



**Politecnico  
di Torino**

**POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Civile Strutture LM

A.a. 2024/2025

**STUDIO DEL COMPORTAMENTO PRESTAZIONALE  
DI MISCELE BITUMINOSE AD ALTO CONTENUTO DI  
FRESATO ADDIZIONATE CON COMPOUND  
POLIMERICICO**

Relatori:

Prof. Orazio Baglieri

Prof. Davide Dalmazzo

Ing. Joseph Nicolas La Macchia

Candidata:

Lucia Rigassio



*Ai miei genitori, Matteo e Roberta, a cui devo tutto.*



## **Abstract**

Il concetto di sostenibilità ricopre oggi un ruolo centrale nella progettazione delle nuove miscele di conglomerato bituminoso per pavimentazioni stradali, incentivando sempre più l'utilizzo di materiali non di primo impiego.

In tale contesto, l'obiettivo del presente elaborato di tesi prevede la valutazione delle prestazioni di miscele bituminose caratterizzate dall'impiego di alti quantitativi (50%) di materiale fresato e di un compound polimerico derivato interamente da plastiche rigide di scarto, aggiunto alla miscela bituminosa tramite metodo ibrido. In particolare, sono state preparate due miscele bituminose che differiscono per il contenuto di compound polimerico (0.3% e 0.5%). Inoltre, è stata prodotta una terza miscela di confronto senza compound polimerico, modificata tramite il tradizionale metodo a umido.

Dopo una fase preliminare di caratterizzazione volumetrica e meccanica effettuata in studi precedenti, il presente lavoro si propone di analizzare il comportamento a fatica delle tre miscele elencate. Il fenomeno della fatica è stato analizzato secondo la norma BS EN 12697-24 F su campioni cilindrici di 150 mm di diametro. Sono state effettuate almeno due ripetizioni per ogni livello tensionale, valutando le prestazioni a fatica sia a parità di deformazioni indotte, sia in funzione degli sforzi indotti sui campioni. In aggiunta, campioni compattati a 120 giri con la pressa a taglio giratorio sono stati testati a 25°C in condizione di trazione indiretta, determinando il fattore  $N_{flex}$  per valutarne la resistenza alla fessurazione. Il comportamento delle tre miscele è risultato fortemente influenzato dall'alto quantitativo di materiale fresato.

La miscela contenente lo 0.5% di compound polimerico è risultata la più performante in entrambe le configurazioni di prova. Ulteriori studi del comportamento a fatica mediante diverse metodologie di analisi sono fortemente raccomandate, nonché l'effettiva fattibilità in impianto delle miscele investigate in laboratorio.

# Sommario

Abstract .....	4
1. Panoramica e obiettivi dello studio .....	8
1.1 Introduzione .....	8
1.2 Le plastiche riciclate .....	9
1.2.1 Tipologie di plastiche .....	10
1.3 Metodologie di implementazione del polimero plastico nelle miscele .....	13
1.3.1 Metodo umido .....	14
1.3.2 Metodo secco .....	14
1.4 La resistenza a fatica .....	16
1.5 Obiettivi.....	18
2 Materiali .....	19
2.1 Introduzione .....	19
2.2 Aggregati.....	20
2.3 RAP .....	22
2.4 Bitume.....	24
2.5 Additivo (rejuvenator).....	24
2.6 Compound polimerico.....	26
2.7 Miscele realizzate .....	26
2.8 Miscele ottime .....	29
3 Campagna sperimentale.....	31

3.1	Procedure preliminari.....	31
3.1.1	Quartatura .....	31
3.1.2	Essiccazione degli aggregati e del fresato .....	32
3.2	Mix design.....	33
3.2.1	Miscelazione.....	33
3.3	Contenuto di legante.....	35
3.3.1	Prova di ignizione.....	36
3.4	Massima massa volumica teorica.....	38
3.4.1	Calcolo.....	39
3.5	Compattazione giratoria .....	42
3.5.1	Procedura.....	43
3.6	Bulk density .....	45
3.6.1	Calcolo.....	46
3.7	Modulo di rigidezza (IT-CY) .....	46
3.7.1	Procedura.....	48
3.8	Resistenza a trazione indiretta (ITS) .....	51
3.9	Resistenza a fatica (CIT-CY) .....	54
3.10	Indice Nflex.....	58
4.	Analisi dei risultati.....	61
4.1	Le miscele ottime .....	61
4.2	Percentuale contenuto legante.....	64

4.3 Caratteristiche volumetriche .....	64
4.4 Caratteristiche meccaniche.....	65
4.4.1 Modulo di rigidezza.....	65
4.4.2 Resistenza a fatica .....	67
4.4.3 Resistenza a trazione indiretta e indice Nflex .....	77
5. Conclusioni e sviluppi futuri.....	83
Indice delle figure .....	86
Indice delle tabelle .....	90
Bibliografia .....	92

# 1. Panoramica e obiettivi dello studio

## 1.1 Introduzione

Uno dei principali obiettivi della nostra epoca è quello di intraprendere un cammino verso un futuro sempre più sostenibile e ciò sta diventando possibile introducendo, in ogni settore, concetti quali ad esempio quello di economia circolare.

La gestione dei rifiuti e il riciclo dei materiali sono temi attuali e di fondamentale importanza, a tal punto che anche il mondo delle infrastrutture ha iniziato a prendere parte a questa sfida, indagando sulle possibili soluzioni da adottare, tra le quali ad esempio l'integrazione di plastica riciclata nelle pavimentazioni stradali.

Questo elaborato si propone di condurre un'analisi circa i vantaggi dell'utilizzo delle plastiche riciclate nelle miscele di conglomerato bituminoso, nello specifico all'interno dello strato di collegamento della pavimentazione stradale. Ciò non riguarda solo un vantaggio in termini di sostenibilità attraverso, ad esempio, la riduzione del consumo di materie prime, ma si vuole dimostrare soprattutto come questa fusione porti a un miglioramento delle proprietà meccaniche dell'asfalto, in particolar modo in termini di resistenza a fatica.

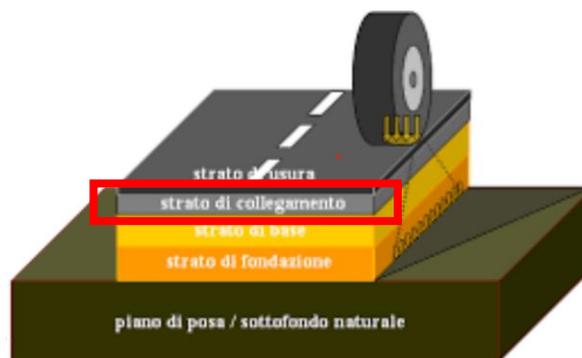


Figura 1: Layers di una pavimentazione stradale

## 1.2 Le plastiche riciclate

La plastica è uno dei materiali più utilizzati e al tempo stesso uno dei principali responsabili dell'inquinamento globale. Per quanto sia pratica e relativamente semplice da produrre, non si può dire altrettanto dello smaltimento causa la scarsa biodegradabilità e il continuo aumento della sua produzione. Per far chiarezza, si riportano alcuni dati circa la produzione e lo smaltimento di questo materiale nel mondo.

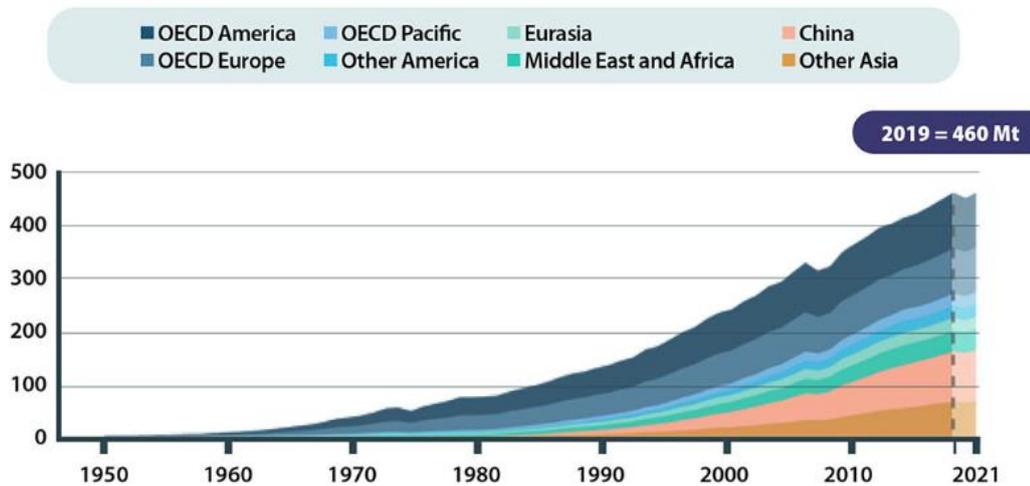


Figura 2: Fonte – OECD Global Plastics

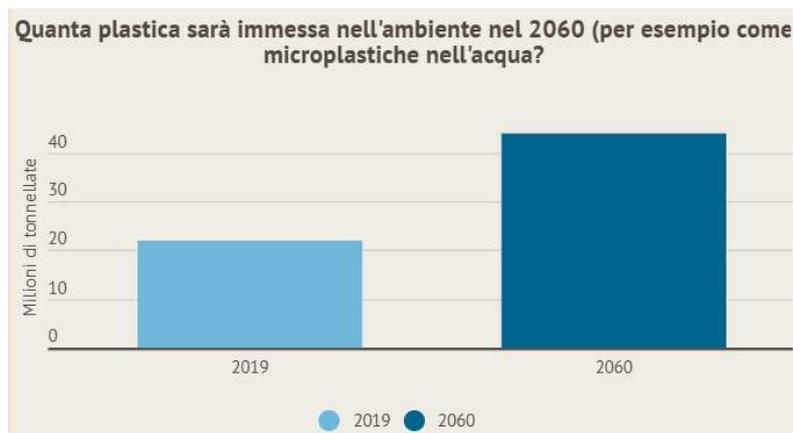


Figura 3: Fonte – OECD Global Plastics

Il primo grafico mostra come la produzione di plastica sia aumentata, soprattutto negli ultimi vent'anni, passando da 234 milioni di tonnellate a circa il doppio e come il fenomeno non sembri arrestarsi. Il vero problema però è nella gestione del suo smaltimento: solo il 9% viene riciclato, il 19% viene incenerito, il 50% finisce in discarica e la restante parte viene eliminata in maniera non controllata.

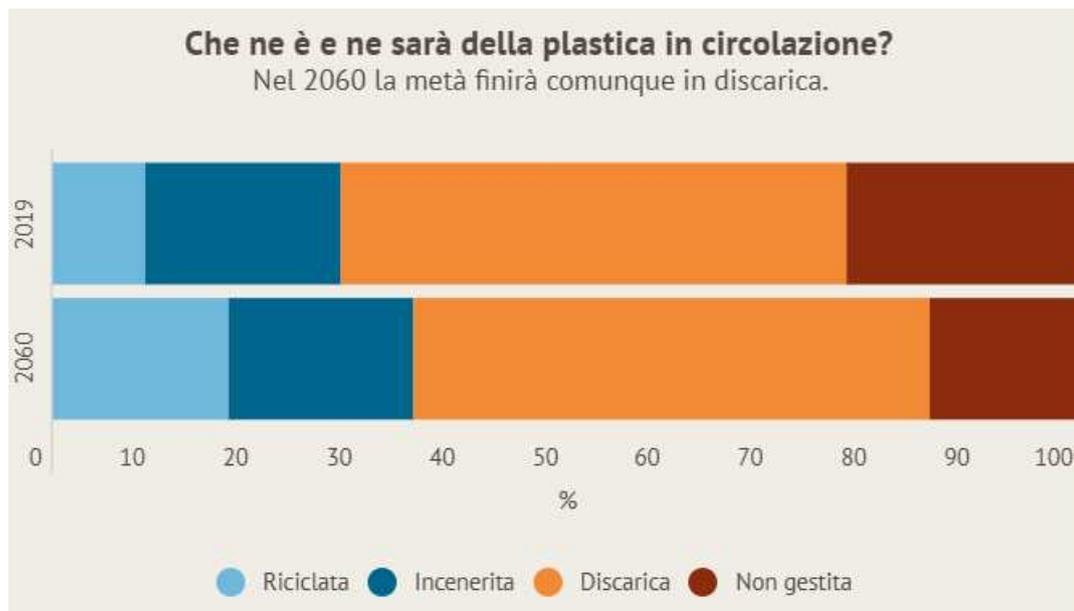


Figura 4: Fonte – OECD Global Plastics

Dagli studi condotti dall'OECD Global Plastics risulta evidente come sia necessario intervenire al più presto, migliorando la gestione della produzione e del riciclo della plastica, adottando soluzioni più sostenibili, come l'incorporazione di questa nelle pavimentazioni stradali, così da costruire una nuova strada verso il futuro.

### ***1.2.1 Tipologie di plastiche***

Esistono numerose tipologie di plastiche che differiscono per composizione chimica e caratteristiche fisiche, rendendo così più complicato il loro riciclo (la plastica non può essere riciclata tutta allo stesso modo). La Society of the Plastics Industry l'ha catalogata in sette gruppi, identificati attraverso dei codici, in funzione dei seguenti parametri: proprietà chimiche e fisiche, campo di applicazione, percentuale di

riciclaggio (quest'ultimo dato è stato fornito considerando il riciclo che avviene in AUS e NZ):

Identification Number	Description	Properties	Product Applications in AU/NZ	Recycling Rate* in AUS/NZ
 PET	Polyethylene Terephthalate (PET)	Good thermal properties Resistant to most solvents High impact and shatter resistant Low gas permeability	<b>Post-Consumer Market</b> Water bottles Shampoo/soap bottles Food containers Packaging trays  <b>Post-Industrial Market</b> Strapping Storage containers	Commonly Recycled ~20%
 HDPE	High Density Polyethylene (HDPE)	Higher tensile strength in comparison to other polyethylene resins Resistant to most solvents Low temperature resistant Stiff material	<b>Post-Consumer Market</b> Milk/juice bottles Food containers  <b>Post-Industrial Market</b> Pipes Geomembrane covers Chemical drums	Commonly recycled ~15%
 PVC	Polyvinyl Chloride (PVC)	Strong insulating properties High durability Flame retardant Resistant to inorganic chemicals	<b>Post-Consumer Market</b> Disposable medical equipment  <b>Post-Industrial Market</b> Water pipes Insulation pipes Waterproofing membranes Cable insulators	Occasionally recycled ~2%
 LDPE	Low Density Polyethylene (LDPE)	Chemical resistant to acids Low water absorption High impact strength at low temperatures Thin film-like material	<b>Post-Consumer Market</b> Plastic bags Food containers Dispensing bottles  <b>Post-Industrial Market</b> Bulk bags Tunnel film Packaging material Irrigation pipes Cover films Water tanks	Commonly recycled ~15%

Identification Number	Description	Properties	Product Applications in AU/NZ	Recycling Rate* in AUS/NZ
 PP	Polypropylene (PP)	Resistant to cracking Strong mechanical and electrical properties Good optical properties Stiffer than polyethylene	<b>Post-Consumer Market</b> Kitchen containers Bottles Toys Furniture Appliances  <b>Post-Industrial Market</b> Bulk bags Flowerpots Packaging material Crate holders Chemical drums Automotive parts Buckets	Sometimes recycled ~8%
 PS	Polystyrene (PS)	Strong insulating properties High compressive strength Resistant to salts and alkalis Resistant to aging	<b>Post-Consumer Market</b> Packaging material Food packaging  <b>Post-Industrial Market</b> Packaging material Safety equipment (e.g., sporting helmets), car seats	Sometimes recycled ~12%
 OTHER	Others (PC, PLA, ABS, PA6)	Resins that do not fall into any of the categories above are listed as category 7 plastics, such as: Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Polylactic Acid (PLA), Polycarbonates (PC), Nylon (PA6) High variability in chemical and mechanical properties Possible generation of Bisphenol A and S (BPA and BPS).	<b>ABS</b> Electronics Hygiene stations Car bumpers and automotive parts Household appliances  <b>Nylon</b> Fishing nets Ropes Clothing Carpets	Sometimes recycled ~8%

Figura 5: identificazione dei polimeri plastici

Non è possibile, tuttavia, inserire qualsiasi tipologia di plastica all'interno del conglomerato bituminoso; in particolare è importante valutare: la temperatura di fusione, la densità, la forma e la tossicità del materiale. Molte miscele bituminose vengono prodotte intorno ai 170°C, ma non tutti i polimeri si fondono a questa temperatura, rendendoli quindi non adatti secondo le tecniche comunemente utilizzate (metodo a umido). Risulta perciò fondamentale un'analisi preliminare sulla tipologia di plastica da impiegare nel riciclo delle pavimentazioni stradali. Di seguito una tabella riassuntiva dei tipi di plastica e la loro temperatura di fusione:

Number	Types of Plastics	Application/Uses	Melting Point (°C)	Melting Point (°F)
1	Polyethylene Terephthalate (PET)	Bottles for water and soda; Food packaging; Food containers	>250	>482
2	High Density Polyethylene (HDPE)	Plastic mailing envelopes; Flexible pipes; Plastic chairs/stools; Toys and playground equipment; Plastic bags; Shampoo bottles	130 but can vary in grade	266 but can vary in grade
3	Polyvinyl Chloride (PVC)	Pipes; Electric cables; Construction material; Sign boards; Vinyl flooring	100-260	212-500
4	Low Density Polyethylene (LDPE)	Trays and containers; Plastic wraps; Plastic bags; Juice and milk containers	110-120	230-248
5	Polypropylene (PP)	Plastic hinges; Piping system; Plastic Chairs; Reusable plastic containers; Plastic moldings	160-165	320-330
6	Polystyrene (PS)	Food packaging; CD and DVD casing; Disposable utensils; License plate frames; Foam beverage cups	Glass Transition at 100	Glass Transition at 212
7	Other (Polycarbonate – PC; Polylactide – PLCA; Acrylonitrile Butadiene Styrene – ABS; Nylon; Fiberglass; Acrylic)	Baby bottles; Car parts; Water cooler bottles; Food containers	Based on grade and plastic type	

Un aspetto vincente dell'integrazione diplastiche nelle pavimentazioni stradali è sicuramente la fattibilità economica del materiale se comparata con quella dei componenti tradizionali dell'asfalto. Il prezzo finale del polimero dipende dal processo necessario per ottenere il prodotto finale e dalla forma di quest'ultimo, che può essere a scaglie, a pellet e in polvere.



*Figura 6: plastica in flocchi*



*Figura 7: plastica in pellets*



*Figura 8: plastica in polvere*

### ***1.3 Metodologie di implementazione del polimero plastico nelle miscele***

Esistono due procedimenti principali per implementare le plastiche riciclate alle miscele di conglomerato bituminoso: il metodo umido e il metodo secco. Nella realtà ne esiste una terza, la metodologia ibrida, che è stata utilizzata in laboratorio per la realizzazione delle miscele contenenti il compound polimerico. Importante nella fase di scelta del processo da adottare, scegliere il polimero anche in funzione della sua temperatura di fusione.

Perché la plastica riciclata possa essere implementata via umido o via ibrida, viene classificata utilizzando i seguenti criteri:

- contaminazione da riciclaggio;
- miscibilità;
- purezza;
- processabilità;
- stabilità di stoccaggio;
- solubilità;
- polarità;
- presenza di additivi tossici.

Per la metodologia via secco si considerano solo il primo e gli ultimi tre parametri.

### ***1.3.1 Metodo umido***

Il primo metodo preso in esame è il metodo umido, attraverso cui plastiche con basso punto di fusione, sotto forma di fiocchi, pellet o polvere, vengono miscelate con il legante bituminoso a temperature maggiori di 150°C; si ottiene così come prodotto finale bitume modificato (PMB). Lo scopo è quello di ottenere una miscela omogenea durante la fase di miscelazione, in modo tale che le plastiche vengano incorporate correttamente.

### ***1.3.2 Metodo secco***

In questo secondo approccio la differenza rispetto al precedente sta nel fatto che le plastiche sostituiscono una parte dell'aggregato, permettendo così di incorporare una percentuale più alta di polimeri. La temperatura di fusione di tali polimeri deve soddisfare requisiti più stringenti, presentando valori pari ad almeno 200°C, ovvero superiori di almeno 30°C alla temperatura di miscelazione. L'obiettivo in questo caso è che il polimero integrato sostituisca una parte dello scheletro litico. Questo procedimento è applicabile a tutte le tipologie di plastica con elevati punti di fusione e rammollimenti, eccetto per il PVC, a causa delle emissioni di cloruro che potrebbe rilasciare.

