

# POLITECNICO DI TORINO

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

*Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile*

Tesi di Laurea Specialistica

**Indagine sperimentale su miscele tradizionali e modificate  
per la valutazione della resistenza all'ormaiamento**



***Relatori***

Prof. Orazio Baglieri

Prof. Ezio Santagata

Ing. Pier Paolo Riviera

***Candidato***

Domenico D'Angelo

26 Ottobre 2018







---

# INDICE

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
Struttura della tesi .....	2
<b>Capitolo 1 LO STUDIO DELL'ORMAIAMENTO .....</b>	<b>3</b>
1.1 L'ormaiamento.....	7
1.1.1 Previsione dell'ormaiamento nelle pavimentazioni flessibili .....	9
1.1.2 Effetto del tipo di conglomerato bituminoso sull'ormaiamento .....	11
1.1.3 Effetti degli additivi sull'ormaiamento.....	11
<b>Capitolo 2 ANALISI SPERIMENTALE .....</b>	<b>17</b>
2.1 Background .....	17
2.2 Obiettivi .....	17
2.3 Approccio metodologico.....	18
2.3.1 Analisi preliminare dei materiali .....	18
2.3.1.1 Caratterizzazione degli aggregati.....	18
2.3.1.2 Caratterizzazione dei bitumi .....	19
2.3.2 Realizzazione dei provini.....	21
2.3.2.1 La miscelazione .....	21
2.3.2.2 Produzione dei campioni .....	22
2.3.2.3 Il carotaggio e il taglio .....	24
2.3.3 Test dei provini.....	25
<b>Capitolo 3 MATERIALI E METODI .....</b>	<b>29</b>
3.1 Gli aggregati .....	29
3.1.1 Analisi granulometrica.....	30
3.2 Il bitume.....	32
3.2.1 Viscosimetro rotazionale .....	33
3.2.2 Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) .....	34
3.2.3 Dynamic Shear Rheometer.....	35
3.3 Il conglomerato bituminoso.....	36
3.3.1 Contenuto di bitume.....	36
3.3.2 Analisi granulometrica degli aggregati .....	38
3.3.3 Massima massa volumica teorica (MMVT).....	40
3.3.4 Compattazione con pressa a taglio giratorio .....	42
3.3.5 Massima massa volumica apparente (MMVA).....	45
3.3.6 Percentuale dei vuoti .....	46

---

3.3.7 Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) .....	47
<b>Capitolo 4 ANALISI DEI DATI.....</b>	<b>49</b>
4.1 Analisi granulometrica e MMVT degli aggregati .....	49
4.2 Curva granulometrica di progetto .....	51
4.3 Contenuto di bitume, granulometria e MMVT delle miscele.....	53
4.4 Compattazione con pressa a taglio girettorio .....	56
4.5 Il Flow Number .....	59
4.6 Correlazione tra FN e contenuto dei vuoti .....	61
4.7 Il CCR .....	62
4.8 Correlazione tra CCR e FN .....	66
<b>Capitolo 5 CONCLUSIONI.....</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>71</b>
<b>ALLEGATI .....</b>	<b>75</b>
Allegato 1 – Compattazione dei provini.....	75
Allegato 2 – Test del Flow Number .....	84

**INDICE DELLE FIGURE**

Figura 1.1: Fenomeno dell'ormaiamento..... 7

Figura 1.2: Variazione della profondità dell'ormaiata nel tempo..... 9

Figura 1.3: Deformazioni in funzione del tempo..... 13

Figura 2.1: Fuso CIRS e centro fuso..... 18

Figura 2.2: Andamento della viscosità al variare della temperatura..... 19

Figura 2.3: Fase di carico del test SSCR. .... 20

Figura 2.4: Materiale pronto per essere riscaldato alla temperatura di miscelazione.21

Figura 2.5: Produzione della miscela e versamento nei sacchi..... 22

Figura 2.6: Operazione di carotaggio e taglio campione. .... 24

Figura 2.7: Campione carotato e tagliato..... 25

Figura 2.8: Curva di Flow Number..... 26

Figura 3.1: Aggregati utilizzati nello studio. .... 29

Figura 3.2: Cilindri coassiali e viscosimetro Brookfield. .... 33

Figura 3.3: Bicchieri cilindrici e forno usato per RTFOT. .... 34

Figura 3.4: Forno Carbolite e cestello d'acciaio utilizzato per la prova..... 37

Figura 3.5: Schema di funzionamento della pila di setacci su agitatore meccanico.. 39

Figura 3.6: Picnometro vuoto e campioni di conglomerato bituminoso..... 41

Figura 3.7: Picnometro riempito con materiale e operazione di disareazione..... 41

Figura 3.8: Pressa a taglio girevole utilizzata e schema di funzionamento. .... 43

Figura 3.9: Estrusione del campione e campione estruso. .... 44

Figura 3.10: Pesata in acqua e in aria. .... 46

Figura 4.1: Curve granulometriche degli aggregati..... 50

Figura 4.2: Curva di progetto all'interno del fusso CIRS. .... 52

Figura 4.3: Curve granulometriche delle miscele TR\_70-100. .... 54

Figura 4.4: Curve granulometriche delle miscele TR\_50-70. .... 54

Figura 4.5: Curve granulometriche delle miscele MOD\_SBS. .... 55

Figura 4.6: Relazione tra FN e vuoti delle miscele con il 4% di bitume. .... 61

Figura 4.7: Relazione tra FN e vuoti delle miscele con il 5% di bitume..... 61

Figura 4.8: Relazione tra FN e vuoti delle miscele con il 6% di bitume..... 62

Figura 4.9: Risultati test SSCR del bitume "Tal Quale" 70-100..... 63

Figura 4.10: Risultati test SSCR del bitume "Tal Quale" 50-70..... 63

Figura 4.11: Risultati test SSCR del bitume modificato con SBS..... 64

---

Figura 4.12: Valori di CCR in funzione della temperatura di test.....	64
Figura 4.13: Correlazione tra CCR e FN delle miscele con il 4% di bitume. ....	66
Figura 4.14: Correlazione tra CCR e FN delle miscele con il 5% di bitume. ....	66
Figura 4.15: Correlazione tra CCR e FN delle miscele con il 6% di bitume. ....	67
Figura 4.16: Correlazione tra CCR e FN di tutte le miscele.....	67
Figura 4.17: Parametro “a” (intercetta) in funzione del contenuto dei vuoti. ....	68
Figura 4.18: Parametro “b” (pendenza) in funzione del contenuto dei vuoti. ....	68

**INDICE DELLE TABELLE**

Tabella 3.1: Serie di setacci utilizzati per lo studio della granulometria.....	30
Tabella 3.2: Massa della pozione di prova.....	30
Tabella 3.3: Quantitativi di materiale prescritti.....	37
Tabella 3.4: Massa volumica dell'acqua a diverse temperature.....	45
Tabella 4.1: Risultati analisi granulometrica degli aggregati.....	49
Tabella 4.2: MMVT degli aggregati.....	50
Tabella 4.3: Fuso CIRS.....	51
Tabella 4.4: Percentuali di aggregato della curva di progetto.....	51
Tabella 4.5: Curva di progetto.....	52
Tabella 4.6: Contenuto di bitume delle miscele TR_70-100.....	53
Tabella 4.7: Contenuto bitume delle miscele TR_50-70.....	53
Tabella 4.8: Contenuto bitume delle miscele MOD_SBS.....	53
Tabella 4.9: MMVT delle miscele.....	55
Tabella 4.10: Risultati compattazione miscela TR_70-100_M1.....	56
Tabella 4.11: Risultati compattazione miscela TR_70-100_M2.....	56
Tabella 4.12: Risultati compattazione miscela TR_70-100_M3.....	56
Tabella 4.13: Risultati compattazione miscela TR_50-70_M1.....	57
Tabella 4.14: Risultati compattazione miscela TR_50-70_M2.....	57
Tabella 4.15: Risultati compattazione miscela TR_50-70_M3.....	57
Tabella 4.16: Risultati compattazione miscela MOD_SBS_M1.....	57
Tabella 4.17: Risultati compattazione miscela MOD_SBS_M2.....	58
Tabella 4.18: Risultati compattazione miscela MOD_SBS_M3.....	58
Tabella 4.19: Risultati FN della miscela TR_70_100.....	59
Tabella 4.20: Risultati FN della miscela TR_50-70.....	60
Tabella 4.21: Risultati FN della miscela MOD_SBS.....	60
Tabella 4.22: Condizioni di test utilizzate.....	62
Tabella 4.23: CCR ottenuto dai test SSCR.....	65
Tabella 4.24: Coefficienti delle rette FN in funzione del CCR.....	68



## INTRODUZIONE

L'ormai, depressione longitudinale che si sviluppa sul piano viabile accompagnata da sollevamenti ai lati, rappresenta uno dei principali problemi che interessano pavimentazioni stradali flessibili. A causa della suscettibilità termica e del comportamento viscoelastico dei materiali, l'ormaiamento o rutting è notevolmente accentuato alle temperature di servizio elevate e in presenza di veicoli pesanti a movimento lento [1]. 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, in altre parole, 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 riciclata 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.

Purtroppo il miglioramento delle caratteristiche di base di un bitume può aumentare notevolmente il suo costo, quindi, è necessario avere metodi di prova affidabili di laboratorio e criteri di classificazione per stabilire quale miscela bituminosa è più idonea a limitare l'accumulo di deformazione permanente e al contempo la più economica.

---

## **Struttura della tesi**

Il presente studio è principalmente suddiviso in due parti, la prima dedicata allo studio dell'ormaiamento con richiami alle principali scoperte presenti in letteratura riguardante questo fenomeno e la seconda, invece, è dedicata all'indagine di laboratorio.

Nella seconda parte della tesi è descritta l'esperienza di laboratorio, dalla raccolta delle informazioni riguardanti i materiali utilizzati fino all'analisi dei dati ottenuti dalle prove effettuate in laboratorio. Lo scopo pratico delle prove di laboratorio è stato quello di determinare due parametri prestazionali, il Creep Compliance Rate (CCR) per i bitumi e il Flow Number (FN) per ogni campione ottenuto dalle miscele di conglomerato bituminoso. Per ottenere questi dati si sono prodotte miscele con leganti diversi (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) e contenuto di bitume diverso (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 parametri ottenuti (CCR e FN) sono stati utili a convalidare la precedente ricerca di laboratorio condotta nello stesso laboratorio nella quale è trovata una correlazione lineare tra questi due parametri [2] e si è inoltre cercato di trovare una equazione legni i parametri della relazione lineare (intercetta "a" e pendenza "b") con le caratteristiche volumetriche della miscela (contenuto di bitume e di vuoti).

## Capitolo 1

### LO STUDIO DELL'ORMAIAMENTO

I fenomeni di degrado a cui è sottoposta una pavimentazione stradale sono molteplici e strettamente legati tra loro. La formazione di fessure, avvallamenti, ormaie, buche sono la dimostrazione che la sovrastruttura stradale si sta degradando. Il manifestarsi di questi fenomeni, riscontrabili direttamente sul piano viabile, indica molto spesso l'esistenza di mancanze all'interno del pacchetto stradale stesso e/o del piano di posa. Le mancanze sono generalmente di tipo meccanico-strutturale, per cui ad esempio, gli spessori impiegati per i conglomerati bituminosi non sono sufficienti per sopportare i carichi esterni, oppure gli aggregati scelti per il piano viabile non presentano sufficiente resistenza all'abrasione, od ancora i bitumi utilizzati rammolliscono alle temperature di esercizio. Ecco che, sotto l'effetto delle azioni esterne, il pacchetto, inteso come struttura resistente composta da più materiali, inizia a cedere, manifestando in maniera più o meno spiccata i fenomeni di degrado sopra descritti. Appare evidente come risulti assai complesso il compito di separare gli effetti delle varie azioni che concorrono al degrado della sovrastruttura ed altrettanto difficile è fornire a quest'ultimo un'identificazione oggettiva. Le caratteristiche reologiche dei materiali costituenti gli strati, legate alla temperatura di esercizio e alla velocità di applicazione dei carichi, e l'azione continuata del traffico, farebbero sì che le deformazioni indotte dai carichi si accumulino e che la capacità della sovrastruttura di resistere nel tempo alle sollecitazioni cui è sottoposta, trasferendole al sottofondo, si riduca fino al raggiungimento dei limiti di resistenza dei materiali stessi, ovvero alla loro rottura [3].

Dal quadro introduttivo si comprende quanto sia complesso il processo di deterioramento della sovrastruttura e quanto sia difficile individuarne le cause, soprattutto se queste si trovano in profondità, all'interno del pacchetto, ed il verificarsi del fenomeno in superficie rappresenta soltanto l'atto conclusivo dell'ammaloramento. Occorre poi tener presente che, molto spesso, la contemporaneità di due o più fenomeni di degrado su una porzione di pavimentazione li amplifica entrambi.

I degradi delle pavimentazioni stradali flessibili possono essere suddivisi nelle seguenti categorie:

- Fessurazioni: a ragnatela, a blocchi, di bordo, longitudinale e trasversale, da scorrimento.
- Deformazioni superficiali plasto-viscose: risalti e sacche, ormaie, ondulazioni, depressioni, buche, rigonfiamenti, scalinamento fra corsie e banchine, spostamento del manto per spinte orizzontali.
- Difetti superficiali: essudazione di bitume, levigatura degli inerti, scagliatura della superficie.

*Fessurazione a ragnatela.* Le fessure a ragnatela si presentano nelle zone soggette ai carichi di traffico ripetuti. Si originano sul fondo degli strati di conglomerato bituminoso, dove lo stato tenso-deformativo di trazione indotto dalle sollecitazioni è maggiore. Le fessure si propagano in superficie all'inizio parallele e longitudinali, poi interconnesse a formare segni poliedrici ad angoli acuti. Si presentano solo sulle superfici soggette al carico, perciò possono presentarsi su alcune aree piuttosto che su altre.

*Fessurazione a blocchi.* Le fessure a blocchi dividono la superficie della pavimentazione in forme approssimativamente rettangolari le cui estensioni oscillano in genere tra  $0,1 \text{ m}^2$  e  $10 \text{ m}^2$ . Sono causate dal ritiro del conglomerato bituminoso dovuto alla variazione ciclica di temperatura. Indipendenti dai fenomeni di carico, manifestano un eccessivo indurimento del materiale superficiale e possono presentarsi anche su porzioni non trafficate.

*Fessurazione di bordo.* Le fessure di bordo, di forma abbastanza ricurva, interessano la striscia esterna di pavimentazione larga 60 cm adiacente alla banchina. Queste sono causate da fenomeni di gelo nel sottofondo o nella fondazione vicino al bordo della pavimentazione; sono accelerate dal carico del traffico.

*Fessurazione longitudinale e trasversale.* Le fessure longitudinali sono parallele alla linea centrale della carreggiata o alla linea di posa dello strato superficiale; si distinguono anche per la loro dislocazione rispetto all'area interessata al rotolamento delle ruote. Le cause del fenomeno sono i difetti di costruzione, le escursioni termiche giornaliere e il ritiro del conglomerato bituminoso per basse temperature. Le fessure trasversali si presentano ortogonali a quelle appena descritte, e neanche queste sono causate dal carico di traffico.

*Fessurazione da scorrimento.* Le fessure da scorrimento, di forma ricurva, sono causate dallo scivolamento o dalle deformazioni indotte durante il rotolamento o dalla frenatura degli pneumatici: di solito sono localizzate in curva, in salita, nelle intersezioni. Lo slittamento si manifesta più facilmente in presenza di strati di usura sottili e scarsamente resistenti alle azioni tangenziali, con scarsa aderenza tra la superficie e lo strato ad essa inferiore o in presenza di miscele di conglomerato bituminoso molto liquido (emulsioni).

*Risalti e sacche.* I risalti sono piccoli e localizzati innalzamenti della superficie; sono 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 dovuto al traffico. Le sacche sono piccoli, improvvisi avvallamenti della superficie.

*Ondulazioni.* Le ondulazioni sono una successione di avvallamenti e di innalzamenti lungo la superficie stradale ad intervalli regolari, di solito inferiori a 3 m. Gli innalzamenti sono perpendicolari alla direzione del traffico e sono causate dall'azione del traffico combinata con l'instabilità della superficie o della base.

*Depressioni.* Le depressioni sono porzioni di pavimentazioni a quota leggermente più bassa rispetto a quelle circostanti. Se sono leggere si possono riconoscere versando dell'acqua su di esse e vedendo se questa ristagna. Possono essere causate da cedimenti del terreno di sottofondo dovuto alla costruzione di manufatti nelle vicinanze o da un errato procedimento di costruzione.

*Buche.* Le buche sono depressioni a forma di scodella con diametro inferiore a 1 m, presenti sulla superficie stradale. I bordi in genere sono netti e spigolosi e i lati in prossimità della parte superiore sono verticali. Il loro scavo è accelerato dalla presenza d'acqua che può ristagnare al loro interno. Si possono formare quando, a causa del traffico veicolare, sono asportate piccole porzioni di pavimentazione. La

pavimentazione continua a rovinarsi a causa dell'insufficiente protezione del manto stradale.

*Rigonfiamenti.* I rigonfiamenti sono caratterizzati da un graduale innalzamento della superficie stradale che si prolunga per più di 3 m. È causato dall'azione del gelo nel sottofondo; spesso si presenta con formazione di fessure da scorrimento.

*Scalinamento tra corsia e banchina.* È la differenza di quota tra la superficie percorsa dai veicoli e la striscia esterna limitrofa della banchina; in alcuni casi si rileva anche un dislivello tra corsie dovuto ad irregolari modalità di posa in opera del materiale superficiale. Il primo aspetto del fenomeno è causato dall'erosione della banchina o dal suo assestamento.

*Spostamento del manto per spinta orizzontale (Shoving).* Questo ammaloramento è uno spostamento longitudinale permanente in un'area circoscritta del manto causato dai carichi di traffico. Il traffico spingendo contro la pavimentazione produce un'onda corta e brusca nel manto. Tale ammaloramento generalmente si trova solo in pavimentazioni con miscele di conglomerato bituminoso molto liquido (emulsioni).

*Essudazione del bitume (bleeding).* In caso di manti con eccessivo contenuto di bitume, può formarsi uno strato scivoloso, riflettente, lucido che diviene facilmente viscoso e appiccicoso. Il fenomeno è causato dal surriscaldamento della superficie per irraggiamento: il calore aumenta le caratteristiche viscosi del materiale, favorendo dislocazioni interne. Nelle miscele con eccessivo contenuto di bitume o con scarsa presenza di vuoti, il bitume riempie i vuoti durante il periodo caldo espandendosi poi in superficie: il fenomeno è perciò irreversibile e progressivo nel tempo.

*Levigatura dell'aggregato.* Il fenomeno è causato dalle ripetute applicazioni dei carichi di traffico che rendono l'aggregato liscio in superficie, diminuendo così l'aderenza con gli pneumatici.

*Scagliatura della superficie.* Il deterioramento è dovuto all'usura della superficie con perdita di materiale bituminoso e conseguente liberazione dell'aggregato. Il fenomeno, che indica una scarsa qualità della miscela e un indurimento della stessa, può presentarsi con perdita dei fini come con perdita di inerti grossolani, fino a conferire alla superficie un aspetto ruvido e butterato [4].

## 1.1 L'ormaiamento

L'ormaiamento (*rutting*) rappresenta uno dei principali degradi delle pavimentazioni flessibili e si manifesta con la comparsa di veri e propri solchi in corrispondenza della traiettoria delle ruote. L'ormaiamento avviene alle alte temperature in seguito a carichi ripetuti dovuti al traffico pesante che provoca il progressivo accumulo di deformazioni permanenti sotto la pressione degli pneumatici [5]. La profondità dell'ormaia si estende agli strati di conglomerato bituminoso o ancora oltre (fondazione e sottofondo).

L'ormaiamento si sviluppa principalmente in due fasi:

- la prima fase si osserva nelle prime settimane in seguito all'apertura della strada al traffico: infatti, si assiste ad un più o meno omogeneo cedimento  $\Delta h$  di tutta la pavimentazione dovuto al ridursi dei vuoti. Tale consolidazione non è altro che una deformazione permanente non più recuperabile;
- la seconda fase si origina quando tutti i vuoti sono saturi e i veicoli continuano a passare alle alte temperature; in queste condizioni si sviluppano degli scorrimenti viscosi e da ciò nasce il vero fenomeno dell'ormaiamento in cui si addensa il materiale sotto la ruota e refluisce ai lati (Figura 1.1) [6].

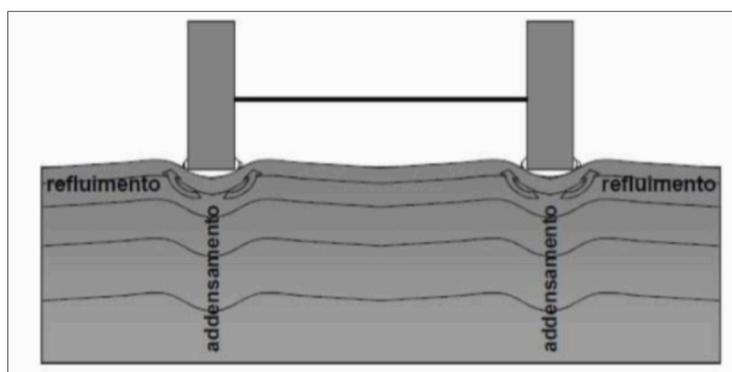


Figura 1.1: Fenomeno dell'ormaiamento.

Tale dissesto è molto rilevante in fase di progettazione e manutenzione della pavimentazione, poiché la formazione dell'ormaia porta a una riduzione della percezione di comfort e di sicurezza da parte degli utenti [7]. Infatti, la presenza dell'ormaia compromette la regolarità trasversale della pavimentazione; i sollevamenti laterali impediscono l'allontanamento delle acque, le quali si accumulano nei solchi causando importanti problemi di sicurezza stradale come l'acqua planning.

Il verificarsi dell'ormaiamento ha una stretta relazione con la tecnica di costruzione delle strade, il tipo di pavimentazione e la percentuale di vuoti delle miscele bituminose. Inoltre, le proprietà reologiche del bitume come la penetrazione e la viscosità potrebbero essere fattori importanti [8],[9],[10].

Ci sono diversi test per valutare la resistenza all'ormaiamento di una miscela di conglomerato bituminoso, in particolare: wheel tracking test (WTT), static creep test, repeated-load creep test; Marshall Quotient and indirect tensile test [3]. Inoltre, la prova di stabilità Marshal in una certa misura è correlata con le caratteristiche di ormaiamento delle miscele di conglomerato bituminoso (Kim, et al. 2000; Li, et al. 2002). Inoltre, è stato rilevato da Özen [11] che repeated-load creep test (RLC) può essere usata come indicatore del potenziale ormaiamento, ma il risultato deve essere confrontato con altri test affidabili.

Inoltre, un metodo di prova di base sull'applicazione di un carico in un'area limitata è stato sviluppato da Doh [12] per misurare la resistenza del materiale alle alte temperature. Il Deformation strength (SD) test è stato concepito come un nuovo metodo di prova per creare una deformazione indotta da un carico puntuale, che è simile al carico imposto da una ruota statica. Il carico statico verticale a 50.8 mm/min è stato applicato al campione attraverso una testa di carico. Inoltre, per trovare un punto del massimo carico, questo è stato applicato senza confinamento. Con il risultato del test è stata sviluppata la seguente equazione:

$$SD = \frac{4P}{\pi[D-2(r-\sqrt{2ry-y^2})]^2}; \quad (1)$$

dove:

SD = tensione di deformazione (MPa);

P = carico massimo a rottura (N);

D = diametro (mm) della testa di caricamento;

r = raggio (mm) di curvatura nella parte inferiore della testa di caricamento;

y = deformazione verticale (mm) nel campione.

Per verificare l'accuratezza di questo metodo sono stati condotti due differenti test. È stato eseguito il test WTT a 60 ° C e alla pressione di 14,5 kPa e alla velocità di 30 cicli/min. Il progetto della miscela è stato fatto sulla base del metodo Marshal con vuoti del 4%, VFA da 70 a 85%, stabilità Marshal minima di 7,3 (kN) e a valori di portata da 20 a 40. Per entrambe le prove SD e WTT è stata preparata un lastra campione dalla quale sono stati estratti per il test SD due provini di 100 mm di

diametro da un lato della piastra che non è stata usata per le prove WTT. La prova RLC è stata anche condotta a 60°C con carico di punta di 2,75 kN. Il risultato ha mostrato che vi è una correlazione inversa tra SD e i parametri dell'ormaiamento, ovvero profondità dell'ormaiamento (RD) e la stabilità dinamica (DS). Inoltre, vi è una buona correlazione ( $R^2 = 0,89$ ) tra la prova SD e la RLC. Infine, si può osservare che la SD può essere un buon test alternativo della tendenza all'ormaiamento delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso ad alta temperatura.

### 1.1.1 Previsione dell'ormaiamento nelle pavimentazioni flessibili

Diversi fattori influenzano la profondità dell'ormaiamento nelle miscele di conglomerato bituminoso, vale a dire: la velocità e carico assiale del veicolo, lo spessore della pavimentazione, la temperatura e le proprietà dei materiali delle miscele. Quindi, trovare un'equazione esatta potrebbe essere difficile. Studi precedenti mostrano che esiste un rapporto non lineare tra la profondità dell'ormaiamento e il tempo all'inizio della vita di una pavimentazione (prima fase), e questa tendenza cambia in una relazione lineare nel tempo (seconda fase). Nella prima fase, il conglomerato bituminoso è compattato a causa del carico veicolare, con un considerevole aumento della profondità dell'ormaiamento, mentre nella seconda avviene una riduzione dell'incremento di altezza dell'ormaiamento (Figura 1.2).



Figura 1.2: Variazione della profondità dell'ormaiamento nel tempo.

Diversi studi sono stati condotti per scoprire l'equazione per predire l'ormaiamento nella pavimentazione in conglomerato bituminoso. Alcune di esse sono elencate di seguito.

La profondità dell'ormaiamento potrebbe essere valutata dall'equazione ( 2 ):

$$SD = \alpha \times N^\beta \times T^\theta \quad ( 2 )$$

dove:

RD = altezza dell'ormai;

N = numero di ripetizioni;

$\alpha$ ,  $\beta$  e  $\theta$  = coefficienti dell'equazione.

Un altro modello di previsione per le pavimentazioni semirigide è stato determinato anche in un altro studio usando Static Uniaxial Penetration Test (SUPT). Il vantaggio principale di questo metodo è la considerazione dei parametri di taglio e della velocità nelle pavimentazioni semi-rigide:

$$SD = \alpha \times \left( \frac{V_{ref}}{V} \times N_V \right)^m \times T^\theta; \quad (3)$$

$$m = \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^\mu; \quad (4)$$

Dove:

$v_{ref}$  = velocità di riferimento;

V = velocità di interesse;

$N_V$  = numero ripetizioni del carico alla velocità di interesse;

T = temperatura;

$\tau$  = tensione di taglio, calcolata con il metodo agli elementi finiti;

$\tau_0 = k \cdot P_{max}$  è la tensione di taglio della miscela bituminosa;

$P_{max}$  è la forza di penetrazione ottenuta con il modello SUPT;

k è il coefficiente della forza di taglio (Su, Sun, e Hachiya, 2008);

$\alpha$ ,  $\theta$  e  $\mu$  = coefficienti dell'equazione.

In un altro studio è stato definito un modello di previsione dell'ormaiamento basato sul group method of data handling (GMDH) utilizzando l'accelerated pavement testing (APT) e il software NeuroShell 2 come di seguito riportato:

$$Y = -0.19 + 0.14X_1 - 0.4X_2 - 0.34X_1X_2 + 0.83X_2X_3 + 1.4X_2^2 + 0.1X_1^3X_2 + 0.32X_1X_2X_3 + 4.9X_2^3 - 3.5X_2^4 - 14X_2^5 + 1.8X_2^6 + 9.8X_2^7 - 0.5X_2X_3^3; \quad (5)$$

dove:

$$Y = 2 \times \frac{\text{ormaiamento attuale}}{26.74} - 1;$$

$$X_1 = 2 \times \frac{\text{carico della ruota}-20}{83.5} - 1;$$

$$X_2 = 2 \times \frac{\text{ripetizioni di carico}}{1131250} - 1;$$

$$X_3 = 2 \times \frac{cSN-1.21}{2.26} - 1;$$

Per ottenere questa equazione, la prova APT è stata condotta a 23°C con differenti carichi assiali che variavano tra 40 a 207 kN. In questo studio, sono stati considerati

un totale di 264 prove per la calibrazione e 81 prove per la verifica dei dati, è stato osservato che il parametro  $R^2$  variava all'interno nello stesso intervallo sia per la calibrazione che per la verifica dei dati [13].

Secondo Christensen e Bonaquist [14], vi è una buona correlazione tra l'incremento dell'ormaiamento e la resistenza della miscela:

$$RR = 224P^{-1.08} \cdot N_{eq}^{-0.65} \cdot RD^{-18.06}; \quad (6)$$

dove:

RR = tasso di ormaiamento, mm di ormaiamento / m di spessore / ESAL;

P = resistività in s/nm;

$N_{eq}$  =  $N_{design}$  o numero di colpi con il compattatore Marshal;

$RD = \left( \frac{100\% - vuoti\ reali}{100\% - vuoti\ di\ progetto} \right)$  è densità di campo relativa.

