



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Anno Accademico 2023/2024

**Comportamento a fatica di
conglomerati bituminosi contenenti
fibre di riciclo da corde da tennis
esauste**

Relatori:

Prof. Riviera Pier Paolo
Prof. Santagata Ezio
Prof. Dalmazzo Davide
Ing. Hajjali Mozghan

Candidato:

Miceli Enrico



**Politecnico
di Torino**

ABSTRACT

Lo smaltimento dei rifiuti plastici rappresenta, ormai, una problematica ambientale globale ad elevata criticità che richiede interventi mirati urgenti. Una delle sfide che i recenti anni hanno posto in essere è rappresentata dal possibile recupero di tali rifiuti all'interno dei materiali da costruzione.

Tra i rifiuti di origine plastica più comuni, i sottoprodotti delle attrezzature sportive ne rappresentano un volume non trascurabile. In particolare, le corde da tennis esauste vengono accumulate notevolmente poiché, nel mondo, vi sono approssimativamente 87 milioni di tennisti che, regolarmente, cambiano le loro corde giunte a fine vita a causa della perdita graduale di tensione e flessibilità, con una conseguente perdita di prestazioni. Tali corde possono essere di diverso materiale, a seconda delle caratteristiche desiderate, tra cui nylon, poliestere, budello naturale, kevlar o una combinazione di questi. Le incordature hanno una lunghezza di circa 15 m e diametro variabile tra 1.10 e 1.30 mm.

In linea con le attuali indicazioni della Circular Economy, l'indagine sperimentale oggetto della presente tesi si colloca all'interno di questo contesto, focalizzandosi sul possibile contributo che le corde da tennis esauste possono apportare sul comportamento a fatica e sulle proprietà di propagazione della fessura nei conglomerati bituminosi.

Lo studio sperimentale ha previsto una prima fase di mix-design, per definire le caratteristiche compositive delle miscele bituminose oggetto della sperimentazione e il dosaggio ottimale delle fibre derivanti dalle corde da tennis esauste. Sono stati analizzati 3 quantitativi di fibre, 1.0%, 0.5% e 0.3% rispetto alla massa degli aggregati.

Le miscele così ottenute sono state sottoposte a prove sperimentali per la determinazione della rigidità (EN 12697-26 - Annex C), della resistenza a fatica (EN 12697-24) e della resistenza alla propagazione della fessura in configurazione SCB (EN 12697-44). Le prove per la determinazione della rigidità sono state condotte a 10°C, 20°C e 30°C mentre le prove di fatica e SCB sono state effettuate a 10 °C.

I risultati ottenuti sembrano confermare che l'utilizzo delle corde esauste da tennis come fibre all'interno dei conglomerati bituminosi possano effettivamente contribuire in maniera non trascurabile al miglioramento del comportamento a fatica e di resistenza alla propagazione della fessura.

Parole chiave: Plastiche da riciclo; corde da tennis esauste; pavimentazioni stradali; conglomerato bituminoso; strato di binder; metodo dry, RTI, rigidità, resistenza a fatica, SCB.



**Politecnico
di Torino**

INDICE

| | |
|---|----|
| 1. Introduzione | 1 |
| 2. Corde da tennis | 3 |
| 2.1. <i>Definizione e caratteristiche</i> | 3 |
| 2.2. <i>Durata delle corde</i> | 4 |
| 3. Conglomerati bituminosi e degrado strutturale: rottura per fatica | 5 |
| 3.1. <i>Conglomerati bituminosi</i> | 5 |
| 3.2. <i>Comportamento a fatica</i> | 6 |
| 4. Campagna sperimentale | 9 |
| 4.1. <i>Programma sperimentale</i> | 9 |
| 4.2. <i>Materiali</i> | 10 |
| 4.2.1. <i>Fibre</i> | 10 |
| 4.2.2. <i>Aggregati lapidei</i> | 12 |
| 4.2.3. <i>Bitume</i> | 18 |
| 4.3. <i>Mix design di CB</i> | 20 |
| 4.3.1. <i>Preparazione e miscelazione manuale</i> | 20 |
| 4.3.2. <i>Massima Massa Volumica Teorica (MMVT)</i> | 22 |
| 4.3.3. <i>Contenuto di bitume tramite ignizione</i> | 23 |
| 4.3.4. <i>Granulometria</i> | 25 |
| 4.3.5. <i>Compattazione giratoria</i> | 25 |
| 4.3.6. <i>Volumetria</i> | 29 |
| 4.3.7. <i>Resistenza a Trazione Indiretta (RTI)</i> | 30 |
| 4.4. <i>Miscelazione e proprietà volumetriche</i> | 32 |
| 4.5. <i>Prove meccaniche</i> | 35 |
| 4.5.1. <i>Modulo di rigidezza (IT-CY)</i> | 35 |
| 4.5.2. <i>Resistenza a fatica (CIT-CY)</i> | 39 |
| 4.5.3. <i>Flessione a tre punti su campioni semicircolari (SCB)</i> | 42 |
| 4.5.4. <i>Indice di trazione indiretta N_{flex}</i> | 46 |
| 5. Analisi dei risultati | 49 |
| 5.1. <i>Materiali (aggregati)</i> | 49 |
| 5.1.1. <i>Densità delle particelle</i> | 49 |
| 5.1.2. <i>Granulometria</i> | 49 |
| 5.2. <i>Mix design dei CB</i> | 50 |
| 5.2.1. <i>Ottimizzazione AC16</i> | 50 |
| 5.2.2. <i>Miscelazione manuale</i> | 51 |



| | |
|--|----|
| 5.2.3. Compattazione, volumetria e bitume ottimale | 51 |
| 5.3. <i>Miscelazione, compattazione e volumetria</i> | 52 |
| 5.3.1. Composizione..... | 53 |
| 5.3.2. Compattazione e volumetria..... | 54 |
| 5.4. <i>Modulo di rigidezza IT-CY</i> | 54 |
| 5.5. <i>Resistenza a fatica CIT-CY</i> | 56 |
| 5.6. <i>SCB</i> | 58 |
| 5.7. <i>Resistenza a trazione indiretta RTI ed indice N_{flex}</i> | 62 |
| 6. Conclusioni | 65 |
| Bibliografia e sitografia | 67 |
| Allegati | 71 |
| A. Mix design | 71 |
| B. Compattazione e volumetria | 80 |
| C. Resistenza a fatica | 82 |
| D. Resistenza alla fessurazione – prova SCB | 91 |
| E. Resistenza alla fessurazione – Indice di flessione N_{flex} | 94 |
| Ringraziamenti | 95 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|--|----|
| Figura 1. Tipi di materiali per corde da tennis. | 3 |
| Figura 2. Tipi di usura. A sinistra intagli (<i>notching</i>), a destra sfilacciamenti (<i>fraying</i>)..... | 4 |
| Figura 3. Coesione bitume-aggregato. | 5 |
| Figura 4. Alternanze di tensioni nella pavimentazione sotto carico. | 6 |
| Figura 5. Prova di fatica. | 7 |
| Figura 6. Diagramma di flusso della campagna sperimentale. | 9 |
| Figura 7. Corde da tennis esauste..... | 10 |
| Figura 8. Preparazione corde per taglio. | 10 |
| Figura 9. Taglio di corde esauste. | 10 |
| Figura 10. Fibre. | 10 |
| Figura 11. Fibre in forno prima della fusione (con cambio di colore). | 11 |
| Figura 12. Fibre fuse. | 11 |
| Figura 13. Locazione dell'impianto Brillada, a Borgaro Torinese (TO) (da <i>google maps</i>).... | 12 |
| Figura 14. Impianto Brillada – fresato fine. | 12 |
| Figura 15. Raccolta classe “polvere” | 12 |
| Figura 16. Indicazione della classe aggregato 3/8..... | 13 |
| Figura 17. Trasporto di aggregati in laboratorio. | 13 |
| Figura 18. Dimensioni delle classi di aggregati e lunghezza delle fibre..... | 13 |
| Figura 19. Menisco convesso di acqua..... | 14 |
| Figura 20. Sedimentazione delle particelle nei picnometri con acqua distillata. | 15 |
| Figura 21. Deaeratore e sotto picnometri con acqua distillata e deaerata. | 15 |
| Figura 22. Aggregati nei picnometri dopo la deaerazione. | 15 |
| Figura 23. Classe 0-5 con deaeratore a sinistra e con acqua deaerata a destra. | 15 |
| Figura 24. Preparazione setacci per lavaggio..... | 17 |
| Figura 25. Fase di lavaggio degli aggregati. | 17 |
| Figura 26. Pila di setacci su setacciatore meccanico..... | 18 |
| Figura 27. Trattamenti post-setacciatura..... | 18 |
| Figura 28. Classe di aggregati dopo l'analisi granulometrica..... | 18 |
| Figura 29. Contenitori di alluminio contenente il bitume 50/70 da IPLOM-Busalla | 19 |
| Figura 30. Miscelazione manuale tramite apposito mixer. | 21 |
| Figura 31. Miscele con diverso dosaggio di bitume alla fine della miscelazione..... | 21 |
| Figura 32. Dispersione di particelle. | 22 |
| Figura 33. Quartatura. | 22 |
| Figura 34. Campioni in fase di deaerazione..... | 23 |
| Figura 35. Vista da vicino in fase di deaerazione. | 23 |
| Figura 36. Pesatura picnometro con materiale ed acqua deaerata..... | 23 |
| Figura 37. Carbolite con temperatura di 540°C. | 24 |
| Figura 38. Cestello con materiale..... | 24 |
| Figura 39. Pesatura cestello pieno..... | 24 |
| Figura 40. Pulizia degli aggregati. | 25 |
| Figura 41. Lavaggio degli aggregati post-ignizione..... | 25 |
| Figura 42. Diagramma del movimento girevole del campione (<i>EN 12697-31</i>)..... | 26 |
| Figura 43. Schema geometrico della giratoria. | 26 |
| Figura 44. Macchina della pressa a taglio girevole. | 26 |
| Figura 45. Versamento del materiale nella fustella..... | 28 |
| Figura 46. Riscaldamento di fustelle da 100 mm in forno a 150°C..... | 28 |
| Figura 47. Fase di compattazione..... | 28 |
| Figura 48. Campioni finali post-compattazione..... | 28 |