Per chiarire ulteriormente le idee circa i due approcci appena esposti, si mostra uno schema di come avviene l'implementazione delle plastiche, via umida e via secca, in un impianto:

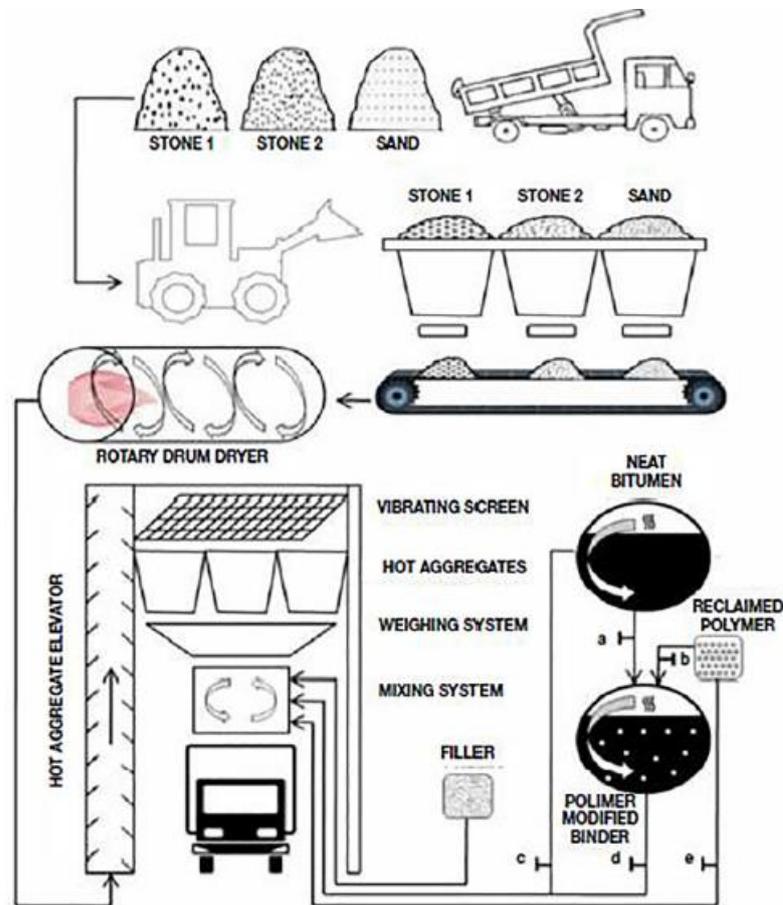


Figura 9: Fonte – “The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review” – Yuetan Ma, Hongyu Zhou, Xi Jiang, Pawel Polaczyk, Rui Xiao, Miaomiao Zhang

Da uno studio riportato in letteratura (“The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review” – Yuetan Ma, Hongyu Zhou, Xi Jiang, Pawel Polaczyk, Rui Xiao, Miaomiao Zhang), in cui sono state analizzate differenti plastiche riciclate utilizzando i procedimenti sopra descritti, si evince che:

- il processo a umido si utilizza per lo più con polimeri plastici con basse temperature di fusione e migliora la resistenza all'ormaiamento, all'umidità e la resistenza a fatica;
- durante l'implementazione a umido si potrebbero riscontrare problemi a causa della separazione di fase e delle prestazioni a bassa temperatura del legante, che possono essere mitigati aggiungendo degli additivi nella miscela;
- il metodo a secco migliora la resistenza all'usura e all'umidità. Inoltre, mentre le plastiche con temperatura di fusione elevata vengono implementate in sostituzione agli aggregati, polimeri con temperatura di fusione bassa formano un film sottile, portando a un aumento di adesione tra conglomerato bituminoso e plastica (metodologia ibrida);
- in generale entrambi i processi portano a un miglioramento delle proprietà prestazionali della miscela.

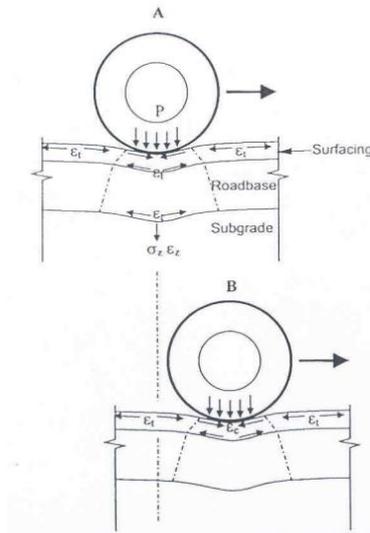
#### *1.4 La resistenza a fatica*

La rottura per fatica di una pavimentazione stradale è causata da carichi che variano nel tempo, rappresentati dal passaggio dei veicoli, che provocano l'alternanza di zone di compressione e trazione. Il fenomeno determina un progressivo accumulo di danneggiamento all'interno del materiale, provocando infine la rottura per carichi inferiori rispetto alla resistenza.

Inizialmente si avrà la formazione di microcricche (fase di innesco), che nel tempo si propagheranno all'interno del materiale, riducendo la sezione resistente, fino ad arrivare ad essere visibili a occhio nudo. Tra le tipologie di rottura troviamo:

- rottura a fatica di tipo bottom-up, chiamata anche rottura a pelle di coccodrillo, in cui sulla superficie stradale si crea una sorta di rete formata da fratture superficiali del manto stradale. L'innesco avviene dagli strati più profondi, per propagarsi in superficie;
- rottura a fatica di tipo top-down, che ha inizio sulla superficie stradale e si propaga verso gli strati più bassi.

La rottura per fatica dev'essere dunque correttamente analizzata e studiata in modo da garantire una corretta progettazione strutturale.



*Figura 12: impronta del pneumatico sulla pavimentazione stradale*



*Figura 13: esempio di rottura a pelle di coccodrillo (fessure visibili a occhio nudo)*

Esistono diverse metodologie di prove di fatica, che consistono nel sottoporre il campione a sollecitazioni ripetute fino alla rottura. Ciò che può variare è la temperatura di prova, la forma del campione in esame, il carico applicato e le condizioni al contorno: controllo di sforzo o controllo di deformazione. Dai valori di output si ottengono le curve di fatica del materiale in scala bilogarithmica, che riportano sull'asse delle ascisse il valore di deformazione iniziale applicata e sull'asse delle ordinate il numero di cicli che ha portato alla rottura del provino. Tale

numero di cicli risultante che esprime la vita a fatica del suddetto provino, può essere determinato tramite diversi criteri: ne è un esempio l'abbattimento del modulo di rigidezza alla metà del suo valore iniziale. Nell'ambito della presente tesi si è scelto di utilizzare come criterio la rottura fisica del campione in esame. Si riporta una curva a fatica di esempio:

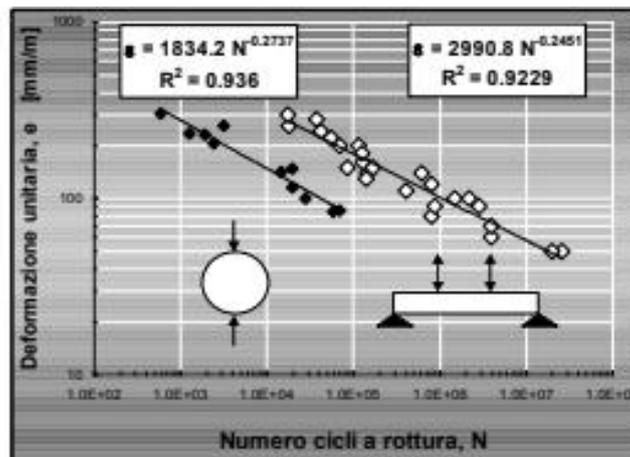


Figura 12: curva di fatica

## 1.5 Obiettivi

Il presente elaborato si pone l'obiettivo di investigare le prestazioni meccaniche di miscele bituminose con un alto quantitativo di fresato (50%) e modificate con un compound polimerico in due diversi dosaggi (0.3% e 0.5% sul peso della miscela) attraverso la metodologia ibrida. Una miscela modificata secondo la tradizionale metodologia "a umido" è stata utilizzata come confronto.

Le tre miscele ottime, determinate a seguito di uno studio di mix design oggetto di studi precedenti, sono state compattate in provini cilindrici e le rispettive prestazioni nei riguardi della resistenza da fatica, della resistenza a trazione indiretta e della determinazione dell'indice Nflex in configurazioni di trazione indiretta sono state valutate.

## 2 Materiali

### 2.1 Introduzione

Nel capitolo che segue verranno descritti i materiali utilizzati in laboratorio per creare le miscele di conglomerato bituminoso sostenibili che sono state oggetto di verifica e analisi presso il laboratorio di Infrastrutture del Politecnico di Torino. Le tre miscele differiscono per la tipologia di modifica (metodologia "a umido" confrontata con metodologia "ibrida") e per il dosaggio di compound polimerico nelle miscele modificate in maniera "ibrida". I materiali utilizzati sono:

1) aggregati vergini:

1. sabbia 0/5
2. pietrisco 8/16
3. pietrisco 16/22

Il pietrisco 16/22 ha subito una precedente vagliatura, al fine di rimuovere gli elementi che presentassero dimensione superiore ai 20 mm.

2) RAP (fresato) 50%:

4. RAP 0/12 (30%)
5. RAP 0/20 (20%)

3) compound polimerico (composto da plastiche riciclate):

6. SUPERPLAST ECO 0.3% sul mix
7. SUPERPLAST ECO 0.5% sul mix

4) bitume vergine:

8. bitume tal quale 50/70
9. bitume modificato hard 45/80-70

5) rejuvenator: bio-based ACF2000 green (0.3% su RAP)

6) filler.

Aggregati vergini e RAP sono stati forniti dall'impianto di conglomerato bituminoso Bitux S.p.A., specializzato nella pavimentazione di strade e autostrade; il compound polimerico dall'azienda Iterchimica.



*Figura 13: le tre foto mostrano l'impianto Bitux S.p.A.*

## **2.2 Aggregati**

La pezzatura degli aggregati segue una curva granulometrica di riferimento, che rispetta i requisiti imposti da due Capitolati speciali d'appalto (CSA), nello specifico

quello utilizzato per i lavori sull'autostrada A4 e quello redatto dalla società SIIV. Tale curva è solitamente impiegata in strati di collegamento.

Si riporta un'immagine dei materiali e la curva granulometrica di riferimento:

*Tabella 1: dimensione aggregati vergini*

Setaccio [mm]	Sabbia 0/5 [%]	Pietrisco 8/16 [%]	Pietrisco 16/22 [%]	RAP 0/12 [%]	RAP 0/20 [%]	Filler [%]	Curva di progetto [%]	Curva di riferimento [%]	Scarto [-]
31.5	100.0	100.0	100.0	100	100	100.0	100	100	0.0
20	100.0	100.0	100.0	100	100	100.0	100	100	0.0
16	100.0	100.0	43.4	100	97.2	100.0	95	95	3.9
12.5	100.0	82.2	5.6	100	89	100.0	84	84	1.6
8	100.0	12.0	1.9	91	61.1	100.0	68	68	1.7
4	76.1	0.5	1.6	64.7	35.4	100.0	50	50	2.4
2	42.1	0.4	1.6	48.3	25.8	100.0	33	33	0.6
0.5	18.7	0.4	1.3	26.7	15.4	100.0	17	17	0.0
0.25	12.0	0.4	1.2	18.7	11.3	100.0	11	11	1.1
0.063	3.0	0.3	0.8	9.9	5.9	97.2	6	6	0.0



*Figura 14: dimensione aggregati utilizzati per le miscele ottime*

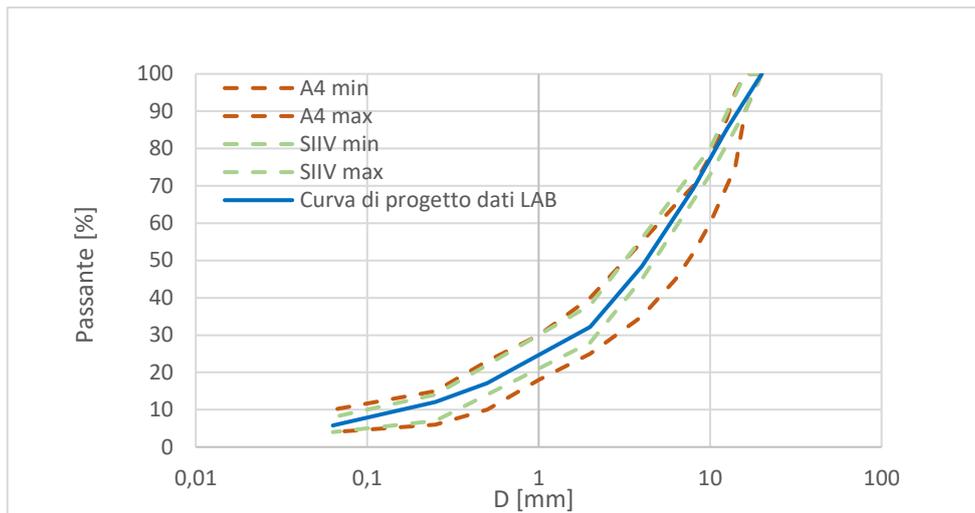


Figura 15: curva granulometrica di progetto

La curva di progetto (in blu) ricade all'interno dei limiti dei CSA ed è stata studiata in un precedente studio di ricerca, di cui questo elaborato rappresenta una prosecuzione.

### 2.3 RAP

Per RAP (dall'inglese Reclaimed Asphalt Pavement) o fresato si intende il conglomerato bituminoso di recupero proveniente dalla fresatura di pavimentazioni stradali esistenti, che risultano ammalorate o a fine vita utile. Essendo un materiale di recupero contiene al suo interno del bitume invecchiato. Il suo utilizzo combina i vantaggi economici a quelli ambientali e richiede un'accurata analisi circa: la percentuale di legante e il suo invecchiamento, tipo e qualità dell'aggregato, con corrispettiva curva granulometrica.

Nella preparazione dei provini è stato utilizzato un fresato proveniente da un'autostrada della Valle d'Aosta, che costituiva lo strato di base, di collegamento e di usura. Le Normative consentono un riciclaggio del fresato minimo del 20% sul volume complessivo della pavimentazione.

Il RAP è stato opportunamente vagliato, frantumato, frazionato e stoccato dallo stesso impianto di cui sopra. Se ne riporta un'immagine:



Figura 16: dimensioni aggregati fresato

Seguono le tabelle riguardo la distribuzione granulometrica dell'estratto del RAP (nel gergo "il bianco del RAP", ovvero il RAP privo della componente legante) e la percentuale di bitume presente:

Tabella 2: distribuzione granulometrica aggregato

RAP 0/12 [%]	RAP 0/20 [%]
100	100
100	100
100	97.2
100	89
91	61.1
64.7	35.4
48.3	25.8
26.7	15.4
18.7	11.3
9.9	5.9

Tabella 3: percentuale di bitume presente nel fresato

Pb [%]	
RAP 0/12	RAP 0/20
5.45%	4.15%

Questi valori sono stati ottenuti attraverso più prove di ignizione seguendo la norma **BS EN 12697 – 39**. Il risultato finale è la media della differenza di peso prima e dopo la prova, di più campioni testati.

## **2.4 Bitume**

Il bitume è “un materiale virtualmente non volatile, adesivo e impermeabile derivato dal petrolio greggio oppure presente nell’asfalto nativo; completamente o quasi completamente solubile in toluene, molto viscoso o quasi solido a temperatura ambiente”, così è come lo definisce la norma UNI EN 12597. Il suo ruolo è quello di legare gli aggregati tra di loro, in modo da formare una miscela solida e compatta.

Il legante adoperato nel presente elaborato è di due tipi: bitume tal quale e bitume modificato PMB (hard). Quest’ultimo contiene al suo interno dei polimeri, nonché plastiche, al fine di migliorare le prestazioni e le qualità della miscela bituminosa.

Il bitume tal quale ha una classe di penetrazione 50/70, il secondo è di classe 4. Per stabilire tale classificazione si è fatto riferimento alla EN 12591 per il bitume tal quale e alla EN 14023 per il bitume modificato (classificazione determinata in lavori precedenti).

## **2.5 Additivo (rejuvenator)**

La principale problematica riguardo l’utilizzo di fresato proveniente da altre pavimentazioni stradali come materiale di riciclo all’interno di una nuova miscela di conglomerato, è la presenza di bitume invecchiato, che risulta essere rigido – fragile e quindi difficilmente lavorabile e con prestazioni più scarse. La causa dell’invecchiamento del bitume è legata principalmente al processo di ossidazione a cui è sottoposto nel tempo.

Per ovviare ciò si utilizzano comunemente degli additivi chimici funzionali, come i ringiovanenti, o rejuvenator, in inglese. Il rejuvenator ha il compito di ringiovanire le caratteristiche del bitume invecchiato dal punto di vista delle prestazioni meccaniche.

Tale additivo è stato applicato a freddo, spruzzandolo, sul conglomerato preventivamente riscaldato in forno a 70° e poi mescolato il tutto. È prassi comune stabilire il suo in funzione della percentuale di fresato presente all'interno della nuova miscela. L'additivo che è stato messo a disposizione è stato così battezzato: ITERLENE ACF 2000 GREEN, ed è stato fornito dall'azienda Iterchimica S.p.A. Se ne riportano alcune caratteristiche:

PHYSICAL PROPERTIES	
Aspect	liquid
Color	Brown - Purple
Density at 80°F (25°C)	0.93 ± 0.1 g/cm <sup>3</sup>
Viscosity at 80°F (25°C )	100 ± 50 cP
Flash point	> 390°F (200°C)
Water content	< 2%

*Figura 17: proprietà fisiche rejuvenator*



*Figura 18: rejuvenator utilizzato e miscelazione RAP + rejuvenator*

## 2.6 Compound polimerico

Il materiale plastico, prodotto da Iterchimica S.p.A., è protetto da brevetto industriale, pertanto l'esatta formulazione è ignota. Quello di cui si è a conoscenza è la temperatura di rammollimento del materiale, c.a. 170 °C, che coincide con quella utilizzata durante la fase di miscelazione.

All'interno delle miscele è stata inserita una percentuale di compound polimerico proveniente da plastiche di scarto pari allo 0.3% e allo 0.5% rispetto al peso della miscela. Si riporta un'immagine delle plastiche utilizzate:



Figura 19: Compound polimerico utilizzato

## 2.7 Miscele realizzate

Le miscele esaminate in questo elaborato di tesi presentano un contenuto di legante ottimale derivato da uno studio antecedente di mix design: nella fattispecie erano state realizzate 12 miscele in totale, che differivano per la percentuale di plastiche al loro interno e per la tipologia e quantitativi di bitume (tal quale o modificato). Si riporta una tabella riassuntiva, in funzione dei vuoti ottenuti:

Tabella 4: tabella miscele realizzate e vuoti ottenuti tramite compattazione

		v_Ninit (%)	v_Ndes (%)	v_Nmax (%)	Pb (%)
SP1	SP1 4.0%	13.4	5.5	4.3	1.2
	SP1 4.1%	11.8	3.8	2.7	1.3
	SP1 4.6%	12.8	4.9	3.6	1.8
	SP1 5.2%	9.4	1.3	0.6	2.4
	SP1 5.4%	9.4	1.2	0.4	2.5
PMB	PMB 3.7%	14.4	6.9	5.4	1.1
	PMB 4.3%	15.3	7.5	6.2	1.8
	PMB 4.6%	12.2	3.9	2.4	2.1
	PMB 5.0%	10.8	2.4	1.3	2.5
SP2	SP2 4.3%	12.8	5.1	3.9	1.3
	SP2 4.8%	12.7	4.5	3.3	1.8
	SP2 5.2%	12.1	4.2	2.8	2.3

Le miscele SP1 ed SP2 contengono bitume tal quale, quelle denominate PMB bitume modificato. Dallo studio e dal confronto dei grafici di seguito riportati (già ampiamente discussi in una tesi precedenti), si è arrivati a stabilire quali potessero essere le miscele ottime in termini di vuoti e rigidezza, in modo in modo da valutare successivamente su queste ultime le caratteristiche meccaniche.

I grafici sono stati costruiti facendo riferimento ai limiti imposti dalle specifiche CSA utilizzato per l'autostrada A4, e impiegando i dati ottenuti dalla compattazione con pressa a taglio giratoria.

Tabella 7: miscele e percentuale di compound polimerico considerato

Nome miscela	Compound polimerico
SP1	0.3 %
PMB	0%
SP2	0.5%

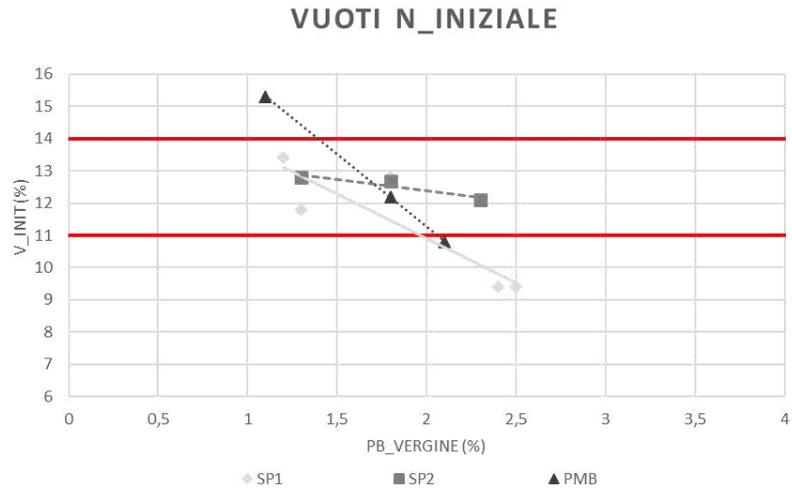


Figura 20: percentuale vuoti  $n_{iniziale}$

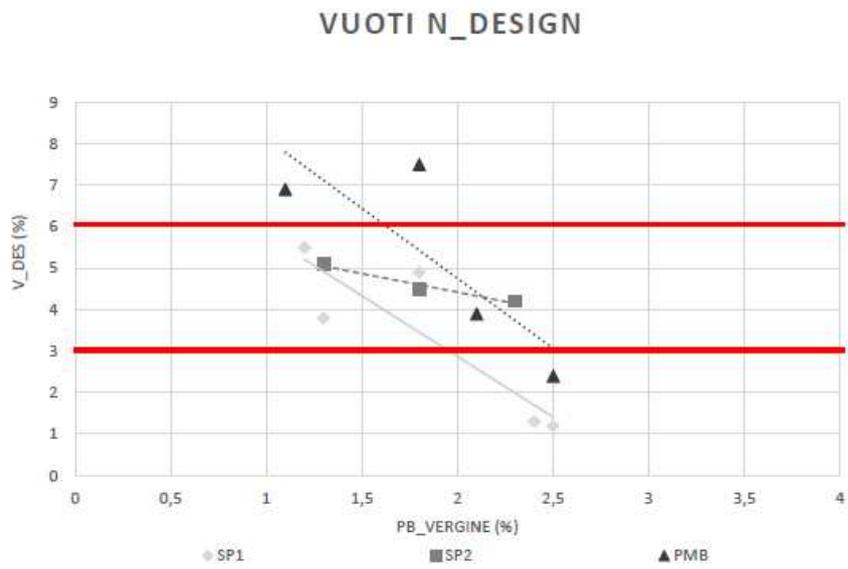


Figura 21: percentuale vuoti a  $n_{design}$

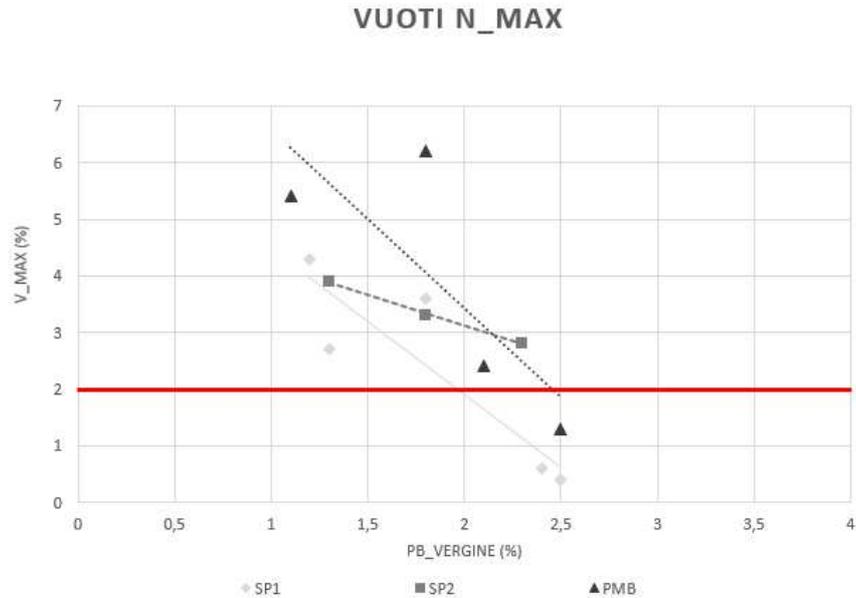


Figura 22: percentuale vuoti a  $n_{max}$

## 2.8 Miscele ottime

Si è giunti a stabilire (per interpolazione) quale potesse essere l'intervallo di vuoti ottimale per realizzare le miscele cosiddette "ottime" per studiarne le prestazioni dal punto di vista della resistenza a fatica.