Per valutare le caratteristiche reologiche del legante bituminoso ad una temperatura più alta è stato menzionato come parametro efficace il rapporto  $G^*/\sin \delta$  [15].

### 1.1.2 Effetto del tipo di conglomerato bituminoso sull'ormaiamento

Si è riscontrato che la miscela stone mastic asphalt (SMA) ha più resistenza contro l'ormaiamento rispetto al composto dense graded, perché consiste in una grossa ossatura di aggregato con un contenuto più alto di bitume garantendo il contatto pietra-su-pietra tra le particelle di aggregato grosso (Scherocman 1991, Scherocman 1992, Davidson e Kennepohl 1992 e Brown et al. 1997), anche se in un altro rapporto il risultato è stato diverso [16]. Inoltre, usando polveri di minerali, come la polvere di pietra calcarea, si migliorano notevolmente le caratteristiche di ormaiamento della miscela bituminosa (Superpave, 1996).

### 1.1.3 Effetti degli additivi sull'ormaiamento

Chiu e Lu (2007) hanno condotto test con wheel track test su miscele bituminose diverse: SMA 13, SMA 19 (con e senza gomma di pneumatico) e su una miscela dense graded. Essi hanno ottenuto che il rutting rate (RR) per la miscela con la gomma (AR)-SMA era minore della miscela di SMA convenzionale con stessi aggregati. Inoltre, è stato osservato che il composto con dimensione delle particelle aggregate più grandi aveva più resistenza alla deformazione permanente. Così, AR-SMA 19 e la miscela dense graded avevano rispettivamente più e meno resistenza alla deformazione permanente.

Un altro studio, Fontes nel 2010 [10] illustra l'effetto del bitume modificato con polverino di gomma sulla deformazione permanente della relativa miscela bituminosa, il quale è stato condotto con due tipi di gomma ottenute attraverso processi naturali e criogenici. Per valutare la resistenza all'ormaiamento delle miscele bituminose con polverino di gomma sono state condotte i seguenti test: Repeated Simple Shear Test a altezza costante (RSST-CH) e wheel tracking test (WTT) a 60°C. In entrambe le prove è stata osservata una minore deformazione permanente rispetto al composto convenzionale, e la maggior parte della deformazione permanente avviene ai primi cicli di carico. Esiste una relazione lineare tra i risultati ottenuti dai test RSST-CH e WTT che conferma l'accuratezza di entrambi i test per valutare la deformazione permanente.

Cao (2007) ha pubblicato uno studio che illustra l'effetto del polverino di gomma di pneumatici riciclati sulle proprietà di rutting ad alta temperatura di miscele di bituminose modificati con SBS. Sono state aggiunte alle miscele mediante processo a secco diverse percentuali di gomma (0, 1, 2 e 3%). Il test WTT con il carico di 0,7 MPa e la velocità di 42 cicli al minuto è stato condotto per valutare la deformazione permanente a 60°C. Di conseguenza è stata calcolata la stabilità dinamica come segue:

$$DS = \frac{(t_2 - t_1) \times N}{d_2 - d_1} \quad (7)$$

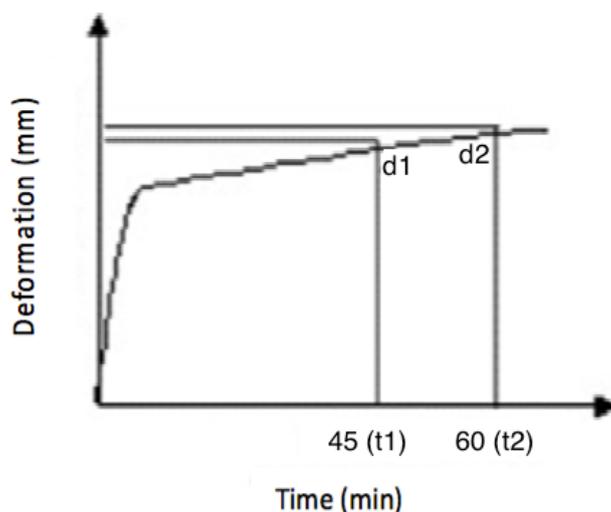
dove:

DS = stabilità dinamica;

d1, d2 = deformazione o la profondità dell'ormaia nei tempi 1 e 2;

t1, t2 = rispettivamente il tempo dopo 45 e 60 minuti (Figura 1.3);

N = numero di passaggi con la ruota sul campione per minuto.



**Figura 1.3: Deformazioni in funzione del tempo.**

Dai risultati si è visto che la DS aumenta con l'aumento della percentuale di gomma, quindi il campione contenente la più alta percentuale di gomma (3%) ha la più alta resistenza alla deformazione permanente (Cao, 2007). Si noti che un DS alto significa maggiore resistenza alla deformazione permanente.

Un altro programma di ricerca ha confrontato la resistenza all'ormaiamento di miscele SMA contenenti due diversi tipi di leganti modificati con polimeri. Nella prima miscela è stato utilizzato un legante polimerico usato nella pratica (PMB) e nell'altra è stato utilizzato un legante modificato con HDPE riciclato (RP). Per valutare l'ormaiamento è stato usato il wheel tracking test. I campioni sono stati prodotti con dimensioni 305x305x50 mm mediante un compattatore a rullo e sono stati lasciati a riposare a 20 ° C per circa 24 h.

La prova è stata condotta con un carico standard di 520 N ad una velocità costante di 21 cicli per minuto e per un tempo totale di 45 min. Inoltre, al fine di simulare un carico pesante e favorire l'ormaiamento tutte le prove sono state effettuate a 60 ° C. Dal test si è ottenuto che la miscela di legante RP ha una buona resistenza alla deformazione permanente; tuttavia, la miscela PMB ha prestazioni migliori rispetto alle miscele RP. Comunque, il legante polimerico riciclato si potrebbe utilizzare per aumentare la durata della pavimentazione alla condizione di alto traffico (Casey et al., 2008).

Tayfur et al. (2007) hanno studiato la resistenza all'ormaiamento delle miscele di SMA modificate con: polialfaolefin amorfa (AP), cellulosefiber (SE), fibra di cellulosa mescolata con bitume (BE), poliolefin (PE) e stirene-butadiene-stirene (SB)

con la percentuale rispettivamente del 6% di bitume, 0,4% di aggregato, 0,6% di miscela, 0,6% di aggregato e 5% di bitume. Inoltre, per il confronto sono stati condotti diversi test di performance. I test inclusi sono: static creep test (con carico mono assiale di 425 kPa a 25 e 40°C e 3600 s di applicazione del carico), repeated creep test (con carico medio di 1100 N e periodi di impulso di 1000 ms alle stesse temperature) e LCPC rutting test (con pressione dei pneumatici di 0,6 MPa a 60°C). Si è osservato che tutte miscele bituminose modificate hanno una maggiore resistenza all'ormaiamento rispetto alle miscele convenzionali, anche con un contenuto ottimale di bitume maggiore, e vi è una maggiore adesione tra legante modificato e particelle aggregate [5].

In studi condotti da Hınıslioğlu e Ağar, (2004) è stato osservato che è stata migliorata la resistenza all'ormaiamento della miscela bituminosa aggiungendo, come modificatore del bitume, diverse percentuali di polietilene riciclato ad alta densità (HDPE) con percentuali di 4, 6 e 8% in peso del contenuto di bitume, ed è stato notato che tutti i campioni hanno approssimativamente lo stesso rapporto di vuoti di aria (3.07-3.35%). In aggiunta, sono stati considerati in questo studio tre diverse temperature di miscelazione (145, 155 e 165°C) e tre diversi tempi di miscelazione (5, 15 e 30 min.). Prendendo in considerazione il Marshal Quotient (MQ) per la valutazione delle deformazioni permanenti, il campione con un valore di MQ più alto è più resistente alle deformazioni permanenti. Il risultato illustra che i campioni con 4% HDPE a 165°C sono più resistenti alla deformazione permanente. Inoltre, tra tutti i tempi di miscelazione, il miglior risultato si è ottenuto con il campione che è stato miscelato per 30 minuti, nel quale il MQ ha registrato un aumento del 50% rispetto al composto di controllo.

Le proprietà reologiche di leganti bituminosi modificati LDPE e del GMA-g-LDPE contenenti diverse percentuali di modificante (3, 4, 5 e 6% in peso di bitume) sono stati studiati da Jun et al. (2008) [15]. A causa della bassa compatibilità tra LDPE e bitume, è stato considerato il Glycidyl methacrylate (GMA) per migliorare la polarità del LDPE. Osservando il risultato, il parametro  $G^*/\sin \delta$  del bitume modificato GMA-g-LDPE era superiore a quello del bitume modificato LDPE. Pertanto, le caratteristiche di rutting del GMA-g-LDPE PMB sono migliori di quella del LDPE PMB, e questo risultato ha illustrato che GMA-g-LDPE PMB ha minore sensibilità alle temperature e migliore prestazione elastica. Inoltre, il test con bending beam

rheometer (BBR) ha dimostrato che il GMA-g-LDPE PMB non ha ridotto la resistenza a fatica a bassa temperatura, mentre l'aggiunta di LDPE ha avuto l'effetto negativo sul bitume di base (Jun et al., 2008).

In uno studio condotto da Sengoz e Topal (2005) sono stati utilizzati roofing shingle waste (elementi impermeabilizzazione per le coperture), nel tentativo di valutare il comportamento all'ormaiamento di miscele bituminose mescolate con questi elementi di scarto rispetto a una miscela di controllo (senza roofing shingle). L'1% di roofing shingle rispetto al peso totale della miscela è selezionato come valore ottimale. È stato usato il LCPC pavement rutting tester con pressione degli pneumatici della ruota di 600 kPa. Il test è stato condotto a 60°C sui campioni lastriformi con dimensioni di 500×180×100 mm. Di conseguenza, è stato mostrato che la profondità dell'ormaia per campioni contenenti roofing shingle è notevolmente inferiore rispetto alla miscela di controllo.

Un altro programma di ricerca ha illustrato il potenziale ormaiamento di miscele SMA contenenti pneumatici riciclati e fibre di tessuto confrontandole con le miscele contenenti fibre di cellulosa comunemente utilizzate e di poliestere (Putman e Amirkhaniyan, 2004). I campioni sono stati realizzati in conformità al mix design Superpave con contenuti ottimali di bitume. I provini cilindrici sono stati preparati con diametro di 150 mm e 75 mm di altezza, e sono stati messi a 76°C per quattro ore prima del test. Inoltre, il carico della ruota e la pressione che sono stati applicati durante la prova sono rispettivamente di 445 N e 689 kPa. Le curve di ormaiamento, profondità del solco in funzione dei cicli, sono state tracciate per ogni miscela, e la stabilità dinamica di ciascun campione è stata calcolata determinando la pendenza della curva dopo 1000 cicli. Dall'analisi dei risultati si deduce che la miscela contenente fibra di poliestere ha avuto una resistenza maggiore all'ormaiamento con profondità di solco di 1,60 mm e la stabilità dinamica di 10.299 cicli/mm; tuttavia, per tutte le altre miscele, la resistenza all'ormaiamento sono state quasi le stesse e non esiste alcuna differenza rilevante tra questi valori poiché la profondità dell'ormaia per le miscele contenenti fibra di tessuto, pneumatici di scarto e fibre di cellulosa è stata rispettivamente 1,66, 1,67, 1,76 millimetri.

Xu et al. (2010) [17] hanno studiato l'effetto delle fibre di poliestere, poliacrilonitrile, lignina e amianto con diverse percentuali (0,00, 0,20, 0,35 e 0,50% in massa della miscela) sulle proprietà di ormaiamento e di fatica delle di miscele di conglomerato

bituminoso. I campioni con dimensioni di 30×30×5 cm sono stati fabbricati per WTT con la pressione dei pneumatici di 0,7 MPa e la velocità di 42 cicli/min. a 60°C. I risultati hanno mostrato che la miscela con 0,35% di fibra polyacrylonitrile aveva la profondità degli ormaie più basse dopo 2500 cicli e inoltre si è notato che le ormaie si erano ridotte del 32.56% rispetto alla miscela senza fibre, per le fibre di poliestere, lignina e amianto si sono ottenuti valori di riduzione inferiori, rispettivamente di 19,57, 8,43 e 11,40%.

## Capitolo 2

### ANALISI SPERIMENTALE

#### 2.1 Background

La mia indagine sperimentale ha inizio dalla ricerca presentata nella tesi di dottorato di Mohammad Alam, svolta nel laboratorio del DIATI del Politecnico di Torino. In questo studio sono stati eseguiti test di single shear creep-recovery (SSCR) per valutare le proprietà di ormaiamento di diversi leganti bituminosi a varie temperature. I dati sperimentali sono stati confrontati con quelli derivati dai test del Flow Number (FN) condotti su miscele bituminose corrispondenti caratterizzate dalla stessa composizione (curva granulometrica e dosaggio del legante) e dallo stesso contenuto di vuoti. Mediante questo studio sperimentale è stata trovata una relazione singola tra Creep Compliance Rate (CCR) e FN indipendente dall'origine e dal tipo di legante, confermando così l'efficacia del protocollo di prova SSCR nel catturare il contributo della fase legante all'accumulo di deformazione permanente nelle miscele considerate [2].

#### 2.2 Obiettivi

Lo scopo di questa tesi è di validare la ricerca di Mohammad e di cercare una correlazione analitica tra i parametri della retta CCR-FN con la percentuale dei vuoti della miscela di conglomerato bituminoso. In modo tale da ottenere un'equazione di progetto, con la quale noti le caratteristiche del bitume (CCR) e del conglomerato bituminoso (%B e %v) si può ottenere analiticamente il Flow Number della miscela corrispondente.

## 2.3 Approccio metodologico

### 2.3.1 Analisi preliminare dei materiali

La prima fase del nostro studio sperimentale è quella di analizzare i materiali con cui andremo a lavorare. Nel nostro caso i materiali base sono aggregati e bitumi. Nei seguenti sotto-paragrafi saranno specificate le prove per effettuate questa fase preliminare.

#### 2.3.1.1 Caratterizzazione degli aggregati

L'analisi degli aggregati consiste nell'andare a determinare la curva granulometrica e la densità di ogni classe di aggregato compreso il filler, al fine di avere tutti gli strumenti per andare a determinare la curva granulometrica di progetto.

- L'analisi granulometrica, il cui procedimento è trattato al paragrafo §3.1.1, è quella prova utile a misurare le dimensioni dei granuli che costituiscono un aggregato. A causa della forma irregolare dei granuli, per caratterizzarne le dimensioni ci si riferisce a un diametro medio, che si fa coincidere con la dimensione dell'apertura delle maglie del setaccio attraverso cui i granuli passano.

- La curva granulometrica di progetto rappresenta lo scheletro litico delle miscele, per ottenerla bisogna determinare le percentuali di ogni classe di aggregato, con il vincolo che essa rispetti il fuso del capitolato speciale di appalto redatto dal CIRS per conto del ministero delle infrastrutture e dei trasporti (Figura 2.1) cui si è fatto riferimento. Inoltre, in questa sperimentazione si è fatto in modo che la differenza tra la curva granulometrica di progetto e quella del centro fuso sia minima.

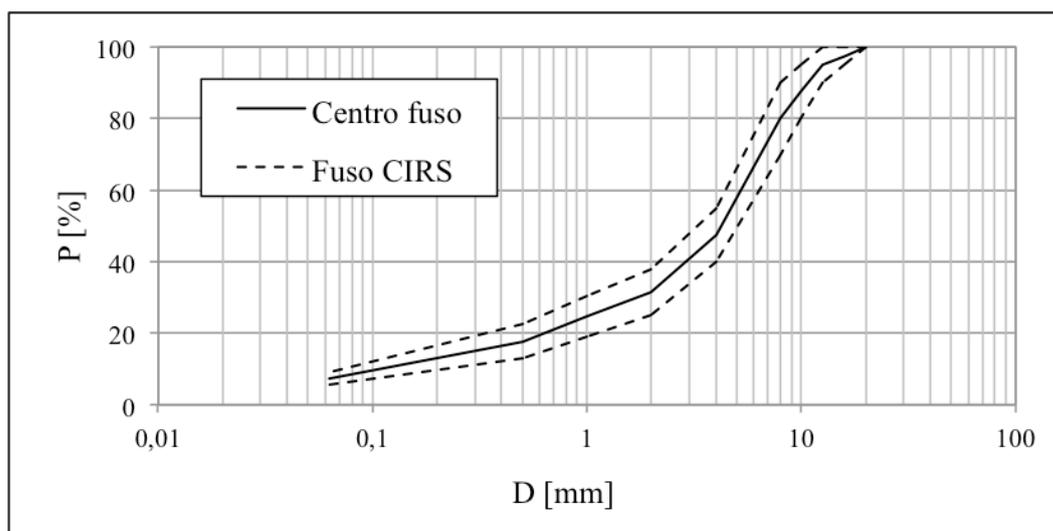


Figura 2.1: Fuso CIRS e centro fuso.

### 2.3.1.2 Caratterizzazione dei bitumi

Le prove eseguite sui leganti bituminosi in questo studio sono principalmente due, in particolare sono stati eseguiti test per la valutazione della viscosità e test per la determinazione della resistenza all'accumulo delle deformazioni permanenti dei bitumi.

- La viscosità è una grandezza fisica che misura la resistenza di un fluido allo scorrimento, tale grandezza è utile per il confezionamento delle miscele bituminose, infatti, tramite la viscosità si valuta la lavorabilità dei bitumi alle alte temperature. Per la misurazione di tale grandezza nei leganti bituminosi si utilizza il viscosimetro rotazione (§3.2.1). Si valuta questo parametro per determinare la temperatura di miscelazione ( $T^*$ ) in funzione della lavorabilità desiderata. Essendo noto che la viscosità diminuisce con l'innalzamento della temperatura, ottenuto questo parametro a differenti step di temperatura, è stata tracciata la curva di viscosità la quale è stata utile per determinare la temperatura di miscelazione per ogni bitume impiegato. In particolare, entrando nel grafico con la densità ( $\eta^*$ ), s'intercetta la curva e infine, si determina la temperatura ( $T^*$ ) (Figura 2.2).

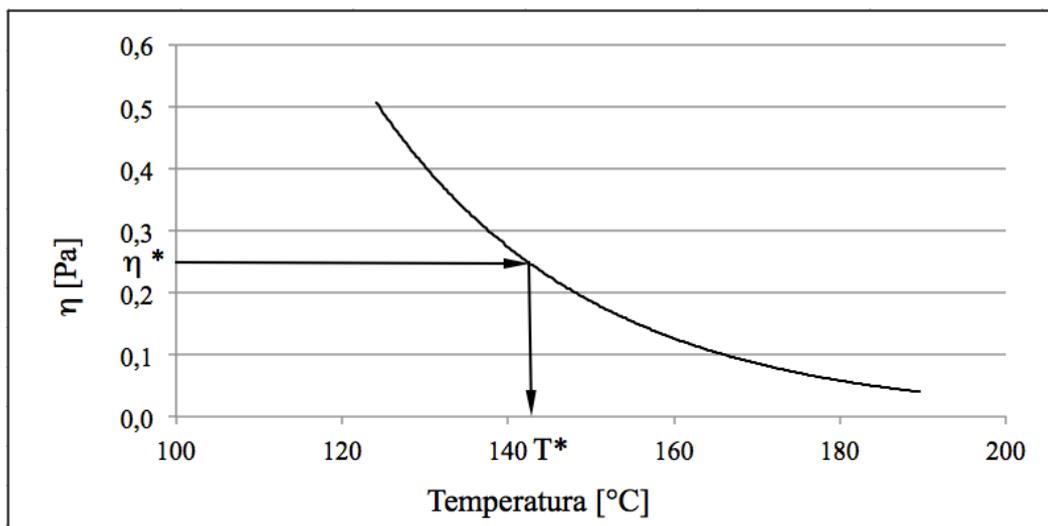


Figura 2.2: Andamento della viscosità al variare della temperatura.

- L'altra caratteristica dei bitumi che è stata esaminata in questo studio è la resistenza all'accumulo delle deformazioni permanenti dei leganti. Questa proprietà reologica è stata indagata sottoponendo il campione al test Single Shear Creep Recovery con il DSR (§3.2.3).

La Single Shear Creep Recovery è un test sviluppato da Sant'Agata, Baglieri e altri [18], con il quale si può valutare la resistenza di un legante bituminoso a resistere all'accumulo di deformazioni permanenti. Tale procedura prevede che i campioni di bitume siano sottoposti ad unico ciclo di creep-recovery, eseguito a tensione costante ( $\tau = 100$  Pa) e con temperatura e tempi di carico e scarico prefissati.

Il parametro che si ottiene da questo test è il Creep Compliance Rate (CCR), con il si ha una stima della resistenza all'ormaiamento del legante bituminoso.

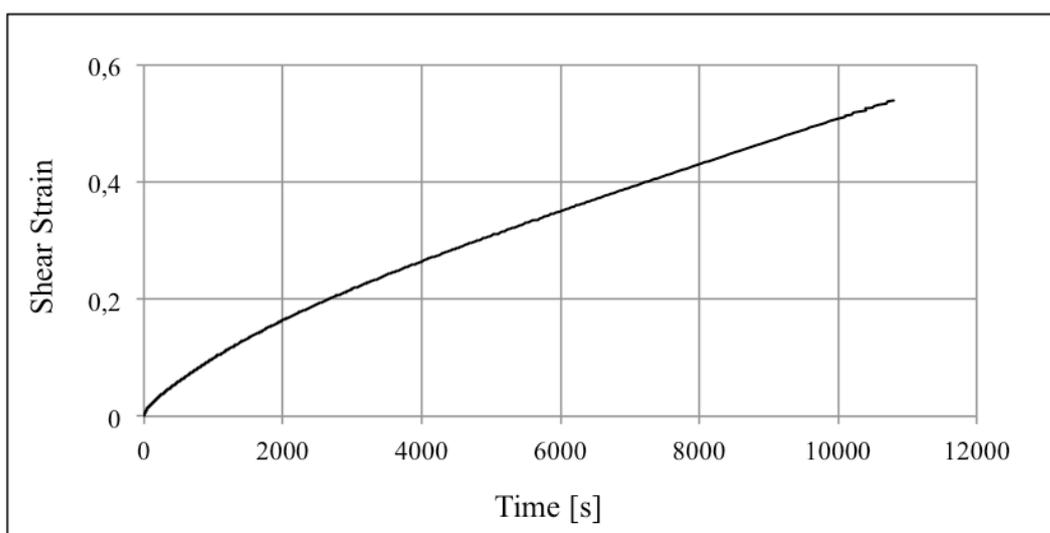


Figura 2.3: Fase di carico del test SSCR.

Il CCR è la pendenza del tratto lineare della curva di carico o Creep (Figura 2.3), quindi si può scrivere:

$$CCR = \frac{d(\gamma/\tau_0)}{dt} = \frac{dJ}{dt} \quad (8)$$

dove:

$\gamma$  = deformazione di taglio;

$\tau_0$  = tensione applicata;

J = Creep Compliance.

Tutti i bitumi prima di essere testati con il reometro sono stati invecchiati al Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) (§3.2.2), l'invecchiamento è stato necessario per indurre al materiale delle condizioni di prova peggiori, le quali saranno le stesse di quando il bitume è posto in opera. Il bitume invecchiato presenta una maggiore rigidità ma allo stesso tempo una maggiore fragilità.

### 2.3.2 Realizzazione dei provini

Gran parte del lavoro in laboratorio è stato dedicato alla formazione dei provini di conglomerato bituminoso, per i quali è stata utilizzata la stessa procedura per ognuno di essi, in modo da evitare che la produzione interferisca con i risultati dell'esperimento. Nella procedura per la realizzazione dei provini si distinguono principalmente tre fasi:

- la miscelazione;
- la compattazione;
- il carotaggio e il taglio.

#### 2.3.2.1 La miscelazione

La miscelazione è quell'operazione con cui si va a confezionare il conglomerato bituminoso. Dopo aver determinato le diverse percentuali di aggregato che costituiscono lo scheletro litico e le temperature di miscelazione per ogni bitume, durante le fasi preliminari di caratterizzazione dei materiali, si è proceduto al confezionamento del conglomerato. Per quanto riguarda la percentuale di bitume impiegata per ogni miscela, in questo studio si è deciso di confezionare il conglomerato bituminoso, per ogni tipo di bitume, con tre percentuali diverse di legante (4%, 5%, 6%) calcolate rispetto alla massa degli aggregati.

Progettate le miscele si prosegue con la miscelazione, la procedura che è stata seguita è la seguente. Inizialmente si collocano gli aggregati nel forno alla temperatura di 110°C per circa 20 ore, in modo da eliminare l'umidità residua degli aggregati. Dopo aver essiccato gli aggregati, si pesano e in seguito si dispongono all'interno del forno insieme al bitume alla temperatura di miscelazione (Figura 2.4).



Figura 2.4: Materiale pronto per essere riscaldato alla temperatura di miscelazione.

Quando il materiale raggiunge la temperatura di miscelazione, si inizia a versare nel mixer, anch'esso riscaldato alla stessa temperatura, gli aggregati, mescolando per 1 minuto tra un'aggiunta e l'altra, e il legante. In questo esperimento si è deciso di inserire nel mixer gli aggregati e il legante secondo il seguente ordine: pietrisco, graniglia, sabbia, filler e bitume.

A questo punto possiamo accendere il mixer mescolando il tutto per una durata di circa 6 minuti e controllando prima di terminare che tutti gli aggregati siano ricoperti dal bitume, se così non fosse si continua a miscelare per un altro minuto.

Ottenuta la miscela, si prelevano dei campioni di miscela per verificare il contenuto di bitume (§3.3.1) e per determinare la massa volumica teorica (§3.3.3), il resto per composto prodotto di preleva dal mixer ed è posto in dei sacchi (Figura 2.5), sui quali vi si indica le caratteristiche della miscela e la data di produzione.



Figura 2.5: Produzione della miscela e versamento nei sacchi.

### 2.3.2.2 Produzione dei campioni

Ottenuta la miscela di conglomerato bituminoso, si può passare alla produzione dei provini cilindrici. Questi campioni sono realizzati tramite compattazione con pressa a taglio giratoria (§3.3.4), ma prima di compattare, bisogna calcolare la quantità di miscela da inserire nella fustella.

La massa da porre nella fustella è funzione della MMVT della miscela, della percentuale dei vuoti geometrici che desideriamo ottenere all'interno del campione e dalle dimensioni del campione (diametro e altezza).

A seguire saranno esposti i passaggi per definire l'equazione utilizzata per definire la massa. Nota l'equazione che definisce i vuoti nel campione:

$$\%v = \frac{MMVT - \gamma_c}{MMVT}; \quad (9)$$

Dalla quale è possibile ottenere la densità del conglomerato, tenendo in considerazione che il volume del campione corrisponde a quello della fustella:

$$\gamma_c = MMVT \cdot (1 - \%v); \quad (10)$$

$$\gamma_c = \frac{M}{V} = \frac{4 \cdot M}{\pi D^2 H}; \quad (11)$$

quindi, possiamo ottenere la massa da mettere in fustella dalla seguente equazione:

$$M = \frac{\pi \cdot H \cdot D^2 \cdot MMVT \cdot (1 - \%v)}{4} \quad (12)$$

dove:

H = altezza del campione pari a 180 mm;

D = diametro della fustella pari a 150 mm;

%v = percentuale dei vuoti geometrici del campione.

Teoricamente la massa determinata da queste equazioni dovrebbe consentirci di ottenere dei campioni con la percentuale dei vuoti desiderata ma per via dell'irregolarità superficiale dei campioni cilindrici si ottiene una percentuale dei vuoti differente da quella voluta. Quindi si procede iterativamente, in altre parole, si produce il primo campione inserendo nella fustella la massa ottenuta dall'equazione ( 16 ) e si valutano i vuoti del finale campione di dimensioni 100X150, se la percentuale dei vuoti coincide con quella di target (tolleranza del 0,5%) si prende per buono, altrimenti si ripete la procedura a partire dal calcolo della massa con l'accortezza di modificare la percentuale dei vuoti (%v) in funzione del risultato ottenuto.

A questo punto, avendo determinato la massa da inserire nelle fustelle, si passa alla realizzazione del campione di dimensioni 150x180 da cui sarà estratto, dal suo interno, il campione di dimensione 100x150 detto anche "core".

Come anticipato in questo paragrafo, produrre campioni con le caratteristiche volumetriche prefissate è abbastanza difficile, quindi per ogni miscela sono stati prodotti una quantità di provini di numero superiore a quelli richiesti, dai quali si sono scelti due campioni con percentuale dei vuoti pari al 4% e due con percentuale pari al 6%, concedendoci un errore dello 0,5%.