| | |
|--|----|
| Figura 49. Pesatura in aria m_1 . | 30 |
| Figura 50. Pesatura in acqua, m_2 . | 30 |
| Figura 51. Asciugatura della superficie del campione per SSD, m_3 . | 30 |
| Figura 52. Configurazione del provino per RTI. | 31 |
| Figura 53. Rottura del provino da RTI test. | 31 |
| Figura 54. Esempio fessura del provino dopo RTI test. | 31 |
| Figura 55. Mixer meccanico. | 33 |
| Figura 56. Preparazione materiali per miscelazione meccanica. | 33 |
| Figura 57. Miscelazione di soli aggregati. | 33 |
| Figura 58. Versamento di aggregati grossolani. | 33 |
| Figura 59. Versamento di bitume vergine. | 33 |
| Figura 60. Versamento di filler (polvere). | 33 |
| Figura 61. Versamento di fibre. | 34 |
| Figura 62. Miscelazione finale. | 34 |
| Figura 63. Le due miscele ottenute, di riferimento e con 0.5%Fibre. | 34 |
| Figura 64. Diverse configurazioni di prova per il modulo (da <i>EN 12697-26</i>). | 35 |
| Figura 65. Haversine di carico (da <i>EN 12697-26</i>). | 36 |
| Figura 66. Configurazioni di prova per il modulo IT-CY. | 37 |
| Figura 67. Ampiezza di deformazione (<i>EN 12697-26</i>). | 38 |
| Figura 68. Risultati per 5 impulsi di carico e deformazioni durante il test di modulo IT-CY. | 38 |
| Figura 69. Dispositivo per l'incollaggio delle barrette di acciaio per LVDT. | 39 |
| Figura 70. Configurazione di prova di fatica CIT-CY. | 39 |
| Figura 71. Numero di cicli a rottura (<i>fracture life</i>) corrispondente al massimo della curva ER (<i>EN 12697-24 Annex F</i>). | 41 |
| Figura 72. Fine test CIT-CY. | 42 |
| Figura 73. Rottura per fatica del campione con fibre. | 42 |
| Figura 74. Campione compattato $150 \times 115 \text{ mm}^2$ per SCB test. | 43 |
| Figura 75. Campione prima del taglio. | 43 |
| Figura 76. Configurazione taglio tramite sega circolare. | 43 |
| Figura 77. Secondo taglio del provino. | 43 |
| Figura 78. Provini SC finali. | 43 |
| Figura 79. Esempio geometrico del notch. | 43 |
| Figura 80. Notch su campioni semicircolari per SCB test. | 44 |
| Figura 81. Configurazione di prova SCB. | 45 |
| Figura 82. Applicazione del carico sul provino SC con fibre. | 45 |
| Figura 83. Propagazione della fessura del provino con fibre. | 46 |
| Figura 84. Fessurazione dei provini SC. | 46 |
| Figura 85. Esempio curva con equazione polinomiale (da <i>AASHTO TP 141-20</i>). | 47 |
| Figura 86. Granulometria di ciascuna classe di aggregati. | 50 |
| Figura 87. Ottimizzazione strato AC16. | 50 |
| Figura 88. Contenuto di vuoti a 100 giri nel mix design. | 51 |
| Figura 89. Valori di RTI a 10°C di diverse miscele. | 52 |
| Figura 90. Analisi granulometrica delle due miscele. Riferimento e 0.5% Fibre. | 53 |
| Figura 91. Risultati sperimentali. Modulo di rigidezza medio in funzione della temperatura. | 55 |
| Figura 92. Curva di fatica delle due miscele con il criterio energetico. | 56 |
| Figura 93. Rottura per fatica, confronto tra miscela di riferimento (a destra) e miscela con 0.5% fibre (a sinistra). | 57 |
| Figura 94. Vista dall'alto dei campioni. Fibre sotto, Rif sopra. | 58 |
| Figura 95. Vista da vicino. Fibre nel campione rotto dopo il test di fatica. | 58 |
| Figura 96. Prova SCB. Diagramma forza-spostamento dei due campioni SC per miscela. | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 97. Campioni SC con fibre, dopo la rottura a flessione..... | 60 |
| Figura 98. SCB. Riferimento sopra e fibre sotto..... | 60 |
| Figura 99. Sopra: Rottura del provino con fibre. Sotto: Vista da vicino. Fibre all'interno del campione F7 SCB dopo la frattura..... | 61 |
| Figura 100. Curve RTI delle due miscele..... | 62 |
| Figura 101. Lavorabilità della miscela di riferimento con 4.5%B..... | 72 |
| Figura 102. Lavorabilità della miscela di riferimento con 5.0%B..... | 72 |
| Figura 103. Lavorabilità della miscela di riferimento con 5.5%B..... | 72 |
| Figura 104. Lavorabilità della miscela di riferimento con 6.0%B..... | 73 |
| Figura 105. Lavorabilità della miscela 1.0% Fibre con 4.5%B..... | 73 |
| Figura 106. Lavorabilità della miscela 1.0% Fibre con 5.0%B..... | 73 |
| Figura 107. Lavorabilità della miscela 1.0% Fibre con 5.5%B..... | 74 |
| Figura 108. Lavorabilità della miscela 1.0% Fibre con 6.0%B..... | 74 |
| Figura 109. Lavorabilità della miscela 0.5% Fibre con 4.5%B..... | 74 |
| Figura 110. Lavorabilità della miscela 0.5% Fibre con 5.0%B..... | 75 |
| Figura 111. Lavorabilità della miscela 0.5% Fibre con 5.5%B..... | 75 |
| Figura 112. Lavorabilità della miscela 0.5% Fibre con 6.0%B..... | 75 |
| Figura 113. Lavorabilità della miscela 0.3% Fibre con 4.5%B..... | 76 |
| Figura 114. Lavorabilità della miscela 0.3% Fibre con 5.0%B..... | 76 |
| Figura 115. Lavorabilità della miscela 0.3% Fibre con 5.5%B..... | 76 |
| Figura 116. Lavorabilità della miscela 0.3% Fibre con 6.0%B..... | 77 |
| Figura 117. MMVT delle miscele in funzione di %B..... | 77 |
| Figura 118. Istogramma MMVT delle miscele in funzione di %B..... | 77 |
| Figura 119. Contenuto di vuoti a 10 giri (N_{ini}) delle miscele..... | 78 |
| Figura 120. Contenuto di vuoti a 180 giri (N_{fin}) delle miscele..... | 79 |
| Figura 121. Spostamento verticale da RTI delle miscele..... | 80 |
| Figura 122. Curva carico-spostamento da RTI delle miscele..... | 80 |
| Figura 123. Lavorabilità della miscela A di riferimento a 180 giri..... | 81 |
| Figura 124. Lavorabilità della miscela B di riferimento a 180 giri..... | 81 |
| Figura 125. Lavorabilità della miscela 1 con 0.5% Fibre a 180 giri..... | 81 |
| Figura 126. Lavorabilità della miscela 2 con 0.5% Fibre a 180 giri..... | 82 |
| Figura 127. Prova di fatica. Modulo R_2_H60 per 10^3-10^4 numero di cicli..... | 82 |
| Figura 128. Prova di fatica. Deformazione orizzontale R_2_H60 per 10^3-10^4 numero di cicli..... | 83 |
| | 83 |
| Figura 129. Prova di Fatica. Energy Ratio R_2_H60 per 10^3-10^4 numero di cicli..... | 83 |
| Figura 130. Prova di fatica. Modulo R_1_G100 per 10^4-10^5 numero di cicli..... | 84 |
| Figura 131. Prova di fatica. Deformazione orizzontale R_1_G100 per 10^4-10^5 numero di cicli..... | 84 |
| | 84 |
| Figura 132. Prova di fatica. Energy Ratio R_1_G100 per 10^4-10^5 numero di cicli..... | 85 |
| Figura 133. Prova di fatica. Modulo R_5_H60 per 10^5-10^6 numero di cicli..... | 85 |
| Figura 134. Prova di fatica. Deformazione orizzontale R_5_H60 per 10^5-10^6 numero di cicli..... | 86 |
| | 86 |
| Figura 135. Prova di fatica. Energy Ratio R_5_H60 per 10^5-10^6 numero di cicli..... | 86 |
| Figura 136. Prova di fatica. Modulo F_2_H60 per 10^3-10^4 numero di cicli..... | 87 |
| Figura 137. Prova di fatica. Deformazione orizzontale F_2_H60 per 10^3-10^4 numero di cicli..... | 87 |
| | 87 |
| Figura 138. Prova di fatica. Energy Ratio F_2_H60 per 10^3-10^4 numero di cicli..... | 88 |
| Figura 139. Prova di fatica. Modulo F_7_H60 per 10^4-10^5 numero di cicli..... | 88 |
| Figura 140. Prova di fatica. Deformazione orizzontale F_7_H60 per 10^4-10^5 numero di cicli..... | 89 |
| | 89 |



| | |
|---|----|
| Figura 141. Prova di fatica. Energy Ratio F_7_H60 per 10^4 - 10^5 numero di cicli. | 89 |
| Figura 142. Prova di fatica. Modulo F_6_H60 per 10^5 - 10^6 numero di cicli. | 90 |
| Figura 143. Prova di fatica. Deformazione orizzontale F_6_H60 per 10^5 - 10^6 numero di cicli. | 90 |
| Figura 144. Prova di fatica. Energy Ratio F_6_H60 per 10^5 - 10^6 numero di cicli. | 91 |
| Figura 145. Prova SCB. 5 mm/min per Riferimento. | 92 |
| Figura 146. Prova SCB. 5 mm/min per 0.5% Fibre. | 92 |
| Figura 147. Prova SCB. 1 mm/min per Riferimento. | 93 |
| Figura 148. Prova SCB. 1 mm/min per 0.5% Fibre. | 93 |
| Figura 149. Prova RTI. Punto di flesso della miscela di riferimento. | 94 |
| Figura 150. Prova RTI. Punto di flesso della miscela 0.5% Fibre. | 94 |