Le miscele in questione sono: SP1 4.8%, PMB 4.5%, SP2 5.0% e sono composte come indicato nelle tabelle sotto riportate.

Sono stati realizzati un totale di 8 provini per tipologia di miscela attraverso la metodologia ibrida (hybrid) discussa al capitolo 1.: tutti i provini sono stati testati per valutarne le proprietà volumetriche, i valori di modulo di rigidità e successivamente su due provini è stato eseguito il test per la valutazione della resistenza a trazione indiretta, da cui sono stati ottenuti gli indici ITS e Nflex, i rimanenti sono stati testati a fatica.

- **SP1 4.8%:** 50% di aggregati vergini, 50% di RAP rispetto al peso degli aggregati, 0.3% di rejuvenator sul peso del fresato, 0.3% di compound polimerico sul peso della miscela e una quantità di bitume tal quale pari a 2% rispetto al peso della miscela.

- **PMB 4.5%:** 50% di aggregati vergini, 50% di RAP rispetto al peso degli aggregati, 0.3% di rejuvenator sul peso del fresato e una quantità di bitume modificato pari a 2% rispetto al peso della miscela.
- **SP2 5.0%:** 50% di aggregati vergini, 50% di RAP rispetto al peso degli aggregati, 0.3% di rejuvenator sul peso del fresato, 0.5% di compound polimerico sul peso della miscela e una quantità di bitume tal quale pari a 2% rispetto al peso della miscela.

*Tabella 9: miscele testate*

	Materiale [kg]	Pb [%] (da carbolite)	Pb_RAP [%] (da carbolite)	Pb_vergine [%]
<b>SP1 4.8%</b>	30	4.8	2.35	2
<b>PMB 4,5%</b>	30	4.5	2.35	2
<b>SP2 5%</b>	30	5.0	2.35	2

La Pb e Pb\_RAP sono i quantitativi effettivi di legante rispettivamente dell'intera miscela e del fresato, ottenuti tramite la prova a ignizione, che permette di risalire alla percentuale di legante tramite differenza di peso.

## **3 Campagna sperimentale**

L'obiettivo di questo lavoro è di indagare la resistenza a fatica di conglomerati bituminosi contenenti plastiche da riciclo inseriti tramite metodologia ibrida, confrontando tali prestazioni con quelli ottenuti da una miscela modificata tramite il comune metodo a umido. Per fare ciò sono state eseguite diverse prove di laboratorio, in modo tale da caratterizzare volumetricamente e meccanicamente le miscele ottenute e poterle comparare. In questo capitolo verranno descritte le procedure e l'attrezzatura utilizzata.

### ***3.1 Procedure preliminari***

Prima di procedere con la miscelazione dei vari componenti, sono stati eseguiti dei procedimenti preliminari, in modo da ottenere un materiale omogeneo e privo di umidità. In particolare:

- quartatura degli aggregati e del RAP,
- essiccazione degli aggregati,
- essiccazione del RAP.

#### ***3.1.1 Quartatura***

La prima fase successiva al prelievo del materiale in impianto prevede il processo di quartatura, che consiste nell'ottenere un campione di materiale rappresentativo granulometricamente del cumulo presente in impianto.

L'aggregato/fresato passa attraverso un quartatore, macchinario formato da una vasca in acciaio in cui viene accumulato il materiale; successivamente tirando manualmente una leva, questo passa attraverso una griglia e si divide fino a finire in due scomparti distinti che hanno la funzione di raccogliere gli aggregati.



*Figura 23: quartatore*

### ***3.1.2 Essiccazione degli aggregati e del fresato***

La fase successiva prevede l'essiccazione degli aggregati e del fresato, in quanto l'umidità contenuta al loro interno potrebbe compromettere l'esatta formulazione della curva granulometrica nel progetto.

Per riprodurre la procedura effettuata negli impianti, si procede come prima cosa a riscaldare i forni alla temperatura di  $110^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ). Dopodichè il materiale viene pesato e disposto all'interno di contenitori in acciaio, che rimarranno una notte intera ad asciugare. Il giorno successivo si effettuano due pesate distanti un'ora l'una dall'altra e, se la differenza è minima/nulla, il materiale è pronto per essere suddiviso all'interno di sacchi che verranno sigillati adeguatamente, in modo da evitare qualunque contatto con l'aria.

Per il RAP la procedura è analoga, ma le temperature sono più basse, circa 40°C, e la permanenza del materiale in forno è di cinque giorni.

### **3.2 Mix design**

Prima di procedere con la miscelazione degli ingredienti di cui al Cap. 2, sono state valutate le quantità dei materiali costituenti la miscela, in modo tale da ottenere, come risultato finale, la miscela desiderata.

Tramite foglio di calcolo e partendo dalla curva granulometrica di progetto, riportata al capitolo precedente, sono stati stimati i pesi dei vari componenti, considerando una massa totale di 30 kg per miscela.

#### **3.2.1 Miscelazione**

Una volta definita la “ricetta” della miscela, si può procedere alla sua realizzazione in laboratorio attraverso un miscelatore automatico, seguendo attentamente le fasi di seguito riportate:

- *Fase 1:* gli aggregati vergini vengono prelevati dai sacchi, pesati, inseriti all'interno di contenitori in acciaio e messi in forno alla temperatura di 280°C per 2h (è importante che il procedimento avvenga in tempi brevi, per evitare di esporre troppo a lungo l'aggregato all'aria);
- *Fase 2:* il fresato viene prelevato dai sacchi sigillati e pesato. Successivamente riposto in appositi contenitori e lasciato in forno a 70°C per 1.5h, tempo dopo il quale si spruzza il rejuvenator, per poi essere riposto per altri 30 minuti in forno;
- *Fase 3:* la sera prima della miscelazione, il filler è messo all'interno del forno a 110°C, in modo da rimuovere l'umidità presente al suo interno; il giorno stesso se ne preleva la quantità desiderata e si lascia in forno a 160°C;
- *Fase 4:* circa 2h prima dell'inizio della miscelazione, si pone il bitume in forno a 160°C, affinché diventi lavorabile;
- *Fase 5:* inizia la vera e propria miscelazione. Si inseriscono gli aggregati vergini, dalla pezzatura più grossa a quella più fine all'interno del miscelatore;

- *Fase 6:* RAP+rejuvenator vengono gettati nel mixer e mescolati con gli aggregati lapidei per circa 1 minuto a 170°C, in modo da creare lo shock termico;
- *Fase 7:* si aggiunge la quantità di compound polimerico (0.3% o 0.5% sul mix) e si miscela per circa 2 minuti;
- *Fase 8:* si aggiunge metà bitume vergine e metà filler all'interno del mixer e si mescola per 30 secondi a bassa velocità;
- *Fase 9:* si aggiunge la parte restante di legante e filler e si mescola per 3 minuti a bassa velocità;
- *Fase 10:* tutti gli ingredienti sono stati aggiunti nel quantitativo prefissato, si procede con un'ulteriore miscelazione a velocità elevata per un minuto;
- *Fase 11:* il composto "riposa" per 15 minuti a 170° nel miscelatore;
- *Fase 12:* si esegue un'ultima miscelazione per un minuto a bassa velocità e 30 secondi ad alta velocità.

Quanto appena descritto cerca di simulare, il più fedelmente possibile, ciò che avviene in un impianto e al tempo stesso cerca di riprodurre la metodologia ibrida e dry per l'implementazione delle plastiche nel conglomerato bituminoso.



*Figura 24: Miscelatore automatico*



*Figura 25: Fase di stoccaggio e classificazione miscela*

### **3.3 Contenuto di legante**

Questa prova è di fondamentale importanza, perché permette di valutare l'effettivo contenuto di legante presente nella miscela, di cui ne influenza le caratteristiche volumetriche e meccaniche. La prova è conosciuta con il nome di "prova a ignizione", ed è stata utilizzata anche per conoscere il quantitativo di bitume del RAP che è stato utilizzato nella realizzazione dei provini. Il test è stato eseguito tenendo conto della normativa BS EN 12697-39.

Tale procedura prevede l'utilizzo di un forno, di bilance e di un cestello in metallo dentro cui riporre il materiale. La quantità di materiale da testare è fornita dalla norma, sottoforma di tabella e dipende dalla dimensione nominale massima degli aggregati:

<b>Nominal maximum aggregate size</b> mm	<b>Mass of sample</b> g	<b>Maximum constant mass limit</b> g
4	1 000 to 1 400	0,15
5,6 or 6,3 or 8 or 10	1 000 to 1 600	0,15
11,2 or 12,5 or 14 or 16	1 000 to 1 700	0,20
20 or 22,4	1 000 to 2 400	0,25
31,5	1 000 to 3 000	0,30
40 or 45	1 000 to 4 000	0,40

*Figura 26: fonte - BS EN 12697-39, quantità di materiale da testare*

### 3.3.1 Prova di ignizione

Il test condotto riguarda in particolare la metodologia B, che prevede i seguenti step:

- il materiale viene posto in forno alla temperatura di 110°C, così da diventare lavorabile;
- il macchinario per la prova, composto da un forno, viene acceso e portato a temperatura, 540°C;
- si misurano i cestelli a vuoto e con il materiale al loro interno, dopo averlo disposto omogeneamente;
- l'attrezzatura è pronta per essere inserita in forno, dove inizia il processo di combustione, che termina nel momento in cui non si registra più una perdita di massa;
- il cestello viene rimosso e fatto raffreddare;
- si effettua un'ultima pesata del cestello contenente il materiale residuo.

A questo punto si può procedere con la fase di calcolo.

La massa iniziale della miscela è ottenuta come:

$$W_{s,w} = W_{t+s} - W_t$$

dove:

- $W_{s,w}$  è la massa iniziale della miscela (g)
- $W_{t+s}$  è la massa della miscela più il cestello (g)
- $W_t$  è la massa del cestello (g)

La massa finale dopo la prova è valutata nel seguente modo:

$$W_a = W_{t+a} - W_t$$

dove:

- $W_a$  è la massa della miscela dopo la prova (g)
- $W_{t+a}$  è la massa della miscela più il cestello post prova (g)
- $W_t$  è la massa del cestello (g)

La percentuale effettiva di legante presente all'interno della miscela viene valutata come:

$$B = \frac{(W_s - W_a)}{W_s} \times 100 - C_F$$

dove:

- $B$  è la percentuale di legante (%)
- $W_s$  è la massa iniziale della miscela (g)
- $W_a$  è la massa della miscela dopo la prova (g)
- $C_F$  è il fattore di calibrazione, che tiene conto della parte volatile dell'aggregato, a causa delle alte temperature di prova (%)



*Figura 27: posa del materiale nel cestello metallico*



*Figura 28: forno utilizzato per il test*



*Figura 29: peso del cestello più il materiale*

### ***3.4 Massima massa volumica teorica***

La MMVT ovvero massima massa volumica teorica è definita come la massa per unità di volume senza considerare i vuoti d'aria presenti all'interno della miscela bituminosa. Per valutare questo parametro è stata considerata la normativa BS EN 12697-5.

Per svolgere la prova è necessario seguire i seguenti step:

- in un piatto di metallo si versa il quantitativo di materiale da testare, che deve avere una massa minima di 50 volte la N<sub>MAS</sub> (mm);
- dopo aver preriscaldato il forno a 110°C si inserisce il conglomerato bituminoso e si attende finchè questo non diventa lavorabile;
- quando il materiale è pronto per essere testato, si versa il contenuto del piatto su una superficie che viene precedentemente pulita con un solvente e manualmente si procede a separare gli aggregati gli uni dagli altri;
- la fase appena descritta dev'essere svolta in tempi celeri, finchè il materiale risulta ancora caldo e facile da separare;
- dopodichè si procede alla quartatura;
- si elimina l'aria presente all'interno di due picnometri;
- si misurano due picnometri, cui volume è noto, considerando anche il tappo;
- la miscela viene inserita all'interno dei picnometri, di cui si annotano le masse;
- si inserisce acqua distillata;
- l'equipaggiamento viene collegato a un sistema che ha la funzione di rimuovere l'aria presente;
- ogni due minuti, e per un totale di 30 minuti, si scuotono manualmente i picnometri, così da favorire ulteriormente l'espulsione dell'aria;
- finito il tempo di prova si inserisce il tappo e si riempie l'ampolla fino alla creazione di un menisco di acqua;
- si procede con un'ultima pesata e si misura la temperatura dell'acqua.

### 3.4.1 Calcolo

Il valore della MMVT si calcola con le seguenti relazioni:

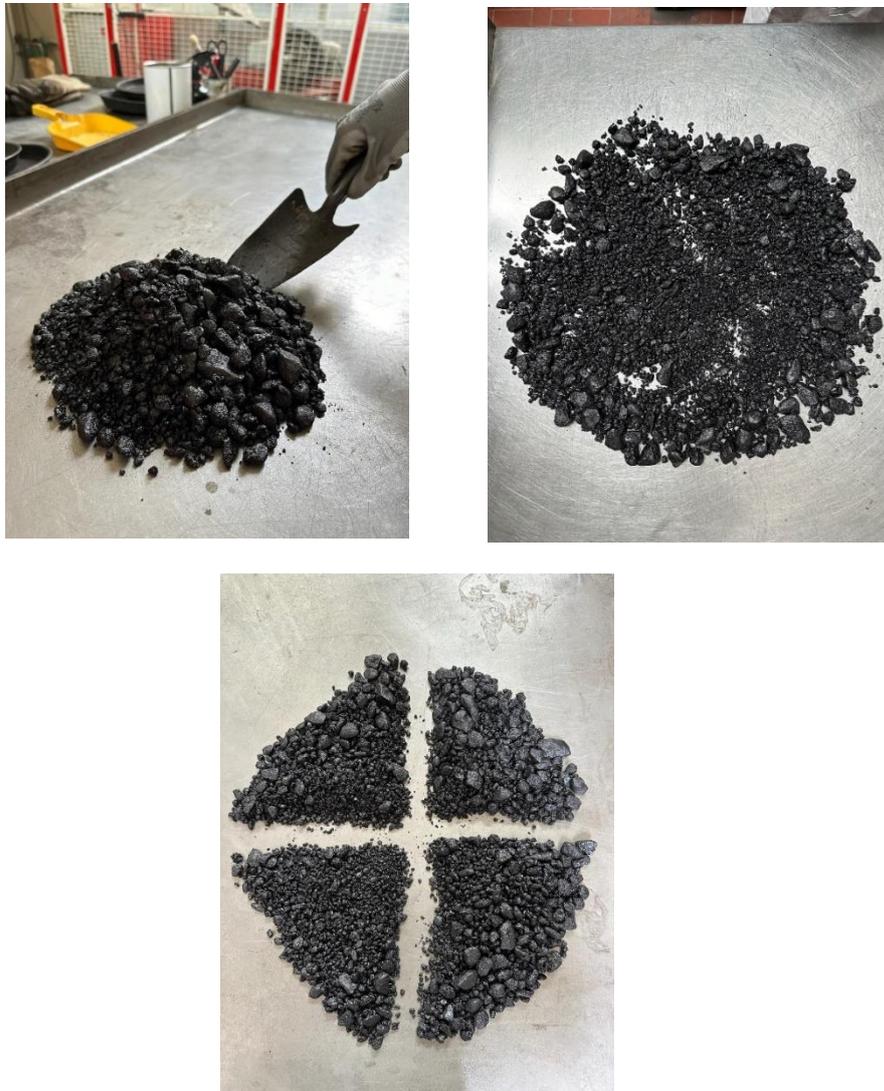
$$\rho_w = 1,00025205 + \left( \frac{7,59 \times t - 5,32 \times t^2}{10^6} \right)$$

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 \times V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w}}$$

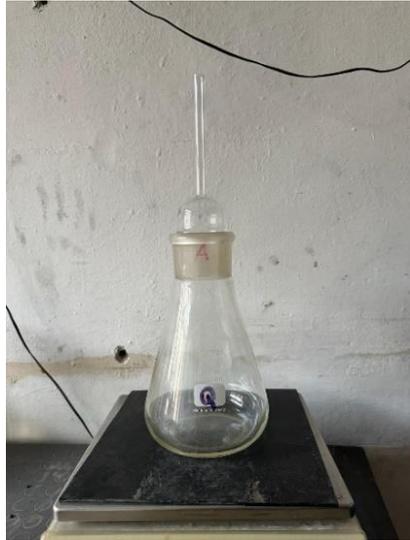
dove:

- $\rho_w$  è la densità dell'acqua funzione della temperatura ( $Mg/m^3$ )
- $t$  è la temperatura dell'acqua ( $^{\circ}C$ )
- $\rho_{mv}$  è la massima massa volumica teorica ( $Mg/m^3$ )
- $m_1$  è la massa del picnometro a vuoto comprensivo di tappo (g)
- $m_2$  è la massa del picnometro con tappo e miscela (g)
- $m_3$  è la massa del picnometro con tappa, miscela e acqua distillata (g)
- $V_p$  è il volume, noto, del picnometro ( $m^3$ )

Si riportano alcune fotografie della procedura:



*Figura 30: le tre fotografie rappresentano la fase di separazione degli aggregati e la divisione del materiale in sezioni omogenee*



*Figura 31: calcolo massa  $m_1$*



*Figura 32: calcolo massa  $m_2$*



*Figura 33: calcolo massa  $m_3$*



*Figura 34: formazione del menisco*

### 3.5 Compattazione giratoria

Per riprodurre ciò che avviene nella realtà per mezzo di rulli compattanti, in laboratorio la compattazione della miscela si realizza utilizzando un macchinario detto pressa a taglio giratoria. Tale strumento permette la creazione dei provini, che saranno successivamente testati, partendo dalla miscela sciolta realizzata precedentemente. La norma a cui si fa riferimento è la BS EN 12697-31.

Il processo prevede che la miscela bituminosa sia contenuta all'interno di una fustella in acciaio, in modo tale da confinare e dare forma al materiale, e la compattazione avviene tramite l'azione simultanea di una compressione statica e di un'azione tagliante. Ciò deriva dal movimento dell'asse del campione, che genera una superficie conica di rivoluzione, con apice 0 e angolo pari a  $2\phi$  all'apice. Per chiarire questo concetto, si riporta in figura tale principio:

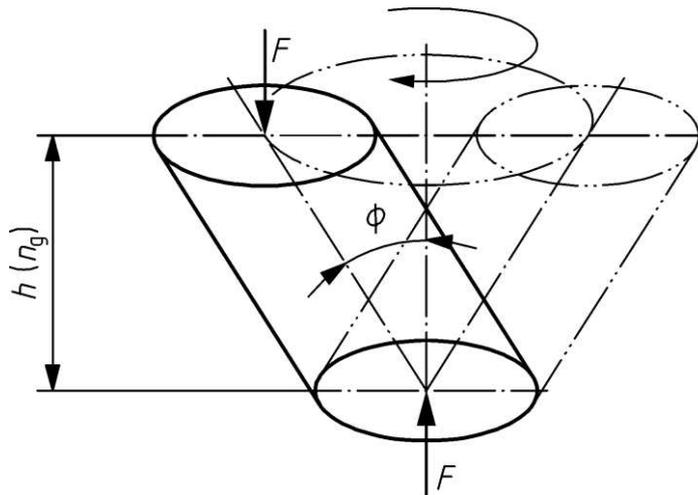


Figura 35: principio di movimento del provino nella pressa a taglio giratoria

La pressa utilizzata è stata tarata considerando uno sforzo verticale di compressione costante pari a 600 kPa, con un angolo di inclinazione di 1.25° e con una velocità di rotazione di 30 giri al minuto. I dati sono stati registrati su un software, che ha restituito le altezze dei provini a ogni giro. I provini sono stati compattati considerando una temperatura di 150°C (160 °C per la miscela “wet” di confronto), un diametro di 150 mm e a seconda della prova da effettuare, la macchina è stata calibrata con il numero di giri stabilito a priori.

