



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**PRESTAZIONI A FATICA DI MISCELE BITUMINOSE  
SOSTENIBILI CON RAP E COMPOUND POLIMERICI  
DA PLASTICHE RICICLATE**

A.A. 2024 - 2025

**Relatori:**

Prof. Orazio Baglieri

Prof. Davide Dalmazzo

Dott. Ing. Joseph Nicolas La Macchia

**Candidato:**

Armando Pellegrino





## ***Abstract***

Negli ultimi anni, si è assistito a una crescente sensibilità verso le tematiche ambientali e all'urgenza di promuovere una transizione verso modelli produttivi più sostenibili ed ecocompatibili. Nel settore delle infrastrutture stradali, questo orientamento ha incentivato l'impiego sempre più diffuso di materiali riciclati nella produzione delle miscele bituminose. Tuttavia, l'utilizzo di tali materiali non deve compromettere la qualità né le prestazioni funzionali delle pavimentazioni.

In questo contesto si inserisce il Decreto 5 agosto 2024, recante l'adozione dei *Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'affidamento dei servizi di progettazione ed esecuzione dei lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali*. In base ai suddetti CAM, i progetti di nuove costruzioni stradali devono prevedere l'impiego di almeno il 20% di materiale recuperato o riciclato in strati di collegamento, con possibilità di impiegare percentuali superiori qualora ciò non comprometta le prestazioni della pavimentazione.

Alla luce di tali premesse, il presente elaborato di tesi si propone di analizzare il comportamento a fatica di miscele bituminose sostenibili (chiamate rispettivamente Sp\_20 e Sp\_50), contenenti diverse percentuali di granulato di conglomerato bituminoso (RAP), pari al 20% e 50%, e modificate tramite un compound polimerico a base di plastiche dure tecno-selezionate riciclate, introdotto con metodologia *hybrid*. Le prestazioni meccaniche ottenute sono state confrontate con tre miscele di riferimento: due realizzate con analoghe percentuali di RAP, ma contenenti un bitume PmB implementato secondo la tradizionale metodologia *wet* (PmB\_20 e PmB\_50) e una miscela contenente il 20% di RAP e bitume tal quale (Ref\_20), priva di compound polimerico, utile a isolare l'effetto del solo modificante plastico. Tutte le miscele sono state progettate mantenendo un contenuto di vuoti medio analogo, così da garantire condizioni uniformi di confronto. Le prove di fatica sono state condotte secondo la norma EN 12697-24, in tre diverse configurazioni sperimentali (4PB, IT-CY e CIT-CY, rispettivamente) e alla temperatura costante di 20°C.

I risultati evidenziano come l'aggiunta del compound polimerico risulti particolarmente vantaggiosa nelle miscele con elevato contenuto di RAP. Inoltre, la lavorabilità di tutte le miscele modificate *hybrid* è risultata sensibilmente

migliorata rispetto a tutte le miscele di riferimento. Per le miscele a basso contenuto di RAP, la metodologia di modifica *wet* offre prestazioni superiori, sebbene con differenze minime rispetto alla controparte *hybrid*.

In conclusione, le miscele modificate con tecnologia *hybrid* mostrano ottime potenzialità, in quanto capaci di coniugare buone prestazioni meccaniche con benefici ambientali, specialmente in ottica di un incremento progressivo del contenuto di RAP. Tuttavia, per basse percentuali di fresato, le miscele modificate con tecnologia *wet* risultano ancora preferibili, mentre la loro efficacia tende a diminuire all'aumentare del contenuto di materiale riciclato.

# SOMMARIO

<b>SOMMARIO .....</b>	<b>I</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE.....</b>	<b>IV</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE .....</b>	<b>VI</b>
<b>1. MISCELE BITUMINOSE SOSTENIBILI: CONTESTO E PROSPETTIVE ....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Introduzione.....</i>	1
1.2. <i>Il RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).....</i>	3
1.2.1. <i>Da rifiuto a materia prima.....</i>	4
1.2.2. <i>Limitazioni nell'utilizzo del RAP nelle miscele di conglomerato bituminoso .....</i>	6
1.3. <i>Le plastiche di riciclo .....</i>	8
1.3.1. <i>Criticità ambientali legate alla plastica .....</i>	9
1.3.2. <i>Uso delle plastiche di riciclo nei conglomerati bituminosi .....</i>	10
1.3.3. <i>Aspetti ambientali ed economici e riciclabilità futura delle miscele bituminose sostenibili.....</i>	14
<b>2. IL FENOMENO DELLA FATICA NEI CONGLOMERATI BITUMINOSI. 16</b>	
2.1. <i>Introduzione.....</i>	16
2.2. <i>Il comportamento visco-elastico dei conglomerati bituminosi.....</i>	17
2.3. <i>Fessurazione per fatica degli strati in conglomerato bituminoso .....</i>	19
2.4. <i>Approccio fenomenologico alla determinazione della vita a fatica .....</i>	23
2.5. <i>Criteri di rottura.....</i>	26
2.5.1. <i>Riduzione del 50% del modulo iniziale.....</i>	26
2.5.2. <i>Criterio dell'Energy Ratio (ER).....</i>	26
<b>3. CAMPAGNA Sperimentale .....</b>	<b>29</b>
3.1. <i>Obiettivi ed inquadramento del lavoro.....</i>	29
3.2. <i>I materiali.....</i>	30
3.2.1. <i>Gli aggregati vergini e il RAP .....</i>	30
3.2.2. <i>Il bitume .....</i>	33
3.2.3. <i>Compound polimerico e rejuvenator .....</i>	33
3.2.4. <i>Le miscele realizzate.....</i>	35
3.3. <i>Le prove sperimentali .....</i>	38

3.3.1.	<i>Quartatura ed essicatura</i> .....	38
3.3.2.	<i>Procedure di miscelazione</i> .....	39
3.3.3.	<i>Determinazione della Theoretical Maximum Density</i> .....	42
3.3.4.	<i>Compattazione dei provini</i> .....	45
3.3.5.	<i>Determinazione delle dimensioni effettive e della Bulk Density dei provini compattati</i> .....	48
3.3.6.	<i>Determinazione dei moduli di rigidezza</i> .....	50
3.3.7.	<i>Determinazione della resistenza a fatica</i> .....	55
<b>4.</b>	<b>ESITI DELLA SPERIMENTAZIONE</b> .....	<b>64</b>
4.1.	<i>Proprietà volumetriche</i> .....	64
4.1.1.	<i>Densità teorica e apparente</i> .....	64
4.1.2.	<i>Valutazione dei vuoti e dei parametri di compattazione</i> .....	67
4.2.	<i>Moduli di rigidezza</i> .....	74
4.3.	<i>Prestazioni a fatica</i> .....	80
4.3.1.	<i>Trazione indiretta con periodi di riposo (IT-CY)</i> .....	83
4.3.2.	<i>Trazione indiretta senza periodi di riposo (CIT-CY)</i> .....	86
4.3.3.	<i>Flessione a quattro punti (4PB-PR)</i> .....	89
4.3.4.	<i>Parametri alternativi per l'analisi dei risultati</i> .....	91
<b>CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</b> .....		<b>95</b>
<b>Bibliografia</b> .....		<b>98</b>
<b>APPENDICE</b> .....		<b>106</b>
<i>Parametri di compattazione</i> .....		106
<i>Moduli di rigidezza</i> .....		109
<i>Resistenza a fatica (IT-CY)</i> .....		112
<i>Sp_20</i> .....		113
<i>PmB_20</i> .....		114
<i>Ref_20</i> .....		115
<i>Sp_50</i> .....		116
<i>PmB_50</i> .....		117
<i>Resistenza a fatica (CIT-CY)</i> .....		118
<i>Sp_20</i> .....		119
<i>PmB_20</i> .....		120
<i>Ref_20</i> .....		121

<i>Sp_50</i> .....	122
<i>PmB_50</i> .....	123
<i>Resistenza a fatica (4PB-PR)</i> .....	124
<i>Sp_20</i> .....	125
<i>PmB_20</i> .....	126
<i>Ref_20</i> .....	127
<i>Sp_50</i> .....	128
<i>PmB_50</i> .....	129

# INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1: Quantitativi minimi di materia recuperata riferiti al peso del prodotto finito (fonte: CAM Strade).....</i>	2
<i>Tabella 2: Densità e intervalli di fusione dei principali tipi di plastica.....</i>	13
<i>Tabella 3: Densità apparente di aggregati e RAP (fonte: La Macchia et al, 2024 [3])...</i>	32
<i>Tabella 4: Caratteristiche dei leganti bituminosi (fonte: La Macchia et al, 2024 [3])....</i>	33
<i>Tabella 5: Principali caratteristiche del compound polimerico utilizzato (fonte: La Macchia et al, 2024 [3]) .....</i>	34
<i>Tabella 6: Caratteristiche del rejuvenator utilizzato (fonte: La Macchia et al, 2024 [3])</i>	
.....	35
<i>Tabella 7: Distribuzione dimensionale di aggregati vergini e RAP .....</i>	36
<i>Tabella 8: Percentuali dei componenti sul peso della miscela.....</i>	37
<i>Tabella 9: Dimensioni dei provini in funzione della massima dimensione nominale dell'aggregato (fonte: EN 12697-26).....</i>	46
<i>Tabella 10: Fasi della compattazione con pressa giratoria.....</i>	47
<i>Tabella 11: Nomenclatura adottata per i provini.....</i>	64
<i>Tabella 12: Densità apparenti dei materiali costituenti le miscele e valori di TMD analitica e sperimentale .....</i>	65
<i>Tabella 13: Densità apparente media delle miscele determinata su provini cilindrici ....</i>	66
<i>Tabella 14: Densità apparente media delle miscele determinata su provini prismatici ..</i>	66
<i>Tabella 15: Valori medi dei vuoti e dei parametri di compattazione per ciascuna miscela</i>	
.....	71
<i>Tabella 16: Contenuto medio di vuoti reali nei provini cilindrici e prismatici per ciascuna miscela .....</i>	74
<i>Tabella 17: Valore medio dei moduli di rigidezza per ciascuna miscela .....</i>	75
<i>Tabella 18: Risultati del test ANOVA a una via sui moduli di rigidezza ottenuti da prove IT-CY.....</i>	77
<i>Tabella 19: Parametri descrittivi di ciascuna miscela, relativi a test eseguiti in configurazione IT-CY.....</i>	77
<i>Tabella 20: Risultati del test post hoc eseguito sui valori di rigidezza ottenuti mediante prove IT-CY.....</i>	78
<i>Tabella 21: Risultati del test ANOVA a una via sui moduli di rigidezza ottenuti da prove 4PB-PR .....</i>	78

<i>Tabella 22: Parametri descrittivi di ciascuna miscela, relativi a test eseguiti in configurazione 4PB-PR .....</i>	78
<i>Tabella 23: Risultati del test post hoc eseguito sui valori di rigidezza ottenuti mediante prove 4PB-PR .....</i>	79
<i>Tabella 24: Parametri di regressione e valori di <math>\varepsilon_6</math> per ciascuna miscela e per i diversi criteri di rottura (IT-CY).....</i>	83
<i>Tabella 25: Parametri di regressione e valori di <math>\varepsilon_6</math> per ciascuna miscela e per i diversi criteri di rottura (CIT-CY).....</i>	86
<i>Tabella 26: Parametri di regressione e valori di <math>\varepsilon_6</math> per ciascuna miscela e per i diversi criteri di rottura (4PB-PR) .....</i>	89
<i>Tabella 27: Parametri di valutazione alternativi delle prestazioni a fatica in configurazione IT-CY.....</i>	93
<i>Tabella 28: Parametri di valutazione alternativi delle prestazioni a fatica in configurazione CIT-CY.....</i>	93

# INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 2: Impianto di granulazione del fresato (fonte: Iterchimica, 2022)</i> .....	5
<i>Figura 3: Trend del commercio globale di plastica (fonte: UNCTAD, 2025)</i> .....	8
<i>Figura 4: Gestione dei rifiuti plastici (fonte: Noor et al, 2022)</i> .....	9
<i>Figura 5: Diverse forme di materiali polimerici utilizzate nei conglomerati bituminosi (fonte: Austroads, 2021)</i> .....	11
<i>Figura 6: Metodi di modifica polimerica delle miscele (fonte: Enfrin et al, 2022)</i> .....	12
<i>Figura 7: Fessurazione per fatica (fonte: Distress Identification Manual - FHWA, 2014)</i> .....	16
<i>Figura 8: Differenza tra risposta elastica e visco-elastica</i> .....	17
<i>Figura 9: Rappresentazione del modulo complesso</i> .....	18
<i>Figura 10: Distorsione dei cicli isteretici dovuta a fatica (fonte: Xu et al, 2025)</i> .....	19
<i>Figura 11: Bottom-up e Top-down cracking (fonte: Bessa et al, 2022)</i> .....	21
<i>Figura 12: Criterio dell'Energy Ratio in regime di stress-control (fonte: Xu et al, 2025)</i> .....	28
<i>Figura 13: Distribuzione granulometrica di aggregati e RAP (fonte: La Macchia et al, 2024 [3])</i> .....	31
<i>Figura 14: Classi granulometriche aggregati vergini</i> .....	32
<i>Figura 15: RAP e compound polimerico</i> .....	32
<i>Figura 16: Interazione tra aggregati e compound polimerico</i> .....	34
<i>Figura 17: Curva granulometrica di riferimento</i> .....	36
<i>Figura 18: Dispositivo utilizzato per quartatura e condizionamento del RAP in cella climatica</i> .....	39
<i>Figura 19: Miscelatore meccanico</i> .....	42
<i>Figura 20: Fasi della misurazione della TMD con metodo del picnometro</i> .....	44
<i>Figura 21: Rappresentazione dell'azione di una pressa giratoria (fonte: EN 12697-31)</i> .....	45
<i>Figura 22: Misurazione delle dimensioni effettive dei provini</i> .....	49
<i>Figura 23: Determinazione della Bulk Density</i> .....	50
<i>Figura 24: Esecuzione della prova in configurazione IC-CY</i> .....	52
<i>Figura 25: Forma dell'impulso di carico applicato (fonte: EN 12697-26)</i> .....	53
<i>Figura 26: Illustrazione del funzionamento della prova in configurazione 4PB (fonte: EN 12697-26)</i> .....	54
<i>Figura 27: Macchinario UTM-10</i> .....	55
<i>Figura 28: Test di fatica in configurazione 4PB</i> .....	57
<i>Figura 29: Definizione della deformazione totale e resiliente</i> .....	59

<i>Figura 30: Test di fatica in configurazione IT-CY .....</i>	60
<i>Figura 31: Spostamento orizzontale indotto dal carico sinusoidale .....</i>	62
<i>Figura 32: Provino giunto a rottura in un test di fatica in configurazione IT .....</i>	63
<i>Figura 33: Confronto TMD determinata con procedura analitica e volumetrica.....</i>	65
<i>Figura 34: Densità apparente delle miscele, calcolata come media dei valori misurati su provini cilindrici .....</i>	66
<i>Figura 35: Densità apparente delle miscele, calcolata come media dei valori misurati su provini prismatici.....</i>	67
<i>Figura 36: Aumento della densità apparente in funzione del numero di giri.....</i>	69
<i>Figura 37: Curva di compattazione del provino A_20 .....</i>	70
<i>Figura 38: Differenza tra vuoti geometrici ed effettivi al variare del numero di giri per il provino A_20.....</i>	70
<i>Figura 39: Media del numero massimo di giri della pressa per ciascuna miscela .....</i>	71
<i>Figura 40: Valori medi del CDI per ciascuna miscela.....</i>	72
<i>Figura 41: Contenuto medio di vuoti geometrici ed effettivi, con relativa differenza, nei provini cilindrici .....</i>	72
<i>Figura 42: Contenuto medio di vuoti effettivi nei provini cilindrici per ciascuna miscela .....</i>	73
<i>Figura 43: Contenuto medio di vuoti effettivi nei provini prismatici per ciascuna miscela .....</i>	73
<i>Figura 44: Moduli di rigidezza medi per le diverse miscele, ottenuti da prove IT-CY su provini cilindrici .....</i>	75
<i>Figura 45: Moduli di rigidezza medi per le diverse miscele, ottenuti da prove 4PB-PR su provini prismatici.....</i>	75
<i>Figura 46: Valori medi di rigidezza per ciascuna miscela, con relativi intervalli di confidenza al 95%, ottenuti da prove in configurazione IT-CY.....</i>	77
<i>Figura 47: Valori medi di rigidezza per ciascuna miscela, con relativi intervalli di confidenza al 95%, ottenuti da prove in configurazione 4PB-PR.....</i>	79
<i>Figura 48: Boxplot dei residui per i diversi criteri di rottura, relativi alla configurazione di prova CIT-CY per la miscela Sp_50, con indicazione degli outliers.....</i>	82
<i>Figura 49: Rette di fatica in configurazione IT-CY per le diverse miscele, secondo il criterio ER.....</i>	84
<i>Figura 50: Valori di <math>\varepsilon_6</math> delle diverse miscele per ciascun criterio di rottura in configurazione IT-CY.....</i>	85

<i>Figura 51: Relazione tra il numero di cicli a rottura e la tensione applicata in configurazione IT-CY, per le diverse miscele analizzate.....</i>	85
<i>Figura 52: Rette di fatica in configurazione CIT-CY per le diverse miscele, secondo il criterio ER.....</i>	87
<i>Figura 53: Valori di <math>\varepsilon_6</math> delle diverse miscele per ciascun criterio di rottura in configurazione CIT-CY.....</i>	88
<i>Figura 54: Relazione tra il numero di cicli a rottura e la tensione applicata in configurazione CIT-CY, per le diverse miscele analizzate .....</i>	88
<i>Figura 55: Rette di fatica in configurazione 4PB-PR per le diverse miscele, secondo il criterio ER.....</i>	90
<i>Figura 56: Valori di <math>\varepsilon_6</math> delle diverse miscele per ciascun criterio di rottura in configurazione 4PB-PR .....</i>	91
<i>Figura 57: Valori di <math>\varepsilon_6</math> ottenuti mediante diverse configurazioni di prova (fonte: Di Benedetto et al.) .....</i>	92
<i>Figura 58: Valori di <math>N_{ER, 0.1\%}</math> e <math>n_{\varepsilon, ER}</math> in configurazione IT-CY.....</i>	94
<i>Figura 59: Valori di <math>N_{ER, 0.1\%}</math> e <math>n_{\varepsilon, ER}</math> in configurazione CIT-CY.....</i>	94



# 1. MISCELE BITUMINOSE SOSTENIBILI: CONTESTO E PROSPETTIVE

## 1.1. *Introduzione*

Negli ultimi anni si è evidenziata con crescente urgenza una triplice sfida: ridurre l'impatto ambientale dovuto all'attività antropica, far fronte alla progressiva scarsità di risorse naturali non rinnovabili e gestire in modo efficace l'ingente quantità di rifiuti plastici. La produzione di plastica continua infatti a crescere, mentre il tasso di riciclo resta inferiore al 10%, causando un accumulo significativo in discarica e negli ecosistemi naturali, in particolare in quelli marini, spesso a causa di metodi illeciti di smaltimento. In questo contesto, i principi dell'economia circolare si affermano come un paradigma indispensabile, promuovendo la riduzione dei rifiuti, il riutilizzo dei materiali e il riciclo come strategie fondamentali per uno sviluppo sostenibile.

Il settore delle costruzioni stradali rappresenta uno dei maggiori consumatori di risorse non rinnovabili, in particolare aggregati lapidei e bitume, e i processi produttivi ad esso associati comportano un impatto significativo in termini di emissioni inquinanti. Solo in Italia, la produzione annua di conglomerati bituminosi destinati alla realizzazione di pavimentazioni stradali è stimata in circa 35 milioni di tonnellate [1]. L'industria delle pavimentazioni bituminose è pertanto in una posizione unica per contribuire alla soluzione delle sfide sopra indicate: mediante l'innovazione tecnologica e la ricerca sui materiali, è possibile valorizzare quelli che un tempo erano considerati rifiuti — come il fresato d'asfalto proveniente da pavimentazioni obsolete e le plastiche post-consumo — trasformandoli in risorse per la costruzione di nuove infrastrutture. L'integrazione di questi materiali secondari non solo riduce la dipendenza da materie prime vergini, ma offre anche il potenziale per migliorare le prestazioni e la durabilità delle pavimentazioni, creando un ciclo virtuoso di sostenibilità.

In questa prospettiva, la comunità scientifica e il settore delle costruzioni stradali hanno investito con decisione nello sviluppo di soluzioni tecnologiche orientate alla sostenibilità, puntando a incrementare progressivamente l'utilizzo di materiali riciclati nelle miscele bituminose. Questa transizione non rappresenta più solo una prerogativa della ricerca, ma trova ormai un solido inquadramento normativo, come dimostra l'introduzione dei *Criteri Ambientali Minimi (CAM)* per le infrastrutture stradali, che pongono l'accento sulla logica della circolarità. Per la prima volta, infatti, viene stabilito un riferimento esplicito a soglie minime di impiego di materiali recuperati nelle produzioni di conglomerato bituminoso: “*Il progetto di nuova costruzione di strade prevede l'impiego di prodotti da costruzione con un contenuto minimo di materia recuperata, riciclata o di sottoprodotti [...] garantendo complessivamente le stesse prestazioni ottenibili con materiali di primo impiego*” [2].

Conglomerati con bitumi modificati con polimeri oppure conglomerati bituminosi additivati con <i>compound</i> polimerici	
Base o Base/binder	$\geq 25\%$
Collegamento o Binder	$\geq 20\%$
Usure chiuse e drenanti	$\geq 10\%$

Tabella 1: Quantitativi minimi di materia recuperata riferiti al peso del prodotto finito (fonte: CAM Strade)

Considerate tali premesse, la principale sfida ingegneristica consiste nell'elaborare formulazioni di miscela e metodologie produttive capaci di integrare in modo efficiente materiali di primo impiego e componenti riciclati, assicurando che le caratteristiche prestazionali e la durabilità delle pavimentazioni non risultino compromesse [3], ma siano conformi ai rigorosi standard richiesti e in linea con i principi di un'economia circolare concreta ed efficace.

## **1.2. *Il RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)***

Il conglomerato bituminoso recuperato, internazionalmente noto con l'acronimo RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), è il materiale ottenuto prevalentemente dalle operazioni di scarifica (fresatura) o dalla demolizione integrale di pavimentazioni in conglomerato bituminoso giunte al termine della loro vita utile; in misura minore, può derivare anche dagli scarti di produzione generati negli impianti di miscelazione. Esso è costituito da una miscela di aggregati lapidei di elevata qualità, già sottoposti a selezione e lavorazione, e da un legante bituminoso che, pur presentando un inevitabile grado di invecchiamento, preserva un significativo valore residuo, sia in termini funzionali che economici. Il suo reimpiego costituisce, pertanto, una delle applicazioni più consolidate ed efficaci dei principi dell'economia circolare nel settore delle infrastrutture viarie, consentendo una sostanziale riduzione del fabbisogno di materiali di primo impiego. L'impiego di RAP può tuttavia comportare alcune limitazioni prestazionali, rendendo necessaria una valutazione attenta delle formulazioni di miscela.

Secondo le stime più recenti [4], in Italia si generano ogni anno tra 15 e 17 milioni di tonnellate di fresato. Di questa quantità, circa il 60% viene reintrodotto nel ciclo produttivo delle pavimentazioni stradali sotto forma di RAP. Nel solo 2024, il riutilizzo del fresato ha consentito di evitare l'impiego di 10 milioni di tonnellate di aggregati naturali e oltre 420.000 tonnellate di bitume vergine, con un beneficio economico stimato intorno ai 440 milioni di euro [5]. Diventa quindi strategico incrementare ulteriormente l'impiego di RAP nei conglomerati bituminosi, così da massimizzare i benefici ambientali ed economici associati al suo recupero.

Alcuni studi hanno evidenziato la potenziale riciclabilità multipla del conglomerato bituminoso recuperato [4-6], ossia la capacità del materiale di essere sottoposto a ripetuti processi di riciclo senza un significativo decadimento delle proprie caratteristiche prestazionali, anche grazie a specifici interventi di valorizzazione, qualora necessari [9]. Infine, dopo numerosi cicli di riutilizzo e recupero, può risultare appropriato un suo declassamento verso impieghi a minor valore aggiunto, ad esempio come materiale per strati di fondazione non legati [6].

### 1.2.1. Da rifiuto a materia prima

Il processo che consente di trasformare il fresato d'asfalto da rifiuto a materia prima secondaria, denominata Granulato di Conglomerato Bituminoso (GCB), si articola in una serie di fasi rigorosamente normate, finalizzate a garantirne la qualità, la sicurezza ambientale e la conformità per il reimpiego. In Italia tale procedura è disciplinata da un quadro normativo specifico che definisce le condizioni per la cessazione della qualifica di rifiuto (*End-of-Waste*), ai sensi del D. Lgs. n. 152 del 2006 (art. 184-ter).

Il ciclo di trattamento ha inizio con la gestione del materiale in ingresso presso un impianto autorizzato: il fresato, classificato con il codice CER 17.03.02, giunge all'impianto come “*rifiuto speciale non pericoloso*” [10]. La prima fase prevede un controllo visivo di accettazione per escludere la presenza di materiali estranei contaminanti (terra, detriti, ecc.). Successivamente, il materiale deve essere sottoposto a un rigoroso campionamento, secondo le procedure definite dalla norma UNI 10802:2011, per effettuare una serie di analisi chimico-fisiche di base. Queste analisi sono volte a determinare parametri fondamentali come il contenuto di bitume e di umidità, e a verificare l'assenza o il rispetto dei limiti per elementi di contaminazione quali metalli pesanti, Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) e amianto [11].

Superata la fase di accettazione, il fresato viene sottoposto a trattamenti meccanici per renderlo idoneo al reimpiego. Tramite frantoi o mulini, il materiale viene frantumato per ridurre la pezzatura degli aggregati. Successivamente, attraverso vagliatura con setacci vibranti, il granulato viene separato in diverse frazioni granulometriche omogenee [12]. Per garantire la costanza qualitativa del prodotto finale, si procede all'omogeneizzazione, miscelando lotti diversi. Il prodotto così ottenuto viene stoccati in cumuli distinti e identificati, di volumetria non superiore a 3.000 m<sup>3</sup> ciascuno, in attesa delle verifiche di conformità. Sul granulato stoccati vengono eseguiti i test di laboratorio finali, con una frequenza di campionamento minima di un prelievo ogni 3.000 m<sup>3</sup> di materiale prodotto [11].

Le analisi chimico-fisiche obbligatorie verificano il rispetto dei limiti di legge per le sostanze pericolose, in particolare per gli IPA ( $\leq 100$  mg/kg) e l'amianto ( $\leq 1.000$  mg/kg). Si eseguono inoltre test di cessione per valutare il potenziale

rilascio di inquinanti in ambiente acquoso, i cui limiti sono fissati dal DM 5/2/1998. Parallelamente, i controlli prestazionali accertano le caratteristiche fisiche del granulato: il contenuto di materiali estranei non deve superare l'1% in massa e la curva granulometrica deve essere classificata secondo la norma EN 933-1. La natura petrografica degli aggregati è invece verificata secondo la EN 932-3 [11]. In sintesi, il GCB deve soddisfare le specifiche tecniche richieste per il suo uso finale, come la produzione di nuove miscele bituminose (EN 13108) o l'impiego come aggregato per strati stradali (EN 13242).



*Figura 1: Impianto di granulazione del fresato (fonte: Iterchimica, 2022)*

L'atto formale che sancisce il completamento di questo percorso è la Dichiarazione di Conformità (DDC). Una volta che tutte le analisi di laboratorio hanno confermato il rispetto dei parametri, il produttore emette la DDC per ogni lotto di GCB (massimo 3.000 m<sup>3</sup>), allegando i relativi rapporti di prova. A partire dalla data di emissione di tale documento, il materiale perde legalmente lo status di rifiuto [10] e diventa a tutti gli effetti un prodotto, pronto per essere immesso sul mercato.

### ***1.2.2. Limitazioni nell'utilizzo del RAP nelle miscele di conglomerato bituminoso***

Una caratteristica intrinseca del granulato di conglomerato bituminoso è la presenza di un'elevata percentuale di particelle fini. Questo fenomeno è una conseguenza diretta del degrado meccanico indotto dalle operazioni di fresatura degli strati di pavimentazione esistenti o dai processi di frantumazione necessari per ridurre la pezzatura degli aggregati. Un elevato contenuto di frazione fine può impedire alla miscela finale di soddisfare i requisiti granulometrici specificati, limitando di fatto la percentuale massima di RAP ammisible. Inoltre le particelle più fini, a causa dell'elevata area superficiale specifica, sono ricoperte da una quantità maggiore di legante invecchiato e irrigidito rispetto alle particelle più grossolane [13]. Esse trattengono anche più umidità, rendendo il RAP nel suo complesso meno drenante di un cumulo di aggregati vergini [14]. Questo si ripercuote direttamente sulle fasi di produzione successive: un materiale più umido richiede un maggiore dispendio energetico per l'essiccazione, un tempo di miscelazione più lungo e può portare a una riduzione della capacità produttiva dell'impianto.

La qualità e l'omogeneità del RAP sono fortemente dipendenti dalla sua provenienza: un materiale fresato da un'unica fonte tracciabile, con parametri di fresatura controllati (come velocità e profondità), può risultare notevolmente omogeneo [14]. Tuttavia, una delle principali problematiche per i produttori di conglomerato bituminoso consiste proprio nella difficoltà di stoccare il RAP proveniente da diversi cantieri in cumuli separati. Questa difficoltà è spesso dovuta a limiti di spazio nell'area dell'impianto. Quando non è possibile garantire l'omogeneità attraverso una gestione ideale delle fonti (creando cioè cumuli separati), l'onere si sposta verso processi di trattamento più complessi (come la frantumazione e la miscelazione di RAP di diversa provenienza), e metodologie di progettazione più sofisticate, in grado di compensare la variabilità intrinseca del materiale in ingresso [6]. Inoltre, sempre a causa dei limiti di spazio, è sovente impossibile selezionare il granulato in più di due o tre classi granulometriche, che risultano pertanto piuttosto ampie. Ne consegue che la distribuzione effettiva delle

dimensioni all'interno di ciascuna classe rimane sostanzialmente incerta, introducendo un inevitabile grado di variabilità nella formulazione delle miscele.

Le limitazioni imposte dalle tecnologie degli impianti di produzione rappresentano un ulteriore ostacolo all'incremento del contenuto di RAP nelle miscele di conglomerato bituminoso. Il RAP non può essere introdotto negli impianti standard con le stesse modalità degli aggregati vergini, a causa del rischio di combustione del legante. Il contatto diretto tra il materiale riciclato e la fiamma del bruciatore genera un'eccessiva emissione di aerosol di idrocarburi incombusti e danneggia ulteriormente il legante invecchiato, alterandone le proprietà. Per superare i limiti imposti dagli impianti tradizionali, è necessario dunque preriscaldare il RAP, evitando il contatto diretto con la fiamma [15].

Dal punto di vista meccanico, la caratteristica distintiva delle miscele ad alto contenuto di RAP è un potenziale aumento della rigidezza, che dipende in gran parte dalla rigidezza del legante del RAP stesso [16]. Questo aumento di rigidezza è vantaggioso per quanto riguarda la resistenza alle deformazioni permanenti (ormaiamento); di contro, un conglomerato bituminoso più rigido risulta potenzialmente più vulnerabile nei confronti dei fenomeni di fessurazione. Tali aspetti vanno tenuti in considerazione in fase di progettazione della miscela, prevedendo eventualmente l'utilizzo di leganti bituminosi vergini più "soffici" o additivi rigeneranti [17].

La massimizzazione dei benefici economici e ambientali derivanti dall'impiego del granulato di conglomerato bituminoso richiede dunque un approccio integrato che includa:

1. Un frazionamento accurato, lo stoccaggio in aree coperte, rigorosi test di controllo qualità e, ove possibile, la separazione delle diverse fonti di approvvigionamento;
2. Investimenti in tecnologie produttive in grado di garantire un riscaldamento controllato e indiretto del RAP, come ad esempio i tamburi a doppio cilindro;
3. L'adozione di metodologie di progettazione avanzate, fondate su criteri prestazionali.

### 1.3. *Le plastiche di riciclo*

La crescente industrializzazione e l'aumento della popolazione mondiale hanno portato a un forte incremento nella produzione di plastica, un materiale sintetico derivato dal petrolio, insolubile e non biodegradabile. Le tipologie più diffuse comprendono polietilene tereftalato (PET), cloruro di polivinile (PVC), polipropilene (PP), polistirene (PS), polietilene (PE) e poliuretano (PUR), in accordo alla EN ISO 472:2013 [18]. La plastica, grazie al suo basso costo, alla leggerezza, alla resistenza e alla facilità di lavorazione e produzione, trova applicazione in numerosi settori, tra cui l'imballaggio, l'agricoltura, l'automotive e le costruzioni.

Le statistiche riflettono una tendenza preoccupante: la produzione globale di plastica è passata da 2 milioni di tonnellate nel 1950 a 299 milioni di tonnellate nel 2013, raggiungendo 436 milioni di tonnellate nel 2022. Le proiezioni suggeriscono che i livelli produttivi potrebbero raddoppiare entro il 2050, raggiungendo le 884 milioni di tonnellate [19].

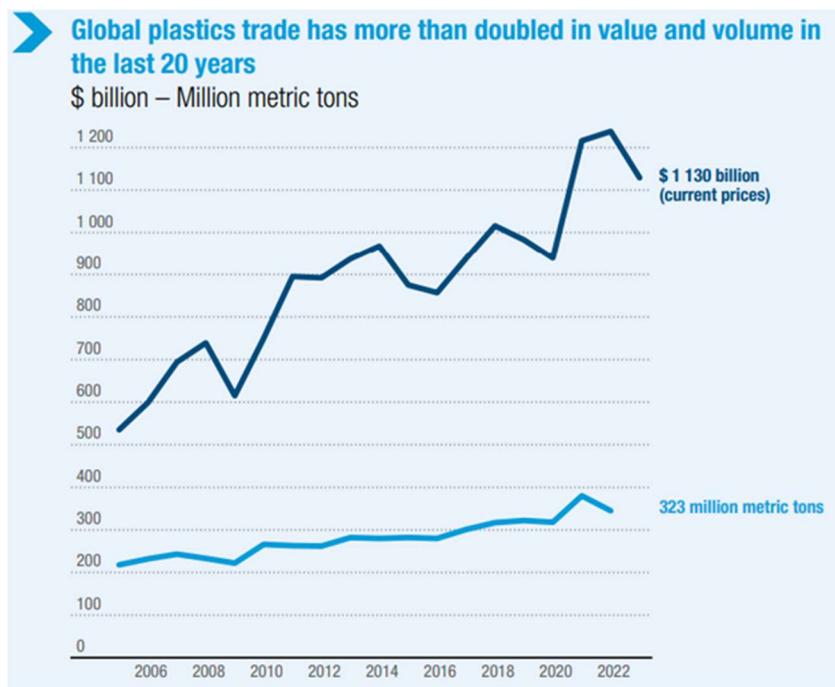


Figura 2: Trend del commercio globale di plastica (fonte: UNCTAD, 2025)

La plastica rappresenta circa il 16% del peso dei rifiuti domestici a livello globale, ponendo un serio problema di smaltimento [20]. Solo il 9% dei rifiuti

plastici viene riciclato, mentre il 79% viene smaltito nelle discariche e il 12% incenerito [21]. A tal proposito, anche l'incenerimento dei rifiuti plastici risulta problematico e spesso non percorribile: sebbene efficace nel ridurre massa e volume delle plastiche, contribuisce al rilascio di sostanze nocive come diossine, monossido di carbonio e metalli pesanti mediante fumi e residui generati [18].

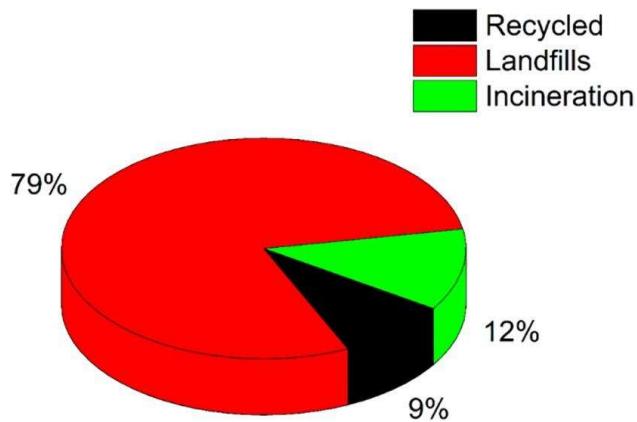


Figura 3: Gestione dei rifiuti plastici (fonte: Noor et al, 2022)

### 1.3.1. Criticità ambientali legate alla plastica

Le problematiche ambientali legate ai materiali plastici sono relative a tutto il loro ciclo di vita. Già la fase di produzione contribuisce in modo significativo alle emissioni, mentre le stesse qualità che ne hanno decretato il successo–resistenza e durabilità–ne ostacolano la gestione a fine vita, con tassi di riciclo ancora molto limitati a causa di vincoli tecnici [22].

I polimeri sintetici convenzionali sono definiti come materiali non biodegradabili, con stime che indicano una persistenza nell'ambiente fino a 4500 anni [23]. La loro struttura chimica li rende resistenti ai processi di degradazione microbica [24]: a differenza dei materiali biodegradabili, le plastiche convenzionali sono soggette a un processo di degradazione estremamente lento, che si protrae per secoli e che consiste principalmente in una frammentazione fisica. L'esposizione prolungata alla radiazione ultravioletta solare innesca processi di fotodegradazione, causando l'ossidazione e la scissione delle catene polimeriche. A questo processo si aggiunge la degradazione meccanica, ovvero l'abrasione fisica causata dall'azione di vento, onde, correnti e contatto con sedimenti, che contribuisce a erodere e

frantumare i detriti plastici più grandi. Infine, processi chimici come l'ossidazione e l'azione superficiale di comunità microbiche, ne indeboliscono ulteriormente la struttura, accelerando la disintegrazione. Il risultato inevitabile di questi processi è la formazione di microplastiche secondarie, definite come particelle polimeriche di dimensioni inferiori a 5 mm [25]. La riduzione dimensionale rende queste particelle biodisponibili per un'ampia gamma di organismi, facilitandone l'ingresso e la propagazione lungo l'intera catena alimentare [26]. In questo modo, la degradazione converte un rifiuto inerte e localizzato in un contaminante microscopico e ubiquitario, moltiplicandone il potenziale di danno ecologico.

Inoltre, la scomposizione di un oggetto macroscopico in milioni di frammenti microscopici aumenta in modo esponenziale l'area superficiale totale del materiale. Questo fenomeno non solo favorisce il rilascio di additivi chimici (lisciviazione), come i plastificanti utilizzati per aumentare la flessibilità e la lavorabilità della plastica, ma accresce anche la capacità delle microplastiche di adsorbire inquinanti dall'ambiente, trasformandole in veri e propri vettori di contaminanti [16, 24].

### ***1.3.2. Uso delle plastiche di riciclo nei conglomerati bituminosi***

A fronte dell'elevato impatto ambientale dei materiali polimerici e delle limitate possibilità di riciclo, il loro riutilizzo nelle infrastrutture stradali rappresenta una soluzione promettente per una gestione più sostenibile dei rifiuti plastici. L'opportunità nel settore stradale è unica: la costruzione e la manutenzione delle infrastrutture richiedono grandi volumi di materiali, e l'eventuale incorporazione dei rifiuti plastici offre benefici sia economici che ambientali.

I materiali polimerici possono essere implementati all'interno dei conglomerati bituminosi in diverse forme (granuli, pellet, scaglie, polveri, ecc.), essenzialmente attraverso due differenti modalità: il processo a umido (*wet*), e il processo a secco (*dry*). Il metodo *wet* prevede l'aggiunta di plastica sminuzzata o polverizzata direttamente nel legante bituminoso ad alte temperature (tipicamente circa 170 °C) [1]. In questa fase è necessaria una miscelazione meccanica mediante miscelatori ad alto taglio, così da ottenere un legante bituminoso omogeneo modificato con polimero (PmB), successivamente impiegato per confezionare il conglomerato con

gli aggregati [27]. Tale approccio consente di introdurre plastica dal 2% all’8% in peso rispetto al contenuto ottimale di bitume [28].

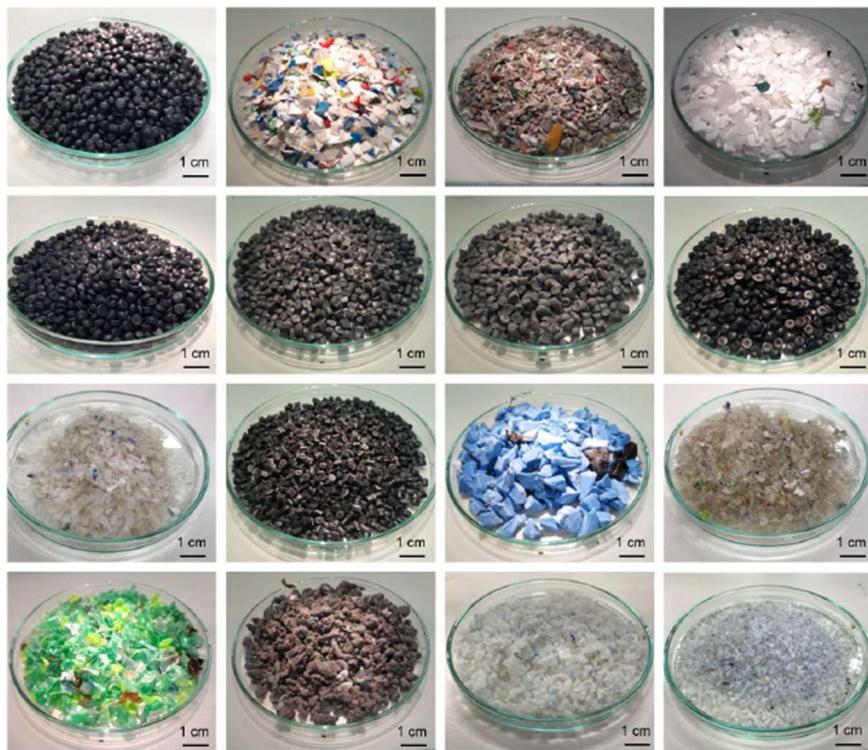


Figura 4: Diverse forme di materiali polimerici utilizzate nei conglomerati bituminosi (fonte: Austroads, 2021)

Il processo *wet* presenta tuttavia alcune criticità significative, dovute principalmente alla limitata compatibilità tra polimero e bitume, che rende necessario l’impiego di additivi chimici compatibilizzanti per migliorare l’adesione e prevenire la migrazione del polimero. La diversa densità dei due materiali riduce inoltre la stabilità allo stoccaggio, favorendo fenomeni di separazione di fase e compromettendo l’omogeneità del legante in assenza di agitazione continua [27]. L’impiego di high shear mixers e la necessità di gestire la stabilità allo stoccaggio contribuiscono a rendere l’implementazione delle plastiche tramite metodo *wet* più complessa e onerosa.

Nel metodo *dry* la plastica di scarto, tipicamente in forma di granuli, pellet o sminuzzata, viene mescolata direttamente agli aggregati caldi, prima dell’aggiunta del bitume. Si tratta di un processo più semplice ed economico, che non richiede attrezzature specifiche per la modifica del bitume. Permette di incorporare una quantità maggiore di plastica rispetto al processo a umido—tra lo 0.2% e il 6%

rispetto al peso degli aggregati [29], a seconda del tipo di plastica impiegata—e riduce i problemi di stoccaggio. Questo approccio può essere distinto in due varianti principali:

- *Approccio ibrido*: si utilizzano plastiche il cui punto di rammollimento è prossimo alle temperature di miscelazione (160-180 °C) o inferiore a queste. A contatto con la superficie calda degli inerti, il polimero fonde parzialmente, creando un sottile film che li riveste e agendo come modificatore della miscela e come sostituto parziale del bitume;
- *Approccio classico*: si utilizzano plastiche rigide e caratterizzate da un elevato punto di rammollimento, che non fondono alle temperature di processo. In questo caso, il materiale plastico non partecipa alla fase legante, ma sostituisce parte degli aggregati (tipicamente la frazione fine, come sabbia o filler).

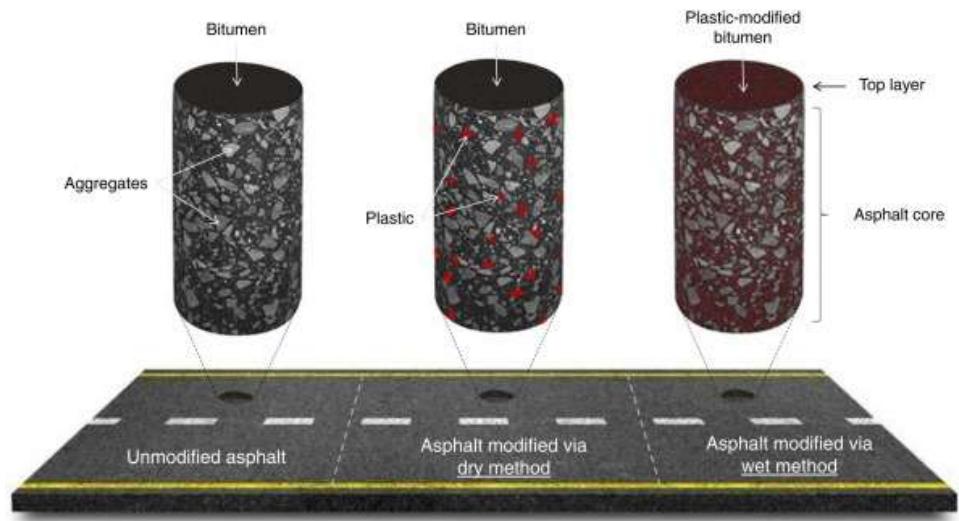


Figura 5: Metodi di modifica polimerica delle miscele (fonte: Enfrin et al, 2022)

Le proprietà dei materiali polimerici influenzano direttamente l'efficacia dell'integrazione delle plastiche riciclate nei conglomerati bituminosi e le prestazioni meccaniche ottenibili.