### 2.3.2.3 Il carotaggio e il taglio

Il carotaggio e il taglio dei campioni cilindrici, con diametro di 150 mm e altezza di 180 mm, sono due step importanti per la buona riuscita dell'indagine sperimentale. Il fine di queste operazioni è di ottenere campioni cilindrici più piccoli con diametro di  $100 \pm 2$  mm e altezza di  $150 \pm 2,5$  mm. Tali dimensioni sono prescritte nel protocollo usato per il Flow Number AASHTO TP79-19 [19].

I campioni, compattati e raffreddati a temperatura ambiente, sono posti sulla base della macchina carotatrice e in seguito bloccati al fine di evitare che il campione possa spostarsi durante il carotaggio. Avviata la macchina, il carotaggio avviene per mezzo di un cilindro cavo, in acciaio con circonferenza di base diamantata, il quale si abbassa manualmente cercando di mantenere la velocità costante fino a raggiungere la base del campione (Figura 2.6 sinistra).



Figura 2.6: Operazione di carotaggio e taglio campione.

Il provino che si ottiene da questo primo step ha dimensioni 100 x 180 mm, al fine di ottenere un'altezza di 150 mm si procede con il taglio (Figura 2.6 destra). Questa fase consiste nel tagliare 20 mm dalla base e 10 mm dalla cima (Figura 2.7), così da ottenere un campione cilindrico con caratteristiche quasi omogenee.



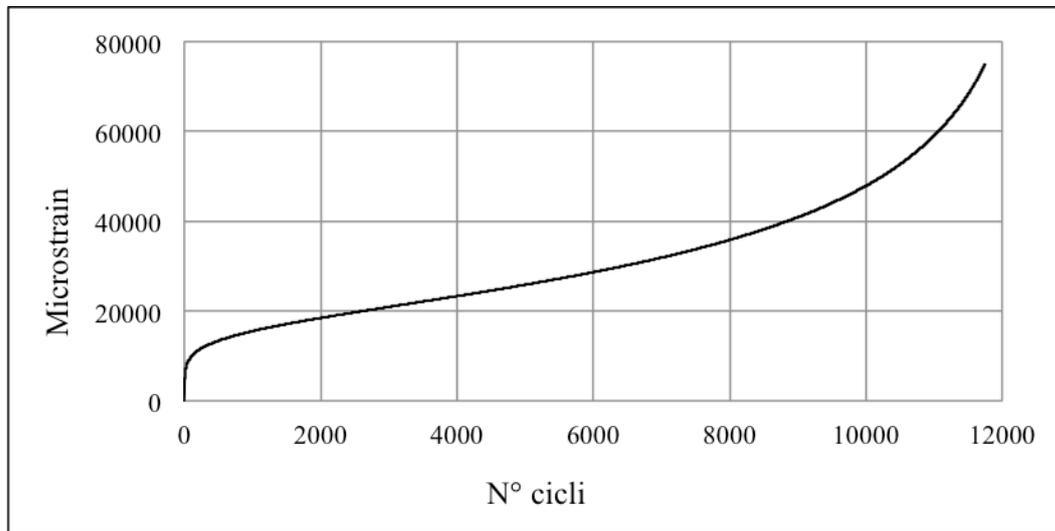
Figura 2.7: Campione carotato e tagliato.

Questa seconda fase è molto importante perché, oltre a ottenere l'altezza esatta, bisogna garantire la planarità delle facce parallele al fine di evitare sollecitazioni di taglio durante il test del Flow Number.

### 2.3.3 Test dei provini

Tutti i provini cilindrici di dimensioni 100x150 sono stati testati con Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) (§3.3.7) per valutarne il Flow Number (FN), con tale parametro si valuta l'ormaiamento (accumulazione delle deformazioni verticali permanenti) nei conglomerati bituminosi. Tale parametro è ottenuto dalla suddetta prova la quale prevede l'utilizzo di un campione cilindrico di 100 mm di diametro e di 150 mm di altezza, ottenuto estraendolo dal cuore di un campione cilindrico di 150 mm di diametro e 180 mm di altezza compactato con la pressa a taglio girevole. I provini, dopo essere stati condizionati alla temperatura di prova all'interno di una camera di condizionamento per 5 ore a causa della mancanza del "dummy specimen" che con il quale si dovrebbe andare a valutare il tempo di condizionamento, sono posti all'interno della cella triassiale anch'essa precedentemente condizionata alla temperatura di prova. Dopo aver posizionato il provino perfettamente centrato tra i due piatti di acciaio all'interno della cella si dà inizio alla prova di Flow Number. A questo punto il provino è soggetto ad un carico impulsivo ciclico di 600 kPa con frequenza di 1 Hz, in altre parole, ogni ciclo è costituito da 0,1 s di carico e 0,9 s di riposo. La prova termina quando le deformazioni verticali raggiungono i 75000 microstrain. Il risultato di questo

processo è visualizzabile diagrammando la deformazione assiale cumulata con il corrispondente numero di cicli (Figura 2.8).



**Figura 2.8: Curva di Flow Number.**

Il Flow Number è definito come il punto nel quale la variazione delle deformazioni assiali cumulate raggiunge il valore minimo. Si ottiene differenziando la curva delle deformazioni verticali cumulate rispetto ai cicli di carico e ricercando il valore minimo. Esistono diversi algoritmi per identificare il Flow Number, e due di questi sono implementati nell'AMPT:

1. Smoothed central difference;
2. Francken model.

Nell'algoritmo "smoothen central difference" la derivata ad ogni punto è calcolata usando i dati di deformazioni grezzi e l'equazione ( 13 ).

$$\frac{d(\varepsilon_p)_i}{dN} \cong \frac{(\varepsilon_p)_{i+\Delta N} - (\varepsilon_p)_{i-\Delta N}}{2\Delta N} \quad (13)$$

dove:

$\frac{d(\varepsilon_p)_i}{dN}$  = variazioni delle deformazioni permanenti per il ciclo i;

$(\varepsilon_p)_{i-\Delta N}$  = deformazioni permanenti al ciclo  $i-\Delta N$ ;

$(\varepsilon_p)_{i+\Delta N}$  = deformazioni permanenti al ciclo  $i+\Delta N$ ;

$\Delta N$  = intervallo di campionamento.

La variazione delle deformazioni permanenti per ogni ciclo in questo algoritmo è spalmata usando una media mobile della variazione di deformazioni permanenti al punto i considerando un intervallo  $[i-2N; i+2N]$ . I test con questo algoritmico

indicano che il Flow Number è sensibile all'intervallo di campionamento usato. Inoltre, per intervalli di campionamento pari a 1, il valore di Flow Number da ripetuti test sullo stesso materiale, è altamente variabile a causa del rumore elettrico sul segnale del trasduttore di deformazione.

Con il "Francken model" si ha un approccio più stabile per il calcolo della variazione di deformazioni permanenti e del Flow Number. Questo modello sviluppato dall'equazione ( 14 ) è una combinazione di un modello di potenza e di esponenziale ed è in grado di adattarsi a diverse curve di deformazione permanenti.

$$\varepsilon_p \cong An^B + C(e^{Dn} - 1) \quad (14)$$

dove:

- $\varepsilon_p$  = deformazione permanente assiale;
- $n$  = numero di cicli;
- $A, B, C$  e  $D$  = coefficienti di calibrazione.

I coefficienti di calibrazione sono determinati da ottimizzazione numerica. Ottenuti tali parametri, si possono determinare analiticamente la derivata prima ( 15 ) e la derivata seconda ( 16 ) del Francken model.

$$\frac{d\varepsilon_p}{dn} \cong ABn^{B-1} + CDe^{Dn} \quad (15)$$

$$\frac{d^2\varepsilon_p}{dn^2} \cong AB(B-1)n^{B-2} + CD^2e^{Dn} \quad (16)$$

Il Flow Number è il ciclo in cui la derivata seconda cambia da negativa a positiva.

Usando il Francken model con intervallo di campionamento pari a 1 si ottiene una standardizzazione del calcolo del Flow Number che porta a ridurre la variabilità nei test [19].

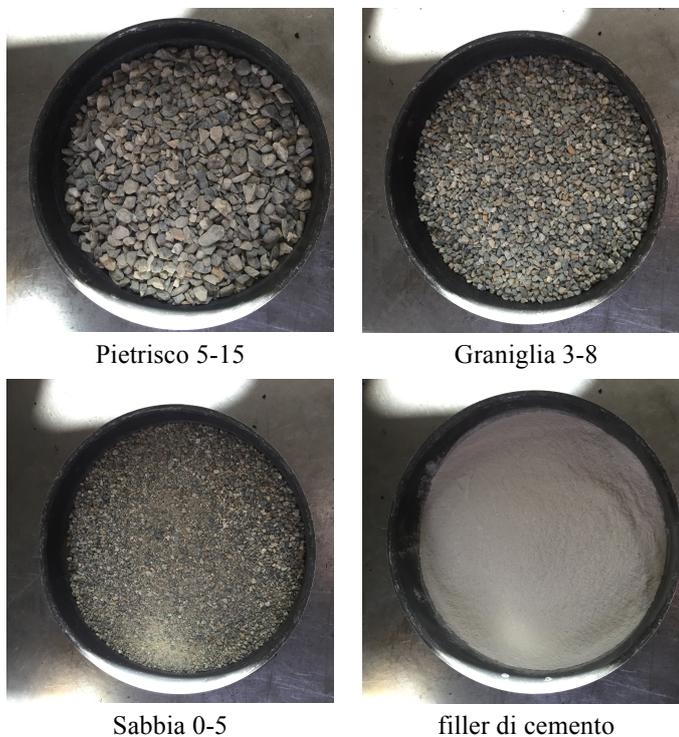


## Capitolo 3

### MATERIALI E METODI

#### 3.1 Gli aggregati

Il materiale inerte utilizzato nello studio è stato fornito completamente da una sola Cava, questo affinché tutte le prove potessero essere realizzate mantenendo invariata la tipologia di aggregati utilizzati. Tutto il materiale è di tipo frantumato, ossia l'inerte lapideo presenta spigoli vivi e forme taglienti. Per la realizzazione delle miscele studiate sono state utilizzate 3 frazioni granulometriche più il filler.



**Figura 3.1: Aggregati utilizzati nello studio.**

### 3.1.1 Analisi granulometrica

Per ogni singola frazione, utilizzando la metodologia fornita dalla Normativa UNI EN 993-1 [20], si è ricostruita la curva granulometrica tramite l'analisi granulometrica per setacciatura.

La presente Norma stabilisce un metodo per la determinazione della distribuzione granulometrica degli aggregati mediante setacciatura, fino a una dimensione nominale minima di 0,063 mm, escluso il filler.

La prova consiste nel dividere, per mezzo di una serie di setacci, un materiale in numerose classi granulometriche di dimensioni decrescenti.

Le dimensioni delle maglie e il numero dei setacci sono scelti in base alla natura del campione ed alla precisione richiesta. Nel nostro caso si è scelta la serie in mostrata in Tabella 3.1.

**Tabella 3.1: Serie di setacci utilizzati per lo studio della granulometria.**

Diametro setaccio [mm]									
20	16	12,5	10	8	4	2	1	0,5	0,063

I setacci di prova devono avere aperture quadrate, conformi alla EN 933-1. Per aperture di dimensioni uguali o superiori ai 4 mm devono essere di lamiera perforata con fori quadrati, mentre con apertura inferiore di tela metallica.

La massa del campione di prova deve essere scelta in funzione della dimensione massima dell'aggregato, come riportato in Tabella 3.2.

**Tabella 3.2: Massa della porzione di prova.**

Dimensione massima dell'aggregato [mm]	Massa della porzione di prova (minimo) [kg]
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

Una volta selezionato il materiale si deve fare essiccare portandola ad una temperatura di  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  per il tempo sufficiente affinché il valore della massa di materiale riscaldato rimanga costante, lasciando poi che si raffreddi. A questo punto si pesa il campione e si registra la massa M1. Si procede poi al lavaggio del

campione per ottenere una completa separazione delle frazioni fini ( $< 0,063$  mm), si essicca nuovamente il campione di frazione superiore e si ottiene, una volta raffreddato, la massa  $M_2$ . In seguito si versa il contenuto nella colonna di setacci sovrapposti in base alla serie di aperture scelta, dal maggiore al minore in ordine di dimensione decrescente di maglia e si procede con agitazione meccanica tramite base vibrante per 15 minuti.

In seguito, si rimuovono i setacci, partendo da quello che presenta apertura maggiore, e si pesa il trattenuto di ognuno di essi, registrando le varie masse, compresa quella passante al setaccio  $0,063$  mm.

Lo step successivo è quello della pesatura, seguendo quanto dice la norma si procede determinando la massa del trattenuto nello staccio con maglia di dimensione più grande e registrarla come  $R_1$ ; quindi proseguire con la stessa operazione per tutti gli stacci che si trovano nella colonna per ottenere le masse delle diverse parti di materiale trattenuto e registrate tali masse come  $R_2, R_3, \dots, R_i, \dots, R_n$ . la fase della pesatura si conclude registrando la massa del materiale vagliato rimasto nel recipiente alla base della pila dei setacci e registrarla con  $P$ .

Dopo la pesatura si passa al calcolo all'elaborazione dei dati registrati. Per prima cosa si calcola la massa del trattenuto su ciascun setaccio, espressa come percentuale della massa essiccata d'origine  $M_1$  tramite l'equazione ( 17 ).

$$\% t_i = \frac{R_i \cdot 100}{M_1} \quad (\text{trattenuto percentuale}) \quad (17)$$

In seguito, si calcola la percentuale di trattenuto cumulato rispetto alla massa essiccata d'origine del passante attraverso ogni staccio, escluso quello di  $63 \mu\text{m}$ .

$$\% T = \sum_{i=1}^n \% t_i = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \cdot 100}{M_1} \quad (\text{trattenuto cumulato in percentuale}) \quad (18)$$

Per risalire alla percentuale delle particelle fini ( $f$ ) che passano attraverso lo staccio di  $63 \mu\text{m}$  si utilizza la seguente equazione:

$$\% f = \frac{(M_1 - M_2) + F}{M_1} \cdot 100 \quad (19)$$

dove:

$M_1$  = massa essiccata della porzione di prova, in kilogrammi;

$M_2$  = massa essiccata del trattenuto sullo staccio di  $63 \mu\text{m}$ , in kilogrammi;

$F$  = massa del passante che rimane nel recipiente in fondo, in kilogrammi.

### 3.2 Il bitume

Il bitume è il residuo della distillazione sottovuoto del petrolio, costituito da miscele di idrocarburi e di altri composti organici complessi ad elevato peso molecolare; il bitume costituisce la matrice legante del conglomerato bituminoso, usato per le pavimentazioni stradali ed aeroportuali. Il bitume è un prodotto termoplastico, che ha una viscosità che varia con la temperatura; i bitumi sono materiali che si ritrovano allo stato solido o semisolido in natura o più comunemente sono ottenuti dalla raffinazione del petrolio.

I leganti bituminosi che sono stati usati in questa indagine sperimentale sono stati selezionati per coprire un ampio spettro delle proprietà visco-elastiche, con lo scopo di enfatizzare l'efficacia dei diversi metodi di prova nel distinguere le loro caratteristiche prestazionali. Tutti i materiali sono stati forniti da impianti di produzione italiani.

I bitumi selezionati sono:

- due bitume tradizionali (B\_70-100 e B\_50-70) con grado di penetrazione rispettivamente 50/70 e 70/100, i quali sono stati campionati da raffinerie operanti su greggi di origine e fonte diverse;
- un bitume modificato con polimero SBS, stirene-butadiene- stirene, (B\_SBS) secondo lo schema di trattamento non divulgato adottato dall'impianto che ha fornito il materiale.

Il bitume modificato è un legante bituminoso le cui caratteristiche chimico-fisiche sono state modificate con l'aggiunta di particolari polimeri. Rispetto a quello "Tal Quale", il bitume modificato consente:

- maggiore intervallo di elastoplasticità;
- migliore comportamento alle alte ed alle basse temperature;
- maggiore viscosità;
- maggiore resistenza al carico e alla fatica;
- aumento della coesione e adesione agli inerti;
- miglioramento della resistenza all'invecchiamento.

Di conseguenza, i miglioramenti del legante bituminoso si riflettono sulle miscele, consentendo di ottenere conglomerati bituminosi che dimostrano:

- maggiore rigidità;
- maggiore resistenza alle deformazioni permanenti;
- maggiore resistenza alla propagazione di fessure;
- maggiore resistenza all'acqua;
- maggiore resistenza al refluentamento;
- maggiore durata.

### 3.2.1 Viscosimetro rotazionale

Il viscosimetro rotazionale è lo strumento con il quale è possibile misurare la viscosità in diverse condizioni di prova, come temperatura e velocità angolare. Il suo funzionamento è basato sulla determinazione del momento torcente trasmesso da un corpo posto in rotazione all'interno di un fluido [21]. Nel viscosimetro a cilindri coassiali, un cilindro contenuto in un altro cilindro, è posto in rotazione per mezzo di una coppia motrice ( Figura 3.2 sinistra). Si misura la velocità angolare del cilindro di raggio maggiore, il cui valore dipende dal momento resistente offerto dalle tensioni tangenziali di attrito trasmesse dal fluido contenuto nello spazio tra i due cilindri. In questo studio di ricerca si è utilizzato il viscosimetro rotazionale prodotto dalla casa costruttrice BROOKFIELD ( Figura 3.2 destra). Esso è utilizzato per andare a definire la risposta reologica di materiali impiegati in ambito stradale.

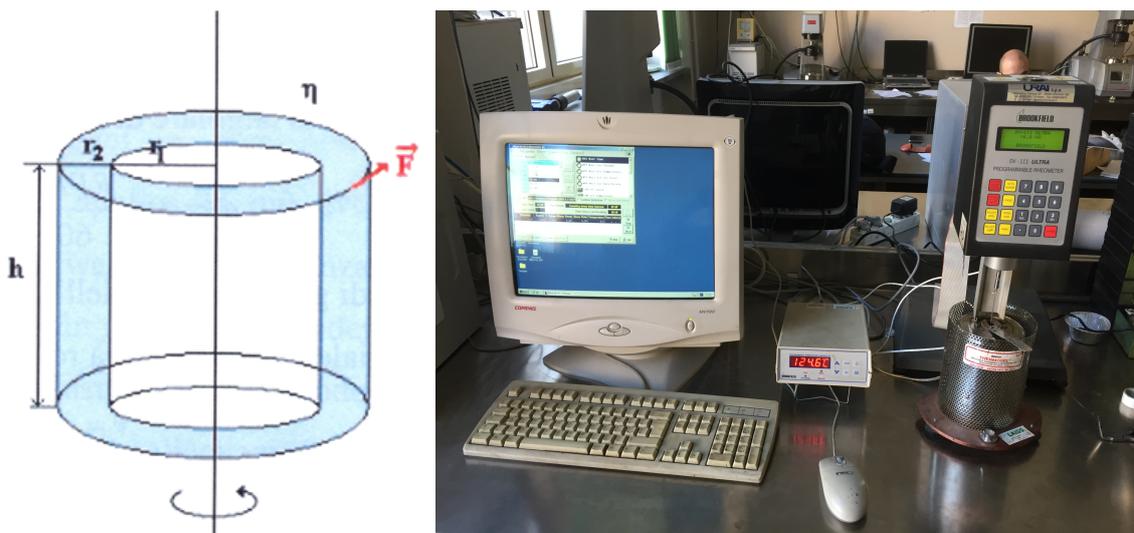


Figura 3.2: Cilindri coassiali e viscosimetro Brookfield.

Il principio di funzionamento di questo viscosimetro, consiste nel far ruotare a una velocità predefinita (prova a controllo di spostamento) una girante di forma cilindrica (spindle), collegata al motore attraverso una molla calibrata, all'interno di un campione di materiale precedentemente colato nel cilindro esterno, la quantità di legante bituminoso da utilizzare è funzione del tipo di girante usata.

La resistenza viscosa incontrata è misurata con un trasduttore rotazionale. La viscosità (in centipoise) è determinata in funzione della velocità rotazionale, della dimensione e forma del girante, e della forza torcente della molla calibrata.

### 3.2.2 Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)

Il test RTFOT fa riferimento alla Norma 12607-1 [22], come prescritto nella norma si colano  $35\text{g} \pm 0,5\text{g}$  di bitume all'interno dei bicchieri, mentre si versa il bitume si devono ruotare i bicchieri in modo da formare con il bitume un film che copra la superficie interna degli stessi (Figura 3.3 sinistra). Terminata questa fase preliminare, si possono inserire i bicchieri all'interno di un forno a tamburo rotante (Figura 3.3 destra) in precedenza riscaldato alla temperatura di  $163^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 3.3: Bicchieri cilindrici e forno usato per RTFOT.**

Durante la disposizione dei bicchieri all'interno del forno, si assiste alla diminuzione della temperatura di prova, affinché il test possa considerarsi valido la temperatura all'interno del forno deve aumentare e raggiungere nuovamente i  $163^{\circ}\text{C}$  entro 15 minuti.

La prova inizia quando la temperatura registrata dal forno è pari a 163°C e ha una durata di 75 minuti. I campioni all'interno del forno ruotano mentre sono soggetti a un getto d'aria controllato pari a 4000 ml per minuto.

Terminato il test, si procede con il recupero del bitume, mediante una spatola, dai bicchieri. La quantità di bitume recuperato deve essere almeno il 90% di quello colato nei bicchieri.

### **3.2.3 Dynamic Shear Rheometer**

L'indagine reologica è stata condotta utilizzando un Dynamic Shear Rheometer (DSR) MCR 302 Anton Paar Inc., equipaggiato con un dispositivo di controllo delle tensioni con cuscinetto d'aria dotato di unità sincrono a magnete permanente (coppia minima 1/4 0,1  $\mu\text{Nm}$ , risoluzione di coppia, 0,1  $\mu\text{Nm}$ ) ed un encoder incrementale ottico per la misurazione di rotazioni angolari (risoluzione, 1  $\mu\text{rad}$ ).

Il DSR è uno strumento che permette, a temperatura controllata, di applicare una coppia sollecitante  $T$ , variabile nel tempo secondo una legge sinusoidale, con velocità angolare  $\theta$  a un provino di materiale con geometria avente simmetria assiale. Il DSR, quindi, permette di determinare le proprietà del materiale come il modulo complesso  $|G|$  e la fase  $\delta$  tramite una relazione, con il quale noti il momento torcente, la velocità angolare e le dimensioni del campione di bitume (raggio e altezza), di valutare le tensioni e le deformazioni tangenziali  $\tau$  e  $\gamma$  applicate al campione. Il DSR permette analisi sia a sollecitazione controllata sia a deformazione controllata, nella nostra indagine abbiamo lavorato in regime di sollecitazione controllata.

La geometria che è stata utilizzata per i test è caratterizzata da piastre parallele di 25 mm con un gap di 1,0 mm. Per ogni test sono state eseguite almeno due repliche e per l'analisi sono stati considerati i dati medi.

La preparazione del campione segue la seguente procedura: si cola il bitume sul piatto inferiore, in precedenza portato alla temperatura di prova; in seguito, il piatto superiore del reometro è stato abbassato comprimendo il campione; a questo punto viene rimosso il materiale in eccesso per mezzo di una spatola metallica; infine, si conclude questa procedura riducendo il gap tra i piatti fino al valore richiesto per il test.

### 3.3 Il conglomerato bituminoso

Il conglomerato bituminoso è una miscela costituita principalmente da aggregati e da un legante, in precedenza trattati rispettivamente nei paragrafi 3.1 e 3.2 di questo elaborato.

Al fine di ottenere un più grande spettro di dati da poter confrontare, si è ritenuto necessario realizzare nove miscele differenti, le quali differiscono tra loro per contenuto di bitume e percentuale di vuoti:

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

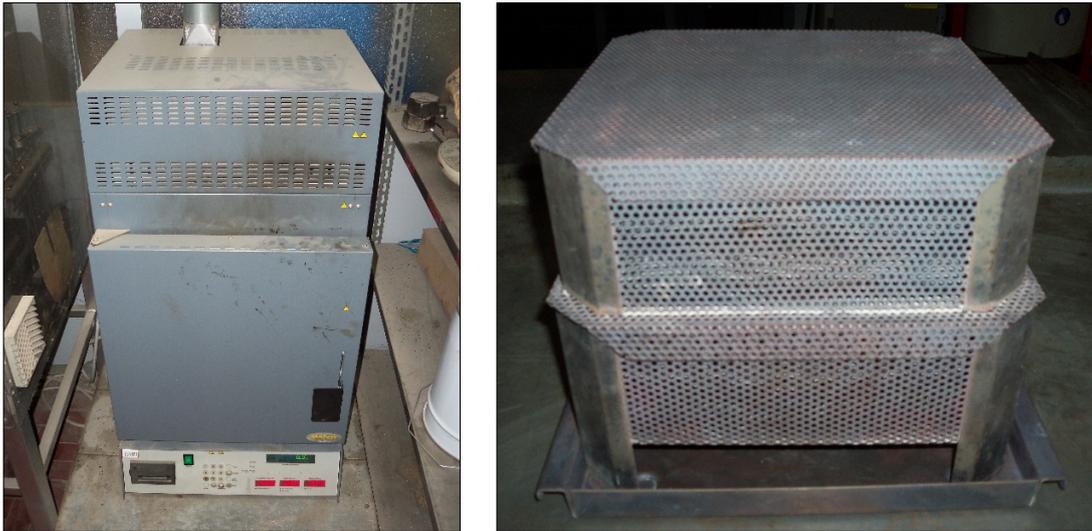
Le miscele che sono state confezionate con la stessa percentuale di bitume si differenziano tra loro per l'impiego dei tre diversi bitumi elencati al paragrafo §3.2, ovvero, i due bitumi tradizionali con grado di penetrazione 50/70 e 70/100 e il bitume modificato con SBS. Per ognuna delle nove miscele di conglomerato sono stati realizzati quattro campioni: due con percentuale dei vuoti pari al 4% e due con percentuale dei vuoti del 6%.

Dunque, per questa indagine sperimentale sono stati realizzati e quindi testati 36 provini cilindrici di dimensioni 100 mm di diametro e 150 mm di altezza.

In seguito sono descritte le prove eseguite, secondo quanto prescritto nelle normative che ne stabiliscono lo scopo, le modalità e le strumentazioni da utilizzare.

#### 3.3.1 Contenuto di bitume

La determinazione della quantità di legante di una miscela bituminosa avviene tramite ignizione, seguendo la norma UNI EN 12697-39 [23]. La prova richiede l'utilizzo di un cestello di acciaio e di un forno (Figura 3.4 sinistra) capace di raggiungere i 540°C, provvisto di una bilancia interna in grado di monitorare le variazioni di peso subite dal campione durante lo svolgersi del processo. La prova prevede le seguenti fasi:



**Figura 3.4: Forno Carbolite e cestello d'acciaio utilizzato per la prova.**

- Preparazione del campione

Il campione è posto nel cestello d'acciaio (Figura 3.4 destra), opportunamente tarato (T) e dotato di due piani sovrapposti per consentire una distribuzione migliore del materiale. La quantità richiesta dalla prova è stabilita dalla seguente tabella:

**Tabella 3.3: Quantitativi di materiale prescritti.**

<b>Dimensione massima degli aggregati</b>	<b>Massa del campione</b>	<b>Variazione massima entro la quale la massa si può ritenere costante</b>
[mm]	[g]	[g]
4	1000 a 1400	0,15
5,6 o 6,3 o 8 o 10	1000 a 1600	0,15
11,2 o 12,5 o 14 o 16	1000 a 1700	0,20
20 o 22,4	1000 a 2400	0,25
31,5	1000 a 3000	0,30
40 o 45	1000 a 4000	0,40

Tutte le prove sono state condotte con campioni di conglomerato aventi un peso pari a circa 1000 g. Il cestello, con il materiale al suo interno, è in seguito ripesato ( $M_i$ ).

- Esecuzione della prova

Il campione inserito nel forno alla temperatura di 540°C, dando così il via al processo di combustione che termina quando la bilancia interna non registra più variazioni di massa. Il tempo oscilla tra i 20 e i 30 minuti, a seconda ovviamente del quantitativo di legante e di miscela.

- Estrazione del campione e pesatura

Il cestello con il campione, estratto dal forno, (figura 3.10 destra) è raffreddato a temperatura ambiente così da poter essere correttamente pesato ( $M_f$ ). Infine, tramite la seguente equazione si ottiene la percentuale di legante rispetto alla massa degli aggregati:

$$\%B = \frac{(M_{i-T}) - (M_{f-T})}{(M_{f-T})} \cdot 100 = \frac{\text{peso bitume [kg]}}{\text{peso aggregati [kg]}} \cdot 100 \quad (20)$$

### 3.3.2 Analisi granulometrica degli aggregati

L'analisi granulometrica definisce la distribuzione dimensionale delle particelle del campione e viene effettuata mediante la tecnica della vagliatura. Poiché sono state condotte indagini sia sulle varie classi di aggregato che sulla frazione recuperata dopo l'estrazione del legante, ci si attiene alla norma UNI EN 12697-2 [24].