### **3.5.1 Procedura**

La procedura segue quanto prescritto nella normativa di riferimento (BS EN 12697-31):

- la fustella in acciaio, che ospiterà il materiale, dev'essere preriscaldata in forno a 150°C (160 °C per la miscela di confronto);
- si preleva la quantità di miscela desiderata e si ripone in forno, attendendo che arrivi alla temperatura di compattazione;
- raggiunte le temperature, il materiale viene inserito all'interno della fustella, dopo l'aggiunta di un filtro di carta sul fondo e il tutto reinserto in forno, avendo cura di inserire un termometro all'interno della miscela, in modo da monitorarne la temperatura;
- si rimuove dal forno la fustella, si inserisce un ulteriore filtro di carta su cui si andrà a posizionare il piattino in acciaio;
- in tempi brevi si passa dal forno alla pressa a taglio giratoria, in modo da disperdere meno calore possibile e si setta la macchina con i valori discussi al paragrafo precedente;
- a fine prova si estrae il campione dalla fustella, che dovrà raffreddare, prima di poter procedere ai primi test.

Per conoscere il quantitativo di massa da impiegare per la realizzazione dei provini, si utilizza la seguente formula:

$$M = 10^{-3} \pi \frac{D^2}{4} h_{\min} \rho_M$$

dove:

- M è la massa (g)
- D è il diametro finale del campione (mm)
- $h_{\min}$  è l'altezza minima del provino dopo compattazione, corrispondente al caso di assenza di vuoti (mm)
- $\rho_M$  è la massima massa volumica teorica ( $\text{Mg}/\text{mm}^3$ )

Per un dato tipo di pressa a taglio giratoria,  $h_{\min}$  sarà costante e il rapporto con D (diametro interno allo stampo) sarà compreso nell'intervallo 0.66 e 1.05.

Dai dati registrati tramite il software è possibile creare le curve di compattazione in scala semilogaritmica, in funzione del numero di giri e del grado di costipamento. Per ottenere quanto detto, è indispensabile valutare dei parametri quali:

- i vuoti geometrici:

$$v_{geom} = 1 - \frac{\rho_{geom}}{\rho_{MMVT}}$$

dove  $\rho_{geom}$  è la densità geometrica e  $\rho_{MMVT}$  è la massima massa volumica teorica, entrambi i parametri sono espressi in ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

- il fattore correttivo, s, che tiene conto del fatto che i provini non hanno in realtà una forma cilindrica perfetta:

$$s = \frac{\rho_{SSD\_Nc}}{\rho_{geom\_Nc}}$$

dove  $\rho_{SSD\_Nc}$  è la densità satura a superficie asciutta finale, considerando il provino compattato con un certo numero di giri e  $\rho_{geom\_Nc}$  è la densità geometrica rispetto al numero di giri della compattazione, entrambi i parametri sono espressi in ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

- la densità satura a superficie asciutta:

$$\rho_{SSD} = \rho_{geom} \cdot s$$

- la percentuale di vuoti reali del provino:

$$v_{real} = 1 - \frac{\rho_{SSD}}{\rho_{MMVT}}$$

dove  $\rho_{SSD}$  è la densità satura a superficie asciutta ( $\text{g/cm}^3$ )

- la percentuale di compattazione:

$$C = 1 - v_{real}$$

- l'equazione della retta:

$$C = C1 + k \cdot \log Ng$$

dove C1 equivale alla percentuale di compattazione iniziale e k è la lavorabilità, entrambe espresse in (%).

### 3.6 Bulk density

Un aspetto fondamentale per la caratterizzazione volumetrica e meccanica delle miscele è la percentuale di vuoti, che è stata valutata facendo riferimento alla norma BS EN 12697-6. Da questo test si è ricavata la massa per unità di volume del campione saturo a superficie asciutta. La metodologia utilizzata è la SSD (procedura B all'interno della norma), che sta per "saturated surface dry".

La procedura si articola nelle seguenti fasi:

- il giorno seguente alla compattazione, il provino viene pesato e si valuta così la massa asciutta;
- il campione viene calato all'interno di una bacinella contenente acqua per circa 1h, con scuotimento del provino ogni 10 minuti, così da far fuoriuscire l'aria presente negli interstizi;

- al termine della prova il provino viene estratto dall'acqua e asciugato in superficie utilizzando un panno umido e pesato così da ricavare la massa satura a superficie asciutta;
- viene misurata la temperatura dell'acqua presente nella bacinella.

### 3.6.1 Calcolo

La massa volumica  $\rho_{SSD}$  è calcolata come segue:

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

dove:

- $m_1$  è la massa del campione asciutto (g);
- $m_2$  è la massa del campione immerso in acqua;
- $m_3$  è la massa satura a superficie asciutta(g)
- $\rho_w$  è la densità dell'acqua in funzione della temperatura misurata ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 3.7 Modulo di rigidezza (IT-CY)

Il modulo di rigidezza è un parametro cardine quando si tratta di pavimentazioni stradali, poiché aiuta a capire come un determinato materiale reagisce sotto l'azione del traffico e le variazioni di temperatura. In generale un valore alto indica una miscela meno suscettibile a deformazione, ma questo potrebbe portare al contempo a una riduzione di elasticità del materiale stesso.

Questo parametro dipende dunque dalla composizione della miscela, dalla tipologia di legante adottato e da condizioni al contorno come la temperatura e i carichi applicati.

Per la sua determinazione è stata adottata la norma BS EN 12697-26 ed è stata applicata la metodologia definita IT-CY, cioè di trazione indiretta, ma esistono ulteriori configurazioni di prova. Di seguito un'immagine che racchiude le principali metodologie applicate per la valutazione del modulo di rigidezza:

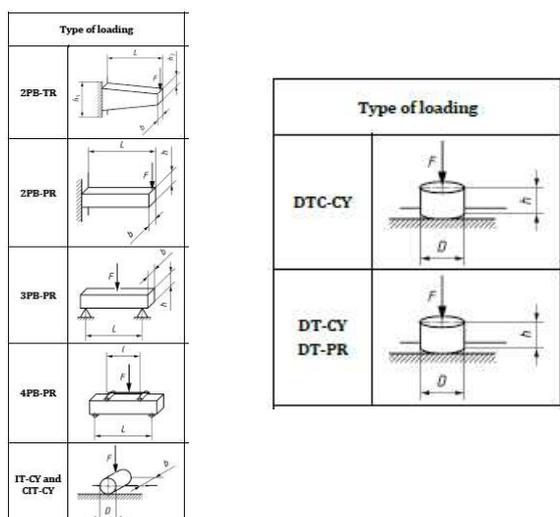


Figura 36: fonte - BS EN 12697-26, configurazioni di prove per il modulo di rigidità

Il test non è di tipo distruttivo e vede l'applicazione di un carico verticale di compressione, sotto forma di impulso. Tramite dei trasduttori, collegati all'apparecchio di prova, vengono registrati gli spostamenti orizzontali. La temperatura di prova è di 20°C (medesima temperatura utilizzata per il test a fatica) ed il test è stata effettuato su sei provini compattati a 120 giri, successivamente testati a fatica, e su due provini, successivamente utilizzati per stimare l'indice Nflex, compattati anch'essi a 120 giri. Infine, i risultati ottenuti sono stati comparati con i limiti imposti dal CSA dell'A4, che si riportano di seguito:

Miscela bituminosa		
Condizioni di prova (UNI EN 12697-31/13108-20)	Unità di misura	Limiti (UNI EN 13108-1)
Angolo di rotazione	°	1,25 ± 0,02
Velocità di rotazione	Giri/min	30
Pressione verticale	kPa	600 ± 3
Diametro del provino	mm	100
Rotazioni N1	---	10
Rotazioni N2	---	120
Rotazioni N3	---	200

La miscela ottimale dovrà avere le seguenti caratteristiche dopo compattazione a N3:

Risultati richiesti	Unità di misura	Limiti (UNI EN 13108-1)	Limiti (UNI EN 13108-1)
Affinità bitume-aggregato – Spogliamento (UNI EN 12697-11)	%	≥ 5	≥ 5
Vuoti a N1 (UNI EN 12697-8)	%	≤ 14 (V <sub>max14</sub> )	≤ 14 (V <sub>max14</sub> )
Vuoti a N2 (UNI EN 12697-8)	%	3 ÷ 6 (V <sub>min3</sub> -V <sub>max6</sub> )	3 ÷ 6 (V <sub>min3</sub> -V <sub>max6</sub> )
Vuoti a N3 (UNI EN 12697-8)	%	≥ 2 (V <sub>min2</sub> )	≥ 2 (V <sub>min2</sub> )
Resistenza a Trazione Indiretta a 25°C (UNI EN 12697-23)	N/mm <sup>2</sup>	0,95 ± 1,70	1,20 ± 2,20
Coefficiente di Trazione Indiretta a 25°C	N/mm <sup>2</sup>	60 ± 250	60 ± 250
Perdita di Resistenza a Trazione Indiretta a 25°C (UNI EN 12697-12)	%	≥ 90 (ITSR <sub>90</sub> )	≥ 90 (ITSR <sub>90</sub> )
Rigidità (UNI EN 12697-26 – Annesso C)			
T=5°C, Def.=7µm, Freq.=2Hz, Coeff.P.=0,35	N/mm <sup>2</sup>	14.000 ± 20.000	18.000 ± 27.000
T=20°C, Def.=7µm, Freq.=2Hz, Coeff.P.=0,35	N/mm <sup>2</sup>	5.000 ± 8.000	8.000 ± 15.000
T=40°C, Def.=7µm, Freq.=2Hz, Coeff.P.=0,35	N/mm <sup>2</sup>	700 ± 2.500	900 ± 6.000

Figura 37: limiti imposti dal capitolato d'appalto speciale dell'A4

### 3.7.1 Procedura

La normativa suggerisce le dimensioni (altezza e diametro) dei provini da testare, in funzione della dimensione massima dell'aggregato, con la seguente tabella:

Maximum grain size mm	Specimen diameter mm	Specimen height mm
$\leq 16$	$100 \pm 3$ $150 \pm 3$	$40 \text{ to } 60 \pm 2$
$> 16 \text{ to } < 32$	$150 \pm 3$	$60 \pm 2$
$\geq 32$	$150 \pm 3$	$90 \pm 2$

Figura 38: fonte - BS EN 12697-26

Il test ha inizio dopo 14 giorni dalla compattazione dei provini, passati i quali devono condizionare all'interno di una camera climatica per almeno 4h, alla temperatura di prova. La macchina utilizzata presso il laboratorio del Politecnico di Torino è l'UTM-30, che ha permesso anche l'esecuzione della prova a fatica.

L'UTM-30 è dotata di un pistone idraulico, nonché un attuatore di carico in grado di applicare una forza verticale impulsiva con tempi di riposo, che forma un'onda haversine. Si accettano forme di carico diverse, qualora la differenza tra haversine e carico applicato sia minore del 5%. Inoltre, il tempo di carico da inizio prova fino al picco deve essere compreso tra 50 e 125 ms  $\pm$  5 ms.

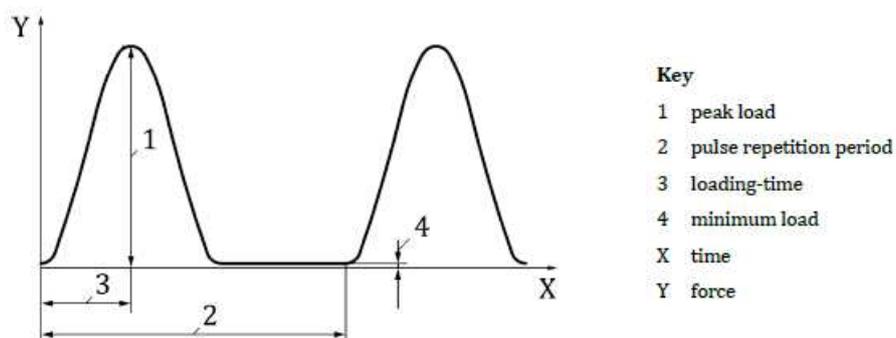
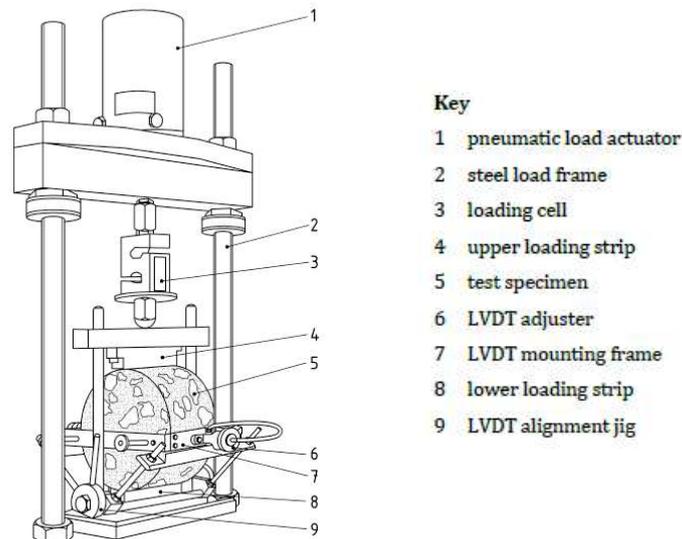


Figura 39: fonte - BS EN 12697-26, forma del carico d'impulso

Terminato il condizionamento, il provino viene posto e fissato all'interno di un castelletto e il tutto viene inserito all'interno della macchina di prova. È buona norma eseguire un warm up dell'UTM-30, di circa 10 minuti, prima di iniziare la prova.



*Figura 40: fonte – BS EN 12697-26 esempio di equipaggiamento del test*

I primi 10 impulsi di carico servono ad assestare la macchina e a regolare il carico necessario per ottenere la deformazione target. Ulteriori 5 impulsi sono applicati dal macchinario, che in questo modo calcola il modulo di rigidezza dalla media dei cinque. Ottenuto il primo valore, si rimuove il provino e lo si ruota di  $90^\circ \pm 10^\circ$  rispetto al suo asse orizzontale e si ripete il medesimo procedimento. Come parametro di controllo e accettazione della prova, la seconda media deve essere compresa tra + 10% e - 20% della media calcolata dal primo test: se i limiti non fossero rispettati bisogna ripetere il test.

Dalla norma ricaviamo la seguente formula per il calcolo del modulo di rigidezza:

$$E = \frac{F \cdot (v + 0,27)}{(z \cdot h)}$$

dove:

- $E$  è il modulo di rigidezza (MPa)
- $F$  è il carico applicato dal pistone (N)
- $\nu$  è il coefficiente di Poisson, considerato pari a 0.35
- $h$  è la media delle quattro altezze del provino prese in punti differenti (mm)
- $z$  è l'ampiezza della deformazione orizzontale resiliente ottenuta durante il ciclo di carico (mm)

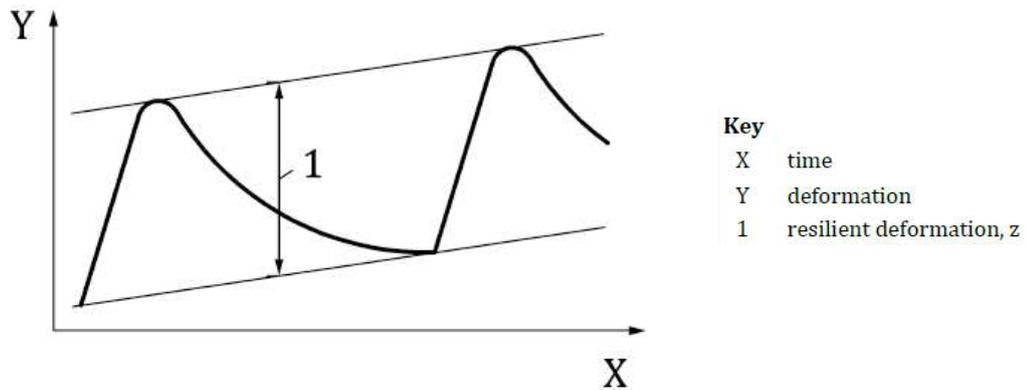


Figura 41: fonte BS EN 12697-26, ampiezza deformazione

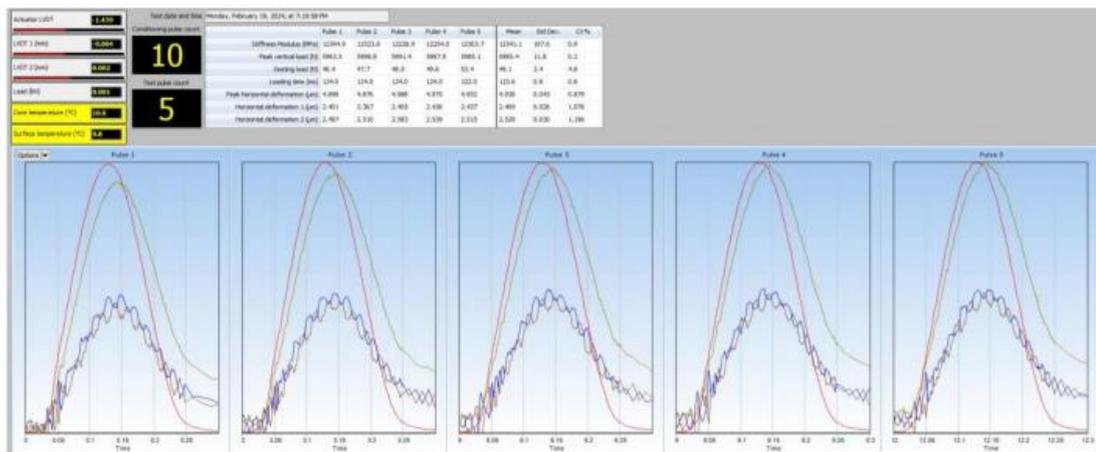


Figura 42: esempio di risultati ottenuti dal software - curve a campana per 5 impulsi di carico e deformazione

### 3.8 Resistenza a trazione indiretta (ITS)

La resistenza a trazione indiretta è una caratteristica meccanica di ogni miscela di conglomerato bituminoso ed equivale alla capacità della miscela di resistere a sollecitazioni di trazione senza rompersi o fessurarsi; si misura quindi la tenacità del conglomerato bituminoso.

Lo studio della resistenza è stato eseguito facendo riferimento alla norma BS EN 12697-23 e applicato su coppie di provini cilindrici per le tre miscele ottime. Dalla compattazione devono passare tra le 48 ore e i 42 giorni perché i campioni possano essere testati a seguito di un condizionamento di almeno 4h a 25°C. Il macchinario ha una capacità di carico massimo che si attesta attorno ai 50 kN e la prova avviene a controllo di deformazione con un valore di 50 mm/min.

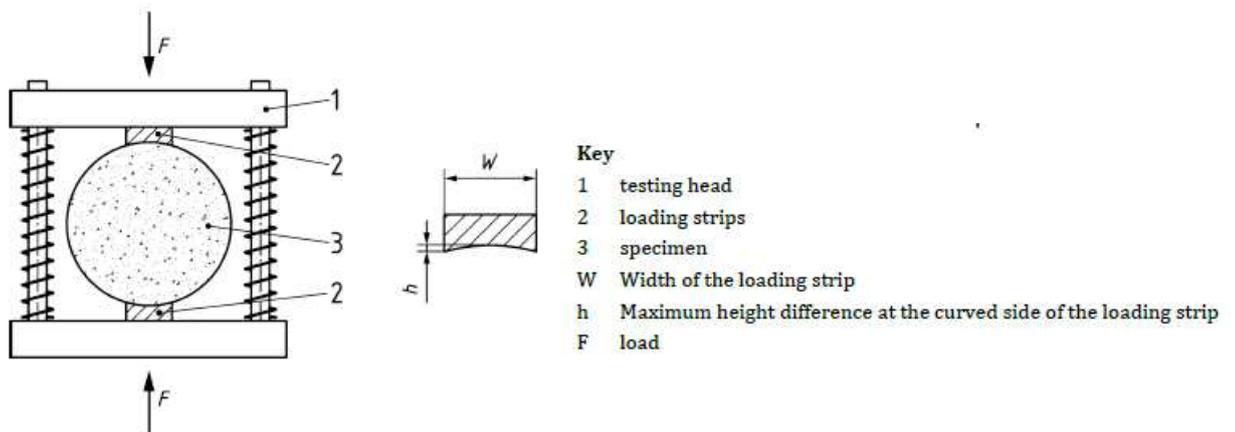


Figura 43: fonte - BS EN 12697-23, equipaggiamento utilizzato durante il test

La prova ha inizio con il corretto posizionamento del provino all'interno del castelletto, che sarà posizionato al di sotto del pistone di carico. Quest'ultimo si trova a una distanza millimetrica dal campione. Vengono poi impostati i parametri di input nella macchina e viene avviato il test, che ha la durata di qualche secondo. I dati sono registrati in un software apposito, che restituisce i valori di deformazione verticale e di carico.

Il valore di resistenza a trazione indiretta si calcola come:

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H} \cdot 1000$$

dove:

- ITS è la resistenza a trazione indiretta (kPa)
- P è il carico applicato (kN)
- D è il diametro del campione (mm)
- H è la media delle quattro altezze del provino prese in punti diversi (mm)

La normativa fornisce anche indicazioni circa le probabili rotture che possono verificarsi:

- a) “rottura evidente da trazione” – il campione presenta rottura lungo la linea diametrale, e zone in cui sono visibili piccole sezioni triangolari prossime alle strisce di carico;
- b) “deformazione” – non è presente una linea di rottura a trazione netta
- c) “combinazione” – il provino mostra una linea di rottura a trazione limitata e aree in cui la deformazione è maggiore vicino alle strisce di carico.