Il *melting point* (o meglio, l'intervallo di fusione) rappresenta il parametro più rilevante nella scelta del metodo di integrazione: plastiche a basso punto di fusione tendono a fondere a temperature vicine a quelle di miscelazione, risultando ideali per il processo *wet* o *ibrido* [30]. Al contrario, plastiche ad alto punto di fusione

non fondono completamente e agiscono principalmente come sostituti parziali degli aggregati, risultando più adatte al metodo *dry* [31].

<b>Tipo di Plastica</b>	<b>Sigla</b>	<b>Densità (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Intervallo di Fusione (°C)</b>
Polietilene a Bassa Densità	LDPE	0.91 - 0.94	105 - 115
Polietilene ad Alta Densità	HDPE	0.94 - 0.97	120 - 130
Polietilene Tereftalato	PET	1.38 - 1.39	250 - 260
Polipropilene	PP	0.90 - 0.92	130 - 171
Cloruro di Polivinile	PVC	1.30 - 1.58	100 - 260

*Tabella 2: Densità e intervalli di fusione dei principali tipi di plastica*

Il grado di cristallinità, strettamente correlato al punto di fusione, influisce sulla rigidezza del polimero. Una cristallinità elevata conferisce maggiore resistenza alla deformazione plastica (ormaiamento), ma aumenta la fragilità del legante, rendendo la pavimentazione più suscettibile alla fessurazione a basse temperature [32].

Il Melt Flow Index (MFI) misura la facilità di scorrimento di un polimero fuso ed è inversamente correlato alla sua viscosità e al peso molecolare. Valori bassi di MFI indicano polimeri ad alta viscosità e con peso molecolare elevato, che incrementano la rigidezza del bitume e la resistenza all'ormaiamento, ma riducono la lavorabilità della miscela [33]. Valori elevati di MFI corrispondono invece a polimeri più fluidi e facilmente disperdibili nel bitume, sebbene il contributo all'aumento della rigidezza risulti più limitato [34].

La dimensione delle particelle plastiche determina l'omogeneità della miscela finale: particelle più piccole hanno una maggiore area superficiale, facilitando l'interazione con il legante bituminoso e garantendo una dispersione più uniforme. Particelle di dimensioni maggiori possono ridurre l'omogeneità, intrappolare aria e diminuire la densità finale del conglomerato.

Infine, la densità della plastica influisce in modo diverso a seconda del metodo di integrazione. Nel processo *wet*, come già accennato, la differenza di densità con il bitume può provocare separazione di fase durante lo stoccaggio a caldo, rendendo necessaria l'agitazione continua o l'impiego di compatibilizzanti. Nel processo *dry*, invece, una densità inferiore rispetto agli aggregati riduce la massa volumica del conglomerato finito, con potenziali benefici in termini di costi di trasporto [35].

### ***1.3.3. Aspetti ambientali ed economici e riciclabilità futura delle miscele bituminose sostenibili***

L'integrazione di RAP e plastiche di riciclo nella realizzazione di conglomerati bituminosi sostenibili comporta significativi vantaggi sia ambientali sia economici. Dal punto di vista ambientale, numerosi studi basati su analisi del ciclo di vita (LCA) evidenziano riduzioni consistenti delle emissioni di gas serra (fino al 29-37%), del consumo energetico (fino al 36% con l'uso di RAP, con ulteriori potenziali risparmi derivanti dall'impiego di plastiche) e del consumo di acqua, oltre a una drastica diminuzione del ricorso a materie prime vergini e del conferimento di rifiuti in discarica [35, 36].

Sul piano economico, i principali benefici derivano dalla riduzione dei costi per l'acquisto di materiali vergini e per l'energia necessaria alla loro produzione. Le analisi Life Cycle Cost Analysis (LCCA) confermano che un maggiore contenuto di RAP abbassa i costi di produzione, con risparmi che possono arrivare dal 14% al 30% se si integra anche plastica riciclata [36, 37]. Tuttavia, la sostenibilità economica a lungo termine dipende strettamente dalle prestazioni della pavimentazione: l'aumento della fragilità associato a elevate percentuali di RAP può incrementare i costi di manutenzione, rendendo essenziale una corretta progettazione per garantire una durabilità adeguata.

Per quanto riguarda la riciclabilità futura, gli studi disponibili indicano che le pavimentazioni modificate con plastica possono essere a loro volta riciclate senza un degrado significativo delle proprietà meccaniche [39]. Ciononostante, questa potenzialità necessita di una validazione su larga scala e a lungo termine.

Infine, il potenziale rilascio di microplastiche rappresenta una delle più recenti e rilevanti preoccupazioni legate all'impiego di materiali polimerici riciclati nelle pavimentazioni stradali. L'abrasione dovuta al traffico veicolare e il degrado superficiale causato dagli agenti atmosferici possono favorire la dispersione di microplastiche nell'ambiente. Studi preliminari indicano che la quantità di particelle rilasciate dipenda da fattori quali temperatura, acidità delle acque, caratteristiche del traffico e, in misura determinante, dal metodo di integrazione della plastica nella miscela. In particolare, Enfrin et al. hanno evidenziato come il processo *wet*, che comporta integrazione diretta della plastica nella matrice

bituminosa e dunque una maggiore esposizione negli strati superficiali della pavimentazione, possa determinare un rilascio precoce di microplastiche rispetto al processo *dry*, nel quale le particelle plastiche, di dimensioni maggiori, risultano fisicamente intrappolate tra gli aggregati [40].

## 2. IL FENOMENO DELLA FATICA NEI CONGLOMERATI BITUMINOSI

### 2.1. *Introduzione*

Il fenomeno della fatica rappresenta una delle principali cause di ammaloramento e cedimento strutturale delle pavimentazioni stradali flessibili e semi-rigide. Esso si manifesta attraverso un processo di danneggiamento progressivo e cumulativo, indotto dalla ripetuta applicazione dei carichi veicolari, che culmina nella formazione e propagazione di fessure all'interno degli strati legati a bitume. Sebbene le singole sollecitazioni applicate dal traffico siano di entità sensibilmente inferiore alla resistenza a rottura del materiale, la loro ripetizione ciclica innesca un degrado irreversibile che riduce la rigidezza e limita la vita utile della pavimentazione. La manifestazione visibile di questo degrado è la comparsa di una maglia fessurativa sulla superficie della pavimentazione, spesso descritta come "pelle di coccodrillo" (*alligator cracking*), che compromette la funzionalità e l'integrità strutturale, apre la via all'infiltrazione di agenti atmosferici e accelerando il decadimento degli strati sottostanti.

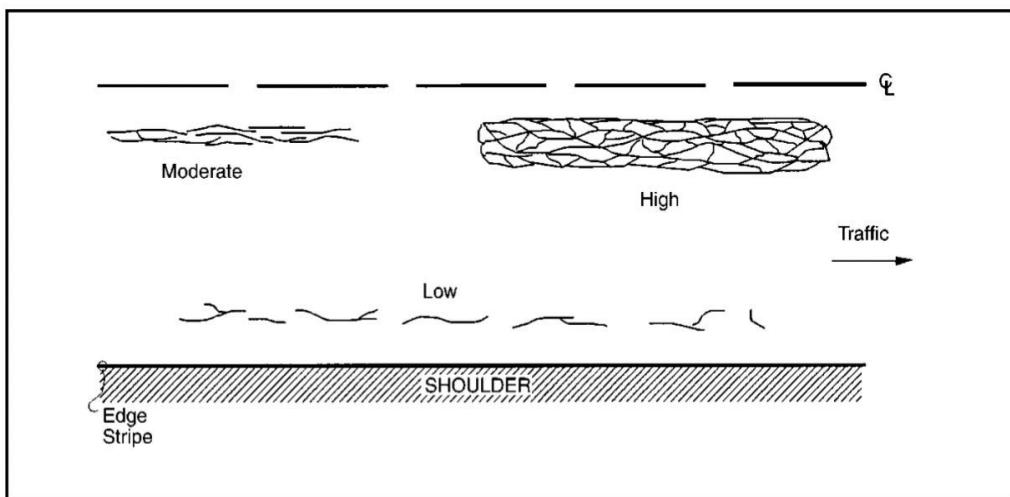


Figura 6:Fessurazione per fatica (fonte: *Distress Identification Manual - FHWA, 2014*)

È importante distinguere la fatica indotta dai carichi di traffico da altre forme di fessurazione, come la fessurazione termica. Quest'ultima è causata non dai carichi, ma dalle tensioni interne generate da variazioni di temperatura, che possono manifestarsi come fessurazione da basse temperature (*low-temperature cracking*) per contrazione impedita o come fatica termica (*thermal-fatigue cracking*) a seguito di cicli periodici di riscaldamento e raffreddamento. Sebbene entrambe le tipologie di degrado portino alla perdita di integrità della pavimentazione, i meccanismi fisici alla base sono distinti e richiedono approcci di modellazione e analisi specifici.

## 2.2. *Il comportamento visco-elastico dei conglomerati bituminosi*

A differenza dei materiali puramente elastici, i quali rispondono istantaneamente a un carico e recuperano completamente la loro forma una volta rimosso (restituendo tutta l'energia di deformazione spesa), i conglomerati bituminosi ereditano dalla matrice legante un comportamento di tipo visco-elastico. Ciò implica che la loro risposta meccanica (deformazione) a una sollecitazione applicata dipende non solo dall'intensità del carico, ma anche dalla frequenza di applicazione e dalla temperatura di esercizio.

In condizioni di carico ciclico, come quelle imposte dal traffico, questo comportamento si traduce in uno sfasamento temporale tra il picco della sollecitazione applicata e il picco della deformazione risultante. Tale sfasamento è quantificato dall'angolo di fase ( $\delta$ ), un parametro che misura il ritardo della risposta deformativa rispetto alla sollecitazione.

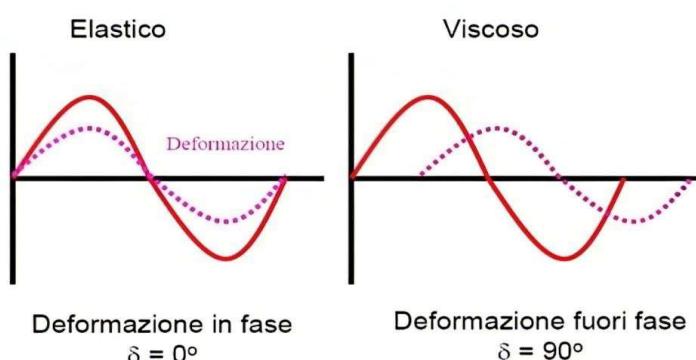


Figura 7: Differenza tra risposta elastica e visco-elasticità

Un angolo di fase nullo ( $\delta=0^\circ$ ) corrisponde a un comportamento puramente elastico, in cui sollecitazione e deformazione sono in fase. Un angolo di fase di  $90^\circ$  indica un comportamento puramente viscoso, tipico di un fluido. I conglomerati bituminosi si collocano in una posizione intermedia, con valori di  $\delta$  che variano in funzione delle condizioni operative.

La rigidezza del materiale in regime dinamico è descritta dal modulo complesso ( $E^*$ ), definito come il rapporto tra la sollecitazione imposta e la conseguente deformazione. Il modulo complesso può essere rappresentato come un vettore nel piano complesso, e scomposto pertanto nella sua parte reale, o *modulo di conservazione*,  $E_1 = |E^*| \cdot \sin \delta$ , che rappresenta la componente elastica (energia immagazzinata e recuperata in un ciclo), e nella sua parte immaginaria, o *modulo di dissipazione*,  $E_2 = |E^*| \cdot \cos \delta$ , che rappresenta la componente viscosa (energia dissipata, principalmente in calore, in un ciclo).

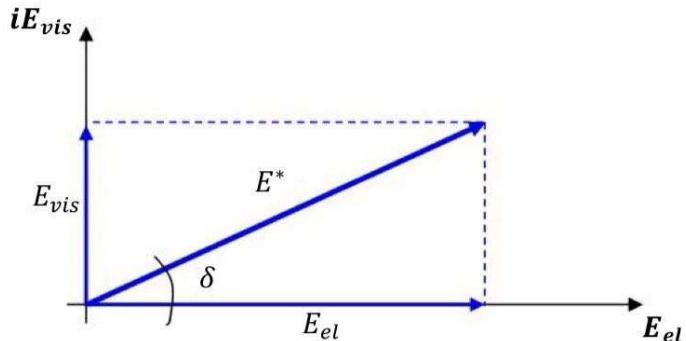


Figura 8: Rappresentazione del modulo complesso

La dipendenza dalla temperatura e dalla frequenza è cruciale [41]:

- A basse temperature o alte frequenze (traffico veloce), il bitume si comporta in modo più rigido e fragile. Il materiale ha meno tempo per fluire, la risposta è dominata dalla componente elastica, il modulo è elevato e l'angolo di fase è basso;
- Ad alte temperature o basse frequenze (traffico lento o fermo), il bitume rammollisce. La componente viscosa diventa predominante, il modulo si riduce e l'angolo di fase aumenta, indicando una maggiore capacità di dissipare energia.

Questa natura viscoelastica è alla base del meccanismo di fessurazione per fatica: l'energia di deformazione dissipata in ogni ciclo di carico, rappresentata dall'area del ciclo di isteresi tensione-deformazione, non è interamente convertita in calore, ma una sua frazione contribuisce all'accumulo di un danno microstrutturale permanente che, ciclo dopo ciclo, porta alla degradazione del materiale.

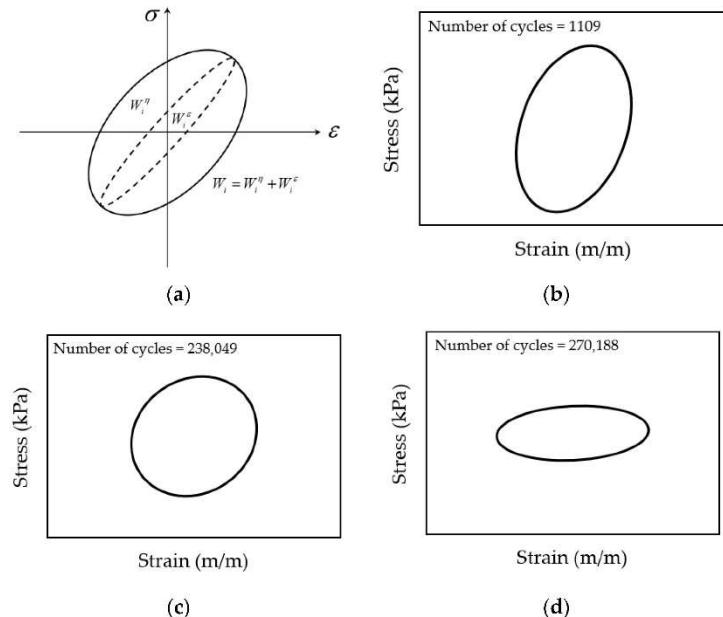


Figura 9: Distorsione dei cicli isteretici dovuta a fatica (fonte: Xu et al, 2025)

### 2.3. Fessurazione per fatica degli strati in conglomerato bituminoso

Il cedimento per fatica non è un evento istantaneo, ma un processo evolutivo che, secondo i principi della meccanica della frattura, può essere suddiviso in tre fasi distinte [42]:

1. Innesco della fessura (*Crack Initiation*): fase iniziale in cui si assiste alla nucleazione di microfrazioni. Sotto l'azione dei carichi ciclici si generano deformazioni plastiche localizzate a livello microscopico, che tendono a concentrarsi in corrispondenza di punti di debolezza intrinseca del materiale, quali i pori, l'interfaccia tra aggregati e mastice bituminoso (legante e filler), o all'interno della stessa matrice legante. L'accumulo

progressivo di tali deformazioni determina la formazione di microfratture, generalmente di dimensioni comparabili a quelle degli aggregati fini;

2. Propagazione stabile della fessura (*Stable Crack Propagation*): in questa fase le microfratture tendono a coalescere e a propagarsi nel conglomerato, dando origine a macro-fratture. In questa fase la crescita della fessura avviene in maniera stabile e controllata, accompagnata da una progressiva, pressoché lineare, riduzione della rigidezza macroscopica del materiale.
3. Propagazione instabile e rottura finale: quando la macro-frattura raggiunge una dimensione critica, la sezione resistente residua del materiale diventa insufficiente a sopportare il carico applicato. La propagazione diventa instabile e accelera rapidamente, portando al collasso finale del provino o dell'elemento strutturale. Questa fase è tipicamente molto breve rispetto alle due precedenti e corrisponde a una caduta drastica della rigidezza.

Nelle pavimentazioni flessibili o semi-rigide, i meccanismi di innescio e propagazione descritti possono manifestarsi secondo diverse modalità, dando origine a differenti morfologie di fessurazione:

- Fessurazione dal basso (*Bottom-Up Cracking*): i carichi veicolari inducono una flessione degli strati bituminosi, che genera tensioni di compressione nella parte superiore e tensioni di trazione alla base dello strato. Poiché i conglomerati bituminosi sono molto meno resistenti a trazione che a compressione, le fessure si innescano alla base dello strato legato (tipicamente alla base dello strato di collegamento) e si propagano verticalmente verso l'alto. Una volta raggiunta la superficie, queste fessure si interconnettono, creando il già citato quadro fessurativo a reticolo (*alligator cracking*), sintomo di un avanzato stato di degrado strutturale. L'analisi di questo meccanismo giustifica l'importanza di limitare la deformazione di trazione orizzontale alla base degli strati bituminosi nei metodi di progettazione meccanicistica;
- Fessurazione dall'alto (*Top-Down Cracking*): consiste in crepe longitudinali che si innescano sulla superficie della pavimentazione, solitamente ai bordi dell'area di contatto dello pneumatico, e si propagano verso il basso. I meccanismi che la governano sono complessi e ancora oggetto di dibattito

scientifico. Le cause principali sono riconducibili alle elevate sollecitazioni di taglio, generate in superficie dalla complessa distribuzione delle pressioni di contatto dei moderni pneumatici radiali a carcassa rigida. L'invecchiamento ossidativo del bitume nello strato di usura, che lo rende più rigido e fragile, è un altro fattore che contribuisce in modo significativo all'innesto di questo tipo di fessurazione;

- Fessurazione per riflessione (*Reflective Cracking*): questo tipo di ammaloramento non è legato in senso stretto al fenomeno della fatica, ma si tratta piuttosto della propagazione di una discontinuità preesistente. Si verifica quando un nuovo strato di conglomerato bituminoso viene steso sopra una pavimentazione esistente (bituminosa o in calcestruzzo) che presenta già delle fessure o dei giunti. I movimenti relativi dei lembi della fessura sottostante (dovuti a variazioni termiche o ai carichi) inducono una concentrazione di sforzi nel nuovo strato, che porta all'innesto di una nuova fessura esattamente in corrispondenza di quella vecchia. Questa nuova crepa si propaga "riflettendo" quella sottostante fino a raggiungere la superficie.

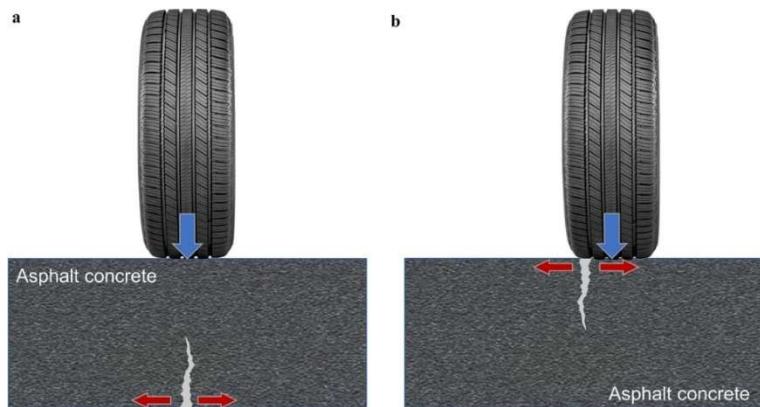


Figura 10: Bottom-up e Top-down cracking (fonte: Bessa et al, 2022)

La comprensione di questi meccanismi fisici fornisce la base teorica per lo sviluppo e l'interpretazione delle prove di laboratorio. Ad esempio, il meccanismo di *bottom-up cracking* è la ragione principale per cui le prove di flessione, che inducono uno stato di trazione controllato, sono considerate tra le più rappresentative per la caratterizzazione a fatica dei conglomerati bituminosi. La

flessione di una pavimentazione flessibile indotta dai carichi veicolari genera uno stato tensionale di trazione alla base degli strati legati: di conseguenza, per studiare in laboratorio il fenomeno che governa la vita utile della pavimentazione, è necessario replicare questo stato di sollecitazione. La prova di flessione su quattro punti (4PB) è stata progettata proprio per questo scopo: nella zona centrale del provino si genera un momento flettente costante, che, in condizioni di prova ideali, induce uno stato di trazione uniaxiale uniforme alla base del provino, simulando le condizioni critiche che si verificano in opera e permettendo una caratterizzazione affidabile della resistenza a fatica del materiale.

Infine, è importante sottolineare come la resistenza a fatica di un conglomerato bituminoso risulti inversamente correlata al suo contenuto di vuoti d'aria: all'aumentare della percentuale di vuoti, la vita a fatica del materiale tende infatti a diminuire [43].

Ciò è dovuto alla concomitanza di diversi fattori: in primo luogo, i vuoti presenti all'interno della matrice rappresentano punti di discontinuità e di debolezza, nei quali le tensioni tendono a concentrarsi quando il materiale è sottoposto ai carichi ciclici del traffico. Tale concentrazione di sforzi accelera l'innesto e la successiva propagazione delle microfessure, che nel tempo tendono a coalescere dando origine a danni macroscopici. A questo fenomeno si somma la riduzione dell'area resistente: un contenuto di vuoti più elevato comporta infatti, a parità di volume, una minore sezione efficace, con la conseguenza che il conglomerato raggiunge più rapidamente il proprio limite di resistenza [44].

I vuoti, inoltre, soprattutto se interconnessi, agevolano la penetrazione di aria e acqua all'interno della miscela, accelerando i processi di degrado. L'ossigeno promuove l'ossidazione del legante, rendendolo progressivamente più rigido e fragile e quindi meno capace di sopportare deformazioni ripetute senza fessurarsi [45]. L'acqua, d'altro canto, può compromettere l'adesione tra legante e aggregati attraverso il fenomeno dello *stripping* (separazione del film di bitume dalla superficie dell'aggregato), indebolendo ulteriormente l'integrità strutturale della miscela e rendendola più vulnerabile ai danneggiamenti [46].

## 2.4. Approccio fenomenologico alla determinazione della vita a fatica

L'approccio fenomenologico rappresenta il metodo classico per la caratterizzazione della fatica nei conglomerati bituminosi, nonché quello impiegato nella campagna sperimentale oggetto del presente lavoro di tesi. Tale approccio si concentra sulla descrizione del comportamento a livello macroscopico, mettendo in relazione una grandezza meccanica di input, rappresentativa del livello di sollecitazione, con il risultato finale, ovvero il numero di cicli di carico che il materiale può sopportare prima di raggiungere un criterio di rottura predefinito. Non si addentra nell'analisi dei meccanismi microscopici di danneggiamento, ma si basa su correlazioni empiriche derivate da prove di laboratorio.

Il fulcro di questo approccio è la legge di Wöhler, o più comunemente "*legge di fatica*", che esprime matematicamente la relazione tra l'ampiezza della deformazione iniziale applicata e il numero di cicli a rottura. La relazione assume tipicamente la forma di una legge di potenza:

$$N_f = k_\varepsilon \left( \frac{1}{\varepsilon_0} \right)^{n_\varepsilon},$$

dove:

- $N_f$  è il numero di cicli a rottura (vita a fatica);
- $\varepsilon_0$  è l'ampiezza della deformazione di trazione iniziale applicata al provino. In alternativa, si può utilizzare la sollecitazione iniziale  $\sigma_0$ ;
- $k_\varepsilon$  e  $n_\varepsilon$  sono parametri del materiale, determinati sperimentalmente tramite regressione dei dati ottenuti da prove di fatica condotte a diversi livelli deformativi.

Applicando il logaritmo a entrambi i membri dell'equazione, si ottiene una relazione lineare:

$$\log N_f = \log k_\varepsilon - n_\varepsilon \log \varepsilon_0.$$

Questa linearizzazione è molto utile dal punto di vista pratico, poiché permette di rappresentare i dati sperimentali in un diagramma bi-logaritmico, dove la

relazione tra deformazione e vita a fatica appare come una retta, definita "*retta di fatica*".

I parametri della legge di Wöhler rappresentano dunque l'intercetta e la pendenza della retta di fatica e, pur essendo empirici, possiedono un significato fisico interpretabile. L'intercetta ( $k_\epsilon$ ) è legata alla resistenza del materiale: a parità di deformazione, una retta posizionata più in alto indica una maggiore vita a fatica. La pendenza ( $n_\epsilon$ ) è invece un indicatore della sensibilità del materiale al livello di carico: un valore assoluto della pendenza più basso indica che la vita a fatica è meno influenzata da variazioni del livello deformativo. Materiali con questo comportamento sono considerati più "tolleranti al danno", poiché anche importanti variazioni del livello deformativo causano una riduzione relativamente contenuta della vita a fatica. Tipicamente, i conglomerati con bitumi modificati con polimeri, che possiedono maggiore duttilità e capacità di dissipare energia, mostrano pendenze più piatte rispetto ai conglomerati con bitumi tradizionali, indicando una superiore resistenza alla propagazione delle fessure.

Le prove di laboratorio per determinare la vita a fatica possono essere eseguite secondo due modalità di controllo principali, che simulano condizioni strutturali differenti e forniscono risposte diverse del materiale:

- Prove in controllo di deformazione (*Strain-Controlled*): in questa modalità viene imposta al provino un'ampiezza di deformazione costante per tutta la durata del test. Con l'applicazione dei cicli di carico, il materiale si danneggia e la sua rigidezza diminuisce. Di conseguenza, la tensione richiesta per mantenere l'ampiezza di deformazione costante si riduce progressivamente nel tempo. Questa modalità di prova è considerata rappresentativa del comportamento di pavimentazioni relativamente sottili e flessibili, per le quali la deformazione negli strati bituminosi è governata principalmente dalla rigidezza degli strati di fondazione sottostanti;
- Prove a controllo di carico (*Stress-Controlled*): In questo caso, ad essere mantenuta costante è l'ampiezza della tensione applicata al provino. Le deformazioni risultanti aumentano pertanto ad ogni ciclo, man mano che il materiale si danneggia e perde rigidezza. Questo processo porta a una rottura finale tipicamente più rapida e fragile rispetto alla modalità a

deformazione controllata. Questa modalità è più indicata per simulare il comportamento di pavimentazioni spesse e rigide, dove la risposta strutturale è dominata dalla rigidezza degli strati bituminosi stessi.

È importante sottolineare che, a parità di livello tenso-deformativo iniziale, la vita a fatica risulta sistematicamente più lunga nelle prove a deformazione controllata rispetto a quelle a tensione controllata. Di conseguenza, i parametri della legge di fatica ottenuti con le due modalità non sono direttamente confrontabili e la scelta della modalità di prova dovrebbe essere guidata dalla tipologia di struttura che si intende modellare.

Nonostante la sua diffusa applicazione storica, l'approccio fenomenologico presenta limiti concettuali significativi. Il limite principale è la mancanza di universalità: i parametri della legge di fatica ( $k_\epsilon$  e  $n_\epsilon$ ) non sono proprietà intrinseche del materiale, ma dipendono fortemente dalle condizioni di prova: la modalità di carico (tensione o deformazione controllata), la geometria del provino (es. flessione su trave o trazione indiretta su cilindro), la temperatura e la frequenza di applicazione del carico. Ricerche comparative inter-laboratorio hanno dimostrato in modo inequivocabile che le prestazioni a fatica di un medesimo conglomerato risultano diverse se testate con metodi differenti [47].

Questa dipendenza implica che non è possibile trasferire direttamente i risultati ottenuti con un tipo di prova per prevedere il comportamento in un'altra configurazione, né tantomeno per predire in modo accurato la vita a fatica della pavimentazione in opera. Per colmare questo divario tra laboratorio e realtà, i metodi di progettazione basati su questo approccio richiedono l'introduzione di fattori di traslazione empirici (*shift factors*), che possono variare anche di un ordine di grandezza e che rappresentano una delle maggiori fonti di incertezza nella progettazione delle pavimentazioni.

Inoltre, l'approccio fenomenologico non fornisce informazioni sui meccanismi fisici che governano il danneggiamento e non è in grado di modellare fenomeni complessi come l'autoriparazione (*self-healing*) che avviene durante i periodi di riposo tra i passaggi dei carichi. Queste criticità hanno spinto la comunità scientifica a sviluppare modelli più robusti e fisicamente fondati, in grado di fornire una caratterizzazione del materiale che sia indipendente dalle condizioni di prova.

## 2.5. *Criteri di rottura*

La determinazione della vita a fatica in una prova di laboratorio richiede l'individuazione di un *criterio di rottura*, inteso come un indicatore misurabile che consenta di identificare l'apertura della macro-cricca e, di conseguenza, la conclusione della prova. La scelta di tale criterio influisce in maniera diretta sui risultati sperimentali. Nella campagna sperimentale oggetto del seguente lavoro di tesi sono stati adottati i due criteri principali: quello convenzionale, basato sulla riduzione del 50% del modulo iniziale, e quello dell'*Energy Ratio*, correlato all'energia dissipata.

### 2.5.1. *Riduzione del 50% del modulo iniziale*

Tale criterio definisce la vita a fatica ( $N_f$ ) come il numero di cicli di applicazione del carico necessari a causare una riduzione del modulo di rigidezza del provino al 50% del suo valore iniziale. Il valore di rigidezza iniziale viene convenzionalmente misurato dopo alcuni cicli di condizionamento (ad esempio, al centesimo ciclo) per escludere gli effetti di assestamento iniziale del materiale.

Si tratta del metodo più diffuso e tradizionalmente adottato, in quanto di semplice implementazione. Tuttavia, dal punto di vista scientifico, esso presenta importanti limitazioni: la scelta del 50% è puramente arbitraria e non corrisponde necessariamente a un evento fisico specifico nel processo di danneggiamento, come la formazione di una macro-fessura visibile o il collasso imminente del provino. Rappresenta semplicemente un punto convenzionale lungo la curva di degradazione della rigidezza. Studi approfonditi hanno dimostrato che, al raggiungimento di questo livello di degrado, il materiale ha già subito un significativo processo di microfessurazione diffusa, ma la coalescenza in una macro-fessura dominante potrebbe non essere ancora avvenuta [42, 43].

### 2.5.2. *Criterio dell'Energy Ratio (ER)*

L'ipotesi di base di tale criterio è che il processo di danneggiamento per fatica sia intrinsecamente legato all'energia che viene dissipata all'interno del materiale ad ogni ciclo di applicazione del carico. L'energia dissipata corrisponde all'area

racchiusa dal ciclo di isteresi nel diagramma tensione-deformazione ed è una misura del lavoro meccanico che non viene recuperato elasticamente, ma viene convertito in altre forme, principalmente calore e danno microstrutturale.

Questo criterio analizza l'evoluzione di un parametro adimensionale, l'Energy Ratio, definito come il seguente rapporto:

$$W_n = \frac{n(\pi\sigma_0\epsilon_0 \sin \delta_0)}{\sigma_n\epsilon_n \sin \delta_n} = \frac{nw_0}{w_n},$$

dove:

- $n$  è il numero di cicli;
- $\sigma_0$  e  $\sigma_n$  sono rispettivamente la tensione applicata al primo ciclo e al ciclo  $n$ -esimo;
- $\epsilon_0$  e  $\epsilon_n$  sono rispettivamente l'ampiezza della deformazione al ciclo iniziale e al ciclo  $n$ -esimo;
- $w_0$  è l'energia dissipata al primo ciclo;
- $w_n$  è l'energia dissipata all' $n$ -esimo ciclo.

Ricordando che  $\sigma = E^* \epsilon$ , dalla precedente relazione si ricava pertanto che:

- $W_n = \frac{nE_0^*}{E_n^*}$ , per prove in regime di controllo di deformazione;
- $W_n = \frac{nE_n^*}{E_0^*}$ , per prove in regime di controllo di carico.

Tracciando l'andamento dell'energia dissipata in funzione del numero di cicli, si osserva tipicamente una fase iniziale pressoché lineare, seguita da una deviazione significativa rispetto a tale andamento. Il punto in cui la curva si discosta in modo evidente dal tratto rettilineo iniziale segna l'avvio della propagazione della macrofessura. Nelle prove a carico controllato (stress-controlled), l'ampiezza del carico rimane, per definizione, costante e, dopo l'innesto della cricca, la tensione al suo apice cresce rapidamente. Di conseguenza, il cambio di pendenza della curva dell'energia dissipata può essere agevolmente individuato in corrispondenza del picco dell'Energy Ratio.

Nelle prove a controllo di deformazione l'individuazione di questa condizione è più complessa, ma (come dimostrato da Rowe e Bouldin, 2000), può essere ottenuta applicando la stessa procedura di analisi prevista per il metodo a controllo di carico [50].

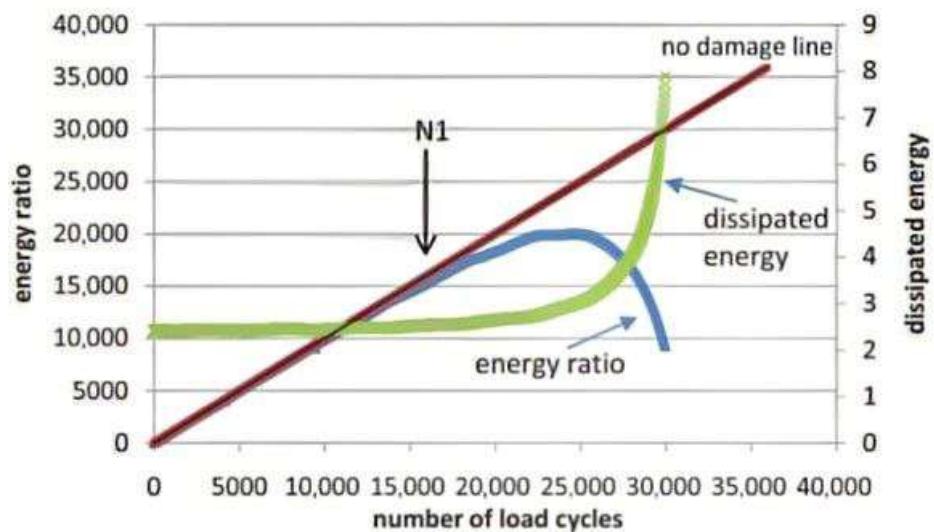


Figura 11: Criterio dell'Energy Ratio in regime di stress-control (fonte: Xu et al, 2025)

## 3. CAMPAGNA SPERIMENTALE

### 3.1. *Obiettivi ed inquadramento del lavoro*

Il Decreto Ministeriale del 5 agosto 2024, che ha introdotto i nuovi *Criteri ambientali minimi (CAM) per l'affidamento del servizio di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione delle infrastrutture stradali*, stabilisce che l'utilizzo di materiali recuperati o riciclati non debba incidere negativamente sugli aspetti prestazionali e funzionali della pavimentazione. Risulta pertanto necessario garantire prestazioni equivalenti a quelle ottenibili con materiali di primo impiego.

Scopo principale del presente lavoro di tesi è la valutazione dell'impatto sulle prestazioni meccaniche, in particolare sulla resistenza a fatica, derivante dall'impiego, all'interno della miscela bituminosa, di RAP e di un compound polimerico a base di plastiche dure tecno-selezionate riciclate, introdotto con metodologia *dry* e approccio *ibrido*.

A tal fine è stato eseguito un confronto tra cinque diverse miscele mantenendo costante il contenuto di vuoti - parametro che, come discusso nel capitolo precedente, influenza sulla resistenza a fatica - al fine di escludere tale variabile dalla valutazione.

Le miscele prodotte, tutte rappresentative di uno strato di collegamento (AC 16), sono le seguenti:

- ACR Sp\_20: contenente il 20% di RAP (bianco sul peso degli aggregati) e compound polimerico, implementato con approccio “ibrido” allo 0,5% sul peso della miscela;
- ACR Pmb\_20: contenente il 20% di RAP e PmB;
- ACR Ref\_20: contenente il 20% di RAP e bitume tal quale, priva di compound polimerico. Tale miscela di riferimento non presenta modifiche alla fase legante in modo tale da isolare il contributo del fresato, scindendolo dal ruolo delle plastiche;

- ACR Sp \_50: contenente il 50% di RAP (bianco sul peso degli aggregati) e compound polimerico implementato con approccio “ibrido” allo 0,5% sul peso della miscela;
- ACR PmB\_50: contenente il 50% di RAP (bianco sul peso degli aggregati) PmB.

La resistenza a fatica è stata valutata su provini confezionati con le suddette miscele mediante tre diverse configurazioni di prova, in conformità a quanto riportato nella norma EN 12697-24 [51]:

- 4PB-PR: prova di flessione a quattro punti in controllo di deformazione, eseguita su provini prismatici (frequenza di 10 Hz);
- IT-CY: prova di trazione indiretta in controllo di tensione su provini cilindrici, con periodo di riposo (frequenza di 2 Hz);
- CIT-CY: prova di trazione indiretta in controllo di tensione su provini cilindrici, senza periodo di riposo (frequenza di 10 Hz).

### 3.2. *I materiali*

Per la realizzazione delle miscele oggetto del seguente studio, sono stati impiegati aggregati vergini, filler, RAP, bitume tal quale e bitume PmB, tutti forniti dall’impianto Bitux S.p.A., nonché un additivo rigenerante (Iterlene ACF 2000 green) e un compound polimerico in forma di granuli (SuperPlastEco), forniti dall’azienda Iterchimica S.p.A.

#### 3.2.1. *Gli aggregati vergini e il RAP*

Le classi granulometriche degli aggregati vergini impiegate per la realizzazione delle miscele, rappresentative di uno strato di collegamento standard (AC16), sono state selezionate in accordo alle specifiche tecniche riportate nei principali capitolati speciali d’appalto (CSA) italiani:

- Sabbia 0/5 mm;
- Pietrisco 8/16 mm;
- Pietrisco 16/20 mm;
- Filler < 0.063 mm.

In precedenti studi [3], gli aggregati sono stati sottoposti a caratterizzazione preliminare, comprendente l'analisi granulometrica e la determinazione della massa volumica apparente, eseguite rispettivamente secondo le norme EN 933-1 [52] ed EN 1097-6 [53].

Il RAP è stato ricavato da operazioni di demolizione e fresatura della pavimentazione, giunta al termine della sua vita utile, di un'autostrada situata nell'Italia nord-occidentale.

In particolare, il fresato è stato ottenuto mediante scarifica degli strati di base, collegamento e usura della pavimentazione, risultando quindi in un RAP "misto". Per garantire l'omogeneità richiesta, come già specificato nel primo capitolo, il fresato è stato pertanto sottoposto a un processo di frantumazione e successivamente vagliato in due frazioni granulometriche (RAP 0/12 e RAP 0/20).

Analogamente [3], il contenuto legante di entrambe le frazioni è stato determinato mediante la prova di ignizione, ai sensi della norma EN 12697-39 [54]. I risultati hanno evidenziato un contenuto di bitume pari al 4,15% in peso sull'aggregato per RAP 0/12 e al 5,45% in peso sull'aggregato per RAP 0/20. L'aggregato recuperato dal processo di ignizione è stato successivamente caratterizzato per ottenere la distribuzione granulometrica e la massa volumica apparente, secondo le medesime procedure normative richiamate in precedenza.

Di seguito si riportano le curve granulometriche e i valori di massa volumica apparente degli aggregati e del RAP.

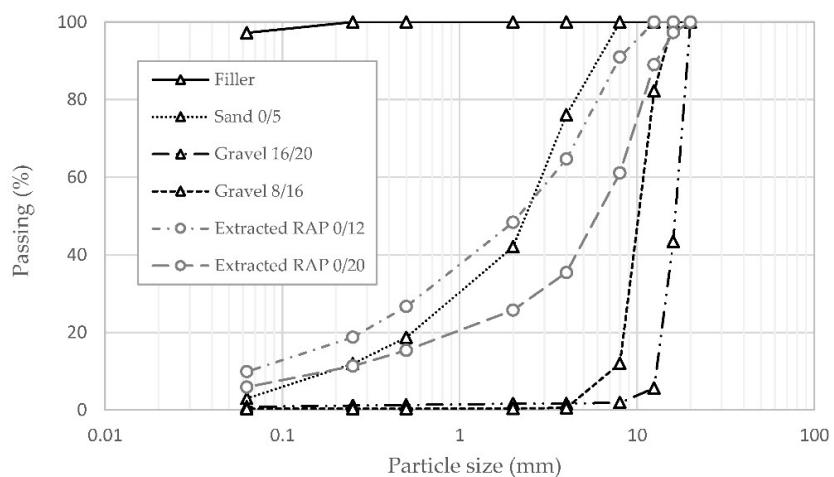


Figura 12: Distribuzione granulometrica di aggregati e RAP (fonte: La Macchia et al, 2024 [3])

Apparent Specific Gravity $\rho_{mv}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	
Sand 0/5	2.780
Gravel 8/16	2.849
Gravel 16/20	2.813
Extracted RAP 0/12	2.765
RAP 0/12	2.538
Extracted RAP 0/20	2.774
RAP 0/20	2.587

Tabella 3: Densità apparente di aggregati e RAP (fonte: La Macchia et al, 2024 [3])



Figura 13: Classi granulometriche aggregati vergini



Figura 14: RAP e compound polimerico

### 3.2.2. Il bitume

Per la realizzazione delle miscele sono stati impiegati due differenti tipi di legante bituminoso:

- Un bitume tal quale, con grado di penetrazione 50/70, classificato ai sensi della norma EN 12591 [55], impiegato nelle miscele in cui il compound polimerico è stato implementato in modalità “ibrida”;
- Un bitume modificato con polimero SBS (copolimero a blocchi stirene-butadiene-stirene), classificato come PmB 45/80–70 secondo lo standard EN 14023 [56].

I leganti utilizzati sono stati sottoposti a caratterizzazione prestazionale ed empirica nell’ambito del progetto di ricerca all’interno del quale si inserisce il presente studio [3]. I Performance Grades (PG), determinati secondo il sistema di classificazione Superpave (AASHTO M323-22) [57], insieme ai valori di penetrazione (EN 1426) [58] e punto di rammollimento (EN 1427) [59], sono riportati nella seguente tabella.

Legante	Performance Grade	Penetrazione a 25°C [dmm]	Punto di Rammollimento [°C]
Bitume 50/70	PG 46E-22	70	48.1
PmB 45/80-70	PG 64E-22	55	80.3

Tabella 4: Caratteristiche dei leganti bituminosi (fonte: La Macchia et al, 2024 [3])

### 3.2.3. Compound polimerico e rejuvenator

L’additivo polimerico SuperPlastEco, fornito da Iterchimica S.p.A., si presenta sotto forma di granuli con dimensioni comprese tra 4 e 6 mm ed è ottenuto dal riciclo di plastiche rigide derivanti da rifiuti urbani e industriali. La sua composizione, coperta da brevetto industriale, è stata appositamente sviluppata per consentirne l’impiego nelle miscele bituminose attraverso la metodologia *dry* o mediante un approccio “*ibrido*”. Le principali proprietà fisiche del prodotto sono riportate nella tabella seguente.

Aspect	Granules
Color	Shades of gray
Apparent density at 80 °F (25 °C)	0.4–0.6 g/cm <sup>3</sup>
Softening point	160–180 °C

Tabella 5: Principali caratteristiche del compound polimerico utilizzato (fonte: La Macchia et al, 2024 [3])

Tra queste, particolare rilievo assume il punto di rammollimento, compreso tra 160 °C e 180 °C, valore prossimo alle tipiche temperature di miscelazione di un HMA. Tale caratteristica assicura un corretto rammollimento del materiale, condizione indispensabile per la sua efficace implementazione con approccio “ibrido”.

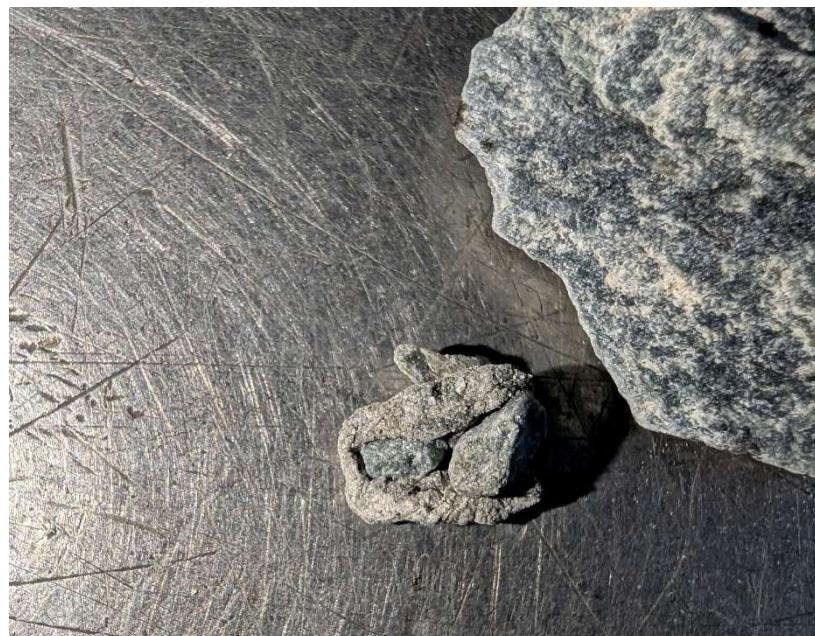


Figura 15: Interazione tra aggregati e compound polimerico

È stato inoltre utilizzato un agente rigenerante liquido di origine biologica (“*bio-based*”), denominato Iterlene ACF 2000 green, anch'esso fornito da Iterchimica S.p.A. È stato aggiunto con un dosaggio fisso per tutte le miscele, pari allo 0.3% sul peso del RAP, come raccomandato dal produttore.