INDICE DELLE TABELLE

| | |
|--|----|
| Tabella 1. Fusi granulometrici (<i>Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2022</i>). | 16 |
| Tabella 2. Proprietà viscoelastiche del bitume 50/70 Iplom Busalla (da <i>Scheda tecnica Bitume 50/70 Iplom</i>). | 19 |
| Tabella 3. Metodo volumetrico per il mix design. | 20 |
| Tabella 4. Temperatura di riferimento in funzione del bitume (<i>EN 12697-35</i>). | 21 |
| Tabella 5. Geometria dei provini cilindrici in funzione della dimensione massima dell'aggregato (da <i>EN12697-26</i>). | 36 |
| Tabella 6. Deformazione orizzontale massima in funzione della temperatura (<i>EN 12697-26</i>). | 37 |
| Tabella 7. Densità delle particelle di classi di aggregati. | 49 |
| Tabella 8. Analisi granulometrica delle classi di aggregati. | 49 |
| Tabella 9. Percentuale di aggregati nella miscela | 51 |
| Tabella 10. Dosaggio di bitume ottimale | 52 |
| Tabella 11. Dosaggio di materiali per la miscelazione. | 53 |
| Tabella 12. Composizione delle miscele. Riferimento e 0.5% Fibre. | 54 |
| Tabella 13. Volumetria delle due miscele. | 54 |
| Tabella 14. Valore medio del modulo di rigidità dei campioni con diverso contenuto di vuoti a tre temperature. | 55 |
| Tabella 15. Prova di fatica CIT-CY. Numero di giri a rottura della miscela di riferimento (R) applicando il criterio energetico. | 56 |
| Tabella 16. Prova di fatica CIT-CY. Numero di giri a rottura della miscela con 0.5% fibre (F) applicando il criterio energetico. | 56 |
| Tabella 17. Dati sperimentali dalla prova di fatica CIT-CY. Equazione, coefficiente di correlazione, parametri di regressione ed ϵ_6 | 57 |
| Tabella 18. Valori medi di tenacità a rottura KIc e U della miscela di riferimento. | 59 |
| Tabella 19. Valori medi di tenacità a rottura KIc e U della miscela con 0.5% fibre. | 59 |
| Tabella 20. Riassunto risultati da SCB. | 60 |
| Tabella 21. Risultati RTI di due miscele. | 62 |
| Tabella 22. Risultati di indice di flessione delle due miscele. | 63 |
| Tabella 23. Curva di progetto dello strato AC16. | 71 |
| Tabella 24. Dosaggio di bitume per ogni miscela e MMVT. | 71 |
| Tabella 25. Contenuto di vuoti delle miscele a 3 diversi giri. | 78 |
| Tabella 26. Risultati RTI delle miscele (CTI, Coefficiente di Trazione Indiretta) | 79 |
| Tabella 27. Contenuto di vuoti delle due miscele a diversi giri. | 82 |
| Tabella 28. Contenuto di vuoti e geometria dei campioni SCB (R=Riferimento, F=Fibre). ... | 91 |



**Politecnico
di Torino**

1. Introduzione

Da qualche decennio a questa parte, i rifiuti plastici rappresentano un problema ambientale ad ogni latitudine, perché ogni anno sono stati generati milioni di tonnellate di plastiche, e continua ad aumentare la produzione in maniera esponenziale. Questi rifiuti potrebbero essere un pericolo per gli ecosistemi e l'inadeguato smaltimento dei rifiuti provoca un processo di inquinamento idrico e territoriale, influenzando la biodiversità e il clima. Per tentare di porre rimedio, si sta cercando di ridurre i rifiuti mediante riciclaggio, strategie di gestione dei rifiuti e nuovi metodi di biodegradazione.

Negli ultimi anni, si è pertanto osservato un interesse via via crescente del riuso delle plastiche nei materiali da costruzioni, in particolare negli strati legati a bitume delle pavimentazioni stradali con lo scopo di migliorare le loro prestazioni strutturali e funzionali, come le resistenze a fatica, all'ormaiamento, alla rottura termica, alla fessurazione.

In questo contesto si colloca il lavoro di tesi avente l'obiettivo di indagare il possibile riutilizzo delle corde da tennis esauste all'interno dei CB.

Ogni anno si stima che milioni di corde da tennis vengano prodotte per soddisfare le esigenze dei giocatori di tennis in tutto il mondo, includendo una vasta gamma di corde di diversi materiali, spessori per adattarsi alle preferenze individuali dei tennisti.

Statisticamente, vi sono globalmente 87000000 tennisti e si suppone che mediamente ogni giocatore cambi le corde una volta al mese. Se ogni incordatura è lunga circa 12 metri e la corda pesa 17 grammi, si produrrebbe all'incirca 12500000 km o, in termini di massa, 18000 tonnellate di corde l'anno. Queste normalmente andranno in indifferenziato dove verrebbero incenerite emanando 50000 di CO_{2,eq} impattando notevolmente sul cambiamento climatico.

Le corde sono fatte di materiale plastico con proprietà ottime. Dalla letteratura, non sono state riutilizzate se non per produrre filamenti per stampa 3D. Perché non provare a riusarle in campo delle infrastrutture stradali, avendo ancora caratteristiche fisiche e meccaniche notevoli?

Sono state effettuate diverse prove in laboratorio su diversi materiali costituenti le sovrastrutture stradali contenenti plastiche da riciclo. In particolare, grazie a numerose ricerche, hanno trattato diversi tipi di fibre a seconda del tipo di polimero utilizzato, come HDPE, LDPE, poliestere, PET, PE, PP ed altri ancora. E questi mostrano dei miglioramenti delle prestazioni meccaniche dei CB, ad esempio, da letteratura, il 0.25% di fibre in poliestere, rispetto alla miscela e lunghe 8 mm, hanno dato esiti positivi sull'energia a rottura del conglomerato, rispetto alla miscela di controllo. Da un'altra, sono state usati diversi contenuti di fibre, 0.5% e 1%, che hanno migliorato la stabilità e la resistenza alla fessurazione del CB.

Quindi, si ripone la stessa domanda: perché non riutilizzare le corde da tennis, se sono anch'esse delle plastiche?

Si è provato, di conseguenza, a utilizzare le corde esauste nei CB per verificare se vi sono eventuali effetti benefici sulle prestazioni. Attraverso una procedura sperimentale in laboratorio, sono stati effettuati dei test per valutare le proprietà meccaniche del CB contenente fibre ottenute da corde esauste tramite taglio.



2. Corde da tennis

2.1. Definizione e caratteristiche

Le corde sono un elemento cruciale per il funzionamento di una racchetta da tennis. Sono costituite da fili sottili intrecciati o avvolti insieme per formare una struttura a maglia flessibile e resistente che viene tesa sulla racchetta. Le corde sono necessarie per colpire la palla e trasferisce l'energia dall'oscillazione della racchetta alla palla stessa durante il gioco.

Le preferenze di corde da tennis possono variare notevolmente da un giocatore all'altro in base al loro stile di gioco, come per esempio, corde più morbide per maggiore sensibilità o più rigide per maggior controllo.

La gamma di corde da tennis è vasta, esistono numerosi produttori, una cinquantina di marchi, che generano corde di diverso materiale, diversa geometria e diverse proprietà, con un totale stimato di 1000 corde.

Le corde da tennis possono essere realizzate con 5 differenti tipi di materiali, ognuno del quale offre diverse caratteristiche di gioco ed anche la durata della corda:

- *Nylon* (o *budello sintetico*). Si stima che più del 70% di tennisti utilizzi questo materiale sintetico con più strati, coprente l'anima del nylon, che compensano la perdita di elasticità dell'anima. Esso è sufficientemente elastico offrendo una buona combinazione di prestazione e durabilità.
- *Budello naturale*. Scelto dai professionisti grazie ad elevate prestazioni e comfort. È molto elastica, resistente con tensione stabile. Tuttavia, ha poca durata e sono molto costosi.
- *Poliestere monofilamento*, cioè con un suo nucleo, disponibile in diversi spessori offrendo maggiore durabilità, ma, a differenza del nylon e budello naturale, fornisce minore potenza e sensibilità perdendo la sua flessibilità. È comunemente progettato per giocatori che consumano molto le corde.
- *Kevlar*. Materiale più duraturo, molto rigido con notevole tensione e meno confortevole.
- *Multifilamento*. Centinaia o migliaia di sottili filamenti sono intrecciati per formare una singola corda con rivestimento protettivo. Presenta un'elevata elasticità ed ottimo comfort, ma una minore durata di vita.

Vi sono anche corde ibride come unione di due diversi tipi di corda, uno sulle verticali ed uno sulle orizzontali per beneficiare del mix di vantaggi offerti da due materiali.