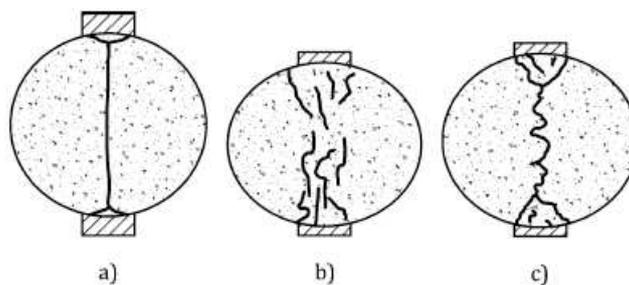


Figura 44: fonte - BS EN 12697-23, tipi di rotture

Da questo indice si è potuto calcolare l'indice Nflex, parametro legato alla resistenza a frattura di un materiale, di cui si discute al cap. 4.



*Figura 45: prova di trazione indiretta*



*Figura 46: rottura del provino durante la prova*



*Figura 47: esempio di rottura di un provino*

### 3.9 Resistenza a fatica (CIT-CY)

Da normativa (BS EN 12697-24) la resistenza a fatica è “la riduzione della resistenza di un materiale sottoposto a un carico ciclico, rispetto alla resistenza sotto un singolo carico”. Questo fenomeno è correlato alla variazione di rigidità che diminuisce in maniera non lineare all’aumentare dei cicli di carico.

La norma presenta differenti approcci alla prova, quello analizzato nel presente studio si basa sul metodo CIT-CY (dall’inglese “cyclic indirect tensile test on cylindrical shaped specimens”), tratto dall’annex F. Sono stati testati sei provini per miscela, attraverso la medesima macchina utilizzata per il modulo di rigidità, l’UTM-30. Il test avviene applicando un carico ciclico sinusoidale di compressione, che non prevede tempi di riposo ed è svolto in controllo di sforzo. Si genera uno sforzo di trazione uniforme e ortogonale alla direzione di carico, che porterà alla rottura, con la formazione di una fessura lungo il diametro verticale del campione. Come valori di input si inseriscono le altezze dei provini, il diametro, lo sforzo da applicare e il modulo elastico; il coefficiente di Poisson viene assunto pari a 0.35. Attraverso dei trasduttori metallici si registra lo spostamento orizzontale e quindi la deformazione al centro del provino. Dai dati raccolti, correlando numero di cicli a rottura e deformazione, si crea la retta di fatica su un piano bi-logaritmico. Di seguito si riporta un grafico di esempio:

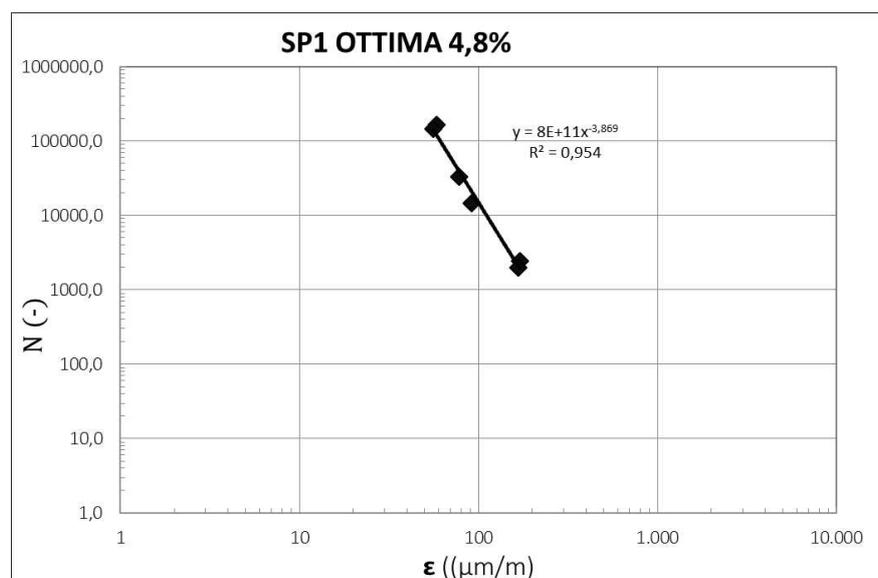


Figura 48: esempio di retta a fatica in funzione della deformazione e del numero di cicli a rottura

La curva finale si ottiene per interpolazione testando un certo numero di provini, sottoposti a diversi casi di carico. L'annex F fornisce le dimensioni dei provini tramite una tabella:

Maximum grain size mm	Specimen diameter $\Omega$ mm	Specimen height $h$ mm
$\leq 16$	$100 \pm 3$	$40 \pm 2$
$> 16$ to $< 32$	$150 \pm 3$	$60 \pm 2$
$\geq 32$	$150 \pm 3$	$90 \pm 2$

Figura 49: fonte - BS EN 12697-24

I provini testati presentavano un diametro di 150 mm e un'altezza di circa 60 mm. Il test è stato condotto a 20°C, applicando una frequenza di 10 Hz che simulasse il traffico veicolare. I valori di sforzo applicati sono stati calcolati in modo tale che l'ampiezza della massima deformazione iniziale,  $\epsilon_a$ , ricadesse nel range 25  $\mu\text{m/m}$  e 100  $\mu\text{m/m}$ ; il numero di cicli a rottura dev'essere compreso tra  $10^3$  e  $10^6$  cicli.

Anche in questo caso i provini sono stati condizionati per 4 h alla temperatura di prova. Rimossi dalla camera climatica, sono stati posizionati accuratamente all'interno del castelletto.

Dai dati in output, in particolare dai valori di deformazione ottenuti attraverso i trasduttori, sono state valutate le seguenti grandezze:

$$\epsilon_a = \left( \frac{2 u_a}{\Omega} \right) \cdot \left[ \frac{1 + 3\nu}{4 + \pi \cdot \nu - \pi} \right] \cdot 10^6$$

$$\Delta\epsilon = 2 \cdot \epsilon_a$$

dove:

- $\epsilon_a$  è l'ampiezza massima di deformazione ( $\mu\text{m/m}$ )
- $u_a$  è lo spostamento orizzontale (mm)
- $\nu$  è il coefficiente di Poisson assunto pari a 0.35
- $\Omega$  è il diametro (mm)
- $\Delta\epsilon$  è la massima differenza di deformazione ( $\mu\text{m/m}$ )

Il modulo di rigidezza è dato da:

$$S_{\text{mix}} = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \cdot (1 + 3\nu) \cdot 10^6$$

Questa formula viene utilizzata nella fase preliminare per stimare il valore di sforzo da applicare, essendo note tutte le altre grandezze.

Eseguito il test e raccolto i dati, si ottengono le curve di fatica, a cui è associato un coefficiente, detto coefficiente di correlazione,  $R^2$ . Si considerano le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} \lg(N_{f,w}) &= \lg(k_\varepsilon) + n_\varepsilon \cdot \lg(\Delta\varepsilon) \\ N_{f,w} &= k_\varepsilon \cdot \left(\frac{1}{\Delta\varepsilon}\right)^{n_\varepsilon} \end{aligned}$$

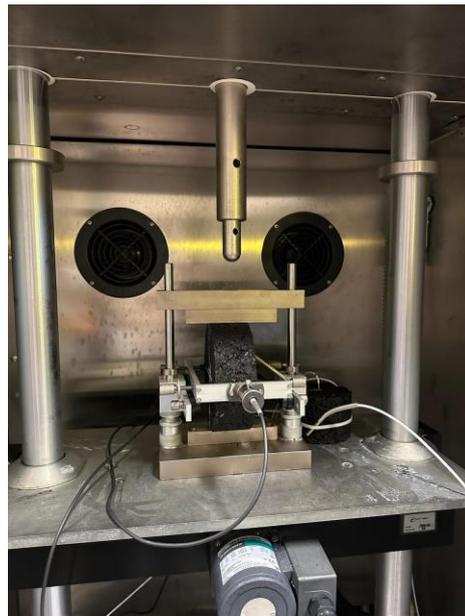
dove:

- $N_{f,w}$  è il numero di cicli a rottura secondo il criterio energetico
- $k_\varepsilon$  è una costante del materiale della funzione di fatica
- $n_\varepsilon$  è una costante del materiale della funzione di fatica

Dalle formule sopra riportate si può ricavare la deformazione a un milione di cicli, importante parametro di comparazione tra le varie miscele.



*Figura 50: posizionamento del provino all'interno del castelletto di prova*



*Figura 51: configurazione di prova*

### 3.10 Indice *Nflex*

La normativa impone che:

- i provini testati abbiano un diametro pari a 150 mm,
- siano stati compattati a  $N_{des}$  (120 giri),
- prima della prova devono essere condizionati in una camera climatica per 2h alla temperatura di prova,
- per ottenere tale indice i campioni sono sottoposti alla prova di trazione indiretta, in cui la velocità di spostamento verticale durante la prova deve attestarsi intorno ai  $50 \pm 1$  mm/min.



*Figura 52: configurazione della prova a trazione indiretta*

Questo indice dipende dalla curva sforzo-deformazione, da cui si ricavano il punto di flesso, la tenacità e la pendenza; quindi, per prima cosa è stata plottata tale curva, ricavando i valori di sforzo e deformazione tramite le formule a seguire.

Lo sforzo risulta pari a:

$$S_t = \frac{2000P}{\pi Dt}$$

dove

- $S_t$  è lo sforzo di trazione (kPa)
- $P$  è il carico verticale (kN)
- $D$  è il diametro del campione (mm)
- $t$  è lo spessore del provino (mm)

La deformazione è data da:

$$\epsilon' = \frac{\mu Y}{D} * 100\%$$

dove

- $\epsilon'$  è la deformazione di trazione stimata (%)
- $\mu$  è il coefficiente di Poisson, che si assume pari a 0.35
- $Y$  è lo spostamento verticale (mm)
- $D$  è il diametro del campione (mm)

Si è ottenuto dunque un grafico del tipo:

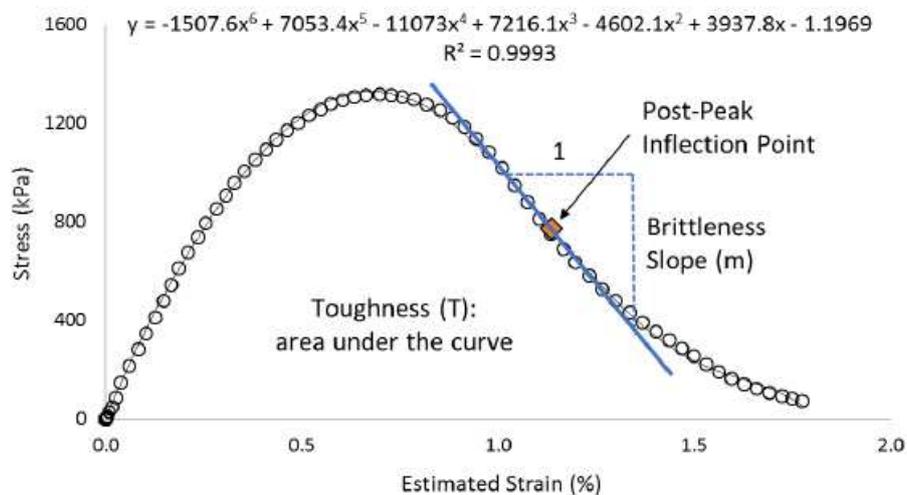


Figura 53: fonte - AASHTO Designation: TP 141-201

descritto da un'equazione polinomiale di quinto/sesto grado e dal coefficiente di determinazione  $R^2$ , cui valore deve essere maggiore o uguale a 0.95 per attestare la bontà dei dati raccolti.

Da tale grafico si ottengono ulteriori parametri, indispensabili ai fini del calcolo dell' $N_{flex}$ . Tra questi troviamo:

- *punto di flesso dopo il picco*: ottenuto tramite derivata seconda dell'equazione polinomiale e dall'annullamento di questa, considerando il primo punto dopo il picco con curvatura nulla;
- *pendenza di fragilità,  $m$* : corrisponde al punto di flesso, si valuta attraverso la derivata prima dell'equazione polinomiale e si esprime in  $J/m^3$ ;
- *tenacità,  $T$* : è rappresentata dall'area sottesa dalla curva sforzo – deformazione e si ottiene integrando l'equazione polinomiale, prendendo come estremi di integrazione il punto 0 iniziale e il punto di flesso. Si esprime in  $J/m^3$ .

Ottenuti questi valori, si procede alla valutazione dell'indice  $N_{flex}$ , come segue:

$$N_{flex} \text{ factor} = \frac{T}{|m|}$$

È un valore adimensionale e rappresenta la resistenza a fatica di un conglomerato bituminoso.

## 4. Analisi dei risultati

In questo capitolo saranno discussi i risultati ottenuti dall'analisi dei dati ricavati dalle prove introdotte nel capitolo precedente sulle tre miscele di conglomerato bituminoso considerate "ottimali": SP1 4.8%, PMB 4.5%, SP2 5%. Tali "miscele ottime" sono state ricavate da uno studio di mix design realizzato e discusso in un precedente elaborato di tesi.

In una prima fase verranno discusse le caratteristiche volumetriche dei tre provini, ottenute dalle seguenti prove:

- MMVT,
- SSD,
- Prova a ignizione (in inglese, carbolite),
- Compattazione tramite pressa a taglio giratoria,

fondamentali per arrivare ad approfondire l'obiettivo di questo studio: la caratterizzazione meccanica delle miscele ottime dal punto di vista della resistenza a fatica. Ciò è stato possibile eseguendo test quali:

- modulo di rigidezza a 20 °C,
- resistenza a fatica tramite metodologia CIT-CY,
- resistenza a trazione indiretta ITS,
- indice Nflex.

Le tre miscele verranno dapprima presentate insieme, per poi essere prese singolarmente e infine confrontate.

### 4.1 Le miscele ottime

Si presentano le percentuali di materiale considerate nella fase di mix design, per ottenere le tre miscele bituminose. Di seguito una tabella riassuntiva del compound polimerico aggiunto:

Nome miscela	Compound polimerico
SP1	0.3 %
PMB	0%
SP2	0.5%

La prima miscela realizzata in laboratorio è stata la SP1 4.8%, in cui l'aggiunta del compound polimerico tramite metodologia ibrida è pari allo 0.3% sulla miscela totale (30 kg), ed è così composta:

*Tabella 10: quantità di materiale presenti nella miscela SP1 4.8%*

SP1 4,8%	Rispetto al peso aggregati (%)	Rispetto al peso miscela (%)	Miscela (kg)	Miscela (g)
Sabbia 0/5	27,63	23,72	7,11	7114,73
Pietrisco 8/16	10,32	8,86	2,66	2657,71
Pietrisco 16/22	11,35	9,74	2,92	2921,77
RAP 0/12 bianco	31,64	27,15	8,15	8145,86
RAP 0/20 bianco	29,83	25,60	7,68	7681,08
Filler	0,70	0,60	0,18	180,55
Legante totale	5,04	4,33	1,30	1298,29
Bitume RAP 0/12	1,72	1,48	0,44	443,95
Bitume RAP 0/20	1,24	1,06	0,32	318,76
Bitume vergine	1,57	1,35	0,40	404,70
Polimero	0,32	0,27	0,08	81,11
Rejuvenator	0,19	0,17	0,05	49,77
RAP 0/12 TOTALE	33,36	28,63	8,59	8589,81
RAP 0/20 TOTALE	31,07	26,67	8,00	7999,85
RAP TOTALE	64,43	55,30	16,59	16589,66
TOTALE	116,51	100,00	30,00	30000,00

Nella seconda miscela, PMB 4.5%, non è stato inserito il polimero plastico, ma è stato utilizzato un bitume modificato (tramite la comunissima metodologia "a umido"); si riportano le percentuali e i pesi dei vari componenti rispetto alla miscela totale (30kg):

Tabella 11: quantità di materiale presente nella miscela PMB4.5%

PMB 4.5%	Rispetto al peso aggregati (%)	Rispetto al peso miscela (%)	Quanta miscela? (kg)	Quanta miscela? (g)
Sabbia 0/5	27,63	26,27	7,88	7880,47
Pietrisco 8/16	10,32	9,81	2,94	2943,76
Pietrisco 16/22	11,35	10,79	3,24	3236,24
RAP 0/12 bianco	30,00	28,52	8,56	8556,27
RAP 0/20 bianco	20,00	19,01	5,70	5704,18
Filler	0,70	0,67	0,20	199,98
Legante totale	5,19	4,93	1,48	1479,00
Bitume RAP 0/12	1,64	1,55	0,47	466,32
Bitume RAP 0/20	0,83	0,79	0,24	236,72
Bitume vergine	2,56	2,44	0,73	731,16
Polimero	0,00	0,00	0,00	0,00
Rejuvenator	0,16	0,15	0,04	44,89
RAP 0/12 TOTALE	31,64	30,08	9,02	9022,59
RAP 0/20 TOTALE	20,83	19,80	5,94	5940,90
RAP TOTALE	52,47	49,88	14,96	14963,49
TOTALE	105,19	100,00	30,00	30000,00

Nella terza e ultima miscela, la SP2 5%, è stato aggiunto lo 0.5% di compound polimerico sulla miscela totale (30kg), ed è stata realizzata considerando le seguenti quantità:

Tabella 12: quantità di materiale presente nella miscela SP25%

SP2 5%	Rispetto al peso aggregati (%)	Rispetto al peso miscela (%)	Quanta miscela? (kg)	Quanta miscela? (g)
Sabbia 0/5	27,63	26,43	7,93	7929,40
Pietrisco 8/16	10,32	9,87	2,96	2962,03
Pietrisco 16/22	11,35	10,85	3,26	3256,33
RAP 0/12 bianco	30,00	28,70	8,61	8609,39
RAP 0/20 bianco	20,00	19,13	5,74	5739,59
Filler	0,70	0,67	0,20	201,22
Legante totale	4,54	4,34	1,30	1302,03
Bitume RAP 0/12	1,64	1,56	0,47	469,21
Bitume RAP 0/20	0,83	0,79	0,24	238,19
Bitume vergine	1,39	1,33	0,40	399,36
Polimero	0,52	0,50	0,15	150,09
Rejuvenator	0,16	0,15	0,05	45,17
RAP 0/12 TOTALE	31,64	30,26	9,08	9078,60
RAP 0/20 TOTALE	20,83	19,93	5,98	5977,79
RAP TOTALE	52,47	50,19	15,06	15056,39
TOTALE	104,54	100,00	30,00	30000,00

## 4.2 Percentuale contenuto legante

Come primo risultato si riporta la percentuale di legante presente all'interno di ogni miscela, valutato eseguendo la prova a ignizione (vedi cap. 3). Da questa prova si è visto come in tutti e tre i casi sia stata aggiunta la stessa percentuale di legante vergine/modificato:

Tabella 13: percentuale contenuto di legante

	Pb [%]	Pb_vergine [%]
SP1 4.8%	4.8	2
PMB 4.5%	4.5	2
SP2 5%	5	2

## 4.3 Caratteristiche volumetriche

Le caratteristiche volumetriche analizzate sui provini realizzati in laboratorio, riguardano principalmente la percentuale di vuoti presenti. Tali parametri devono rispettare i limiti imposti dal CSA dell'A4, che sono uguali sia per le miscele ottenute con la metodologia di implementazione umida (PMB 4.5%) che con quella ibrida (SP1 4.8% e SP2 5%):

Miscela bituminosa		
Condizioni di prova (UNI EN 12697-31/13108-20)	Unità di misura	Limiti (UNI EN 13108-1)
Angolo di rotazione	°	1,25 ± 0,02
Velocità di rotazione	Giri/min	30
Pressione verticale	kPa	600 ± 3
Diametro del provino	mm	100
Rotazioni N1	---	10
Rotazioni N2	---	120
Rotazioni N3	---	200

La miscela ottimale dovrà avere le seguenti caratteristiche dopo compattazione a N3:

Risultati richiesti	Unità di misura	Limiti (UNI EN 13108-1)	Limiti (UNI EN 13108-1)
Affinità bitume-aggregato – Spogliamento (UNI EN 12697-11)	%	≥ 5	≥ 5
Vuoti a N1 (UNI EN 12697-8)	%	≤ 14 ( $V_{max14}$ )	≤ 14 ( $V_{max14}$ )
Vuoti a N2 (UNI EN 12697-8)	%	3 ÷ 6 ( $V_{min3}$ - $V_{max6}$ )	3 ÷ 6 ( $V_{min3}$ - $V_{max6}$ )
Vuoti a N3 (UNI EN 12697-8)	%	≥ 2 ( $V_{min2}$ )	≥ 2 ( $V_{min2}$ )
Resistenza a Trazione Indiretta a 25°C (UNI EN 12697-23)	N/mm <sup>2</sup>	0,95 ÷ 1,70	1,20 ÷ 2,20
Coefficiente di Trazione Indiretta a 25°C	N/mm <sup>2</sup>	60 ÷ 250	60 ÷ 250
Perdita di Resistenza a Trazione Indiretta a 25°C (UNI EN 12697-12)	%	≥ 90 (ITSR <sub>90</sub> )	≥ 90 (ITSR <sub>90</sub> )
Rigidezza (UNI EN 12697-26 – Amnesso C)			
T=5°C, Def.=7µm, Freq.=2Hz, Coeff.P.=0,35	N/mm <sup>2</sup>	14.000 ÷ 20.000	18.000 ÷ 27.000
T=20°C, Def.=7µm, Freq.=2Hz, Coeff.P.=0,35	N/mm <sup>2</sup>	5.000 ÷ 8.000	8.000 ÷ 15.000
T=40°C, Def.=7µm, Freq.=2Hz, Coeff.P.=0,35	N/mm <sup>2</sup>	700 ÷ 2.500	900 ÷ 6.000

Figura 54: fonte - CSA dell'A4

La terza colonna a partire da sinistra riguarda le miscele PMB, quella successiva le miscele SP1 ed SP2.