L'adozione di additivi di questo tipo si rende necessaria quando si ricorre a elevate percentuali di RAP. Il legante presente nel fresato, infatti, risulta

invecchiato e ossidato a seguito della prolungata esposizione agli agenti atmosferici e ai carichi del traffico nel corso della sua vita utile. Questo processo di invecchiamento altera la composizione chimica del bitume, in particolare l'equilibrio tra asfalteni (la frazione che conferisce rigidezza) e malteni (la frazione oleosa e resinosa che conferisce duttilità e flessibilità). Il risultato è un legante eccessivamente rigido e fragile, che rende la miscela meno lavorabile e più suscettibile a fessurazioni premature [58, 59].

L'agente rigenerante interviene per contrastare tali effetti, ripristinando le proprietà chimiche e reologiche originarie del legante invecchiato. Il suo meccanismo d'azione si basa sulla penetrazione e diffusione all'interno del film di bitume che ricopre gli aggregati del RAP: una volta assorbito, il rigenerante reintegra la frazione maltenica persa, riequilibrando la composizione del legante.

Questo processo riduce la viscosità e la rigidezza del bitume ossidato, restituendogli flessibilità e migliorando al contempo la lavorabilità e la durabilità della miscela finale [60]. L'agente impiegato nello studio, essendo di origine biologica, presenta inoltre il vantaggio di derivare da fonti sostenibili e rinnovabili.

Di seguito si riportano le principali caratteristiche dell'agente rigenerante utilizzato.

Aspect	Liquid
Color	Brown–purple
Density at 80 °F (25 °C)	$0.93 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$
Viscosity at 80 °F (25 °C)	$100 \pm 50 \text{ cP}$
Flash point	>390 °F (200 °C)
Water content	<2%

Tabella 6: Caratteristiche del rejuvenator utilizzato (fonte: La Macchia et al, 2024 [3])

### 3.2.4. Le miscele realizzate

La curva di progetto delle miscele realizzate è stata anch'essa determinata in precedenti lavori di ricerca [3], facendo riferimento alle specifiche tecniche dei principali CSA per strati di collegamento.

Le due frazioni granulometriche di RAP sono state introdotte in tutte le miscele realizzate con rapporto 3:2. In particolare, nelle miscele contenenti il 20% di RAP (bianco sul peso degli aggregati) sono stati impiegati il 12% della frazione 0/12 e l'8% della frazione 0/20. Per le miscele con il 50% di RAP, invece, sono stati utilizzati il 30% della frazione 0/12 e il 20% della frazione 0/20.

Si riportano di seguito la distribuzione dimensionale delle classi di aggregati e del RAP e la curva di progetto.

Setaccio	Sabbia 0-5	Pietrisco 8-16	Pietrisco 16-22	Filler	RAP 0-12	RAP 0-20
[mm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
20	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
16	100.0	100.0	43.4	100.0	100.0	97.2
12.5	100.0	82.2	5.6	100.0	100.0	89.0
8	100.0	12.0	1.9	100.0	91.0	61.1
4	76.1	0.5	1.6	100.0	64.7	35.4
2	42.1	0.4	1.6	100.0	48.3	25.8
0.5	18.7	0.4	1.3	100.0	26.7	15.4
0.25	12.0	0.4	1.2	100.0	18.7	11.3
0.063	3.0	0.3	0.8	97.2	9.9	5.9

Tabella 7: Distribuzione dimensionale di aggregati vergini e RAP

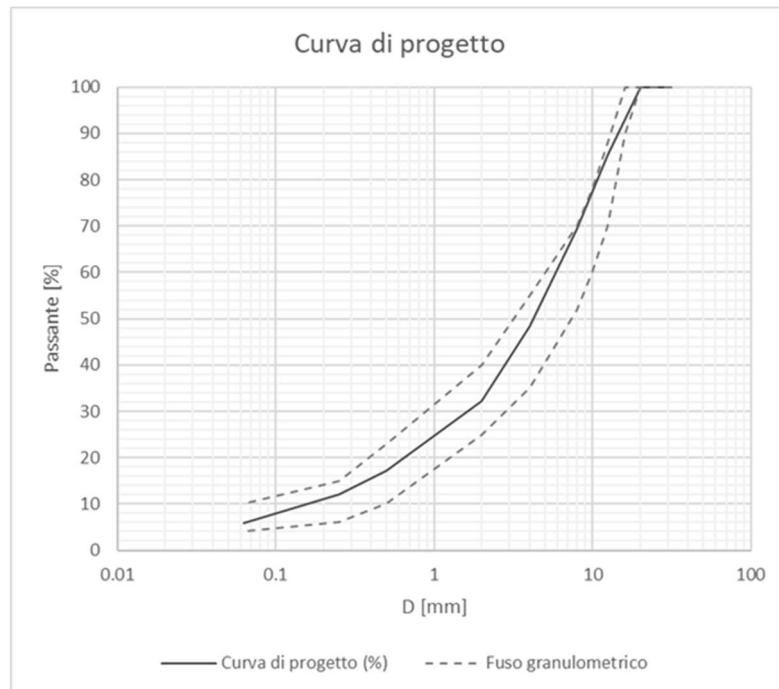


Figura 16: Curva granulometrica di riferimento

Il contenuto ottimale di legante bituminoso delle miscele oggetto di questo studio è stato invece determinato sulla base di un precedente lavoro di mix design [3]. In particolare, per la miscela di riferimento e per quelle confezionate con PmB, è stato adottato un contenuto totale di legante pari al 4,5% in peso sulla miscela finita. Per le miscele contenenti il compound polimerico, impiegato secondo metodologia ibrida, il tenore di legante complessivo è stato incrementato al 5%, considerando dunque lo 0,5% in peso di plastica come partecipante alla fase legante. Infine, l'additivo rigenerante è stato dosato in quantità pari allo 0,3% rispetto al peso del RAP.

È importante evidenziare che il contenuto totale di legante è stato definito come la somma tra il bitume vergine d'aggiunta, il bitume invecchiato del RAP, l'additivo ringiovanente e il compound polimerico. Lo studio di cui sopra [3] ha analizzato le miscele contenenti il 50% di RAP. È stato supposto che la percentuale di legante totale sulla miscela si mantenesse costante al variare della percentuale di RAP.

Inoltre, l'impiego di differenti percentuali di RAP ha comportato una variazione del bitume vergine di aggiunta, che risulta pari a circa 3,5% nelle miscele con il 20% di RAP e a circa 2% nelle miscele con il 50% di RAP.

Nella tabella seguente sono riportate le percentuali in peso, rispetto alla miscela finita, di ciascun componente.

Componente	Sp_20	PmB_20	Ref_20	Sp_50	Pmb_50
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Sabbia 0/5	44.822	45.058	45.058	26.249	26.387
Pietrisco 8/16	17.328	17.419	17.419	9.805	9.857
Pietrisco 16/22	10.818	10.875	10.875	10.780	10.836
RAP 0/12 bianco	11.400	11.460	11.460	28.500	28.650
RAP 0/20 bianco	7.600	7.640	7.640	19.000	19.100
Filler	3.032	3.048	3.048	0.666	0.669
Legante totale	5.000	4.500	4.500	5.000	4.500
Bitume RAP 0/12	0.621	0.625	0.625	1.553	1.561
Bitume RAP 0/20	0.315	0.317	0.317	0.789	0.793
Bitume vergine	3.504	3.498	3.498	2.009	1.996
Polimero	0.500	0.000	0.000	0.500	0.000
Rejuvenator	0.060	0.060	0.060	0.150	0.150
RAP 0/12 TOTALE	12.021	12.085	12.085	30.054	30.212
RAP 0/20 TOTALE	7.915	7.957	7.957	19.789	19.893
RAP TOTALE	19.937	20.042	20.042	49.842	50.105

Tabella 8: Percentuali dei componenti sul peso della miscela

Ai fini del conseguimento degli obiettivi della presente ricerca sono stati confezionati circa 600 kg di miscela, da cui sono stati ricavati 110 provini cilindrici e 40 provini prismatici. La quantità di miscela prodotta è stata definita in modo da garantire l'esecuzione di almeno 9 ripetizioni per ciascuna miscela nelle prove a fatica in configurazione CIT-CY, almeno 6 ripetizioni nelle prove IT-CY e 8 ripetizioni nelle prove 4PB-PR su travetti prismatici.

### **3.3. *Le prove sperimentali***

Nel seguente paragrafo sono descritte le procedure operative e le metodologie adottate per l'esecuzione delle prove sperimentali, svolte presso il Laboratorio di Materiali Stradali del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture del Politecnico di Torino.

#### **3.3.1. *Quartatura ed essiccatura***

Il materiale lapideo, sia vergine sia di recupero (RAP), è stato prelevato dall'impianto in lotti di circa 60 kg. Per garantire che il materiale destinato alla miscelazione risultasse omogeneo e rappresentativo del campione complessivo, si è proceduto alla sua riduzione mediante quartatura meccanica, utilizzando un apposito dispositivo (*sample splitter*). In tal modo sono stati ottenuti quattro campioni di circa 15 kg ciascuno, caratterizzati da una granulometria uniforme all'interno di ogni classe di aggregati e di RAP.

Questa procedura, eseguita in conformità alla EN 932-2 [62] consente di ottenere sottocampioni rappresentativi e di dimensioni più gestibili, idonei alla successiva produzione di miscele sperimentali che siano il più possibile aderenti alla curva granulometrica di progetto.

Oltre a garantire l'omogeneità, è essenziale che gli aggregati impiegati nelle miscele siano completamente privi di umidità, in quanto la presenza di acqua residua potrebbe alterarne la massa e compromettere l'accuratezza del dosaggio.

Negli impianti di produzione a ciclo discontinuo, tale obiettivo viene normalmente conseguito mediante il passaggio degli aggregati in un tamburo rotante essiccatore, all'interno del quale il materiale viene riscaldato ad alte

temperature (anche superiori a 300 °C) per tempi relativamente brevi, nell'ordine di alcune decine di secondi. In questa fase gli aggregati vengono contemporaneamente essiccati e riscaldati, per poi essere vagliati e stoccati in compatti separati in funzione della classe granulometrica.

In laboratorio, non essendo praticabile l'impiego di temperature così elevate, si è adottata una procedura differenziata per aggregati vergini e RAP, in conformità alla EN 1097-5:2008 [63].

Gli aggregati vergini sono stati essiccati in forno ventilato a 110 °C per un'intera notte. Per quanto riguarda il RAP, per evitare fenomeni di ulteriore ossidazione e indurimento del legante bituminoso invecchiato, il materiale è stato condizionato in cella climatica in condizioni di umidità controllata e a temperatura più moderata, pari a 40 °C, per una durata di 5 giorni.

Al termine dell'essiccazione, aggregati vergini e RAP sono stati confezionati in sacchi sigillati, al fine di prevenire il riassorbimento di umidità durante le fasi di stoccaggio.



Figura 17: Dispositivo utilizzato per quartatura e condizionamento del RAP in cella climatica

### 3.3.2. Procedure di miscelazione

Al fine di simulare il processo produttivo di un impianto industriale di conglomerato bituminoso, sono state sviluppate due differenti procedure di

miscelazione, una per miscele contenenti il 20% di RAP e una per miscele contenenti il 50% di RAP. Lo scopo è quello di massimizzare l'attivazione e l'integrazione del legante invecchiato presente nel RAP, nonché di garantire la corretta dispersione degli additivi polimerici, senza compromettere la lavorabilità e le prestazioni finali della miscela. Si riportano di seguito le fasi della miscelazione eseguita in laboratorio per mezzo di miscelatore meccanico.

Per le miscele contenenti il 20% di RAP:

1. Gli aggregati vergini sono stati riscaldati fino a raggiungere una temperatura di 190 °C;
2. Parallelamente, il RAP è stato portato a 70 °C e mantenuto a tale temperatura per 1 ora e 45 minuti. Successivamente è stato aggiunto l'agente rigenerante (0,3% in peso sul RAP) e il materiale è stato mantenuto in forno per ulteriori 15 minuti. Tale fase a temperatura moderata è finalizzata ad ammorbidente il legante invecchiato e a favorire la penetrazione del rigenerante, evitando al contempo fenomeni di ulteriore invecchiamento termico;
3. Gli aggregati caldi sono stati introdotti nel miscelatore, mantenuto a una temperatura di 170°C, a partire dalla pezzatura più grossa fino a quella più fine, e miscelati per 30 secondi;
4. È stato quindi aggiunto il compound polimerico (0,5% in peso sulla miscela) e lasciato riposare per 40 minuti all'interno della massa di aggregati caldi, al fine di consentire un rammollimento graduale e completo del polimero e favorirne l'adesione alle superfici degli aggregati prima dell'aggiunta del legante bituminoso vergine. Successivamente è stata effettuata una miscelazione di due minuti a bassa velocità per garantirne la distribuzione uniforme;
5. Il RAP, precedentemente trattato con rejuvenator, è stato aggiunto agli aggregati e al polimero, mescolando per circa 1 minuto in modo tale da favorire il raggiungimento dell'equilibrio termico;
6. Il bitume vergine è stato introdotto gradualmente in tre porzioni, intervallate dall'aggiunta del filler, con un tempo di miscelazione di 30 secondi a bassa velocità per ogni fase. Tale aggiunta frazionata ha lo scopo di assicurare una

ricopertura più uniforme degli aggregati ed evitare la formazione di grumi di mastice.

7. Infine, la miscela è stata sottoposta a 1 minuto di miscelazione ad alta velocità, così da garantire l'omogeneità del prodotto finale.

Per le miscele contenenti il 50% di RAP:

1. Gli aggregati vergini sono stati riscaldati alla massima temperatura consentita dalla stufa, pari a circa 280 °C;
2. La preparazione del RAP è stata condotta secondo il medesimo protocollo già descritto (riscaldamento a 70 °C per 1 ora e 45 minuti, aggiunta di rigenerante pari allo 0,3% in peso e successiva sosta di 15 minuti);
3. Gli aggregati preriscaldati (280 °C) sono stati inseriti nel miscelatore mantenuto a 170 °C e mescolati per 30 secondi; subito dopo è stato aggiunto il RAP condizionato e trattato con rejuvenator. Il contatto tra i due materiali a temperature differenti ha generato uno “shock termico” [3], che ha prodotto tre effetti simultanei: ha riscaldato il RAP alla temperatura di miscelazione (170 °C) senza esposizione diretta e prolungata al calore, ha ammorbidente il legante invecchiato e ha favorito la disgregazione meccanica degli agglomerati di RAP, migliorando l'omogeneità della miscela. La miscelazione è durata circa 1 minuto, per favorire il raggiungimento dell'equilibrio termico;
4. Diversamente dal protocollo precedente, il polimero (0,5% in peso sulla miscela) è stato aggiunto dopo l'incorporazione del RAP, e miscelato per due minuti a bassa velocità, sfruttando l'elevata temperatura della massa aggregato/RAP per favorirne il rammollimento e la distribuzione;
5. Il bitume vergine è stato quindi introdotto in due porzioni, intervallate dall'aggiunta del filler, con un tempo di miscelazione di 30 secondi per ciascuna fase;
6. La miscela è stata successivamente sottoposta a 1 minuto di miscelazione ad alta velocità. È seguita una fase di mantenimento a 170 °C per 15 minuti, finalizzata a simulare il tempo di trasporto del conglomerato dall'impianto al cantiere. Infine, è stata effettuata un'ulteriore miscelazione (1 minuto a bassa velocità e 30 secondi ad alta velocità), al fine di riprodurre l'azione

della finitrice. Questa fase conclusiva assicura che le proprietà determinate in laboratorio siano rappresentative delle condizioni reali di posa in opera.



Figura 18: Miscelatore meccanico

### 3.3.3. Determinazione della Theoretical Maximum Density

Per ciascuna miscela è stata determinata la massima massa volumica teorica (TMD), parametro necessario per definire la quantità di materiale da impiegare in fase di compattazione, in modo da ottenere provini con lo stesso contenuto di vuoti. La TMD corrisponde alla massa per unità di volume che la miscela raggiungerebbe in assenza di vuoti, ossia nel caso teorico di una compattazione perfetta, in cui legante e aggregati occupano completamente il volume disponibile senza lasciare porosità. Si tratta, tuttavia, di un valore puramente teorico, poiché nella pratica le miscele bituminose presentano sempre una certa percentuale di vuoti residui.

La TMD è stata determinata ai sensi della EN 12697-5 con procedura volumetrica [64], che prevede l'impiego di un picnometro e di un sistema di vuoto per eliminare l'aria intrappolata.

Le attrezzature necessarie per lo svolgimento della prova sono:

- Picnometro con tappo a volume noto, sottoposto a periodica calibrazione; il campione deve occupare non più di due terzi del volume utile;
- Sistema di vuoto in grado di raggiungere una pressione residua  $\leq 4$  kPa;

- Acqua deaerata;
- Bilancia con risoluzione pari a 0,1 g.

Il campione è stato prelevato secondo la norma EN 12697-27 [65]; la massa minima richiesta per picnometro è pari a 50 volte la dimensione massima nominale dell'aggregato in mm. Il campione è stato preventivamente riscaldato a  $110 \pm 5$  °C fino a divenire lavorabile; quindi, è stato disgregato fino a ridurre gli agglomerati a una dimensione massima di 6 mm. Successivamente è stata eseguita una quartatura, in modo da ottenere due campioni omogenei rappresentativi della miscela. Sono stati infatti eseguite due misurazioni per miscela, e il valore di TMD assunto è dato dalla media delle due misurazioni.

La procedura operativa per la corretta esecuzione della prova prevede le seguenti fasi:

1. Pesata del picnometro vuoto (con tappo) e registrazione della massa  $m_1$ ; il volume del picnometro è noto da calibrazione;
2. Introduzione del campione secco, pesata del picnometro + campione e registrazione della massa  $m_2$ ;
3. Aggiunta di acqua deareata fino a circa 30 mm al di sotto del giunto del tappo;
4. Rimozione dell'aria intrappolata mediante applicazione di vuoto fino a  $\leq 4$  kPa per  $15 \pm 1$  minuti, eventualmente coadiuvata da vibrazione o agitazione del picnometro;
5. Riempimento totale del picnometro con acqua deareata fino ad ottenere un menisco di acqua;
6. Asciugatura esterna del picnometro ed esecuzione immediata della pesata finale, con registrazione della massa  $m_3$ .

Il valore di densità massima teorica è stato calcolato secondo la seguente relazione:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^3 * V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w}} ,$$

dove:

- $\rho_{mv}$  è la theoretical maximum density della miscela bituminosa, espressa in  $\text{Mg/m}^3$ ;

- $m_1$  è la massa del picnometro vuoto compreso di tappo, espressa in g;
- $m_2$  è la massa del picnometro riempito con il campione secco di conglomerato bituminoso, espressa in g;
- $m_3$  è la massa del picnometro riempito con campione di conglomerato e acqua deareata, espressa in g;
- $V_p$  è il volume del picnometro, noto da calibrazione, espresso in  $m^3$ ;
- $\rho_w$  è la densità dell'acqua determinata alla temperatura di test, espressa in  $Mg/m^3$ .



Figura 19: Fasi della misurazione della TMD con metodo del picnometro

### 3.3.4. Compattazione dei provini

La compattazione dei provini cilindrici è stata eseguita ai sensi della norma EN 12697-31 [66], mediante l'impiego di una pressa a taglio giratoria. Tale apparecchiatura consente di simulare in laboratorio le condizioni di compattazione che si verificano in cantiere: i rulli utilizzati per la compattazione delle pavimentazioni, infatti, non si limitano ad applicare una pressione verticale, ma generano anche sollecitazioni di taglio che contribuiscono in modo determinante alla densificazione dello strato bituminoso. Questa azione combinata viene riprodotta dalla pressa tramite due movimenti simultanei: una compressione statica ed una rotazione dell'asse del campione, che descrive una superficie conica di rivoluzione.

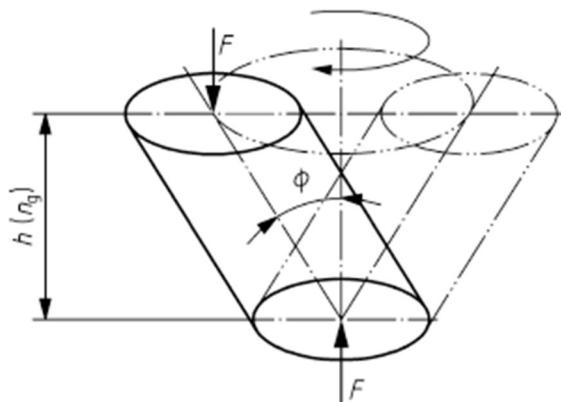


Figura 20: Rappresentazione dell'azione di una pressa giratoria (fonte: EN 12697-31)

La compattazione è stata condotta applicando uno stress verticale costante pari a 600 kPa, una velocità di rotazione di 30 giri al minuto e un angolo di inclinazione di 1,25°, mentre l'altezza del campione è stata registrata in continuo.

Per le miscele oggetto di studio, la compattazione è stata condotta imponendo un'altezza target, definita in funzione dei requisiti previsti dalle norme EN 12697-24 [51] e EN 12697-26 [67], così da ottenere provini idonei alle successive prove meccaniche. In particolare, sono stati realizzati provini di diametro pari a 150 mm e altezza target di 60 mm.

Table C.3 — Specimen dimensions

Maximum grain size mm	Specimen diameter mm	Specimen height mm
≤ 16	100 ± 3 150 ± 3	40 to 60 ± 2
> 16 to < 32	150 ± 3	60 ± 2
≥ 32	150 ± 3	90 ± 2

Tabella 9: Dimensioni dei provini in funzione della massima dimensione nominale dell'aggregato (fonte: EN 12697-26)

La temperatura di compattazione è stata fissata a  $150 \pm 5$  °C per le miscele con bitume non modificato e a  $160 \pm 5$  °C per quelle contenenti PmB.

La massa da inserire in fustella per ciascuna miscela è stata calcolata a partire dalla seguente relazione:

$$M = \pi \frac{d^2}{4} \rho_{mv} \left(1 - \frac{v_{geo}}{100}\right),$$

nota la massima massa volumica teorica ( $\rho_{mv}$ ). È stato fissato un contenuto di vuoti geometrici target pari al 7%, così da ottenere, in seguito alla compattazione, un contenuto medio di vuoti reali prossimo al 3,5%, e poter dunque eseguire il confronto tra le prestazioni a fatica delle varie miscele a parità di condizioni.

Evidenze emerse in precedenti studi di tesi hanno infatti mostrato uno scostamento sistematico di circa il 3,5% tra vuoti geometrici e vuoti effettivi.

La procedura operativa di compattazione per ciascun provino, in accordo con la norma EN 12697-31, è stata la seguente:

1. La fustella (diametro 150 mm), completa degli inserti metallici, è stata inserita nel forno e portata alla temperatura di compattazione;
2. La miscela di conglomerato bituminoso da compattare è stata inserita in forno e portata alla temperatura di compattazione;
3. Una volta raggiunta la temperatura stabilita, è stata introdotta nella fustella la massa di miscela precedentemente calcolata, posizionando un foglio di carta filtro alla base;

4. La fustella contenente il materiale da compattare è stata nuovamente inserita nel forno ed è stato monitorato il raggiungimento della temperatura di compattazione al cuore del materiale mediante una sonda;
5. Una volta raggiunta la temperatura target, la fustella è stata estratta dal forno e sono stati posizionati il foglio di carta filtro superiore e il piatto metallico finale;
6. La fustella è stata collocata all'interno della pressa a taglio giratoria ed è stata avviata la procedura di compattazione, dopo aver impostato i parametri di pressione verticale, diametro del provino e altezza target;
7. Al termine del processo, il provino compattato è stato estratto tramite il pistone idraulico.

Tutti i provini realizzati sono stati lasciati a maturare su una superficie piana per almeno 14 giorni prima di essere sottoposti a ulteriori test.



Tabella 10: Fasi della compattazione con pressa giratoria

Relativamente alla realizzazione dei provini prismatici, la compattazione delle lastre per mezzo del roller compactor, in conformità alla EN 12697-33 [68], è stata eseguita presso la sede di Iterchimica a Suisio (BG).

La miscela calda è stata distribuita nello stampo e compattata mediante passaggi controllati del rullo, regolando carico e numero di passate per conseguire il contenuto di vuoti prefissato.

Le lastre sono state successivamente sezionate per ricavare i provini prismatici delle dimensioni desiderate, in accordo alla EN 12697-24 [51].

Anche in questo caso, massa e temperatura sono state definite sulla base della TMD e delle specifiche di miscela, così da ottenere il livello di vuoti richiesto e assicurare la comparabilità tra provini. In tal caso il contenuto di vuoti geometrici imposto è stato del 6%. L'approccio consente di riprodurre in laboratorio condizioni di compattazione prossime a quelle di stesa e rullatura in opera.

### ***3.3.5. Determinazione delle dimensioni effettive e della Bulk Density dei provini compattati***

Ai fini della determinazione delle caratteristiche volumetriche delle miscele compattate, le dimensioni effettive di ciascun provino sono state misurate in conformità alla norma EN 12697-29 [69]. Nel caso dei provini cilindrici, il diametro è stato calcolato come media di due misurazioni e l'altezza come media di quattro, mentre per i provini prismatici ciascuna dimensione è stata determinata come media di quattro misurazioni.

Per ciascun provino è stata poi determinata la Bulk Density ai sensi della EN 12697-6 [70], con procedura Saturated Surface Dry (SSD), indicata per provini con superficie chiusa, granulometria dense graded e basso livello di assorbimento, al fine di poter stimare i vuoti effettivi in funzione del numero di giri della pressa giratoria e ricavare la relativa curva di compattazione.

Per la determinazione del parametro:

1. Si determina innanzitutto la massa del provino allo stato asciutto ( $m_1$ );
2. Si rileva la temperatura dell'acqua e, sulla base di essa, si calcola la densità ( $\rho_w$ ) con approssimazione pari a  $0,0001 \text{ Mg/m}^3$ ;

3. Il provino viene quindi immerso in acqua e lasciato in saturazione fino a quando la sua massa non raggiunge un valore costante;
4. Una volta completata la saturazione, si misura la massa del provino immerso ( $m_2$ ), avendo cura di eliminare eventuali bolle d'aria aderenti alla superficie;
5. Successivamente il provino viene estratto dall'acqua, asciugato superficialmente con un panno in camoscio asciutto, così da rimuovere unicamente il velo d'acqua superficiale;
6. Infine, si determina immediatamente la massa del provino saturo a superficie asciutta ( $m_3$ ).

La densità apparente a superficie satura e asciutta ( $\rho_{ssd}$ ) di ciascun provino è stata calcolata secondo la seguente relazione:

$$\rho_{ssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w ,$$

dove:

- $\rho_{ssd}$  è la densità apparente determinata con il metodo saturo a superficie asciutta, espressa in Mg/m<sup>3</sup> e approssimata al terzo decimale (0,001 Mg/m<sup>3</sup>);
- $m_1$  è la massa del provino asciutto, in grammi;
- $m_2$  è la massa del provino immerso in acqua, in grammi;
- $m_3$  è la massa del provino saturo a superficie asciutta, in grammi;
- $\rho_w$  è la densità dell'acqua alla temperatura di prova, espressa in Mg/m<sup>3</sup>.

Come prescritto dalla norma, è stato inoltre verificato che la densità di ciascun provino non si discostasse di oltre l'1% dal valore medio della serie.



Figura 21: Misurazione delle dimensioni effettive dei provini



Figura 22: Determinazione della Bulk Density

### 3.3.6. Determinazione dei moduli di rigidezza

Come già accennato nel capitolo 2, il conglomerato bituminoso è un materiale composito il cui comportamento meccanico è di tipo viscoelastico-plastico. Ciò significa che la sua risposta deformativa a una sollecitazione esterna dipende non solo dall'intensità del carico, ma anche dalla sua durata (o frequenza di applicazione) e dalla temperatura di esercizio. Questa dipendenza è dovuta alla natura viscoelastica del legante bituminoso.

La rigidezza delle miscele bituminose può essere valutata in laboratorio mediante diverse tipologie di prova, come quelle a flessione o a trazione, sia diretta che indiretta. In particolare, nel presente studio la caratterizzazione meccanica è stata condotta valutando, per ciascuna miscela, sia il modulo di rigidezza, ottenuto mediante prove di trazione indiretta su provini cilindrici, che la norma del modulo complesso, definito spesso in letteratura come modulo dinamico, determinato attraverso prove di flessione a quattro punti su provini prismatici.

La norma del modulo complesso si definisce come:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2},$$

dove:

- $|E^*|$  è il modulo di rigidezza, equivalente alla norma del modulo complesso, espresso in MPa;
- $E_1$  è la parte reale del modulo complesso, che rappresenta la componente puramente elastica;
- $E_2$  è la parte immaginaria del modulo complesso, che rappresenta la componente viscosa.

Per ciascun provino sono stati dunque determinati i moduli di rigidezza ai sensi della EN 12697-26 [67], eseguendo prove di trazione indiretta (IT-CY) in controllo di deformazione per i provini cilindrici, e prove di flessione a 4 punti (4PB-PR), sempre in controllo di deformazione, per i travetti prismatici. Tutti i test sono stati condotti alla temperatura di 20°C, e i provini sono stati condizionati in cella climatica per almeno 4 ore prima dell'esecuzione della prova. I moduli di rigidezza determinati sono stati utilizzati come riferimento per la definizione dei livelli tensodeformativi da applicare nelle prove successive di resistenza a fatica.

Per l'esecuzione dei test in configurazione IT-CY, finalizzate alla determinazione del modulo di rigidezza delle miscele bituminose, è stato utilizzato il sistema di prova UTM-30. L'attrezzatura è composta da un sistema di carico in grado di applicare impulsi con una forma d'onda e una durata controllate, un telaio di prova per la trazione indiretta e una coppia di trasduttori di spostamento (LVDT) montati orizzontalmente a contatto con il provino per misurarne la deformazione diametrale.



Figura 23: Esecuzione della prova in configurazione IC-CY

I provini cilindrici sono stati sottoposti a un carico compressivo applicato lungo un piano diametrale verticale attraverso due bande di carico metalliche. Questo schema di carico, pur essendo di compressione, genera per effetto Poisson uno stato di tensione relativamente uniforme lungo il diametro orizzontale, che è prevalentemente di trazione. La prova consiste nel misurare la deformazione diametrale orizzontale, transitoria e recuperabile, in risposta a un impulso di carico di breve durata.

Il sistema applica degli impulsi di carico di intensità relativamente bassa, in modo che la risposta del materiale rimanga in campo viscoelastico lineare. La prova avviene in controllo di deformazione: gli impulsi di carico applicati producono un allungamento orizzontale massimo imposto pari a  $11,2 \mu\text{m}$ . L'impulso di carico viene applicato con forma d'onda *haversine*, allo scopo di simulare il passaggio di una singola ruota. Il tempo di applicazione del carico (*rise time*), ovvero il tempo necessario per raggiungere il picco, è fissato convenzionalmente a 125 ms.

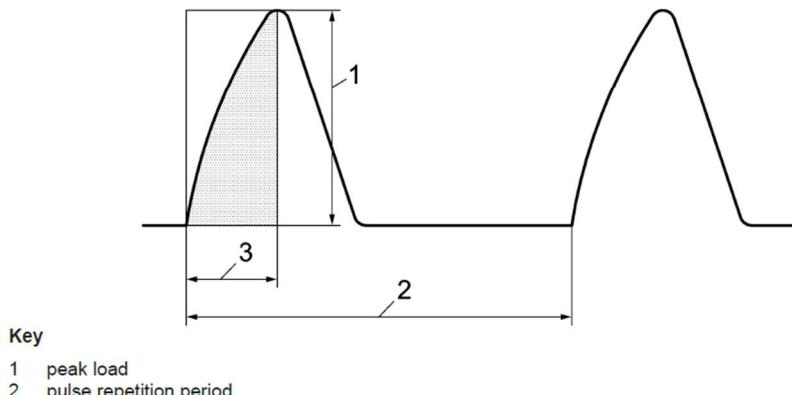


Figura 24: Forma dell'impulso di carico applicato (fonte: EN 12697-26)

L'impulso viene ripetuto ogni tre secondi per consentire il completo recupero della deformazione viscoelastica tra un'applicazione e la successiva. Il modulo di rigidezza viene calcolato come valore medio ottenuto da cinque impulsi di carico consecutivi, utilizzando la formula derivata dalla teoria dell'elasticità per un disco compresso diametralmente:

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

dove:

- $E$  è il modulo di rigidezza, in MPa;
- $F$  è il valore di picco del carico verticale applicato, in N;
- $z$  è l'ampiezza della deformazione orizzontale resiliente, in mm;
- $h$  è lo spessore medio del provino cilindrico, in mm;
- $v$  è il coefficiente di Poisson, per il quale si assume convenzionalmente un valore di 0.35 per i conglomerati bituminosi in condizioni di prova standard.

Per l'esecuzione delle prove in configurazione 4PB-PR, finalizzate alla determinazione del modulo dinamico delle miscele bituminose, è stato impiegato il macchinario UTM-16. L'attrezzatura di prova è costituita da un attuatore servopneumatico in grado di applicare carichi sinusoidali controllati, un telaio di carico a quattro punti e un sensore di spostamento ad alta risoluzione (LVDT) posizionato al centro della trave per misurare la freccia. L'intero sistema è alloggiato all'interno

di una camera termostatica che garantisce il mantenimento della temperatura di prova. I provini testati sono travi di forma prismatica, con dimensioni della sezione trasversale di circa 50x50 mm una lunghezza di circa 413 mm.

I travetti prismatici sono stati alloggiati all'interno del telaio di carico e sollecitati ciclicamente in corrispondenza degli appoggi interni. Questa configurazione di carico ha il vantaggio di generare, almeno in teoria, un campo di momento flettente puro e costante, privo di sforzi di taglio, nella porzione di trave compresa tra i due punti di carico interni. È in questa zona che viene misurata la deformazione verticale (freccia).

Anche la prova 4PB-PR viene eseguita in controllo di deformazione: in particolare è stata imposta un'ampiezza di deformazione flessionale massima costante pari a 50  $\mu\text{m}/\text{m}$ , in modo da rimanere in campo viscoelastico lineare. Il carico applicato ha una forma d'onda sinusoidale e la prova è stata ripetuta per un ampio intervallo di frequenze: 0.1 Hz, 0.2 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e, nuovamente, 0.1 Hz. Quest'ultima ripetizione è stata eseguita per verificare che i valori di modulo non si discostino in maniera significativa da quelli rilevati durante il primo ciclo di carico a 0,1 Hz, così da escludere eventuali danneggiamenti del provino nel corso della prova.

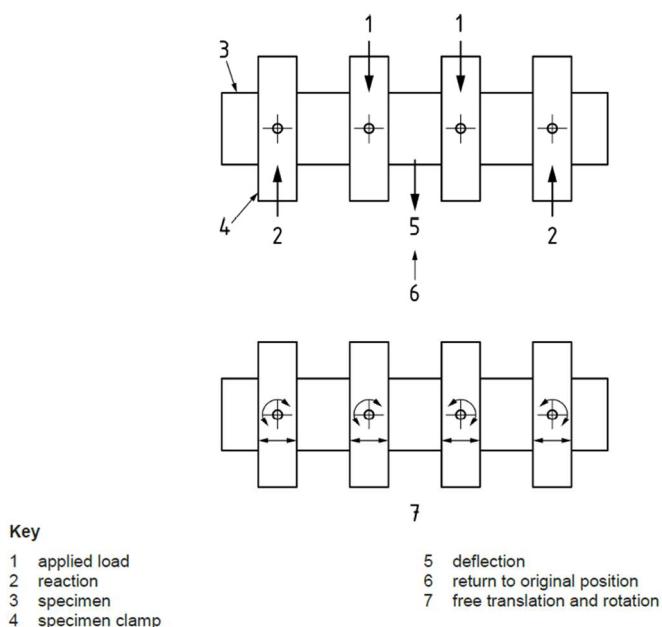


Figura 25: Illustrazione del funzionamento della prova in configurazione 4PB (fonte: EN 12697-26)



Figura 26: Macchinario UTM-10

### 3.3.7. Determinazione della resistenza a fatica

Le prove di resistenza a fatica sono state eseguite in conformità a quanto previsto dalla EN 12697-24 [51], adottando tre diverse configurazioni di prova:

- Flessione a quattro punti su provini prismatici (4PB-PR) in controllo di deformazione (frequenza di 10 Hz);
- Trazione indiretta su provini cilindrici (IT-CY) in controllo di carico, con periodo di riposo (frequenza di 2 Hz);
- Trazione indiretta ciclica (CIT-CY) in controllo di carico, senza periodo di riposo (frequenza di 10 Hz).

Per ciascuna miscela sono state condotte:

- Due ripetizioni per tre differenti livelli tensionali imposti in configurazione IT-CY;
- Almeno tre ripetizioni per tre differenti livelli tensionali imposti in configurazione CIT-CY;
- Otto ripetizioni per diversi livelli deformativi imposti in configurazione 4PB-PR.

Per l'esecuzione dei test su provini cilindrici è stato utilizzato il dispositivo UTM-30, mentre per i provini prismatici è stato impiegato l'UTM-16. Tutti i test

sono stati eseguiti a una temperatura di 20 °C, dopo condizionamento dei provini in cella climatica, in conformità alla normativa di riferimento.

L’impiego di differenti metodi di prova è motivato dalla complessità del fenomeno della fatica e dall’impossibilità di riprodurre in laboratorio, con una singola configurazione sperimentale, l’insieme degli stati tensionali e delle condizioni ambientali cui è soggetta una pavimentazione reale. I risultati ottenuti con prove diverse non sono tuttavia direttamente comparabili, poiché ciascun metodo induce differenti stati di sollecitazione.

Una prova a flessione, ad esempio, genera uno stato di tensione prevalentemente uniaxiale, rappresentativo dei meccanismi di fessurazione per inflessione che si innescano alla base degli strati legati (*bottom-up cracking*). Al contrario, una prova di trazione indiretta determina uno stato tensionale biassiale nel centro del provino.

Poiché la risposta del materiale può variare in modo significativo in funzione dello stato di tensione (uniaxiale o biassiale), ne consegue che differenti configurazioni di prova possano condurre a classifiche prestazionali diverse per il medesimo insieme di miscele.

Nelle prove 4PB in controllo di deformazione sono stati considerati, per ciascuna miscela, almeno tre diversi livelli di deformazione iniziale, selezionati in modo tale da coprire un intervallo di vita a fatica compreso tra  $10^4$  e  $2 \cdot 10^6$  numero di cicli di applicazioni del carico. La frequenza di applicazione del carico è stata fissata a 10 Hz.

Il provino prismatico, precedentemente condizionato in cella climatica alla temperatura di test (20 °C), viene inserito all’interno di un telaio di carico in cui morsetti interni ed esterni sono disposti in maniera simmetrica. I provini vengono sottoposti a sollecitazioni flettenti periodiche a quattro punti, mediante l’applicazione di un carico sinusoidale, con possibilità di libera rotazione e traslazione in corrispondenza dei punti di applicazione del carico e delle reazioni vincolari. La flessione è realizzata applicando il carico nei due punti interni (morsetti di carico), in direzione verticale e perpendicolare all’asse longitudinale della trave, mentre la posizione verticale dei supporti esterni (morsetti di reazione) rimane fissa. Questa configurazione di carico genera un momento costante – e di conseguenza una deformazione costante – nella zona compresa tra i due morsetti

interni. Ne consegue che questa porzione centrale del provino è soggetta, teoricamente, a uno stato di sollecitazione di flessione pura, con le fibre inferiori in trazione e quelle superiori in compressione. Come già accennato, questo stato tensionale uniassiale è considerato una simulazione delle condizioni che portano all'innesto del *bottom-up cracking* nelle pavimentazioni flessibili o semi-rigide. La modalità di prova in controllo di deformazione, infatti, simula il comportamento di strati bituminosi relativamente sottili e flessibili, nei quali il livello di deformazione alla base dello strato bituminoso è governato primariamente dalla deformabilità degli strati sottostanti.

Inoltre, il fatto che la massima sollecitazione di trazione si distribuisca uniformemente nella zona compresa tra i due punti di applicazione del carico, e non concentrata in un singolo punto, permette di ottenere una caratterizzazione più rappresentativa delle proprietà medie del conglomerato, minimizzando l'influenza di disomogeneità locali.

La prova consente di monitorare il decremento del modulo di rigidezza in funzione del numero di cicli di applicazione del carico. Per la definizione della vita a fatica ( $N_f$ ) sono stati considerati il criterio di rottura basato sulla riduzione del 50% del modulo iniziale (in tal caso la rigidezza iniziale è stata assunta pari alla media dei valori registrati tra il 98° e il 102° ciclo) e il criterio dell'*Energy Ratio*.



Figura 27: Test di fatica in configurazione 4PB

Per le prove di trazione indiretta in controllo di carico con periodo di riposo (IT-CY), eseguite su provini di forma cilindrica, sono state eseguite 2 ripetizioni per 3 differenti livelli tenso-deformativi per ciascuna miscela.

La tensione da applicare per ciascun provino è stata definita a partire dai valori di modulo definiti in precedenza ai sensi della EN 12697-26. In tal modo è stato possibile stimare il livello deformativo iniziale atteso in termini di deformazione resiliente, applicando la seguente relazione:

$$S_{mix,n} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_{r,n}} \cdot (1 + 3\nu) \cdot 10^6 ,$$

dove:

- $S_{mix,n}$  è il modulo di rigidezza al ciclo n, in MPa;
- $\sigma_0$  è l'ampiezza della tensione di trazione al centro del provino, in kPa;
- $\varepsilon_{r,n}$  è l'ampiezza della deformazione resiliente al ciclo n, in  $\mu\text{m}/\text{m}$ ;
- $\nu$  è il coefficiente di Poisson, assunto pari a 0,35;

La deformazione resiliente attesa dev'essere compresa tra 70 e 400  $\mu\text{m}/\text{m}$  durante i primi dieci cicli, mentre la vita a fatica finale del provino testato deve essere compresa tra  $10^3$  e  $10^6$  numero di cicli di applicazione del carico.

La deformazione iniziale viene calcolata come:

$$\varepsilon_0 = \left( \frac{2 \cdot \Delta H}{\Omega} \right) \cdot \left[ \frac{1 + 3\nu}{4 + \pi \cdot \nu - \pi} \right] \cdot 10^6 ,$$

dove:

- $\varepsilon_0$  è la deformazione iniziale al centro del provino, in  $\mu\text{m}/\text{m}$ ;
- $\Delta H$  è la deformazione orizzontale totale, determinato come differenza tra la media dello spostamento totale tra i cicli 98 e 102 e la media dello spostamento permanente tra i cicli 60 e 64, in mm;
- $\Omega$  è il diametro del provino, in mm;
- $\nu$  è il coefficiente di Poisson, assunto pari a 0,35.

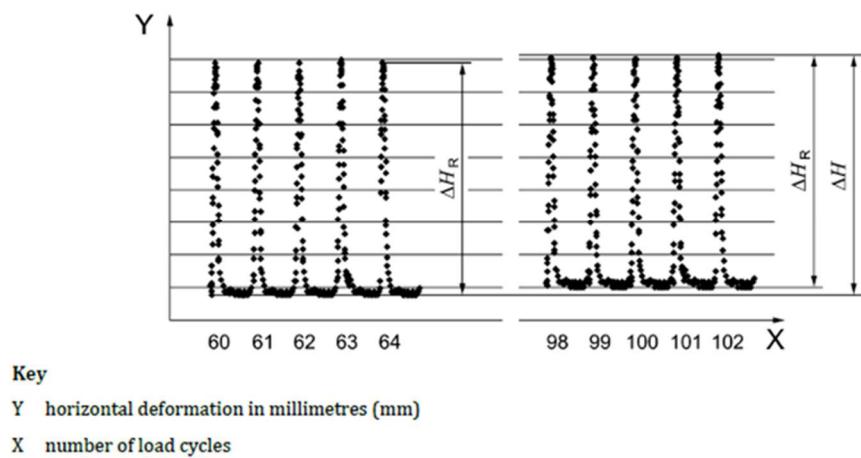


Figura 28: Definizione della deformazione totale e resiliente

Qualora si faccia riferimento ai concetti di deformazione resiliente e di energia dissipata per la determinazione del numero di cicli a rottura, si considera la seguente relazione:

$$\varepsilon_{R,n} = \left( \frac{2 \cdot \Delta H_{R,n}}{\Omega} \right) \cdot \left[ \frac{1 + 3\nu}{4 + \pi \cdot \nu - \pi} \right] \cdot 10^6 ,$$

dove:

- $\varepsilon_{R,n}$  è l'ampiezza della deformazione resiliente al ciclo  $n$ , in  $\mu\text{m}/\text{m}$ ;
- $\Delta H_{R,n}$  è l'ampiezza della deformazione orizzontale resiliente al ciclo  $n$ , in mm;
- $\Omega$  è il diametro del provino, in mm;
- $\nu$  è il coefficiente di Poisson, assunto pari a 0,35.