Figura 1. Tipi di materiali per corde da tennis.

Dal punto di vista geometrico, vi sono diversi diametri, identificati come calibri (o *gauge*), delle corde. Questo spessore varia da 1.10 a 1.40 mm influenzando le prestazioni della singola corda: le più sottili offrono maggiore controllo e comfort, mentre le più spesse sono più durevoli mantenendo meglio la tensione.

2.2. Durata delle corde

Le corde hanno diversa durata ed ogni tennista cambia mediamente una corda al mese. Questo dipende dalle condizioni prestazionali della corda del giocatore: se le corde sono sfilacciate o intagliate, o hanno una potenza ridotta, se un giocatore sente uno strano suono o un pessimo comfort durante il gioco.

Vengono cambiate per due motivi:

- *Usura*. Le corde da tennis si consumano con l'uso continuo, tramite contatto ripetuto con la palla, e l'attrito e la tensione causano la rottura dei fili nel tempo mostrando degli intagli (in corde monofilamento - *notching*) o degli sfilacciamenti (in multifilamento - *fraying*). E nel corso dell'usura, si possono perdere tensione ed elasticità.

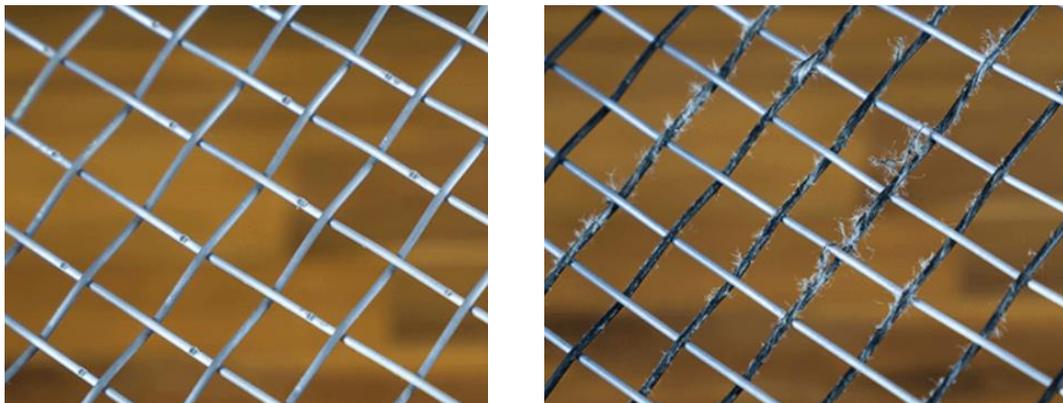


Figura 2. Tipi di usura. A sinistra intagli (*notching*), a destra sfilacciamenti (*fraying*).

- *Comfort*.

La lunghezza dell'incordatura è di circa 12 m e dopo le 24 ore dall'incordatura, le corde spesso perdono il 10% della loro tensione che talvolta dipende dal tipo di corda. La frequenza con cui i tennisti cambiano corde può variare in base a diversi fattori. I professionisti tendono a cambiarle molto frequentemente, dopo ogni partita, i giocatori regolari potrebbero cambiare ogni 1-2 mesi o ogni 20-30 ore di gioco, quelli occasionali ogni 3-6 mesi o ogni 30-40 ore di gioco.

3. Conglomerati bituminosi e degrado strutturale: rottura per fatica

Le pavimentazioni stradali o sovrastrutture sono la parte superiore del corpo stradale soggetta direttamente alle azioni di traffico veicolare e devono soddisfare i requisiti strutturali, come ridurre le tensioni trasmesse al sottofondo e resistere a fenomeni di degrado, e funzionali, come regolarità ed aderenza (comfort e sicurezza). Queste normalmente sono realizzate in più strati e possono essere flessibili o rigide.

Focalizzando su quelle flessibili, esse sono costituite da strati che formano il pacchetto bituminoso dove la percentuale di bitume cresce verso l'alto, e ciascun strato ha diverse caratteristiche. Partendo dal basso, vi è lo strato di *base* che contribuisce significativamente alla risposta strutturale, con granulometria grossolana, porosità elevata e bassa percentuale di bitume; lo strato di *collegamento* o *binder* collega i due strati base e *usura* con caratteristiche intermedie tra i due strati; lo strato di usura presenta granulometria fine e %B elevato, ed è lo strato che verrà continuamente danneggiato sotto carico e dall'ambiente e richiede maggiore manutenzione.

Gli strati di conglomerato bituminoso (CB) sono soggetti a fenomeni di degrado strutturale, quali la rottura per fatica, l'accumulo di deformazioni permanenti od ormaimento, e fessurazione di origine termica.

In seguito, un breve accenno sui conglomerati e sul comportamento a fatica, presi in esame.

3.1. Conglomerati bituminosi

I CB sono delle miscele costituite da diversi materiali e prodotti ad elevate temperature in appositi impianti per la realizzazione degli strati. La composizione del CB varia in base agli strati variando proprietà volumetriche e meccaniche. I materiali costituenti la miscela sono:

- *Aggregati lapidei* che formano lo scheletro litico portante del CB.
- *Legante bituminoso* che offre coesione alla miscela delle particelle.
- *Filler* che è la frazione più fine della granulometria per migliorare la lavorabilità.
- *Eventuali additivi*, come i polimeri per migliorare le prestazioni del CB.
- *Eventuale CB di recupero o fresato* detto anche RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*).

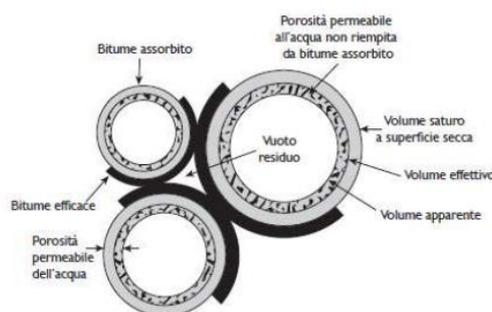


Figura 3. Coesione bitume-aggregato.

Come mostrato in **Figura 3**, l'aggregato lapideo, caratterizzato da una propria porosità interna e superficiale, è ricoperto dal bitume: nella porosità superficiale la parte più interna è permeabile all'acqua ma non al legante, mentre la parte più esterna al bitume (detto assorbito). Una caratteristica fondamentale del CB è la presenza dei vuoti, tra le particelle ricoperte di bitume e nella porosità del CB permeabile all'acqua. I vuoti influenzano la volumetria e le proprietà meccaniche della miscela bituminosa.

3.2. Comportamento a fatica

La rottura per fatica della pavimentazione stradale è prodotta dal ripetuto passaggio di veicoli, perché si hanno alternanze di zone di trazione e compressione, cioè la pavimentazione si inflette. Nei punti lontani dall'applicazione di carico, l'entità delle tensioni varia sia di segno che di valore assoluto: le fibre che prima erano tese diventano compresse e viceversa.

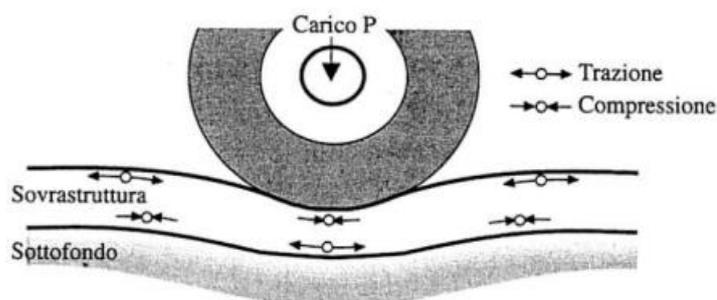


Figura 4. Alternanze di tensioni nella pavimentazione sotto carico.

Quando il materiale è soggetto a sollecitazioni cicliche, raggiungerà la condizione di rottura, non perché ha superato la resistenza a trazione, ma si rompe per fatica. Si rompe per fatica perché, ad ogni ciclo di carico, il materiale subisce un microdanno che si accumulerà con il procedere della sollecitazione fino a raggiungere lo stato finale di rottura.

La fatica interessa quella parte di pavimentazione soggetta a deformazioni maggiori, ovvero la base è soggetta a deformazioni orizzontali di trazione. All'innescare della fessura, essa si propagerà verso la superficie. Questo tipo di fessura è definito come *bottom-up cracking* che sono le più critiche. Un altro tipo di fessura è quello più frequente, detto *top-down cracking* che si forma e si propaga dalla superficie verso gli strati sottostanti del pacchetto bituminoso, ma che sono meno dannose rispetto al bottom-up.

Questi fenomeni avvengono alle temperature intermedie di esercizio in cui la miscela è rigida, motivo per cui tenderà più a fessurarsi che a deformarsi.

Il materiale deve essere testato con prove cicliche per mandarlo a rottura, e ripetendo il test su campioni dello stesso materiale facendo variare la tensione o il tempo di ciclo, si costruirà la *curva di fatica* del materiale, riportando sul grafico il numero di cicli di carico, su scala logaritmica, in funzione della deformazione orizzontale iniziale:

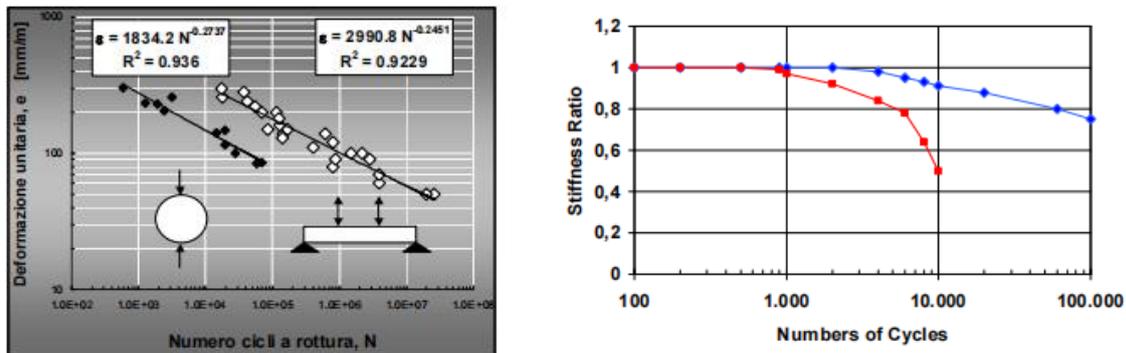


Figura 5. Prova di fatica.