I parametri volumetrici sono stati così ottenuti:

- compattazione tramite pressa a taglio giratoria (con verifica a 10 e a 120 giri) (verifica provini a fatica);
- compattazione tramite pressa a taglio giratoria (con verifica a 120 giri) (verifica provini a Nflex);
- massima massa volumica teorica (MMVT).

I valori finali corrispondono alla media dei risultati ottenuti su un numero di sei provini per miscela, realizzati per essere testati a fatica e due provini, per miscela, testati per valutare l'indice Nflex (indice correlato alla resistenza a fatica):

*Tabella 14: caratteristiche volumetriche*

	PROVINI A FATICA		PROVINI A N_FLEX	MMVT [g/mc]
	v_in [%]	v_des [%]	v_des [%]	
<b>SP1 4.8%</b>	12.61	5.33	5.53	2.554
<b>PMB 4.5%</b>	13.26	5.81	2.51	2.576
<b>SP2 5%</b>	10.59	3.53	2.15	2.545

A parità di bitume totale, si può subito notare come l'aumento delle plastiche renda la miscela più chiusa in termini di vuoti, per i provini realizzati per i test a fatica; la MMVT diminuisce all'aumentare del contenuto di compound polimerico.

I valori ottenuti rientrano nei limiti imposti dal CSA dell'A4.

#### **4.4 Caratteristiche meccaniche**

##### **4.4.1 Modulo di rigidezza**

Un parametro fondamentale per caratterizzare le miscele realizzate e necessario come input per la prova a fatica, è il modulo di rigidezza, ottenuto attraverso la prova descritta al capitolo precedente.

Il modulo di rigidezza ha un impatto significativo sul comportamento del materiale, rappresenta infatti la risposta della pavimentazione stradale ai carichi derivanti dal traffico. Il suo valore dipende dai seguenti fattori: temperatura, rapporto di carico, dalla viscosità della miscela, dal legante presente, dagli aggregati e dai vuoti.

Il test è stato effettuato a 20°C, stessa temperatura dei test a fatica. Infatti la conoscenza del modulo di rigidezza è fondamentale per l'applicazione dei carichi durante le prove di fatica.

Sono stati testati sei provini per miscela e il valore finale equivale alla media dei valori attesi.

Tabella 15: Moduli di rigidezza a 20°C miscele ottime

	S_undes_20° [Mpa]
SP1 4.8%	10252
PMB 4.5%	7294
SP2 5%	12481

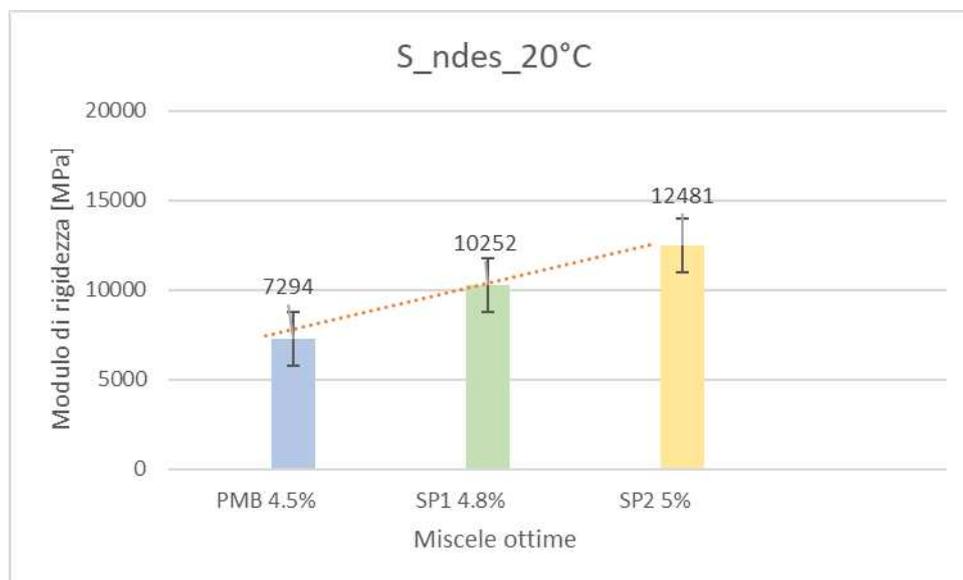


Figura 55: moduli di rigidezza a 20°C miscele ottime

Si nota come a parità di bitume vergine d'aggiunta, all'aumentare della percentuale di plastiche riciclate, aumenti la rigidezza del campione; e che tra il campione con bitume

modificato (ottenuto tramite processo wet) e i due campioni con bitume tale quale (ottenuti tramite processo ibrido) e compound polimerico, le seconde siano più rigide. Da questi risultati, ci si potrebbe aspettare che il provino SP2 5% abbia una resistenza a fatica maggiore degli altri due essendo che le prove sono in controllo di sforzo.

#### **4.4.2 Resistenza a fatica**

Si tratterà in questo capitolo l'argomento principale di tale elaborato: il comportamento a fatica di miscele bituminose integrate con plastiche riciclate tramite metodologia ibrida e il loro confronto con una miscela di riferimento contenente SBS-PMB. Verranno prima mostrati i risultati ottenuti per ogni singola miscela, per poi confrontarle tra di loro.

Il test è stato effettuato su sei provini cilindrici di diametro pari a 150 mm e altezza circa 60 cm, alla temperatura di 20°C. Si riporta una tabella riassuntiva in cui sono mostrati valori di input e output quali: i valori di E (modulo di rigidezza in MPa),  $S_0$  (carico applicato in kPa),  $\nu$ (%) (percentuale di vuoti) sono dati di input, i restanti ovvero  $\Delta\varepsilon$  (differenza di deformazione massima in mm/m),  $N_f$  (numero di cicli a rottura)  $\varepsilon_a$  (ampiezza deformazione orizzontale iniziale in m/m) sono dati in output, ottenuti a seguito della prova.

Si è scelto di testare miscele con percentuale di vuoti vicine, in modo tale da avere valori del numero di cicli a rottura non troppo distanti tra loro, applicando un valore carico a rottura simile,  $S_0$ , valutato con la seguente formula:

$$S_{\text{mix}} = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \cdot (1 + 3\nu) \cdot 10^6$$

dove:

- $S_{\text{mix}}$  è il modulo di rigidezza in (MPa)
- $\sigma_a$  è l'ampiezza della tensione verticale (kN)
- $\varepsilon_a$  è la massima ampiezza di deformazione ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

- $\nu$  è il coefficiente di Poisson assunto pari a 0.35

$\epsilon_a$  è stato suddiviso in tre intervalli di cicli distinti in cui studiare le coppie di provini, in particolare: 0-10000, 10000-100000, 100000-1000000.

Inoltre da test precedenti, si è notato come il valore di modulo inserito in input e quello calcolato durante il test, differenziasse di circa 2500 MPa, per cui al modulo ottenuto tramite la prova a trazione indiretta è stato aggiunto tale delta. Il criterio di rottura applicato è quello di rigidità, in cui il numero di cicli a rottura equivale al valore minimo del modulo.

#### 4.4.2.1 SPI 4.8%

Miscela contenente lo 0.3% di compound polimerico e bitume vergine tal quale.

Tabella 16: dati di input e output della prova a fatica della miscela SPI 4.8%

ID	E	$s_0$	$\Delta\epsilon$	$N_f$	$\epsilon_a$	$[\%] \nu$
	(MPa)	(kPa)	(mm/m)	(-)	(-)	[%]
FAT1	10268	500	170,23	2450	85,11	4,76%
FAT2	9976	185	58,64	164560	29,32	5,33%
FAT3	11846	560	167,00	2010	83,50	5,00%
FAT4	11598	310	91,23	14500	45,61	5,05%
FAT5	7398	155	56	146.020	27,98	5,57%
FAT6	10423	285	78	33370	39	5,16%

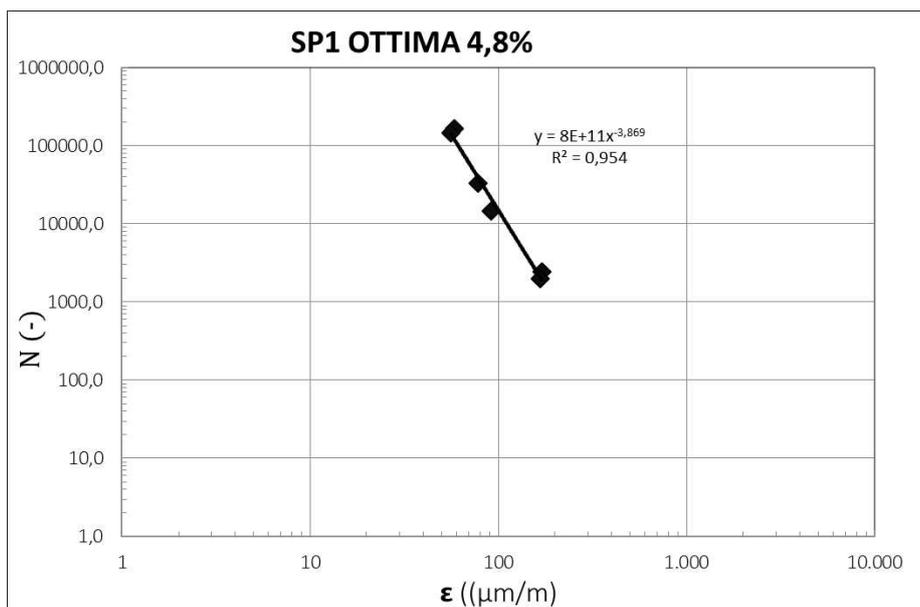


Figura 56: curva di fatica SP1 4.8%

Tabella 17: dati sperimentali della prova a fatica –  $\epsilon_6$ , equazione retta a fatica, indice di correlazione, parametri di regressione, indice dei vuoti

Mixture	$\epsilon_6$ (μm/m)	Fatigue Equation	$R^2$ (-)	ke	ne	v [%]
FAT1	0,017238	$y=1142,2*x^{(0,253)}$	0,9809	1,15341E+12	3,943	4,76%
FAT2						5,33%
FAT3						5,00%
FAT4						5,05%
FAT5						5,57%
FAT6						5,16%

Per tutte e sei le miscele, la curva modulo di rigidezza – numero cicli a rottura ha mostrato un andamento crescente fino ai primi dieci cicli di carico, per poi diventare decrescente fino a quando non è stato raggiunto il 50% del valore iniziale del modulo, dopo il quale il trend si è accentuato, passando a un andamento asintotico verticale. L'indice di correlazione della curva di fatica è prossimo all'unità, ciò vuol dire che i punti sono ben distribuiti e il materiale è omogeneo. Si riporta di seguito il grafico di FAT1 come esempio; il comportamento degli altri provini è stato analogo:

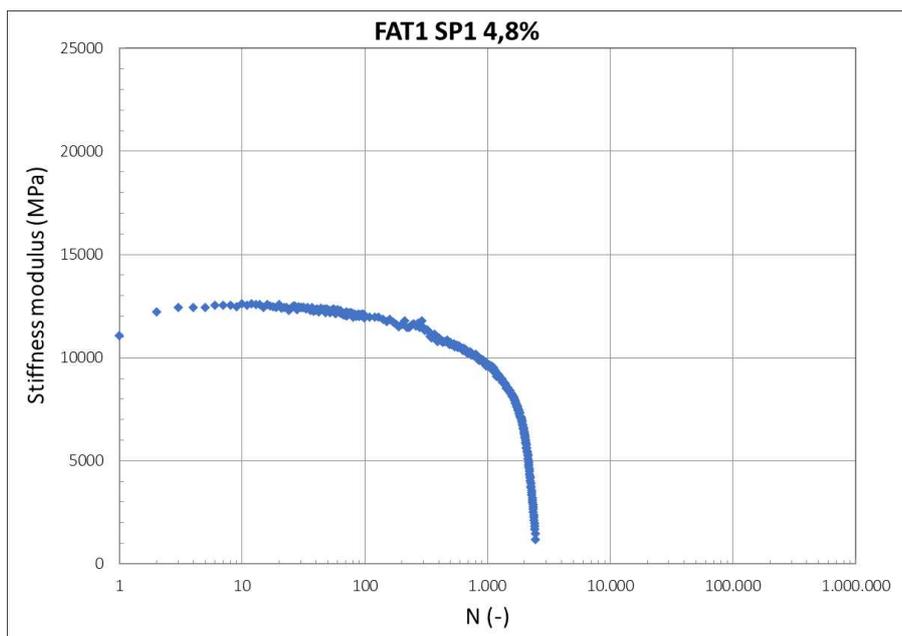


Figura 57: diagramma modulo elastico - numero cicli a rottura FAT1 SP14.8%

#### 4.4.2.2 PMB 4.5%

Miscela di confronto modificata con bitume vergine modificato.

Tabella 18: dati di input e output della prova a fatica della miscela PMB 4.5%

ID	E	$s_0$	$\Delta \epsilon$	$N_f$	$\epsilon_a$	$\% v$
	(MPa)	(kPa)	(mm/m)	(-)	(-)	(%)
FAT1	6959	370	169,54	2520	84,77	6,63%
FAT2	7557	390	194,95	1640	97,48	6,49%
FAT3	6989	140	55,94	206210	27,97	5,89%
FAT4	8077	230	90,19	25700	45,10	6,15%
FAT5	6596	135	62	212.040	31,07	5,76%
FAT6	7586	220	84	21280	42	6,00%

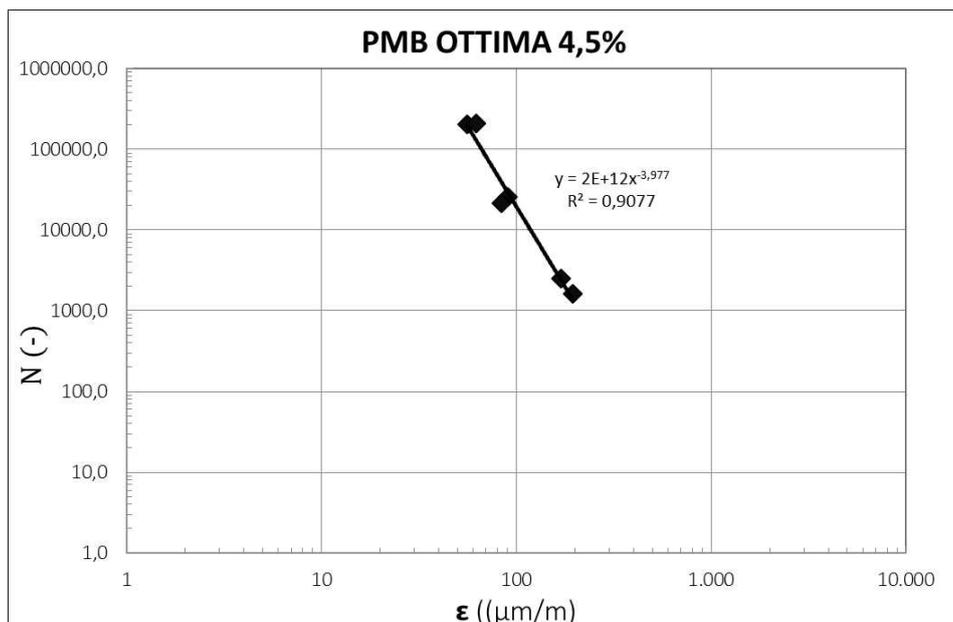


Figura 58: curva di fatica PMB 4.5%

Tabella 19: dati sperimentali della prova a fatica –  $\epsilon_6$ , equazione retta a fatica, indice di correlazione, parametri di regressione, indice dei vuoti

Mixture	$\epsilon_6$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Fatigue Equation	$R^2$ (-)	ke	ne	v [%]
FAT1	0,01916548	$y = 1114,9 * x^{(-0,243)}$	0,9815	$3,10977E+12$	4,100	6,63%
FAT2						6,49%
FAT3						5,89%
FAT4						6,15%
FAT5						5,76%
FAT6						6,00%

Analogamente al caso precedente, per tutte e sei le miscele, la curva modulo di rigidezza – numero cicli a rottura ha mostrato un andamento crescente fino ai primi dieci cicli di carico, per poi diventare decrescente fino a quando non è stato raggiunto il 50% del valore iniziale del modulo, dopo il quale il trend si è accentuato, passando a un andamento asintotico verticale. L'indice di correlazione della curva di fatica è prossimo all'unità, ciò vuol dire che i punti sono ben distribuiti e il materiale è omogeneo. Si riporta di seguito il grafico di FAT1 come esempio; il comportamento degli altri provini è stato analogo:

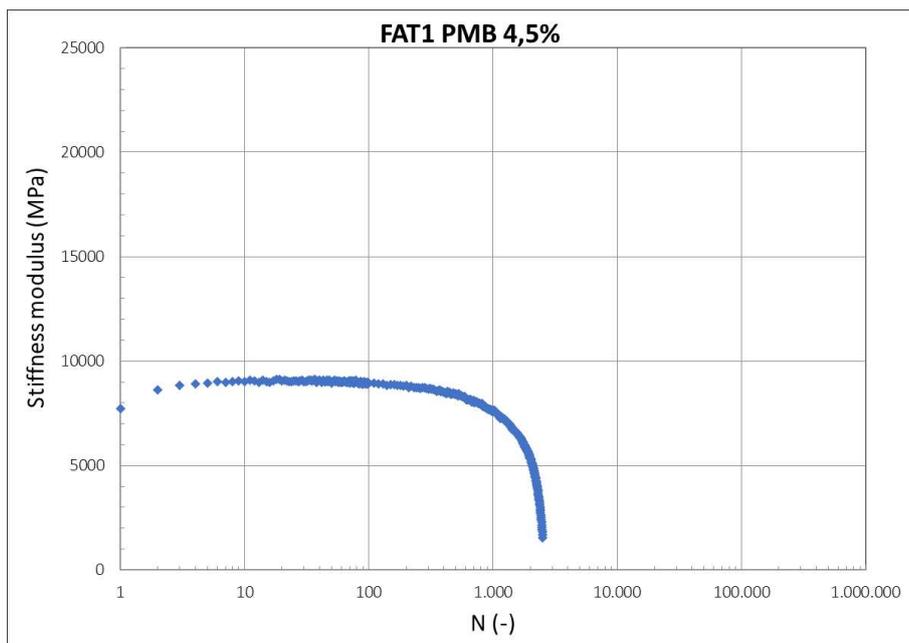


Figura 59: diagramma modulo elastico - numero cicli a rottura FAT1 PMB4.5%

#### 4.4.2.3 SP2 5%

Miscela contenente lo 0.5% di compound polimero e bitume vergine tal quale.