Nota la deformazione resiliente, è possibile poi ricavare l'Energy Ratio,  $w_n$ , correlato all'energia dissipata per ciclo di carico, mediante la relazione:

$$w_n = \frac{n}{\varepsilon_{R,n}} \cdot 10^6$$

La procedura di prova prevede l'applicazione di un carico compressivo ciclico lungo il diametro verticale del provino, con forma d'onda di tipo *haversine*. Il carico viene applicato con frequenza pari a 2 Hz, con tempo di carico di 0,1 s seguito da

un periodo di riposo di 0,4 s. Questa configurazione di carico intende simulare il passaggio discreto dei veicoli sulla pavimentazione, permettendo di considerare i fenomeni di recupero viscoelastico della deformazione e di *healing* del materiale.

Il principio fisico della prova si basa sul fatto che l'applicazione di un carico di compressione lungo il diametro verticale induce uno stato di trazione lungo il diametro orizzontale, ortogonale alla direzione del carico. Tuttavia, al centro del provino si sviluppa uno stato tensionale di tipo biassiale, caratterizzato da una tensione di trazione lungo l'asse orizzontale e da una tensione di compressione lungo quello verticale. La complessità di questo stato di sollecitazione costituisce la principale ragione per cui i risultati della prova non sono direttamente confrontabili con quelli ottenuti nelle configurazioni a flessione.

Per la definizione della vita a fatica ( $N_f$ ) sono stati considerati il criterio di rottura basato sulla riduzione del 50% del modulo iniziale (anche in questo caso la rigidezza iniziale è stata assunta pari alla media dei valori registrati tra il 98° e il 102° ciclo), il criterio dell'*Energy Ratio* e la rottura completa del provino.

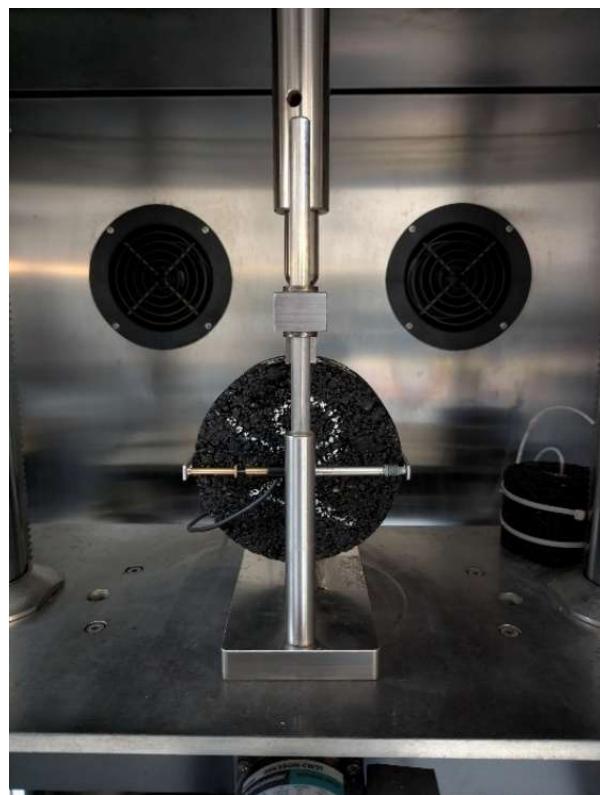


Figura 29: Test di fatica in configurazione IT-CY

Infine, per quanto riguarda le prove di trazione indiretta in controllo di carico senza periodo di riposo (CIT-CY), eseguite su provini di forma cilindrica, sono state eseguite almeno 3 ripetizioni per 3 differenti livelli tenso-deformativi per ciascuna miscela. La tensione da applicare per ciascun test è stata stimata a partire dai moduli di rigidezza determinati in precedenza ai sensi della EN 12697-26, applicando la seguente relazione:

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

dove:

- $S_{mix,n}$  è il modulo di rigidezza al ciclo n, in MPa;
- $\sigma_a$  è l'ampiezza della tensione di trazione al centro del provino, in kPa;
- $\varepsilon_a$  è l'ampiezza della deformazione orizzontale al centro del provino, in  $\mu\text{m}/\text{m}$ ;
- $\nu$  è il coefficiente di Poisson, assunto pari a 0,35;

I tre livelli tensionali sono stati selezionati in modo tale che la deformazione iniziale attesa ricadesse nell'intervallo 25–100  $\mu\text{m}/\text{m}$  e che la vita a fatica del provino risultasse compresa tra  $10^3$  e  $10^6$  cicli di carico.

Il principio fisico di base della prova CIT-CY è identico a quello della IT-CY: si induce uno stato di trazione indiretta attraverso una compressione diametrale. L'esecuzione della prova prevede tuttavia l'applicazione di un carico ciclico con forma d'onda sinusoidale continua, senza periodi di riposo, e frequenza di applicazione pari a 10 Hz. Questa configurazione di carico intende simulare l'effetto di un traffico veicolare intenso e ininterrotto, eliminando la variabile dei periodi di riposo.

Lo spostamento orizzontale misurato dai trasduttori, indotto dal carico sinusoidale, è descritto dalla seguente relazione:

$$u(t) = u_m + u_a \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) + u_d \cdot t ,$$

dove:

- $u_m$  è lo spostamento orizzontale medio, in mm;

- $u_a$  è l'ampiezza massima dello spostamento orizzontale indotto dal carico sinusoidale, in mm;
- $u_d$  è l'incremento di spostamento orizzontale, rappresentativo delle deformazioni viscoplastiche permanenti, in mm/s,
- $f$  è la frequenza di applicazione del carico, in Hz;
- $\phi$  è l'angolo di fase tra sollecitazione e spostamento, in gradi.

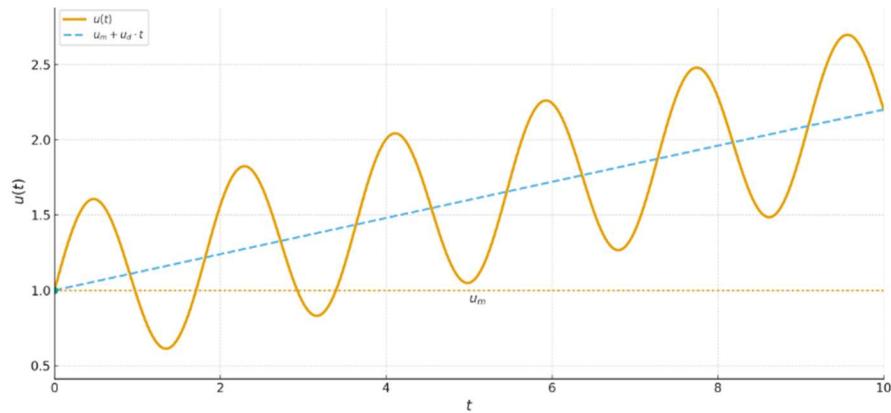


Figura 30: Spostamento orizzontale indotto dal carico sinusoidale

Considerando la simmetria del problema, la massima ampiezza della deformazione iniziale di trazione, determinata convenzionalmente come valore medio delle deformazioni misurate tra il 90° e il 100° ciclo, si ottiene dalla seguente espressione, derivata dalla teoria dell'elasticità:

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

dove:

- $\varepsilon_a$  è l'ampiezza massima della deformazione di trazione, in  $\mu\text{m}/\text{m}$ ;
- $u_a$  è l'ampiezza dello spostamento orizzontale, in mm;
- $\Omega$  è il diametro del provino, in mm;
- $\nu$  è il coefficiente di Poisson, assunto pari a 0,35.

Per le prove condotte in configurazione IT-CY, che prevedono l'applicazione di un carico con forma d'onda di tipo *haversine*, la deformazione di trazione al centro del provino viene determinata direttamente a partire dal massimo spostamento

orizzontale indotto dal carico ( $\Delta H$ ). Nelle prove CIT-CY, invece, tale deformazione è convenzionalmente assunta pari a due volte l'ampiezza massima della deformazione ( $\varepsilon_a$ ):

$$\Delta\varepsilon = 2 \cdot \varepsilon_a .$$

Per la definizione della vita a fatica ( $N_f$ ) nelle prove in configurazione CIT-CY, sono stati considerati il criterio di rottura basato sulla riduzione del 50% del modulo iniziale (in tal caso la rigidezza iniziale è stata assunta pari alla media dei valori registrati tra il 90° e il 100° ciclo, per neutralizzare gli effetti di assestamento primario), il criterio dell'*Energy Ratio* e la rottura completa del provino.



Figura 31: Provino giunto a rottura in un test di fatica in configurazione IT

## 4. ESITI DELLA Sperimentazione

Nel presente capitolo verranno presentati e commentati i risultati emersi dalle prove sperimentali condotte in laboratorio.

Allo scopo di semplificare la trattazione, è stata adottata la seguente nomenclatura per i provini cilindrici (CY) e prismatici (PR) realizzati, in riferimento alle diverse miscele, dove  $n$  indica l' $n$ -esimo provino della serie:

Specimen	Mix				
	Sp_20	PmB_20	Sp_50	PmB_50	Ref_20
CY	A_n	B_n	C_n	D_n	E_n
PR	A_PR_n	B_PR_n	C_PR_n	D_PR_n	E_PR_n

Tabella 11: Nomenclatura adottata per i provini

### 4.1. Proprietà volumetriche

#### 4.1.1. Densità teorica e apparente

Accanto alla determinazione sperimentale della massima massa volumica teorica mediante procedura volumetrica (metodo del picnometro), è stata effettuata, a fini comparativi, anche la stima analitica della TMD. Quest'ultima è stata ricavata sulla base delle densità apparenti e delle percentuali in peso dei singoli costituenti della miscela, conformemente a quanto prescritto dalla EN 12697-5 [64]. Ai fini del calcolo si è fatto riferimento alla seguente relazione:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\sum_i \frac{p_i}{\rho_i}},$$

dove:

- $\rho_{mc}$  è la massima densità teorica della miscela, in  $\text{Mg/m}^3$ ;
- $p_i$  è la percentuale, sul peso della miscela, dell' $i$ -esimo componente;
- $\rho_i$  è la densità apparente dell' $i$ -esimo componente, in  $\text{Mg/m}^3$ .

Di seguito si riportano i valori di densità apparente di ciascun componente e le relative percentuali in peso per ciascuna miscela, nonché i valori di TMD volumetrica ( $\rho_{mv}$ ) e analitica ( $\rho_{mc}$ ).

Componente	$\rho$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	Sp_20 [%]	PmB_20 [%]	Ref_20 [%]	Sp_50 [%]	PmB_50 [%]
<b>Sabbia 0/5</b>	2.780	44.822	45.058	45.058	26.249	26.387
<b>Pietrisco 8/16</b>	2.849	17.328	17.419	17.419	9.805	9.857
<b>Pietrisco 16/22</b>	2.813	10.818	10.875	10.875	10.780	10.836
<b>RAP 0/12 bianco</b>	2.765	11.400	11.460	11.460	28.500	28.650
<b>RAP 0/20 bianco</b>	2.774	7.600	7.640	7.640	19.000	19.100
<b>Filler</b>	2.730	3.032	3.048	3.048	0.666	0.669
<b>Bitume RAP 0/12</b>	1.000	0.621	0.625	0.625	1.553	1.561
<b>Bitume RAP 0/20</b>	1.000	0.315	0.317	0.317	0.789	0.793
<b>Bitume vergine</b>	1.000	3.504	3.498	3.498	2.009	1.996
<b>Polimero</b>	0.600	0.500	0.000	0.000	0.500	0.000
<b>Rejuvenator</b>	1.000	0.060	0.060	0.060	0.150	0.150
$\rho_{mc}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	-	<b>2.541</b>	<b>2.584</b>	<b>2.584</b>	<b>2.535</b>	<b>2.578</b>
$\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	-	<b>2.540</b>	<b>2.563</b>	<b>2.581</b>	<b>2.545</b>	<b>2.576</b>

Tabella 12: Densità apparenti dei materiali costituenti le miscele e valori di TMD analitica e sperimentale

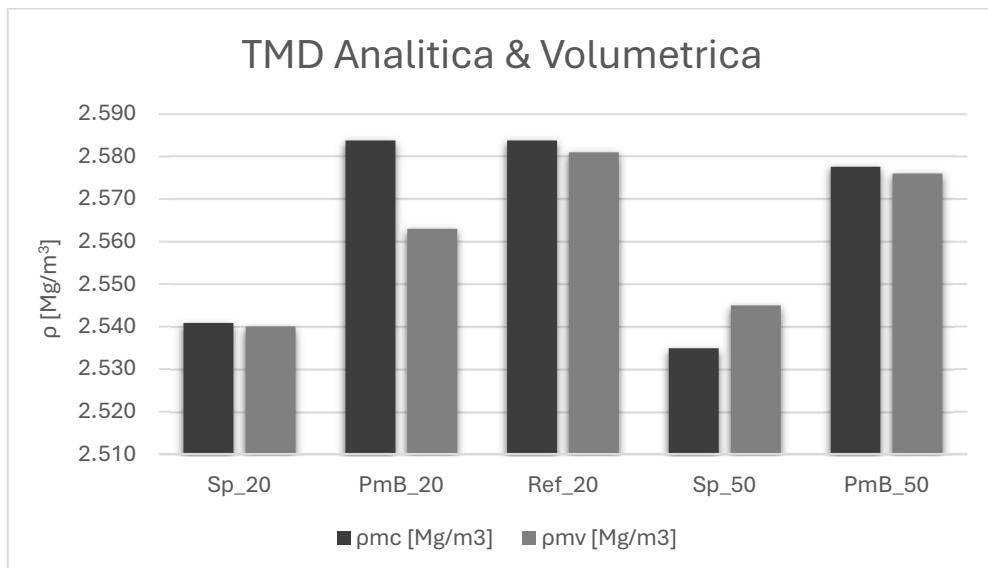


Figura 32: Confronto TMD determinata con procedura analitica e volumetrica

Si osserva una discrepanza tra i valori attesi, ottenuti mediante calcolo analitico, e quelli misurati sperimentalmente per le miscele Pmb\_20 e, in misura minore,

Sp\_50. Tale scostamento può essere ricondotto a variabilità intrinseche, legate al processo di campionamento e all'esecuzione delle prove.

La densità apparente delle miscele è stata determinata come valore medio dei risultati ottenuti mediante prove in configurazione Saturated Surface Dry (SSD), condotte su provini sia cilindrici sia prismatici, conformemente alla EN 12697-6 [70]. La norma richiede inoltre di verificare che la differenza relativa tra la densità apparente misurata per ciascun provino e il valore medio della serie non superi l'1%. L'applicazione di tale criterio non ha evidenziato scostamenti significativi rispetto alla media. Di seguito si riportano tabelle e grafici riepilogativi.

CY	Mix				
	Sp_20	PmB_20	Ref_20	Sp_50	PmB_50
$\rho_{ssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	<b>Media</b>	2.440	2.473	2.483	2.446
	<b>Dev Std</b>	0.0153	0.0131	0.0109	0.0065

Tabella 13: Densità apparente media delle miscele determinata su provini cilindrici

PR	Mix				
	Sp_20	PmB_20	Ref_20	Sp_50	PmB_50
$\rho_{ssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	<b>Media</b>	2.469	2.491	2.494	2.467
	<b>Dev Std</b>	0.016	0.006	0.007	0.014

Tabella 14: Densità apparente media delle miscele determinata su provini prismatici

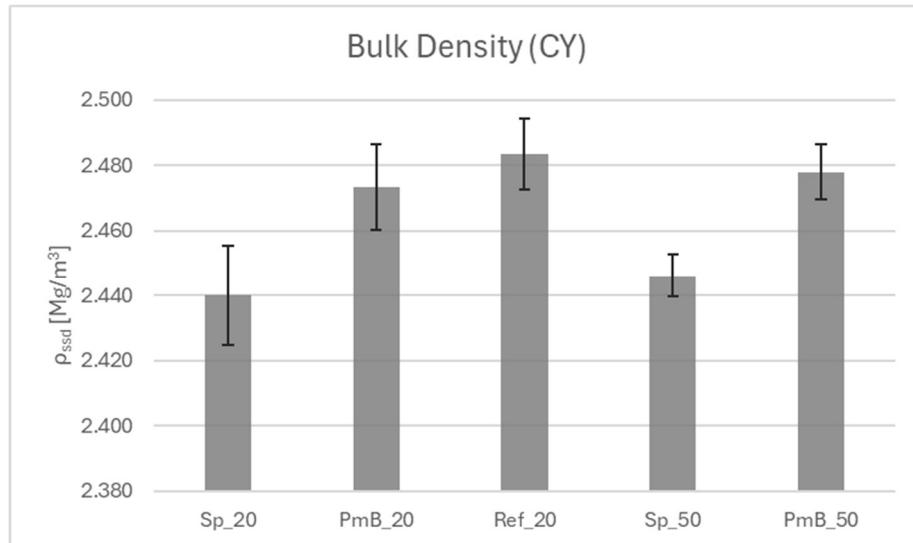


Figura 33: Densità apparente delle miscele, calcolata come media dei valori misurati su provini cilindrici

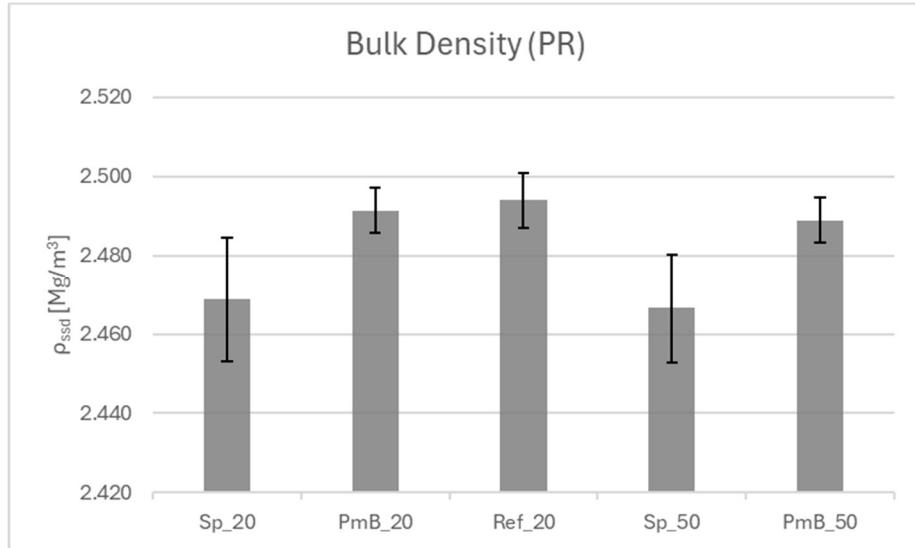


Figura 34: Densità apparente delle miscele, calcolata come media dei valori misurati su provini prismatici

La densità media, sia teorica sia apparente, delle miscele contenenti lo 0,5% di compound polimerico (in peso sulla miscela) risulta inferiore rispetto a quella delle miscele prive di tale additivo. Ciò era prevedibile, considerando la minor densità dei granuli di polimero rispetto a quella del bitume e degli aggregati, che vengono parzialmente sostituiti dall'additivo stesso. L'andamento osservato si conferma coerente sia per i provini cilindrici sia per quelli prismatici.

#### 4.1.2. Valutazione dei vuoti e dei parametri di compattazione

Per ciascun provino compattato sono stati determinati il contenuto di vuoti, allo scopo di verificare il raggiungimento del primo obiettivo del presente studio - ossia la possibilità di confrontare le prestazioni meccaniche delle miscele a parità di vuoti - e i parametri di compattazione, al fine di valutare le caratteristiche di lavorabilità delle miscele.

In particolare, sono stati calcolati, in funzione del numero di giri della pressa giratoria, il contenuto di vuoti geometrici ( $v_{geo}$ ) e quello di vuoti effettivi ( $v_{ssd}$ ), quest'ultimo ricavato a partire dal valore di densità apparente dei provini compattati, nonché la differenza tra vuoti geometrici ed effettivi ( $\Delta v$ ).

Sono state inoltre tracciate le curve di compattazione, da cui sono stati ottenuti i parametri di lavorabilità e di auto-addensamento, oltre al Construction

Densification Index (CDI). Quest'ultimo è un parametro adimensionale, definito come l'area sottesa alla curva di compattazione a partire dall'ottavo giro, in modo da simulare l'azione della vibrofinitrice durante la stesa, fino al raggiungimento di un addensamento pari al 92% della massima massa volumica teorica [71]. Questo indice consente di quantificare l'energia di compattazione necessaria affinché la miscela raggiunga determinati livelli di addensamento: una curva che tende rapidamente a valori elevati di densità corrisponde a un CDI più basso, indice di una miscela facilmente compattabile; viceversa, un CDI elevato è rappresentativo di maggiori energie di compattazione e quindi di una minore lavorabilità.

La percentuale di vuoti rispetto al volume di un campione compattato di conglomerato bituminoso è definita come:

$$\nu (\%) = \frac{V_v}{V_{tot}} * 100 ,$$

dove:

- $V_v$  è il volume dei vuoti d'aria contenuti all'interno del provino;
- $V_{tot}$  è il volume totale occupato dal provino compattato.

Sulla base di tale definizione, è possibile ricavare la relazione che lega la percentuale di vuoti alla massa volumica apparente e alla massima massa volumica teorica della miscela:

$$\nu (\%) = \left( 1 - \frac{MV}{TMD} \right) * 100 , \quad (1)$$

dove:

- MV è la massa volumica apparente del provino compattato;
- TMD è la massima massa volumica teorica della miscela, corrispondente alla condizione ideale di assenza di vuoti.

Nel corso della compattazione con pressa giratoria, il sistema di acquisizione registra la variazione dell'altezza del provino in funzione del numero di giri della pressa giratoria,  $h (n)$ . Tali dati consentono di determinare la percentuale di vuoti (geometrici) in funzione del numero di giri,  $n$ . Al crescere del numero di giri,  $h (n)$

decresce, riducendo il volume del provino e determinando un incremento della sua massa volumica apparente. In questo modo, il grado di compattazione può essere correlato al numero di passaggi di un rullo compattatore in cantiere, simulato dal parametro  $n$ .

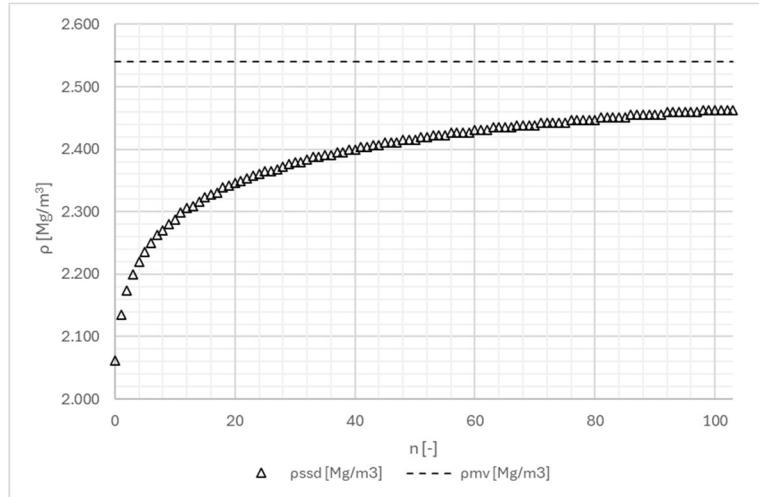


Figura 35: Aumento della densità apparente in funzione del numero di giri

Essendo la TMD una caratteristica intrinseca della miscela bituminosa, è possibile ricavare, mediante la (1), la relazione tra percentuale di vuoti e numero di giri, che avrà andamento decrescente. Nota la percentuale di vuoti in funzione del numero di giri, risulta quindi possibile determinare il grado di compattazione al variare del numero di giri,  $n$ , come:

$$C(n) = 1 - v(n) .$$

Rappresentando il grado di compattazione  $C$  in scala semi-logaritmica, otteniamo infine la cosiddetta *curva di compattazione* o *retta di lavorabilità*:

$$C(n) = C_1 + k * \log n ,$$

dove:

- $C_1$  è l'*auto-addensamento*, che rappresenta la capacità della miscela di addensarsi sotto l'azione del peso proprio;

- $k$  è il *gradiente di addensamento* o *lavorabilità*, parametro che ci consente di valutare la lavorabilità della miscela.

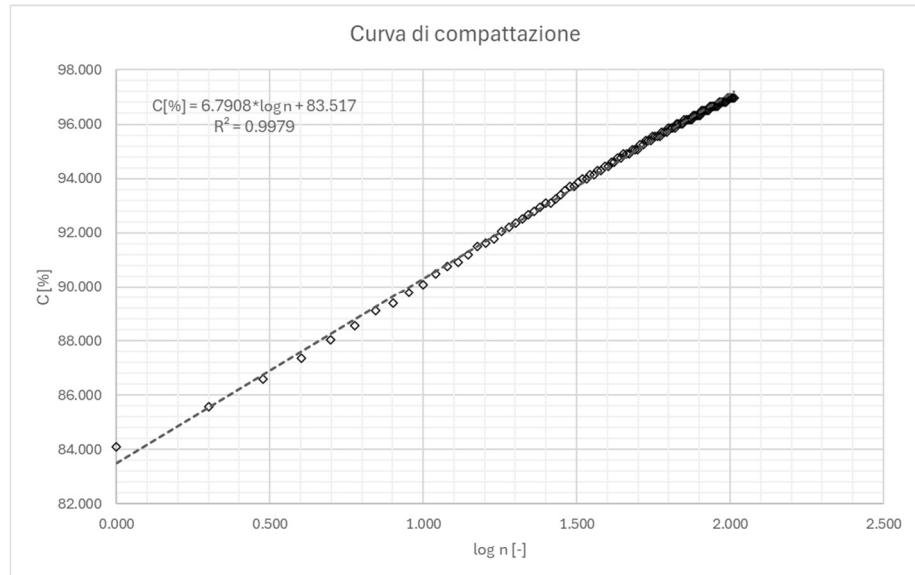


Figura 36: Curva di compattazione del provino A\_20

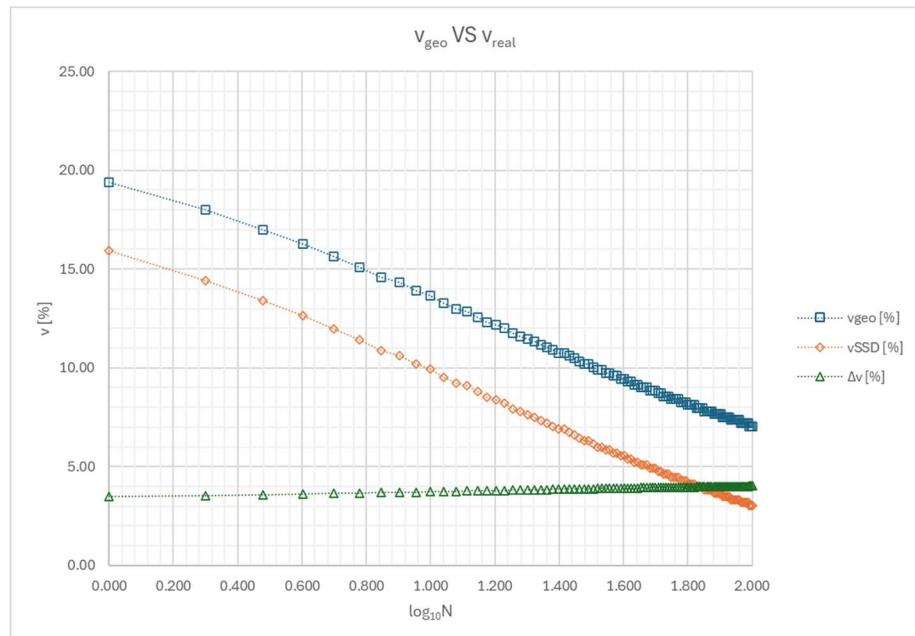


Figura 37: Differenza tra vuoti geometrici ed effettivi al variare del numero di giri per il provino A\_20

Per quanto riguarda i provini cilindrici, i dati completi relativi a tutti i provini confezionati per ciascuna miscela sono riportati in appendice. Di seguito è

presentata una tabella riepilogativa contenente i valori medi dei principali parametri considerati per ciascuna miscela: numero medio di giri della pressa necessari per raggiungere l'altezza target di 60 mm ( $N_{60, avg}$ ), percentuale di vuoti geometrici ( $v_{geo}$ ), percentuale di vuoti reali ( $v_{ssd}$ ), differenza tra vuoti geometrici ed effettivi ( $\Delta v$ ), auto-addensamento ( $C_1$ ), lavorabilità ( $k$ ) e CDI.

Mix	$N_{60, avg}$	$v_{geo} [\%]$	$v_{ssd} [\%]$	$\Delta v [\%]$	$C_1 [\%]$	$k [-]$	CDI [-]
<b>Sp_20</b>	119	6.97	<b>3.60</b>	3.37	83.05	6.59	30.08
<b>PmB_20</b>	215	7.08	<b>3.50</b>	3.58	81.40	6.66	103.10
<b>Ref_20</b>	277	7.05	<b>3.78</b>	3.28	80.67	6.51	175.58
<b>Sp_50</b>	187	7.02	<b>3.87</b>	3.14	81.92	6.34	85.63
<b>PmB_50</b>	226	7.01	<b>3.80</b>	3.20	81.69	6.32	104.18

Tabella 15: Valori medi dei vuoti e dei parametri di compattazione per ciascuna miscela

Si può notare una certa variabilità nel numero di giri necessari a raggiungere l'altezza - e, di conseguenza, il contenuto di vuoti - target, sia tra i singoli provini, che, in media, tra le diverse miscele.

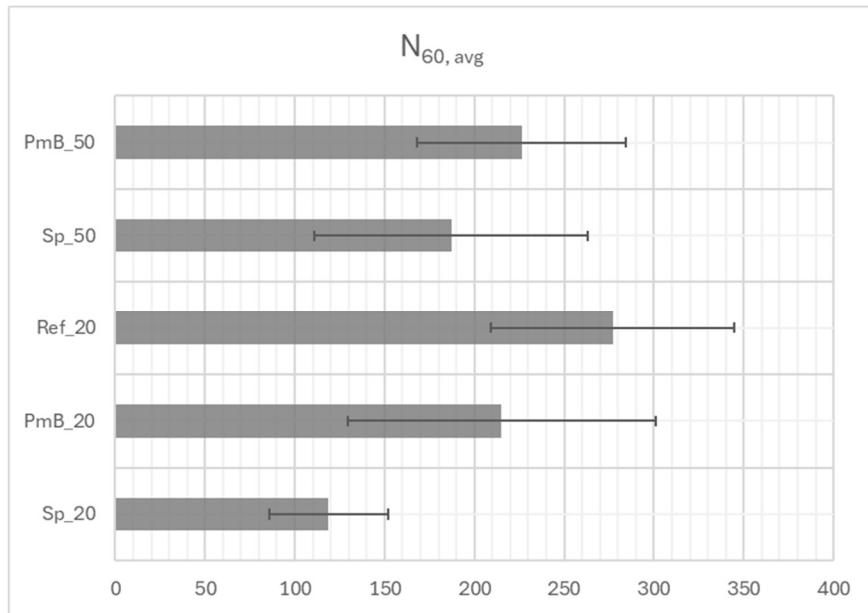


Figura 38: Media del numero massimo di giri della pressa per ciascuna miscela

Seppur influenzato dalla variabilità del numero di giri, il parametro CDI evidenzia una miglior lavorabilità delle miscele contenenti il compound polimerico.

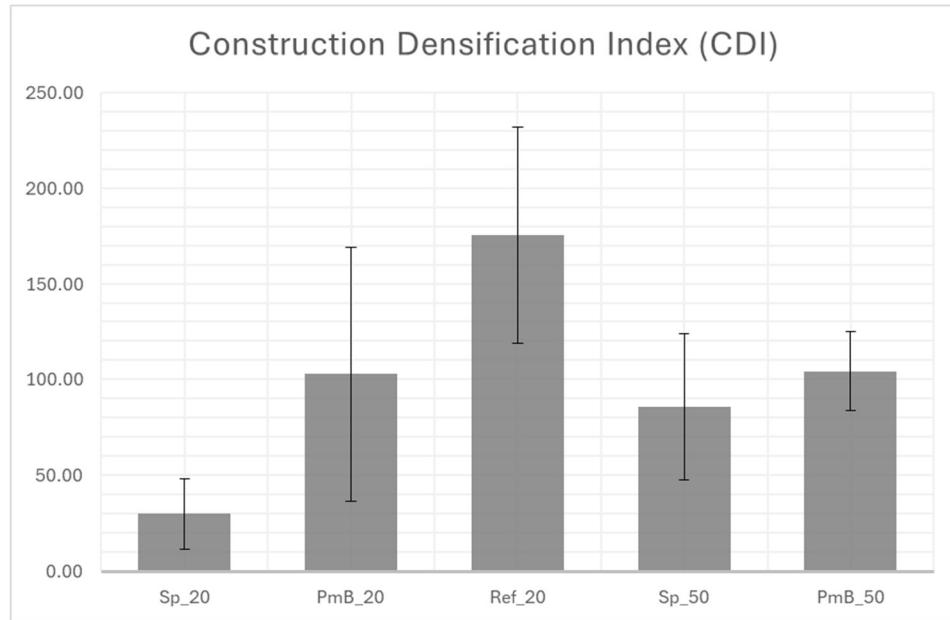


Figura 39: Valori medi del CDI per ciascuna miscela

Infine, considerando una tolleranza dello 0,4%, l'obiettivo di ottenere provini (mediamente) a parità di vuoti per ciascuna miscela può dirsi essenzialmente raggiunto.

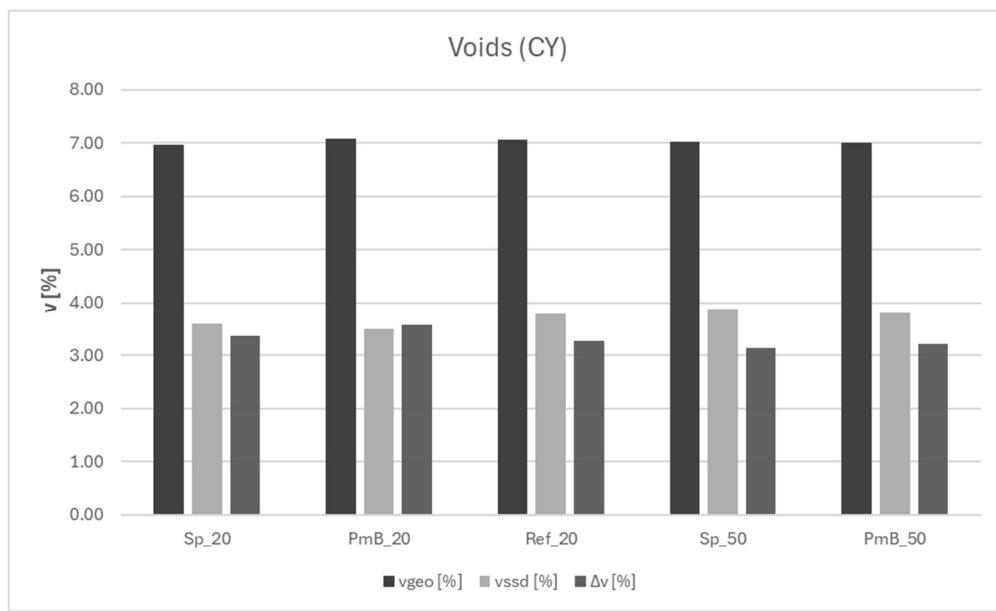


Figura 40: Contenuto medio di vuoti geometrici ed effettivi, con relativa differenza, nei provini cilindrici

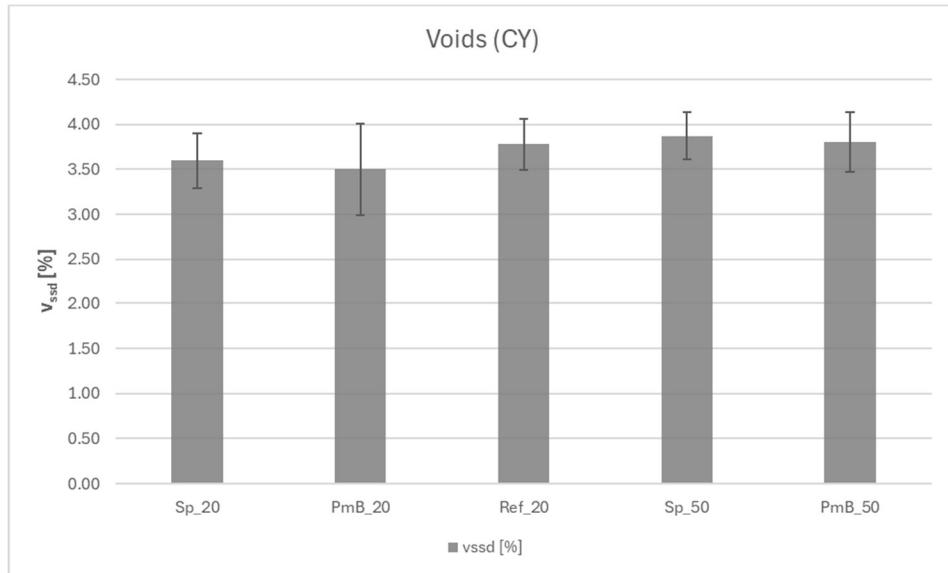


Figura 41: Contenuto medio di vuoti effettivi nei provini cilindrici per ciascuna miscela

In relazione ai provini prismatici invece, la scelta di imporre un contenuto di vuoti geometrici target del 6%, motivata da evidenze riportate in precedenti studi [72], ha portato ad ottenere un contenuto medio di vuoti effettivi leggermente inferiore al valore atteso del 3,5%. Anche in tal caso, tuttavia, considerando una tolleranza dello 0,6%, l'obiettivo di ottenere un contenuto di vuoti comparabile tra le diverse miscele può ritenersi sostanzialmente raggiunto.

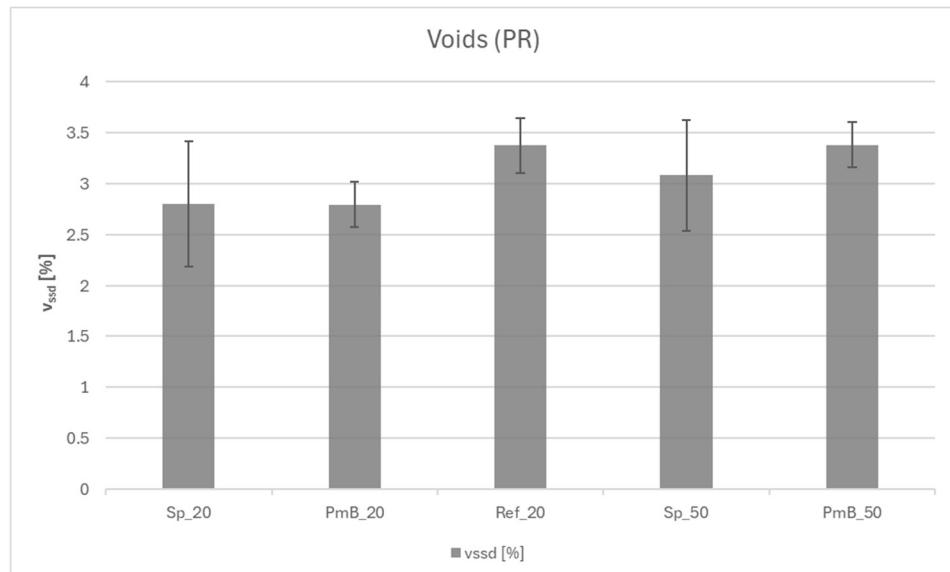


Figura 42: Contenuto medio di vuoti effettivi nei provini prismatici per ciascuna miscela

CY		Mix				
		Sp_20	PmB_20	Ref_20	Sp_50	PmB_50
v <sub>ssd</sub> [%]	Media	3.60	3.50	3.78	3.87	3.80
	Dev Std	0.31	0.51	0.43	0.26	0.33
PR		Mix				
		Sp_20	PmB_20	Ref_20	Sp_50	PmB_50
v <sub>ssd</sub> [%]	Media	2.80	2.80	3.37	3.08	3.38
	Dev Std	0.62	0.22	0.27	0.54	0.22

Tabella 16: Contenuto medio di vuoti reali nei provini cilindrici e prismatici per ciascuna miscela

## 4.2. *Moduli di rigidezza*

Come già indicato nel capitolo precedente, le prove per la determinazione dei moduli di rigidezza sono state condotte in configurazione IT-CY sui provini cilindrici, imponendo uno spostamento orizzontale massimo di 11,2  $\mu\text{m}$ , e in configurazione 4PB-PR sui provini prismatici, con una deformazione imposta pari a 50  $\mu\text{m/m}$ . Tutti i test sono stati eseguiti a una temperatura di 20  $^{\circ}\text{C}$ , con l’obiettivo di ricavare parametri utili alla definizione dei livelli tenso-deformativi da applicare nelle successive prove a fatica, anch’esse condotte alla stessa temperatura.

Vale la pena inoltre ricordare che il modulo di rigidezza di un conglomerato bituminoso è un parametro meccanico che esprime il rapporto tra la tensione applicata al materiale e la deformazione conseguente. Un modulo elevato è utile a limitare le deformazioni permanenti (ormaiamento), particolarmente critiche alle alte temperature, quando il legante tende a rammollire. Di contro, un’eccessiva rigidezza può rendere la pavimentazione più fragile, aumentando la vulnerabilità sia alla fessurazione per fatica, indotta dai carichi ciclici del traffico, sia alla fessurazione termica a basse temperature. Ne consegue la necessità di un compromesso progettuale tra resistenza all’ormaiamento e resistenza alla fessurazione per fatica.

Da precedenti studi [3] è emerso che sia l’introduzione di modificanti polimerici sia l’impiego di RAP producono un effetto irrigidente nelle miscele di conglomerato bituminoso. I risultati sperimentali ottenuti nel presente lavoro confermano pienamente tali evidenze. Si riportano di seguito le tabelle e i grafici riepilogativi dei valori misurati. Per quanto riguarda i provini prismatici, si fa

riferimento ai valori di modulo determinati alla frequenza di 10 Hz, corrispondente a quella impiegata nelle successive prove a fatica. I dati completi relativi a ciascuna miscela sono riportati in appendice.

CY	Mix				
	Sp_20	PmB_20	Ref_20	Sp_50	PmB_50
E [MPa]	9302	8130	8474	11340	12504
Dev Std [MPa]	1114	820	883	1516	1148
PR	Mix				
	Sp_20	PmB_20	Ref_20	Sp_50	PmB_50
E* <sub>10 Hz</sub>   [MPa]	9958	8405	9468	10388	13011
Dev Std [MPa]	778	1342	768	898	1551

Tabella 17: Valore medio dei moduli di rigidezza per ciascuna miscela

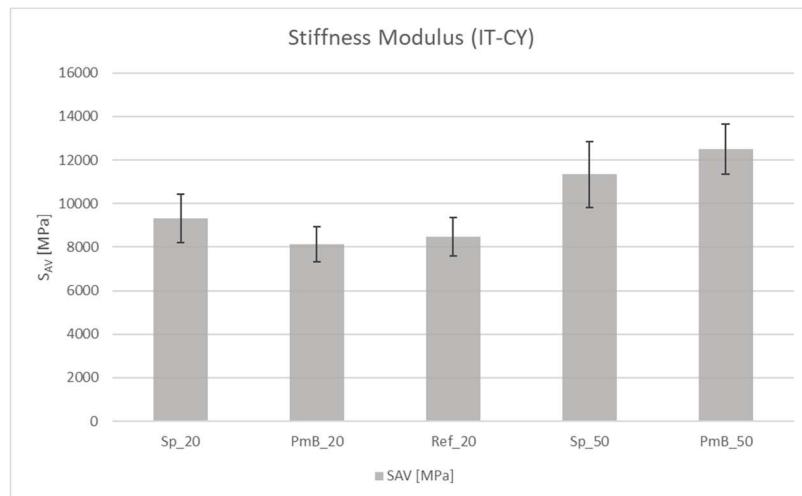


Figura 43: Moduli di rigidezza medi per le diverse miscele, ottenuti da prove IT-CY su provini cilindrici

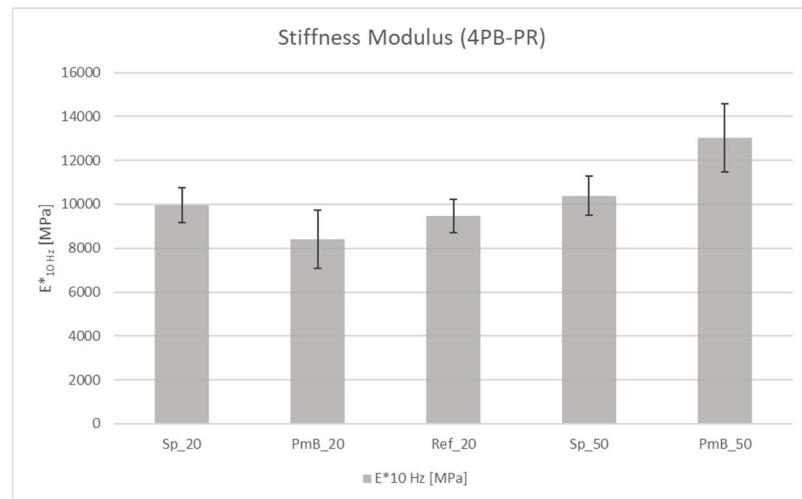


Figura 44: Moduli di rigidezza medi per le diverse miscele, ottenuti da prove 4PB-PR su provini prismatici

Per quanto riguarda le miscele contenenti il 20% di RAP, si osserva che la Sp\_20 presenta in media una rigidezza superiore rispetto alla PmB\_20 e alla Ref\_20, confermando l'effetto irrigidente del compound polimerico introdotto nella miscela mediante approccio “*hybrid*”. È interessante notare come le miscele confezionate con PmB, ossia con bitume modificato con polimero SBS — che incrementa il grado di elasticità del legante, ma non necessariamente la sua rigidezza — risultino quelle con i valori di rigidezza più bassi in assoluto.

