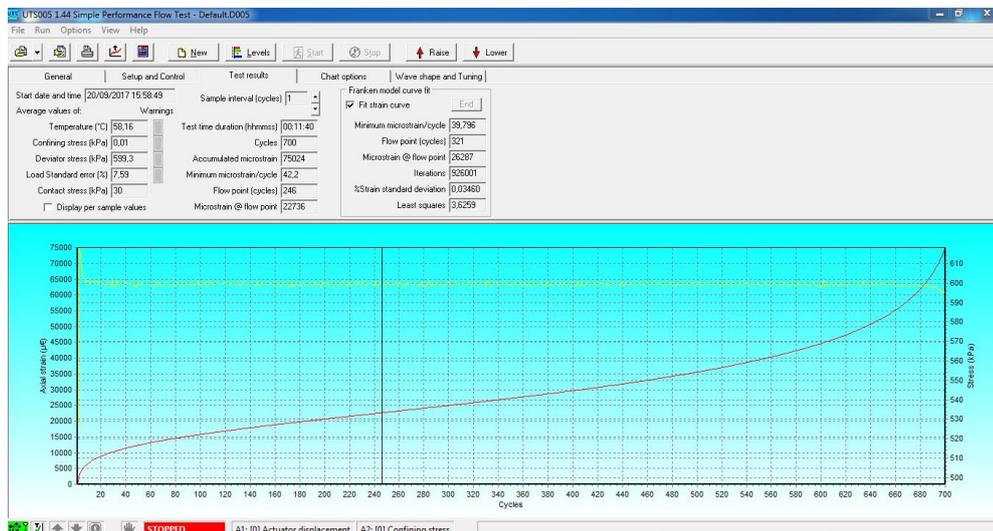


Figura 5.1: curva di Flow Number del campione 2

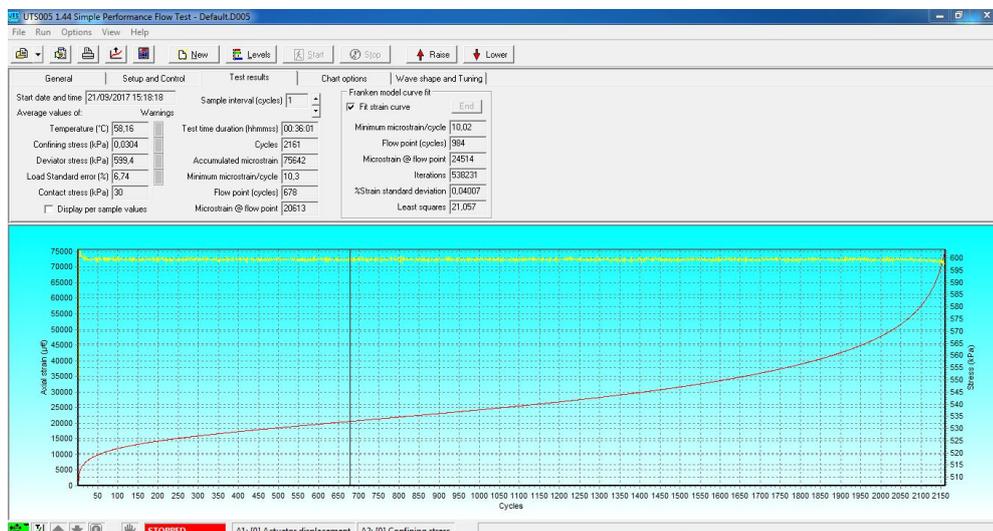


Figura 5.2: curva di Flow Number del campione 3

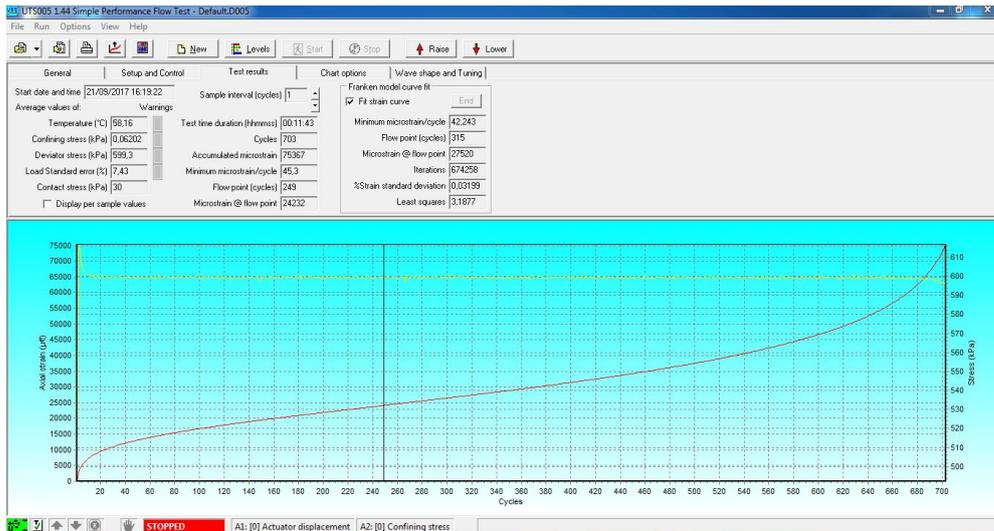


Figura 5.3: curva di Flow Number del campione 4

Miscela 6 realizzata con il 6% di bitume modificato:

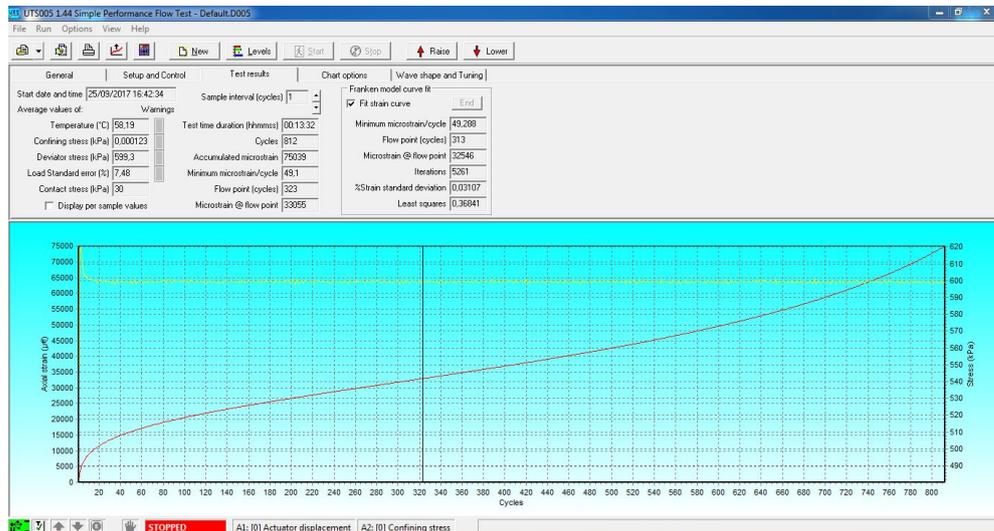


Figura 6: curva di Flow Number del campione 1

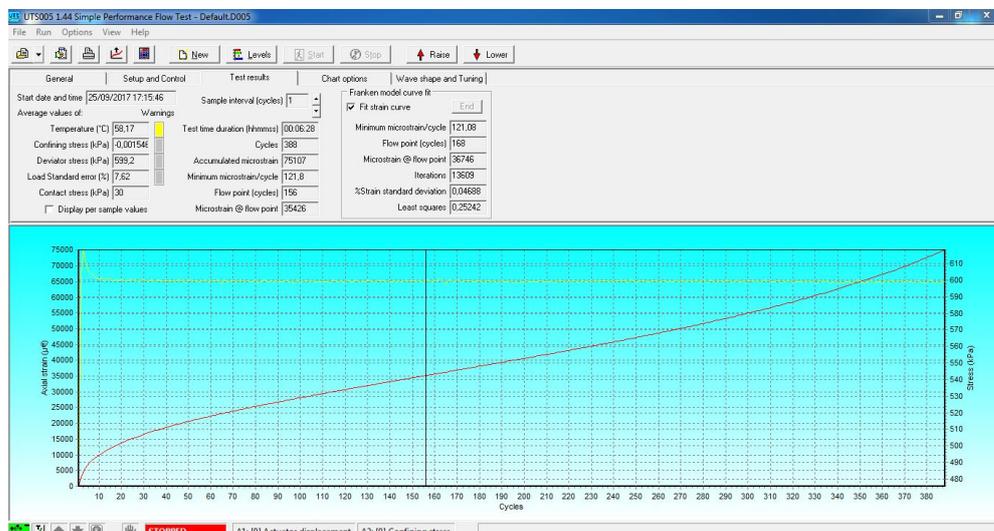


Figura 6.1: curva di Flow Number del campione 2

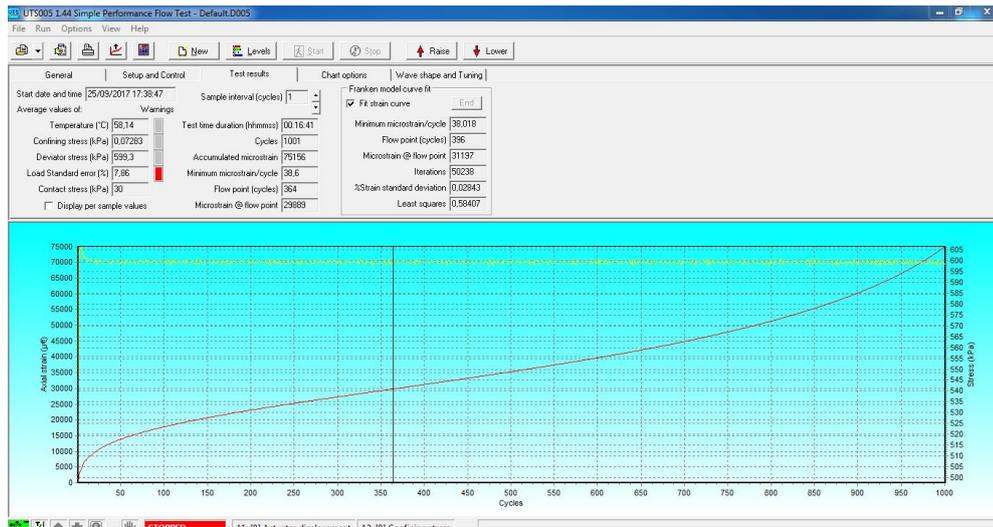


Figura 6.2: curva di Flow Number del campione

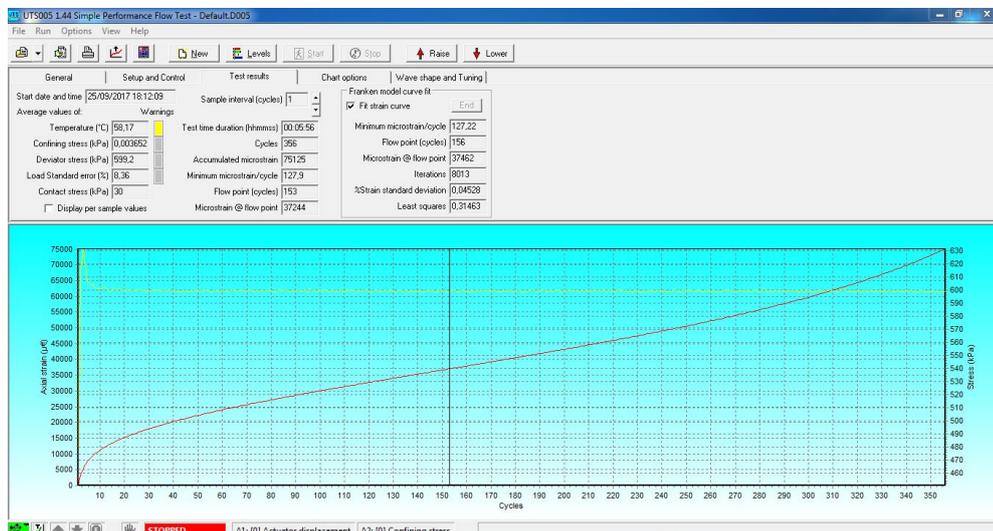


Figura 6.3: curva di Flow Number del campione 4

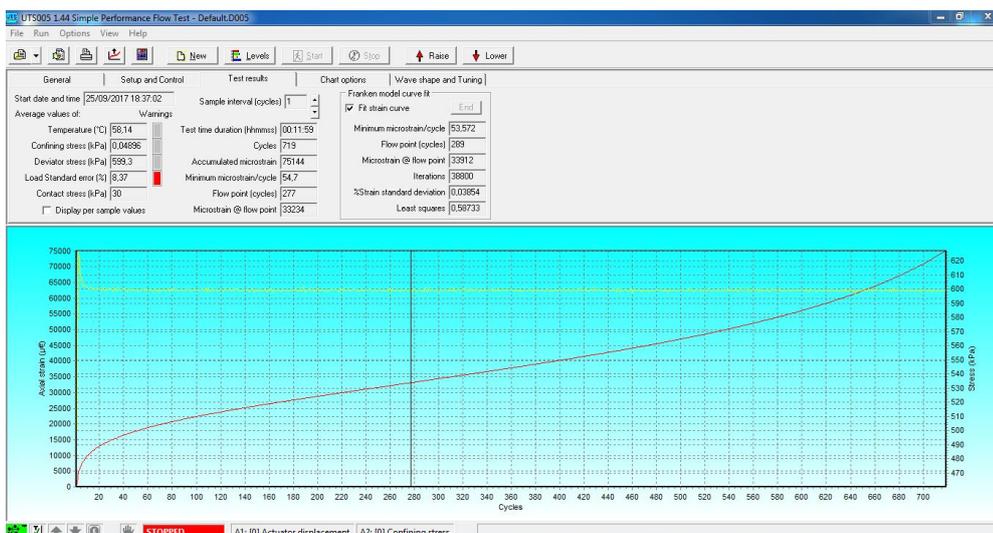


Figura 6.4: curva di Flow Number del campione 5

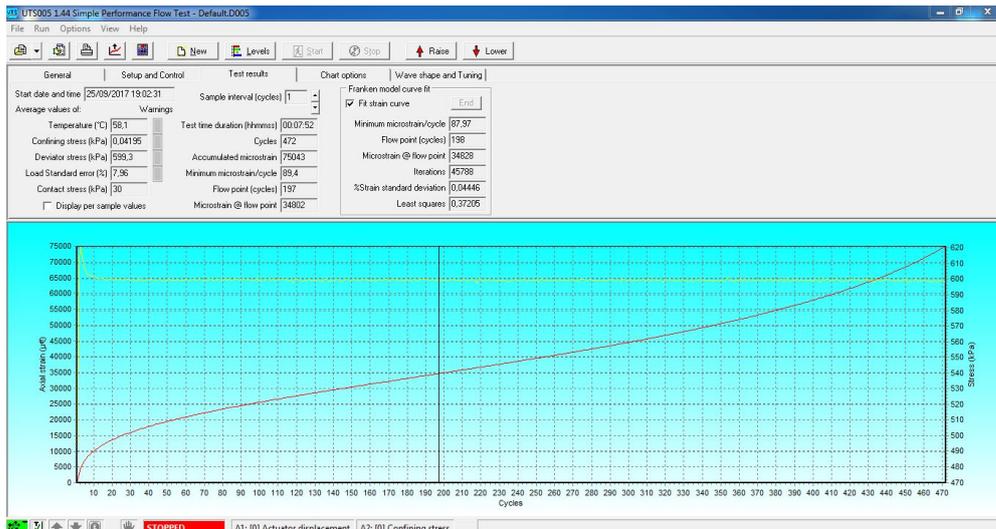


Figura 6.5: curva di Flow Number del campione 5

Per le miscele realizzate con il bitume “Tal Quale” 50/70, i valori di FN ottenuti sono:

| N° campioni | %B | %V | CCR | FN |
|-------------|-----|-----|----------|------|
| 1 | 4,1 | 4,1 | 6,13E-04 | 1554 |
| 2 | 4,1 | 6,9 | 6,13E-04 | 187 |
| 3 | 4,1 | 4,7 | 6,13E-04 | 961 |
| 7 | 4,1 | 5,9 | 6,13E-04 | 557 |
| 1 | 4,9 | 4,1 | 6,13E-04 | 405 |
| 2 | 4,9 | 6,6 | 6,13E-04 | 222 |
| 3 | 4,9 | 4,1 | 6,13E-04 | 384 |
| 4 | 4,9 | 6,0 | 6,13E-04 | 272 |
| 1 | 5,9 | 4,3 | 6,13E-04 | 232 |
| 2 | 5,9 | 6,3 | 6,13E-04 | 134 |
| 3 | 5,9 | 4,4 | 6,13E-04 | 249 |
| 4 | 5,9 | 5,6 | 6,13E-04 | 186 |
| 5 | 5,9 | 3,8 | 6,13E-04 | 265 |
| 6 | 5,9 | 4,2 | 6,13E-04 | 246 |
| 7 | 5,9 | 5,9 | 6,13E-04 | 171 |