Le prove possono essere fatte in condizioni di *stress controlled* o di *strain controlled*. Stress controlled significa che stiamo ripetutamente applicando lo stesso carico e, nel corso del tempo, la deformazione gradualmente aumenta perché il campione diventa via via debole. Se il test, in condizioni di stress controlled, porta a rottura rapidamente e se si monitorasse il modulo del materiale come funzione di numero di pulsazioni durante un singolo test, si avrebbe un andamento del genere in **Figura 5**, dove all'inizio il modulo rimane più o meno costante, poi inizia a diminuire perché il campione è stato danneggiato e, spesso, ad un certo punto si avrà la rottura. Viceversa, strain controlled si riferisce alla deformazione costante dove, nel corso della prova, lo sforzo diminuisce man mano che il campione diventa sempre più debole.

Da diversi tipi di test, si deduce che la linea di fatica dipende fortemente dalla temperatura, dalla frequenza, dal tipo di controllo (strain o stress controlled), dallo stato tensionale, cioè da diverse prove come di trazione indiretta, di flessione a quattro punti e di compressione.



4. Campagna sperimentale

Come accennato, lo scopo della tesi è di valutare le caratteristiche meccaniche, in particolare la resistenza a fatica, del conglomerato bituminoso contenenti le fibre da corde da tennis esauste, confrontandolo con una miscela di riferimento in assenza di plastiche da riciclo.

Le due miscele interessate sono state create grazie al cosiddetto mix design di miscele bituminose nel quale vengono analizzati i materiali costituenti la miscela, inclusi gli aggregati minerali, il bitume ed eventuali additivi. Sulla base delle caratteristiche dei materiali, vengono selezionati dei parametri di progetto, come la distribuzione granulometrica degli aggregati, e sono state studiate diverse miscele con differenti contenuti di bitume per individuare quello ottimale. Pertanto, ai conglomerati è stato aggiunto diverso quantitativo di fibre.

I due conglomerati sono stati poi testati mediante prove meccaniche quali rigidità, resistenza a fatica e resistenza alla fessurazione tramite flessione a 3 punti e trazione indiretta.

4.1. Programma sperimentale

Si elenca brevemente, tramite un diagramma di flusso, le procedure della campagna sperimentale a partire dalla preparazione dei materiali.

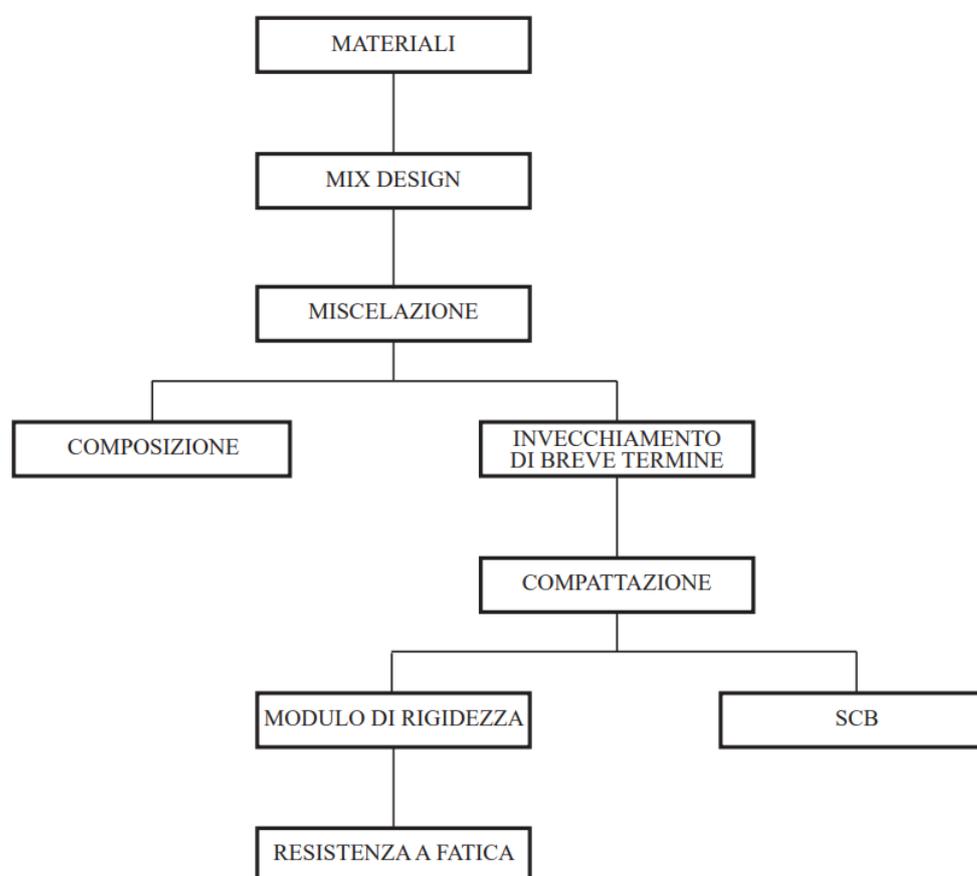


Figura 6. Diagramma di flusso della campagna sperimentale.

4.2. Materiali

Come spiegato in capitolo 3, il CB da testare è una miscela composta da tre tipi di materiali, aggregati, bitume e fibre, su ciascuna dei quali sono state fatte delle prove preliminari di caratterizzazione.

4.2.1. Fibre

L'elemento di grande interesse e come oggetto di caso studio sono le fibre. Esse sono ottenute tramite il taglio delle corde da tennis esauste in lunghezze inferiori a 20 mm (vedi **Figura 10**), in base ai dati della letteratura.

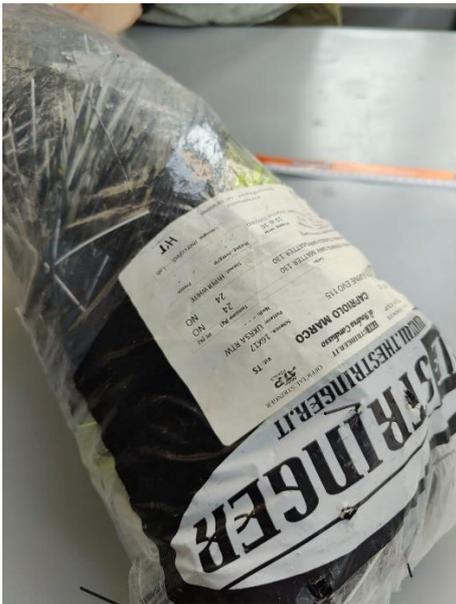


Figura 7. Corde da tennis esauste.



Figura 8. Preparazione corde per taglio.



Figura 9. Taglio di corde esauste.



Figura 10. Fibre.

Queste sono materiali polimerici, derivanti da corde monofilamento, presumibilmente in poliestere, studiate tramite osservazione sia estetica che del loro comportamento di fronte alla temperatura di fusione.

Esteticamente, le corde esauste mostrano degli intagli dovute al fenomeno di usura, come mostrato in **Figura 2** nel capitolo 2, caratteristico delle corde monofilamento.

Sono stati prelevati dei campioni e, messi in un piccolo contenitore di alluminio, sono stati posizionati in forno per un'ora ad ogni 15°C di temperatura a partire da 170°C. Si è esaminato che tale polimero ha iniziato a cambiare colore a 260°C e poi fondersi a 275°C, con una completa fusione a 280°C, motivo per cui si è dedotto che la temperatura a 275°C rientra nel range di quella caratteristica di fusione dei materiali in poliestere, con densità di 1.38 g/cm³.



Figura 11. Fibre in forno prima della fusione (con cambio di colore).



Figura 12. Fibre fuse.

Dal punto di vista geometrico, la lunghezza delle fibre è variabile, sotto i 20 mm, con valore medio di 10 mm, e il loro spessore è fisso, pari a 1.2 mm.

Vi sono, inoltre, corde esauste di diverso colore, probabilmente di simili caratteristiche, come la flessibilità, ma si è scelti, per avere una maggiore certezza, il colore nero così da ottenere miscele con fibre di stesse caratteristiche.

Come da letteratura, sono stati utilizzati due metodi per incorporare le plastiche da riciclo all'interno dei CB: il processo *wet* e il processo *dry*. Il processo *wet* e il processo *dry* differenziano in come le plastiche sono state aggiunte nella miscela.

- Nel processo *wet*, le fibre sono state aggiunte come modificante del bitume liquido caldo. Le plastiche adatte a questo metodo sono quelle con un punto di fusione basso, come LDPE e HDPE. Verranno sciolte e fuse con il bitume che saranno aggiunte agli aggregati caldi per ottenere la miscela bituminosa.
- Nel processo *dry*, le plastiche vengono miscelate insieme agli aggregati preriscaldati prima di versare il bitume. Questo processo richiede fibre con punto di fusione alto, dove la loro forma si mantiene intatta e si comporteranno come particelle di aggregati.