Il maggior incremento di rigidezza si registra tuttavia nelle miscele contenenti il 50% di RAP: la PmB\_50 mostra in media la rigidezza più elevata tra tutte, risultato riconducibile al minor contenuto di bitume vergine di aggiunta rispetto alle miscele con il 20% di RAP. Nella Sp\_50, invece, la presenza del compound polimerico (in quantità pari allo 0,5% rispetto al peso totale della miscela), partecipando alla fase legante, tende probabilmente a determinare una riduzione della rigidezza rispetto alla PmB\_50, poiché determina un incremento complessivo della frazione legante vergine.

Nonostante le differenze concettuali tra i parametri determinati, l'andamento generale risulta coerente tra le diverse configurazioni di prova. Nel complesso, i risultati evidenziano come il contributo irrigidente del RAP risulti preponderante rispetto a quello fornito dall'introduzione di materiali polimerici, sia in modalità *wet* sia mediante approccio *ibrido*.

Al fine di verificare la significatività statistica delle differenze riscontrate tra i valori medi di rigidezza ottenuti per le diverse miscele, è stato eseguito un test ANOVA a una via (*one-way analysis of variance*). Tale analisi consente di valutare se le differenze osservate tra le medie di più gruppi siano statisticamente significative oppure se allo stato attuale non vi sono elementi per giudicarle tali, confrontando la variabilità interna ai gruppi con quella tra i gruppi stessi.

L'esito del test ha evidenziato la presenza di differenze statisticamente significative tra le rigidezze medie delle varie miscele, indicando che la tipologia di legante e la percentuale di RAP influenzano in modo rilevante il comportamento meccanico del conglomerato.

Successivamente è stato eseguito un test Post-Hoc, per individuare in modo puntuale quali coppie di miscele presentassero differenze significative tra loro. I

risultati ottenuti hanno confermato le differenze già evidenziate dalle osservazioni sperimentaliste.

ANOVA a una via (Fisher)

	F	gdl1	gdl2	p
Stiffness	53.5	4	104	< .001

Tabella 18: Risultati del test ANOVA a una via sui moduli di rigidezza ottenuti da prove IT-CY

Descrittive Gruppo

	Mix	N	Media	SD	SE
Stiffness	Sp_20	27	9302	1114	214
	PmB_20	20	8130	821	183
	Ref_20	18	8474	883	208
	Sp_50	26	11340	1516	297
	PmB_50	18	12504	1148	271

Tabella 19: Parametri descrittivi di ciascuna miscela, relativi a test eseguiti in configurazione IT-CY

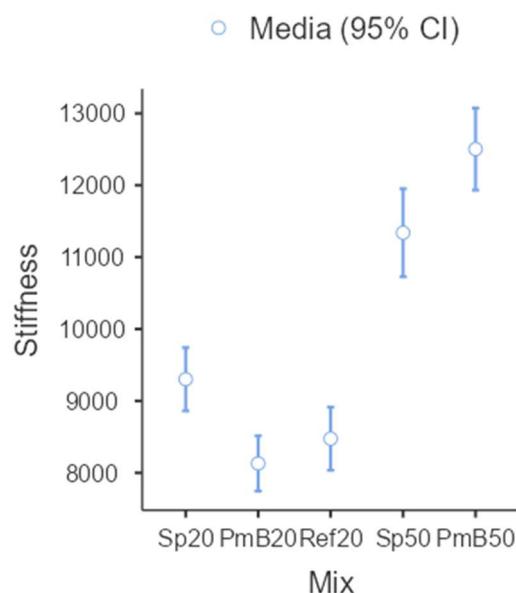


Figura 45: Valori medi di rigidezza per ciascuna miscela, con relativi intervalli di confidenza al 95%, ottenuti da prove in configurazione IT-CY

Test Post-Hoc di Tukey – Stiffness

		Sp_20	PmB_20	Ref_20	Sp_50	PmB_50
Sp_20	Differenza media	—	1172 **	828	-2039 ***	-3203 ***
	valore p	—	0.007	0.135	< .001	< .001
PmB_20	Differenza media	—	—	-344	-3211 ***	-4375 ***
	valore p	—	—	0.889	< .001	< .001
Ref_20	Differenza media	—	—	—	-2866 ***	-4030 ***
	valore p	—	—	—	< .001	< .001
Sp_50	Differenza media	—	—	—	—	-1164 *
	valore p	—	—	—	—	0.012
PmB_50	Differenza media	—	—	—	—	—
	valore p	—	—	—	—	—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Tabella 20: Risultati del test post hoc eseguito sui valori di rigidezza ottenuti mediante prove IT-CY

ANOVA a una via (Fisher)

	F	gdl1	gdl2	p
Stiffness	18.5	4	34	< .001

Tabella 21: Risultati del test ANOVA a una via sui moduli di rigidezza ottenuti da prove 4PB-PR

Descrittive Gruppo

	Mix	N	Media	SD	SE
Stiffness	Sp_20	8	9958	778	275
	PmB_20	8	8405	1342	475
	Ref_20	7	9468	768	290
	Sp_50	8	10388	898	317
	PmB_50	8	13011	1551	549

Tabella 22: Parametri descrittivi di ciascuna miscela, relativi a test eseguiti in configurazione 4PB-PR

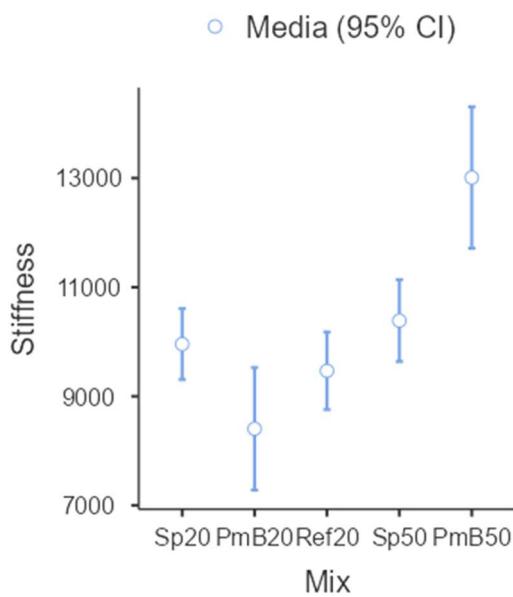


Figura 46: Valori medi di rigidezza per ciascuna miscela, con relativi intervalli di confidenza al 95%, ottenuti da prove in configurazione 4PB-PR

Test Post-Hoc di Tukey – Stiffness

		Sp_20	PmB_20	Ref_20	Sp_50	PmB_50
Sp_20	Differenza media	—	1553	490	-430	-3053 ***
	valore p	—	0.065	0.915	0.939	< .001
PmB_20	Differenza media		—	-1063	-1983 **	-4606 ***
	valore p		—	0.374	0.010	< .001
Ref_20	Differenza media			—	-920	-3543 ***
	valore p			—	0.518	< .001
Sp_50	Differenza media				—	-2623 ***
	valore p				—	< .001
PmB_50	Differenza media					—
	valore p					—

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Tabella 23: Risultati del test post hoc eseguito sui valori di rigidezza ottenuti mediante prove 4PB-PR

### 4.3. Prestazioni a fatica

Nel presente paragrafo verranno presentati i risultati ottenuti nei test per la caratterizzazione della resistenza a fatica delle cinque diverse miscele di conglomerato bituminoso oggetto di analisi. Come già specificato, la valutazione è stata condotta in conformità alla norma europea EN 12697-24, impiegando tre differenti configurazioni di prova:

- Trazione indiretta con periodi di riposo (IT-CY): prova a controllo di carico su provini cilindrici, che prevede l'applicazione di una sollecitazione compressiva ciclica lungo il diametro verticale del provino, con forma d'onda di tipo *haversine*. Il carico è applicato con frequenza pari a 2 Hz, per una durata di 0,1 s seguita da un periodo di riposo di 0,4 s. Per questa configurazione sono state eseguite tre ripetizioni per due differenti livelli tensionali per ciascuna miscela;
- Trazione indiretta senza periodi di riposo (CIT-CY): prova a controllo di carico su provini cilindrici, che prevede l'applicazione di una sollecitazione ciclica con forma d'onda sinusoidale, senza periodi di riposo, a una frequenza di 10 Hz. Per questa configurazione sono state previste almeno tre ripetizioni per tre differenti livelli tensionali per ciascuna miscela;
- Flessione a quattro punti (4PB-PR): prova a controllo di deformazione eseguita su provini prismatici, sottoposti a sollecitazioni flettenti periodiche mediante l'applicazione di un carico sinusoidale a una frequenza di 10 Hz. Tale configurazione consente di generare, nella zona centrale della trave, una condizione di momento (e quindi di deformazione) costante. Per questa configurazione sono stati utilizzati otto provini per ciascuna miscela.

Attraverso la regressione dei dati sperimentali ottenuti dalle prove di fatica, si può estrapolare il valore di deformazione orizzontale corrispondente a  $N_f = 10^6$  cicli, ossia  $\epsilon_6$ , espresso in  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Tale parametro viene assunto convenzionalmente come indice sintetico delle prestazioni a fatica della miscela. Un valore più elevato di  $\epsilon_6$  indica che il materiale è in grado di sopportare deformazioni maggiori prima di raggiungere la rottura per fatica, quindi una maggiore duttilità e capacità di

dissipazione energetica. In termini pratici, una miscela con  $\varepsilon_6$  più alto è più resistente alla fessurazione da fatica, poiché tollera livelli di deformazione più ampi senza perdere la propria integrità strutturale. Al contrario, un  $\varepsilon_6$  più basso denota un materiale più rigido e fragile e, di conseguenza, una vita a fatica più breve.

Nel complesso, sono stati eseguiti 88 test in configurazione di trazione indiretta (IT) su provini cilindrici e 40 test in configurazione di flessione a 4 punti (4PB) su provini prismatici. Tutte le prove sono state condotte alla temperatura di 20 °C.

Per garantire l'affidabilità statistica dei dati, è stata condotta un'analisi per l'individuazione di valori anomali (*outliers*) utilizzando il *metodo del range interquartile* (IQR). Questo approccio si basa sulla deviazione dei dati rispetto alla mediana ed è particolarmente robusto in presenza di valori estremi. In primo luogo, sono stati determinati i residui (distanza verticale) di ciascun punto sperimentale rispetto alla retta di regressione della legge di fatica. Successivamente, sono stati calcolati il primo quartile (Q1), corrispondente al valore al di sotto del quale si trova il 25% dei dati, e il terzo quartile (Q3), corrispondente al valore al di sotto del quale si trova il 75% dei dati. L'intervallo interquartile (IQR) è stato quindi definito come:

$$IQR = Q3 - Q1 .$$

Concettualmente, l'IQR rappresenta l'ampiezza dell'intervallo contenente il “50% centrale” dei dati. Sono stati poi determinati gli estremi dell'intervallo di accettabilità dei dati:

$$T_{sup} = Q3 + 1.5 \times IQR ,$$

$$T_{inf} = Q1 - 1.5 \times IQR .$$

I punti i cui residui cadono al di fuori dell'intervallo di accettazione sono stati identificati come outliers. Complessivamente, considerando le due configurazioni di prova su provini cilindrici (IT-CY e CIT-CY), sono stati individuati 14 outliers, che sono stati esclusi dalle successive elaborazioni per la determinazione delle leggi di fatica.

È opportuno sottolineare che, durante la campagna sperimentale, le prove di flessione a quattro punti (4PB-PR) hanno evidenziato una variabilità dei risultati superiore alle aspettative, significativamente maggiore rispetto alle altre due configurazioni. Tale elevata dispersione dei dati ha reso più complessa l'interpretazione dei risultati e la definizione di una legge di fatica robusta per questa configurazione.

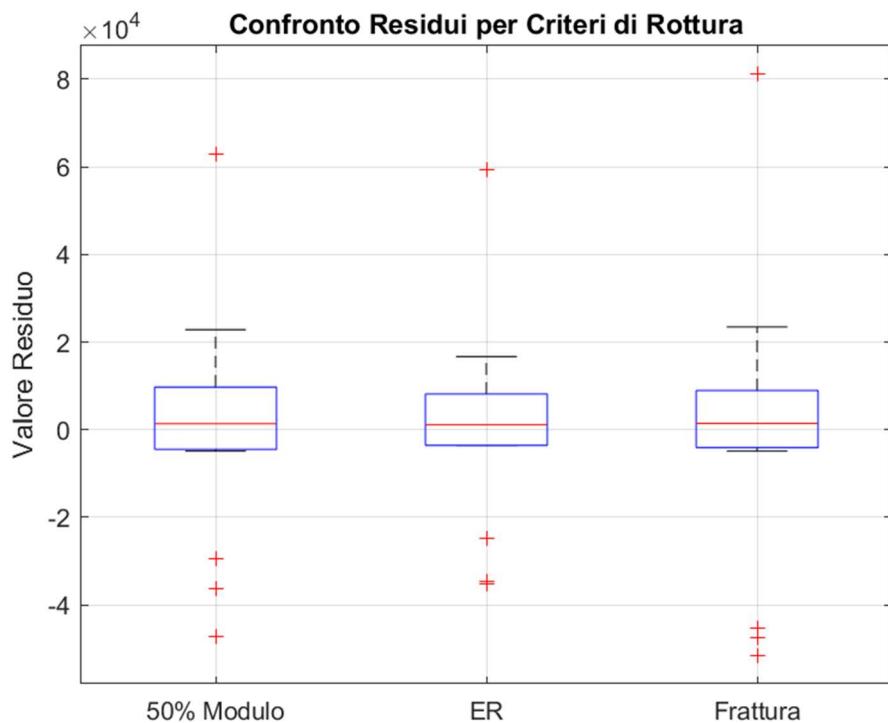


Figura 47: Boxplot dei residui per i diversi criteri di rottura, relativi alla configurazione di prova CIT-CY per la miscela Sp\_50, con indicazione degli outliers

I risultati verranno presentati separatamente per ciascuna delle tre configurazioni di prova, accompagnati da un'analisi critica finalizzata a valutare l'influenza del tipo di modifica polimerica (*wet* e *hybrid*) e della percentuale di RAP (20% e 50%) sulle prestazioni a fatica delle miscele.

Le analisi che seguono si focalizzano sul confronto tra le diverse miscele oggetto di studio. A titolo esemplificativo, sono riportate unicamente le curve di fatica ottenute secondo il criterio dell'Energy Ratio (ER), nelle quali è evidenziato il dominio di esistenza dei dati sperimentali e l'estrapolazione della retta fino a  $10^6$  cicli. Per i dati completi, relativi a tutti i criteri di rottura e a ciascuna miscela, si rimanda invece all'Appendice.

### 4.3.1. Trazione indiretta con periodi di riposo (IT-CY)

Nelle prove condotte in configurazione IT-CY, eseguite in controllo di carico su provini cilindrici, la sollecitazione è applicata con una frequenza di 2 Hz, corrispondente a un tempo di applicazione del carico di 0,1 s, seguito da un periodo di riposo di 0,4 s. Tale sequenza consente di considerare i fenomeni di recupero viscoelastico della deformazione e i meccanismi di autoriparazione (*healing*) tipici dei materiali bituminosi.

I risultati ottenuti, espressi in termini di parametri di regressione della legge di fatica — intercetta ( $k_e$ ) e pendenza ( $n_e$ ) — e del valore di  $\varepsilon_6$  sono riportati nella tabella seguente per ciascuna miscela e per i tre criteri di rottura considerati. È inoltre indicato il coefficiente di determinazione ( $R^2$ ), che esprime il grado di correlazione tra i dati sperimentali e il modello di regressione.

IT-CY					
Mix	Criterio	$k_e$ [-]	$n_e$ [-]	$R^2$ [-]	$\varepsilon_6$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
Sp_20	<b>50%</b>	1.87E+11	-3.336	0.960	38
	<b>ER</b>	5.28E+11	-3.531	0.984	42
	<b>ROTTURA</b>	7.04E+11	-3.525	0.973	46
PmB_20	<b>50%</b>	9.38E+10	-3.089	0.889	41
	<b>ER</b>	3.49E+11	-3.335	0.861	46
	<b>ROTTURA</b>	2.46E+11	-3.213	0.866	48
Ref_20	<b>50%</b>	3.20E+10	-3.015	0.877	31
	<b>ER</b>	1.53E+11	-3.301	0.928	37
	<b>ROTTURA</b>	1.30E+11	-3.213	0.918	39
Sp_50	<b>50%</b>	2.38E+09	-2.484	0.971	23
	<b>ER</b>	2.99E+09	-2.540	0.975	23
	<b>ROTTURA</b>	4.11E+09	-2.540	0.977	26
PmB_50	<b>50%</b>	8.54E+09	-2.744	0.882	27
	<b>ER</b>	9.85E+09	-2.787	0.881	27
	<b>ROTTURA</b>	9.09E+09	-2.713	0.868	29

Tabella 24: Parametri di regressione e valori di  $\varepsilon_6$  per ciascuna miscela e per i diversi criteri di rottura (IT-CY)

Dall’analisi dei risultati emerge che, a parità di contenuto di RAP (20%), l’aggiunta del compound polimerico comporta un sensibile miglioramento della resistenza a fatica. La miscela PmB\_20 mostra prestazioni complessivamente

superiori rispetto alla Sp\_20. Entrambe, tuttavia, si collocano al di sopra della miscela di riferimento Ref\_20, priva di modifiche al legante, confermando l'efficacia della modifica polimerica — sia essa di tipo *wet* o *hybrid* — rispetto a miscele non modificate.

A contenuti di RAP più elevati (50%), la miscela modificata con tecnologia *wet* (PmB\_50) risulta leggermente più performante, in termini di  $\epsilon_0$ , rispetto a quella modificata con tecnologia *hybrid* (Sp\_50). Quest'ultima, tuttavia, presenta una pendenza inferiore della retta di fatica, indicativa di una maggiore “tolleranza al danno”, ossia una migliore capacità di resistere ai carichi elevati. Tale tendenza può essere attribuita agli elevati valori di rigidezza, che, in presenza di sollecitazioni intense, si traducono in deformazioni inferiori.

Per quanto riguarda invece l'effetto del contenuto di RAP, l'aumento della percentuale dal 20% al 50% determina un impatto negativo sulle prestazioni a fatica in questa configurazione di prova. Le miscele con RAP al 50% mostrano infatti un calo prestazionale significativo rispetto alle corrispondenti con il 20%, sebbene tale riduzione risulti meno marcata rispetto a quella osservata nei confronti della miscela di riferimento.

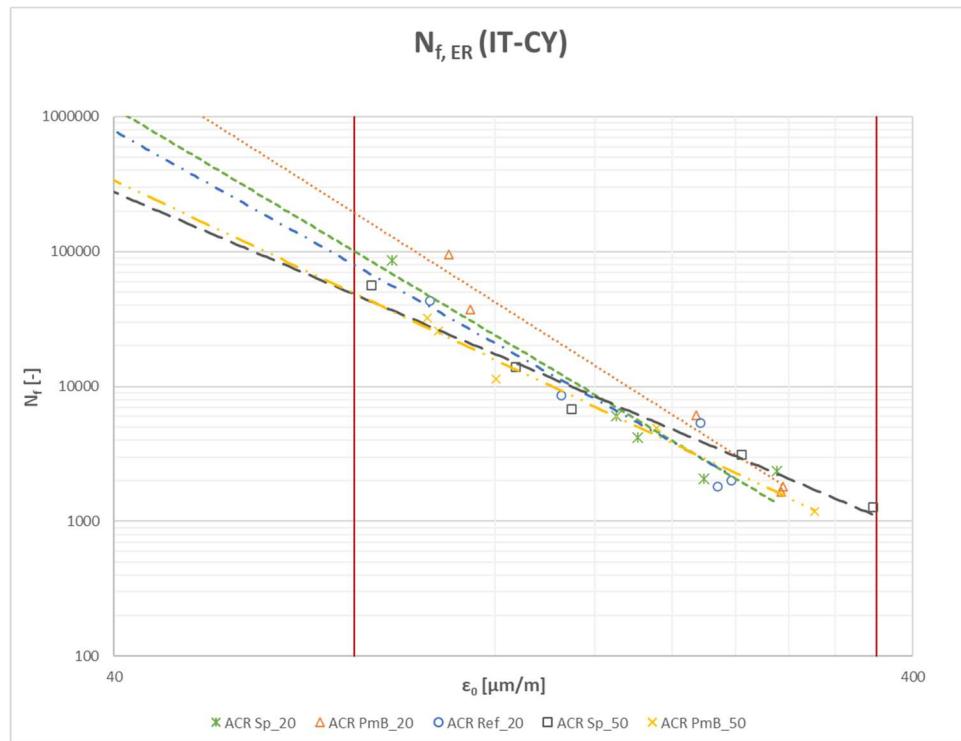


Figura 48: Rette di fatica in configurazione IT-CY per le diverse miscele, secondo il criterio ER

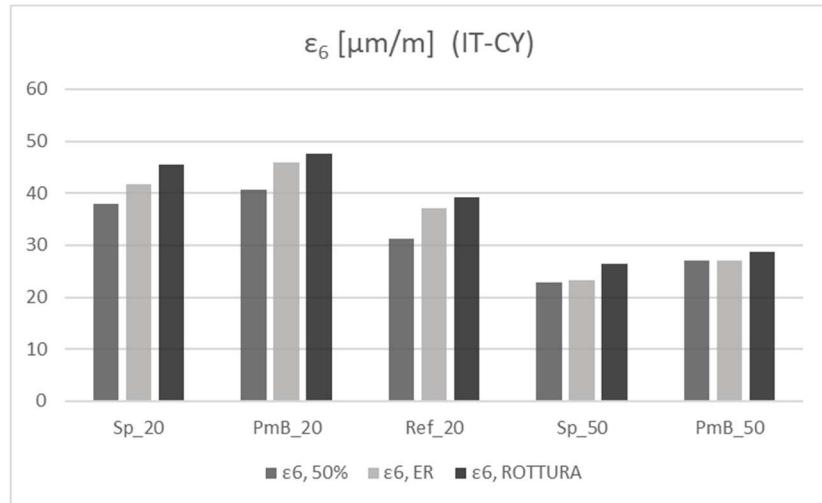


Figura 49: Valori di  $\epsilon_6$  delle diverse miscele per ciascun criterio di rottura in configurazione IT-CY

Per completezza, si riportano anche le rette di regressione che descrivono la relazione tra il numero di cicli a rottura ( $N_f$ ), calcolato secondo il criterio ER, e la tensione costante  $\sigma_0$  applicata. Si osserva che, a causa della maggiore rigidezza, le miscele contenenti il 50% di RAP mostrano valori di tensione applicata più elevati a parità di numero di cicli a rottura.

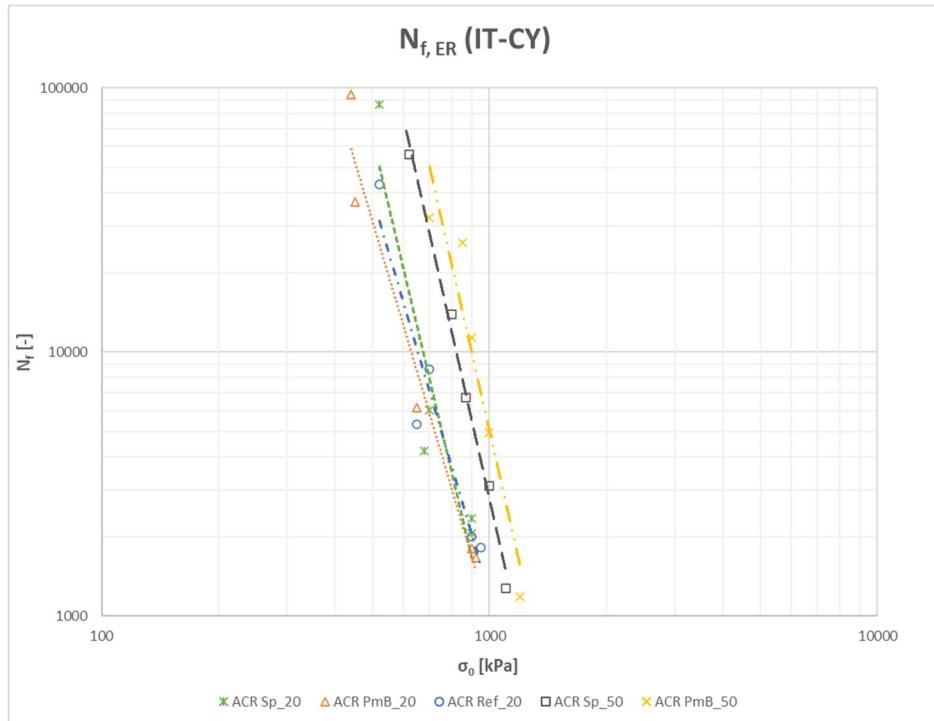


Figura 50: Relazione tra il numero di cicli a rottura e la tensione applicata in configurazione IT-CY, per le diverse miscele analizzate

### 4.3.2. Trazione indiretta senza periodi di riposo (CIT-CY)

Questa configurazione di prova, eseguita anch'essa in controllo di carico su provini cilindrici, si differenzia dalla precedente per l'applicazione di un carico sinusoidale di intensità costante alla frequenza di 10 Hz, senza periodi di riposo, risultando quindi rappresentativa di condizioni di traffico veicolare severe.

Anche in questo caso, nella tabella seguente sono riportati i parametri di regressione della legge di fatica,  $k_\epsilon$  e  $n_\epsilon$ , il coefficiente di determinazione  $R^2$  e i valori estrapolati di  $\epsilon_6$  per ciascuna miscela e per i tre criteri di rottura considerati.

CIT-CY					
Mix	Criterio	$k_\epsilon$ [-]	$n_\epsilon$ [-]	$R^2$ [-]	$\epsilon_6$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
Sp_20	50%	1.25E+11	-3.625	0.945	25
	ER	1.23E+11	-3.651	0.950	25
	ROTTURA	1.75E+11	-3.639	0.966	28
PmB_20	50%	1.84E+11	-3.696	0.919	27
	ER	1.70E+11	-3.706	0.942	26
	ROTTURA	2.69E+11	-3.730	0.915	29
Ref_20	50%	1.90E+11	-3.754	0.978	25
	ER	1.81E+11	-3.766	0.975	25
	ROTTURA	2.11E+11	-3.725	0.977	27
Sp_50	50%	3.99E+10	-3.297	0.958	25
	ER	5.76E+10	-3.406	0.953	25
	ROTTURA	9.04E+10	-3.427	0.970	28
PmB_50	50%	2.01E+11	-3.764	0.838	26
	ER	2.54E+11	-3.834	0.852	26
	ROTTURA	3.68E+11	-3.834	0.879	28

Tabella 25: Parametri di regressione e valori di  $\epsilon_6$  per ciascuna miscela e per i diversi criteri di rottura (CIT-CY)

In relazione all'effetto della modifica polimerica, in questa configurazione di prova le differenze tra le diverse tecnologie di modifica risultano piuttosto contenute. In termini di  $\epsilon_6$ , le miscele mostrano prestazioni pressoché analoghe per tutti i criteri di rottura considerati. Tuttavia, analizzando le rette di fatica nel dominio di esistenza dei dati sperimentali, la miscela Sp\_50 evidenzia un comportamento leggermente migliore, associato anche a una minore pendenza della

retta di regressione. Questo risultato suggerisce che, in tali condizioni di carico, la modifica polimerica con approccio *hybrid*, pur non apportando vantaggi significativi rispetto alla miscela di riferimento, possa comunque garantire prestazioni comparabili o lievemente superiori rispetto alla modifica *wet*.

Per quanto riguarda l'effetto del contenuto di RAP, si osserva un comportamento opposto rispetto a quanto rilevato nella prova IT-CY: in questa configurazione, l'incremento del RAP dal 20% al 50% consente alle miscele di eguagliare e, nel caso della Sp\_50, di superare le prestazioni delle rispettive miscele contenenti il 20% di RAP.

Tale evidenza risulta particolarmente significativa, poiché indica la possibilità di impiegare elevate percentuali di fresato senza compromettere la durabilità della pavimentazione e, anzi, con un potenziale miglioramento delle prestazioni in condizioni di carico continuo.

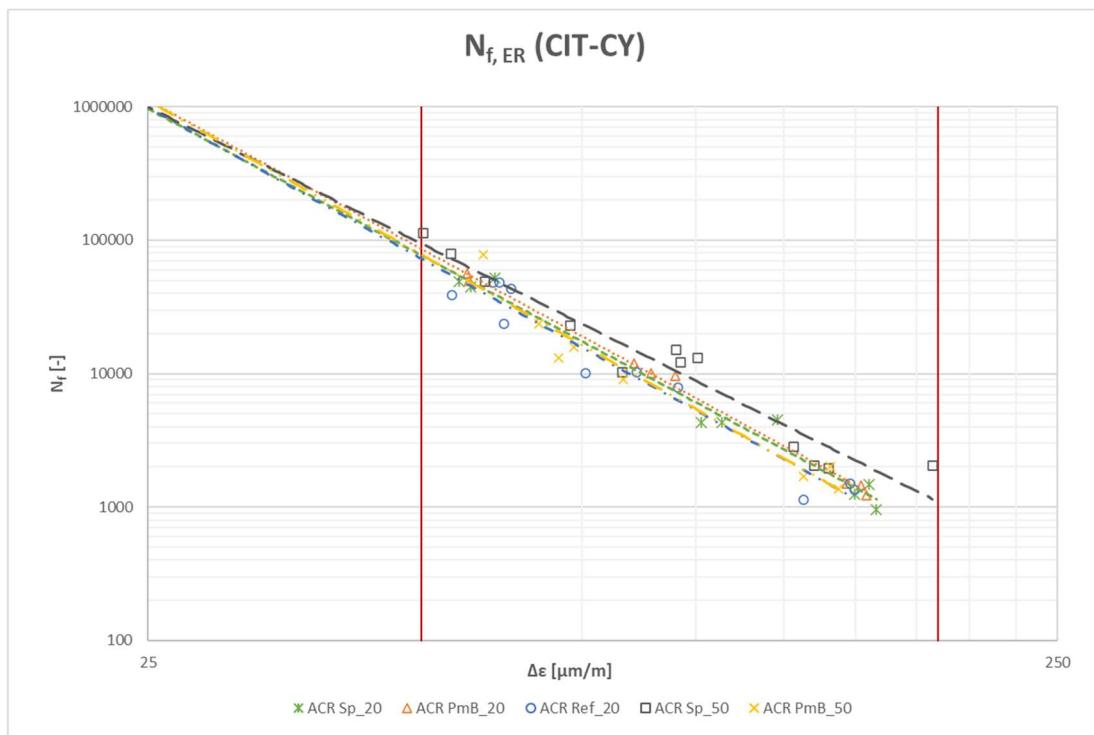


Figura 51: Rette di fatica in configurazione CIT-CY per le diverse miscele, secondo il criterio ER

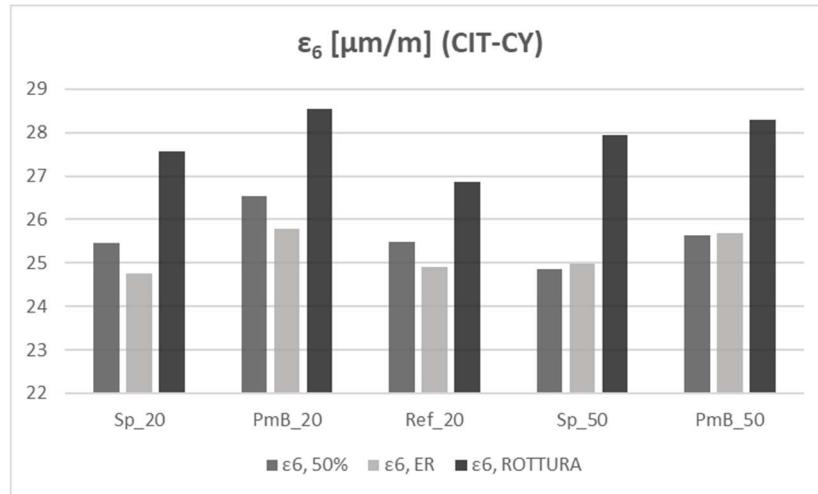


Figura 52: Valori di  $\epsilon_6$  delle diverse miscele per ciascun criterio di rottura in configurazione CIT-CY

Anche in questo caso sono riportate le rette di regressione che rappresentano la relazione tra il numero di cicli a rottura ( $N_f$ ), determinato secondo il criterio ER, e la tensione costante applicata ( $\sigma_a$ ). Si può notare come, in virtù della maggiore rigidità, le miscele contenenti il 50% di RAP presentino valori di tensione più elevati a parità di numero di cicli a rottura.

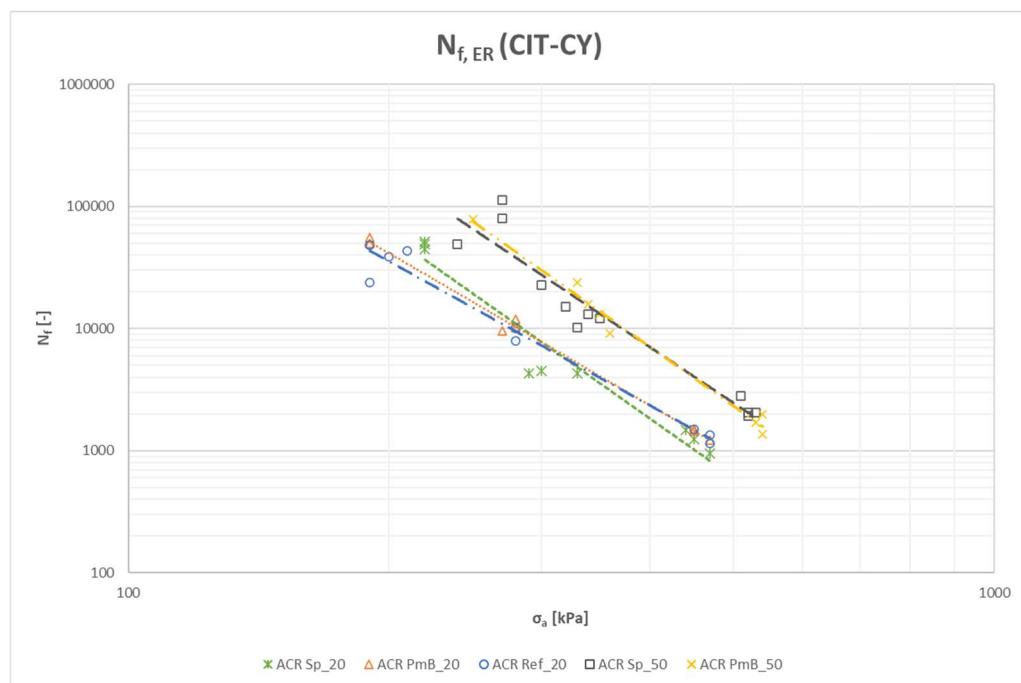


Figura 53: Relazione tra il numero di cicli a rottura e la tensione applicata in configurazione CIT-CY, per le diverse miscele analizzate

### 4.3.3. Flessione a quattro punti (4PB-PR)

La prova di flessione a quattro punti, eseguita in controllo di deformazione su provini prismatici mediante l'applicazione di un carico sinusoidale continuo alla frequenza di 10 Hz, è considerata il test di riferimento per la simulazione della fessurazione dal basso verso l'alto (*bottom-up cracking*). Essa riproduce il comportamento di strati bituminosi relativamente sottili e flessibili, nei quali il livello di deformazione alla base dello strato è governato principalmente dalla deformabilità degli strati sottostanti.

I risultati ottenuti in termini di  $\epsilon_6$ , riportati di seguito insieme ai parametri di regressione della legge di fatica,  $k_\epsilon$  e  $n_\epsilon$  e al coefficiente di determinazione  $R^2$ , risultano significativamente più elevati rispetto a quelli ottenuti nei test a trazione indiretta, a causa delle condizioni di carico a deformazione controllata.

Come già accennato, i dati ottenuti dai test eseguiti in questa configurazione mostrano una variabilità superiore alle attese e sensibilmente maggiore rispetto alle altre due modalità di prova, come confermato dai valori di  $R^2$ . Tale elevata dispersione ha reso più complessa sia l'interpretazione dei risultati sia la definizione di una legge di fatica sufficientemente robusta. Si è pertanto ritenuto opportuno non eseguire la ricerca di outliers con metodo IQR, anche in considerazione del numero relativamente ridotto di dati disponibili, e procedere con un'interpretazione di massima delle prestazioni a fatica delle miscele oggetto di studio.

4PB-PR					
Mix	Criterio	$k_\epsilon$ [-]	$n_\epsilon$ [-]	$R^2$ [-]	$\epsilon_6$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
Sp_20	50%	3.87E+20	-6.782	0.629	142
	ER	2.65E+20	-6.717	0.559	140
PmB_20	50%	5.32E+18	-5.534	0.506	199
	ER	1.77E+17	-4.859	0.459	206
Ref_20	50%	7.63E+14	-4.163	0.353	136
	ER	6.52E+13	-3.646	0.262	139
Sp_50	50%	2.91E+21	-7.053	0.510	156
	ER	2.46E+22	-7.470	0.509	156
PmB_50	50%	3.67E+23	-8.193	0.845	139
	ER	4.57E+22	-7.793	0.819	137

Tabella 26: Parametri di regressione e valori di  $\epsilon_6$  per ciascuna miscela e per i diversi criteri di rottura (4PB-PR)

Per quanto riguarda l'effetto della modifica polimerica, sembra confermarsi la tendenza già osservata nelle altre due configurazioni di prova: la modifica *wet*, rappresentata dalla miscela PmB\_20, appare la più performante in assoluto, mentre l'introduzione del compound polimerico in modalità *hybrid* sembra comunque garantire prestazioni migliori rispetto alla miscela di riferimento non modificata.

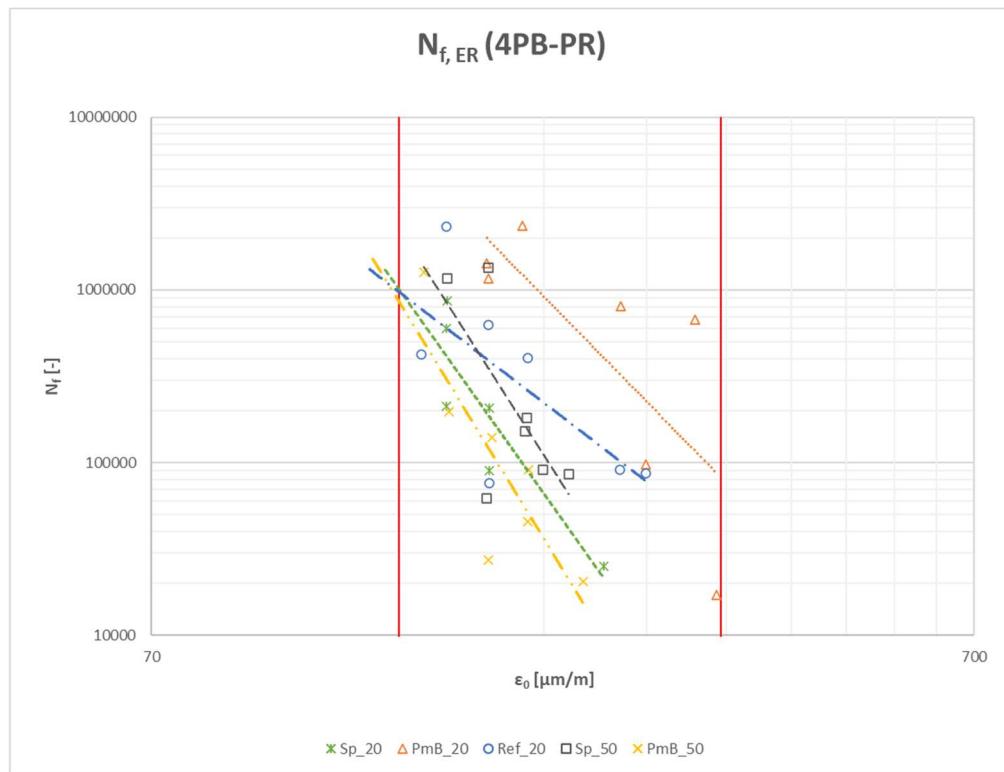


Figura 54: Rette di fatica in configurazione 4PB-PR per le diverse miscele, secondo il criterio ER

Con riferimento all'effetto del RAP, l'aumento della percentuale di fresato (dal 20% al 50%) sembra favorire in particolare la miscela con modifica *hybrid* (Sp\_50), che mostra prestazioni tendenzialmente superiori anche rispetto alla corrispondente con il 20% di RAP, comportamento peraltro osservabile anche nelle prove in configurazione CIT-CY, eseguite anch'esse a 10 Hz. Al contrario, nelle miscele con modifica *wet*, l'incremento del contenuto di RAP sembra determinare un marcato decadimento delle prestazioni, con la miscela PmB\_50 che apparentemente presenta le prestazioni peggiori in assoluto.

Nel complesso, questa tendenza sembrerebbe confermare la competitività della modifica polimerica con approccio *hybrid*, in particolare al crescere del contenuto di RAP.

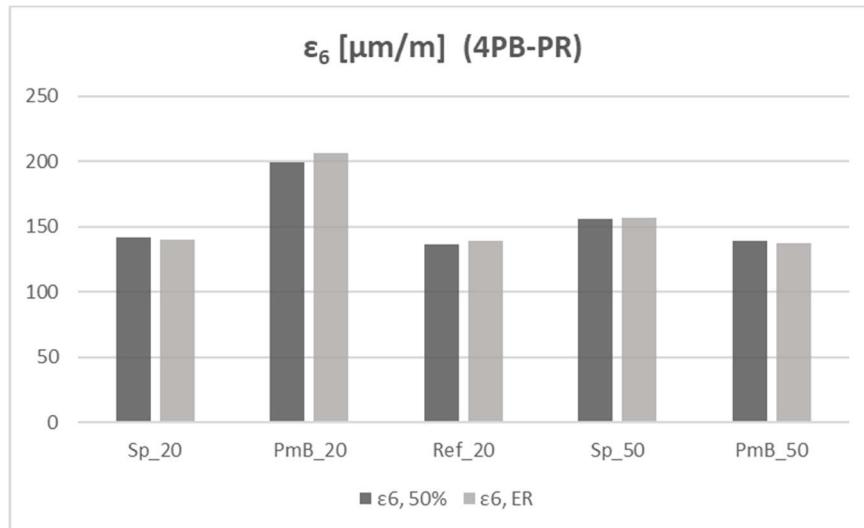


Figura 55: Valori di  $\epsilon_6$  delle diverse miscele per ciascun criterio di rottura in configurazione 4PB-PR

#### 4.3.4. Parametri alternativi per l'analisi dei risultati

Come già accennato, il parametro sintetico più comunemente impiegato per la valutazione della resistenza a fatica delle miscele bituminose è l' $\epsilon_6$ . Tale valore rappresenta il livello di deformazione iniziale (espresso in microstrain,  $\mu\epsilon$  o  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) associato alla rottura del provino - secondo i criteri convenzionali precedentemente illustrati - dopo l'applicazione di un milione di cicli di carico. Un  $\epsilon_6$  più elevato indica, pertanto, una migliore resistenza a fatica.

Occorre tuttavia sottolineare che questo parametro non costituisce una proprietà intrinseca del materiale, in quanto risente fortemente della configurazione sperimentale adottata. Ciò è confermato dalle marcate differenze osservate nei risultati ottenuti mediante differenti tipologie di test.

Diversi studi hanno infatti evidenziato la difficoltà di comparare i risultati di prove di fatica ottenuti con metodologie differenti. Ad esempio, nel lavoro “Fatigue of Bituminous Mixtures” di Di Benedetto et al. [47], viene mostrato come i valori di  $\epsilon_6$  ricavati da prove di trazione indiretta risultino significativamente inferiori

rispetto a quelli derivanti da configurazioni alternative, e come non sia possibile individuare correlazioni affidabili tra i risultati ottenuti con test di diverso tipo.

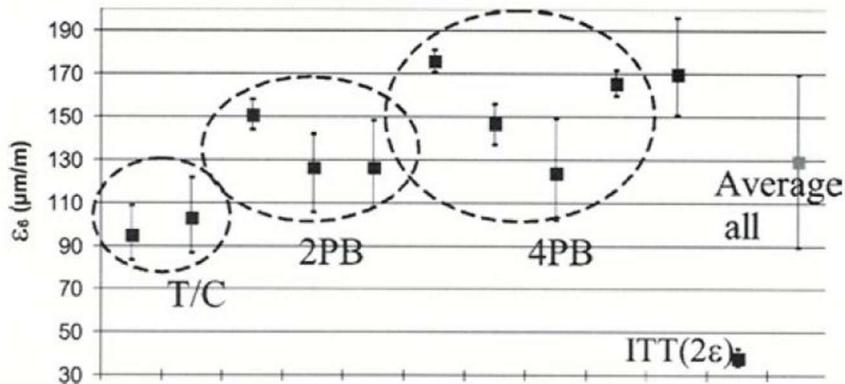


Figura 56: Valori di  $\epsilon_0$  ottenuti mediante diverse configurazioni di prova (fonte: Di Benedetto et al.)

Inoltre, le prove di trazione indiretta a controllo di carico, caratterizzate da uno stato tensionale triassiale non uniforme, presentano una durata sensibilmente inferiore rispetto alle prove di flessione (dell'ordine di  $10^5$  cicli). Di conseguenza, la stima del valore di  $\epsilon_0$  richiede un'extrapolazione notevole della retta di regressione, comportando inevitabili incertezze.

Per tali ragioni, è stata condotta una ricerca bibliografica mirata all'individuazione di parametri alternativi, potenzialmente più rappresentativi del comportamento reale delle miscele bituminose e maggiormente idonei al confronto tra i risultati ottenuti mediante differenti configurazioni di prova.