Miscela 7 realizzata con il 4% di bitume “Tal Quale” 50/70:

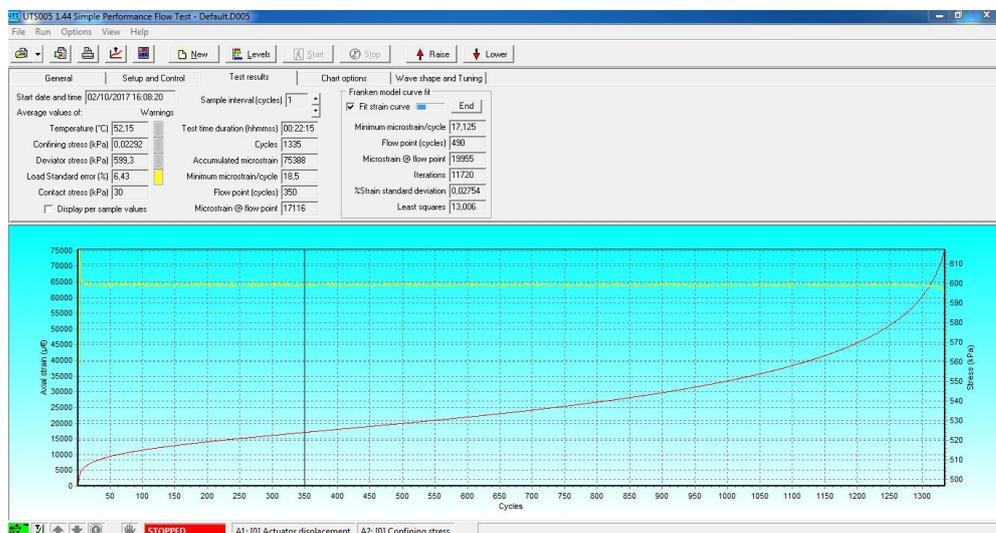


Figura 7: curva di Flow Number del campione 1

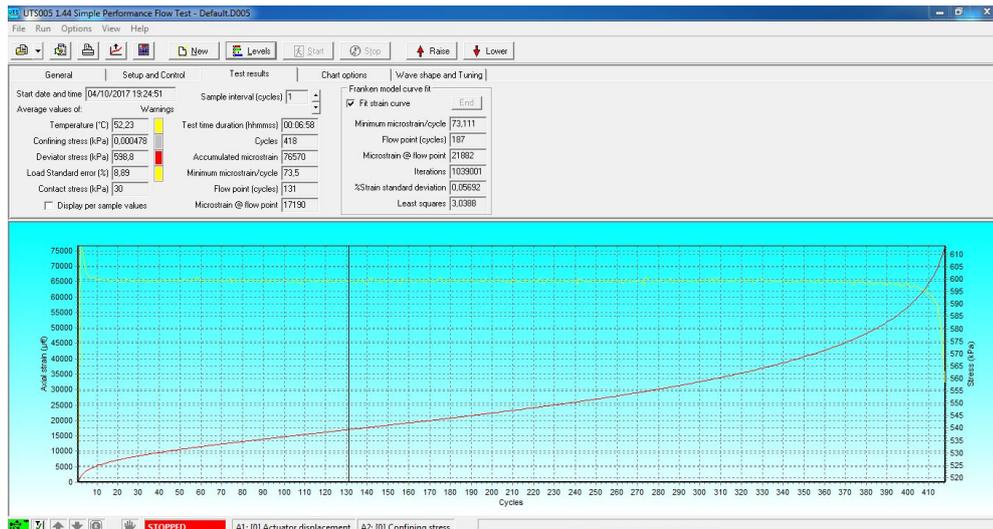


Figura 7.1: curva di Flow Number del campione 2

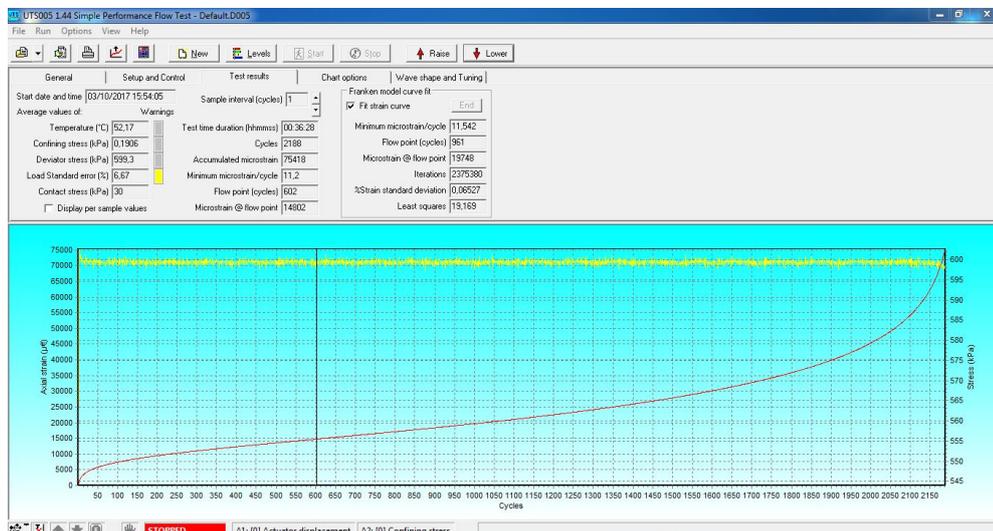


Figura 7.2: curva di Flow Number del campione 3

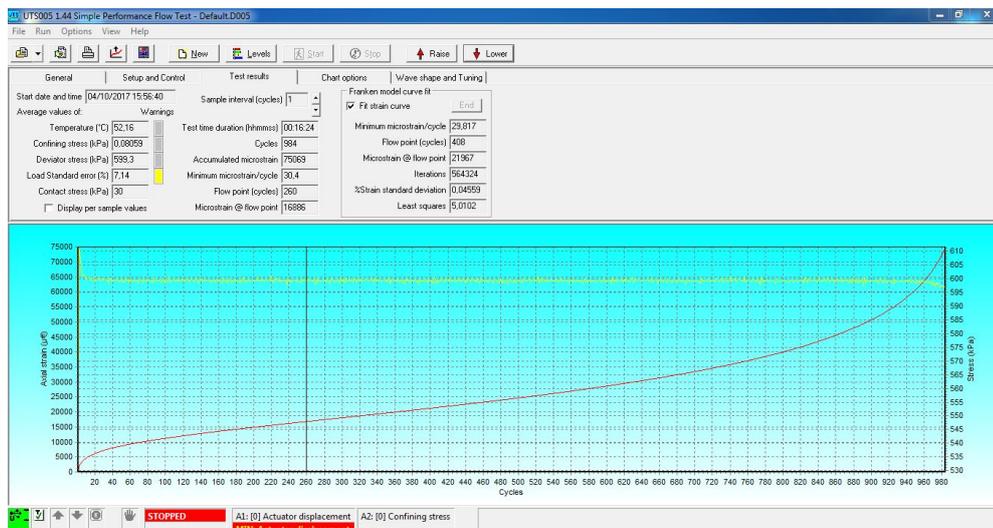