Pesatura, lavaggio ed essiccamento degli aggregati

La prova è condotta sul materiale recuperato dalla Carbolite che è visivamente controllato per verificare che non sia rimasto del legante; successivamente, viene accuratamente estratto dal cestello, evitando perdite. In seguito, si procede al lavaggio mediante due setacci aventi dimensioni 2 e 0,063 mm impilati l'uno sull'altro, in maniera tale eliminare il filler. Si versa il contenuto del recipiente nello staccio superiore da 2 mm e si prosegue a lavare fino a quando le acque, passando attraverso lo staccio inferiore da 0,063 mm, non escano limpide. In seguito si essicca il residuo trattenuto a una temperatura di  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ .

I setacci sono impilati gli uni sugli altri, con dimensione delle maglie decrescente dall'alto verso il basso (Figura 3.5 sinistra). Le dimensioni delle maglie e il numero degli stacci sono stati scelti considerando sia la natura del campione a sia le specifiche introdotte con il mix design. Il campione essiccato da analizzare è inserito dall'alto nella pila e il tutto è poi posto in un agitatore meccanico (Figura 3.5 destra) che mediante vibrazione lo fa cadere verso il basso.

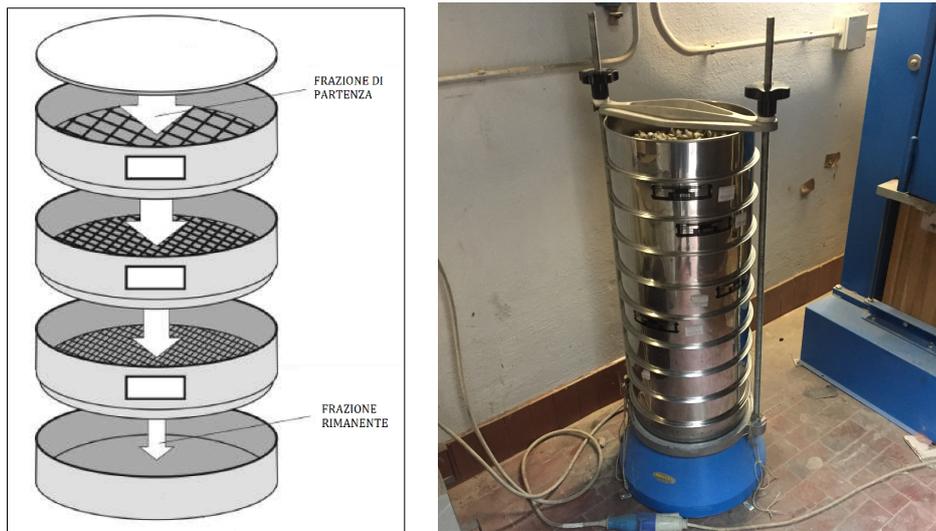


Figura 3.5: Schema di funzionamento della pila di setacci su agitatore meccanico.

Il processo di setacciatura, avviato il setacciatore, può avere una durata variabile tra i 10 e 30 minuti, in funzione della pezzatura, della natura e composizione mineralogica degli aggregati analizzati. In seguito si pesa la quantità di campione a ogni setaccio (trattenuto) e si registra come  $R_1, R_2 \dots R_i \dots R_n$ ; viene pesata anche la massa del materiale vagliato rimasto nel recipiente alla base della pila registrandola come  $P$ . Al termine della pesatura si procede con il calcolo delle masse trattenute in ogni setaccio espresse come percentuale della massa essiccata d'origine  $M_1$  tramite l'equazione ( 21 ).

$$\% t_i = \frac{R_i \cdot 100}{M_1} \quad (\text{trattenuto percentuale}) \quad (21)$$

Infine si calcola la percentuale di trattenuto cumulato e il passante rispetto alla massa essiccata d'origine di ogni staccio.

$$\%T = \sum_{i=1}^n \% t_i = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \cdot 100}{M_1} \quad (\text{trattenuto cumulato in percentuale}) \quad (22)$$

$$\%P = 100 - \%T \quad (\text{Passante progressivo in percentuale}) \quad (23)$$

Infine, riportando in un grafico semi-logaritmico il passante progressivo ( $P$ ) in funzione dell'apertura del vaglio, si costruisce la curva granulometrica del campione analizzato.

### 3.3.3 Massima massa volumica teorica (MMVT)

La massima massa volumica teorica è una caratteristica intrinseca della miscela ed è indipendente dal suo grado di addensamento; per questo motivo è importante porre l'accento sull'aggettivo "teorica" poiché è impossibile, per ragioni fisiche, raggiungere la condizione ultima di addensamento limite, ossia quella a vuoti nulli.

La prova, regolata dalla norma UNI EN 12697-5\_2003, fa riferimento a tre tipi di procedimento (volumetrico, idrostatico e matematico) ma nel presente lavoro si è fatto riferimento unicamente al metodo volumetrico. La procedura prevista richiede le seguenti operazioni:

- Strumentazione di prova

Lo strumento impiegato per la realizzazione della prova è il picnometro (Figura 3.6 sinistra). Esso consiste in una beuta alla quale è accoppiato un tappo con un beccuccio, entrambi di vetro e di dimensione e volume noti. Tappo e picnometro sono identificati da una lettera per evitare accoppiamenti errati.

- Prelievo e preparazione del materiale

La prova è eseguita su quattro campioni dello stesso materiale in modo da mediare i risultati, ricavando un unico valore rappresentativo. Occorre dunque prelevare dal materiale sciolto quattro campioni di circa 600 g (Figura 3.6 destra) per procedere poi alla successiva operazione di "sgranamento" che consiste nel separare fisicamente i grani della miscela di conglomerato bituminoso. Se la miscela non è sufficientemente morbida, la norma suggerisce di riscaldare il materiale a una temperatura non maggiore di 110°C. I campioni quindi devono essere staccati e separati in granuli e agglomerati grossolani che, tuttavia, non devono essere di dimensioni maggiori di 6 mm.



Figura 3.6: Picnometro vuoto e campioni di conglomerato bituminoso.

- Riempimento dei picnometri con il materiale e pesatura

I picnometri sono quindi riempiti con le quantità di materiale in precedenza indicate (Figura 3.7 sinistra), procedendo poi alla pesatura degli stessi comprensivi di tappi e materiale.

- Riempimento dei picnometri con acqua e disaerazione

Questa fase prevede il riempimento dei picnometri con acqua distillata disaerata in quantità tale che il pelo libero sia posto a circa un centimetro dal materiale, per rendere più agevole la disaerazione (Figura 3.7 destra). Tramite un'apparecchiatura si aspira l'aria intrappolata tra i grani del materiale sciolto e a eliminare quella ancora presente nell'acqua. La disaerazione richiede circa quarantacinque minuti, durante questa fase è necessario scuotere adeguatamente e con molta attenzione il fondo dei picnometri per smuovere il materiale e facilitare l'espulsione dell'aria residua.



Figura 3.7: Picnometro riempito con materiale e operazione di disaerazione.

- Riempimento totale dei picnometri con acqua e pesatura

Terminata la disaerazione, i picnometri vengono riempiti con acqua distillata e disaerata, evitando la formazione di bolle che vanificherebbero l'operazione precedente. Si pongono quindi i tappi sui picnometri e si termina il riempimento, creando i menischi sui beccucci. Quindi si pesano i picnometri comprensivi di materiale, acqua e tappi e si rileva poi della temperatura dell'acqua tramite un termometro.

- Calcolo della MMVT

Avendo a disposizione tutti i dati, è possibile calcolare la massima massa volumica teorica dei campioni applicando la seguente formula:

$$\rho_{mw} = \frac{m_2 - m_1}{V_p - \left(\frac{m_3 - m_2}{\rho_w}\right)} \quad (24)$$

dove:

$\rho_{mw}$  = massima massa volumica teorica del materiale in  $\text{g/dm}^3$ ;

$m_1$  = massa del picnometro + tappo in g;

$m_2$  = massa del picnometro + tappo + materiale in g;

$m_3$  = massa del picnometro + tappo + materiale + acqua in g;

$V_p$  = volume del picnometro in  $\text{dm}^3$ ;

$\rho_w$  = massa volumica dell'acqua in funzione della temperatura in  $\text{g/dm}^3$ .

Il valore rappresentativo della MMVT è dato dalla media dei valori ottenuti dai quattro campioni testati.

### 3.3.4 Compattazione con pressa a taglio giratorio

La pressa a taglio giratorio (Figura 3.8) è uno strumento nato tra gli anni ottanta e novanta nell'ambito del programma SHRP, che consente di ottenere dei provini di conglomerato compattato, simulando le proprietà fisicomeccaniche di carote prelevate in situ da pavimentazioni realizzate con la stessa miscela. Questo avviene perché, durante il processo di addensamento con tecnica giratoria, il conglomerato bituminoso subisce una continua riorganizzazione interna dei suoi costituenti che lo porta, come avviene in opera, ad assumere configurazioni corrispondenti a strutture via via più dense.

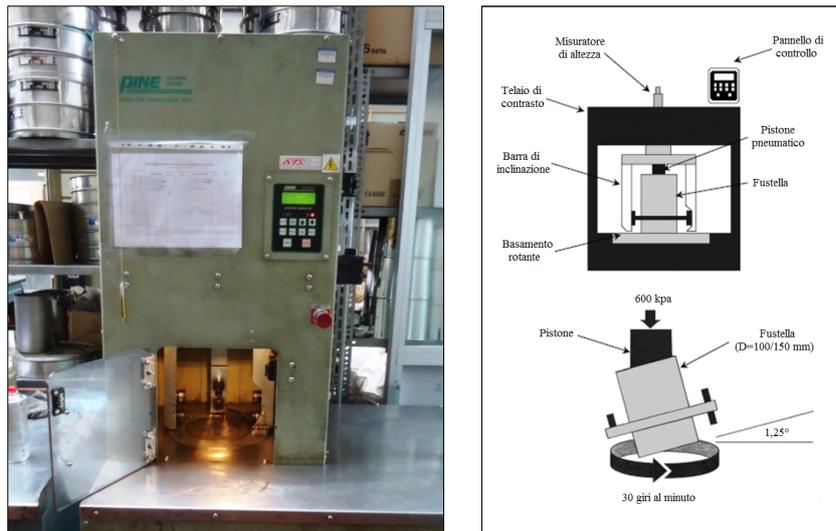


Figura 3.8: Pressa a taglio giratorio utilizzata e schema di funzionamento.

Nell'ambito di questo lavoro di tesi la pressa giratoria è stata utilizzata per confezionare campioni da 150 mm di diametro.

La procedura di compattazione si attiene alla norma UNI EN 12697-31 [25] e prevede le seguenti operazioni.

- Preparazione della fustella

La prima fase consiste nel riscaldare la fustella cilindrica d'acciaio con relativi piatti e il materiale portandolo alla temperatura di compattazione ( $140^{\circ}$  per i due bitumi tradizionali e  $155^{\circ}\text{C}$  per il bitume modificato con SBS); in seguito dopo aver collocato il piatto inferiore e un filtro separatore alla base della fustella, al fine di agevolare l'estrazione del campione, si procede all'introduzione del materiale, la cui massa ( $M$ ) è stata calcolata con la seguente equazione:

$$M = \frac{MMVT (1 - \%v_{geo.})}{v} \quad (25)$$

dove:

MMVT = massima massa volumica teorica;

$\%v_{geo.}$  = percentuale dei vuoti geometrici del campione.

$V = (D/2)^2 \cdot \pi \cdot h$  (volume del campione con  $D = 150$  mm).

Ultimata l'operazione di riempimento della fustella, si posiziona un altro filtro e il piatto superiore; dunque si ripone la fustella piena nel forno alla temperatura di compattazione dove rimane per 60 minuti.

- Configurazione della macchina e compattazione

La fustella dopo essere stata condizionata nel forno per 60 minuti viene inserita all'interno della camera della macchina, iniziando il processo di compattazione. Il sistema idraulico della pressa giratoria fa ruotare il campione a una velocità di 30 giri/min, con un'inclinazione rispetto all'asse verticale di  $1,25^\circ$ . Tramite questa macchina la compattazione del campione può avvenire principalmente in due modi, in altre parole a numero di giri o ad altezza controllata. Nel primo caso si prevede di impostare i giri limite, ovvero il numero di rotazioni che la macchina deve effettuare durante la prova, invece, nel secondo caso la macchina schiaccia il campione fino al raggiungimento di una prefissata altezza, in questo caso si registrano il numero di giri con relativa altezza fino al termine della prova. Questa modalità è stata impiegata per confezionare di provini dai quali estrarre i campioni da testare con l'AMPT.

- Registrazione dei dati

La macchina registra, attraverso un sistema di rilevazione automatico, l'abbassamento subito dal materiale in funzione del numero dei giri e immagazzina i dati tramite il computer a essa collegato.

- Estrusione del provino compattato

Terminato il processo di compattazione, la fustella è estratta dalla cella di carico e fissata al piano di lavoro della macchina con tre ganasce. Dal basso un pistone idraulico permette al campione compattato di essere sfilato dalla fustella (Figura 3.9 sinistra), in maniera tale da poter essere lasciato a raffreddare (Figura 3.9 destra).



**Figura 3.9: Estrusione del campione e campione estruso.**

### 3.3.5 Massima massa volumica apparente (MMVA)

La massa volumica apparente è la massa per unità di volume, comprensiva dei vuoti d'aria, di un provino compattato in laboratorio o ricavato da carote estratte dalla pavimentazione. La procedura per la sua misurazione fa riferimento alla UNI EN 12697-6 [26]. Questa procedura, chiamata Superficie Saturata asciutta (SSD), prevede il calcolo del volume tramite pesate in aria e in acqua (Principio di Archimede). Seguendo l'iter procedurale, inizialmente si determina la massa del provino secco tramite pesatura in aria ( $m_1$ ), si misura la temperatura del bagno d'acqua e si determina la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova (Tabella 3.4).

**Tabella 3.4: Massa volumica dell'acqua a diverse temperature.**

Massa Volumica Acqua					
Temperatura dell'acqua [°C]	Fattore di correzione K [-]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperatura dell'acqua [°C]	Fattore di correzione K [-]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
10	1,0027	999,8	20	1,0012	998,3
11	1,0026	999,7	21	1,0010	998,1
12	1,0025	999,6	22	1,0007	997,8
13	1,0023	999,4	23	1,0005	997,6
14	1,0022	999,3	24	1,0003	997,4
15	1,0021	999,2	25	1,0000	997,1
16	1,0019	999,0	26	0,9997	996,8
17	1,0017	998,8	27	0,9995	996,6
18	1,0016	998,7	28	0,9992	996,3
19	1,0014	998,5	29	0,9989	996,0
20	1,0012	998,3	30	0,9986	995,7

Dopo le suddette misurazioni preliminari, il campione è immerso nel bagno d'acqua, dove rimane per almeno 45 minuti alla temperatura di prova in modo da permettere all'acqua di riempire tutti i vuoti del campione. Allo scadere dei quarantacinque minuti, si determina la massa del provino saturo ( $m_2$ ) mediante pesata in acqua (Figura 3.10 sinistra), osservando accuratamente che non vi siano bolle d'aria aderenti o che fuoriescano dal campione immerso.



Figura 3.10: Pesata in acqua e in aria.

A questo punto, si preleva il campione dal bagno d'acqua e si asciugano rapidamente le gocce d'acqua sulla superficie mediante un panno e si procede con una nuova pesatura, determinando la massa in aria del provino saturo ( $m_3$ ) (Figura 3.10 destra). Infine, per il calcolo della MMVA si è fatto uso della seguente formula:

$$MMVA = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w; \quad (26)$$

dove:

$m_1$  = massa in aria del provino secco [g];

$m_2$  = massa in acqua del provino saturo [g];

$m_3$  = massa in aria del provino saturo a superficie asciutta [g];

$\rho_w$  = densità dell'acqua alla temperatura di prova [ $\text{kg/m}^3$ ].

### 3.3.6 Percentuale dei vuoti

La valutazione della massima massa volumica teorica e massima massa volumica apparente ha come fine quello di definire la percentuale dei vuoti d'aria presenti all'interno del campione. La norma a cui facciamo riferimento è la UNI EN 12697-8 [27]. La percentuale d'aria, contenuta all'interno del campione, è rappresentata dal rapporto tra il volume dei vuoti e il volume totale del campione (costituito da bitume, aggregati e vuoti). Tale rapporto è espresso con la seguente formula:

$$v[\%] = \frac{MMVT}{MMVT - MMVA} \cdot 100 \quad (27)$$

### 3.3.7 Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)

L'AMPT è una macchina di prova progettata per misurare le proprietà ingegneristiche delle miscele di conglomerato bituminoso. È una macchina di prova servo-idraulica compatta che è stata sviluppata attraverso gli studi completati nell'ambito dei progetti da NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). Lo scopo del programma era di realizzare uno strumento di prova compatto, idoneo all'esecuzione di più prove ed a un costo contenuto, idoneo ad affrontare le principali richieste di requisiti per garantire le necessarie prestazioni dei conglomerati bituminosi stradali. Per questi motivi si sono selezionate le prove di Modulo Elastico, del Flow Number e del Flow Time, quest'ultimo solo per il progetto NCHRP, per dare al progettista o all'ente ispettivo un utile strumento per indagare sulla maggior parte degli aspetti critici delle pavimentazioni bituminose a caldo.

La prova del modulo dinamico, così come elaborata da AMPT, permette lo sviluppo delle curve maestre necessarie per il progetto del manto stradale; il Flow Number Test consente di valutare speditamente la resistenza della miscela bituminosa compattata all'ormaiamento. Queste prove sono standardizzate da AASHTO TP79 "Determination the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt using the Asphalt Mixture Performance Tester".

Gli strumenti che non possono mancare nell'AMPT sono l'attuatore elettroidraulico ad elevate prestazioni per prove di compressione e trazione, la cella triassiale integrata equipaggiata con sistema di confinamento ad aria compressa, la camera termostatica con unità di refrigerazione e di riscaldamento e il controllo digitale delle funzioni di acquisizione dei dati [28].



## Capitolo 4

### ANALISI DEI DATI

L'analisi dei dati costituisce la fase finale del programma di sperimentazione visto finora. In essa sono raccolti e analizzati tutti i dati ottenuti dalle singole prove effettuate in laboratorio, rimandando agli allegati quando risultino necessari maggiori dettagli. Mediante l'utilizzo di fogli di calcolo sono stati elaborati i dati delle prove creando tabelle e grafici riassuntivi che possano dare una visione immediata e comprensibile di tutto il lavoro svolto.

#### 4.1 Analisi granulometrica e MMVT degli aggregati

Come specificato nei capitoli precedenti, l'analisi granulometrica è stata condotta per tutte le classi di aggregato utilizzate nell'indagine sperimentale e per le 9 miscele dopo che si è valutato il contenuto di bitume. Le curve granulometriche relative agli aggregati sono rappresentate nei seguenti grafici e nelle relative tabelle.

**Tabella 4.1: Risultati analisi granulometrica degli aggregati.**

D [mm]	Passante [%]			
	Pietrisco 5-15	Graniglia 3-8	Sabbia 0-5	Filler
Setacci				
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

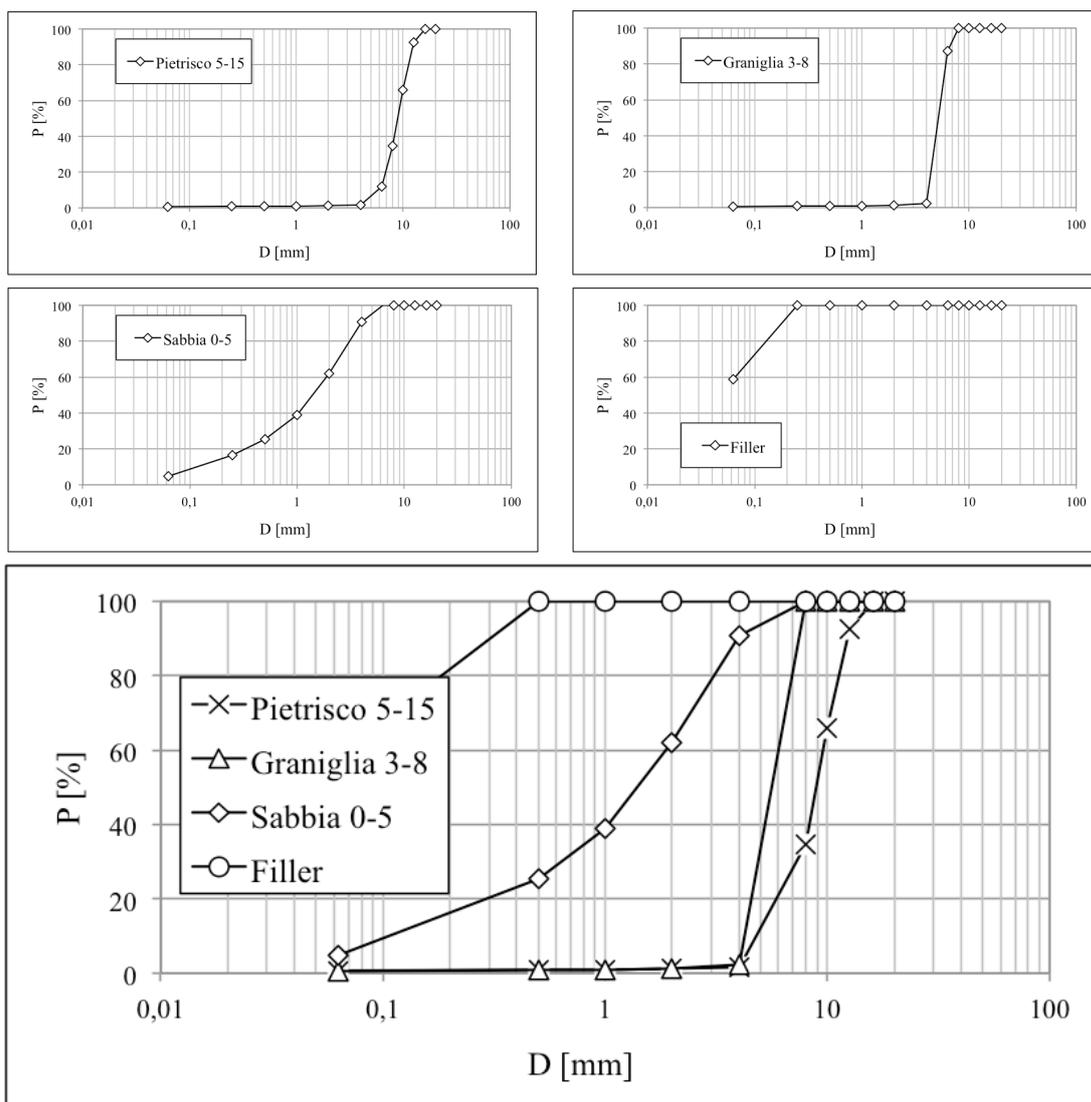


Figura 4.1: Curve granulometriche degli aggregati.

Per ogni frazione granulometrica, inoltre, è stato calcolato il peso specifico apparente degli inerti lapidei che la compongono, utilizzando il metodo con picnometro seguendo le direttive della UNI EN 1097-6 [29], nella Tabella 4.2 sono riportati i risultati ottenuti.

Tabella 4.2: MMVT degli aggregati.

Aggregato	MMVT [kg/m <sup>3</sup> ]
Pietrisco 5-15	2741
Graniglia 3-8	2859
Sabbia 0-5	2807
Filler	2627

## 4.2 Curva granulometrica di progetto

Dai dati di granulometria di ogni singolo aggregato, si è ottimizzata la curva granulometrica della miscela. Questa operazione è stata portata a termine utilizzando il software Excel, il calcolo consiste nel determinare le percentuali di ogni classe granulometrica che compongono la curva granulometrica della miscela. Come specificato nel paragrafo §2.3.1.1, si è proceduto in modo che la curva di progetto ricada all'interno del fuso CIRS (Tabella 4.3).

**Tabella 4.3: Fuso CIRS.**

D [mm]	Passante min. [%]	Passante max. [%]	Passante centro fuso [%]
20	100,0	100,0	100,0
16	95,3	100,0	97,7
12,5	90,0	100,0	95,0
10	80,0	95,0	87,5
8	70,0	90,0	80,0
4	40,0	55,0	47,5
2	25,0	38,0	31,5
1	19,0	30,2	24,6
0,5	12,9	22,5	17,7
0,063	5,6	9,0	7,1

**Tabella 4.4: Percentuali di aggregato della curva di progetto.**

Aggregato	Pietrisco 5-15	Graniglia 3-8	Sabbia 0-5	Filler
% aggregato	26	27	38	9

Avendo ottenuto le diverse percentuali di aggregato (Tabella 4.4), si determina la curva di progetto con la seguente espressione:

$$P = \sum_1^n (p_i \cdot \alpha_i); \quad (28)$$

dove:

P = passante curva di progetto;

$p_i$  = passante progressivo dell'aggregato ad ogni setaccio;

$\alpha_i$  = percentuale ottenuta dall'ottimizzazione.

Quindi infine si ottiene il risultato mostrato in Tabella 4.5 e nel grafico riassuntivo in Figura 4.2.

Tabella 4.5: Curva di progetto.

D [mm]	Passante [%]				
Setacci	Pietrisco 5-15	Graniglia 3-8	Sabbia 0-5	Filler	Curva di Progetto
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	92,6	100,0	100,0	100,0	98,0
10	65,8	100,0	100,0	100,0	91,0
8	34,7	100,0	100,0	100,0	82,8
4	1,8	2,2	90,8	100,0	44,5
2	1,1	1,2	62,1	100,0	33,2
1	1,0	1,1	38,8	100,0	24,3
0,5	1,0	0,9	25,3	100,0	19,1
0,063	0,7	0,5	4,7	58,8	7,4

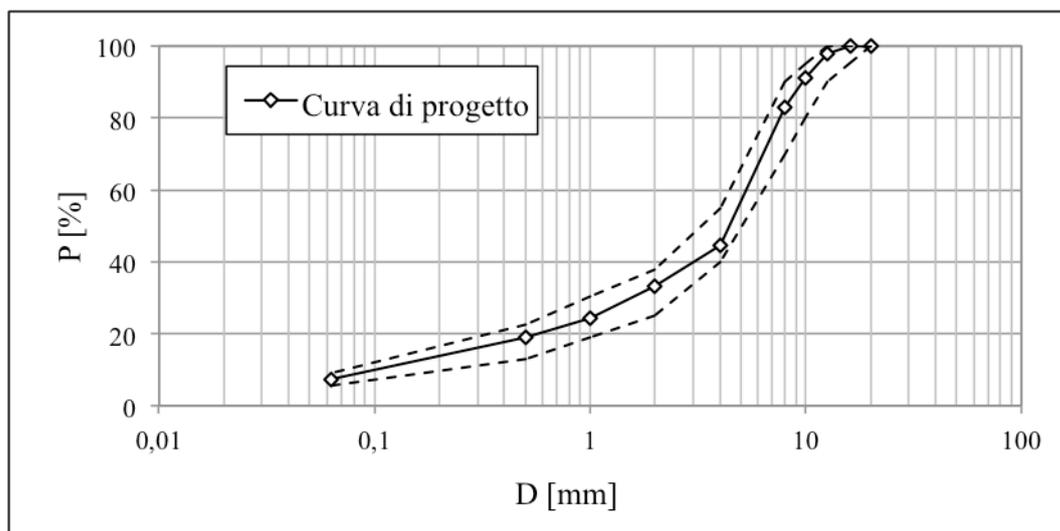


Figura 4.2: Curva di progetto all'interno del fuso CIRS.

### 4.3 Contenuto di bitume, granulometria e MMVT delle miscele.

Il primo test condotto sulla miscela è quello per determinare contenuto di bitume, tale valore è stato ottenuto per ignizione, come descritto del precedente capitolo. Nelle seguenti tabelle si riportano i risultati ottenuti da questa prova.

**Tabella 4.6: Contenuto di bitume delle miscele TR\_70-100.**

ID miscela	%B aggregato	%B aggregato medio ..	%B aggregato target
TR_70-100_M1	4,09	4,10	4,00
	4,12		
TR_70-100_M2	5,16	5,11	5,00
	5,06		
TR_70-100_M3	6,26	6,27	6,00
	6,29		

**Tabella 4.7: Contenuto bitume delle miscele TR\_50-70.**

ID miscela	%B aggregato	%B aggregato medio ..	%B aggregato target
TR_50-70_M1	4,01	4,09	4,00
	4,18		
TR_50-70_M2	4,94	4,87	5,00
	4,80		
TR_50-70_M3	5,85	5,91	6,00
	5,97		

**Tabella 4.8: Contenuto bitume delle miscele MOD\_SBS.**

ID miscela	%B aggregato	%B aggregato medio ..	%B aggregato target
MOD_SBS_M1	4,20	4,05	4,00
	3,89		
MOD_SBS_M2	5,04	5,00	5,00
	4,96		
MOD_SBS_M3	5,77	5,84	6,00
	5,91		

Dalle tabelle si può leggere che in ogni miscela si è raggiunta la percentuale di bitume di target con una tolleranza dello 0,5%.