Tabella 20: dati di input e output della prova a fatica della miscela SP2 5%

ID	E	$s_0$	$\Delta\epsilon$	$N_f$	$\epsilon a$	$[\%] v$
	(MPa)	(kPa)	(mm/m)	(-)	(-)	(%)
FAT1	12593	590	172,87	2040	86,43	4,34%
FAT2	11212	200	57,63	226650	28,81	4,25%
FAT3	11933	315	81,53	35850	40,77	3,29%
FAT4	12719	220	62,52	191920	31,26	4,10%
FAT5	15026	385	95	10.470	47,67	3,39%
FAT6	11400	540	182	1530	91	4,61%

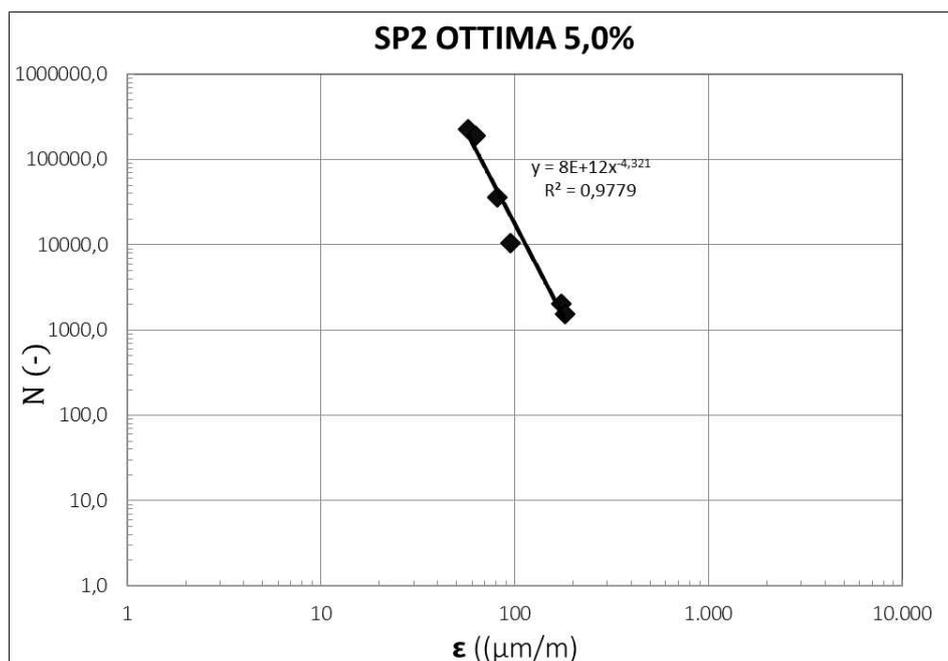


Figura 60: curva di fatica SP2 5%

Tabella 21: dati sperimentali della prova a fatica –  $\epsilon_6$ , equazione retta a fatica, indice di correlazione, parametri di regressione, indice dei vuoti

Mixture	$\epsilon_6$ ( $\mu\text{m/m}$ )	Fatigue Equation	$R^2$ (-)	ke	ne	v [%]
FAT1	0,02021905	$y = 904,23 * x^{(-0,225)}$	0,9794	$1,51434E+13$	4,469	4,34%
FAT2						4,25%
FAT3						3,29%
FAT4						4,10%
FAT5						3,39%
FAT6						4,61%

Anche in quest'ultimo caso, per tutte e sei le miscele, la curva modulo di rigidezza – numero cicli a rottura ha mostrato un andamento crescente fino ai primi dieci cicli di carico, per poi diventare decrescente fino a quando non è stato raggiunto il 50% del valore iniziale del modulo, dopo il quale il trend si è accentuato, passando a un andamento asintotico verticale. L'indice di correlazione della curva di fatica è prossimo all'unità, ciò vuol dire che i punti sono ben distribuiti e il materiale è omogeneo. Si riporta di seguito il grafico di FAT1 come esempio; il comportamento degli altri provini è stato analogo:

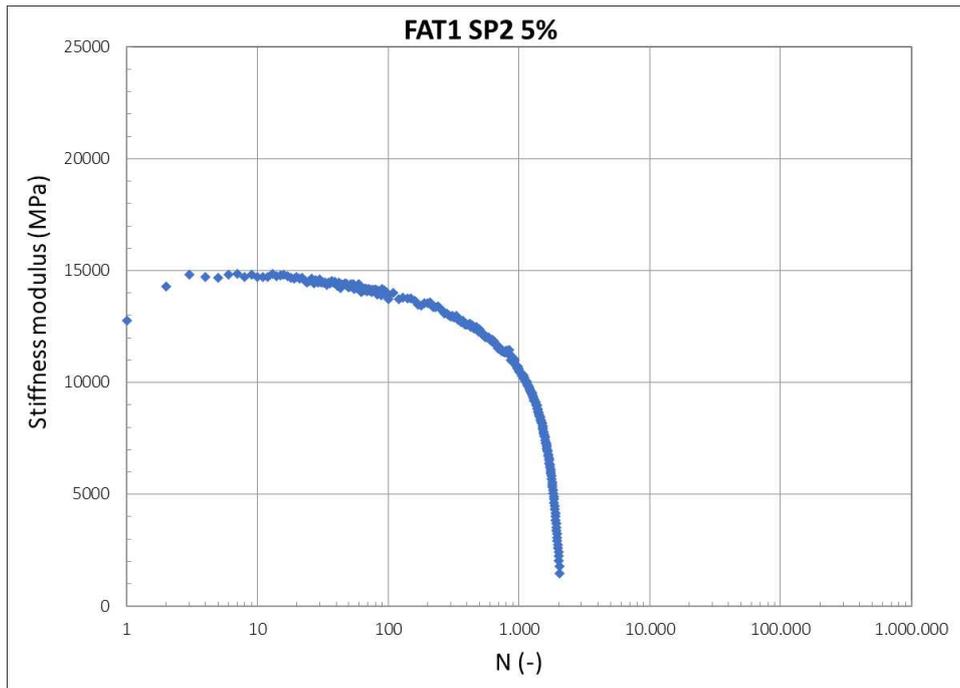


Figura 61: diagramma modulo elastico - numero cicli a rottura FAT1 SP2 5%

#### 4.4.2.4 Confronto miscele ottime

Si riporta l'interpolazione delle tre miscele in due grafici, uno in funzione della deformazione, l'altro del carico applicato durante la prova:

Tabella 22: riassunto delle tre miscele ottime in termini di carico applicato e massima deformazione orizzontale ottenuta

	Miscela	S0 (kPa)	$\epsilon_a$ (-)
SP1 4.8%	FAT1	500	85,11
	FAT2	185	29,32
	FAT3	560	83,50
	FAT4	310	45,61
	FAT5	155	27,98
	FAT6	285	39,07
PMB 4.5%	FAT1	370	84,77
	FAT2	390	97,48
	FAT3	140	27,97
	FAT4	230	45,10
	FAT5	135	31,07
	FAT6	220	42,16
SP2 5%	FAT1	590	86,43
	FAT2	200	28,81
	FAT3	315	40,77
	FAT4	220	31,26
	FAT5	385	47,67
	FAT6	540	90,79

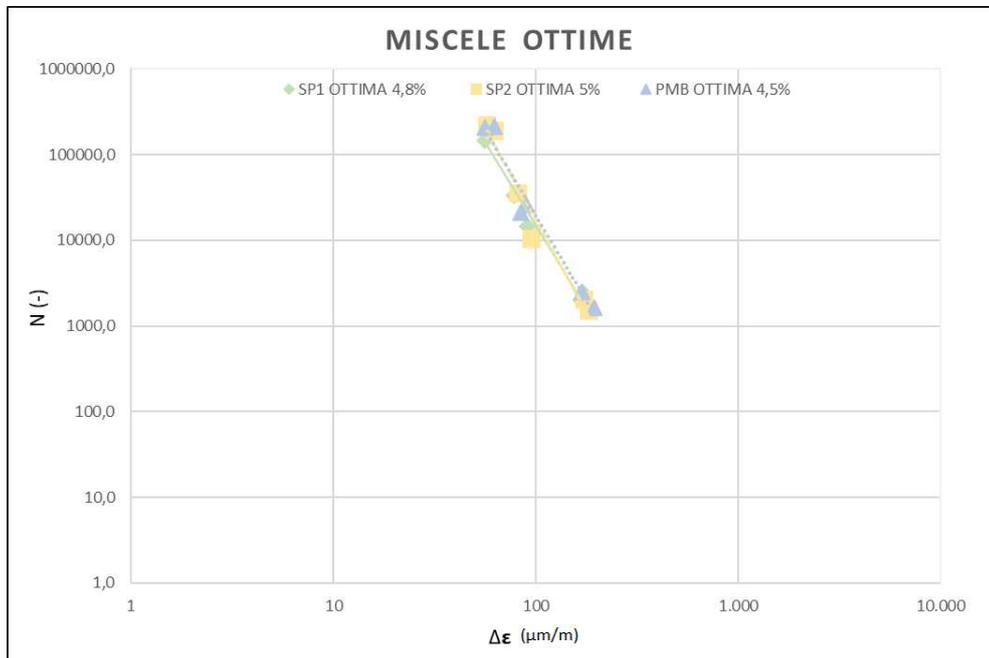


Figura 62: interpolazione diagramma a fatica miscele ottime rispetto alla deformazione orizzontale

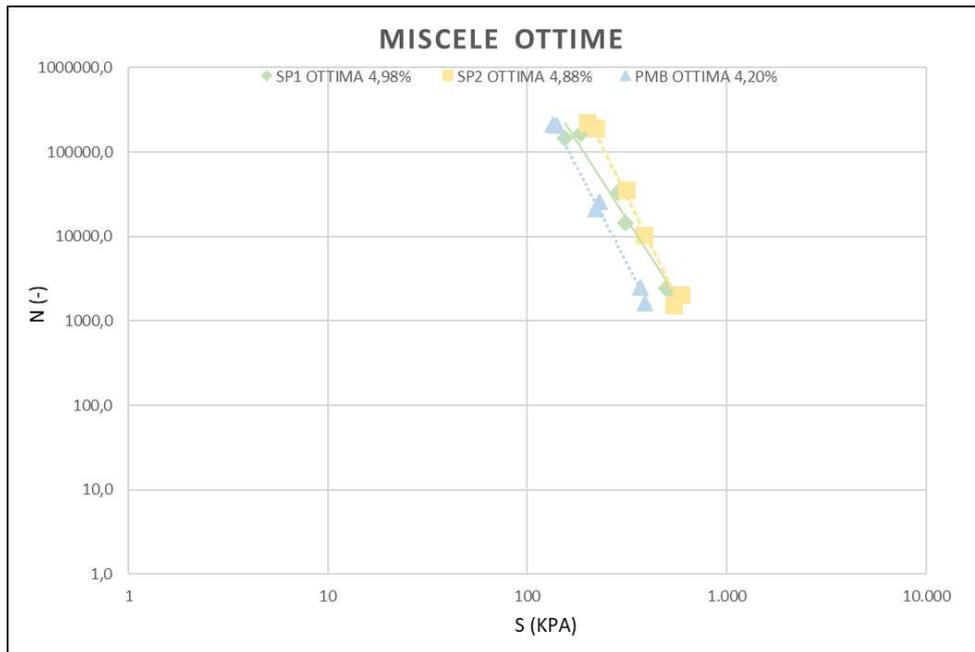


Figura 63: interpolazione diagramma a fatica miscele ottime rispetto al carico applicato

Da una prima visione generale del grafico di figura 24, è evidente come la miscela SP2 realizzata aggiungendo una percentuale di compound polimerico pari allo 0.5%, sia quella più resistente al fenomeno della fatica. Tra i fattori che influenzano la resistenza a fatica, è importante il valore di  $\epsilon_6$ , che corrisponde all'ampiezza della deformazione corrispondente a  $10^6$  cicli a rottura e più è elevato il numero, migliore è la resistenza del materiale a tale fenomeno.

Confrontando le tre miscele, si evince come la SP2 5% abbia il valore più elevato e ciò è in accordo con i risultati ottenuti:

Tabella 23: valori di  $\epsilon_6$

	$\epsilon_6$ (mm/m)
<b>SP1 4.8%</b>	35
<b>PMB 4.5%</b>	38
<b>SP2 5%</b>	40.44

Un altro parametro molto importante, considerato in numerosi studi riportati in letteratura, è il modulo di rigidità, cui aumento, dovuto all'aggiunta di polimeri plastici nella miscela, porta a migliori prestazioni in termini di resistenza a fatica.

Ovviamente è bene sottolineare che i risultati dipendono anche dalla metodologia di test effettuato e dalla temperatura di prova; per basse temperature la resistenza a fatica potrebbe variare.

### **4.4.3 Resistenza a trazione indiretta e indice Nflex**

#### **4.4.3.1 Trazione indiretta ITS**

Un'ulteriore prova volta a caratterizzare la rigidezza e la performance della pavimentazione stradale è la resistenza a trazione indiretta, ITS, da cui si può indagare circa la resistenza a rottura del materiale, tramite i valori di output che restituisce, cioè forza e spostamento.

Sono stati realizzati e testati due provini per miscela alla temperatura di 25°C, che è stata spiegata al capitolo 3. Da questa prova si è potuto ottenere un indice, denominato Nflex, importante per la valutazione della prestazione del materiale nei confronti della rottura per fatica, di cui si discuterà al paragrafo successivo.

Si riportano i diagrammi ottenuti dalla prova ITS:

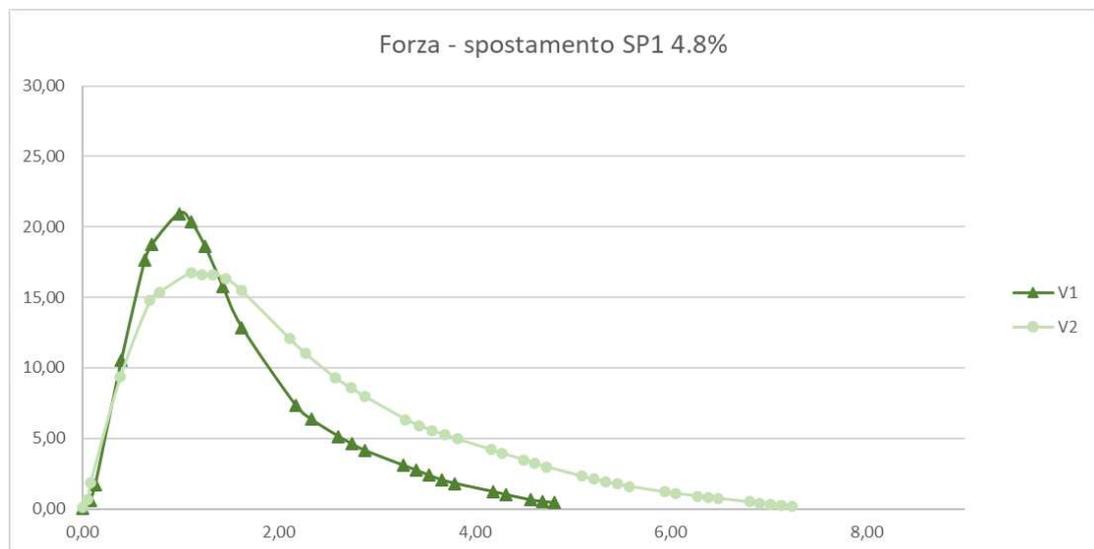


Figura 64: prova a trazione indiretta SP1 4.8%

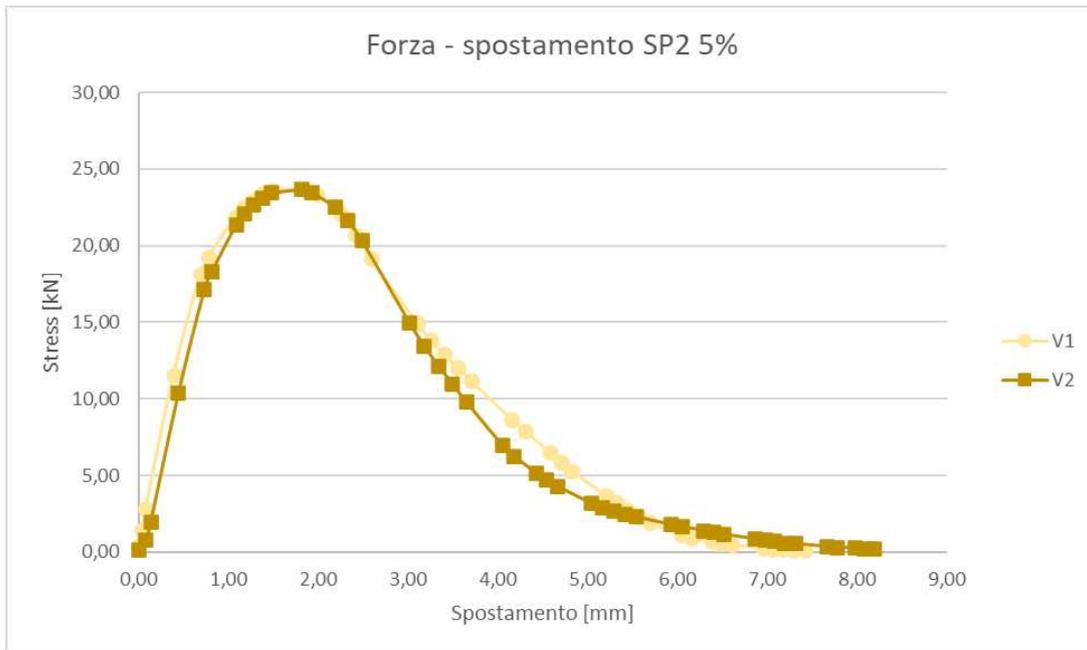


Figura 65: prova a trazione indiretta SP2 5%

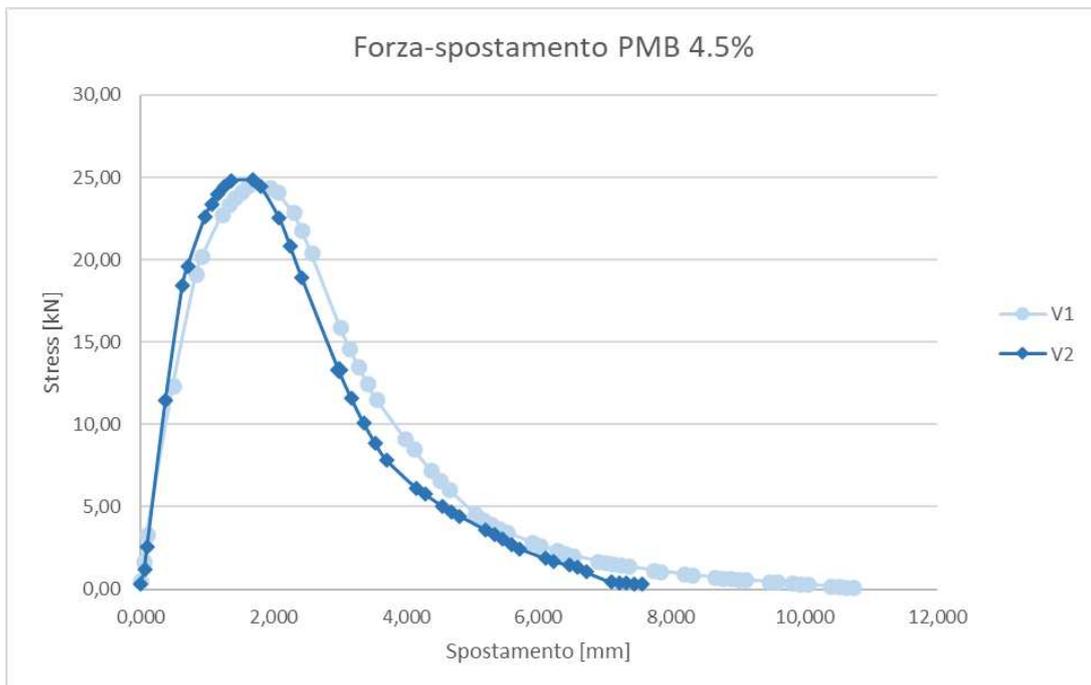


Figura 66: prova a trazione indiretta PMB 4.5%

Si riporta una tabella e un grafico riassuntivi riguardo i valori ottenuti dalla prova:

Tabella 24: valori ottenuti dalla prova ITS

	%bverg	%btot	ITS	Nflex	v_Des[%]	Nflex
V1 SP1 4.8%	2	4.8	1,72	0,109	5,45	0,180
V2 SP1 4.8%	2	4.8	1,41	0,251	5,61	
V1 SP2 4.5%	2	4.5	1,98	0,410	2,27	0,370
V2 SP2 4.5%	2	4.5	1,98	0,331	2,02	
V1 PMB 5.0%	2	5	2,08	0,419	2,31	0,356
V2 PMB 5,0%	2	5	2,12	0,293	2,71	

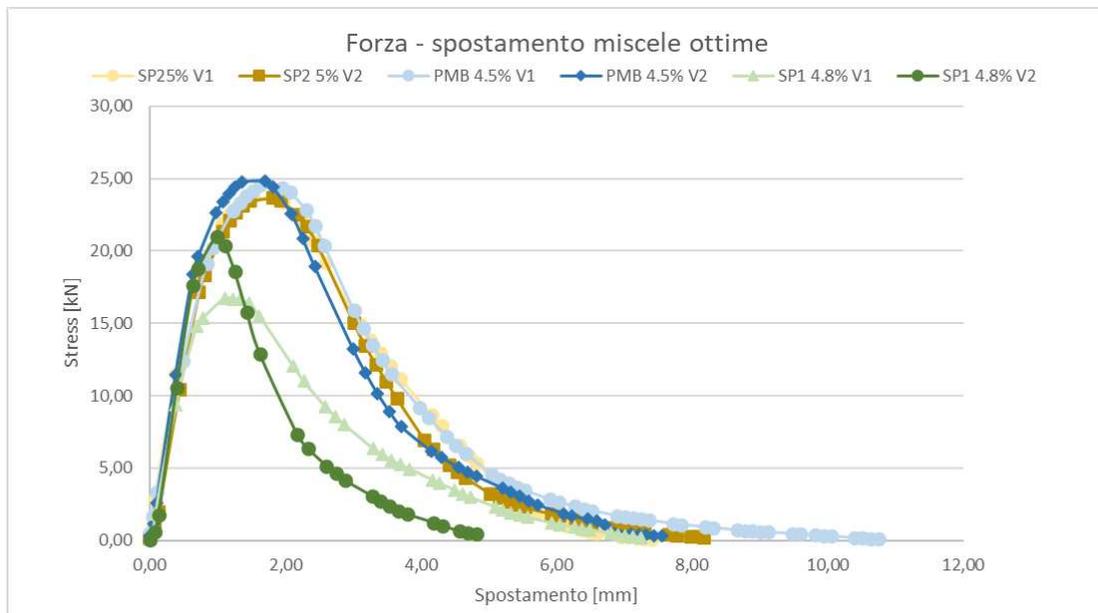


Figura 67: prova a trazione indiretta miscele ottime

La prova fornisce diagrammi caratterizzati da un andamento crescente del carico fino a un dato valore di picco cui, corrisponde la rottura del provino. A questo segue un ramo decrescente post-picco la cui pendenza da informazioni sulla duttilità della miscela.

Dall'ultimo grafico si nota come la miscela PMB 4.5% e SP2 5% non mostrino una differenza netta in termini di forza – spostamento, al contrario della miscela SP1 4.8%,

mostrando uno spostamento a rottura inferiore di circa il 26% rispetto alla SP2 5% e del 33% rispetto alla PMB 4.5%.

Inoltre, dalla tabella si nota come la miscela SP2 5% ha il valore più alto tra le due miscele contenenti compound polimerico, ciò significa che ha una resistenza maggiore rispetto a quella con lo 0.3% di plastiche, valore che potrebbe inficiare sulla duttilità della miscela. In conclusione, si può dire che:

- l'ITS diminuisce con la presenza delle plastiche aggiunte tramite metodologia ibrida, ma è anche vero che le miscele contengono una tipologia di bitume vergine differente e i vuoti non sono i medesimi;
- la SP2 5% e la PMB 4.5% sono meno duttili e chela SP2 5% si conferma, anche in questo test, come miscela migliore tra le tre.

#### ***4.4.3.2 Indice Nflex***

Per misurare la bontà dei provini per quanto riguarda la resistenza a trazione indiretta e soprattutto in termini di resistenza a fatica, che è lo scopo di questa tesi, è stato calcolato l'indice Nflex, seguendo quanto prescritto dalla normativa AASHTO Designation: TP 141-201.