Nel paper “Experimental investigation on fatigue and fracture behaviour of cold recycling materials” di A. Al-Mohammedawi e K. Mollenhauer [73], anziché fissare la vita a fatica ( $N_f = 10^6$ ) e stimare la corrispondente deformazione iniziale ( $\epsilon_0$ ), viene adottato l’approccio inverso: si fissa un livello di deformazione ritenuto significativo e si determina il numero di cicli a rottura. In questo studio, i parametri scelti per valutare le prestazioni a fatica delle miscele sono il numero di cicli a rottura, determinato secondo il criterio dell’Energy Ratio, corrispondente a una deformazione di  $100 \mu\epsilon$  ( $N_{macro, 0.1\%}$ ), e la pendenza delle rette di fatica ( $n_\epsilon$ ). Una miscela può infatti presentare una buona resistenza a fatica, ma allo stesso tempo

una pendenza elevata nella retta di regressione, indice di un'alta sensibilità a piccole variazioni di carico, comportamento non desiderabile.

Nel lavoro “Indirect tensile fatigue test for asphalt mixes commonly used in France” di J.M. Vieira et al. [74], i risultati delle prove di fatica condotte in configurazione IT-CY (con criterio basato sulla effettiva rottura del provino) vengono valutati tramite il parametro  $\varepsilon_i$ , con  $i = 2 \cdot 10^5$  cicli, ritenuto dagli autori riconducibile al valore di  $\varepsilon_6$  ottenuto in configurazione 2PB.

Dai risultati della campagna sperimentale del presente lavoro non è tuttavia emersa alcuna correlazione tra i valori ottenuti nelle prove di trazione indiretta (eseguite sia con sia senza periodi di riposo), condotte in controllo di carico, e quelli ottenuti nelle prove di flessione a quattro punti, condotte in controllo di deformazione.

Nelle tabelle seguenti è riportata una sintesi dei risultati delle prove IT-CY e CIT-CY, considerando i parametri  $N_{macro, 0.1\%}$ ,  $n_\varepsilon$  e  $\varepsilon_5$  (deformazione corrispondente a  $N_f = 2 \cdot 10^5$ ).

IT-CY			
Mix	$N_{ER, 0.1\%}$ [-]	$n_\varepsilon, ER$ [-]	$\varepsilon_5, ER$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
<b>Sp_20</b>	45666	3.531	66
<b>PmB_20</b>	48007	3.335	74
<b>Ref_20</b>	38185	3.301	61
<b>Sp_50</b>	24882	2.540	44
<b>PmB_50</b>	26245	2.787	48

Tabella 27: Parametri di valutazione alternativi delle prestazioni a fatica in configurazione IT-CY

CIT-CY			
Mix	$N_{ER, 0.1\%}$ [-]	$n_\varepsilon, ER$ [-]	$\varepsilon_5, ER$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
<b>Sp_20</b>	6121	3.651	38
<b>PmB_20</b>	6579	3.706	40
<b>Ref_20</b>	5323	3.766	38
<b>Sp_50</b>	8569	3.406	40
<b>PmB_50</b>	5453	3.834	39

Tabella 28: Parametri di valutazione alternativi delle prestazioni a fatica in configurazione CIT-CY

Dall'analisi dei dati emerge che il ranking prestazionale delle miscele nelle due configurazioni di prova si mantiene sostanzialmente coerente con quanto già osservato. Nelle prove IT-CY con periodi di riposo si conferma un vantaggio prestazionale per il metodo di modifica *wet* e per le miscele contenenti il 20% di RAP. Al contrario, nelle prove CIT-CY prive di periodi di riposo le prestazioni delle miscele risultano nel complesso comparabili, pur registrando una lieve superiorità della miscela con il 50% di RAP modificata con approccio *hybrid* (Sp\_50) nel campo dei dati sperimentali, riconducibile alla pendenza più favorevole e al valore di  $N_{macro,0.1\%}$  più elevato.

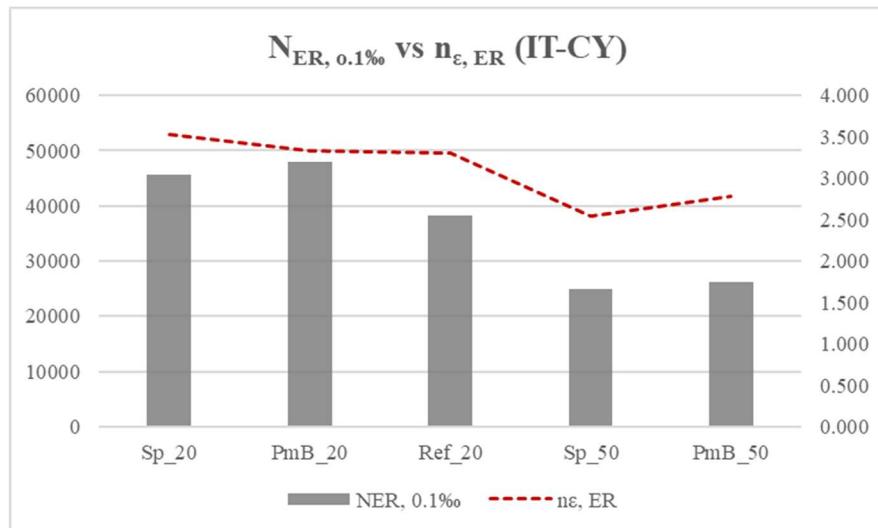


Figura 57: Valori di  $N_{ER, 0.1\%}$  e  $n_{\varepsilon, ER}$  in configurazione IT-CY

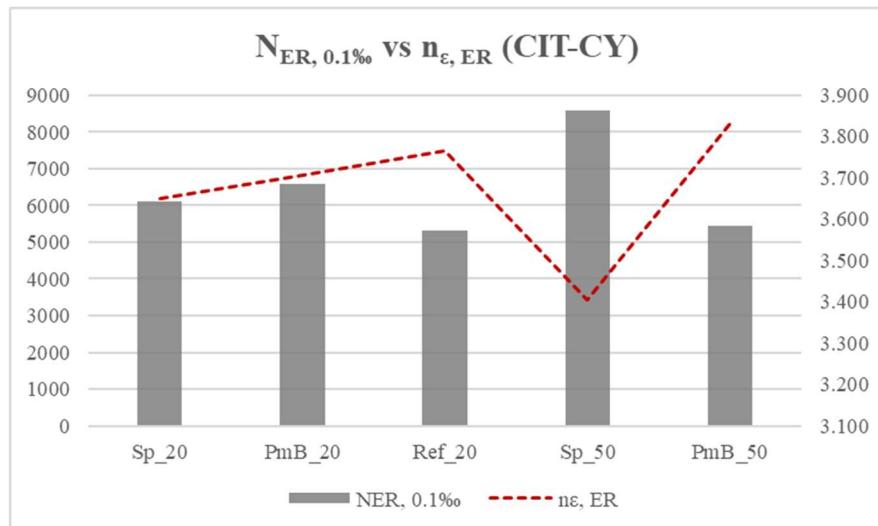


Figura 58: Valori di  $N_{ER, 0.1\%}$  e  $n_{\varepsilon, ER}$  in configurazione CIT-CY

# CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Negli ultimi anni, la crescente attenzione nei confronti delle tematiche ambientali e la necessità di promuovere modelli produttivi più sostenibili hanno favorito un impiego sempre più esteso di materiali riciclati anche nelle infrastrutture stradali. In tale contesto, il Decreto 5 agosto 2024 ha introdotto i nuovi Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'affidamento dei servizi di progettazione ed esecuzione dei lavori stradali, fissando percentuali minime di utilizzo di materiali riciclati che, tuttavia, non devono compromettere le prestazioni meccaniche e funzionali delle pavimentazioni. Il presente lavoro di tesi si inserisce in questo scenario, analizzando il comportamento a fatica di miscele contenenti diverse percentuali di RAP (20% e 50%), modificate tramite approccio *hybrid* con un compound polimerico derivato da plastiche riciclate (Sp\_20 e Sp\_50). Le loro prestazioni sono state confrontate con quelle di miscele analoghe, confezionate con bitume modificato con SBS tramite metodologia *wet* (PmB\_20 e PmB\_50), e con quelle di una miscela di riferimento non modificata (Ref\_20). Tutti i provini sono stati realizzati con un contenuto di vuoti analogo, così da garantire un confronto equo tra le miscele.

Un primo risultato significativo riguarda la lavorabilità, migliore nelle miscele modificate con tecnologia *hybrid* (Sp\_20 e Sp\_50). Tale evidenza è stata quantificata tramite il Construction Densification Index (CDI), parametro indicativo dell'energia necessaria per raggiungere un dato livello di addensamento. Valori più bassi di CDI suggeriscono una compattazione più agevole. Indipendentemente dal contenuto di RAP, l'introduzione del compound polimerico con approccio *hybrid* sembra associarsi a una riduzione del CDI, suggerendo una maggiore lavorabilità rispetto alle miscele *wet* e alla miscela di riferimento.

Per quanto concerne la rigidezza, i test eseguiti nelle configurazioni IT-CY e 4PB-PR hanno evidenziato tendenze coerenti: l'aumento del RAP dal 20% al 50% è il fattore che maggiormente contribuisce all'incremento della rigidezza, con un effetto più rilevante rispetto alla tecnologia di modifica polimerica. Ciò è

attribuibile alla presenza, nel RAP, di un legante invecchiato e più rigido, che condiziona in maniera determinante la risposta meccanica del conglomerato.

L'analisi della vita a fatica ha evidenziato come le prestazioni delle miscele dipendano fortemente dalla configurazione di prova. La valutazione si è basata principalmente sul parametro  $\epsilon_6$  e sulla pendenza della retta di regressione,  $n_\epsilon$ . In configurazione IT-CY, la miscela con 20% di RAP e modifica *wet* (PmB\_20) è risultata la più performante. Tuttavia, anche l'introduzione del compound polimerico tramite approccio *hybrid* nella miscela con 20% di RAP (Sp\_20) ha determinato un miglioramento delle prestazioni rispetto alla miscela di riferimento (Ref\_20). L'aumento del RAP dal 20% al 50% ha invece avuto un impatto negativo sulla resistenza a fatica in questa configurazione. La Sp\_50 sembra tuttavia mostrare una minore sensibilità alle variazioni dello stato tenso-deformativo, come suggerito dalla pendenza più contenuta della relativa retta di fatica. In configurazione CIT-CY, le differenze prestazionali tra le miscele sono risultate piuttosto contenute, con valori di  $\epsilon_6$  molto vicini tra loro. A differenza di quanto osservato nella IT-CY, l'incremento del RAP al 50% non ha compromesso la durabilità: la miscela Sp\_50 (con modifica *hybrid*) ha infatti mostrato un comportamento leggermente migliore nel campo dei dati sperimentali. Per quanto riguarda le prove 4PB-PR, tenuto conto della anomala variabilità dei risultati, sembra comunque confermarsi la superiorità dell'approccio *wet*, con la miscela PmB\_20 che risulta la più performante. Con l'aumento del RAP al 50%, la Sp\_50 pare mantenere, se non migliorare, le prestazioni della Sp\_20, risultando superiore anche alla miscela di riferimento in termini di  $\epsilon_6$ . Al contrario, la PmB\_50 ha evidenziato un marcato decadimento rispetto alla PmB\_20.

Sintetizzando, emergono le seguenti conclusioni:

1. L'utilizzo del compound polimerico introdotto con approccio *hybrid* pare associato a una migliore lavorabilità rispetto alle alternative modificate con metodo *wet* e alla miscela di riferimento, indipendentemente dalla percentuale di RAP impiegata;
2. L'aumento del contenuto di RAP (da 20% a 50%) è il fattore che più contribuisce all'irrigidimento delle miscele, al netto dell'approccio di modifica polimerica impiegato;

3. Le miscele modificate con tecnologia *hybrid* combinano buone prestazioni meccaniche e potenziali benefici ambientali, risultando promettenti nell'ottica di un incremento del RAP, in linea con quanto previsto dai CAM. Tuttavia, per basse percentuali di fresato, le miscele modificate con tecnologia *wet* appaiono ancora preferibili.

Sebbene il presente studio confermi la validità dell'approccio *hybrid* nella modifica polimerica delle miscele bituminose, sono necessari ulteriori approfondimenti per una futura implementazione su larga scala, tra cui:

- La valutazione della resistenza alle deformazioni permanenti tramite prove di ormaramento, con particolare attenzione al comportamento alle alte temperature, integrata dall'analisi della risposta meccanica alle basse temperature e della suscettibilità alla fessurazione termica;
- La verifica della riciclabilità futura delle miscele *hybrid* mediante un protocollo di multi-riciclo in laboratorio, comprensivo di miscelazione, invecchiamento accelerato e produzione di RAP di seconda generazione, con successivi confronti prestazionali volti a verificare il mantenimento delle performance meccaniche;
- La validazione della fattibilità su scala reale, attraverso un confronto prestazionale tra le miscele confezionate in laboratorio e quelle prodotte in impianto, accompagnato da un monitoraggio sul campo del comportamento delle miscele durante la fase di stesa, nel post-costruzione e nel lungo periodo.

# Bibliografia

- [1] «SITEB, “Rassegna del bitume,” in Gli Stati Generali delle costruzioni stradali, Bologna, 2024». Disponibile su: [https://www.siteb.it/wp-content/uploads/2025/02/Rassegna-del-bitume-108\\_24.pdf](https://www.siteb.it/wp-content/uploads/2025/02/Rassegna-del-bitume-108_24.pdf)
- [2] «MASE, “D.M. 5 agosto 2024 – Criteri ambientali minimi per l’affidamento del servizio di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione delle infrastrutture stradali”, 2024».
- [3] J. N. La Macchia, O. Baglieri, D. Dalmazzo and E. Santagata, «Engineering Properties of Road Paving Mixtures with High Content of Reclaimed Asphalt and Recycled Waste Plastics», *Materials*, vol. 17, fasc. 23, p. 5681, nov. 2024, doi: 10.3390/ma17235681.
- [4] «Asphalt in Figures 2023», EAPA. Disponibile su: <https://eapa.org/asphalt-in-figures-2023/>
- [5] «Oggi una strada su tre in Italia è “riciclata”. Ma il potenziale è ancora enorme.», Strade & Autostrade Online. Disponibile su: <https://www.stradearautostrade.it/notizie/2025/oggi-una-strada-su-tre-in-italia-e-riciclata-ma-il-potenziale-e-ancora-enorme/>
- [6] G. Tarsi, P. Tataranni and C. Sangiorgi, «The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review», *Materials*, vol. 13, fasc. 18, p. 4052, set. 2020, doi: 10.3390/ma13184052.
- [7] U. Heneash, «Effect of the Repeated Recycling on Hot Mix Asphalt Properties».
- [8] A. Fabián, H. Di Benedetto, C. Sauzéat and S. Pouget, *Linear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures with multi-Recycled Asphalt Pavement*. 2017, p. 208. doi: 10.1201/9781315100333-30.
- [9] V. Antunes, A. C. Freire and J. Neves, «A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling», *Constr. Build. Mater.*, vol. 211, pp. 453–469, giu. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258.
- [10] «Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152. Norme in materia ambientale (Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006 - Supplemento Ordinario n. 96)».

- [11] «MASE, DECRETO 28 marzo 2018, n. 69. Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto di conglomerato bituminoso ai sensi dell'articolo 184-ter, comma 2 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152., Gazzetta Ufficiale, 2018». Disponibile su: [https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/dm\\_28marzo2018\\_regolamentoconglomeratobituminoso\\_allegato01-pdf](https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/dm_28marzo2018_regolamentoconglomeratobituminoso_allegato01-pdf)
- [12] «SITEB, “Riferimenti per la gestione del conglomerato bituminoso di recupero ai sensi del decreto ministeriale D.M. 69/2018,” 2018». Disponibile su: [https://www.siteb.it/wp-content/uploads/2022/07/SITEB\\_PositionPaper\\_RA\\_rev.1\\_26.01.2021-1.pdf](https://www.siteb.it/wp-content/uploads/2022/07/SITEB_PositionPaper_RA_rev.1_26.01.2021-1.pdf)
- [13] D. Newcomb, E. Brown and J. Epps, «Designing HMA Mixtures With High RAP Content: A Practical Guide». Disponibile su: <https://www.scribd.com/document/405193280/Risk-Assessment-Template>
- [14] «Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Asphalt Mixtures: State-of-the-Practice and Best Practices». Disponibile su: <https://highways.dot.gov/media/841>
- [15] Kandhal, Prithvi S. and Mallick, Rajib B., «Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments: Participant’s Reference Book», 1998.
- [16] Al-Qadi, I.L., Elseifi, M. and Carpenter, S.H., «Reclaimed Asphalt Pavement—A Literature Review. Illinois Center for Transportation, Rantoul, Vol. 7, No. FHWA-ICT-07-001, 1-23. - References - Scientific Research Publishing». Disponibile su: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3207708>
- [17] J. Willis, P. Turner, N. Tran and G. Julian, «Effects of Changing Virgin Binder Grade and Content on High Reclaimed Asphalt Pavement Mixture Properties», *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2371, pp. 66–73, dic. 2013, doi: 10.3141/2371-08.
- [18] A. B. Ameur, J. Valentin and N. Baldo, «A Review on the Use of Plastic Waste as a Modifier of Asphalt Mixtures for Road Constructions», *CivilEng*, vol. 6, fasc. 2, p. 17, apr. 2025, doi: 10.3390/civileng6020017.
- [19] P. J. Landrigan *et al.*, «The Minderoo-Monaco Commission on Plastics and Human Health», *Ann. Glob. Health*, vol. 89, fasc. 1, p. 23, mar. 2023, doi: 10.5334/aogh.4056.

- [20] S. Muenmee, W. Chiemchaisri and C. Chiemchaisri, «Microbial consortium involving biological methane oxidation in relation to the biodegradation of waste plastics in a solid waste disposal open dump site», *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 102, apr. 2015, doi: 10.1016/j.ibiod.2015.03.015.
- [21] A. Noor and M. A. U. Rehman, «A mini-review on the use of plastic waste as a modifier of the bituminous mix for flexible pavement», *Clean. Mater.*, vol. 4, p. 100059, giu. 2022, doi: 10.1016/j.clema.2022.100059.
- [22] D. Briassoulis, M. Hiskakis and E. Babou, «Technical specifications for mechanical recycling of agricultural plastic waste», *Waste Manag.*, vol. 33, fasc. 6, pp. 1516–1530, giu. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.03.004.
- [23] D. M. Singh and S. Kamboj, «Review on Usage of Waste Plastic in Bituminous Roads».
- [24] P. Costa and M. Lackner, «Biodegradable Microplastics: Environmental Fate and Persistence in Comparison to Micro- and Nanoplastics from Traditional, Non-Degradable Polymers», *Macromol.*, vol. 5, fasc. 2, p. 29, giu. 2025, doi: 10.3390/macromol5020029.
- [25] Zhang K., Hamidian A.H., Tubić A., Zhang Y., Fang J.K.H., Wu C. and Lam P.K.S., «Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review», *Environ. Pollut. Barking Essex 1987*, vol. 274, p. 116554, apr. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116554.
- [26] J. Bayo, M. Guillén, S. Olmos, P. Jiménez, E. Sánchez and M. J. Roca, «Microplastics as vector for persistent organic pollutants in urban effluents: The role of Polychlorinated Biphenyls», *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 13, pp. 671–682, apr. 2018, doi: 10.2495/SDP-V13-N4-671-682.
- [27] F. Giustozzi and S. Nizamuddin (eds.), *Plastic waste for sustainable asphalt roads*. in Woodhead publishing series in civil and structural engineering. Cambridge, MA Kidlington, OX: WP Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier, 2022.
- [28] R. Willis, F. Yin and R. Moraes, «Recycled Plastics in Asphalt Part A: State of the Knowledge», Art. fasc. NAPA-IS-142, ott. 2020. Disponibile su: <https://trid.trb.org/View/1761163>

- [29] R. West *et al.*, *Evaluation of Post-Consumer Recycled Plastics in Asphalt Mixtures via the Dry Process*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2025. doi: 10.17226/28867.
- [30] Veropalumbo, R.; Russo, F.; Oretto, C.; Buonocore, G.G.; Verdolotti, L.; Muiambo, H.; Biancardo, S.A.; Viscione, N., «Chemical, Thermal, and Rheological Performance of Asphalt Binder Containing Plastic Waste», *Sustainability*, vol. 13, fasc. 24, p. 13887, gen. 2021, doi: 10.3390/su132413887.
- [31] G. Mazurek, P. Buczyński, M. Iwański, M. Podsiadło, P. Pypeć and A. Kowalczyk, «Effects of the Mixing Process on the Rheological Properties of Waste PET-Modified Bitumen», *Materials*, vol. 16, fasc. 23, p. 7271, gen. 2023, doi: 10.3390/ma16237271.
- [32] A. Singh and A. Gupta, «Exploring the Rheological Behavior of LDPE-Modified Bitumen: Influence of Plastic Source», *J. Test. Eval.*, vol. 53, p. No Pagination, apr. 2025, doi: 10.1520/JTE20240131.
- [33] A. Yousefi, «Polyethylene Dispersions in Bitumen: The Effects of the Polymer Structural Parameters», *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 90, pp. 3183–3190, dic. 2003, doi: 10.1002/app.12942.
- [34] K. L. Roja, A. Rehman, M. Ouederni, S. K. Krishnamoorthy, A. Abdala and E. Masad, «Influence of polymer structure and amount on microstructure and properties of polyethylene-modified asphalt binders», *Mater. Struct.*, vol. 54, fasc. 2, p. 91, apr. 2021, doi: 10.1617/s11527-021-01683-0.
- [35] «Sustainable application of recycled plastics in asphalt pavement: case study of a trial in Newtonville, Ontario, Canada». Disponibile su: <https://cdnsciencepub.com/doi/10.1139/cjce-2024-0438>
- [36] A. Ojha, S. Saadeh, S. Tanvir, L. N. Mohammad, A. A. Butt and J. Harvey, «Employing Life Cycle Assessment in Asphalt Mixture Design Using Reclaimed Asphalt Pavement», pp. 54–64, giu. 2025, doi: 10.1061/9780784486221.006.
- [37] L. Yao, Z. Leng, J. Lan, R. Chen and J. Jiang, «Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong», *J. Clean. Prod.*, vol. 336, p. 130405, gen. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130405.

- [38] Rafiq W, Musarat MA, Altaf M, Napiah M, Sutanto MH, Alaloul WS, Javed MF, Mosavi A. , «Life Cycle Cost Analysis Comparison of Hot Mix Asphalt and Reclaimed Asphalt Pavement: A Case Study», *Sustainability*, vol. 13, fasc. 8, p. 4411, gen. 2021, doi: 10.3390/su13084411.
- [39] D. Lu, M. Enfrin, Y. Boom and F. Giustozzi, «Future recyclability of hot mix asphalt containing recycled plastics», *Constr. Build. Mater.*, vol. 368, gen. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130396.
- [40] M. Enfrin, R. Myszka and F. Giustozzi, «Paving roads with recycled plastics: Microplastic pollution or Eco-friendly solution?», *J. Hazard. Mater.*, vol. 437, p. 129334, giu. 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129334.
- [41] M. Rochlani, G. Canon Falla, S. Caro, S. Leischner and F. Wellner, «Understanding the influence of temperature and frequency on the fatigue resistance of bitumen», *Constr. Build. Mater.*, vol. 296, giu. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123754.
- [42] M. Elseifi, J. Baek and N. Dhakal, «Review of modelling crack initiation and propagation in flexible pavements using the finite element method», *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 19, pp. 251–263, mar. 2018, doi: 10.1080/10298436.2017.1345555.
- [43] J. T. Harvey and B.-W. Tsai, «Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness», *Transp. Res. Rec.*, fasc. 1543, pp. 38–45, 1996, doi: 10.3141/1543-05.
- [44] T. Ma, Y. Zhang, D. Zhang, J. Yan and Q. Ye, «Influences by air voids on fatigue life of asphalt mixture based on discrete element method», *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 785–799, nov. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.045.
- [45] C. J. Glover e R. R. Davison, «Development of a New Method for Assessing Asphalt Binder Durability with Field Validation».
- [46] P. Kandhal and I. Rickards, «Premature failure of asphalt overlays from stripping: Case histories», *Proc. Assoc. Asph. Paving Technol.*, vol. 70, gen. 2001.
- [47] H. Di Benedetto, C. De La Roche, H. Baaj, A. Pronk and R. Lundström, «Fatigue of bituminous mixtures», *Mater. Struct. Constr.*, vol. 37, fasc. 267, pp. 202–216, 2004, doi: 10.1007/bf02481620.

- [48] Xu, S.; Zhao, Z.; Wang, H.; Wan, C.; Wang, X.; Wang, Z.; Zhang, X., «Fatigue Failure Criteria of Asphalt Binders and Asphalt Mixtures: A Comprehensive Review», *Materials*, vol. 18, fasc. 14, p. 3267, gen. 2025, doi: 10.3390/ma18143267.
- [49] Braham A. and Underwood B.S., *State of the Art and Practice in Fatigue Cracking Evaluation of Asphalt Concrete Pavements*.
- [50] G. Rowe and M. G. Bouldin, «Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures», pp. 754–763, gen. 2000.
- [51] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 12697-24; Bituminous mixtures - Test methods; Part 24: Resistance to fatigue». 2018.
- [52] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 933-1; Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 1: Determination of Particle Size Distribution—Sieving Method». 2012.
- [53] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 1097-6; Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption». 2022.
- [54] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 12697-39; Bituminous Mixtures—Test Methods—Part 39: Binder Content by Ignition». 2020.
- [55] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «N 12591; Bitumen and Bituminous Binders—Specifications for Paving Grade Bitumens». 2009.
- [56] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 14023; Bitumen and Bituminous Binders—Specification Framework for Polymer Modified Bitumens». 2010.
- [57] American Association of State and Highway Transportation Officials: Washington, DC, USA, «AASHTO M323-22; Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design». 2022.
- [58] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 1426; Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Needle Penetration». 2015.

- [59] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 1427; Bitumen and Bituminous Binders—Determination of the Softening Point—Ring and Ball Method». 2015.
- [60] Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Katman, H. Y., Mohd Satar, M. K. I., Bilema, M., Putra Jaya, R., Eltwati, A. S., & Radeef, H. R., «A Review on the Durability of Recycled Asphalt Mixtures Embraced with Rejuvenators», *Sustainability*, vol. 13, fasc. 16, p. 8970, gen. 2021, doi: 10.3390/su13168970.
- [61] M. Zaumanis, R. B. Mallick, L. Poulikakos and R. Frank, «Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures», *Constr. Build. Mater.*, vol. 71, pp. 538–550, nov. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073.
- [62] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 932-2; Tests for general properties of aggregates; Part 2: Methods for reducing laboratory samples». 1999.
- [63] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «Tests for mechanical and physical properties of aggregates Part 5: Determination of the water content by drying in a ventilated oven». 2008.
- [64] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 12697-5; Bituminous mixtures - Test methods; Part 5: Determination of the maximum density». 2018.
- [65] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 12697-27; Bituminous mixtures — Test methods; Part 27: Sampling». 2017.
- [66] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, *EN 12697-31; Bituminous mixtures – Test methods Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor*. 2109.
- [67] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 12697-26; Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt Part 26: Stiffness». 2012.
- [68] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 12697-33; Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 33: Specimen prepared by roller compactor». 2003.

- [69] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 12697-29; Bituminous mixtures – Test methods Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen». 2020.
- [70] European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, «EN 12697-6; Bituminous mixtures — Test methods Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens». 2020.
- [71] H. U. Bahia, T. P. Friemel, P. A. Peterson, J. S. Russell, e B. Poehnelt, «Optimization of constructability and resistance to traffic: a new design approach for HMA usign the superpave compactor», in *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1998. Disponibile su: <https://trid.trb.org/View/542933>
- [72] K. Cebi, «Miscele di asfalto sostenibili con RAP e plastiche di scarto = Sustainable asphalt mixes with RAP and waste plastics», laurea, Politecnico di Torino, 2025. Disponibile su: <https://webthesis.biblio.polito.it/34788/>
- [73] A. Al-Mohammedawi and K. Mollenhauer, «Experimental investigation on fatigue and fracture behaviour of cold recycling materials», *Transp. Eng.*, vol. 17, p. 100258, set. 2024, doi: 10.1016/j.treng.2024.100258.
- [74] J. M. Vieira, D. Desmoulin and P. Pellevoisin, «Indirect tensile fatigue test for asphalt mixes commoly used in France», 2012.

# APPENDICE

## *Parametri di compattazione*

ACR Sp\_20

$T_{exit}$  : temperatura al cuore, in corrispondenza della quale la fustella è stata estratta dal forno

D	[mm]	150
h	[mm]	60
$\rho_M$	[Mg/m <sup>3</sup> ]	2.540
$V_g$	[%]	7.0
M	[g]	2504.6

Provino	Data comp.	$T_{exit}$ [°C]	$h_{min, gir}$ [mm]	$h_{min, real}$ [mm]	m [g]	n°giri	$V_{geo}$ [%]	$V_{SSD}$ [%]	$\Delta V$ [%]	C1 [%]	k [-]	CDI [-]
A13	11/03/2025	151	60.0	59.6	2501.2	183	7.13	3.55	3.58	82.27	6.39	61.50
A15	11/03/2025	150	60.0	59.4	2503.3	191	7.05	3.67	3.38	81.92	6.45	74.47
A16	11/03/2025	150	60.0	59.5	2502.8	149	7.07	3.98	3.09	82.51	6.35	52.02
A18	16/05/2025	153	60.0	59.5	2504.8	79	6.99	3.71	3.28	83.93	6.60	10.92
A19	16/05/2025	155	60.0	59.5	2503.7	90	7.03	3.45	3.58	83.56	6.72	15.92
A20	16/05/2025	152	60.0	59.6	2503.5	103	7.04	3.02	4.02	83.52	6.79	13.73
A21	16/05/2025	153	60.0	59.4	2510.1	114	6.42	3.41	3.01	83.38	6.55	20.92
A22	19/05/2025	152	60.0	59.6	2507.2	106	6.90	3.76	3.14	83.33	6.53	22.19
A23	19/05/2025	153	60.0	59.4	2506.7	121	6.92	3.14	3.78	83.00	6.72	26.90
A24	20/05/2025	155	60.0	59.5	2503.9	95	7.03	3.81	3.22	83.38	6.54	20.96
A25	20/05/2025	151	60.0	59.5	2504.8	82	6.99	4.11	2.88	83.35	6.67	18.67
A26	21/05/2025	152	60.0	59.5	2505.6	131	6.96	3.45	3.51	83.08	6.43	30.13
A27	21/05/2025	152	60.0	59.5	2506.0	107	6.95	3.49	3.46	82.54	6.98	27.75
A28	21/05/2025	154	60.0	59.4	2503.7	115	7.03	3.39	3.64	83.03	6.64	25.01
A29	21/05/2025	153	60.0	59.4	2504.6	114	7.00	3.99	3.01	82.92	6.48	30.11
Media	-	-	-	-	-	119	6.97	3.60	3.37	83.05	6.59	30.08
Dev. Std	-	-	-	-	-	33	0.16	0.31	0.32	0.54	0.17	18.27
Q1 [%]	-	-	-	-	-	-	-	3.43	-	-	-	-
Q3 [%]	-	-	-	-	-	-	-	3.79	-	-	-	-
IQR [%]	-	-	-	-	-	-	-	0.36	-	-	-	-
UPPER_T [%]	-	-	-	-	-	-	-	4.32	-	-	-	-
LOWER_T [%]	-	-	-	-	-	-	-	2.90	-	-	-	-

**ACR PmB\_20**T<sub>exit</sub> : temperatura al cuore, in corrispondenza della quale la fustella è stata estratta dal forno

D	[mm]	150
h	[mm]	60
ρ <sub>M</sub>	[Mg/m <sup>3</sup> ]	2.563
v <sub>g</sub>	[%]	7.0
M	[g]	2527.3

Provino	Data comp.	T <sub>exit</sub> [°C]	h <sub>min,gir</sub> [mm]	h <sub>min,real</sub> [mm]	m [g]	n°giri	v <sub>geo</sub> [%]	v <sub>SSD</sub> [%]	Δv [%]	C1 [%]	k [-]	CDI [-]
B1	12/03/2025	160	60.0	59.6	2526.4	182	7.03	3.61	3.42	81.90	6.56	68.72
B2	12/03/2025	162	60.0	59.6	2525.9	174	7.05	3.39	3.67	81.40	6.88	73.66
B3	12/03/2025	161	60.0	59.5	2525.7	165	7.06	3.72	3.34	81.19	6.92	83.94
B4	12/03/2025	160	60.0	59.4	2524.9	222	7.09	3.05	4.04	81.34	6.73	86.19
B5	13/03/2025	160	60.0	59.7	2528.7	191	6.95	3.01	3.94	81.53	6.85	72.79
B6	13/03/2025	161	60.0	59.5	2527.5	265	6.99	3.20	3.80	81.09	6.57	119.54
B7	13/03/2025	161	60.0	59.6	2527.6	176	6.99	2.74	4.25	81.05	7.32	62.48
B8	13/03/2025	162	60.3	59.8	2526.8	300	7.48	2.54	4.94	81.44	6.67	95.60
B9	18/03/2025	162	60.0	59.5	2526.4	165	7.03	3.41	3.62	81.00	7.11	82.84
B10	18/03/2025	162	60.0	59.6	2525.8	149	7.05	3.44	3.61	81.95	6.80	53.12
B11	18/03/2025	162	60.0	59.5	2527.0	167	7.01	3.91	3.10	82.49	6.19	71.01
B12	18/03/2025	162	60.0	59.6	2525.6	247	7.06	2.64	4.43	81.48	6.76	86.07
B13	19/03/2025	162	60.0	59.6	2526.1	169	7.04	3.98	3.06	81.49	6.64	83.05
B14	19/03/2025	163	60.0	59.5	2526.4	185	7.03	3.61	3.43	81.56	6.63	81.17
B15	19/03/2025	161	60.0	59.5	2526.9	235	7.01	3.89	3.13	81.13	6.44	135.09
B16	11/04/2025	162	60.0	59.6	2527.8	131	6.98	4.16	2.82	81.61	6.82	63.70
B17	22/05/2025	163	60.0	59.5	2527.1	144	7.01	3.86	3.15	82.02	6.64	64.25
B18	22/05/2025	163	60.0	59.6	2527.1	195	7.01	3.62	3.39	80.98	6.76	109.06
B19	29/05/2025	160	60.0	59.4	2527.0	340	7.01	4.38	2.63	80.85	5.99	246.50
B20	29/05/2025	160	60.4	59.6	2526.3	500	7.65	3.89	3.77	80.51	5.90	323.25
<b>Media</b>	-	-	-	-	-	215	7.08	3.50	3.58	81.40	6.66	103.10
Dev. Std	-	-	-	-	-	86	0.17	0.51	0.56	0.46	0.34	66.44
Q1 [%]	-	-	-	-	-	-	-	3.16	-	-	-	-
Q3 [%]	-	-	-	-	-	-	-	3.89	-	-	-	-
IQR [%]	-	-	-	-	-	-	-	0.73	-	-	-	-
UPPER_T [%]	-	-	-	-	-	-	-	4.97	-	-	-	-
LOWER_T [%]	-	-	-	-	-	-	-	2.07	-	-	-	-

**ACR Ref\_20**

Texit : temperatura al cuore, in corrispondenza della quale la fustella è stata estratta dal forno

D	[mm]	150
h	[mm]	60
ρ <sub>M</sub>	[Mg/m <sup>3</sup> ]	2.581
v <sub>g</sub>	[%]	7.0
M	[g]	2545.0

Provino	Data comp.	T <sub>exit</sub> [°C]	h <sub>min,gir</sub> [mm]	h <sub>min,real</sub> [mm]	m [g]	n°giri	v <sub>geo</sub> [%]	v <sub>SSD</sub> [%]	Δv [%]	C1 [%]	k [-]	CDI [-]
E1	17/03/2025	155	60.0	59.4	2557.0	247	6.56	2.86	3.70	80.91	6.83	110.17
E2	20/03/2025	151	60.0	59.5	2547.8	224	6.90	3.62	3.28	81.53	6.39	107.74
E3	20/03/2025	151	60.0	59.5	2541.9	208	7.11	3.80	3.31	81.08	6.63	109.61
E4	20/03/2025	152	60.0	59.5	2543.8	267	7.05	3.51	3.53	80.62	6.66	147.78
E5	20/03/2025	152	60.0	59.5	2544.1	249	7.03	3.91	3.13	80.44	6.62	178.38
E6	20/03/2025	150	60.0	59.5	2523.3	171	7.79	4.73	3.06	80.56	6.64	160.61
E7	21/03/2025	153	60.0	59.6	2543.7	231	7.05	3.88	3.17	80.11	6.86	181.84
E8	21/03/2025	152	60.0	59.5	2543.7	213	7.05	3.66	3.39	81.23	6.59	106.42
E9	24/03/2025	152	60.0	59.5	2543.8	284	7.05	3.52	3.52	80.68	6.56	156.96
E10	24/03/2025	152	60.0	59.4	2542.7	210	7.09	4.24	2.85	80.66	6.60	154.53
E11	24/03/2025	152	60.0	59.5	2545.2	320	6.99	3.80	3.20	80.34	6.44	219.21
E12	24/03/2025	153	60.0	59.5	2543.2	250	7.07	4.23	2.84	80.71	6.39	177.25
E13	24/03/2025	151	60.0	59.5	2547.8	375	6.90	3.65	3.25	80.46	6.30	233.38
E14	25/03/2025	153	60.0	59.5	2546.4	340	6.95	3.50	3.45	81.02	6.26	172.66
E15	25/03/2025	153	60.0	59.5	2543.5	271	7.06	3.93	3.13	80.60	6.49	172.03
E16	23/05/2025	152	60.0	59.4	2545.8	356	6.97	3.03	3.94	80.07	6.72	207.46
E17	29/05/2025	152	60.2	59.6	2545.2	400	7.30	4.13	3.17	80.16	6.12	334.50
E18	29/05/2025	153	60.0	59.5	2543.8	370	7.05	4.01	3.04	80.81	6.05	229.84
<b>Media</b>	-	-	-	-	-	277	7.05	3.78	3.28	80.67	6.51	175.58
Dev. Std	-	-	-	-	-	68	0.23	0.43	0.28	0.39	0.23	56.53
Q1 [%]	-	-	-	-	-	-	3.55	-	-	-	-	-
Q3 [%]	-	-	-	-	-	-	3.99	-	-	-	-	-
IQR [%]	-	-	-	-	-	-	0.44	-	-	-	-	-
UPPER_T [%]	-	-	-	-	-	-	4.65	-	-	-	-	-
LOWER_T [%]	-	-	-	-	-	-	2.88	-	-	-	-	-

## ACR Sp\_50

T<sub>exit</sub>: temperatura al cuore, in corrispondenza della quale la fustella è stata estratta dal forno

D	[mm]	150
h	[mm]	60
ρ <sub>M</sub>	[Mg/m <sup>3</sup> ]	2.545
v <sub>g</sub>	[%]	7.0
M	[g]	2509.5

Provino	Data comp.	T <sub>exit</sub> [°C]	h <sub>min, gir</sub> [mm]	h <sub>min, real</sub> [mm]	m [g]	n°giri	v <sub>geo</sub> [%]	v <sub>SSD</sub> [%]	Δv [%]	C1 [%]	k [-]	CDI [-]
C1	25/03/2025	152	60.0	59.5	2509.8	133	6.81	3.43	3.38	82.08	6.80	49.13
C2	25/03/2025	153	60.0	59.5	2510.0	106	6.80	3.94	2.86	82.52	6.65	39.90
C3	27/03/2025	152	60.0	59.5	2507.5	150	7.08	3.65	3.43	82.07	6.66	55.69
C4	27/03/2025	152	60.0	59.6	2511.0	163	6.95	4.12	2.82	81.42	6.66	85.09
C5	27/03/2025	152	60.0	59.6	2511.0	230	6.95	3.25	3.70	82.03	6.35	86.81
C6	27/03/2025	152	60.0	59.6	2509.2	145	7.01	3.99	3.02	81.98	6.58	61.24
C7	27/03/2025	152	60.0	59.6	2510.2	137	6.98	3.86	3.12	82.24	6.57	52.08
C8	27/03/2025	153	60.0	59.6	2507.9	145	7.06	4.29	2.77	81.35	6.77	78.85
C9	28/03/2025	152	60.0	59.6	2508.8	159	7.03	3.93	3.10	82.43	6.31	60.17
C10	28/03/2025	153	60.0	59.5	2508.7	244	7.03	3.61	3.42	81.57	6.31	117.56
C11	31/03/2025	152	60.0	59.5	2509.8	139	6.99	3.98	3.01	82.12	6.59	53.31
C12	31/03/2025	152	60.0	59.5	2509.3	148	7.01	4.11	2.90	81.62	6.68	70.91
C13	31/03/2025	153	60.0	59.5	2508.1	159	7.05	3.75	3.30	82.12	6.50	64.24
C14	31/03/2025	153	60.0	59.6	2509.1	154	7.02	4.06	2.96	81.18	6.88	84.15
C15	31/03/2025	153	60.0	59.6	2508.3	148	7.05	3.94	3.11	81.84	6.62	69.32
C16	09/05/2025	151	60.0	59.5	2509.0	126	7.02	3.96	3.06	81.78	6.87	55.99
C18	09/05/2025	152	60.0	59.5	2507.9	141	7.06	4.44	2.62	81.43	6.68	79.55
C19	13/05/2025	153	60.0	59.5	2508.8	171	7.03	3.72	3.31	81.52	6.75	78.72
C20	13/05/2025	153	60.0	59.5	2509.1	304	7.02	4.04	2.98	81.79	5.82	164.04
C21	14/05/2025	153	60.0	59.5	2509.0	290	7.02	4.04	2.98	82.05	5.81	136.82
C22	14/05/2025	154	60.0	59.3	2509.2	366	7.01	3.59	3.42	81.80	5.86	157.97
C23	23/05/2025	153	60.0	59.4	2509.8	371	6.99	4.04	2.95	82.11	5.59	169.05
C24	27/05/2025	152	60.0	59.5	2509.6	175	7.00	3.66	3.34	81.48	6.49	98.92
C25	22/09/2025	152	60.0	59.4	2507.8	500	7.06	3.88	3.18	82.37	5.25	219.26
C26	22/09/2025	152	60.0	59.4	2506.8	500	7.41	3.73	3.68	82.19	5.35	219.30
C27	22/09/2025	153	60.0	59.3	2509.9	401	6.99	3.65	3.33	82.85	5.37	121.88
Media	-	-	-	-	-	187	7.02	3.87	3.14	81.92	6.34	85.63
Dev. Std.	-	-	-	-	-	76	0.10	0.26	0.27	0.40	0.51	38.05
Q1[%]	-	-	-	-	-	-	-	3.67	-	-	-	-
Q3[%]	-	-	-	-	-	-	-	4.04	-	-	-	-
IQR[%]	-	-	-	-	-	-	-	0.37	-	-	-	-
UPPER_T[%]	-	-	-	-	-	-	-	4.59	-	-	-	-
LOWER_T[%]	-	-	-	-	-	-	-	3.13	-	-	-	-

## ACR PmB\_50

T<sub>exit</sub>: temperatura al cuore, in corrispondenza della quale la fustella è stata estratta dal forno

D	[mm]	150
h	[mm]	60
ρ <sub>M</sub>	[Mg/m <sup>3</sup> ]	2.576
v <sub>g</sub>	[%]	7.0
M	[g]	2540.1

Provino	Data comp.	T <sub>exit</sub> [°C]	h <sub>min, gir</sub> [mm]	h <sub>min, real</sub> [mm]	m [g]	n°giri	v <sub>geo</sub> [%]	v <sub>SSD</sub> [%]	Δv [%]	C1 [%]	k [-]	CDI [-]
D1	28/03/2025	162	60.0	59.5	2545.6	193	6.80	3.69	3.11	81.48	6.58	88.93
D2	28/03/2025	163	60.0	59.5	2536.4	196	7.14	3.91	3.23	81.37	6.49	115.43
D3	28/03/2025	162	60.0	59.5	2535.7	226	7.16	3.44	3.72	81.82	6.35	91.23
D4	28/03/2025	161	60.0	59.6	2540.5	159	6.99	3.95	3.04	82.00	6.45	72.63
D5	01/04/2025	162	60.0	59.5	2532.7	132	7.27	4.34	2.93	82.13	6.50	65.51
D6	01/04/2025	162	60.0	59.5	2540.6	197	6.98	3.71	3.27	82.00	6.35	83.19
D7	01/04/2025	162	60.0	59.5	2537.5	212	7.10	4.18	2.92	81.86	6.17	106.20
D8	01/04/2025	163	60.0	59.5	2541.0	278	6.97	3.42	3.55	81.60	6.27	120.49
D9	01/04/2025	163	60.0	59.5	2544.1	248	6.85	4.00	2.85	81.80	6.08	115.23
D10	02/04/2025	162	60.0	59.6	2540.4	195	6.99	3.99	3.00	81.70	6.41	84.67
D11	02/04/2025	162	60.0	59.6	2540.6	223	6.98	3.68	3.30	81.80	6.31	91.42
D12	02/04/2025	162	60.0	59.5	2539.1	279	7.04	3.88	3.16	81.48	6.18	138.40
D13	02/04/2025	163	60.0	59.5	2543.2	253	6.89	3.64	3.25	81.93	6.14	105.34
D14	02/04/2025	163	60.0	59.6	2540.9	258	6.97	3.80	3.17	81.50	6.23	124.55
D15	02/04/2025	163	60.0	59.5	2544.4	217	6.84	3.93	2.91	81.67	6.29	104.68
D16	12/05/2025	163	60.0	59.5	2539.5	227	7.02	3.64	3.38	81.27	6.44	122.02
D18	12/05/2025	163	60.0	59.5	2538.8	179	7.05	4.29	2.76	81.15	6.58	111.60
D19	12/05/2025	165	60.1	59.7	2541.0	400	7.12	2.99	4.13	81.92	5.98	133.73
Media	-	-	-	-	-	226	7.01	3.80	3.20	81.69	6.32	104.18
Dev. Std.	-	-	-	-	-	58	0.12	0.33	0.34	0.27	0.17	20.62
Q1[%]	-	-	-	-	-	-	-	3.65	-	-	-	-
Q3[%]	-	-	-	-	-	-	-	3.98	-	-	-	-
IQR[%]	-	-	-	-	-	-	-	0.33	-	-	-	-
UPPER_T[%]	-	-	-	-	-	-	-	4.48	-	-	-	-
LOWER_T[%]	-	-	-	-	-	-	-	3.16	-	-	-	-