Figura 7.3: curva di Flow Number del campione 4

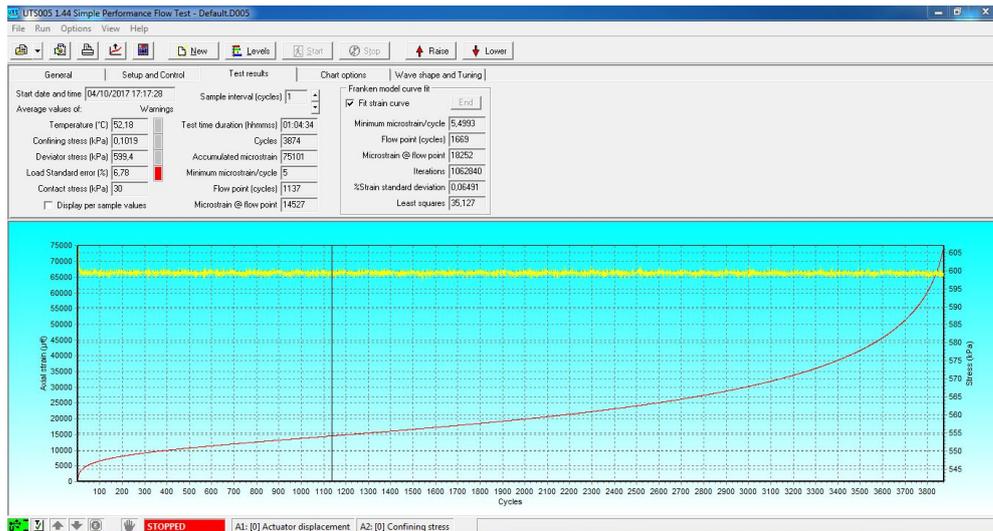


Figura 7.4: curva di Flow Number del campione 5

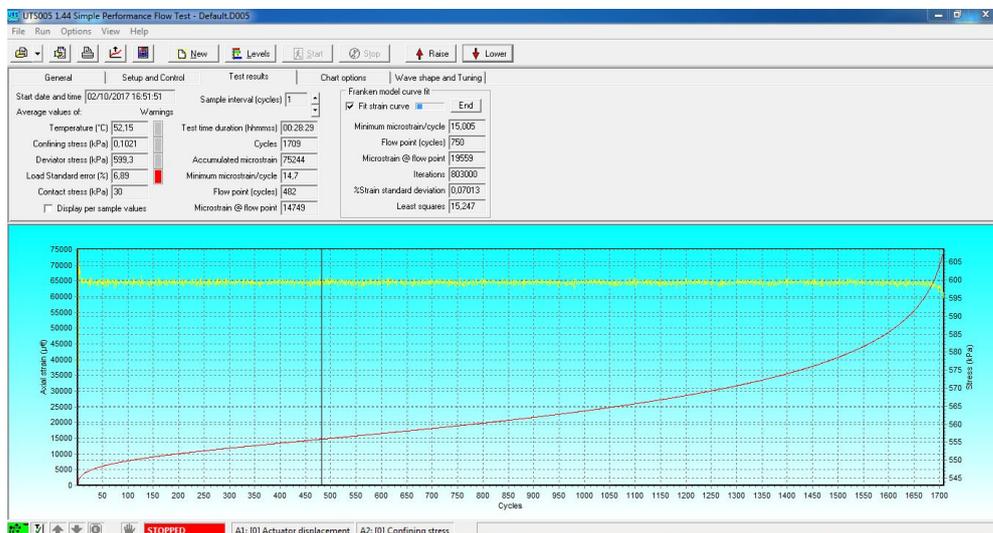


Figura 7.5: curva di Flow Number del campione 6

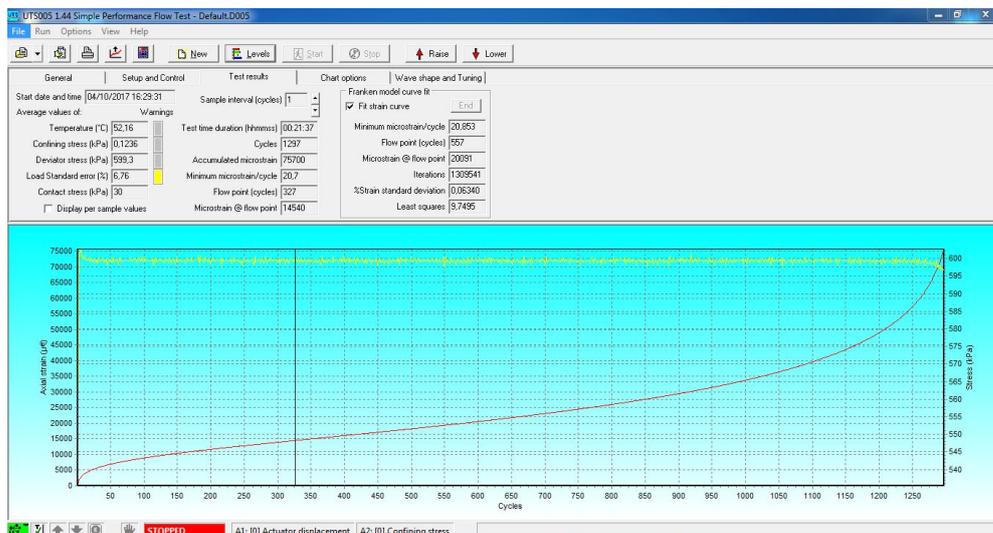


Figura 7.6: curva di Flow Number del campione 7

Miscela 8 realizzata con il 5% di bitume "Tal Quale" 50/70:

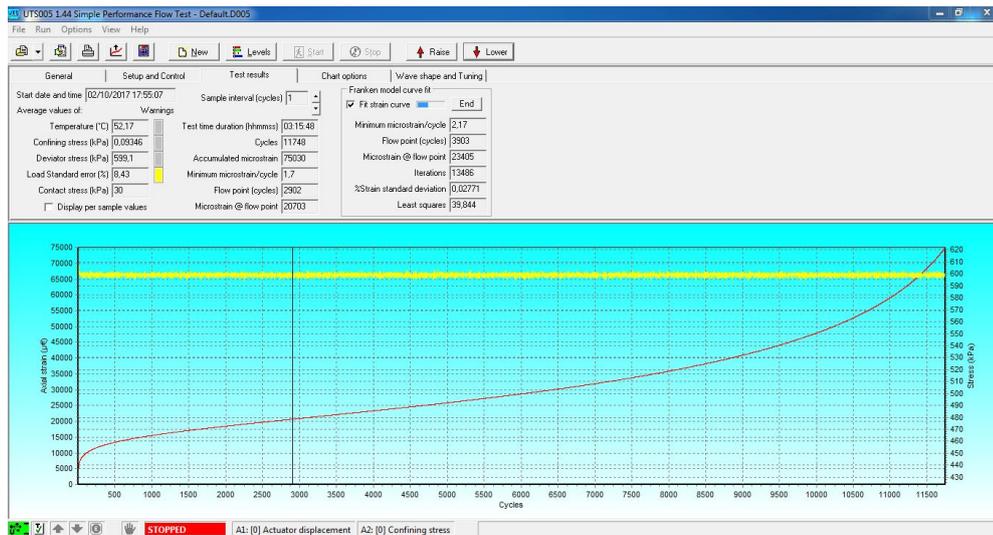


Figura 8: curva di Flow Number del campione 1

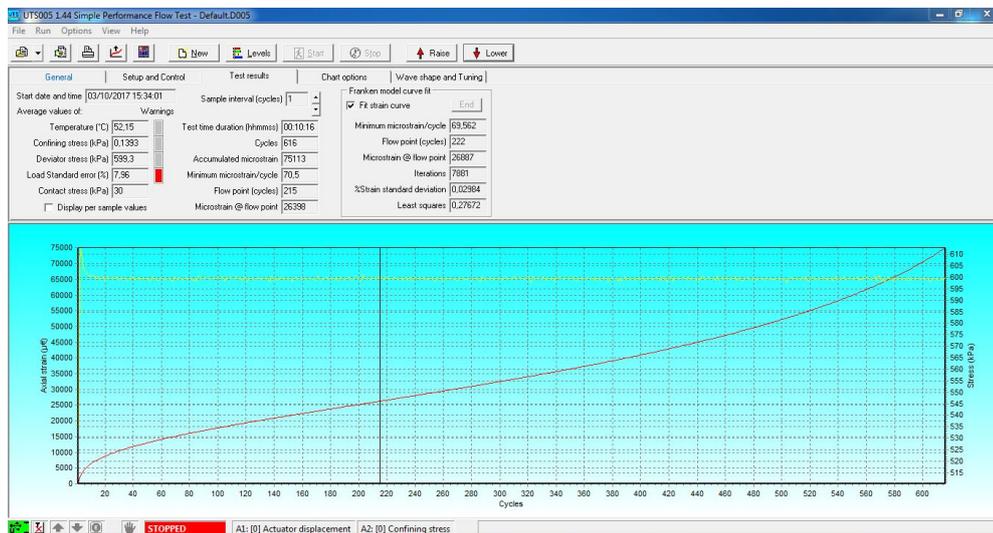


Figura 8.1: curva di Flow Number del campione 2

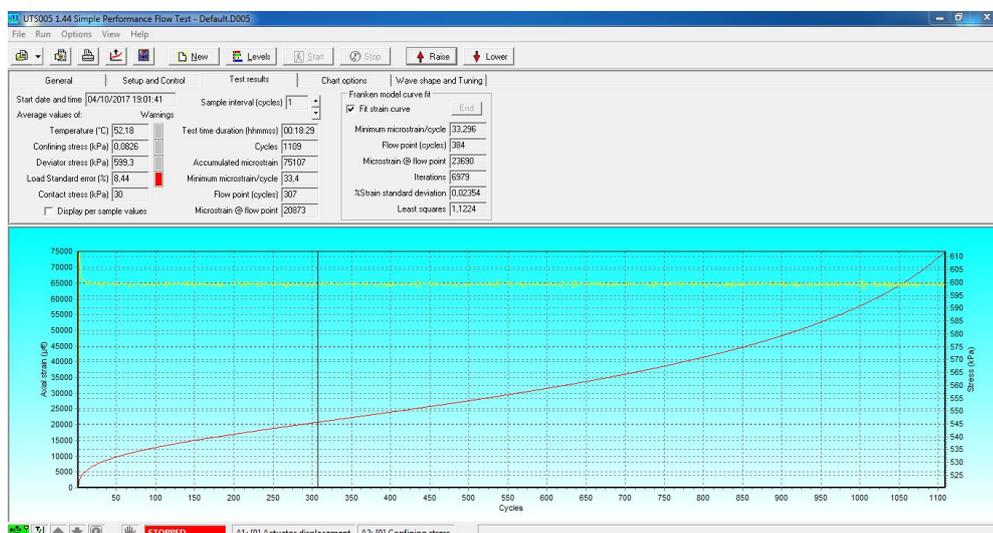


Figura 8.2: curva di Flow Number del campione 3

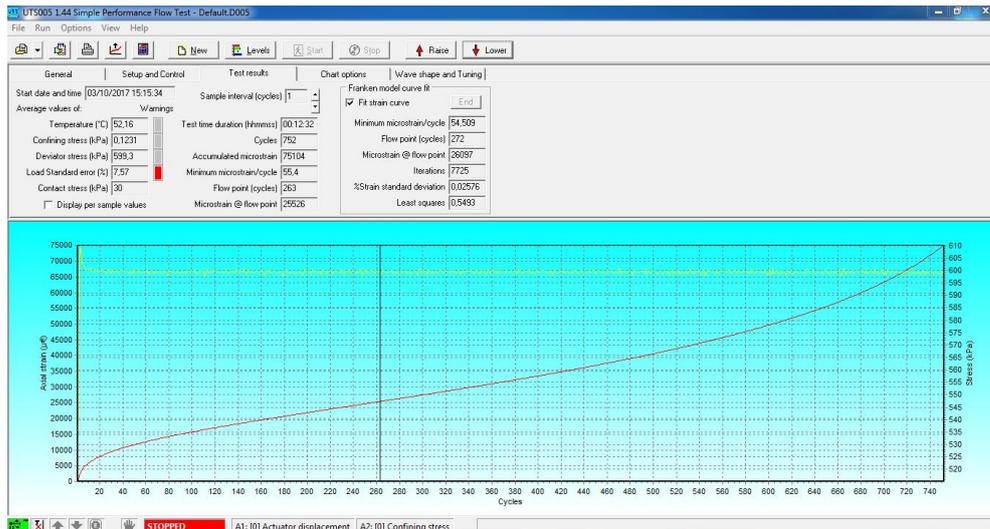


Figura 8.3: curva di Flow Number del campione 4

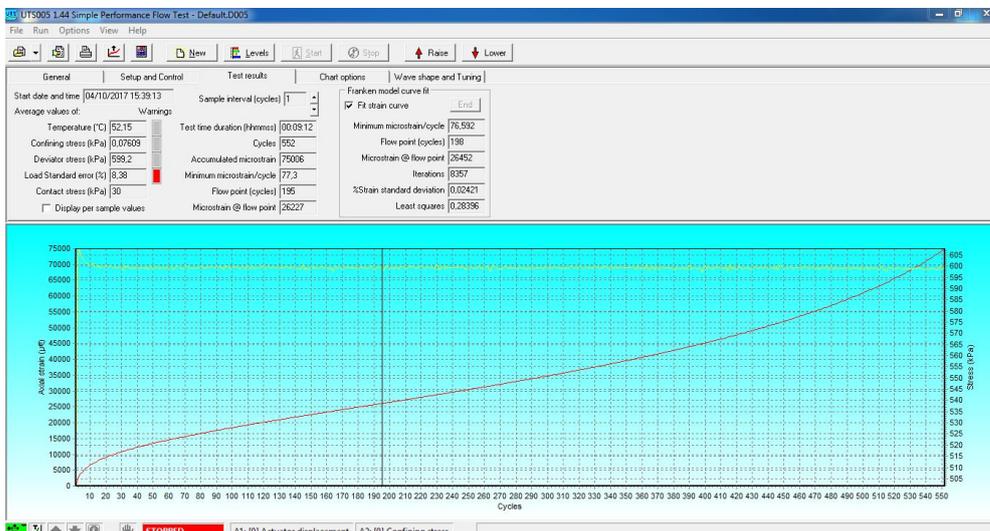


Figura 8.4: curva di Flow Number del campione 5

Miscela 9 realizzata con il 6% di bitume "Tal Quale" 50/70:

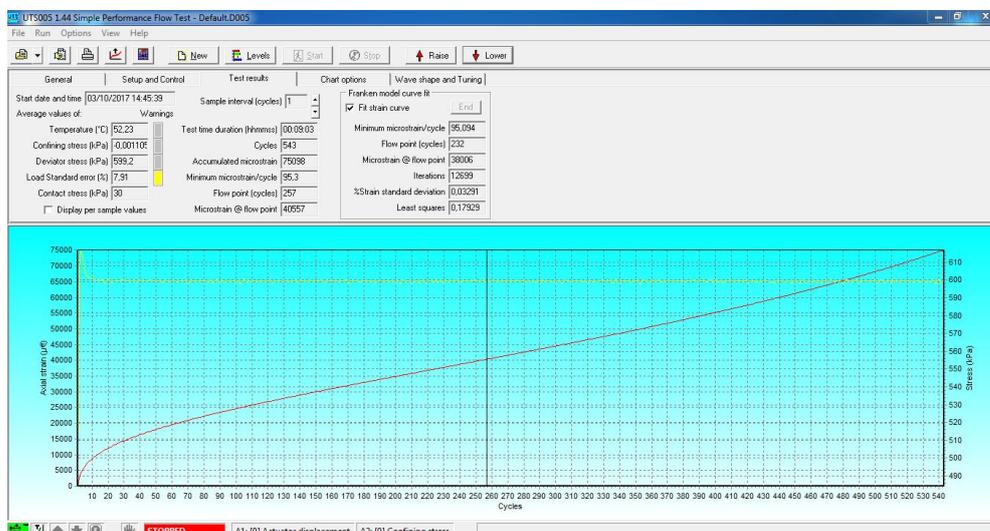


Figura 9: curva di Flow Number del campione 1

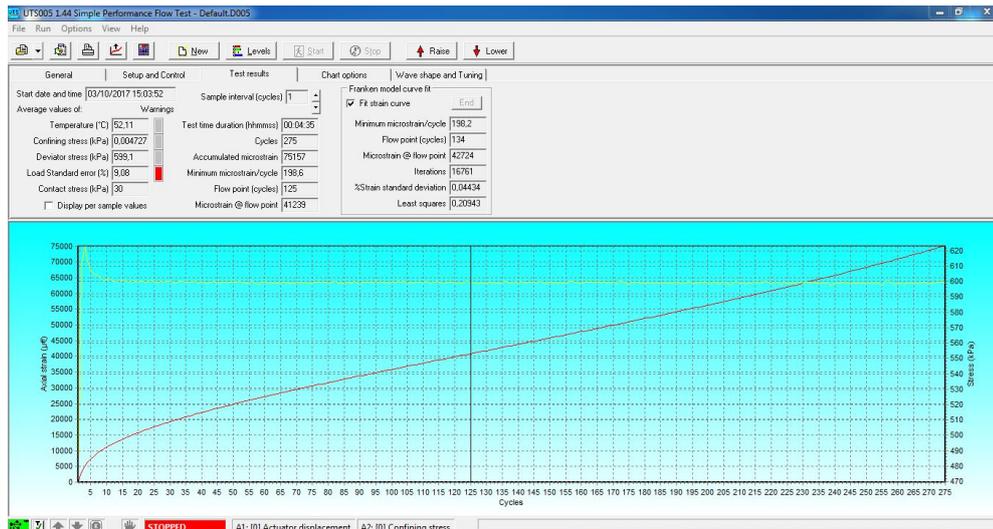


Figura 9.1: curva di Flow Number del campione 2

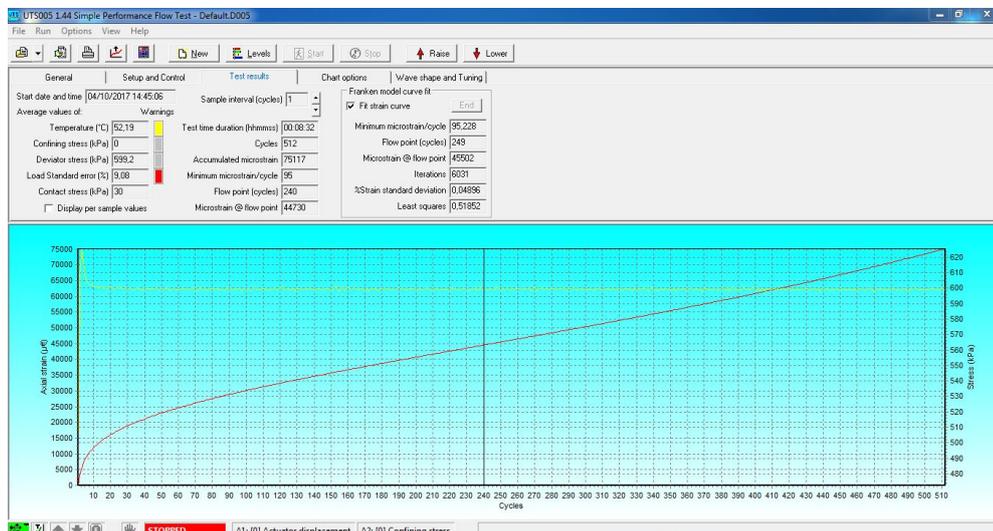


Figura 9.2: curva di Flow Number del campione 3

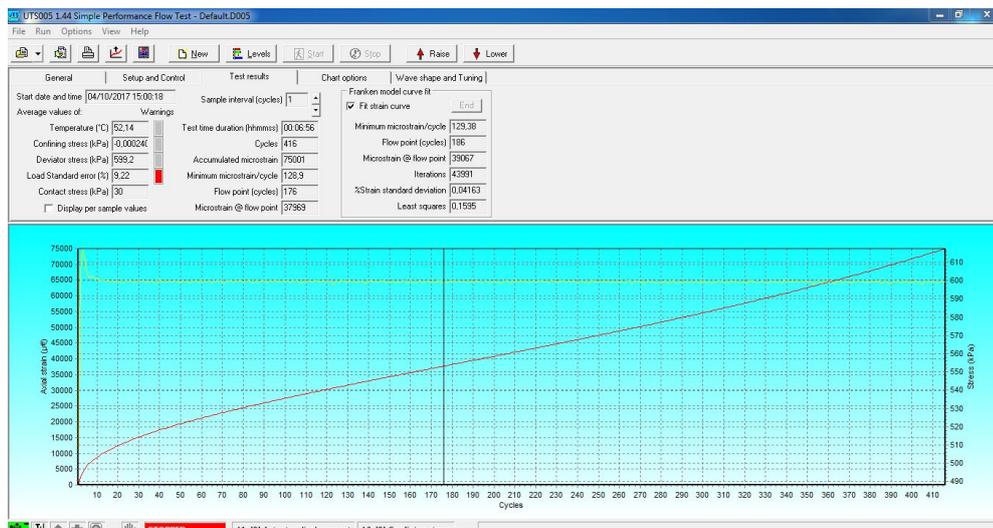


Figura 9.3: curva di Flow Number del campione 4

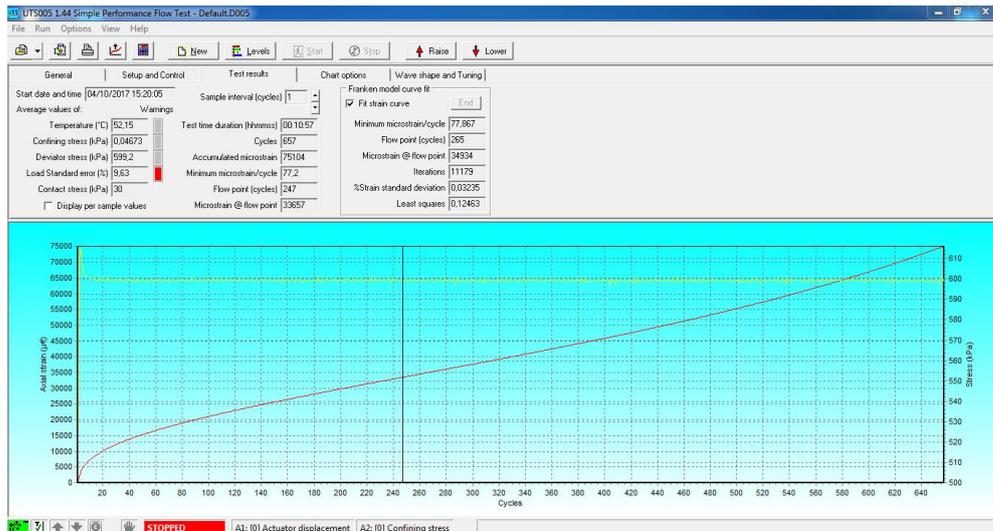


Figura 9.4: curva di Flow Number del campione 5

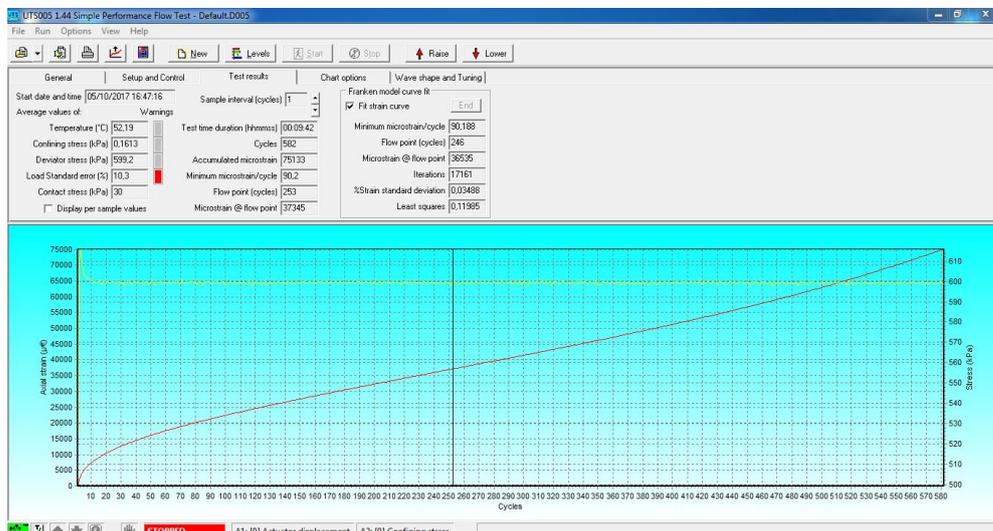


Figura 9.5: curva di Flow Number del campione 6

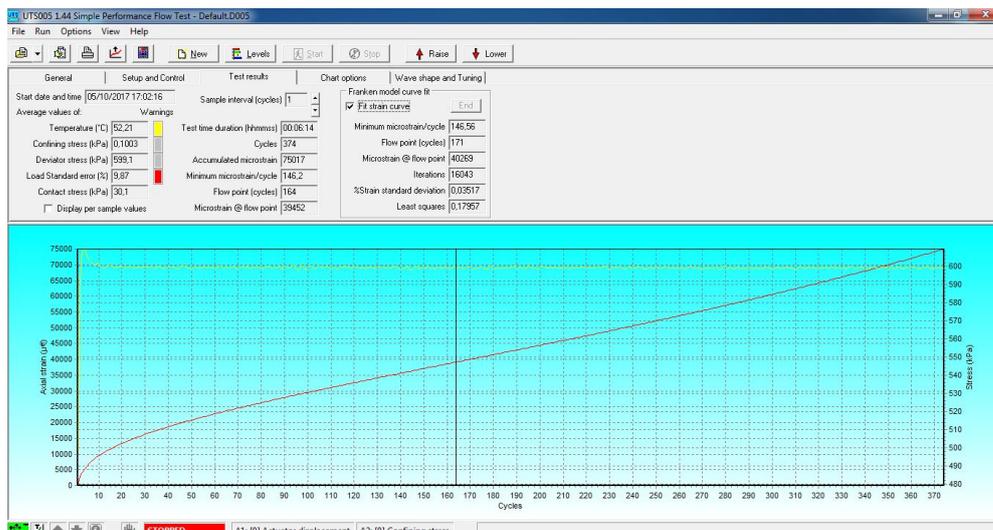


Figura 9.6: curva di Flow Number del campione 7

Allegato 4: Single Shear Creep Recovery

In questo allegato si riportano le curve ottenute dalla prova SSCR per le due ripetizioni di bitume esaminato alle diverse temperature.

Per il bitume 70/100 si rappresentano le curve di una sola ripetizione perché la seconda è risultata identica.

In tabella, i valori del Creep Compliance Rate dei bitumi alle diverse temperature.

Bitume "Tal Quale" 70/100:

| Bitume | Temperatura [°C] | CCR |