Quindi, dall'osservazione sperimentale, le fibre saranno inserite nella miscela tramite il processo *dry*, dato che esse non si rammolliscono alla temperatura di miscelazione.

4.2.2. Aggregati lapidei

Grazie alle ricerche da diversi laboratori, per il caso studio, si è scelto un diametro massimo degli aggregati di 16 mm, per lo strato AC16 (*Asphalt Concrete*). Sono state adottate diverse classi di aggregati i quali sono stati raccolti dall'impianto Brillada, collocato a Borgaro Torinese (TO), Piemonte, Italia, e portati in laboratorio Materiali Stradali del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino.



Figura 13. Locazione dell'impianto Brillada, a Borgaro Torinese (TO) (da *google maps*).

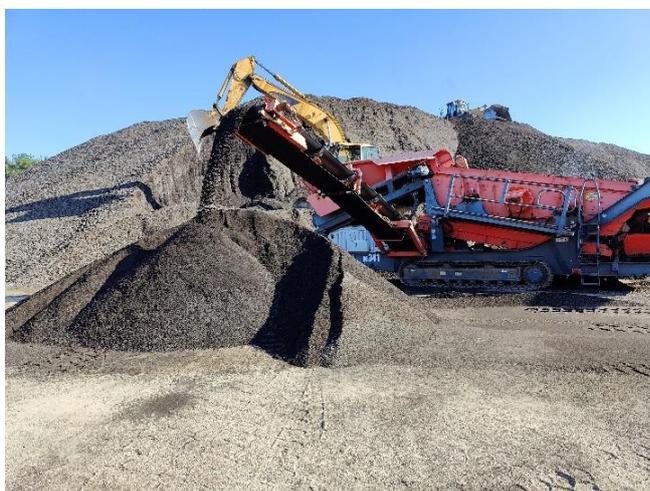


Figura 14. Impianto Brillada – fresato fine.



Figura 15. Raccolta classe “polvere”



Figura 16. Indicazione della classe aggregato 3/8.



Figura 17. Trasporto di aggregati in laboratorio.

Le classi di materiali scelte e studiate sono 5-15, 3-8, 0-5, “polvere” e fresato fine (RAP – Reclaimed Asphalt Pavement), ciascuna delle quali ha differenti dimensioni come mostrato in **Figura 18** sotto. Ognuna di esse è stata sottoposta a due diverse procedure per il calcolo delle proprietà volumetriche, ovvero, la densità e la granulometria dello scheletro litico, spiegati nei paragrafi successivi.



Figura 18. Dimensioni delle classi di aggregati e lunghezza delle fibre.

4.2.2.1. *Densità delle particelle – metodo dei picnometri.*

La densità delle particelle (particle density) è una caratteristica usata per calcolare il volume occupato dagli aggregati nelle miscele proporzionate in base al volume assoluto. Questa è calcolata come rapporto tra massa e volume dove il volume è determinato dalla massa d’acqua dopo un certo periodo di immersione, secondo la norma europea EN 1097-6 Annex H.

Il metodo utilizzato per il calcolo della proprietà volumetrica, attraverso lo standard, è il cosiddetto metodo del picnometro che consiste nei seguenti step:

1. *Calibrazione dei picnometri.* Per il calcolo della densità, è necessario ottenere i valori della massa e volume dei picnometri vuoti, utilizzati per la prova. Questi sono degli strumenti in vetro costituiti da un recipiente di forma conica e un tappo dotato di capillare. Ogni picnometro viene pesato a vuoto ottenendo la prima massa in aria e successivamente pesato dopo essere riempito di acqua distillata e disaerata fino a creare un menisco convesso alla fine del beccuccio del tappo (con una concavità verso il basso). Una volta ottenuto le masse, e attraverso il volume di acqua all'interno del picnometro, si ottiene il volume del picnometro stesso alla temperatura di prova.



Figura 19. Menisco convesso di acqua.

2. *Preparazione dei campioni di prova.* Questo test si effettua su due campioni dello stesso materiale per ottenere un valore medio rappresentativo. Prima della prova, gli aggregati, raccolti dall'impianto, sono stati essiccati per 12 ore in forno alla temperatura di 105°C. Asciutti, sono stati prelevati due campioni di una quantità definita a seconda della dimensione massima degli aggregati, tenendo conto della norma.
3. *Pesatura dei picnometri in aria.* Si riempiono i picnometri con particelle in esame e li si pesano per acquisire la massa del picnometro più aggregati.
4. *Riempimento dei picnometri con acqua distillata e successiva deaerazione.* Si versa l'acqua distillata all'interno dei picnometri, con 2-3 cm di livello di pelo libero al di sopra del materiale (approssimativamente 3 dita). Tuttavia, poiché ciascuna classe di aggregati contiene particelle molto fini, si è aspettato per circa 4 ore in modo tale che i vuoti tra le particelle vengano riempiti di acqua. Successivamente, si collegano i due picnometri, contenenti la classe di aggregati, ad un sistema di aspirazione di aria (o disaeratore), con lo scopo di rimuovere l'aria intrappolata tra particelle. Questo processo richiede almeno 20 minuti, durante i quali vengono fatti scuotere manualmente e leggermente i picnometri.



Figura 20. Sedimentazione delle particelle nei picnometri con acqua distillata.



Figura 21. Deaeratore e sotto picnometri con acqua distillata e deaerata.



Figura 22. Aggregati nei picnometri dopo la deaerazione.



Figura 23. Classe 0-5 con deaeratore a sinistra e con acqua deaerata a destra.

5. *Pesatura in acqua.* Terminato il processo di deaerazione, si riempiono i picnometri con acqua distillata e disaerata fino all'estremità del beccuccio, come nello step 1. Infine, vengono pesati con la nuova massa del picnometro contenente aggregati ed acqua.
6. *Calcolo della densità delle particelle.* Avendo tutti i dati, si calcola la densità degli aggregati attraverso la seguente formula ottenuta dalla normativa di riferimento:

$$\rho_p = \frac{M_1}{V - \frac{(M_2 - M_1 - M_0)}{\rho_w}} \quad (4.1)$$

Dove:

- M_1 è la massa del campione, in grammi (g);
- M_2 è la massa del picnometro, tappo, campione ed acqua, in grammi (g);
- M_0 è la massa del picnometro e tappo, in grammi (g);
- ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova quando M_2 è stato calcolato, in megagrammi per metro cubico (Mg/m^3);
- V è il volume del picnometro, in millilitri (ml) calcolato come:

$$V = \frac{M_3}{\rho_w} \quad (4.2)$$

Con

- M_3 la massa dell'acqua all'interno del picnometro più tappo, in grammi (g);
- ρ_w la densità dell'acqua alla temperatura di prova, in megagrammi per metro cubico (Mg/m^3).

Come detto in precedenza, si definisce la media dei valori ottenuti dai due campioni in esame.

4.2.2.2. Distribuzione granulometrica.

L'analisi granulometrica dello scheletro litico è di fondamentale importanza per la progettazione delle miscele con lo scopo di conoscere la distribuzione delle dimensioni di particelle degli aggregati. Questo test consiste nel dividere e separare il materiale in determinate classificazioni granulometriche di dimensioni decrescenti attraverso una serie di setacci con diverse aperture tramite i quali si fa la vagliatura. Le norme EN 12697-2 ed EN 933-1 suggeriscono due processi: il lavaggio e la successiva setacciatura. Tuttavia, si fa anche riferimento, per la presente tesi, ai fusi granulometrici da rispettare, descritti in "Linee guida per la costruzione e manutenzione delle pavimentazioni stradali (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2022), in funzione del tipo di strato che si vuole adottare, in questo caso AC16 (Binder).

Tabella 1. Fusi granulometrici (*Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2022*).

| Tipologia Impiego | AC32 Base | AC22 Base | AC20 Binder ¹ | AC16 Binder ² | AC12 Usura ³ | AC10 Usura ⁴ | PA11 Usura | SMA11 Usura |
|---|-----------|-----------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|-------------|
| Granulometria Passante [%] | | | | | | | | |
| Setacci [mm] | | | | | | | | |
| 63 | 100 | | | | | | | |
| 31,5 | 90-100 | 100 | | | | | | |
| 22 | | 90-100 | 100 | | | | | |
| 20 | 69-82 | - | 90-100 | 100 | | | | |
| 16 | | 55-85 | - | 90-100 | 100 | | 100 | 100 |
| 12,5 | | - | - | - | 90-100 | 100 | | - |
| 11,2 | | - | - | - | - | - | 90-100 | 90-100 |
| 10 | | - | 56-68 | 73-80 | - | 90-100 | | - |
| 8 | 45-56 | 35-60 | - | - | 70-90 | 70-90 | 20-40 | 50-65 |
| 6,3 | | - | - | - | - | - | | - |
| 5,6 | | - | - | - | - | - | | 35-45 |
| 4 | | 25-50 | 37-48 | 45-56 | 40-55 | 40-55 | | - |
| 2 | 21-31 | 20-35 | 23-33 | 28-38 | 25-38 | 25-38 | 15-25 | 20-30 |
| 0,5 | 10-17 | 6-21 | 11-17 | 14-22 | 14-20 | 14-20 | 8-16 | - |
| 0,25 | 6-12 | 4-16 | 6-12 | 7-14 | 10-15 | 10-15 | | - |
| 0,063 | 4-7 | 4-8 | 4-7 | 4-8 | 6-10 | 6-10 | 5-8 | 8-12 |
| Contenuto di legante [%] (riferito alla massa degli aggregati) | | | | | | | | |
| | 4,0-5,3 | 4,0-5,5 | 4,2-5,8 | 4,5-6,0 | 5,0-6,5 | 5,0-6,5 | 5,0-6,0 | 6,0-7,5 |

(1) per spessori compresi tra 6 e 12 cm

(2) per spessori compresi tra 4 e 6 cm

(3) per spessori uguali o superiori a 4 cm

(4) per spessori inferiori a 4 cm

1. *Lavaggio*. Prima di procedere con il lavaggio, il campione da setacciare dovrà essere pesato in aria per conoscere a posteriori il quantitativo di filler presente nel campione stesso. Si preparano due setacci di apertura delle maglie differente, il setaccio da 2 mm posto sopra uno da 0.063 mm (63 μm), successivamente, si pone il materiale sul setaccio superiore e, tramite acqua corrente, lo si lava manualmente finché l'acqua passante dal setaccio inferiore non diventerà limpida, per eliminare il filler presente. Alla fine, si porta il trattenuto ad essiccare in forno a 105°C per 12 ore.