## Moduli di rigidezza

Provino	Miscela	Data comp.	S <sub>1</sub> [MPa]	S <sub>2</sub> [MPa]	Δ <sub>REL</sub> [%]	S <sub>AV</sub> [MPa]	n°giri	v <sub>SSD</sub> [%]
A13	Sp_20	11/03/2025	9702.7	10076.0	-3.8	9889.4	183	3.55
A15	Sp_20	11/03/2025	9857.9	9989.2	-1.3	9923.6	191	3.67
A16	Sp_20	11/03/2025	9783.3	10587.4	-8.2	10185.4	149	3.98
A18	Sp_20	16/05/2025	7351.7	7275.2	1.0	7313.5	79	3.71
A19	Sp_20	16/05/2025	7623.3	7592.8	0.4	7608.1	90	3.45
A20	Sp_20	16/05/2025	9400.1	9318.7	0.9	9359.4	103	3.02
A21	Sp_20	16/05/2025	8830.7	8434.6	4.5	8632.7	114	3.41
A22	Sp_20	19/05/2025	8430.0	8039.5	4.6	8234.8	106	3.76
A23	Sp_20	19/05/2025	9888.1	9406.6	4.9	9647.4	121	3.14
A24	Sp_20	20/05/2025	8837.2	8970.1	-1.5	8903.7	95	3.81
A25	Sp_20	20/05/2025	8912.3	8850.3	0.7	8881.3	82	4.11
A26	Sp_20	21/05/2025	10001.3	9550.1	4.5	9775.7	131	3.45
A27	Sp_20	21/05/2025	9787.0	9612.8	1.8	9699.9	107	3.49
A28	Sp_20	21/05/2025	8675.4	9600.0	-10.7	9137.7	115	3.39
A29	Sp_20	21/05/2025	10063.8	9609.8	4.5	9836.8	114	3.99

Media [MPa]	9135.3	119	3.60
Dev. Std [MPa]	872.6	33	0.31
Q1 [MPa]	8757.0	-	-
Q3 [MPa]	9806.3	-	-
IQR [MPa]	1049.3	-	-
UPPER_T [MPa]	11380.2	-	-
LOWER_T [MPa]	7183.1	-	-

Provino	Miscela	Data comp.	S <sub>1</sub> [MPa]	S <sub>2</sub> [MPa]	Δ <sub>REL</sub> [%]	S <sub>AV</sub> [MPa]	n°giri	v <sub>SSD</sub> [%]
B1	PmB_20	12/03/2025	7858.0	7267.8	7.5	7562.9	182	3.61
B2	PmB_20	12/03/2025	8539.9	9194.6	-7.7	8867.3	174	3.39
B3	PmB_20	12/03/2025	8387.1	8493.5	-1.3	8440.3	165	3.72
B4	PmB_20	12/03/2025	8420.5	9033.0	-7.3	8726.8	222	3.05
B5	PmB_20	13/03/2025	8012.9	8089.3	-1.0	8051.1	191	3.01
B6	PmB_20	13/03/2025	8801.7	8765.0	0.4	8783.4	265	3.20
B7	PmB_20	13/03/2025	8696.5	8520.9	2.0	8608.7	176	2.74
B8	PmB_20	13/03/2025	8593.6	8772.1	-2.1	8682.9	300	2.54
B9	PmB_20	18/03/2025	9286.6	8700.0	6.3	8993.3	165	3.41
B10	PmB_20	18/03/2025	6590.3	6981.3	-5.9	6785.8	149	3.44
B11	PmB_20	18/03/2025	9685.8	9015.3	6.9	9350.6	167	3.91
B12	PmB_20	18/03/2025	9070.4	9146.8	-0.8	9108.6	247	2.64
B13	PmB_20	19/03/2025	7783.1	7285.1	6.4	7534.1	169	3.98
B14	PmB_20	19/03/2025	7819.7	7616.9	2.6	7718.3	185	3.61
B15	PmB_20	19/03/2025	7688.7	7144.3	7.1	7416.5	235	3.89
B16	PmB_20	11/04/2025	8176.8	7480.0	8.5	7828.4	131	4.16
B17	PmB_20	22/05/2025	8258.2	7616.7	7.8	7937.5	144	3.86
B18	PmB_20	22/05/2025	8364.7	9131.1	-9.2	8747.9	195	3.62
B19	PmB_20	29/05/2025	6731.8	6811.9	-1.2	6771.9	340	4.38
B20	PmB_20	29/05/2025	6982.0	6367.4	8.8	6674.7	500	3.89

Media [MPa]	8129.5	215	3.50
Dev. Std [MPa]	820.5	86	0.51
Q1 [MPa]	7555.7	-	-
Q3 [MPa]	8756.8	-	-
IQR [MPa]	1201.1	-	-
UPPER_T [MPa]	10558.4	-	-
LOWER_T [MPa]	5754.1	-	-

Provino	Miscela	Data comp.	S <sub>1</sub> [MPa]	S <sub>2</sub> [MPa]	Δ <sub>REL</sub> [%]	S <sub>AV</sub> [MPa]	n°giri	v <sub>SSD</sub> [%]
E1	Ref_20	17/03/2025	7745.9	7388.1	4.6	7567.0	247	2.86
E2	Ref_20	20/03/2025	7830.2	8459.6	-8.0	8144.9	224	3.62
E3	Ref_20	20/03/2025	7469.3	7971.8	-6.7	7720.6	208	3.80
E4	Ref_20	20/03/2025	9139.8	8613.4	5.8	8876.6	267	3.51
E5	Ref_20	20/03/2025	8787.1	8454.9	3.8	8621.0	249	3.91
E6	Ref_20	20/03/2025	8311.7	8012.9	3.6	8162.3	171	4.73
E7	Ref_20	21/03/2025	8478.3	7806.7	7.9	8142.5	231	3.88
E8	Ref_20	21/03/2025	8109.8	7348.0	9.4	7728.9	213	3.66
E9	Ref_20	24/03/2025	7764.9	7455.6	4.0	7610.3	284	3.52
E10	Ref_20	24/03/2025	8151.7	7521.5	7.7	7836.6	210	4.24
E11	Ref_20	24/03/2025	9695.3	9065.8	6.5	9380.6	320	3.80
E12	Ref_20	24/03/2025	9473.4	9071.5	4.2	9272.5	250	4.23
E13	Ref_20	24/03/2025	9335.7	8923.9	4.4	9129.8	375	3.65
E14	Ref_20	25/03/2025	10731.2	10334.2	3.7	10532.7	340	3.50
E15	Ref_20	25/03/2025	9313.0	9402.5	-1.0	9357.8	271	3.93
E16	Ref_20	23/05/2025	9457.3	9308.9	1.6	9383.1	356	3.03
E17	Ref_20	29/05/2025	7402.6	7133.6	3.6	7268.1	400	4.13
E18	Ref_20	29/05/2025	7985.3	7609.6	4.7	7797.5	370	4.01

Media [MPa]	8474.0	277	3.78
Dev. Std [MPa]	882.6	68	0.43
Q1 [MPa]	7746.0	-	-
Q3 [MPa]	9236.8	-	-
IQR [MPa]	1490.8	-	-
UPPER_T [MPa]	11472.9	-	-
LOWER_T [MPa]	5509.9	-	-

Provino	Miscela	Data comp.	S <sub>1</sub> [MPa]	S <sub>2</sub> [MPa]	Δ <sub>REL</sub> [%]	S <sub>AV</sub> [MPa]	n°giri	v <sub>SSD</sub> [%]
C1	Sp_50	25/03/2025	8480.3	8050.9	5.1	8265.6	133	3.43
C2	Sp_50	25/03/2025	8670.9	8373.8	3.4	8522.4	106	3.94
C3	Sp_50	27/03/2025	11292.0	10659.0	5.6	10975.5	150	3.65
C4	Sp_50	27/03/2025	11353.9	10774.6	5.1	11064.3	163	4.12
C5	Sp_50	27/03/2025	11887.3	11610.7	2.3	11749.0	230	3.25
C6	Sp_50	27/03/2025	11335.7	11071.2	2.3	11203.5	145	3.99
C7	Sp_50	27/03/2025	11660.6	11629.3	0.3	11645.0	137	3.86
C8	Sp_50	27/03/2025	11690.7	10758.5	8.0	11224.6	145	4.29
C9	Sp_50	28/03/2025	11530.0	10754.1	6.7	11142.1	159	3.93
C10	Sp_50	28/03/2025	11900.2	10937.8	8.1	11419.0	244	3.61
C11	Sp_50	31/03/2025	10610.0	10820.3	-2.0	10715.2	139	3.98
C12	Sp_50	31/03/2025	10550.9	10340.1	2.0	10445.5	148	4.11
C13	Sp_50	31/03/2025	12263.0	11503.9	6.2	11883.5	159	3.75
C14	Sp_50	31/03/2025	11311.1	11503.9	-1.7	11407.5	154	4.06
C15	Sp_50	31/03/2025	10402.4	10027.6	3.6	10215.0	148	3.94
C16	Sp_50	09/05/2025	10406.6	10763.9	-3.4	10585.3	126	4.04
C18	Sp_50	09/05/2025	11643.5	11331.0	2.7	11487.3	141	4.44
C19	Sp_50	13/05/2025	9222.3	8604.2	6.7	8913.3	171	3.72
C20	Sp_50	13/05/2025	9961.4	9530.0	4.3	9745.7	304	4.04
C21	Sp_50	14/05/2025	11802.0	11615.2	1.6	11708.6	290	4.04
C22	Sp_50	14/05/2025	12793.0	12462.4	2.6	12627.7	366	3.59
C23	Sp_50	23/05/2025	14126.5	13012.6	7.9	13569.6	371	4.04
C24	Sp_50	27/05/2025	12997.5	12818.2	1.4	12907.9	175	3.66
C25	Sp_50	22/09/2025	13815.2	13213.3	4.4	13514.3	500	3.88
C26	Sp_50	22/09/2025	13698.3	13648.0	0.4	13673.2	500	3.73
C27	Sp_50	22/09/2025	14680.2	13789.2	6.1	14234.7	401	3.65

Media [MPa]	11340.2	187	3.87
Dev. Std [MPa]	1516.4	76	0.26
Q1 [MPa]	10617.7	-	-
Q3 [MPa]	11849.8	-	-
IQR [MPa]	1232.1	-	-
UPPER_T [MPa]	13698.0	-	-
LOWER_T [MPa]	8769.6	-	-

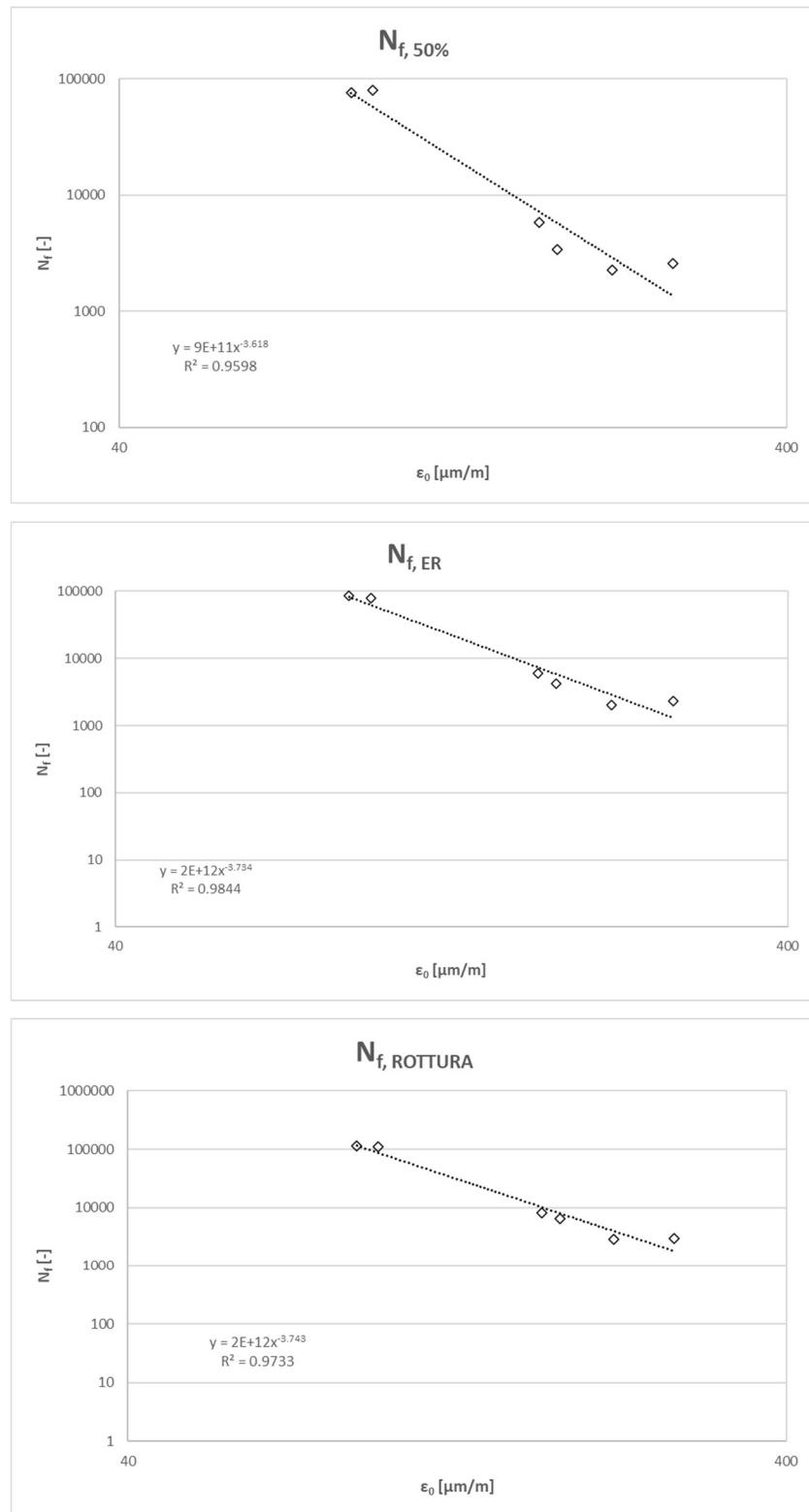
Provino	Miscela	Data comp.	S <sub>1</sub> [MPa]	S <sub>2</sub> [MPa]	Δ <sub>REL</sub> [%]	S <sub>AV</sub> [MPa]	n°giri	v <sub>SSD</sub> [%]
D1	PmB_50	28/03/2025	10027.3	10593.3	-5.6	10310.3	193	3.69
D2	PmB_50	28/03/2025	10794.6	10998.8	-1.9	10896.7	196	3.91
D3	PmB_50	28/03/2025	12226.6	11431.1	6.5	11828.9	226	3.44
D4	PmB_50	28/03/2025	12212.2	12236.3	-0.2	12224.3	159	3.95
D5	PmB_50	01/04/2025	12724.8	13252.9	-4.2	12988.9	132	4.34
D6	PmB_50	01/04/2025	12481.7	12537.8	-0.4	12509.8	197	3.71
D7	PmB_50	01/04/2025	12925.6	12421.8	3.9	12673.7	212	4.18
D8	PmB_50	01/04/2025	14893.2	14760.9	0.9	14827.1	278	3.42
D9	PmB_50	01/04/2025	12853.6	11845.6	7.8	12349.6	248	4.00
D10	PmB_50	02/04/2025	12706.3	12492.9	1.7	12599.6	195	3.99
D11	PmB_50	02/04/2025	13738.0	13979.1	-1.8	13858.6	223	3.68
D12	PmB_50	02/04/2025	11178.1	10616.0	5.0	10897.1	279	3.88
D13	PmB_50	02/04/2025	13231.6	12872.3	2.7	13052.0	253	3.64
D14	PmB_50	02/04/2025	12716.0	12679.8	0.3	12697.9	258	3.80
D15	PmB_50	02/04/2025	12095.2	12315.2	-1.8	12205.2	217	3.93
D16	PmB_50	12/05/2025	12730.0	12410.4	2.5	12570.2	227	3.64
D18	PmB_50	12/05/2025	12681.0	11585.9	8.6	12133.5	179	4.29
D19	PmB_50	12/05/2025	14577.3	14325.8	1.7	14451.6	400	2.99

Media [MPa]	12504.1	226	3.80
Dev. Std [MPa]	1147.9	58	0.33
Q1 [MPa]	12151.4	-	-
Q3 [MPa]	12916.1	-	-
IQR [MPa]	764.7	-	-
UPPER_T [MPa]	14063.2	-	-
LOWER_T [MPa]	11004.3	-	-

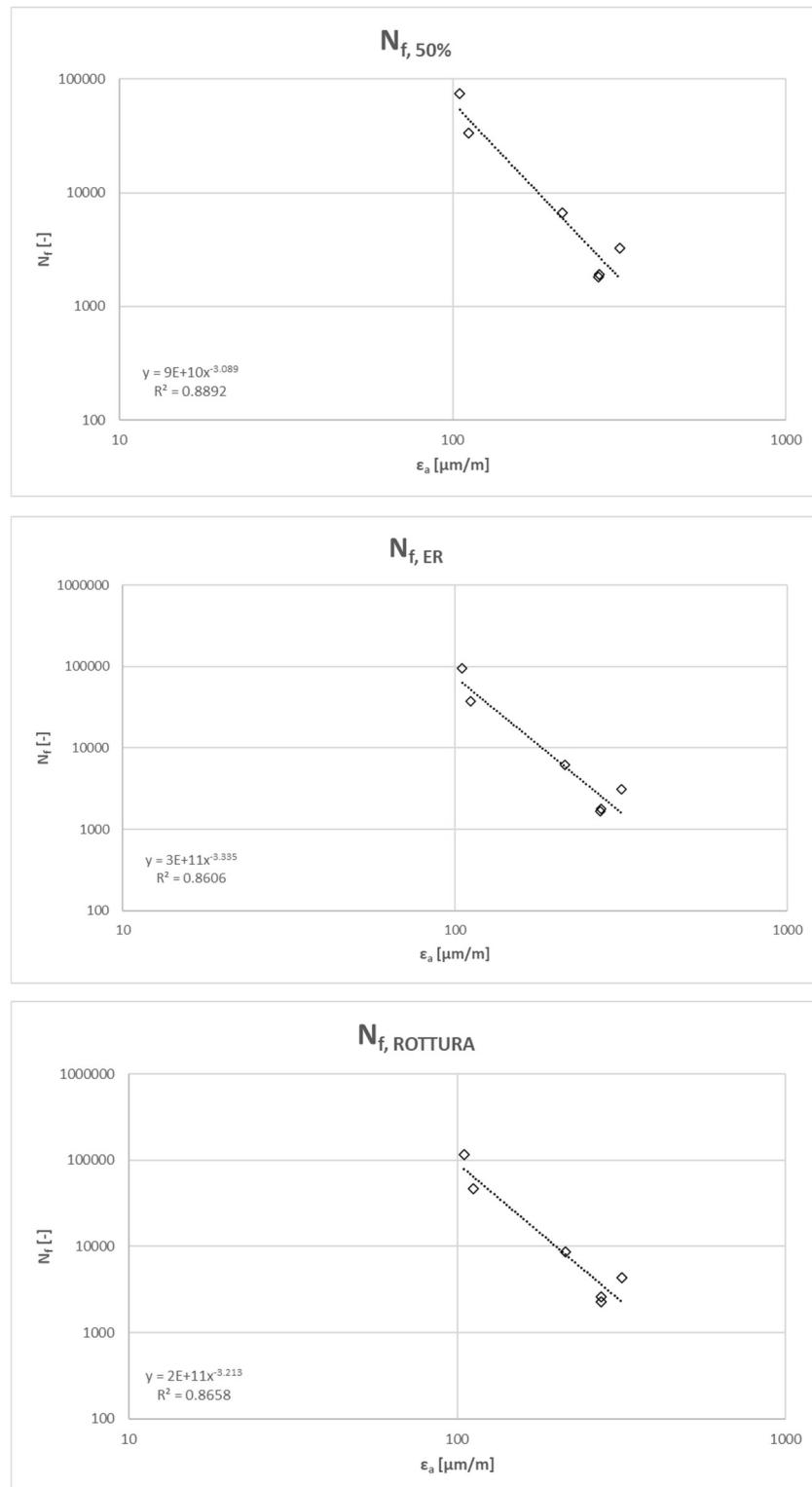
## Resistenza a fatica (IT-CY)

ID	Miscela	$S_0$ [MPa]	$\sigma_a$ [kPa]	$\varepsilon_0$ [μm/m]	$N_{f,50\%}$ [-]	$N_{f,ER}$ [-]	$N_{f,ROTTURA}$ [-]	vSSD	$\log_{10} \varepsilon_0$ [μm/m]	$\log_{10} N_{f,50\%}$ [-]	$\log_{10} N_{f,ER}$ [-]	$\log_{10} N_{f,ROTTURA}$ [-]	$N_{f,50\%}$	$N_{f,ER}$	$N_{f,ROTTURA}$	
A13	Sp_20	8283	900	270.4	2568	2342	2998	3.55	2.432	3.410	3.370	3.477	11.271	11.722	11.848	
A16	Sp_20	10855	900	218.9	2266	2052	2916	3.98	2.340	3.555	3.312	3.465	1.87E+11	5.28E+11	7.04E+11	
A22	Sp_20	10357	680	181.2	3422	4210	6455	3.76	2.258	3.54	3.624	3.810	-3.336	-3.531	-3.525	
A25	Sp_20	11140	700	170.2	5827	6009	8023	4.11	2.231	3.765	3.779	3.904	38	42	46	
A29	Sp_20	14936	520	89.1	76735	86429	114814	3.99	1.950	4.885	4.937	5.060				
B7	PmB_20	9698	900	274.9	1924	1804	2628	2.74	2.439	3.284	3.256	3.420				
B13	PmB_20	11660	440	105.0	74415	94768	115995	3.98	2.021	4.872	4.977	5.064				
B16	PmB_20	12861	450	111.7	33367	37010	46952	4.16	2.048	4.523	4.568	4.672				
B17	PmB_20	9880	650	213.9	6639	6149	8597	3.86	2.330	3.822	3.789	3.934				
B18	PmB_20	10752	920	273.7	1804	1667	2266	3.62	2.437	3.256	3.222	3.355				
B19	PmB_20	7337	700	317.4	3276	3121	4353	4.38	2.502	3.515	3.494	3.639				
E13	Ref_20	9130	520	99.4	34539	43150	54324	3.65	1.997	4.538	4.635	4.735				
E14	Ref_20	11434	950	227.5	1818	1823	2530	3.50	2.357	3.260	3.261	3.403				
E15	Ref_20	10351	900	236.7	2104	2004	2718	3.93	2.374	3.323	3.302	3.434				
E16	Ref_20	13080	700	145.1	7224	8619	11793	3.03	2.162	3.859	3.935	4.072				
E18	Ref_20	10152	650	216.9	4985	5328	7336	4.01	2.336	3.698	3.727	3.865				
C18	Sp_50	15446	800	127.2	14070	13909	18548	4.44	2.105	4.148	4.143	4.268				
C19	Sp_50	10109	1100	356.5	1451	1277	1701	3.72	2.552	3.162	3.106	3.231				
C20	Sp_50	12174	1000	244.0	3226	3121	4409	4.04	2.387	3.509	3.494	3.644				
C21	Sp_50	14530	870	149.7	7060	6742	9475	4.04	2.175	3.849	3.829	3.977				
C23	Sp_50	16536	620	84.0	58209	56017	77922	4.04	1.924	4.765	4.748	4.892				
D1	PmB_50	11218	1200	301.3	1307	1185	1645	3.69	2.4790	3.1163	3.0737	3.2162				
D8	PmB_50	17003	900	120.2	11929	11305	15134	3.42	2.0801	4.0766	4.0533	4.1800				
D13	PmB_50	17850	700	98.7	33112	32358	41685	3.64	1.9944	4.5200	4.5100	4.6200				
D18	PmB_50	12641	1000	191.1	5452	4947	6917	4.29	2.2812	3.7366	3.6943	3.8399				
D19	PmB_50	19068	850	102.0	28509	25901	33239	2.99	2.0087	4.4550	4.4133	4.5216				
													23	23	26	
													31	37	39	
ACR Sp_20																
ACR PmB_20																
ACR Ref_20																
ACR Sp_50																
ACR PmB_50																

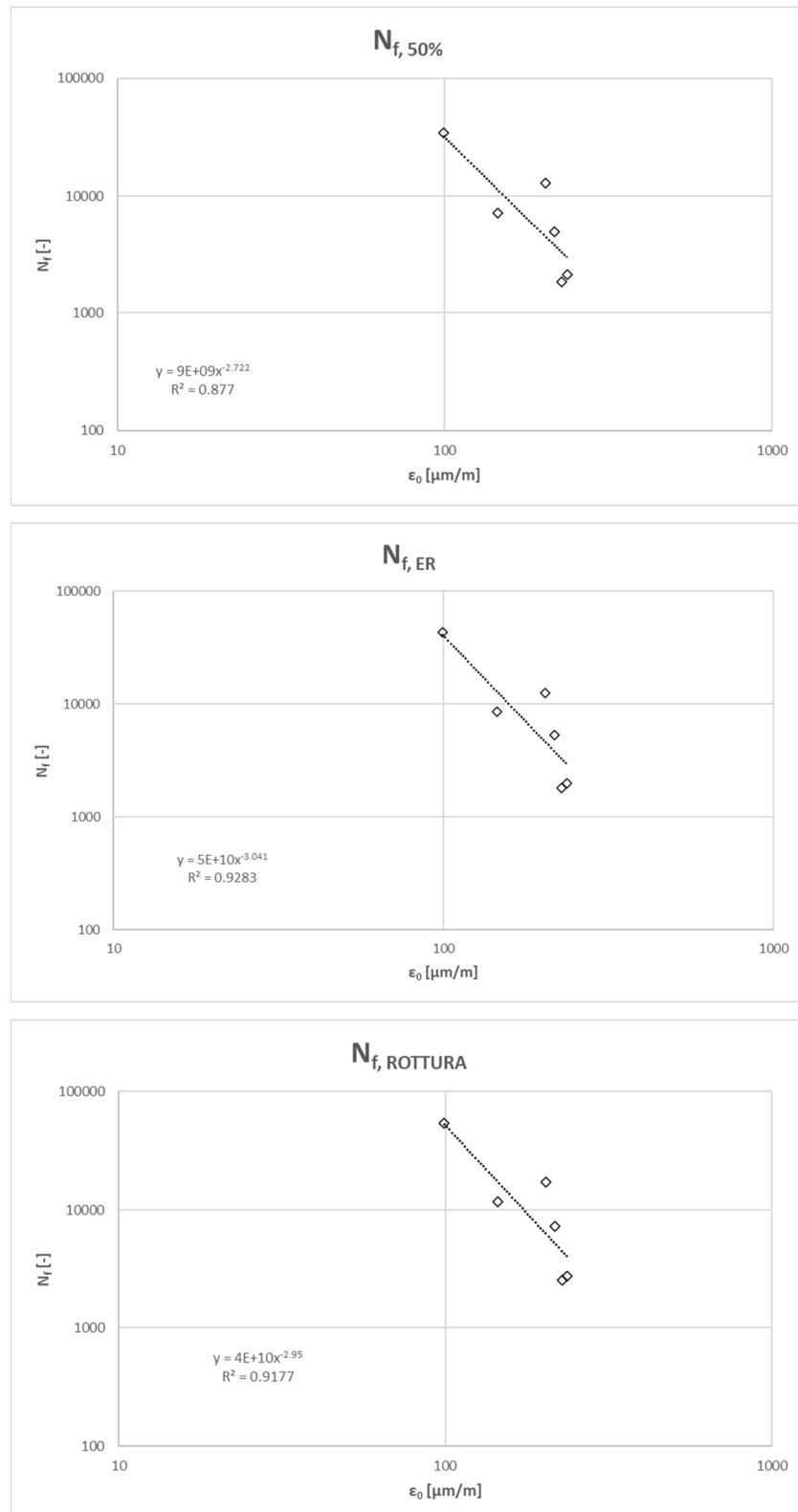
## Sp\_20



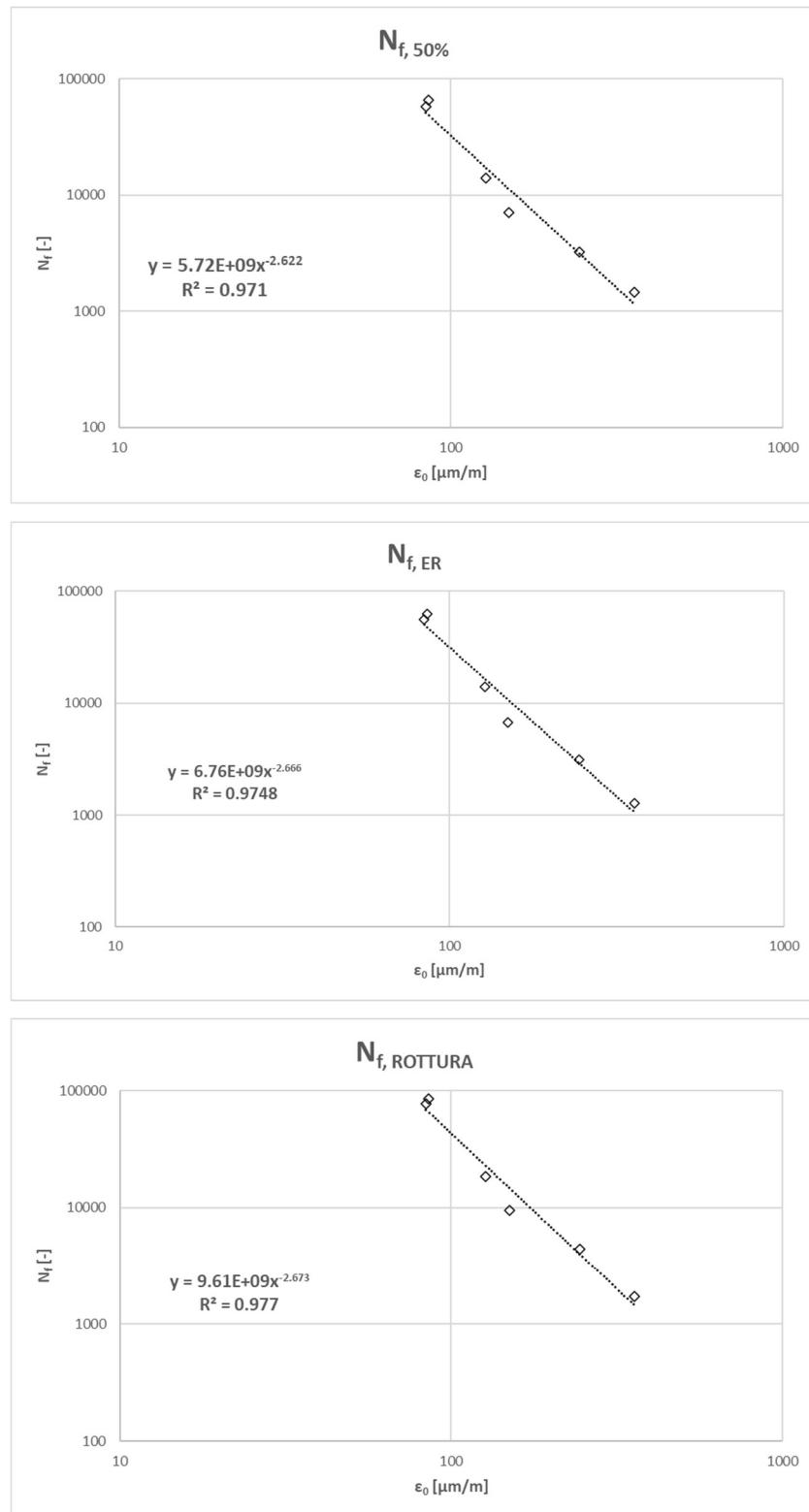
## ***PmB\_20***



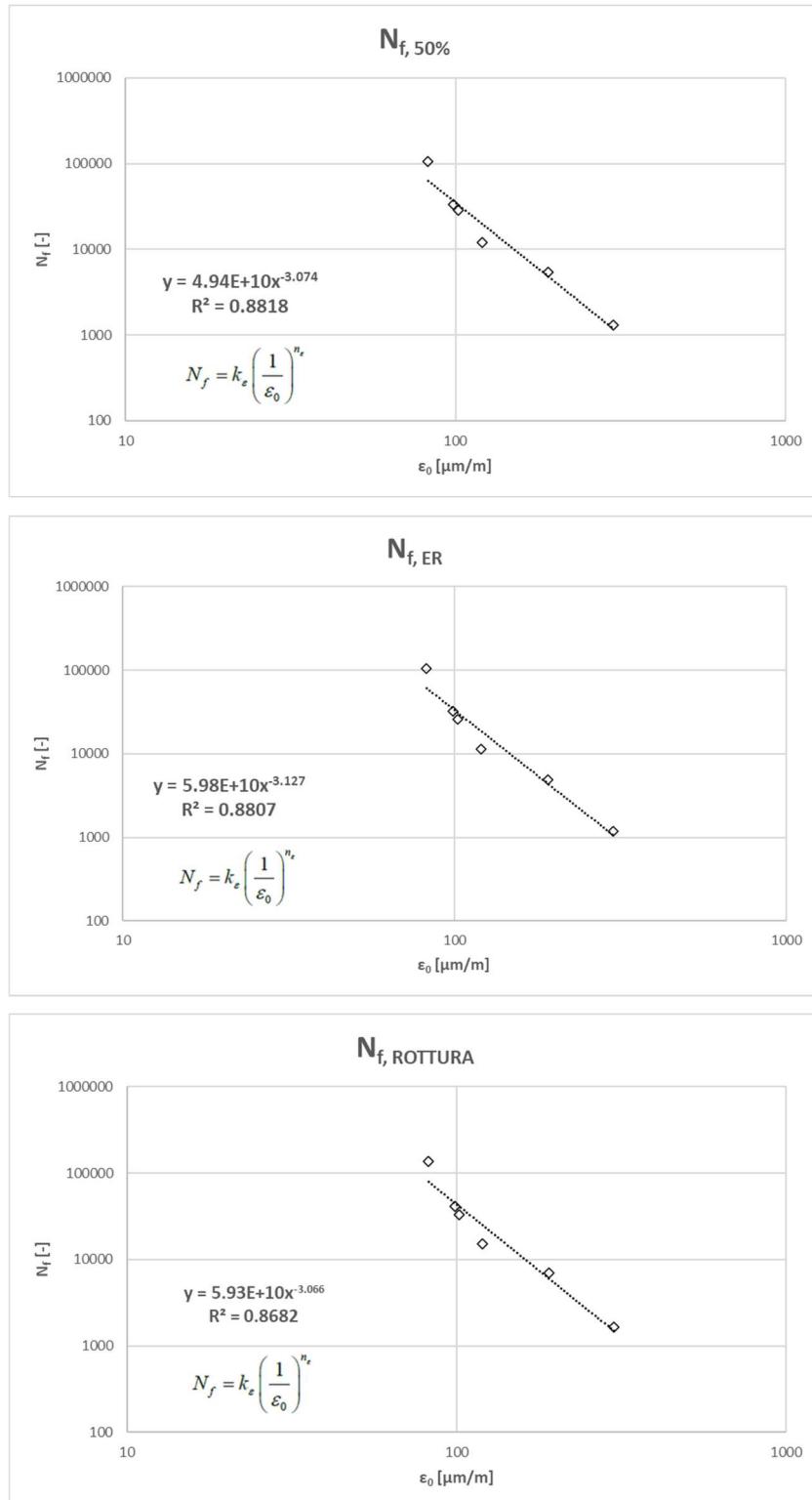
## Ref\_20



## Sp\_50



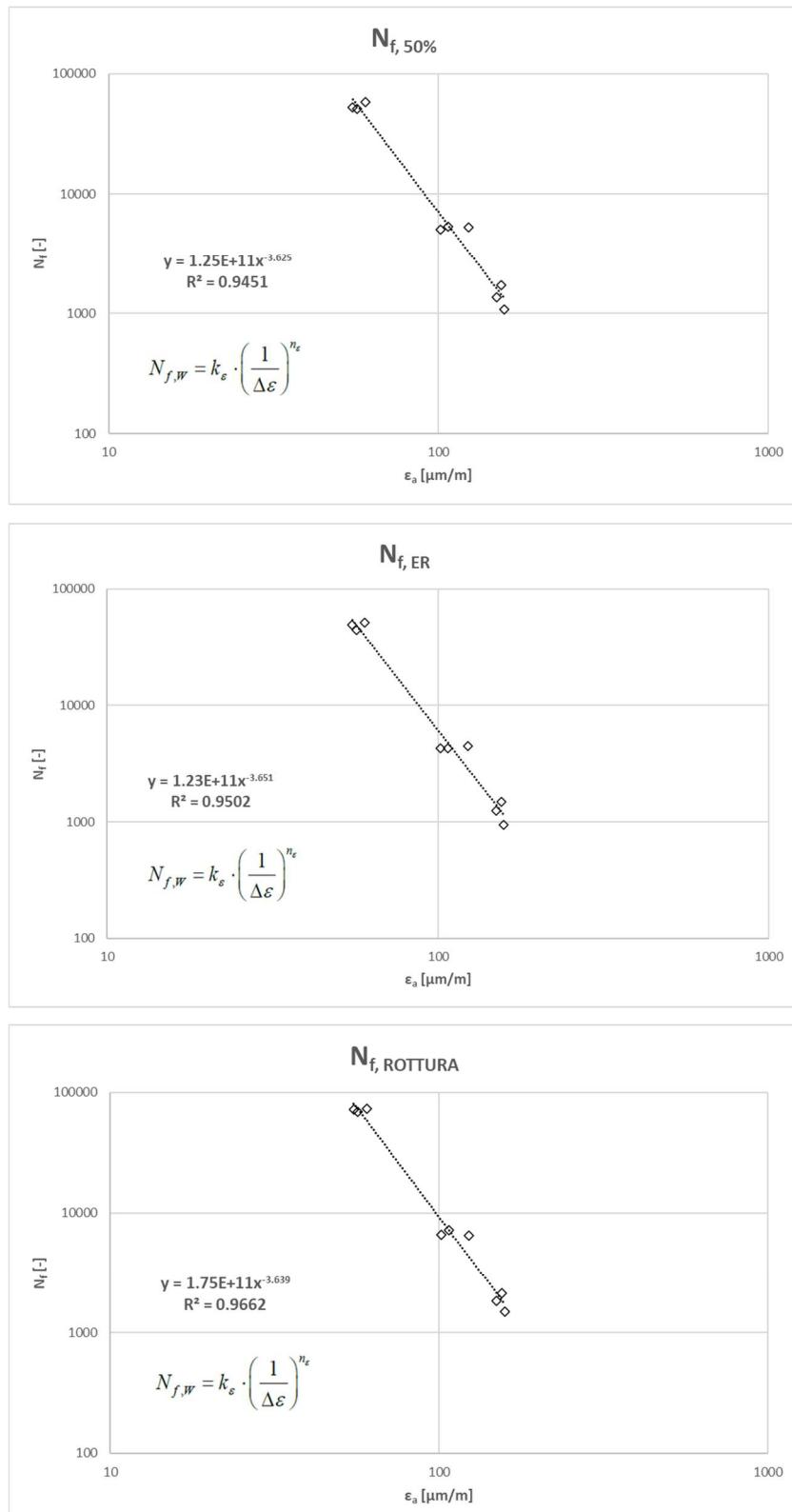
## PmB\_50



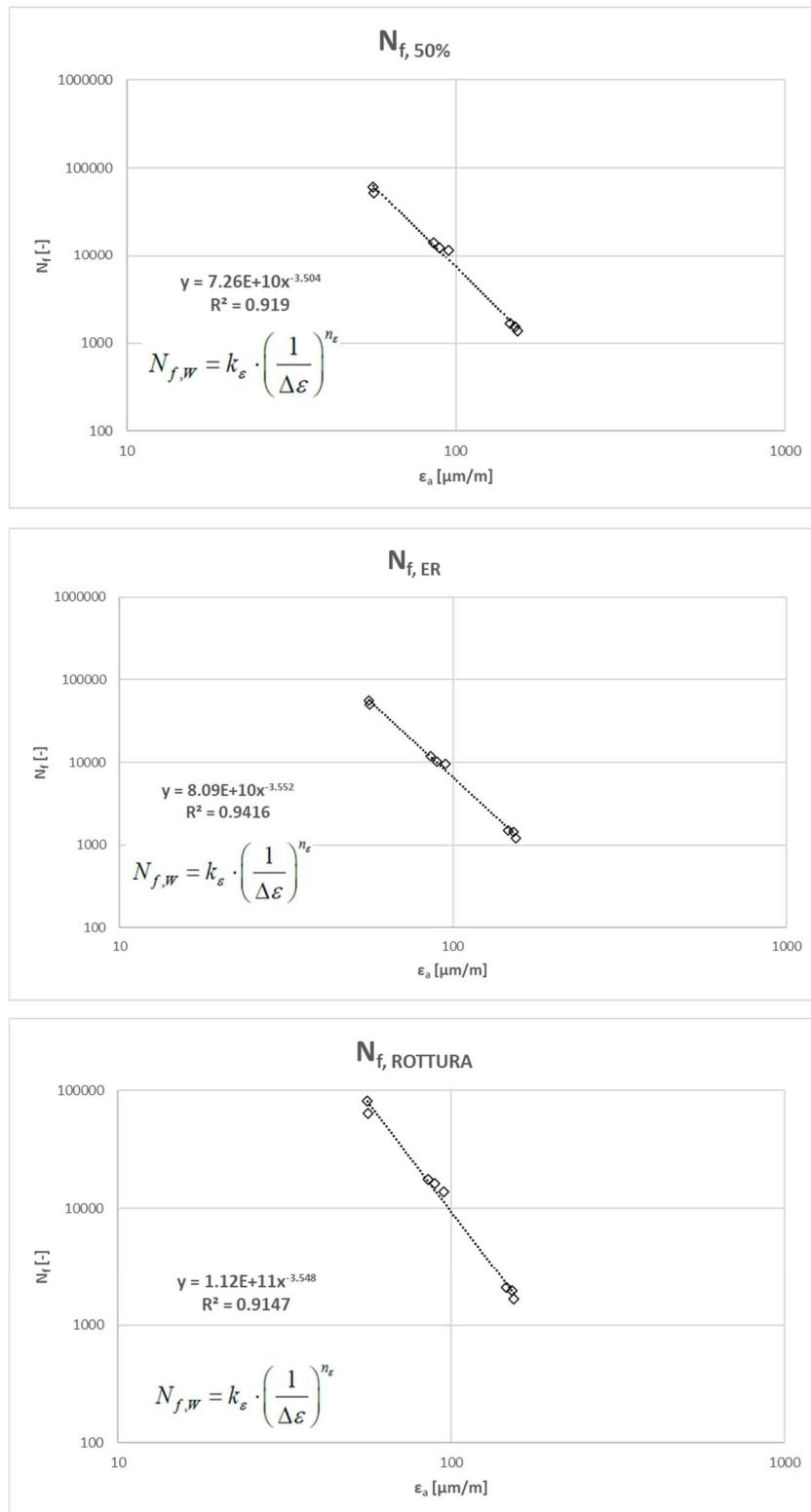
## Resistenza a fatica (CIT-CY)