|--------|------------------|---------|
| 70-100 | 46 | 3,6E-04 |
| | 52 | 9,7E-04 |
| | 58 | 2,5E-03 |
| | 64 | 6,0E-03 |

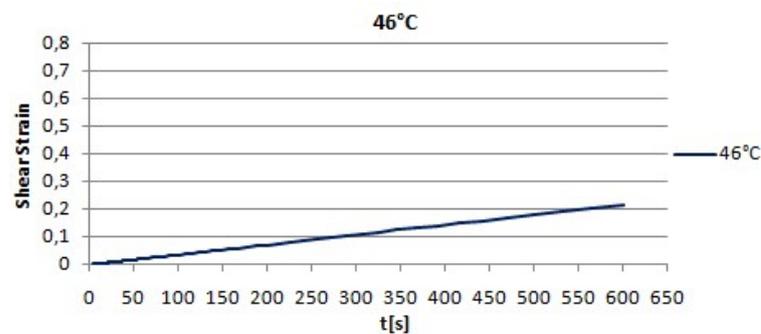


Figura 1: comportamento del bitume "Tal Quale" 70/100 alla temperatura di 46 °C

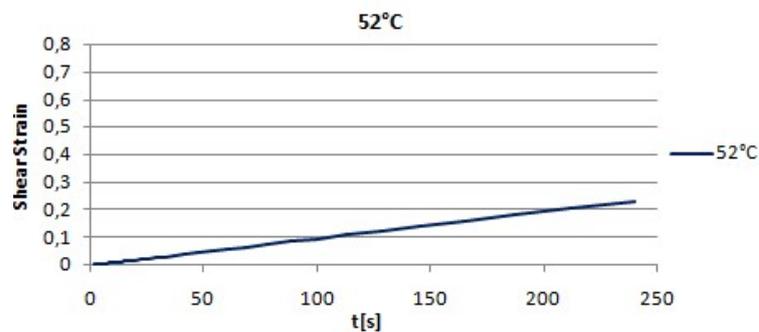


Figura 2: comportamento del bitume "Tal Quale" 70/100 alla temperatura di 52 °C

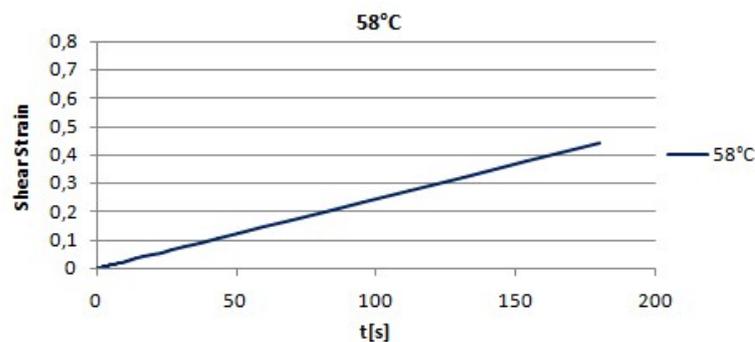


Figura 3: comportamento del bitume "Tal Quale" 70/100 alla temperatura di 58 °C

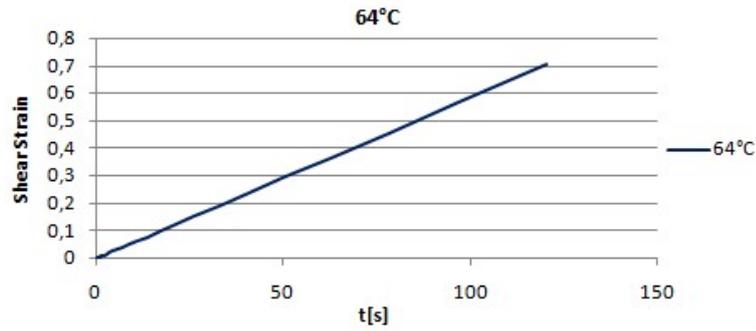


Figura 4: comportamento del bitume "Tal Quale" 70/100 alla temperatura di 64 °C

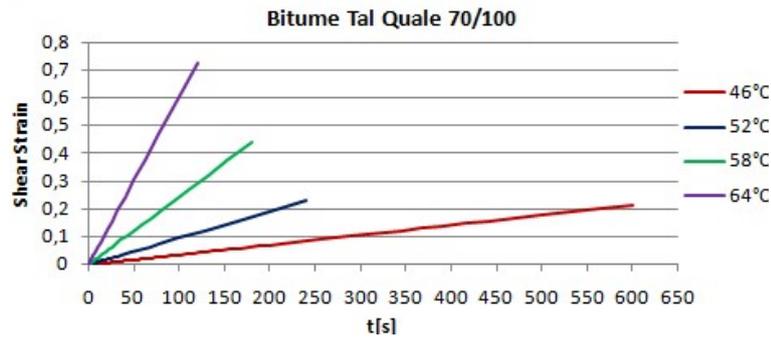


Figura 5: comportamento del bitume "Tal Quale" 70/100 alle diverse temperature

Bitume modificato con SBS:

Per il bitume modificato con SBS sono state rappresentate le due ripetizioni in un unico grafico, per tutte le temperature.

| Bitume | Temperatura [C°] | CCR |
|--------|------------------|---------|
| SBS | 58 | 2,9E-05 |
| | 64 | 1,0E-04 |
| | 70 | 4,1E-04 |
| | 76 | 1,9E-03 |