Figura 24. Preparazione setacci per lavaggio.



Figura 25. Fase di lavaggio degli aggregati.

2. *Setacciatura*. A temperatura ambiente, gli aggregati asciutti vengono vagliati per mezzo dei setacci posizionati uno sopra l'altro formando una pila di setacci con maglie decrescenti dall'alto verso il basso. Dopo aver versato il materiale e dopo uno scuotimento manuale della colonna per qualche minuto, si passa alla setacciatura meccanica per almeno 20 minuti attraverso il setacciatore che, grazie alla vibrazione e basculamento, favorisce il completo passaggio delle particelle. Al termine della procedura, si rimuove ciascun setaccio dalla pila pesandolo su una bilancia, compreso il piatto inferiore che tiene il filler, e da ciò è possibile tracciare la curva granulometrica su scala semi-logaritmica riportando i valori di percentuale di passante progressivo, ottenuto tramite il peso del trattenuto, in funzione del logaritmo dell'apertura dei vagli.



Figura 26. Pila di setacci su setacciatore meccanico.



Figura 27. Trattenui post-setacciatura.



Figura 28. Classe di aggregati dopo l'analisi granulometrica

4.2.3. Bitume

La componente fondamentale per il conglomerato bituminoso è il bitume, una sostanza viscosa e nerastra derivante dal petrolio grezzo. Esso viene utilizzato come legante per tenere uniti aggregati di diversi tipi e dimensioni, creando la miscela per le pavimentazioni stradali.

Nel caso in esame, per il mix design è stato utilizzato il bitume vergine 50/70 da IPLOM-Busalla (Sitalfa 22/07/2021).



Figura 29. Contenitori di alluminio contenente il bitume 50/70 da IPLM-Busalla

Il termine vergine si riferisce al bitume non riciclato o utilizzato, ottenuto direttamente dalla raffinazione del petrolio grezzo; 50/70 indica la gamma di penetrazione del bitume, una misura della consistenza, ossia la profondità in decimi di millimetro (dmm) a cui un ago standard penetra verticalmente nel bitume a una specifica temperatura per un certo intervallo di tempo. Essa valuta l'adesione agli aggregati, garantendo un'adeguata resistenza alla deformazione e alla temperatura.

Per avere un quadro riassuntivo sulle proprietà del legante, si riportano i dati nella tabella.

Tabella 2. Proprietà viscoelastiche del bitume 50/70 IPLM Busalla (da *Scheda tecnica Bitume 50/70 Iplom*).

| Prodotto | BITUME 50-70 | | | METODO |
|---|--------------|---------|------|-----------------------------|
| | min. | tipiche | max. | |
| PROVE DI LABORATORIO | | | | |
| Penetrazione a 25°C dmm | 50 | 62 | 70 | ASTM D 5 / UNI EN 1426 |
| Infiammabilità Cleveland °C | 230 | >300 | | ASTM D 92 / UNI EN ISO 2592 |
| Punto Rammollimento °C | 46,0 | 52,0 | 54,0 | ASTM D 36 / UNI EN 1427 |
| Punto Rottura Fraass °C | | -9 | -8 | IP 80 / UNI EN 12593 |
| Volatilità a 163°C (RTFOT) %p. | | 0,1 | 0,5 | ASTM D 2872/UNI EN 12607-1 |
| Penetrazione Residua dopo volatilità % valore originale | 50 | 55 | | ASTM D 5 / UNI EN 1426 |
| Punto Rammollimento dopo volatilità °C | 48 | 58 | | ASTM D 36 / UNI EN 1427 |
| Solubilità %p. | 99 | 99,8 | | UNI EN 12592 |
| Variazione rammollimento °C | | 6 | 11 | ASTM D 36 / UNI EN 1427 |

4.3. Mix design di CB

Dopo aver acquisito dati preliminari dei materiali si è passati allo step successivo essenziale, ovvero il mix design di miscele bituminose. Ciò è necessario per ottenere le due miscele interessate, quella contenente le fibre da corde da tennis esauste e l'altra in assenza di fibre, considerata come riferimento o controllo.

Nel corso della progettazione, si è tenuto in conto il metodo volumetrico laddove si rispettano i limiti dei valori di vuoti in funzione del numero di giri della compattazione, come mostrato in tabella sottostante. Questo si ispira al livello 1 del mix design SUPERPAVE variando i limiti prestazionali.

Tabella 3. Metodo volumetrico per il mix design.

| Parametro | Normativa di riferimento | Unità di misura | Valori richiesti | | |
|--|--------------------------|-------------------|---|--|--|
| | | | Base | Binder | Usura |
| V_m a 10 rotazioni | UNI EN 12697-8 | % | 11-15 | | |
| V_m a 100 rotazioni | UNI EN 12697-8 | % | 3-6 | | |
| V_m a 180 rotazioni | UNI EN 12697-8 | % | ≥ 2 | | |
| Resistenza a trazione indiretta a 25°C a 100 rotazioni (<i>ITS</i>) | UNI EN 12697-23 | N/mm ² | 0,95-1,65 ^a 1,10 -1,75 ^b | 0,85-1,55 ^a 0,95-1,65 ^b | 0,75-1,45 ^a 0,85-1,55 ^b |
| Coefficiente di trazione indiretta a 25°C a 100 rotazioni (<i>CTI</i>) c | - | - | $\geq 70^a$ $\geq 80^b$ | $\geq 0,70^a$ $\geq 0,80^b$ | $\geq 65^a$ $\geq 75^b$ |
| Sensibilità all'acqua (<i>ITSR</i>) | UNI EN 12697-12 | % | $\geq 80^a$ $\geq 90^b$ | $\geq 80^a$ $\geq 90^b$ | $\geq 80^a$ $\geq 90^b$ |

(a) Conglomerati prodotti con bitume normale

(b) Conglomerati prodotti con bitume modificato o polimeri di addizione

Inoltre, per ottenere campioni in grado di simulare il comportamento reale nella fase di pre-compattazione nel processo di costruzione in situ, si è scelti di far invecchiare a breve termine le miscele prima di essere compattate, prendendo come riferimento la norma americana AASHTO R30-22. Secondo AASHTO, prima della compattazione, i materiali vengono messi in forno per $2 \text{ h} \pm 5$ minuti alla temperatura di $135 \pm 3^\circ\text{C}$.

La metodologia proposta prevede delle fasi:

1. *Ottimizzazione dello scheletro litico* a partire dalla distribuzione granulometrica di aggregati a disposizione mirando ad un avvicinamento alla curva di riferimento.
2. *Scelta del dosaggio di bitume* intervallato di $\pm 0.5\%$.
3. *Scelta del quantitativo di fibre*.
4. *Valutazione delle proprietà volumetriche e scelta del dosaggio di bitume ottimale*.

A seguire, in dettaglio, si descrivono i metodi applicati per il mix design.

4.3.1. Preparazione e miscelazione manuale

Lo strato di CB adottato nell'attuale tesi è AC16 (*Asphalt Concrete* con dimensione massima dell'aggregato di 16 mm).

Avendo la curva granulometrica ottimale dello strato, si preparano dei materiali per la miscelazione, prendendo in esame le percentuali di classi di aggregato, di bitume e di fibre. Per creare le due miscele per il mix design, si è preferito partire da 2.5 kg totali di massa di aggregati e di seguito si dosano materiali disponibili rispetto alla massa totale di aggregati.

Completato ciò, si procede alla miscelazione manuale tramite l'apposito mixer alla temperatura prestabilita secondo la norma europea EN 12697-35, attraverso la seguente tabella. Si riscaldano dapprima i materiali, aggregati e bitume, in forno alla temperatura di miscelazione di 150°C (il bitume in forno per almeno 3 ore e si controlla che sia completamente liquido).

Tabella 4. Temperatura di riferimento in funzione del bitume (EN 12697-35).

| Paving grade of bitumen | Reference compaction temperature for: °C | |
|-------------------------|---|-------------------------|
| | Mixtures of types other than mastic asphalt | Mastic asphalt mixtures |
| 10/20 to 20/30 | 180 | 230 |
| 30/45 | 175 | 220 |
| 35/50 | 165 | 210 |
| 40/60 | 155 | 200 |
| 50/70 | 150 | - |
| 70/100 | 145 | - |
| 100/150 | 140 | - |
| 160/220 | 135 | - |

La procedura di miscelazione è basata sul metodo dry che coinvolge il riscaldamento ed essiccamento degli aggregati in forno prima di essere mescolati con il bitume liquido caldo. Questo processo rimuove completamente l'umidità tra aggregati assicurando un'adeguata adesione tra aggregati e legante. Difatti, gli aggregati sono stati inizialmente essiccati a 110°C in forno per almeno 12 ore.



Figura 30. Miscelazione manuale tramite apposito mixer.



Figura 31. Miscele con diverso dosaggio di bitume alla fine della miscelazione.