ID	Miscela	$S_u$ [MPa]	$\sigma_a$ [kPa]	$\epsilon_a$ [mm/mm]	$\Delta\epsilon$ [-]	$N_{f,50\%}$ [-]	$N_{f,IR}$ [-]	$N_{f,ROTURA}$ [-]	$\gamma_{SSD}$ [%]	$\log_{10}\Delta\epsilon$ [mm/m]	$\log_{10}N_{f,50\%}$ [-]	$\log_{10}N_{f,IR}$ [-]	$\log_{10}N_{f,ROTURA}$ [-]
A18	Sp 20	11709	290.0	50.8	101.55	5010.00	4270	6570	3.71	2.007	3.700	3.630	3.818
A19	Sp 20	9996	300.0	61.5	123.10	5290.00	4520	6500	3.45	2.090	3.723	3.655	3.813
A20	Sp 20	12191	470.0	79.0	158.05	1080.00	950	1490	3.02	2.199	3.033	2.978	3.173
A21	Sp 20	12653	330.0	53.5	106.94	5350.00	4290	7160	3.41	2.029	3.728	3.632	3.855
A23	Sp 20	15944	220.0	28.3	56.61	50770.00	44610	68900	3.14	1.753	4.706	4.649	4.839
A24	Sp 20	11633	440.0	77.5	155.07	1720.00	1480	2110	3.81	2.191	3.236	3.170	3.234
A26	Sp 20	15006	220.0	30.1	60.12	58170.00	51850	72800	3.45	1.779	4.765	4.715	4.862
A27	Sp 20	15967	220.0	27.5	54.98	52800.00	49000	71970	3.49	1.740	4.723	4.690	4.857
A28	Sp 20	12326	450.0	74.8	149.69	1350.00	1250	1840	3.39	2.175	3.130	3.097	3.265
B2	PmB 20	13429	280.0	42.7	85.5	14150	11990	17630	3.39	1.932	4.151	4.079	4.246
B5	PmB 20	11652	270.0	95.0	11610	9650	13850	30150	3.01	1.978	4.065	3.985	4.141
B6	PmB 20	12878	280.0	44.6	89.3	12320	10150	16290	3.20	1.991	4.096	4.212	4.291
B8	PmB 20	12598	450.0	73.2	146.4	1690	1490	2090	2.54	2.166	3.228	3.173	3.320
B11	PmB 20	12504	470.0	77.0	154.1	1370	1220	1660	3.91	2.188	3.137	3.086	3.220
B12	PmB 20	12143	450.0	76.0	151.9	1520	1450	1940	2.64	2.182	3.182	3.161	3.288
B15	PmB 20	13837	190.0	28.2	56.3	52500	49800	63650	3.89	1.751	4.720	4.697	4.804
B20	PmB 20	13169	190.0	28.0	56.1	60730	55850	82280	4.89	1.749	4.783	4.747	4.915
E1	Ref 20	12666	190	30.7	61.5	25160	23770	32130	2.86	1.789	4.401	4.376	4.507
E2	Ref 20	15168	280	37.8	75.7	11530	10070	13910	3.62	1.879	4.062	4.003	4.143
E4	Ref 20	12886	470	74.8	149.5	1480	1350	1870	3.51	2.175	3.170	3.130	3.272
E5	Ref 20	13325	280	43.1	86.1	12160	10200	15900	3.91	1.935	4.085	4.009	4.201
E6	Ref 20	12008	280	47.8	95.6	8640	7890	10720	4.73	1.980	3.937	3.897	4.030
E7	Ref 20	13733	210	31.4	62.7	48790	43240	57850	3.88	1.797	4.688	4.636	4.762
E8	Ref 20	15212	200	27.0	53.9	39420	38840	52460	3.66	1.732	4.596	4.589	4.720
E9	Ref 20	13007	190	29.9	59.9	55740	48940	69990	3.52	1.777	4.746	4.682	4.841
E10	Ref 20	12804	190	30.4	60.8	52490	48390	64190	4.24	1.784	4.720	4.685	4.807
E11	Ref 20	14647	470	65.8	131.5	1290	1140	1720	3.80	2.119	3.111	3.057	3.236
E12	Ref 20	12475	450	74.0	147.9	1590	1490	2040	4.23	2.170	3.201	3.173	3.310
C4	Sp 50	13790	320	47.6	95.2	17470	15190	19800	4.12	1.979	4.242	4.182	4.297
C5	Sp 50	16316	510	64.1	128.1	3030	2820	3480	3.25	2.108	3.481	3.450	3.542
C6	Sp 50	13844	340	50.3	100.7	15910	13210	18440	3.99	2.003	4.202	4.121	4.266
C7	Sp 50	15212	520	70.1	140.1	2320	1940	2860	3.86	2.147	3.365	3.288	3.456
C8	Sp 50	16904	300	36.4	72.8	27980	23890	35290	4.29	1.862	4.447	4.360	4.548
C9	Sp 50	14890	350	48.2	96.3	13210	12200	15590	3.93	1.984	4.121	4.086	4.193
C10	Sp 50	11925	530	91.0	182.1	2480	2050	3100	3.61	2.260	3.394	3.312	3.491
C11	Sp 50	16278	330	41.6	83.1	13030	10210	16190	3.98	1.920	4.115	4.009	4.209
C14	Sp 50	15778	520	67.6	135.2	2400	2060	3120	4.06	2.131	3.380	3.314	3.494
C15	Sp 50	16776	240	29.3	58.7	55270	48970	70640	3.94	1.768	4.742	4.690	4.849
C25	Sp 50	20562	270	26.9	53.8	86070	79600	118340	3.88	1.731	4.935	4.901	5.073
C27	Sp 50	22051	270	25.1	50.2	109990	112110	160130	3.65	1.701	5.004	5.050	5.204
D3	PmB 50	17539	250	29.2	58.4	83320	78360	103150	3.44	1.767	4.921	4.894	5.013
D4	PmB 50	16527	530	65.7	131.5	1880	1710	2410	3.95	2.119	3.274	3.233	3.382
D5	PmB 50	17730	360	41.6	83.3	11170	9090	14370	4.34	1.920	4.048	3.959	4.157
D9	PmB 50	15415	540	71.8	143.6	1510	1370	1980	4.00	2.157	3.179	3.157	3.297
D10	PmB 50	15718	540	70.4	140.8	2230	2000	2840	3.99	2.149	3.348	3.301	3.453
D14	PmB 50	18979	340	36.7	73.4	16440	15810	23640	3.93	1.866	4.216	4.199	4.362
D15	PmB 50	20293	350	35.3	70.7	13140	13120	19640	4.93	1.849	4.119	4.118	4.293

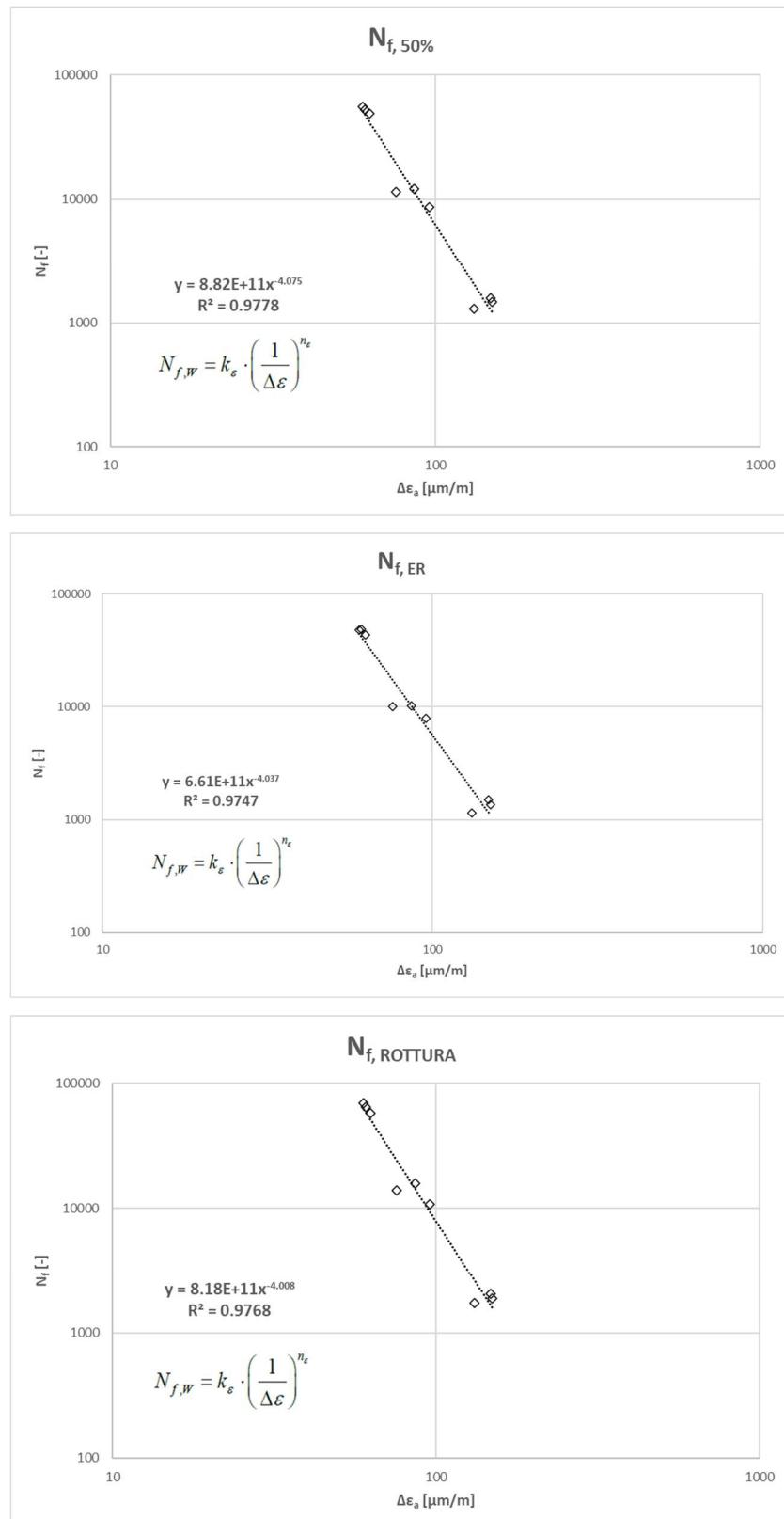
## Sp\_20



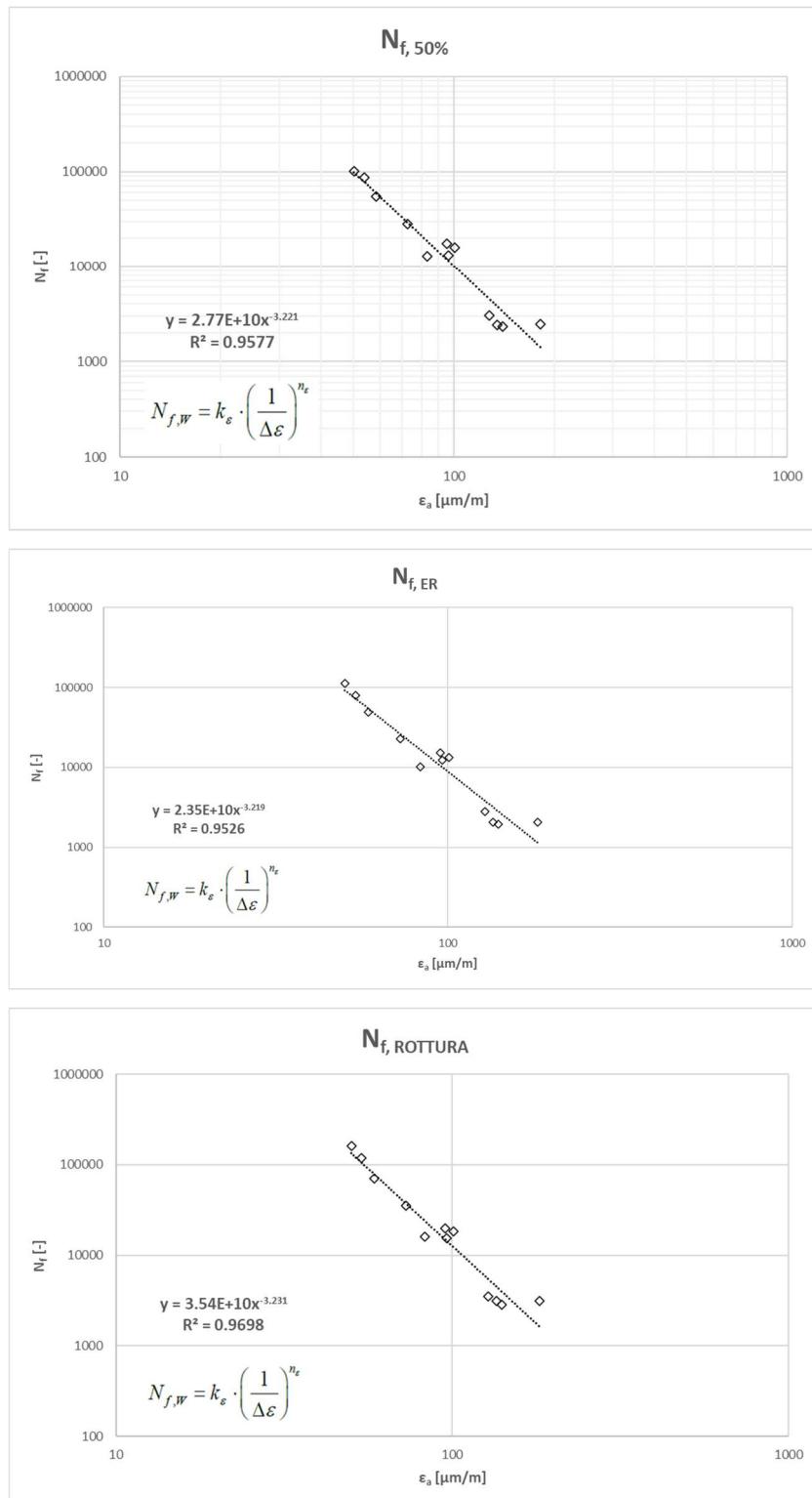
## ***PmB\_20***



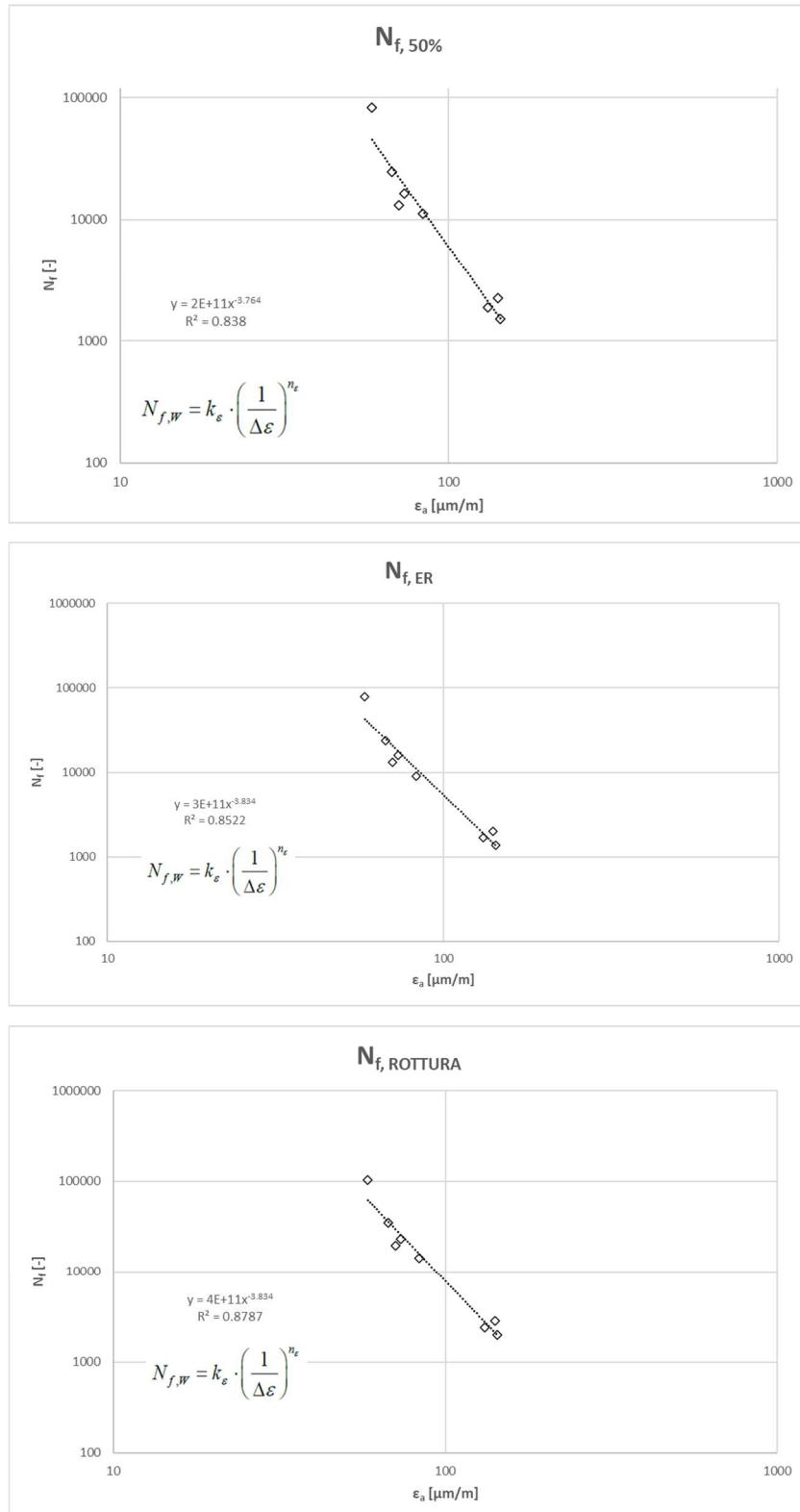
## Ref\_20



## Sp\_50



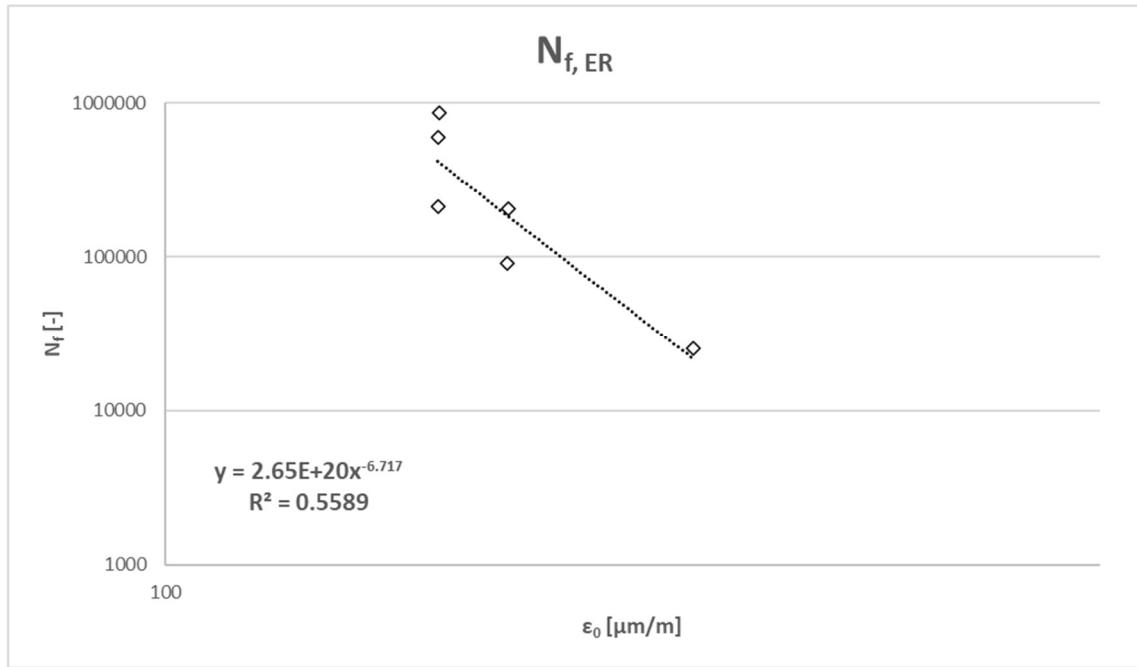
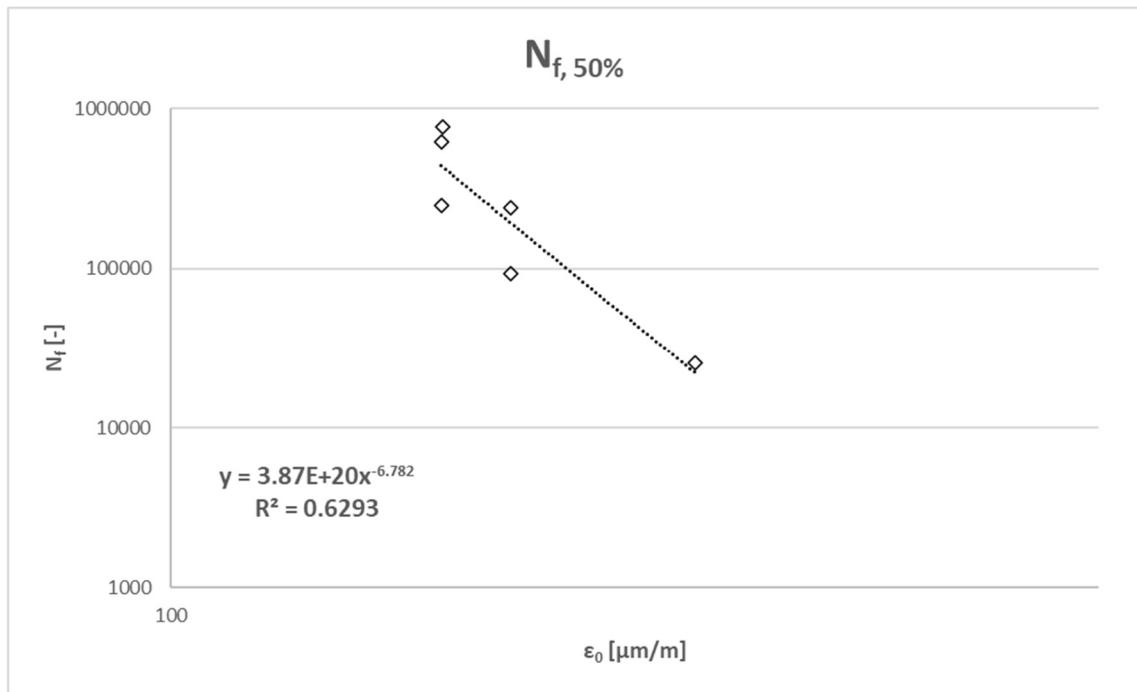
## ***PmB\_50***



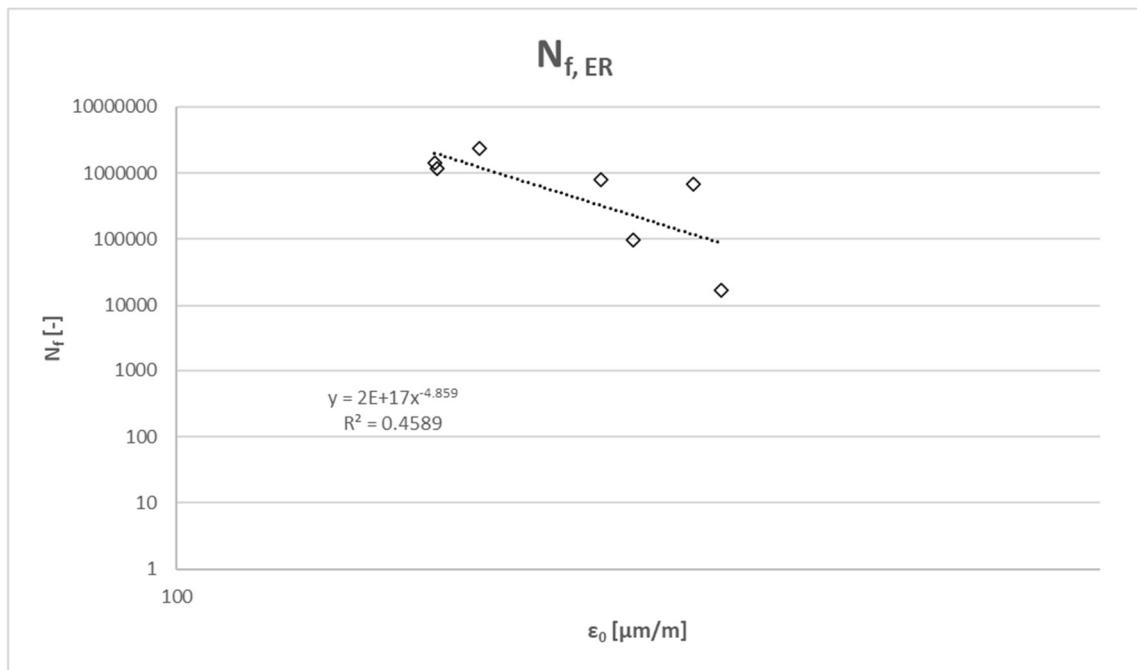
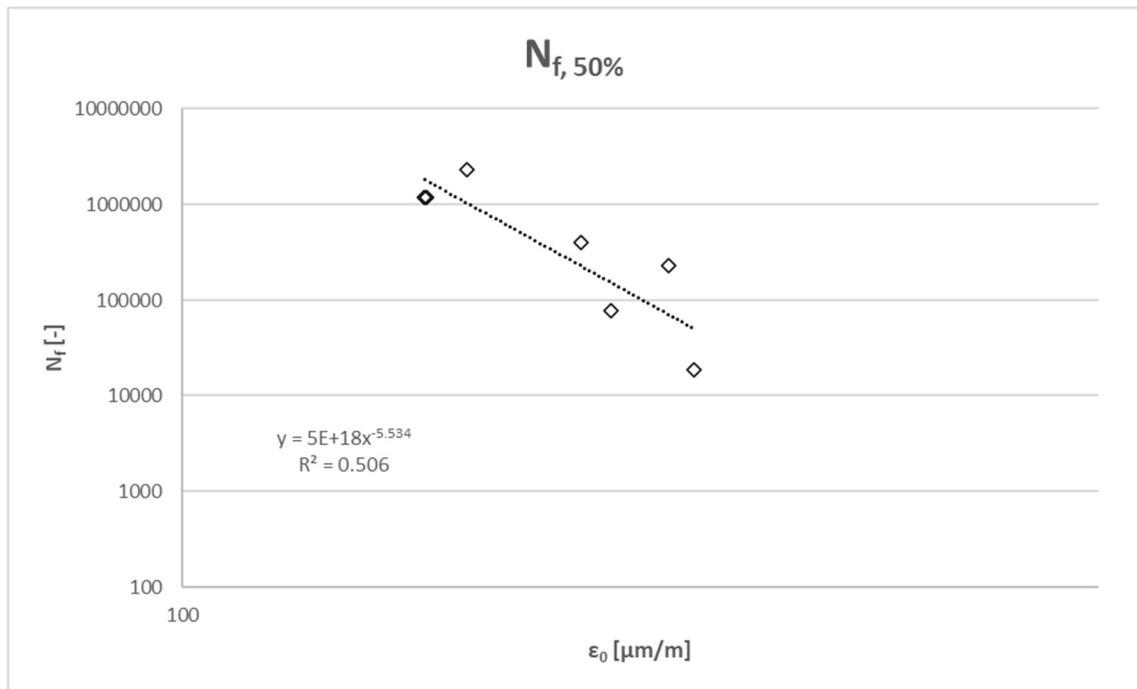
## Resistenza a fatica (4PB-PR)

ID	Miscela	$S_0$		$\sigma_0$ [kPa]	$\epsilon_0$ [-]	$N_{f,50\%}$ [-]	$N_{f,ER}$ [-]	$\log_{10} \epsilon_0$ [μm/m]	$\log_{10} N_{f,50\%}$ [-]	$\log_{10} N_{f,ER}$ [-]	$\nu_{ssd}$ [%]
		$S_0$ [MPa]	$\sigma_0$ [kPa]								
A1-PR	Sp_20	8829	1586	180.2	92612	90504	2.256	4.967	4.957	3.94	
A3-PR	Sp_20	9747	1754	180.5	239884	206803	2.256	5.380	5.316	2.81	
A4-PR	Sp_20	9857	1566	160.2	774264	866519	2.205	5.889	5.938	2.39	
A5-PR	Sp_20	10663	1703	159.8	624534	596425	2.204	5.796	5.776	2.33	
A7-PR	Sp_20	9110	2266	248.5	25216	2395	4.402	4.402	3.13	-6.717	
A8-PR	Sp_20	9604	1536	159.9	249907	213250	2.204	5.398	5.329	3.09	
B1-PR	PmB_20	9334	1674	179.0	1196129	1430723	2.253	6.078	6.156	2.51	
B2-PR	PmB_20	7982	1442	180.0	1196129	1165915	2.255	6.078	6.067	2.79	
B4-PR	PmB_20	5961	1184	197.9	2282093	2356255	2.297	6.358	6.372	2.93	
B5-PR	PmB_20	7037	1831	260.6	400150	806616	2.416	5.602	5.907	3.10	
B6-PR	PmB_20	9017	2526	279.6	78223	97724	2.447	4.893	4.990	2.54	
B7-PR	PmB_20	7906	2694	340.9	18198	17114	2.533	4.260	4.233	2.64	
B8-PR	PmB_20	6660	2136	320.9	230262	670914	2.506	5.362	5.827	2.81	
E1-PR	Ref_20	9602	1729	180.5	73565	75858	2.256	4.867	4.880	3.15	
E2-PR	Ref_20	8100	1621	200.6	348516	402203	2.302	5.542	5.604	3.54	
E3-PR	Ref_20	7298	1086	149.1	425490	423318	2.173	5.629	5.627	3.48	
E4-PR	Ref_20	7962	1435	180.0	473757	624534	2.255	5.676	5.796	3.25	
E6-PR	Ref_20	9218	1475	160.0	1385692	2326306	2.204	6.142	6.367	3.68	
E7-PR	Ref_20	8458	2198	260.1	66070	91202	2.415	4.820	4.960	3.64	
E8-PR	Ref_20	8372	2348	279.4	47680	87097	2.446	4.678	4.940	2.90	
C1-PR	Sp_50	9613	1735	179.7	1250899	1350690	2.255	6.097	6.131	3.42	
C2-PR	Sp_50	8220	1474	179.1	81910	62614	2.253	4.913	4.797	3.50	
C3-PR	Sp_50	10781	2142	200.2	189574	181971	2.301	5.278	5.260	3.32	
C4-PR	Sp_50	13264	2123	160.2	1072891	1165915	2.205	6.031	6.067	3.29	
C6-PR	Sp_50	9200	1924	209.4	96977	91202	2.321	4.987	4.960	3.19	
C7-PR	Sp_50	11351	2556	225.2	99236	85442	2.353	4.997	4.932	3.48	
C8-PR	Sp_50	9899	1975	199.1	1544486	152133	2.299	5.189	5.182	2.39	
D1-PR	PmB_50	12716	2287	179.7	32994	27505	2.254	4.518	4.439	3.25	
D2-PR	PmB_50	14245	2582	181.6	119613	139459	2.259	5.078	5.144	3.02	
D3-PR	PmB_50	11388	2662	234.4	18550	20496	2.370	4.268	4.312	3.52	
D4-PR	PmB_50	11079	2227	201.1	84140	91202	2.303	4.925	4.960	3.71	
D5-PR	PmB_50	13236	2651	200.7	44669	45534	2.302	4.650	4.658	3.30	
D6-PR	PmB_50	13299	2140	161.0	222161	197495	2.207	5.347	5.296	3.34	
D7-PR	PmB_50	14610	2190	150.2	1291550	1275134	2.177	6.111	6.106	3.30	

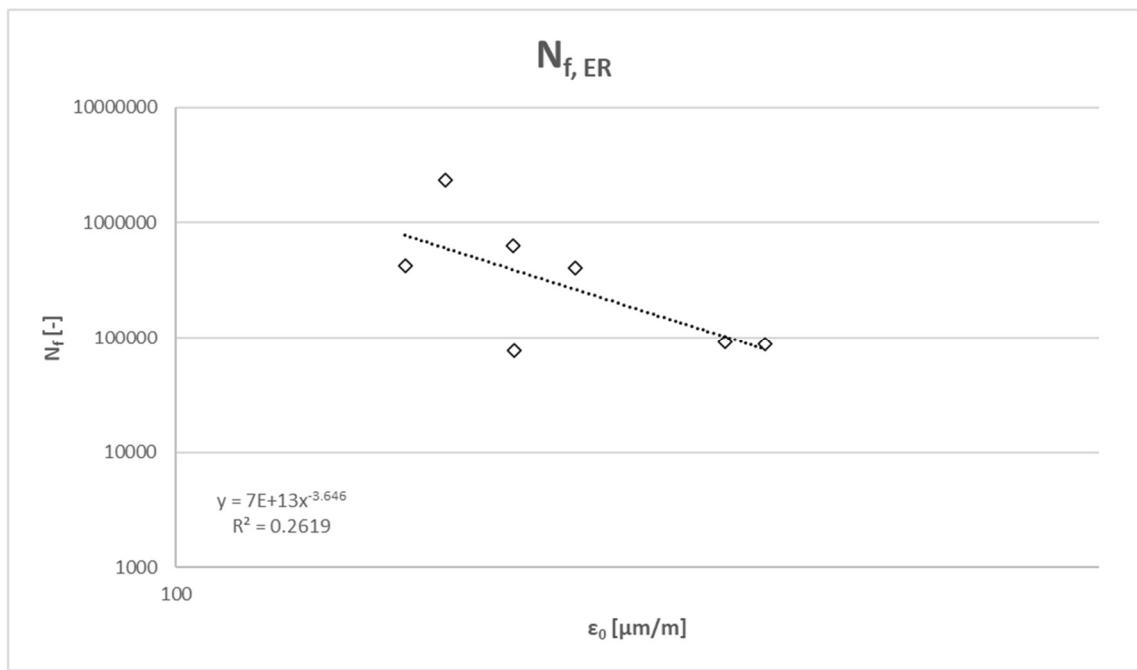
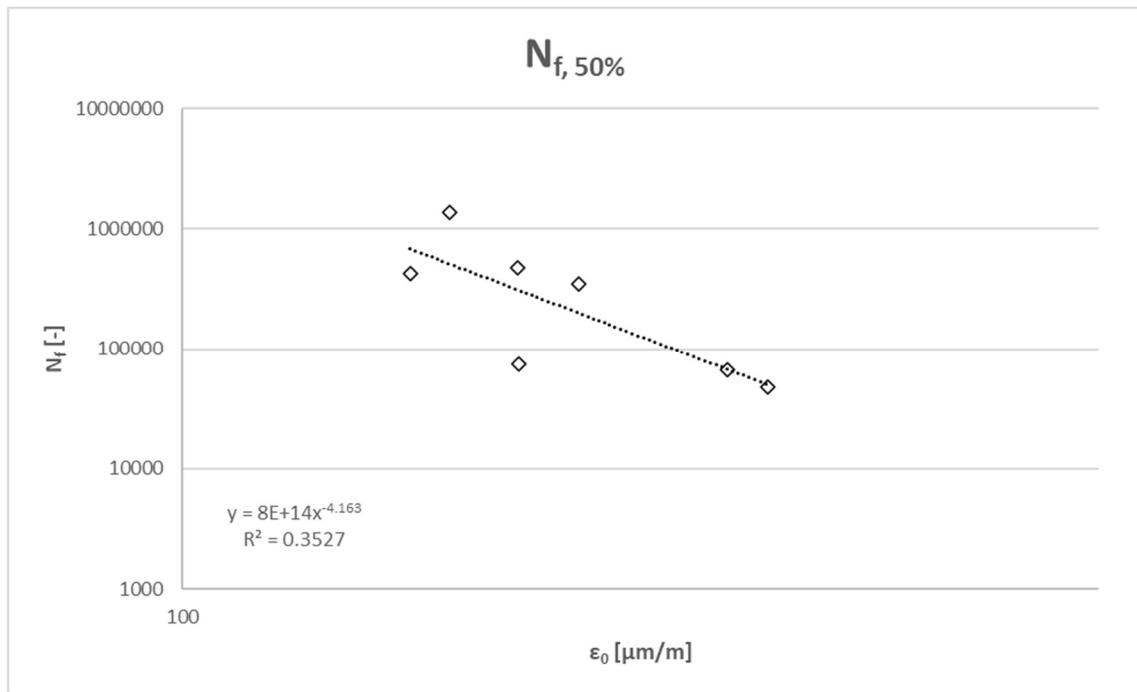
## Sp\_20



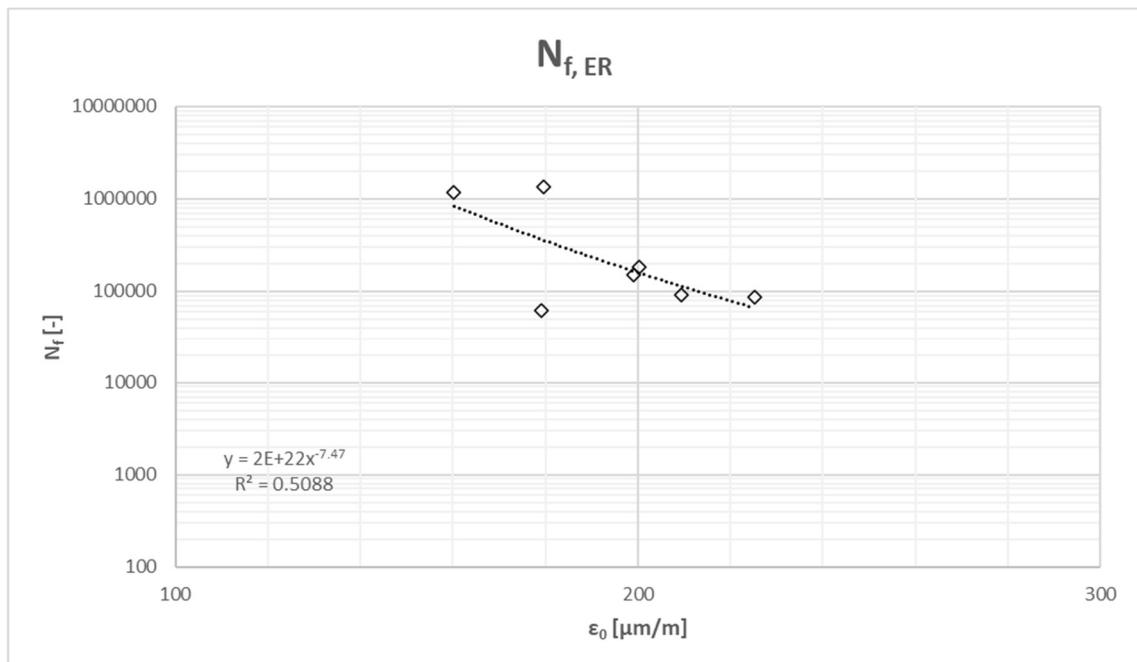
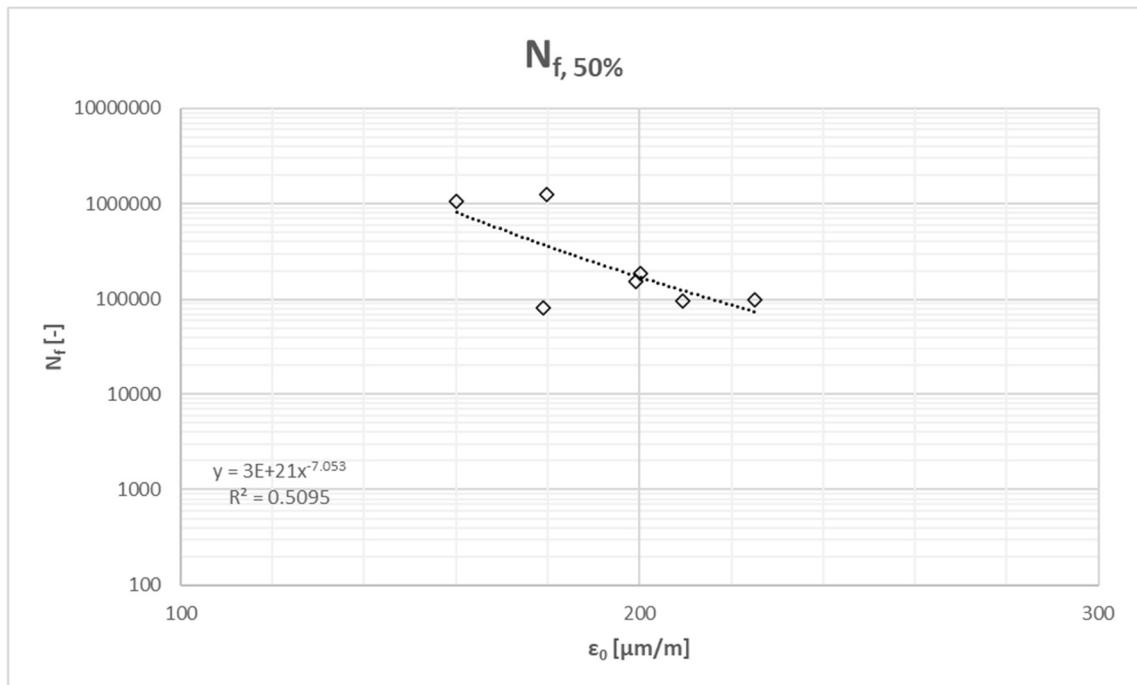
## ***PmB\_20***



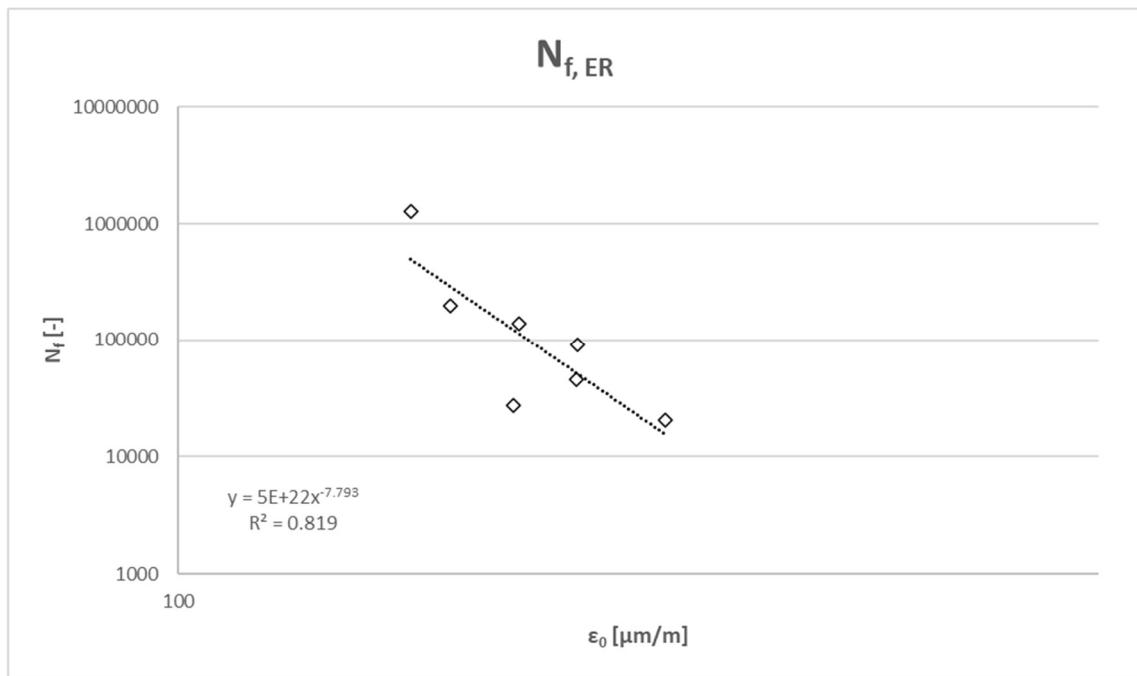
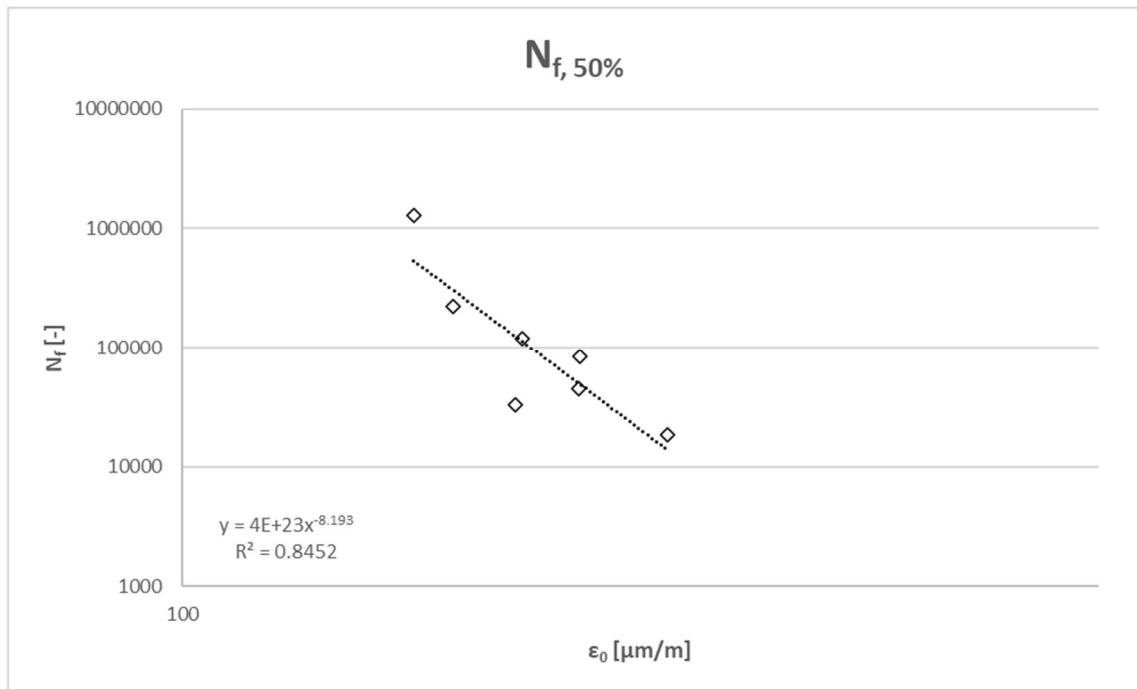
## Ref\_20



## Sp\_50



## ***PmB\_50***



Concludo esprimendo la mia più sincera gratitudine a tutti coloro che mi hanno accompagnato lungo questo percorso, rendendo possibile il raggiungimento di un traguardo così importante. Un ringraziamento speciale va al prof. Baglieri e al prof. Dalmazzo per la loro guida attenta, sempre stimolante e ricca di preziosi consigli, e a Joseph, per la pazienza, la dedizione e la fiducia che ha riposto in me.

Desidero inoltre ringraziare Alessandro, che con la sua disponibilità, la sua simpatia e il suo sostegno costante ha saputo rendere leggeri anche i giorni più impegnativi.

Un grazie sentito va anche alla prof.ssa Tsantilis, al prof. Riviera, a Davide, Enrico, Mattia, Sadegh e a tutti coloro che, con i loro suggerimenti e la loro collaborazione, hanno contribuito a facilitare e arricchire il mio lavoro.