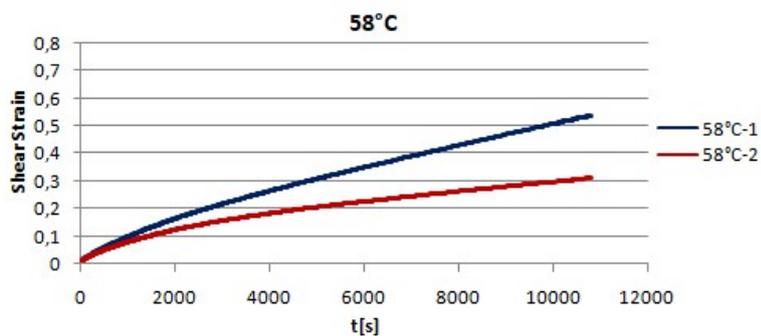


Figura 6: comportamento del bitume modificato alla temperatura di 58°C

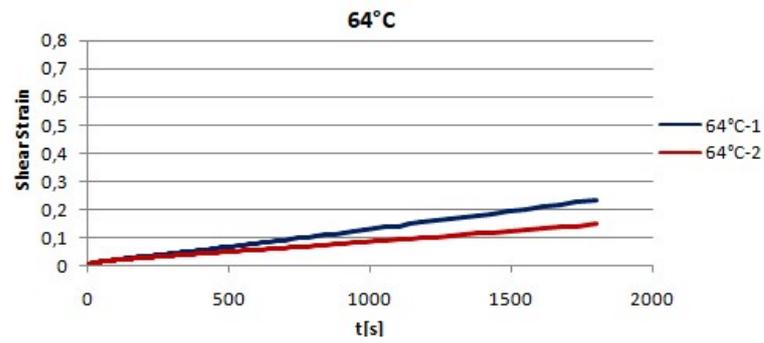


Figura 7: comportamento del bitume modificato alla temperatura di 64°C

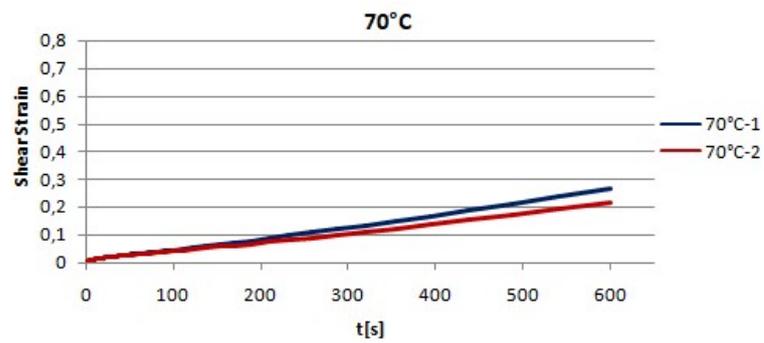


Figura 8: comportamento del bitume modificato alla temperatura di 70°C

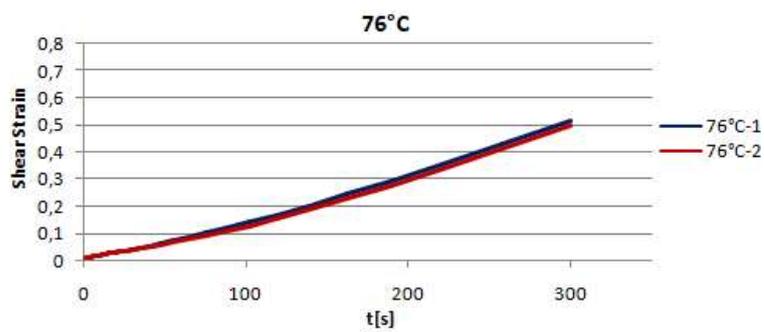


Figura 9: comportamento del bitume modificato alla temperatura di 76°C

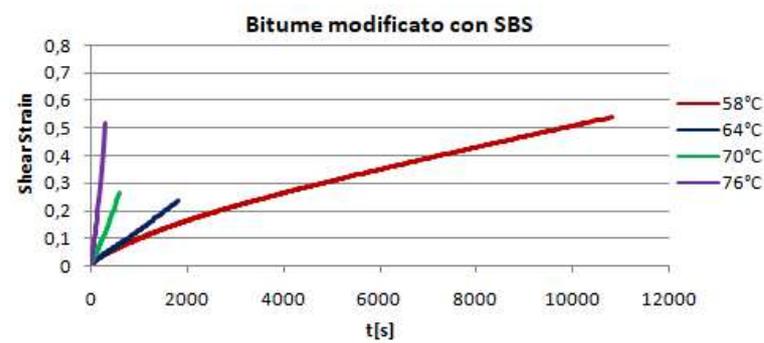


Figura 10: comportamento del bitume modificato alle diverse temperature

Bitume "Tal Quale" 50/70:

| Bitume | Temperatura [°C] | CCR |
|--------|------------------|---------|
| 50-70 | 46 | 2,2E-04 |
| | 52 | 6,1E-04 |
| | 58 | 1,6E-03 |
| | 64 | 3,8E-03 |

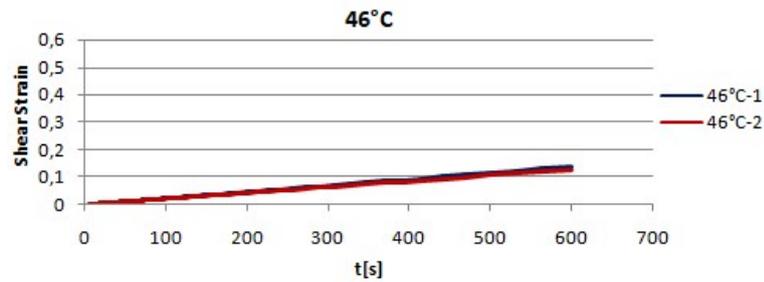


Figura 11: comportamento del bitume "Tal Quale" 50/70 alla temperatura di 46°C

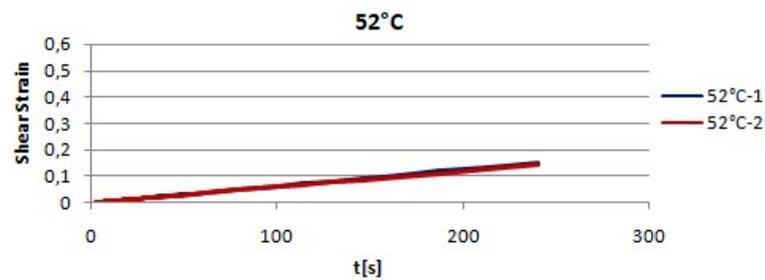


Figura 12: comportamento del bitume "Tal Quale" 50/70 alla temperatura di 52°C

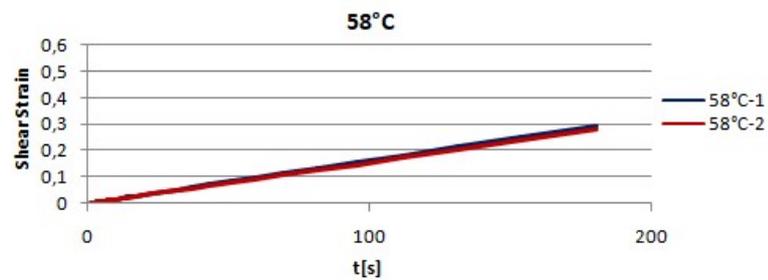


Figura 13: comportamento del bitume "Tal Quale" 50/70 alla temperatura di 58°C

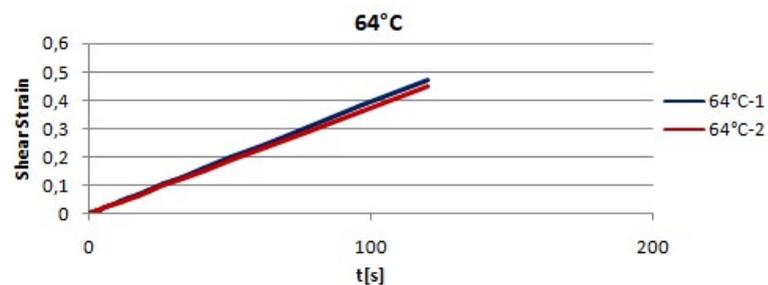


Figura 14: comportamento del bitume "Tal Quale" 50/70 alla temperatura di 64°C

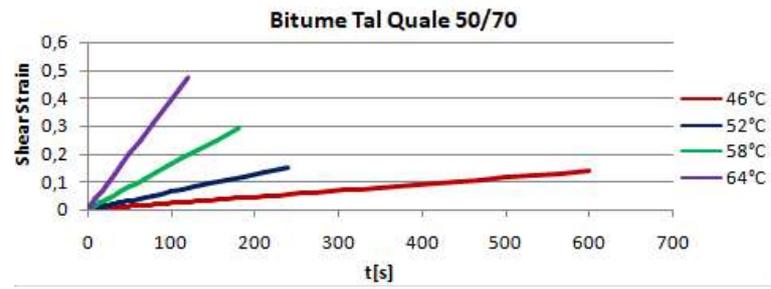


Figura 15: comportamento del bitume “Tal Quale” 50/70 alle diverse temperature