Dopo aver determinato la percentuale di bitume della miscela, il campione all'interno del cestello, su cui è stata eseguita la prova, è privo di ogni traccia di legante. Tale materiale è stato raccolto e analizzato con una nuova analisi granulometrica per verificare che la curva granulometrica della miscela rispecchia quella di progetto.

La verifica è stata condotta confrontando le diverse curve granulometriche delle miscele con quella di riferimento. Di seguito sono riportati i grafici con i risultati.

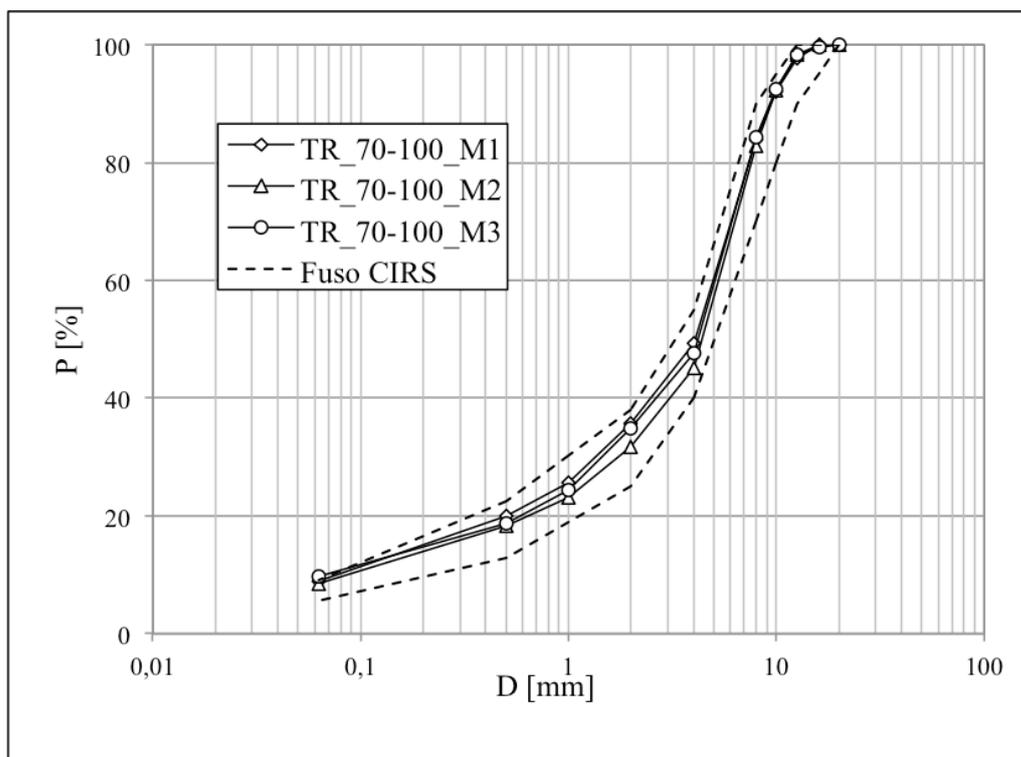


Figura 4.3: Curve granulometriche delle miscele TR\_70-100.

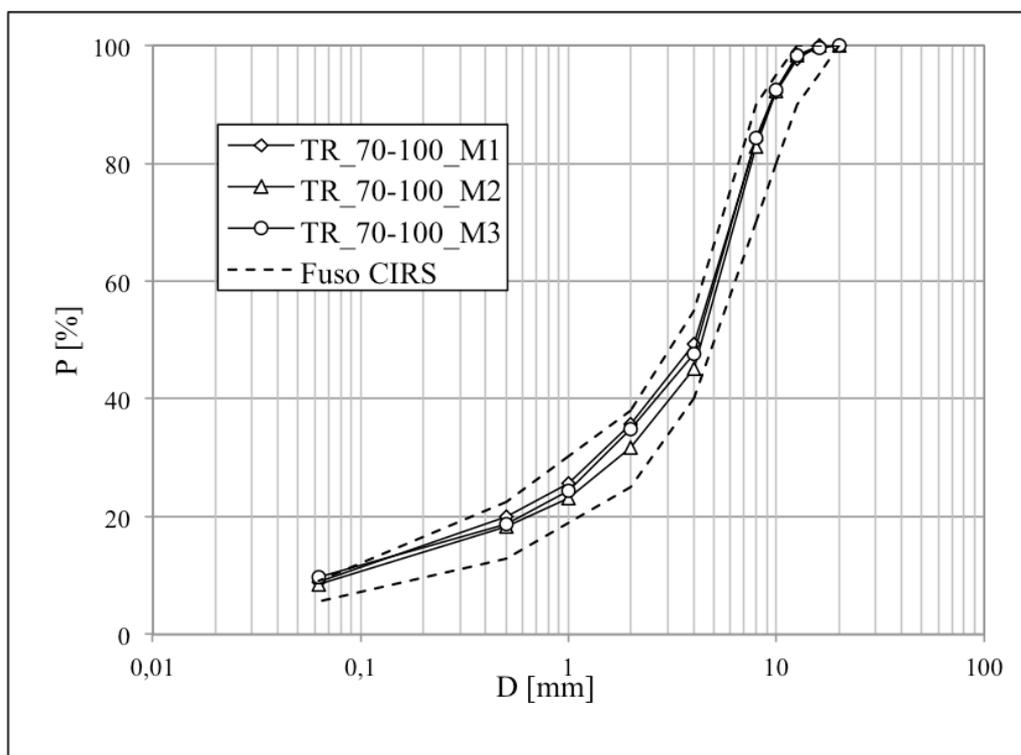


Figura 4.4: Curve granulometriche delle miscele TR\_50-70.

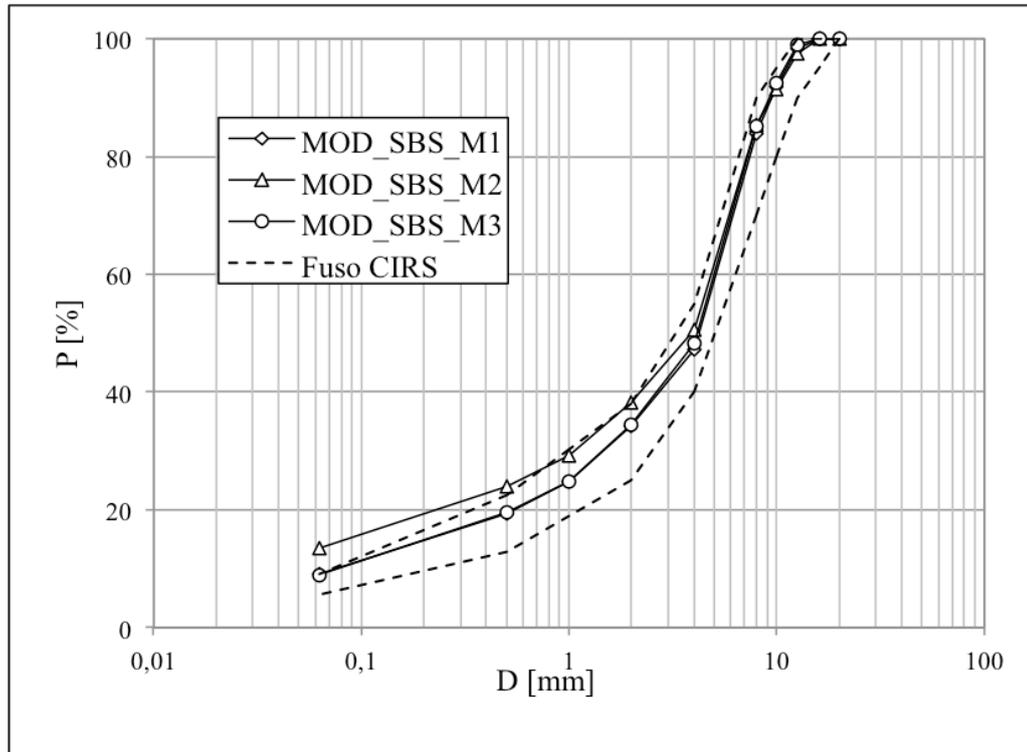


Figura 4.5: Curve granulometriche delle miscele MOD\_SBS.

Dai risultati ottenuti, si deduce che tutte le miscele presentano una curva granulometrica simile a quella di riferimento tranne la miscela ottenuta con il 5% bitume modificato (MOD\_SBS\_M2), la quale presenta una quantità di inerte fine in eccesso.

Infine l'ultimo test effettuato sulle miscele è quello per valutare la Massima Massa Volumica Teorica (MMVT) con il metodo del picnometro che ha portato ai seguenti risultati.

Tabella 4.9: MMVT delle miscele.

ID miscela	MMVT [kg/m <sup>3</sup> ]	%B
TR_70-100_M1	2599	4,10
TR_70-100_M2	2574	5,11
TR_70-100_M3	2522	6,27
TR_50-70_M1	2620	4,09
TR_50-70_M2	2577	4,87
TR_50-70_M3	2545	5,91
MOD_SBS_M1	2628	4,05
MOD_SBS_M2	2569	5,00
MOD_SBS_M3	2530	5,84

I dati in tabella mostrano come a parità di scheletro litico e tipologia di legante, i valori della MMVT aumentino al diminuire del contenuto di bitume. Le miscele esibiscono questo comportamento con variazioni di MMVT che vanno dallo 0,96% al 2,24%.

#### 4.4 Compattazione con pressa a taglio giratorio

Nelle tabelle che seguono, sono riportati i valori della percentuale dei vuoti dei campioni di dimensione 150x180 e di dimensione 100x150, lavorabilità (k) e autocompattazione (C1) delle miscele prodotte, e si rimanda agli allegati la trattazione completa.

Tabella 4.10: Risultati compattazione miscela TR\_70-100\_M1.

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	6,99	77,3	7,3	4,6
2	7,13	78,1	7,5	4,3
3	7,11	77,5	6,3	3,8
4	7,27	77,8	8,7	6,0
5	7,35	77,5	8,8	6,0

Tabella 4.11: Risultati compattazione miscela TR\_70-100\_M2.

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	-	-	-	3,3
2	-	-	-	4,7
3	-	-	-	3,4
4	-	-	-	5,8
5	8,33	78,1	6,3	4,1
6	8,11	79,1	7,8	5,4
7	8,00	79,8	8,4	6,4
8	8,49	79,3	6,1	4,1

Tabella 4.12: Risultati compattazione miscela TR\_70-100\_M3.

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	9,05	81,7	5,9	4,3
2	8,92	81,3	6,0	4,1
3	9,03	82,6	6,4	5,3
4	8,10	83,8	7,2	5,8
5	8,65	81,1	8,0	6,0

Tabella 4.13: Risultati compattazione miscela TR\_50-70\_M1.

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	6,64	77,1	6,8	4,1
2	6,95	77,4	9,5	6,9
3	6,80	77,5	7,1	4,7
4	6,79	78,3	8,7	6,4
5	6,60	77,8	6,8	4,0
6	6,96	77,3	8,2	6,2
7	6,75	78,0	8,1	5,9

Tabella 4.14: Risultati compattazione miscela TR\_50-70\_M2.

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	8,44	78,1	6,2	4,1
2	8,30	79,5	8,4	6,6
3	7,05	76,8	6,4	4,1
4	7,33	78,4	7,8	6,0
5	8,48	78,4	7,9	6,1

Tabella 4.15: Risultati compattazione miscela TR\_50-70\_M3.

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	9,18	81,6	5,9	4,3
2	8,73	82,6	7,4	6,3
3	9,32	81,2	5,8	4,4
4	9,09	81,9	6,9	5,6
5	9,39	81,5	5,4	3,8
6	9,39	81,0	5,4	4,2
7	8,80	82,1	7,2	5,9

Tabella 4.16: Risultati compattazione miscela MOD\_SBS\_M1.

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	6,63	76,4	8,1	4,5
2	6,73	76,9	9,1	6,0
3	6,46	77,6	7,2	4,5
4	6,83	77,1	9,1	7,0
5	6,78	78,1	9,6	7,0
6	8,54	73,1	9,1	5,3
7	8,75	77,8	9,0	6,2

**Tabella 4.17: Risultati compattazione miscela MOD\_SBS\_M2.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	8,43	78,9	6,6	4,2
2	8,15	79,8	8,1	6,0
3	8,40	79,5	5,8	3,9
4	8,26	80,1	8,1	6,1

**Tabella 4.18: Risultati compattazione miscela MOD\_SBS\_M3.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	9,20	82,3	5,2	3,7
2	8,17	83,4	7,7	6,2
3	8,95	82,3	5,3	3,8
4	8,30	83,4	7,4	6,4
5	8,98	82,1	5,7	4,1
6	8,66	82,6	7,1	5,8

Tali valori si riferiscono a provini compattati ad altezza, seguendo quanto previsto nel programma sperimentale. L'addensamento dei campioni avviene principalmente durante i primi giri della prova, quindi per la determinazione dei coefficienti di lavorabilità e di autocompattazione di ciascuna miscela, la normativa prescrive di interpolare i valori del grado di compattazione corrispondenti ai seguenti giri: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 e 150. In tal modo si evita di attribuire un peso eccessivo alle fasi finali della compattazione.

#### 4.5 Il Flow Number

Al fine di valutare la resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti sono stati sottoposti al test del Flow Number, tramite l'AMPT, due coppie di campioni per ciascuna delle miscele prodotte in modo da ottenere dei valori medi. Le due coppie di provini, derivando dalla stessa miscela e si differiscono tra loro per le loro caratteristiche volumetriche, infatti, per ogni miscela sono stati selezionati due campioni con percentuale dei vuoti pari al  $4\% \pm 0,5\%$  e altri due con vuoti pari al  $6\% \pm 0,5\%$ .

I campioni sono stati testati a due diverse temperature ( $58^{\circ}\text{C}$  per le miscele prodotte con il bitume "Tal Quale" 70-100 e quello modificato con SBS e  $52^{\circ}\text{C}$  per quelle prodotte con bitume "Tal Quale" 50-70), in modalità non confinata e con tensione assiale pari a 600 kPa. Infine, sono stati selezionati i criteri di fine prova, ovvero, la deformazione assiale massima (75000 Microstrain) e il numero massimo di cicli (15000). Nelle tabelle seguenti sono riportati i risultati:

**Tabella 4.19: Risultati FN della miscela TR\_70\_100.**

Miscela	Temperatura [°C]	B [%]	V [%]	FN [-]	FN medio [-]	Microstrain [-]	Microstrain medi [-]
M1	58	4,10	4,3	182	219	21132	19927
	58	4,10	3,8	255		18722	
	58	4,10	6,0	57	73	21554	22566
	58	4,10	6,0	89		23577	
M2	58	5,11	4,1	134	110	22539	23169
	58	5,11	4,1	85		23798	
	58	5,11	5,8	69	60	23972	24911
	58	5,11	6,4	50		25849	
M3	58	6,27	4,3	54	59	31831	32598
	58	6,27	4,1	64		33364	
	58	6,27	5,8	41	35	35933	34323
	58	6,27	6,0	28		32713	

Tabella 4.20: Risultati FN della miscela TR\_50-70.

Miscela	Temperatura [°C]	B [%]	V [%]	FN [-]	FN medio [-]	Microstrain [-]	Microstrain medi [-]
M1	52	4,09	4,1	1554	1612	21003	21260
	52	4,09	4,0	1669		21516	
	52	4,09	6,2	752	655	17663	18594
	52	4,09	5,9	557		19525	
M2	52	4,87	4,1	405	395	23175	23321
	52	4,87	4,1	384		23467	
	52	4,87	6,0	272	235	25924	26116
	52	4,87	6,1	198		26308	
M3	52	5,91	3,8	265	256	34905	35719
	52	5,91	4,2	246		36533	
	52	5,91	6,3	134	153	42633	41412
	52	5,91	5,9	171		40190	

Tabella 4.21: Risultati FN della miscela MOD\_SBS.

Miscela	Temperatura [°C]	B [%]	V [%]	FN [-]	FN medio [-]	Microstrain [-]	Microstrain medi [-]
M1	58	4,05	4,5	3813	4006,5	22033	19354
	58	4,05	4,5	4200		16674	
	58	4,05	6,0	1346	1241,0	17677	18676
	58	4,05	6,2	1136		19674	
M2	58	5,00	4,2	585	784,5	24651	24373
	58	5,00	3,9	984		24094	
	58	5,00	6,0	321	318,0	25918	26555
	58	5,00	6,1	315		27192	
M3	58	5,84	3,8	396	343	31062	32428
	58	5,84	4,1	289		33794	
	58	5,84	6,2	168	183	36656	35686
	58	5,84	5,8	198		34716	

Dall'analisi dei risultati si nota che il Flow Number esibisce, in linea con altri studi analoghi reperibili in letteratura, un'alta variabilità che è principalmente dovuta ai diversi vuoti contenuti all'interno di ogni provino e dall'eterogeneità stessa del conglomerato.

Un altro aspetto che si nota dai risultati ottenuti, è che il valore del FN ottenuto da campioni con percentuale dei vuoti del 4%, a parità di ogni altra condizione (%B e

temperatura), è maggiore del FN ottenuto da campioni con percentuale dei vuoti del 6%, questo è dovuto alla diminuzione della porosità e quindi all'instaurarsi di un maggiore contatto pietra-pietra e di un migliore ingranamento all'interno del conglomerato causato dall'aumento dell'energia di compattazione.

#### 4.6 Correlazione tra FN e contenuto dei vuoti

Ottenuti i valori di FN, si è valutata la correlazione con il contenuto dei vuoti del provino testato. Come ci si aspettava, per ogni miscela, al diminuire del contenuto di vuoti si assiste ad un più alto valore di FN. Inoltre, diagrammando le coppie di valori FN e %V (contenuto dei vuoti) questi si allineano su una retta. A seguire sono riportati tali diagrammi nelle figure Figura 4.6, Figura 4.7, Figura 4.8.

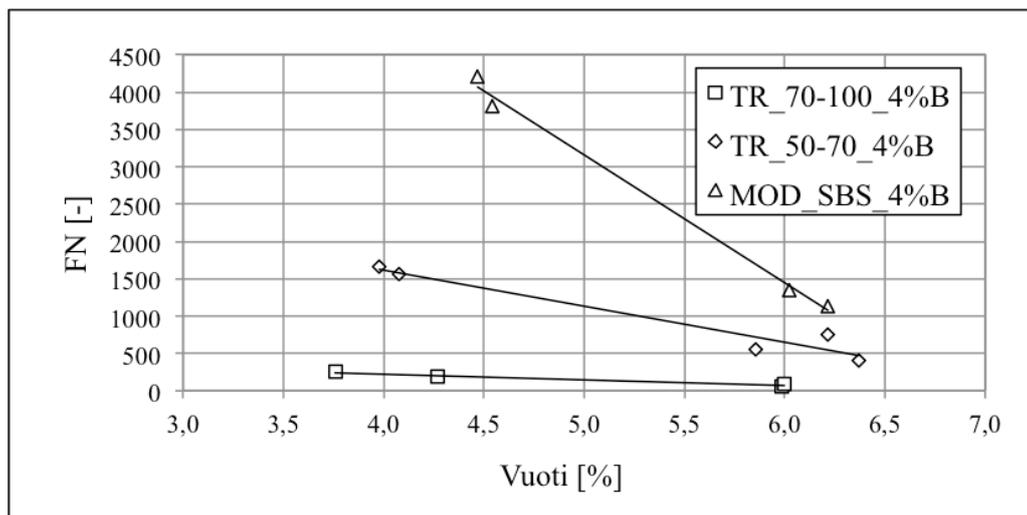


Figura 4.6: Relazione tra FN e vuoti delle miscele con il 4% di bitume.

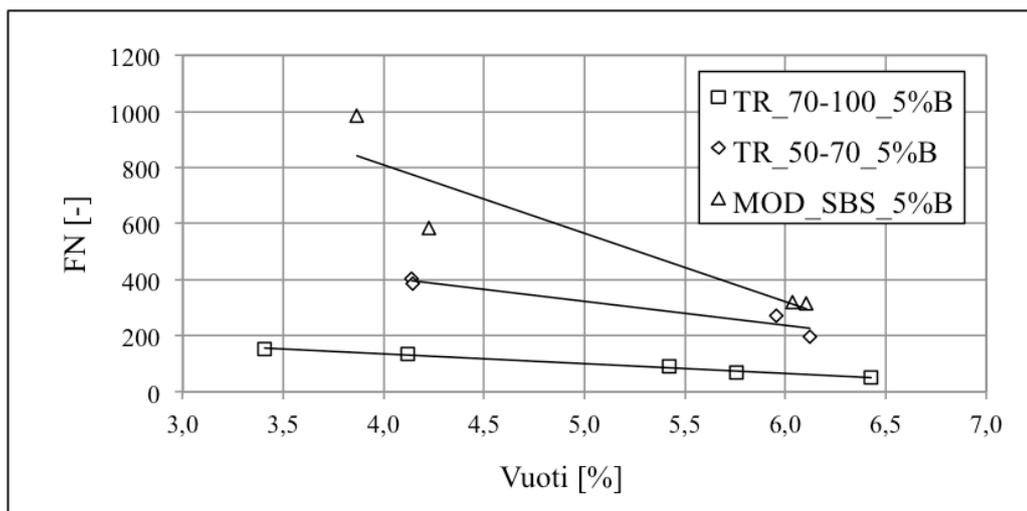


Figura 4.7: Relazione tra FN e vuoti delle miscele con il 5% di bitume.

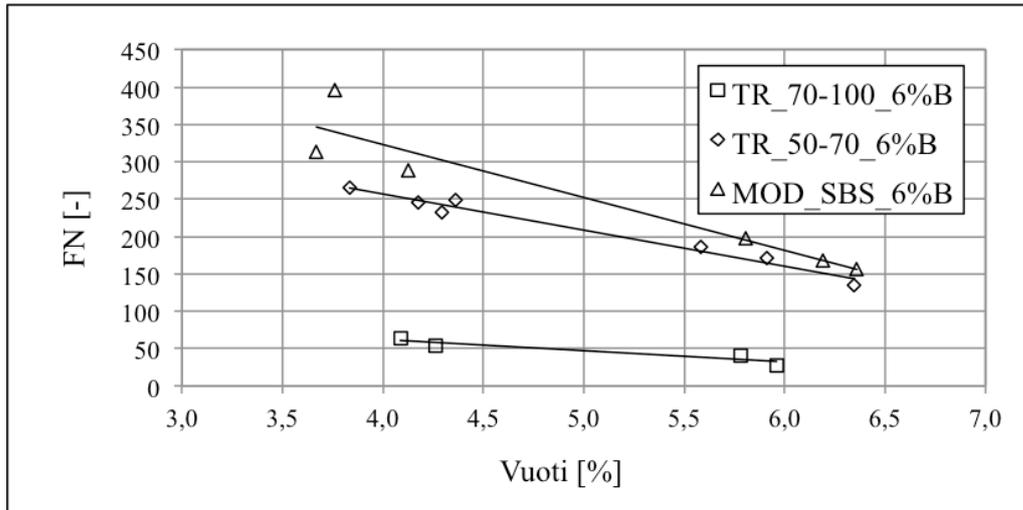


Figura 4.8: Relazione tra FN e vuoti delle miscele con il 6% di bitume.

#### 4.7 II CCR

L'ultimo dato da analizzare è il Creep Compliance Rate (CCR). La procedura da seguire per le prove SSCR prevede che la durata delle fasi di carico e recupero è impostata in modo da consentire ai materiali di raggiungere stato di flusso stazionario sotto carico e di recuperare tutte deformazioni elastiche ritardate dopo la rimozione del carico. In questo studio, però, nel settaggio della prova con il DSR, non si è indicato il tempo di recupero poiché ci siamo limitati a eseguire solo la fase di carico della prova, in accordo con la definizione del Creep Compliance Rate.

Le prove sono state eseguite a quattro temperature (con incremento di 6°C tra ognuna) ad un unico livello di stress, pari a 100 Pa e, come sopra detto, con diversi durate di carico schematizzate in Tabella 4.22.

Tabella 4.22: Condizioni di test utilizzate.

Bitume	Temperatura [°C]	Durata fase di Creep [s]
<b>B_70/100</b>	46	600
	52	240
	58	180
	64	120
<b>B_50/70</b>	46	600
	52	240
	58	180
	64	120
<b>B_SBS</b>	58	10800
	64	1800
	70	600
	76	300

Per ogni temperatura si sono effettuate due ripetizioni e si è considerato per l'analisi il valore medio. Nei grafici che seguono, sono mostrati i risultati delle prove effettuate rimandando agli allegati per una visione più approfondita dei dati ottenuti.

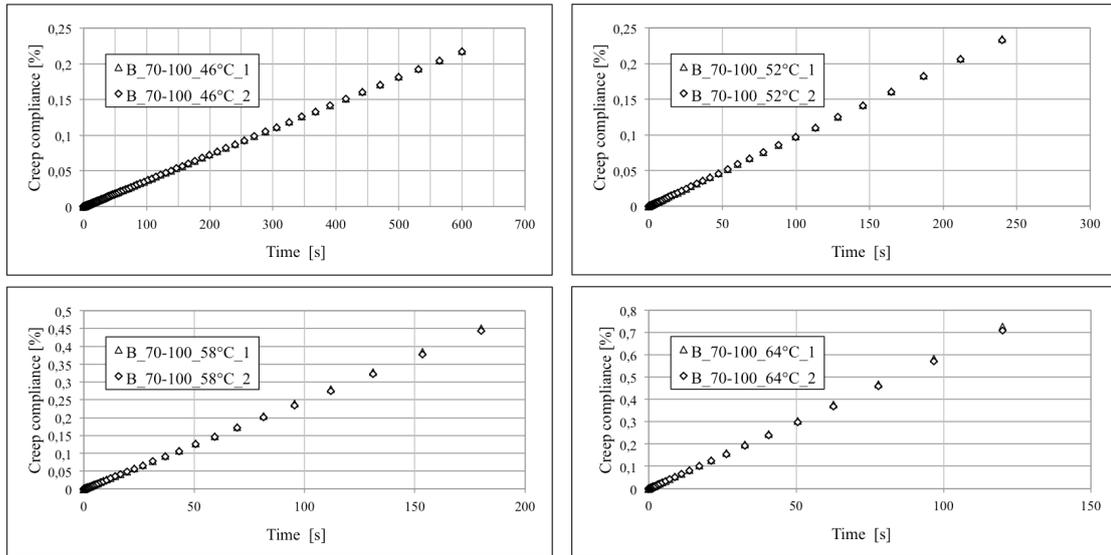


Figura 4.9: Risultati test SSCR del bitume "Tal Quale" 70-100.

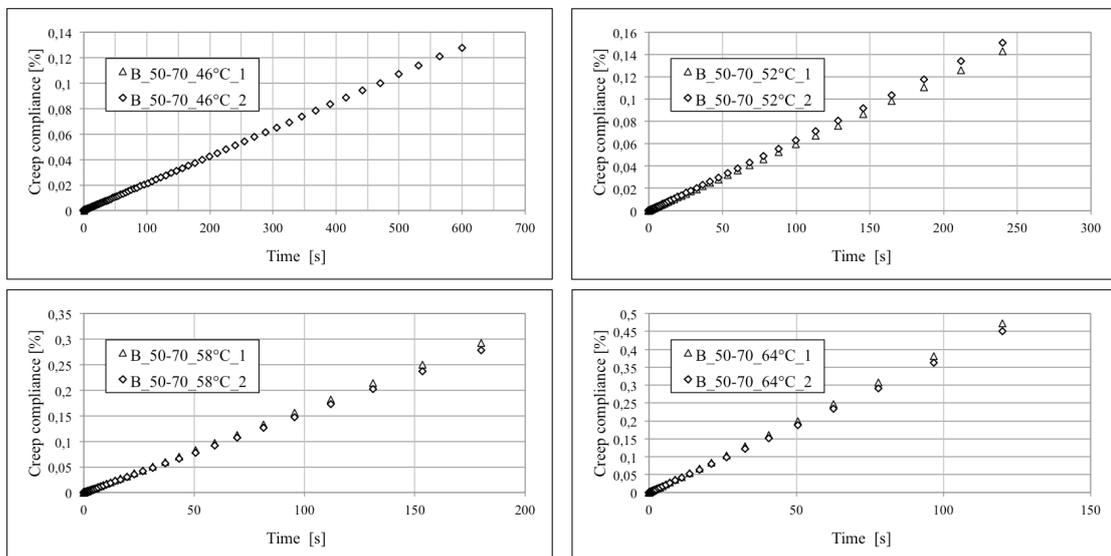


Figura 4.10: Risultati test SSCR del bitume "Tal Quale" 50-70.