Si riporta una tabella e un grafico riassuntivi riguardo i valori ottenuti dalla prova:

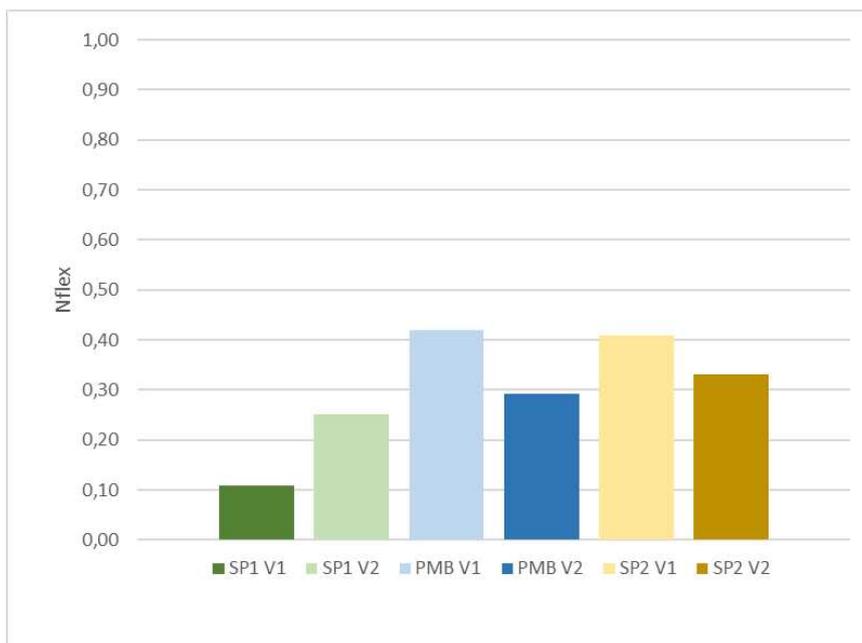


Figura 68: indice Nflex - miscele ottime

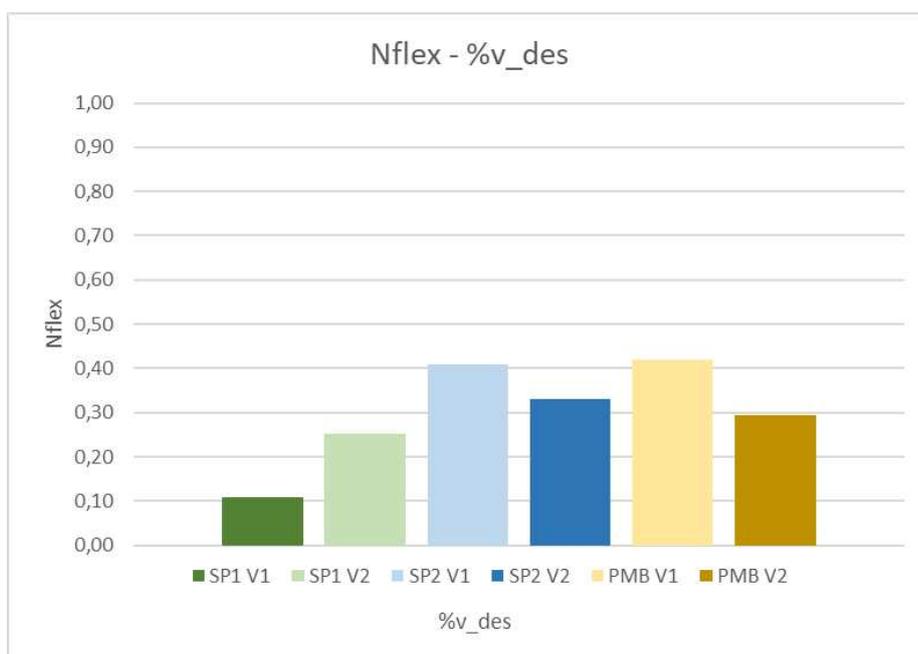


Figura 69: Nflex in funzione dell'indice dei vuoti a Ndes

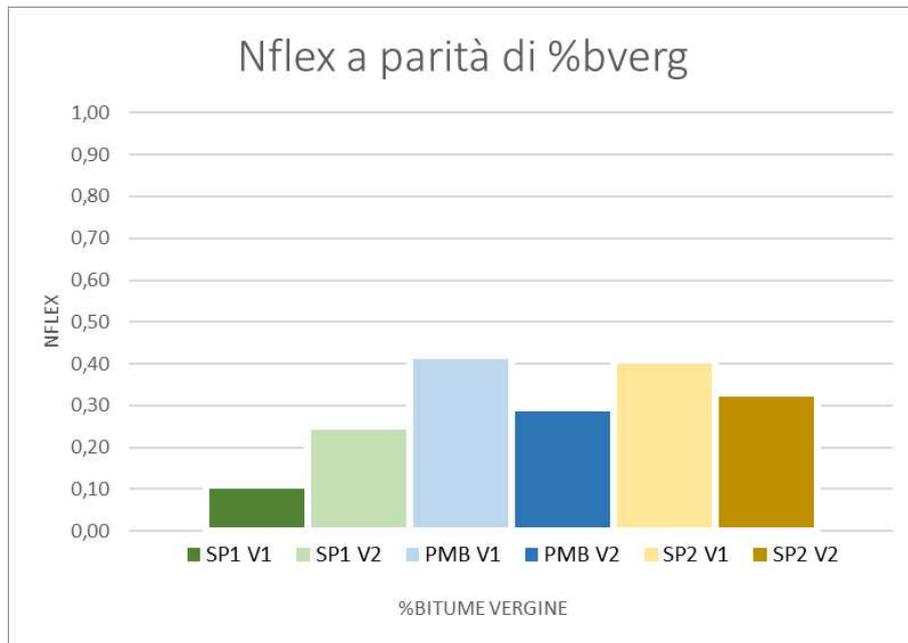


Figura 70: Nflex in funzione della percentuale di bitume vergine

In generale il valore di Nflex dipende dal coefficiente di Poisson considerato, dalla temperatura di prova, dal contenuto e tipo di legante della miscela e dalla metodologia di incorporazione dei materiali riciclati.

Dai risultati ottenuti si vede che la miscela SP2 5% ha il valore di Nflex più alto. Dalla letteratura si riporta che una percentuale di legante più alta e un indice di Nflex alto indicano una migliore resistenza a fessurazione della miscela. Ancora una volta si può confermare che la miscela che presenta il compound polimerico al suo interno, se questo è opportunamente dosato, è più resistente rispetto a una miscela con bitume modificato in maniera “tradizionale”.

## 5. Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente elaborato si è posto lo scopo di indagare le prestazioni meccaniche di conglomerati bituminosi contenenti un compound polimerico aggiunto tramite tecnica ibrida in due diversi dosaggi. Inoltre una miscela modificata con metodologia a umido (cioè contenente un bitume modificato) è stata utilizzata come miscela di riferimento.

L'obiettivo è stato quello di provare se le miscele integrate con il polimero, presentassero qualità e prestazioni meccaniche superiori alle miscele modificate secondo metodologia "tradizionale" e quale fosse la percentuale ideale con cui integrare il compound polimerico nella fase di mix design.

Grazie a studi precedenti a questo elaborato, riguardo l'analisi delle caratteristiche volumetriche e meccaniche di provini pilota, si è giunti a stabilire quali potessero essere le "miscele ottime" da testare. Una miscela si dice ottima quando presenta una formulazione tale per cui i requisiti dettati dal capitolato speciale d'appalto di riferimento vengono rispettati. Nell'ambito del presente studio il CSA scelto come riferimento per identificare tali limiti è quello utilizzato nell'autostrada A4. Si è posta dunque l'attenzione su tre miscele:

- SP1 4.8%: 50% di aggregati vergini, 50% di RAP rispetto al peso degli aggregati, 0.3% di rejuvenator sul peso del fresato, 0.3% di compound polimerico sul peso della miscela e una quantità di bitume tal quale pari a 2.00% rispetto al peso della miscela.
- PMB 4.5%: 50% di aggregati vergini, 50% di RAP rispetto al peso degli aggregati, 0.3% di rejuvenator sul peso del fresato e una quantità di bitume modificato pari a 2.00% rispetto al peso della miscela.
- SP2 4.8%: 50% di aggregati vergini, 50% di RAP rispetto al peso degli aggregati, 0.3% di rejuvenator sul peso del fresato, 0.5% di compound polimerico sul peso della miscela e una quantità di bitume tal quale pari a 2.00% rispetto al peso della miscela.

Dai risultati ottenuti è possibile notare come il compound polimerico oggetto di attenzione dia un contributo positivo se dosato correttamente all'interno della miscela ed eseguendo la miscelazione secondo quanto prescritto.

Si possono dunque riassumere i risultati ottenuti come segue:

- dal punto di vista delle caratteristiche volumetriche è emerso come, a parità di bitume vergine di aggiunta (2%), l'introduzione delle plastiche ha portato a una maggiore chiusura della miscela in termini di vuoti, dovuto probabilmente anche dalla metodologia di implementazione del polimero.
- la presenza del compound polimerico porta a un aumento della rigidità nella miscela: la SP2 5% si dimostra la più rigida (0.5% di polimero plastico), seguono la SP1 4.8% (0.3% di plastiche) e la PMB 4.5%;
- nei confronti del fenomeno della fatica il compound polimerico proveniente da plastica di scarto aiuta positivamente la miscela: anche in questo caso la SP2 5% risulta essere la più resistente. Questo dato viene confermato anche in letteratura.
- l'ITS è maggiore nella miscela modificata con metodologia a umido. La miscela con lo 0.5% di plastiche e quella con bitume PMB mostrano comportamenti simili durante la prova, questo potrebbe essere dato dal fatto che presentino una percentuale di vuoti non distante l'una dall'altra e inoltre la presenza delle plastiche non sembra influire particolarmente sui risultati finali;
- l'indice Nflex, che è un parametro della resistenza alla fessurazione di un materiale, aumenta con l'aggiunta delle plastiche, ma anche in questo caso non evince una differenza sostanziale tra la miscela con lo 0.5% di plastiche e quella di riferimento. In generale un valore alto di questo parametro è sinonimo di buona resistenza in termini di resistenza a fatica.

Nonostante i risultati ottenuti tramite le miscele indagate confermino la presenza di miglioramenti dal punto di vista delle prestazioni meccaniche, risulta però doveroso fare alcune raccomandazioni, quali:

- sono necessari ulteriori test a fatica, a temperature differenti e seguendo approcci diversi, così da ottenere ulteriori informazioni sulla risposta del materiale a questo fenomeno;
- si potrebbe variare, all'interno della stessa miscela, la metodologia da adottare per la resistenza a frattura, in modo da poter avere più informazioni sul fenomeno e poter comparare i risultati ottenuti dai diversi test;
- effettuare e approfondire lo studio dell'indice Nflex, così da trovare dei valori target entro cui considerare tale valore accettabile;
- eseguire altri test di carattere meccanico, per caratterizzare la miscela anche nei riguardi dell'ormaiamento e della resistenza alle basse temperature.

## Indice delle figure

Figura 1: Layers di una pavimentazione stradale .....	8
Figura 2: Fonte – OECD Global Plastics.....	9
Figura 3: Fonte – OECD Global Plastics.....	9
Figura 4: Fonte – OECD Global Plastics.....	10
Figura 5: identificazione dei polimeri plastici .....	11
Figura 6: plastica in fiocchi .....	13
Figura 7: plastica in pellets .....	13
Figura 8: plastica in polvere.....	13
Figura 9: Fonte – “The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review” – Yuetan Ma, Hongyu Zhou, Xi Jiang, Pawel Polaczyk, Rui Xiao, Miaomiao Zhang .....	15
Figura 10: impronta del pneumatico sulla pavimentazione stradale.....	17
Figura 11: esempio di rottura a pelle di cocodrillo (fessure visibili a occhio nudo)	17
Figura 12: curva di fatica .....	19
Figura 13: le tre foto mostrano l’impianto Bitux S.p.A.....	21
Figura 14: dimensione aggregati utilizzati per le miscele ottime .....	22
Figura 15: curva granulometrica di progetto .....	23
Figura 16: dimensioni aggregato fresato .....	24
Figura 17: proprietà fisiche rejuvenator.....	26
Figura 18: rejuvenator utilizzato e miscelazione RAP + rejuvenantor .....	26
Figura 19: compound polimerico utilizzato.....	27

Figura 20: percentuale vuoti $n_{\text{iniziale}}$ .....	29
Figura 21: percentuale vuoti $n_{\text{design}}$ .....	29
Figura 22: percentuale vuoti $n_{\text{max}}$ .....	30
Figura 23: quartatore.....	33
Figura 24: Miscelatore automatico .....	35
Figura 25: Fase di stoccaggio e classificazione miscela.....	35
Figura 26: fonte - BS EN 12697-39, quantità di materiale da testare.....	35
Figura 27: posa del materiale nel cestello metallico .....	38
Figura 28: forno utilizzato per il test .....	39
Figura 29: peso del cestello più il materiale .....	39
Figura 30: le tre foto fotografie rappresentano la fase di separazione degli aggregati e la divisione del materiale in sezioni omogenee .....	41
Figura 31: calcolo massa $m_1$ .....	42
Figura 32: calcolo massa $m_2$ .....	41
Figura 33: calcolo massa $m_3$ .....	42
Figura 34: formazione del menisco .....	42
Figura 35: principio di movimento del provino nella pressa a taglio girevole.....	43
Figura 36: fonte - BS EN 12697-26, configurazioni di prove per il modulo di rigidità.....	48
Figura 37: limiti imposti dal capitolato speciale dell'A4 .....	48
Figura 38: fonte - BS EN 12697-26.....	49
Figura 39: fonte - BS EN 12697-26, forma del carico d'impulso .....	49

Figura 40: fonte - BS EN 12697-26 esempio di equipaggiamento del test .....	50
Figura 41: fonte - BS EN 12697-26, ampiezza deformazione.....	51
Figura 42: esempio di risultati ottenuti dal software – curve a campana per 5 impulsi di carico e deformazione.....	51
Figura 43: fonte - BS EN 12697-23, equipaggiamento utilizzato durante il test.....	52
Figura 44: fonte - BS EN 12697-23, tipi di rotture.....	53
Figura 45: prova di trazione indiretta .....	53
Figura 46: rottura del provino durante la prova.....	53
Figura 47: esempio di rottura di un provino .....	54
Figura 48: esempio di retta a fatica in funzione della deformazione e del numero di cicli a rottura .....	55
Figura 49: fonte - BS EN 12697-24.....	57
Figura 50: posizionamento del provino all'interno del castelletto di prova .....	57
Figura 51: configurazione di prova.....	58
Figura 52: configurazione della prova a trazione indiretta .....	59
Figura 53: fonte – AASHTO Designation: TP 141-210.....	64
Figura 54: fonte – CSA dell'A4 .....	66
Figura 55: moduli di rigidezza a 20°C miscele ottime .....	67
Figura 56: curva di fatica SP1 4.8% .....	70
Figura 57: diagramma modulo elastico – numero cicli a rottura FAT1 SP1 4.8% ....	70
Figura 58: curva di fatica PMB 4.5% .....	73
Figura 59: diagramma modulo elastico – numero cicli a rottura FAT1 PMB 4.5% ..	73

Figura 60: curva di fatica SP2 5% .....	75
Figura 61: diagramma modulo elastico - numero cicli a rottura FAT1 SP2 5%.....	73
Figura 62: interpolazione diagramma a fatica miscele ottime rispetto alla deformazione orizzontale.....	73
Figura 63: interpolazione diagramma a fatica miscele ottime rispetto alla carico applicato.....	73
Figura 64: prova a trazione indiretta SP1 4.8%.....	73
Figura 65: prova a trazione indiretta SP2 5%.....	73
Figura 66: prova a trazione indiretta PMB 4.5%.....	73
Figura 67: prova a trazione indiretta miscele ottime .....	80
Figura 68: indice Nflex – miscele ottime.....	82
Figura 69: Nflex in funzione dell'indice dei vuoti a Ndes .....	82
Figura 70: Nflex in funzione della percentuale di bitume vergine .....	83

## Indice delle tabelle

Tabella 1: dimensione aggregati vergini .....	21
Tabella 2: distribuzione granulometrica aggregato .....	23
Tabella 3: percentuale di bitume presente nel fresato .....	23
Tabella 4: tabella miscele realizzate e vuoti ottenuti tramite compattazione.....	27
Tabella 5: miscele e percentuale di compound polimerico considerato .....	27
Tabella 6: miscele testate .....	30
Tabella 7: quantità di materiale presenti nella miscela SP1 4.8% .....	62
Tabella 8: quantità di materiale presente nella miscela PMB4.5%.....	63
Tabella 9: quantità di materiale presente nella miscela SP25%.....	63
Tabella 10: percentuale contenuto di legante.....	64
Tabella 11: caratteristiche volumetriche .....	65
Tabella 12: Moduli di rigidezza a 20°C miscele ottime.....	66
Tabella 13: dati di input e output della prova a fatica della miscela SP1 4.8% .....	68
Tabella 14: dati sperimentali della prova a fatica – $\epsilon_6$ , equazione retta a fatica, indice di correlazione, parametri di regressione, indice dei vuoti .....	69
Tabella 15: dati di input e output della prova a fatica della miscela PMB 4.5% .....	70
Tabella 16: dati sperimentali della prova a fatica – $\epsilon_6$ , equazione retta a fatica, indice di correlazione, parametri di regressione, indice dei vuoti .....	71
Tabella 17: dati di input e output della prova a fatica della miscela SP2 5% .....	72
Tabella 18: dati sperimentali della prova a fatica – $\epsilon_6$ , equazione retta a fatica, indice di correlazione, parametri di regressione, indice dei vuoti .....	73

Tabella 19: riassunto delle tre miscele ottime in termini di carico applicato e massima deformazione orizzontale ottenuta.....	75
Tabella 20: valori di $\varepsilon_6$ .....	76
Tabella 21: valori ottenuti dalla prova ITS .....	79

## Bibliografia

- *BS EN 12697-5; Bituminous mixtures – Test methods – Part 5: Determination of the maximum density. The British Standards Institution (2019).*
- *BS EN 12697-6; Bituminous mixtures – Test methods – Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. The British Standards Institution (2019).*
- *BS EN 12697-23; Bituminous mixtures – Test methods – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens. The British Standards Institution (2019).*
- *BS EN 12697-24; Bituminous mixtures – Test methods – Part 24: Resistance to fatigue. The British Standards Institution (2019).*
- *BS EN 12697-26; Bituminous mixtures – Test methods – Part 26: Stiffness. The British Standards Institution (2019).*
- *BS EN 12697-31; Bituminous mixtures – Test methods – Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor. The British Standards Institution (2019).*
- *BS EN 12697-35, Bituminous mixtures – Test methods – Part 35: Laboratory mixing. The British Standards Institution (2019).*
- *BS EN 12697-39; Bituminous mixtures – Test methods – Part 39: Binder content by ignition. The British Standards Institution (2019).*
- *Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). Le sfide dell'utilizzo di pavimentazioni in asfalto recuperato per nuove miscele di asfalto: una revisione. *Materiali*, 13 (18), 4052.*
- *Boom, YJ, Enfrin, M., Swaney, M., Masood, H., Pramanik, BK, Robert, D., & Giustozzi, F. (2023). Proprietà ingegneristiche, microplastiche e valutazione delle emissioni di miscele di asfalto modificate con plastica riciclata. *Science of The Total Environment*, 893, 164869.*
- *American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO Designation TP 141-20 Standard Method of Test for Determining the Indirect Tensile Nflex Factor to Assess the Cracking Resistance of Asphalt Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO Designation TP 141-20 Standard Method of Test for*

*Determining the Indirect Tensile Nflex Factor to Assess the Cracking Resistance of Asphalt Mixtures.*

- *Enfrin, M., & Giustozzi, F. (2022). Recenti progressi nella costruzione di strade asfaltate sostenibili con plastica riciclata. Polymer International , 71 (12), 1376-1383.*
- *Richard Willis, PhD Fan Yan, PhD, PE Raquel Moraes, PhD (2022). Recycled plastics in asphalt part A: state of knowledge, NAPA – IS – 142*
- *Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007). Reclaimed asphalt pavement—a literature review. FHWA-ICT-07-001.*
- *Ma, Y., Zhou, H., Jiang, X., Polaczyk, P., Xiao, R., Zhang, M., & Huang, B. (2021). L'utilizzo di rifiuti di plastica nelle pavimentazioni in asfalto: una revisione. Cleaner Materials , 2 , 100031.*
- *Giustozzi, F., Xuan, DL, Enfrin, M., Masood, H., Audy, R., & Boom, YJ (2021). Uso di plastiche riciclate per uso stradale per pavimentazioni in asfalto sostenibili: verso la selezione di plastiche per uso stradale: un quadro di valutazione e risultati sperimentali preliminari (n. AP-R663-21).*
- *Yin, F., Garita, J., Taylor, A., & West, R. (2018). Affinamento del test del fattore Nflex a trazione indiretta (IDT) per valutare la resistenza alla fessurazione delle miscele di asfalto per la progettazione della miscela e la garanzia della qualità. Construction and Building Materials , 172 , 396-405.*
- *You, L., Long, Z., You, Z., Ge, D., Yang, X., Xu, F., ... & Diab, A. (2022). Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 9(5), 742-764.*
- *La Macchia, J. N., Baglieri, O., Dalmazzo, D., & Santagata, E. (2024). Engineering Properties of Road Paving Mixtures with High Content of Reclaimed Asphalt and Recycled Waste Plastics. Materials, 17(23), 5681.*

A conclusione di questo lavoro di tesi, desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno supportato e aiutato a raggiungere questo importante traguardo. Ringrazio prima di tutto il prof. Baglieri e il prof. Dalmazzo, per la loro disponibilità e per la guida e il supporto datomi durante tutto il percorso. Un ringraziamento speciale va a Joseph, cui aiuto è stato prezioso e indispensabile, e grazie alla sua pazienza e al suo sostegno, tutto ciò è stato possibile.