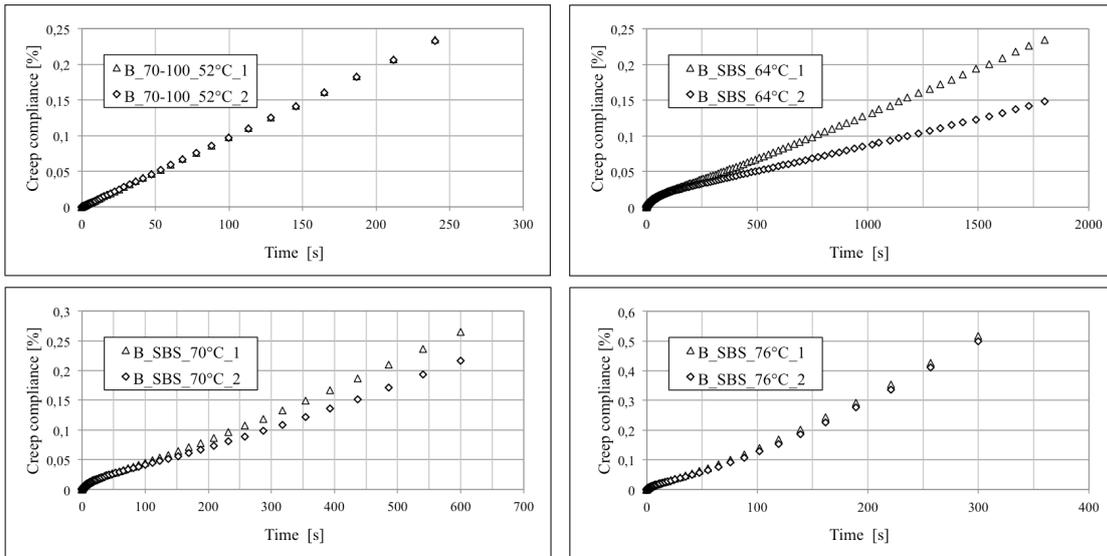


Figura 4.11: Risultati test SSCR del bitume modificato con SBS.

Come già descritto nel capitolo precedente, il CCR è ottenuto dalla porzione di lineare del tratto di carico, in altre parole non è altro che la pendenza di tale tratto. Di ogni ripetizione si è calcolato il CCR, considerando per la ricerca il valore medio.

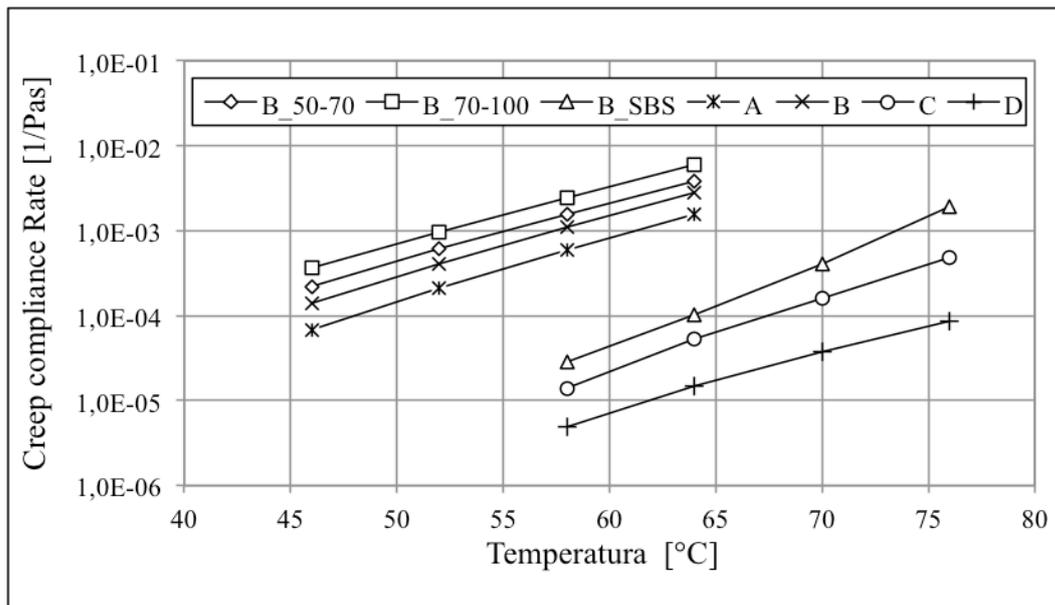


Figura 4.12: Valori di CCR in funzione della temperatura di test.

Dal grafico (Figura 4.12) si può notare che i risultati ottenuti dai test SSCR sono coerenti con quelli ottenuti da Muhammad Alam nella sua precedente ricerca (A e B sono bitumi tradizionali, B e C sono bitumi modificati rispettivamente con SBS e asphalt rubber). Infatti, i valori di CCR dei due bitumi tradizionali (B\_70-100 e B\_50-70), utilizzati in questo studio sperimentale, si allineano parallelamente

valori dei leganti A e B invece i valori che si riferiscono al bitume modificato (B\_SBS) si allineano con i bitumi C e D.

**Tabella 4.23: CCR ottenuto dai test SSCR**

Bitume	Temperatura [°C]	CCR [1/Pas]	CCR medio [1/Pas]
<b>B_70-100</b>	46	3,61e-04	3,63e-04
		3,64e-04	
	52	9,72e-04	9,75e-04
		9,78e-04	
	58	2,46e-03	2,48e-03
		2,51e-03	
	64	5,91e-03	5,98e-03
		6,05e-03	
<b>B_50-70</b>	46	2,29e-04	2,22e-04
		2,14e-04	
	52	6,30e-04	6,13e-04
		5,95e-04	
	58	1,63e-03	1,59e-03
		1,54e-03	
	64	3,94e-03	3,84e-03
		3,75e-03	
<b>B_SBS</b>	58	3,94e-05	2,86e-05
		1,78e-05	
	64	1,30e-04	1,03e-04
		7,57e-05	
	70	4,56e-04	4,12e-04
		3,67e-04	
76	1,95e-03	1,95e-03	
	1,95e-03		

I risultati ottenuti sono anche riportati in Tabella 4.23, dalla quale si nota che il CCR aumenta all'aumentare della temperatura, questo è dovuto al fatto che il materiale riscaldandosi diventa più fluido e quindi meno elastico raggiungendo più velocemente lo stato di flusso stazionario. Si nota anche che a parità di temperatura, come ci si aspettava, il bitume modificato ha mostra una resistenza maggiore all'accumulo di deformazioni permanenti dei bitumi non modificati.

### 4.8 Correlazione tra CCR e FN

Seguendo lo studio di Alam, si sono cercate le correlazioni da CCR e FN, quindi, si sono diagrammati su un grafico semilogaritmico tali valori e si nota, come per Alam, che anche in questo caso esiste una correlazione lineare tra CCR e  $\log(FN)$  (Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15). In questo studio, però, si voluto valutare l'effetto della variazione del contenuto dei vuoti. Avendo per ogni miscela due set di campioni con contenuto dei vuoti differenti (4% e 6%), si è dimostrato che aumentando i vuoti all'interno della miscela, a parità di tutte le altre caratteristiche, si ha una traslazione rigida della retta. In particolare un aumento dei vuoti fa traslare la retta verso destra, ottenendo a parità di CCR valori di FN nettamente inferiori.

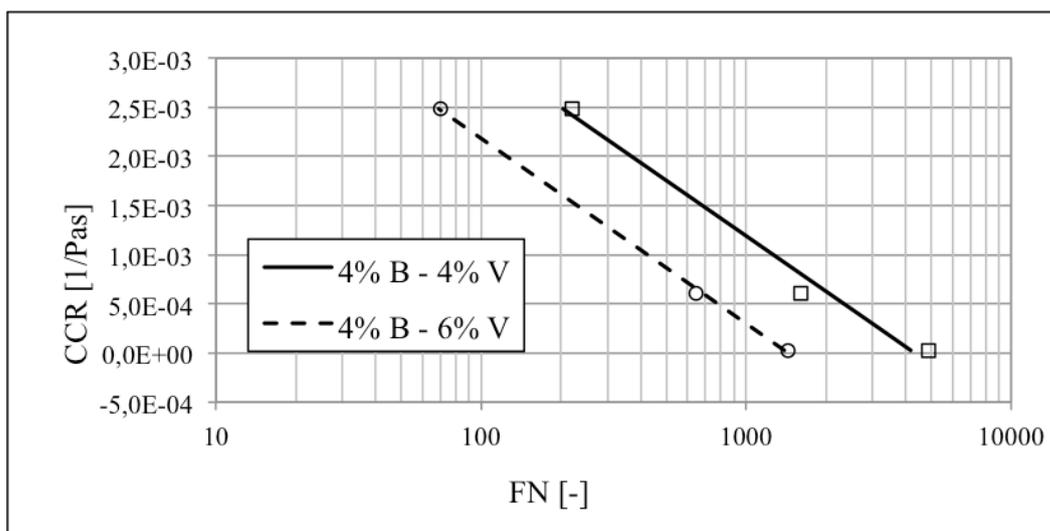


Figura 4.13: Correlazione tra CCR e FN delle miscele con il 4% di bitume.

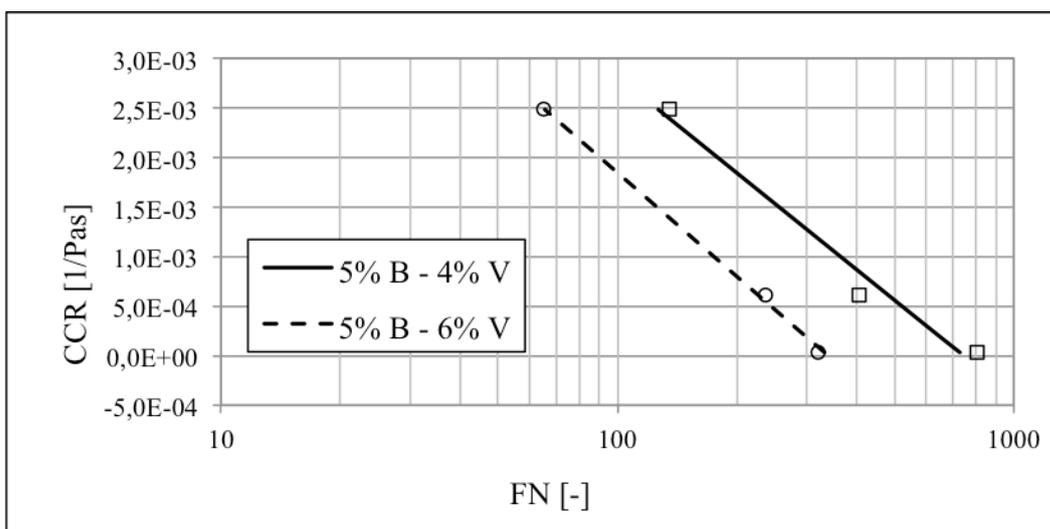
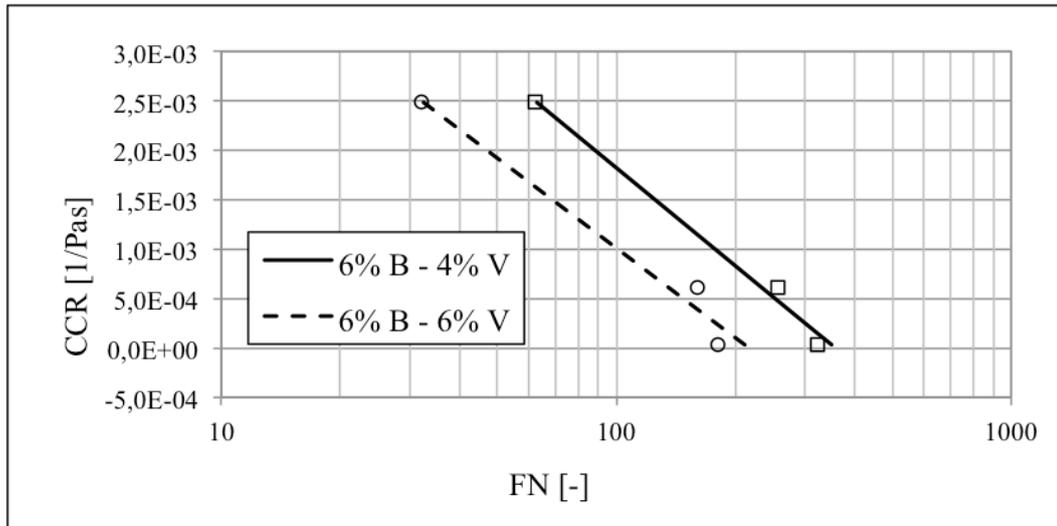
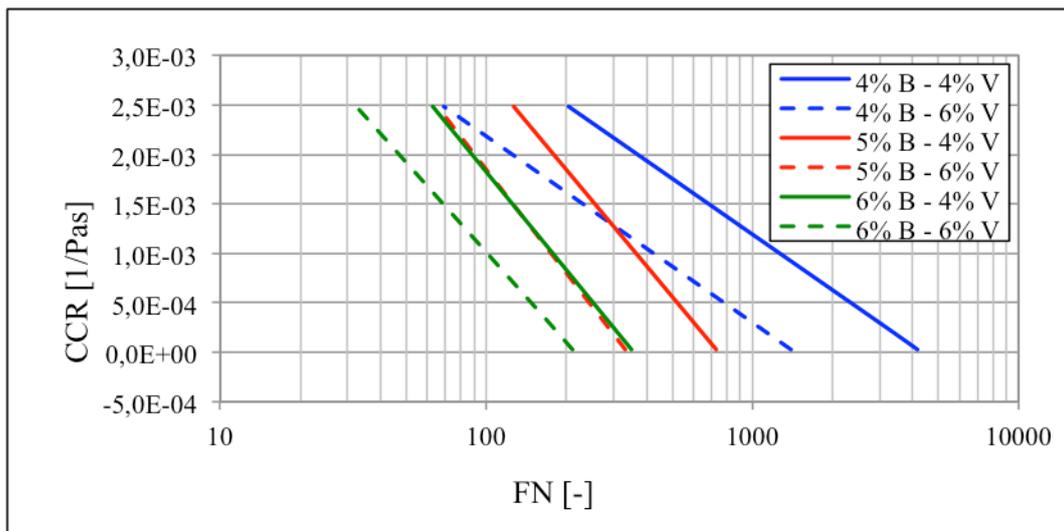


Figura 4.14: Correlazione tra CCR e FN delle miscele con il 5% di bitume.



**Figura 4.15: Correlazione tra CCR e FN delle miscele con il 6% di bitume.**

Nel grafico in Figura 4.16 sono state raggruppate tutte le rette ottenute considerando non solo il diverso contenuto di vuoti ma anche le diverse quantità di bitume.

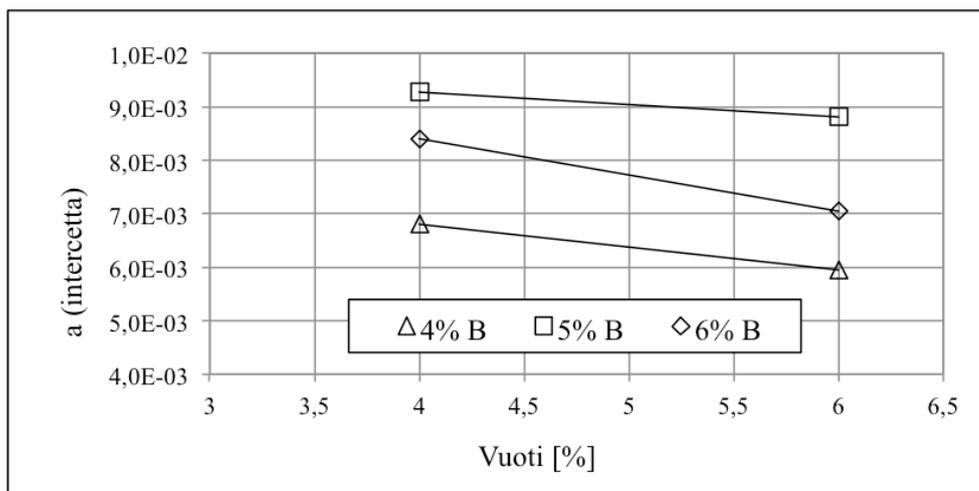


**Figura 4.16: Correlazione tra CCR e FN di tutte le miscele.**

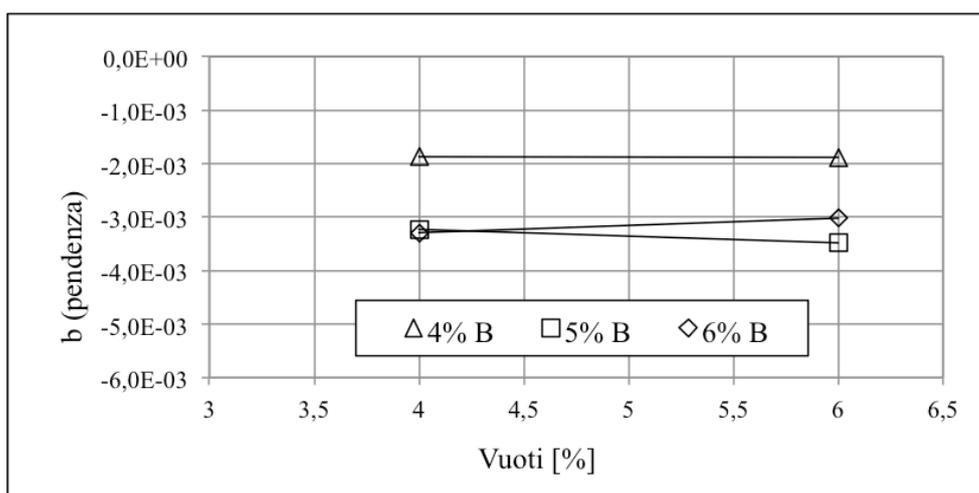
Guardando le rette a due a due, si nota che la variazione di bitume all'interno della miscela comporta una rotazione delle rette. In altre parole, l'aumento di bitume ha come conseguenza che le rette ruotino in senso orario aumentando la loro pendenza. Inoltre, si è osservata una relazione tra le caratteristiche delle miscele (bitume e vuoti) e i coefficienti delle rette (intercetta e pendenza), i valori ottenuti sono riassunti in Tabella 4.24.

**Tabella 4.24: Coefficienti delle rette FN in funzione del CCR.**

Bitume [%]	Vuoti [%]	a (intercetta) [-]	b (pendenza) [-]
4	4	6,80e-03	- 1,87e-03
4	6	5,95e-03	- 1,88e-03
5	4	9,27e-03	- 3,23e-03
5	6	8,81e-03	- 3,48e-03
6	4	8,40e-03	- 3,29e-03
6	6	7,05e-03	- 3,02e-03



**Figura 4.17: Parametro “a” (intercetta) in funzione del contenuto dei vuoti.**



**Figura 4.18: Parametro “b” (pendenza) in funzione del contenuto dei vuoti.**

Ottenuti i valori dei parametri delle rette, in questo studio, si è cercata una relazione che legasse i coefficienti “a” e “b” con la percentuale dei vuoti delle miscele, ma i dati sono stati insufficienti per tale scopo. In quanto, sarebbero serviti ulteriori punti per ogni percentuale di bitume presa in considerazione.

## Capitolo 5

### CONCLUSIONI

Nello studio sperimentale, trattato in questo elaborato, sono state studiate e confrontate le proprietà di diversi leganti bituminosi e quelle delle corrispondenti miscele caratterizzate da diverse composizioni. Sui leganti sono stati eseguiti test di Single Shear Creep-Recovery (SSCR) per determinare il loro Creep Compliance Rate (CCR), mentre le miscele bituminose sono state valutate facendo riferimento al loro Flow Number (FN), derivato da ripetute prove di carico di compressione eseguite con l'Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).

A tale scopo, sono stati impiegati tre differenti leganti bituminosi per produrre nove miscele di conglomerato bituminoso, nello specifico sono stati utilizzati due bitumi non modificati rispettivamente con gradi di penetrazione 70-100 (TR\_70-100) e 50-70 (TR\_50-70) e un bitume modificato con polimero SBS (MOD\_SBS). Con ciascun legante sono state prodotte tre miscele con percentuali di bitume diverse (4%, 5% e 6%) ma con la medesima curva granulometrica, in seguito, per ogni miscela sono stati prodotti quattro campioni caratterizzati da due percentuali dei vuoti (4% e 6%).

I campioni prodotti sono stati testati a due diverse temperature, quelli ottenuti dal bitume “Tal Quale” 70-100 e modificato con SBS alla temperatura di 58°C e quelli ottenuti dal bitume “Tal Quale” 50-70 alla temperatura di 52°C. Il motivo per cui è stata utilizzata una temperatura differente nel test del Flow Number dei campioni realizzati con il bitume “Tal Quale” 50-70 è che i due non modificati presentano valori di CCR con lo stesso ordine di grandezza alla stessa temperatura.

In conclusione, è stata trovata una relazione sul piano semilogaritmico indipendente dall'origine e dal tipo di legante tra CCR e FN, convalidando il precedente studio di Muhammad Alam. Si sono, inoltre, trovate delle corrispondenze grafiche tra i parametri della rette (intercetta e pendenza) nel piano semilogaritmico con i dati volumetrici dei provini (contenuto di bitume e vuoti). Infatti, si è notato che la variazione del contenuto dei vuoti della miscela comporta una traslazione di tale retta del piano (diminuzione del valore dell'intercetta). In particolare a una diminuzione dei vuoti (nel nostro caso siamo passati dal 6% al 4%) consegue un'evidente traslazione della retta verso destra. Si è visto, invece, che la pendenza dipende dal contenuto di bitume presente all'interno della miscela, in particolare più alta è la percentuale di bitume, a parità di tutte le altre caratteristiche, e maggiore è la pendenza delle rette CCR-FN.

E' necessario rilevare che i risultati perseguiti sono stati ottenuti con soli tre punti sperimentali e ciò richiederà un'estensione del database per includere una gamma più ampia di leganti 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" (pendenza) con la variazione della percentuale di bitume e di conseguenza, ricavare la sua equazione esatta, discusso nella tesi di Giuseppe Foti [30]. Infine sarebbe, anche, possibile ricavare il legame che unisce il parametro "a" (intercetta) con la variazione della percentuale dei vuoti che in questo studio non è stato possibile approfondire.

Per le ricerche future, sarebbe molto interessante porre nello stesso grafico i parametri della retta (a e b) con le caratteristiche compositive della miscela (%V e %B). Se si riuscisse a determinare l'equazione di tale grafico, si potrebbe calcolare analiticamente il valore del Flow Number di qualsiasi miscela, avendo noti le caratteristiche volumetriche della miscela e il valore del Creep Compliance Rate del legante impiegato.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] K. E. Cooper, S. F. BROWN, and G. R. Pooley, "THE DESIGN OF AGGREGATE GRADINGS FOR ASPHALT BASECOURSES," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 54, pp. 324–346, 1985.
- [2] E. Santagata, O. Baglieri, P. Paolo, and M. Alam, "Correlating creep properties of bituminous binders with anti-rutting performance of corresponding mixtures," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 2016.
- [3] T. B. Moghaddam, M. R. Karim, and M. Abdelaziz, "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes," *Sci. Res. Essays*, vol. 6, no. 4, pp. 670–682, 2011.
- [4] J. S. Miller and W. Y. Bellinger, "Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program," *Publ. US Dep. Transp. Fed. Highw. Adm.*, no. June, p. 129, 2003.
- [5] S. Tayfur, H. Ozen, and A. Aksoy, "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 2, pp. 328–337, 2007.
- [6] M. Cassarin, "Analisi Sperimentale Di Conglomerati Bituminosi Tiepidi Prodotti Con Additivi Chimici," Università Degli Studi Di Padova, Padova.
- [7] E. Santagata, O. Baglieri, M. Alam, and P. P. Riviera, "Evaluation of rutting properties of bituminous binders by means of single shear creep-recovery (SSCR) tests and correlation with mixture performance."
- [8] Ratnasamy Muniandy and Bujang B . K . Huat, "Laboratory Diametral Fatigue Performance of Stone Matrix Asphalt with Cellulose Oil Palm Fiber," *Am. Journa Appl. Sci.*, vol. 3, no. 9, pp. 2005–2010, 2006.
- [9] X. Lu and P. Redelius, "Effect of bitumen wax on asphalt mixture performance," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 11, pp. 1961–1970, 2007.
- [10] L. P. T. L. Fontes, G. Trichês, J. C. Pais, and P. A. A. Pereira, "Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 7, pp. 1193–1200, 2010.
- [11] H. Özen, A. Aksoy, S. Tayfur, and F. Çelik, "Laboratory performance comparison of the elastomer-modified asphalt mixtures," *Build. Environ.*, vol.

- 
- 43, no. 7, pp. 1270–1277, 2008.
- [12] Y. S. Doh, K. K. Yun, S. N. Amirhanian, and K. W. Kim, “Framework for developing a static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 12, pp. 2047–2058, 2007.
- [13] J. R. Chang and S. J. Chao, “Development of a rutting prediction model through accelerated pavement testing using Group Method of Data Handling (GMDH),” *5th Int. Conf. Nat. Comput. ICNC 2009*, vol. 3, pp. 367–371, 2009.
- [14] D. W. Christensen Jr and R. F. Bonaquist, “Volumetric Requirements for Superpave Mix Design,” in *NCHRP Report 567*, 2006.
- [15] L. Jun, Z. Yuxia, and Z. Yuzhen, “The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 1067–1073, 2008.
- [16] I. M. Asi, “Laboratory comparison study for the use of stone matrix asphalt in hot weather climates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 10, pp. 982–989, 2006.
- [17] P. Cong, P. Xun, M. Xing, and S. Chen, “Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, 2013.
- [18] E. Santagata, O. Baglieri, M. Alam, and D. Dalmazzo, “A novel procedure for the evaluation of anti-rutting potential of asphalt binders,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 287–296, 2015.
- [19] AASHTO, *AASHTO TP79-19 - Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. .
- [20] “UNI EN 933-1:1999 - Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per stacciatura..” 1999.
- [21] Brookfield Engineering Labs. Inc., “BROOKFIELD DIGITAL RHEOMETER MODEL DV-III Operating Instructions Manual,” vol. 8139, no. M, pp. 1–64, 2007.
- [22] “Norma 12607-1(1997)- Invecchiamento del bitume con Rolling Thin Film

- Oven Test RTFOT,” pp. 1–13, 1997.
- [23] T. Della Norma, “UNI EN 12697-39:2004 - 01-12-2004 - Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 39: Contenuto di legante mediante ignizione,” 2004.
- [24] *UNI EN 12697-2:2003 - 01-03-2003 - Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Determinazione della granulometria.* 2003.
- [25] T. Della Norma, “UNI EN 12697-31:2004 - 01-10-2004 - Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 31: Preparazione del provino con pressa giratoria,” 2004.
- [26] *UNI EN 12697-6:2003: Determinazione della massa volumica.* 2003.
- [27] T. Della Norma, “UNI EN 12697-8:2003 - 01-07-2003 - Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi,” 2003.
- [28] Strade & Autostrade, “L’Ampt: macchine servoidrauliche modulari e prove relative,” *S&A*, p. 36, Jun-2015.
- [29] “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.
- [30] G. Foti, “Gli effetti delle proprietà reologiche del legante sul flow number delle miscele bituminose,” Politecnico di Torino, 2017.



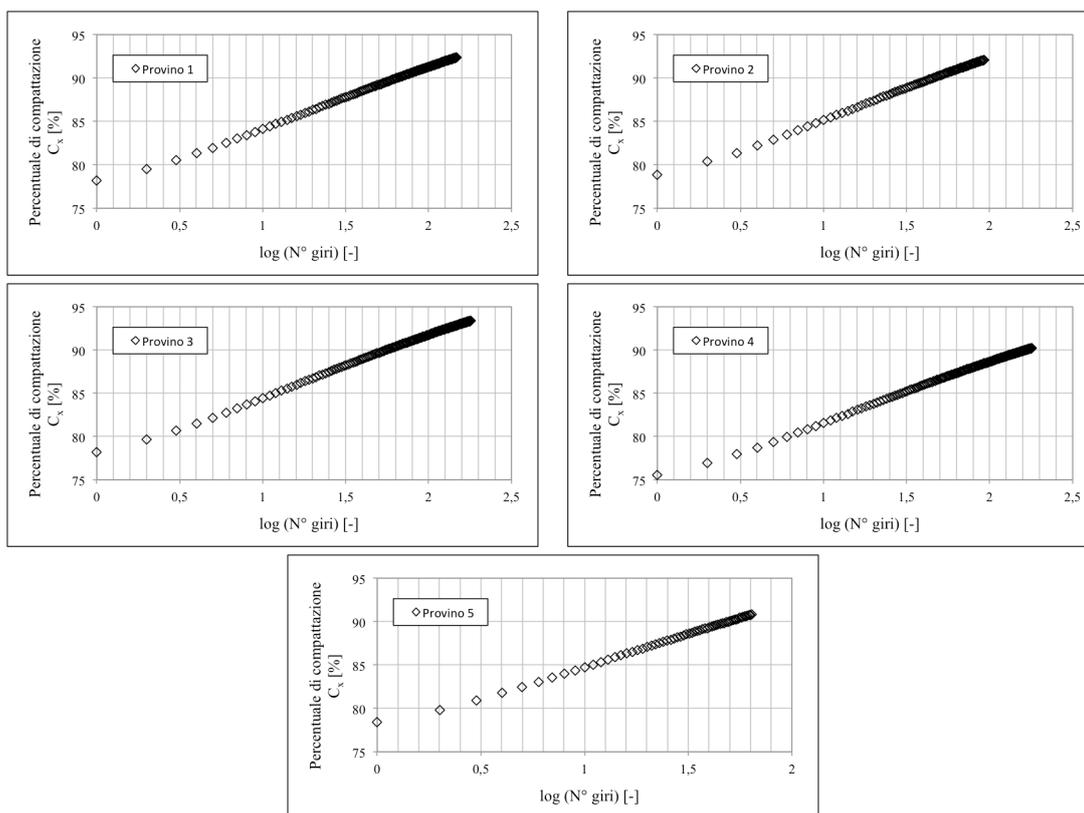
## ALLEGATI

## Allegato 1 – Compattazione dei provini

Curve di compattazione dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 4 % bitume “Tal Quale” 70-100.

**Tabella Allegato 1: Risultati compattazione miscela TR\_70-100\_M1.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	6,99	77,3	7,3	4,6
2	7,13	78,1	7,5	4,3
3	7,11	77,5	6,3	3,8
4	7,27	77,8	8,7	6,0
5	7,35	77,5	8,8	6,0

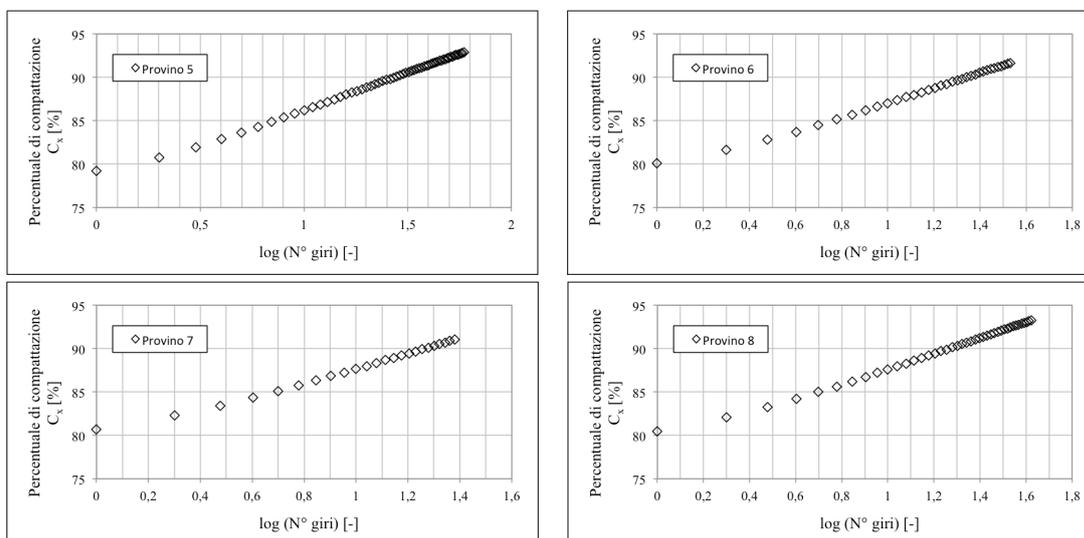


**Figura Allegato 1: Curve compattazione dei provini della miscela TR\_70-100\_M3.**

Curve di compattazione dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 5 % bitume “Tal Quale” 70-100.

**Tabella Allegato 2: Risultati compattazione miscela TR\_70-100\_M2.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	-	-	-	3,3
2	-	-	-	4,7
3	-	-	-	3,4
4	-	-	-	5,8
5	8,33	78,1	6,3	4,1
6	8,11	79,1	7,8	5,4
7	8,00	79,8	8,4	6,4
8	8,49	79,3	6,1	4,1

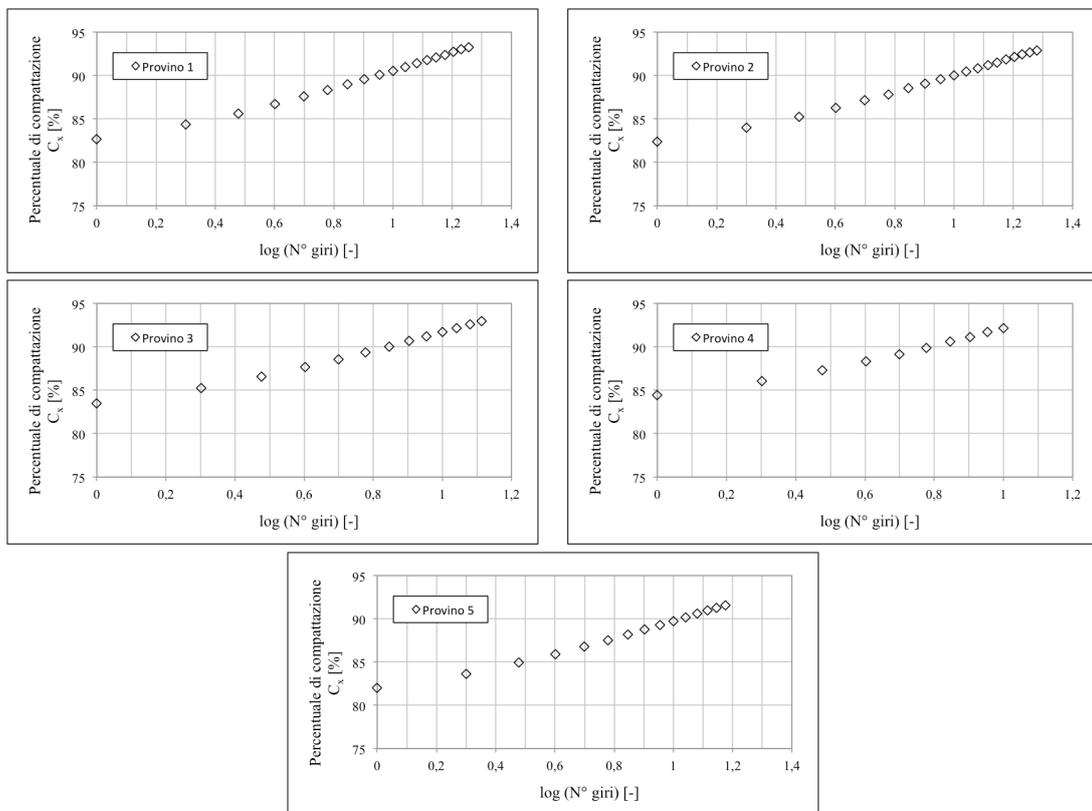


**Figura Allegato 2: Curve compattazione dei provini della miscela TR\_70-100\_M3.**

Curve di compattazione dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 6 % bitume “Tal Quale” 70-100.

**Tabella Allegato 3: Risultati compattazione miscela TR\_70-100\_M3.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	9,05	81,7	5,9	4,3
2	8,92	81,3	6,0	4,1
3	9,03	82,6	6,4	5,3
4	8,10	83,8	7,2	5,8
5	8,65	81,1	8,0	6,0

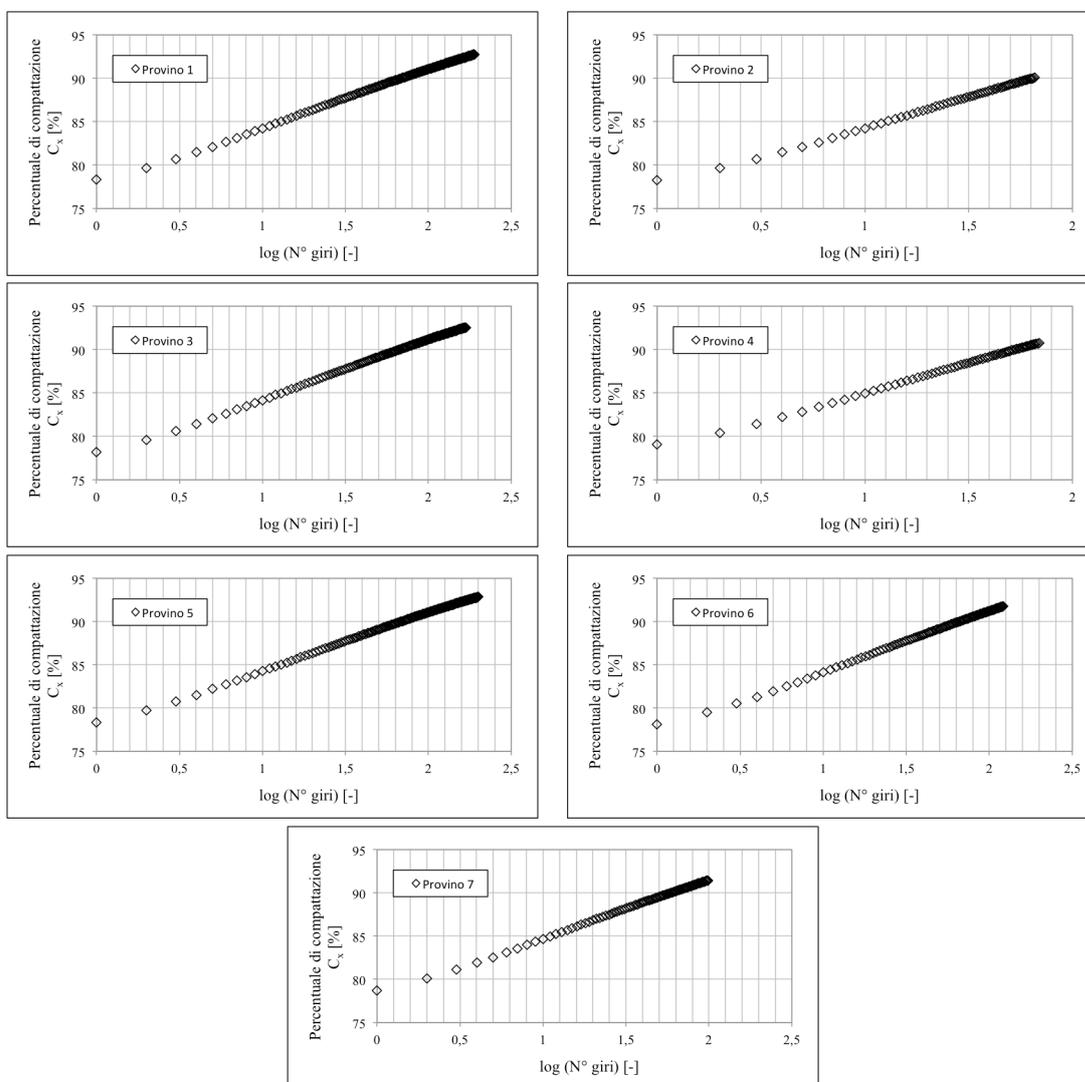


**Figura Allegato 3: Curve compattazione dei provini della miscela TR\_70-100\_M3.**

Curve di compattazione dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 4 % bitume “Tal Quale” 50-70.

**Tabella Allegato 4: Risultati compattazione miscela TR\_50-70\_M1.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	6,64	77,1	6,8	4,1
2	6,95	77,4	9,5	6,9
3	6,80	77,5	7,1	4,7
4	6,79	78,3	8,7	6,4
5	6,60	77,8	6,8	4,0
6	6,96	77,3	8,2	6,2
7	6,75	78,0	8,1	5,9

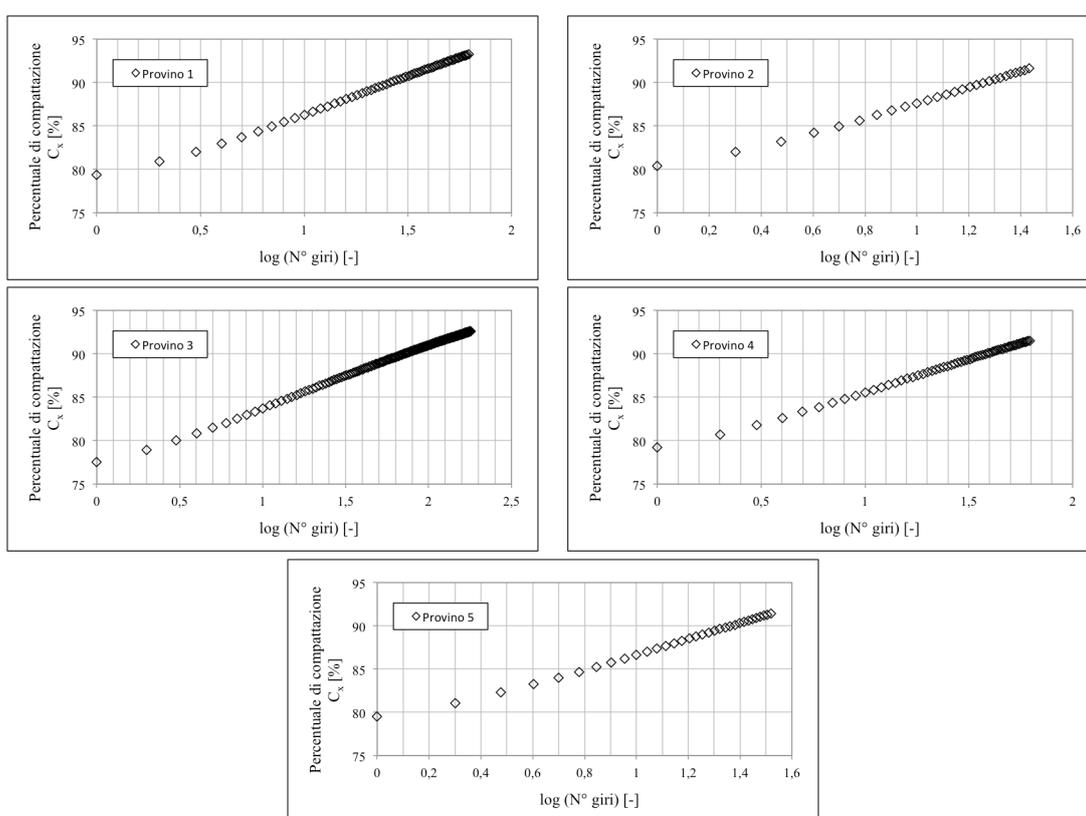


**Figura Allegato 4: Curve compattazione dei provini della miscela TR\_50-70\_M1.**

Curve di compattazione dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 5 % bitume “Tal Quale” 50-70.

**Tabella Allegato 5: Risultati compattazione miscela TR\_50-70\_M2.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	8,44	78,1	6,2	4,1
2	8,30	79,5	8,4	6,6
3	7,05	76,8	6,4	4,1
4	7,33	78,4	7,8	6,0
5	8,48	78,4	7,9	6,1

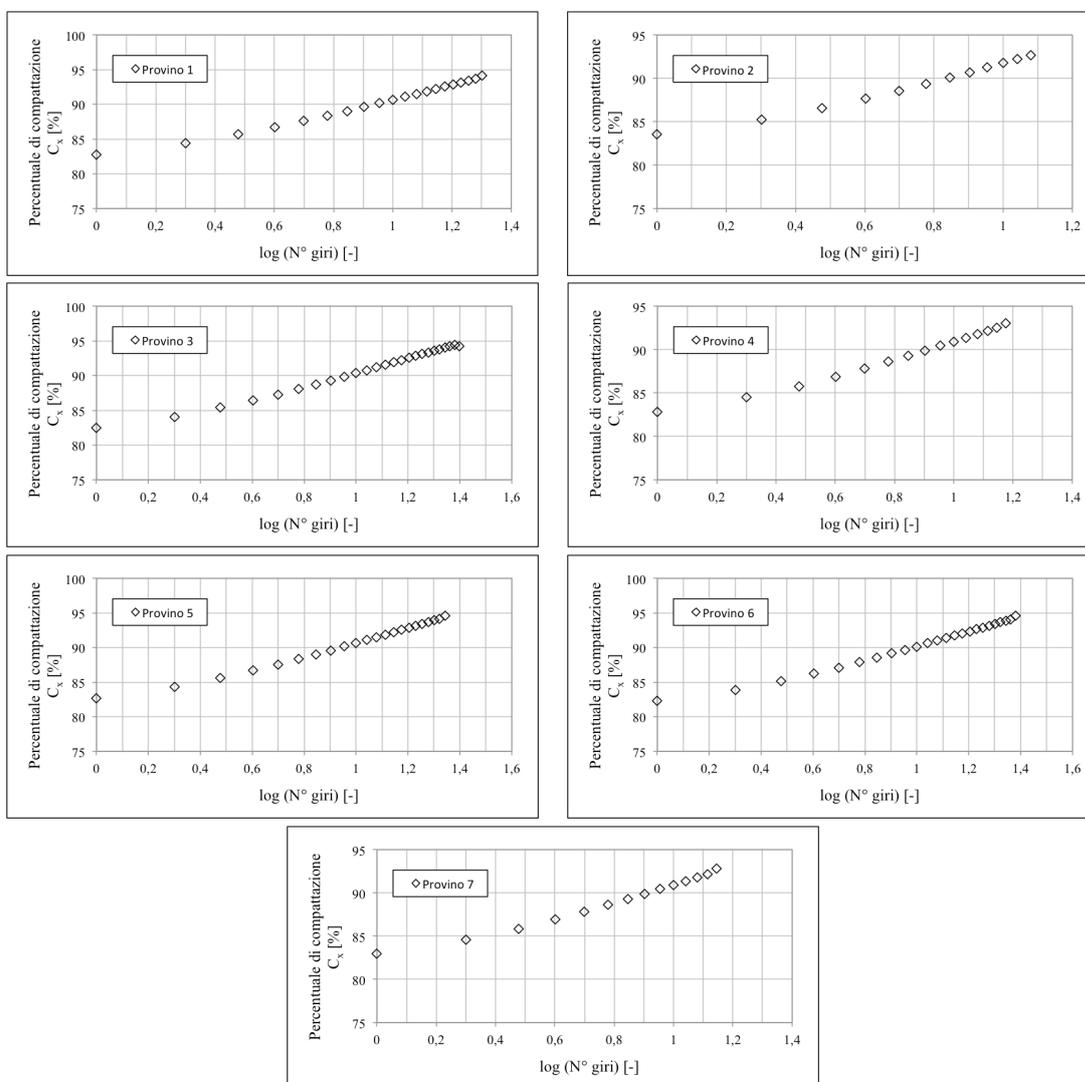


**Figura Allegato 5: Curve compattazione dei provini della miscela TR\_50-70\_M2.**

Curve di compattazione dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 6 % bitume “Tal Quale” 50-70.

**Tabella Allegato 6: Risultati compattazione miscela TR\_50-70\_M3.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	9,18	81,6	5,9	4,3
2	8,73	82,6	7,4	6,3
3	9,32	81,2	5,8	4,4
4	9,09	81,9	6,9	5,6
5	9,39	81,5	5,4	3,8
6	9,39	81,0	5,4	4,2
7	8,80	82,1	7,2	5,9

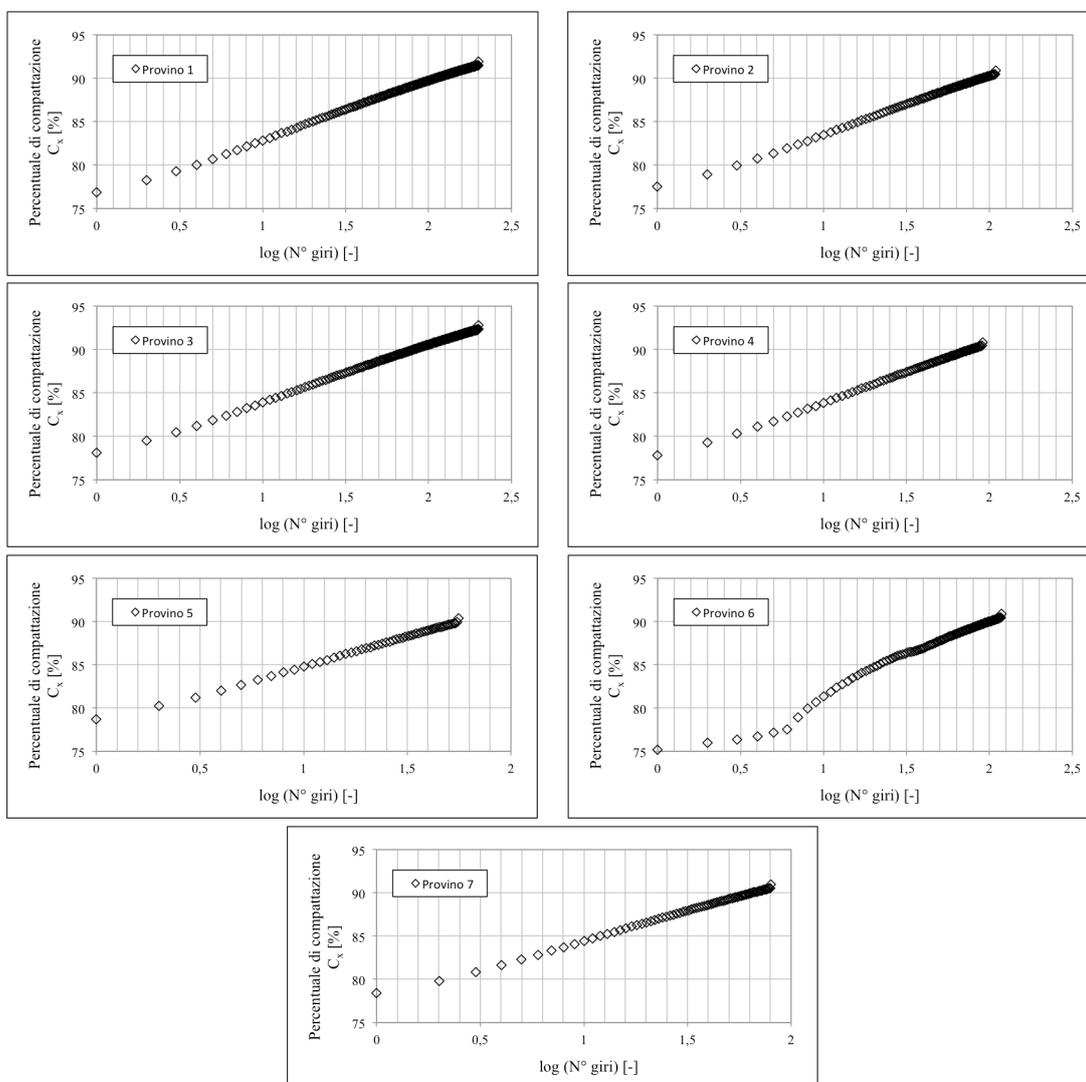


**Figura Allegato 6: Curve compattazione dei provini della miscela TR\_50-70\_M3.**

Curve di compattazione dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 4 % bitume modificato con SBS.

**Tabella Allegato 7: Risultati compattazione miscela MOD\_SBS\_M1.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	6,63	76,4	8,1	4,5
2	6,73	76,9	9,1	6,0
3	6,46	77,6	7,2	4,5
4	6,83	77,1	9,1	7,0
5	6,78	78,1	9,6	7,0
6	8,54	73,1	9,1	5,3
7	8,75	77,8	9,0	6,2

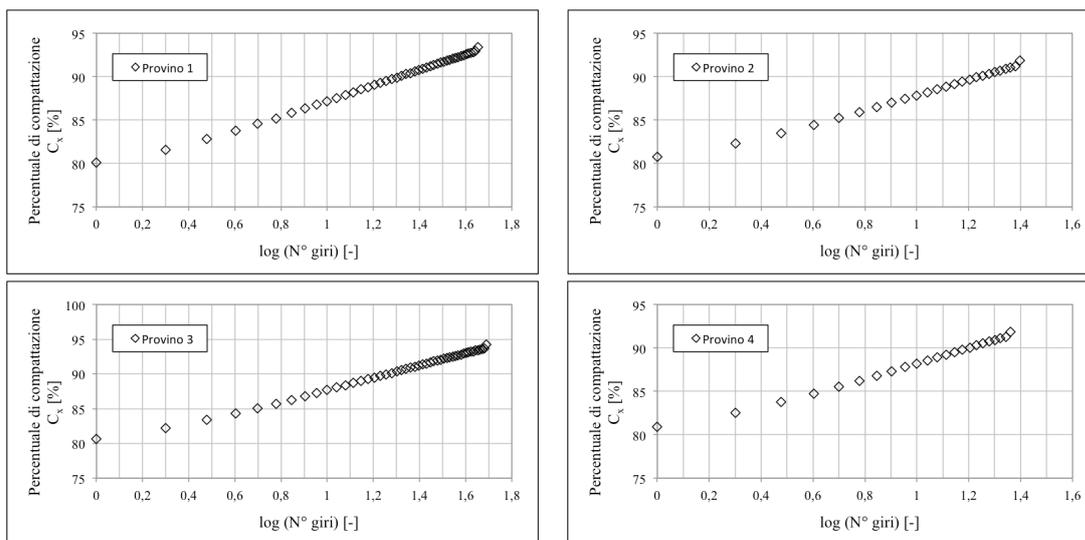


**Figura Allegato 7: Curve compattazione dei provini della miscela MOD\_SBS\_M1.**

Curve di compattazione dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 5 % bitume modificato con SBS.

**Tabella Allegato 8: Risultati compattazione miscela MOD\_SBS\_M2.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	8,43	78,9	6,6	4,2
2	8,15	79,8	8,1	6,0
3	8,40	79,5	5,8	3,9
4	8,26	80,1	8,1	6,1

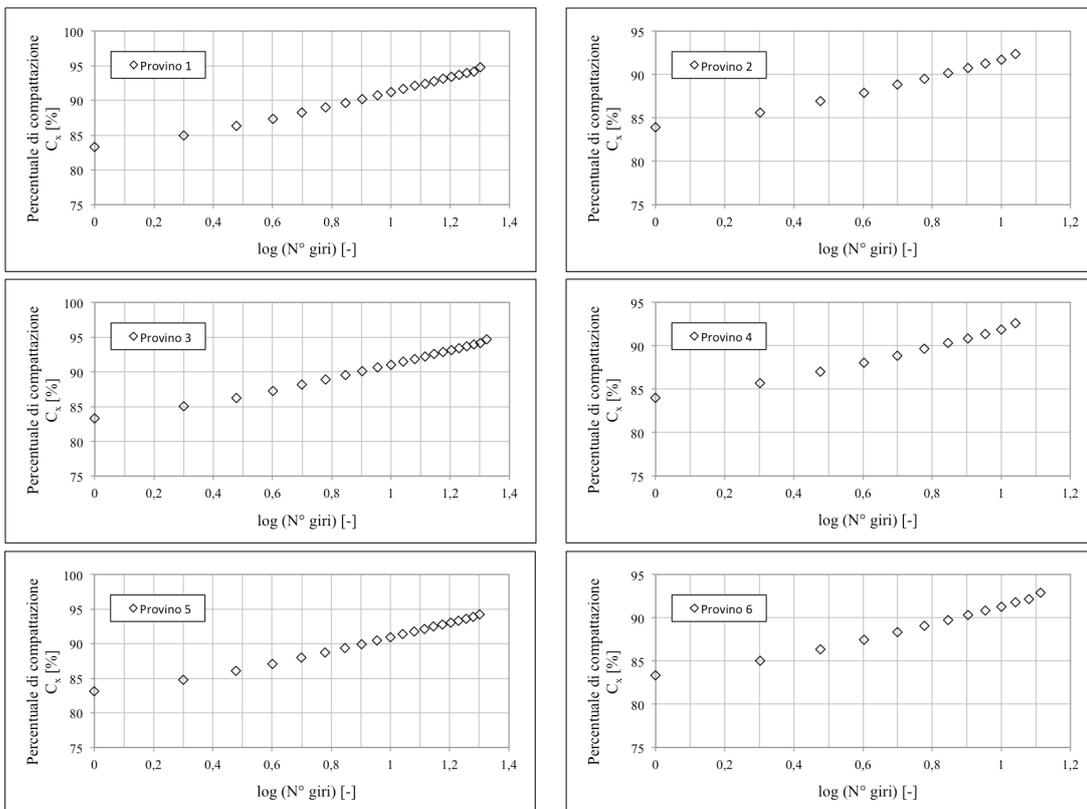


**Figura Allegato 8: Curve compattazione dei provini della miscela MOD\_SBS\_M2.**

Curve di compattazione dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 6 % bitume modificato con SBS.

**Tabella Allegato 9: Risultati compattazione miscela MOD\_SBS\_M3.**

N° campione	K [-]	C1 [%]	V <sub>150x180</sub> [%]	V <sub>100x150</sub> [%]
1	9,20	82,3	5,2	3,7
2	8,17	83,4	7,7	6,2
3	8,95	82,3	5,3	3,8
4	8,30	83,4	7,4	6,4
5	8,98	82,1	5,7	4,1
6	8,66	82,6	7,1	5,8



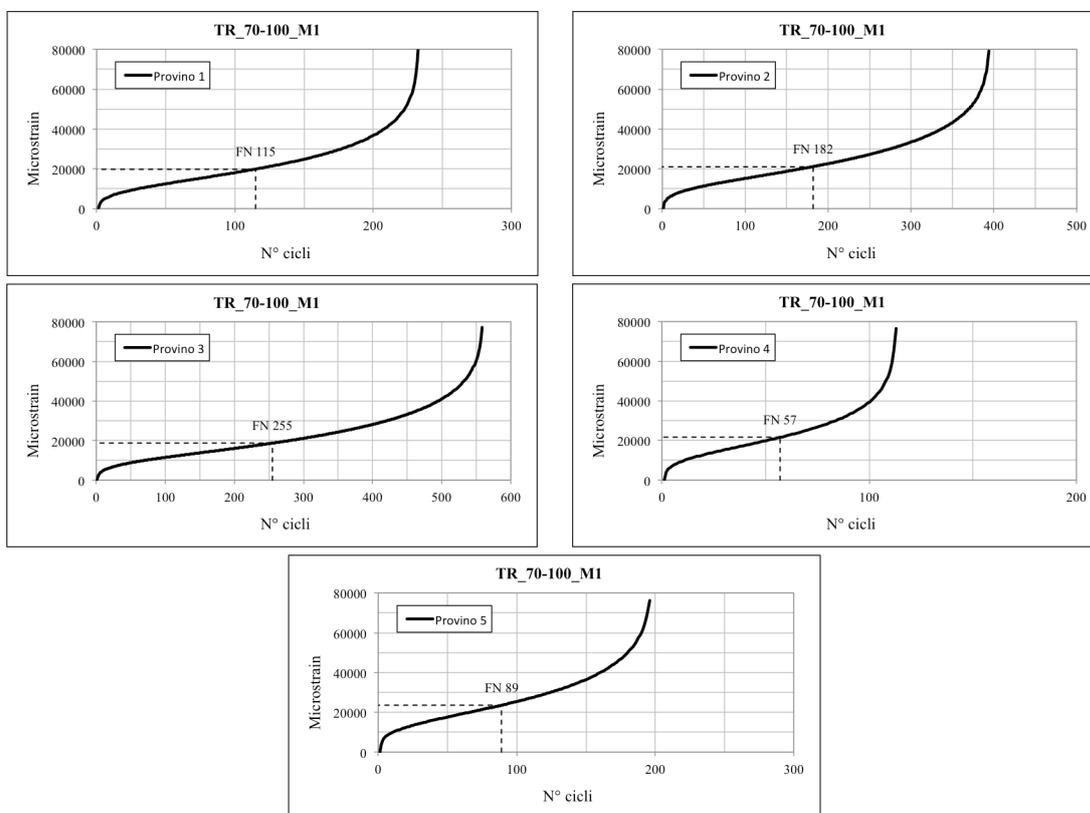
**Figura Allegato 9: Curve compattazione dei provini della miscela MOD\_SBS\_M3.**

## Allegato 2 – Test del Flow Number

Risultati dei test del Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 4 % bitume “Tal Quale” 70/100.

**Tabella Allegato 10: Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela TR\_70-100\_M1.**

N° campioni	%B	%V	FN
1	4,10	4,6	115
2	4,10	4,3	182
3	4,10	3,8	255
4	4,10	6,0	57
5	4,10	6,0	89

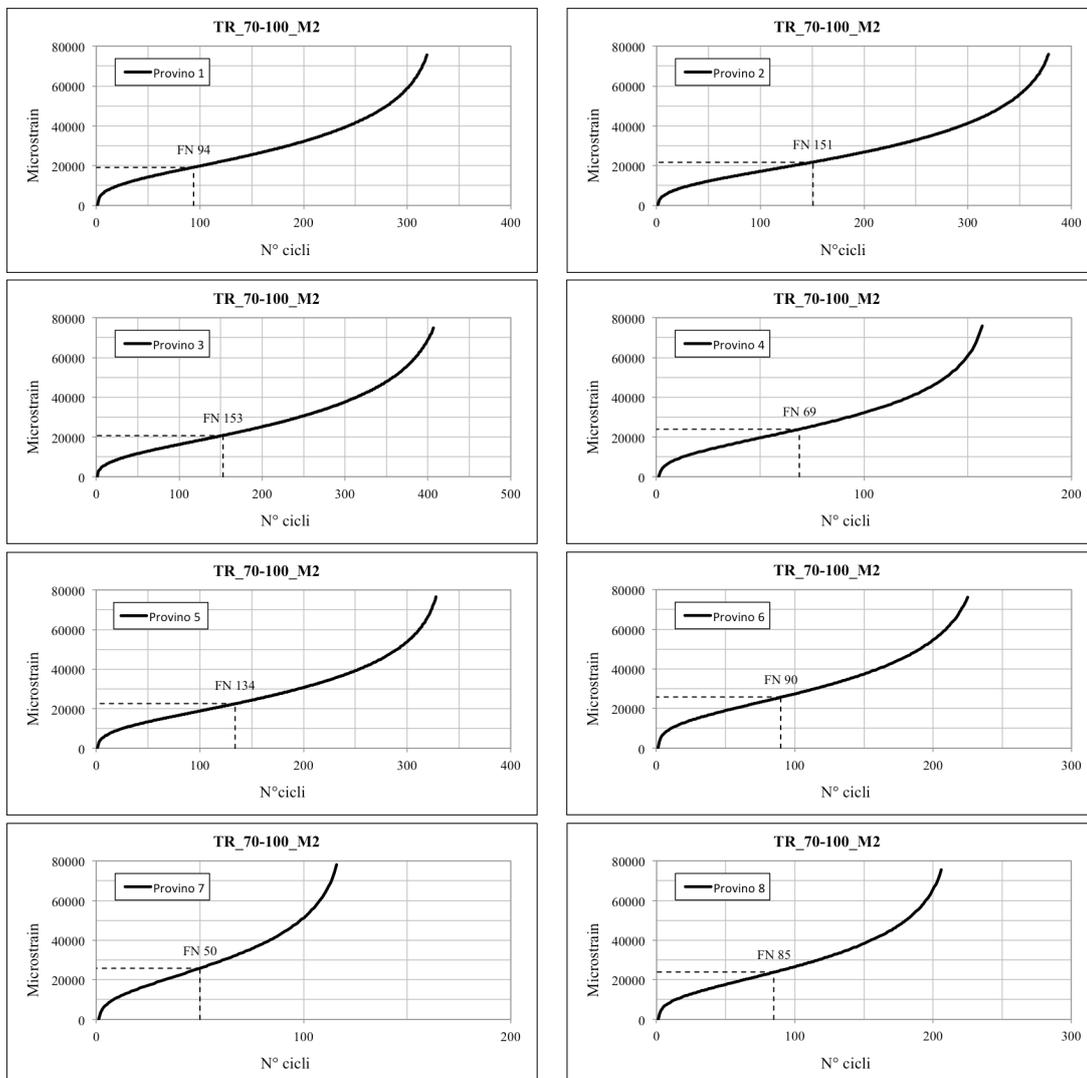


**Figura Allegato 10: Curva del Flow Number dei campioni dalla miscela TR\_70-100\_M1.**

Risultati del Test del Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 5 % bitume “Tal Quale” 70/100.

**Tabella Allegato 11: Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela TR\_70-100\_M2.**

N° campioni	%B	%V	FN
1	5,1	3,3	94
2	5,1	4,7	151
3	5,1	3,4	153
4	5,1	5,8	69
5	5,1	4,1	134
6	5,1	5,4	90
7	5,1	6,4	50
8	5,1	4,1	85

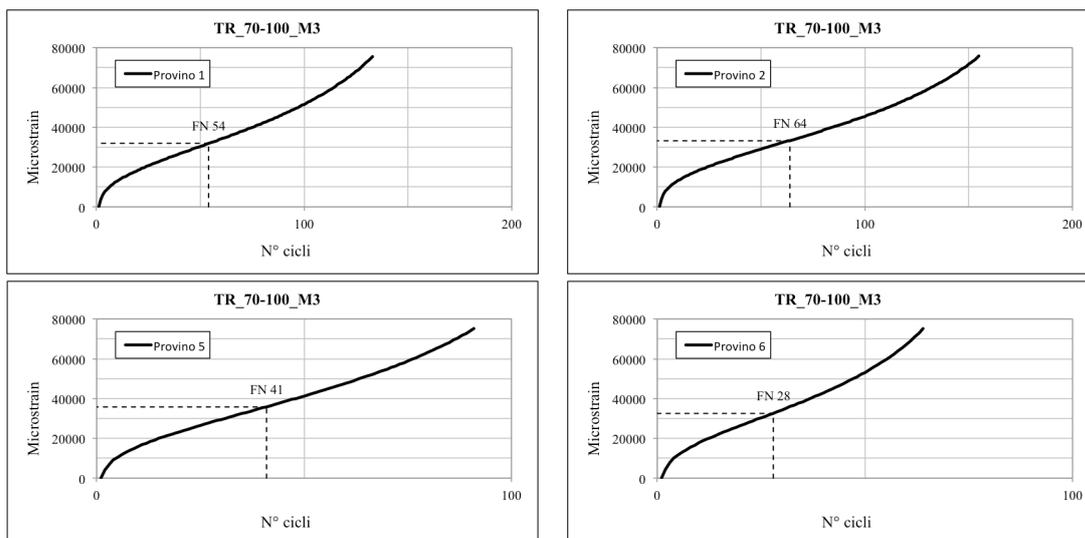


**Figura Allegato 11: Curva del Flow Number dei campioni dalla miscela TR\_70-100\_M2.**

Risultati del Test del Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 6 % bitume “Tal Quale” 70/100.

**Tabella Allegato 12: Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela TR\_70-100\_M3.**

N° campioni	%B	%V	FN
1	6,27	4,3	54
2	6,27	4,1	64
5	6,27	5,8	41
6	6,27	6,0	28

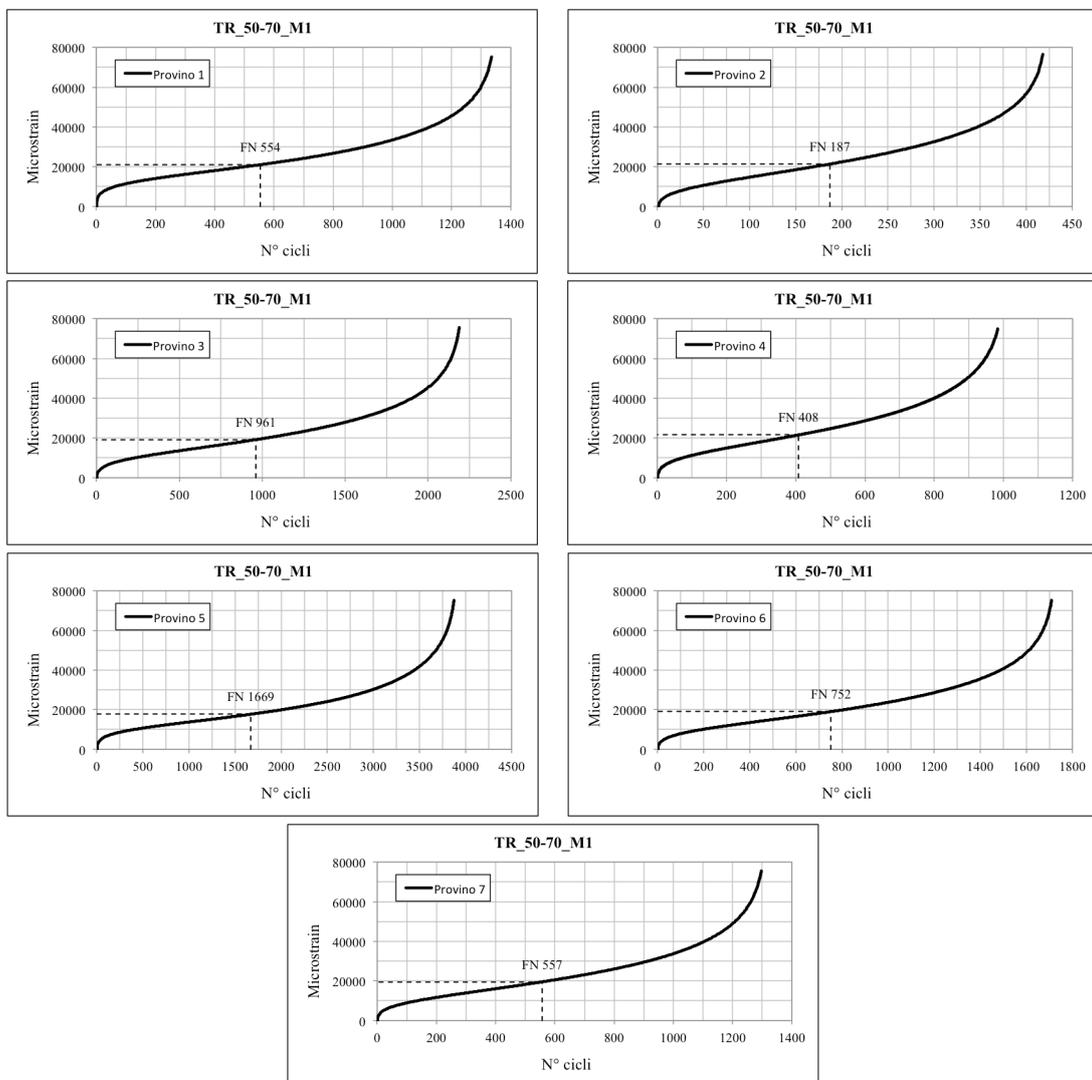


**Figura Allegato 12: Curva del Flow Number dei campioni dalla miscela TR\_70-100\_M3.**

Risultati dei test del Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 4 % bitume “Tal Quale” 70/100.

**Tabella Allegato 13: Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela TR\_50-70\_M1.**

N° campioni	%B	%V	FN
1	4,1	4,1	554
2	4,1	6,9	187
3	4,1	4,7	961
4	4,1	6,4	408
5	4,1	4,0	1669
6	4,1	6,2	752
7	4,1	5,9	557

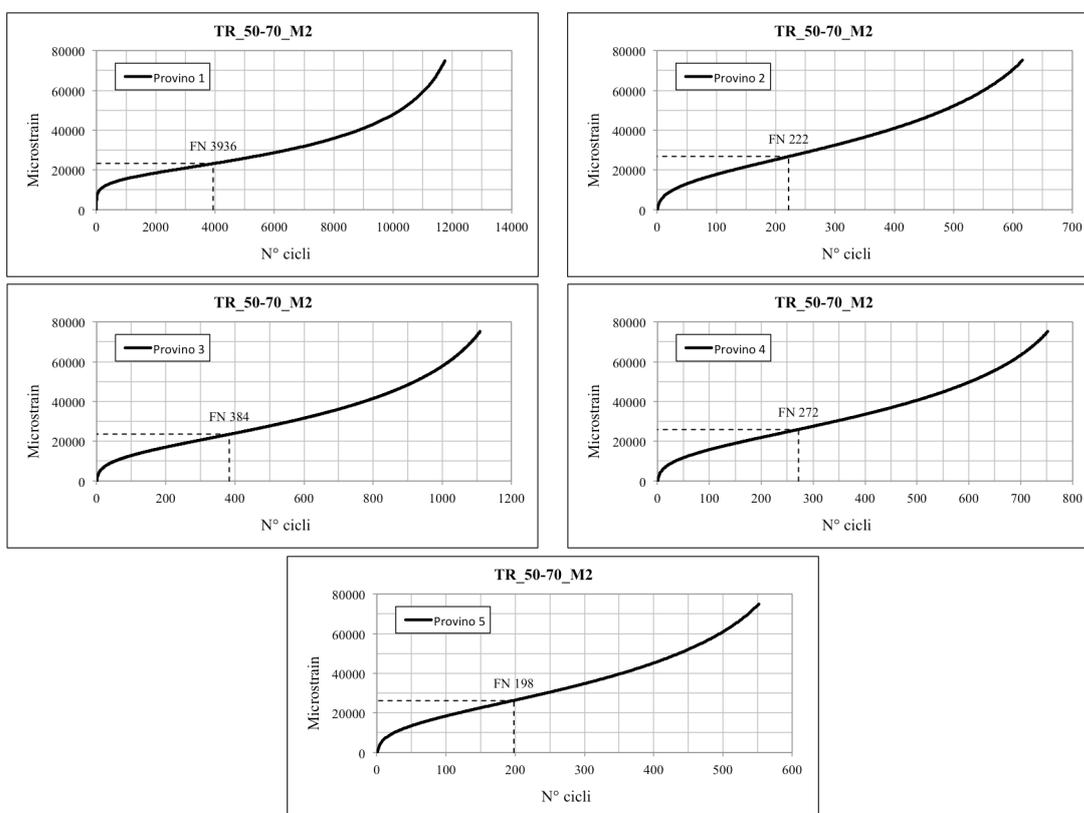


**Figura Allegato 13: Curva del Flow Number dei campioni dalla miscela TR\_50-70\_M1.**

Risultati del Test del Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 5 % bitume “Tal Quale” 50/70.

**Tabella Allegato 14: Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela TR\_50-70\_M2.**

N° campioni	%B	%V	FN
1	4,9	4,1	3936
2	4,9	6,6	222
3	4,9	4,1	384
4	4,9	6,0	272
5	4,9	6,1	198

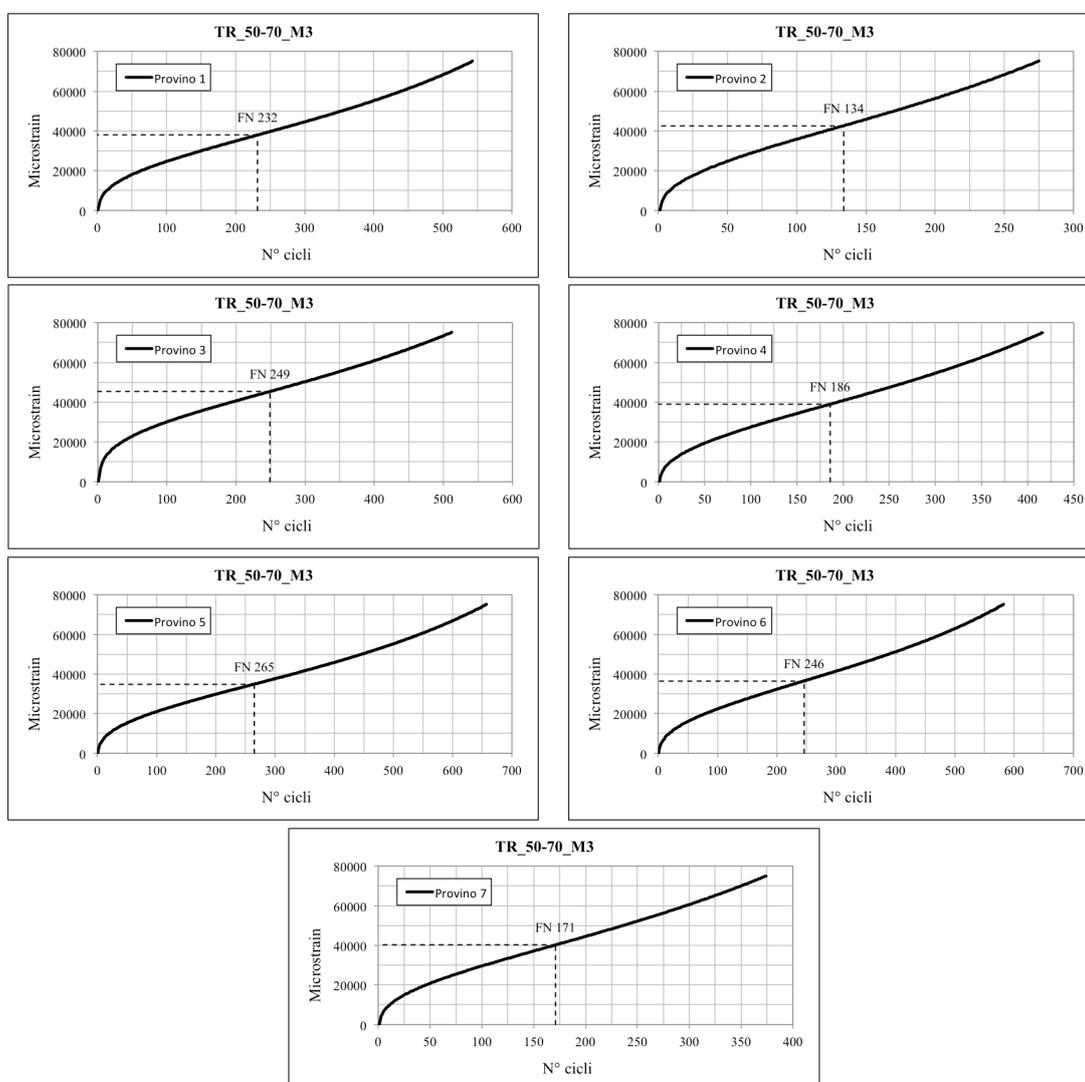


**Figura Allegato 14: Curva del Flow Number dei campioni dalla miscela TR\_50-70\_M2.**

Risultati del Test del Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 6 % bitume “Tal Quale” 50/70.

**Tabella Allegato 15: Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela TR\_50-70\_M3.**

N° campioni	%B	%V	FN
1	5,9	4,3	232
2	5,9	6,3	134
3	5,9	4,4	249
4	5,9	5,6	186
5	5,9	3,8	265
6	5,9	4,2	246
7	5,9	5,9	171

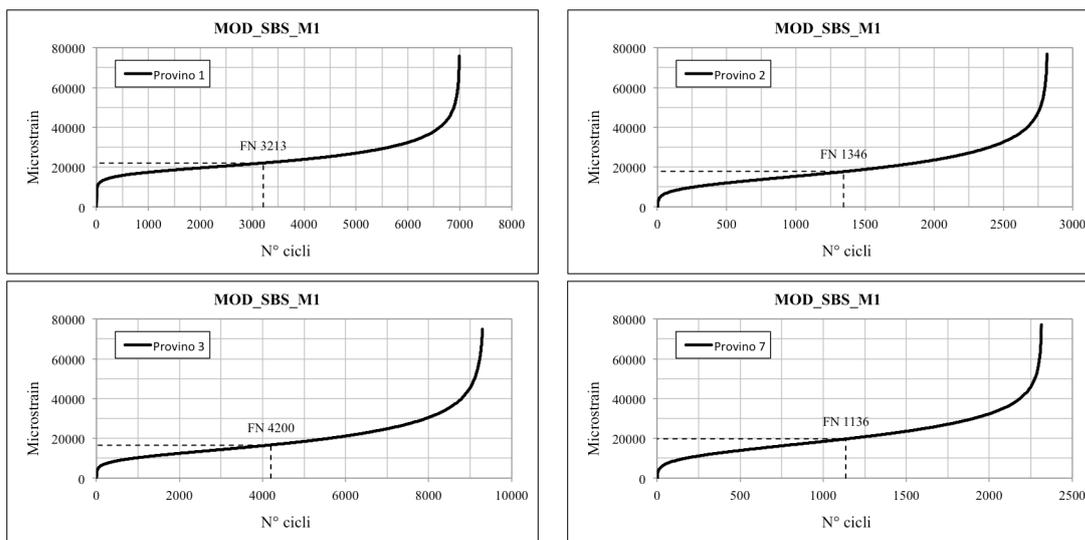


**Figura Allegato 15: Curva del Flow Number dei campioni dalla miscela TR\_50-70\_M3.**

Risultati dei test del Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 4 % bitume modificato con SBS.

**Tabella Allegato 16: Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela MOS\_SBS\_M1.**

N° campioni	%B	%V	FN
1	4,05	4,5	3213
2	4,05	6,0	1346
3	4,05	4,5	4200
7	4,05	6,2	1136

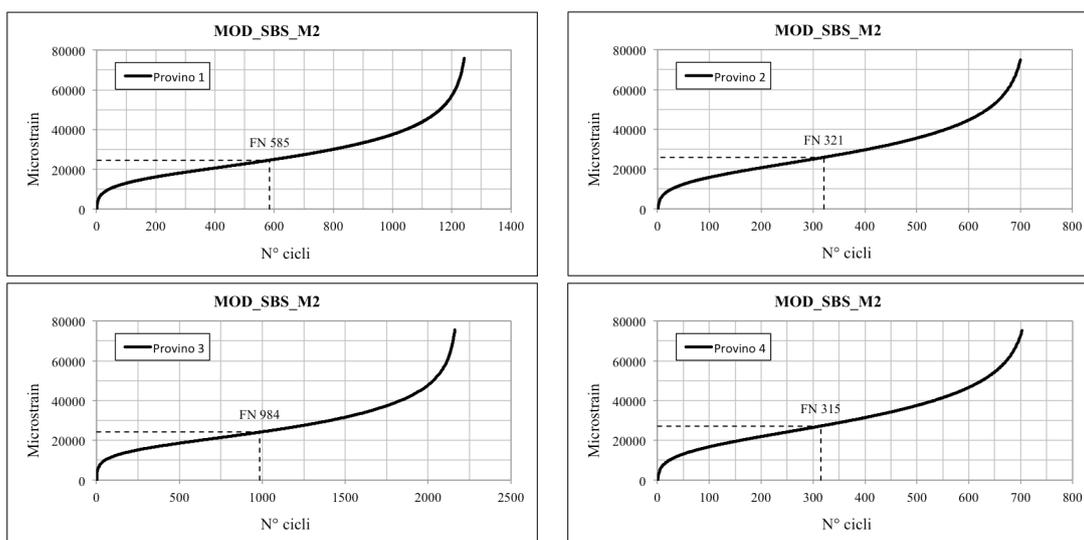


**Figura Allegato 16: Curva del Flow Number dei campioni dalla miscela MOS\_SBS\_M1.**

Risultati dei test del Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 5 % bitume modificato con SBS.

**Tabella Allegato 17: Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela MOS\_SBS\_M2.**

N° campioni	%B	%V	FN
1	5,0	4,2	585
2	5,0	6,0	321
3	5,0	3,9	984
4	5,0	6,1	315

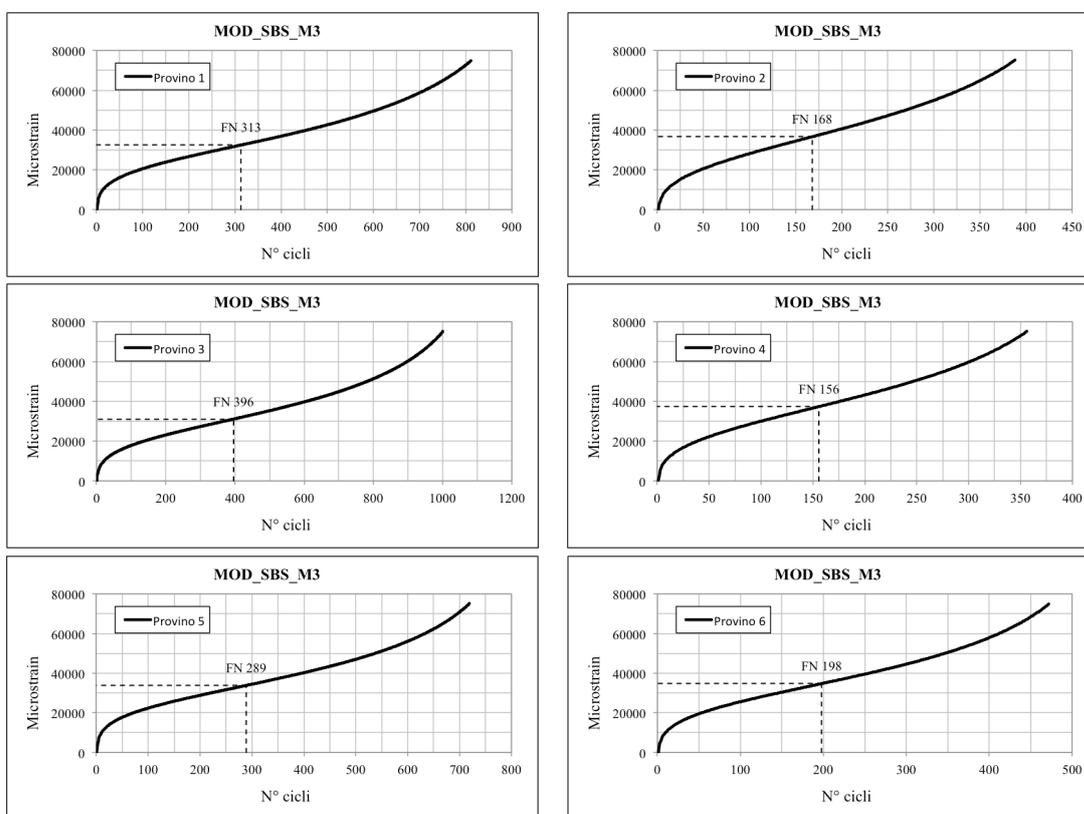


**Figura Allegato 17: Curva del Flow Number dei campioni dalla miscela MOS\_SBS\_M2.**

Risultati dei test del Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela confezionata con il 6 % bitume modificato con SBS.

**Tabella Allegato 18: Flow Number dei campioni ottenuti dalla miscela MOS\_SBS\_M3.**

N° campioni	%B	%V	FN
1	5,84	3,7	313
2	5,84	6,2	168
3	5,84	3,8	396
4	5,84	6,4	156
5	5,84	4,1	289
6	5,84	5,8	198



**Figura Allegato 18: Curva del Flow Number dei campioni dalla miscela MOS\_SBS\_M3.**