Il processo adottato consiste in diversi step:

- *Versamento di aggregati* nel mixer alla temperatura desiderata, partendo dalla classe di aggregati più grossolani a quella più fine.
- *Miscelazione* per circa 1 minuto per evitare la segregazione ed avere una distribuzione più omogenea possibile.
- *Eventuale aggiunta della metà quantità di fibre e miscelazione* per 30 secondi per la precedente ragione.
- *Aggiunta della metà quantità di bitume e miscelazione* per un minuto in modo da coprire il più possibile gli aggregati.
- *Eventuale aggiunta dell'altra metà di fibre e miscelazione* per 30 secondi.
- *Aggiunta dell'altra metà di bitume e miscelazione* per un minuto per ottenere una vera e propria miscela finale, con un ricoprimento totale di bitume intorno alle particelle.

Alla fine della miscelazione, si preparano i campioni su due piattini o teglie per i prossimi test.

4.3.2. Massima Massa Volumica Teorica (MMVT)

Il primo campione miscelato è stato utilizzato per il calcolo della massima massa volumica teorica (MMVT, o TMD in inglese – Theoretical Maximum Density). Essa è una grandezza intrinseca della miscela, essenziale per le proprietà volumetriche dei conglomerati. Questa è la densità massima della miscela in assenza di vuoti, cioè nella condizione in cui si ha l'addensamento limite, e, dal punto di vista fisico, è impossibile raggiungere codesta condizione, per cui tale grandezza è detta "teorica".

La norma di riferimento utilizzata è la EN 12697-5 con il metodo volumetrico o metodo dei picnometri, e con la stessa procedura sugli aggregati spiegata nel paragrafo 4.2.2.1 ad eccezione i punti 2, 4 e 6, dove:

2) I materiali non sono aggregati, ma conglomerati bituminosi, per cui si preparano campioni secondo lo standard EN 12697-28 mediante quartatura. Il campione, prelevato di una quantità definita dalla normativa dipendente dalla dimensione massima di aggregati, viene prima riscaldato almeno alla temperatura di 100-110°C, non comunque superiore a quella massima dalla norma, per renderlo più lavorabile, e successivamente disperso su un piano d'appoggio pulito, privo di residui di bitume, per separare manualmente particelle grossolane da quelle fini. Si fa poi la quartatura di particelle separate e raffreddate, come mostrato in figura sotto e si versano i due campioni dimezzati nei picnometri e si passa allo step 3, pesatura in aria.



Figura 32. Dispersione di particelle.



Figura 33. Quartatura.

4) Poiché sono miscele bituminose, si trascura l'attesa di 4 ore e si deaerizza la miscela tramite il disaeratore.



Figura 34. Campioni in fase di deaerazione.



Figura 35. Vista da vicino in fase di deaerazione.



Figura 36. Pesatura picnometro con materiale ed acqua deaerata.

6) La MMVT è calcolata attraverso la formula dalla norma EN 12697-5:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 \times V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w} \quad (4.3)$$

Dove:

- ρ_{mv} è la MMVT calcolata con metodo volumetrico, in Mg/m^3 .
- m_1 è la massa del picnometro più tappo, in g .
- m_2 è la massa del picnometro più tappo con il campione, in g .
- m_3 è la massa del picnometro più tappo con campione ed acqua, in g .
- V_p è il volume del picnometro calibrato, in m^3 .
- ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova, in Mg/m^3 , pari a

$$\rho_w = 1.00025205 + \left(\frac{7.59 \times t - 5.32 \times t^2}{10^6} \right) \quad (4.4)$$

con t la temperatura dell'acqua in $^{\circ}C$.

Chiaramente, la MMVT sarà data dal valore medio dei due sottocampioni.

4.3.3. Contenuto di bitume tramite ignizione

Altro aspetto riguardante la composizione del conglomerato bituminoso è il contenuto di legante che influenza le caratteristiche meccaniche della miscela. È possibile determinarlo grazie al processo di ignizione, tenendo conto della normativa EN 12697-39.

Tale procedimento consiste nel fare sparire completamente il bitume dallo scheletro litico della miscela all'interno dell'apposito forno, detto Carbolite, alla temperatura di $540^{\circ}C$, secondo lo standard. Gli step sono:

1. *Preparazione.* Si preriscalda il forno Carbolite alla temperatura di prova, 540°C e si riscalda il campione, di quantità che rispetta i limiti dalla normativa in funzione della dimensione massima nominale dell'aggregato, a 100-110°C per un'ideale lavorabilità.
2. *Pesatura.* Si pesa dapprima il cestello vuoto in metallo, adatto al forno, su una bilancia e, dopo aver disperso il campione in modo omogeneo su due piani del cestello, si pesa nuovamente il cestello pieno.



Figura 37. Carbolite con temperatura di 540°C.



Figura 38. Cestello con materiale.



Figura 39. Pesatura cestello pieno.

3. *Ignizione.* Ottenuti i pesi, il cestello viene posto all'interno del forno e si inizia il processo di combustione della miscela con conseguente perdita di massa. Verrà terminato quando non si registra più variazione di peso grazie alla bilancia presente nella Carbolite.
4. *Misura del contenuto di bitume.* Si raffredda il cestello con soli aggregati a temperatura ambiente e successivamente lo si pesa. Alla fine, si calcola la percentuale di bitume, sia rispetto alla miscela che rispetto agli aggregati secondo:

$$B_{mix} = \frac{m_{mix} - m_{agg}}{m_{mix}} \times 100 \quad (4.5)$$

$$B_{agg} = \frac{m_{mix} - m_{agg}}{m_{agg}} \times 100 \quad (4.6)$$

Dove:

- B_{mix} è il contenuto di bitume rispetto alla miscela, in %.
- B_{agg} è il contenuto di bitume rispetto agli aggregati, %.
- m_{mix} è la massa della miscela prima dell'ignizione, in g .
- m_{agg} è la massa dell'aggregato post-ignizione, in g .

Tuttavia, si è considerato il fattore correzione dovuto alla presenza di acqua negli aggregati raccolti dall'impianto (difatti tali aggregati sono stati sottoposti all'ignizione) e all'eventuale presenza di fibre, per cui il contenuto di bitume corretto è dato da:

$$B_{mix,corr} = (B_{mix} - A - F) \times 100 \quad (4.7)$$

con A il contenuto di acqua da soli aggregati, e F il contenuto di fibre presenti nella miscela.

Pertanto, il contenuto di bitume rispetto agli aggregati sarà:

$$B_{agg,corr} = \frac{B_{mix,corr}}{100 - B_{mix,corr}} \times 100 \quad (4.8)$$

4.3.4. Granulometria

Il prossimo parametro che descrive la composizione della miscela bituminosa è la distribuzione granulometrica dello scheletro litico. Come esplicito nel paragrafo 4.2.2.2, il procedimento è il medesimo, aggiungendo lo step prima di 1.

0. *Pulizia degli aggregati post-ignizione.* Dopo aver effettuato la combustione del bitume, si conosce la massa degli aggregati prima del lavaggio, per avere a posteriori il quantitativo di filler. Si rimuovono gli aggregati dal cestello facendo attenzione a non perdere nessuna particella e li si mettono su una teglia apposita prima di essere lavati.

A fine setacciatura, si disegna la curva granulometrica necessaria anche come verifica con quella di progetto (se sono simili o meno).



Figura 40. Pulizia degli aggregati.



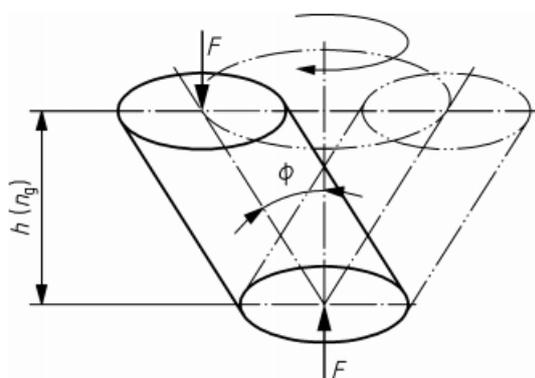
Figura 41. Lavaggio degli aggregati post-ignizione.

4.3.5. Compattazione giratoria

Poiché i campioni devono simulare in laboratorio le azioni compattanti dei rulli in situ durante la fase di costruzione, questi vengono creati tramite l'apposita macchina detta pressa a taglio giratoria. Tale macchina, del programma SHRP, sostituisce la tecnica di compattazione Marshall e permette di conoscere la lavorabilità della miscela e del grado di compattazione, o di addensamento, a diversi giri.

La norma EN 12697-31 descrive la configurazione e la tecnica giratoria. Il conglomerato bituminoso è inserito all'interno della fustella cilindrica metallica mantenuta alla temperatura di prova costante. La compattazione è realizzata con due diversi movimenti in simultanea: la bassa compressione statica e l'azione tagliante derivante dal movimento del campione (o fustella) che genera una superficie conica di rivoluzione, di apice 0 e di angolo di 2ϕ all'apice.

Idealmente, le estremità del provino dovrebbero rimanere perpendicolari all'asse della superficie conica.



| | |
|------------|--|
| Key | |
| F | axial resultant force |
| $h(n_g)$ | height of specimen after a number of gyrations |
| ϕ | angle |

Figura 42. Diagramma del movimento giretorio del campione (EN 12697-31).

La pressa in laboratorio è stata già calibrata con uno sforzo costante di compressione di 600 kPa, con un angolo di inclinazione di 1.25° e con una velocità di rotazione di 30 giri al minuto. Durante il costipamento si evidenzia un avvicinamento delle particelle e una loro riorganizzazione grazie all'azione combinata della compressione verticale e della forza tagliante.

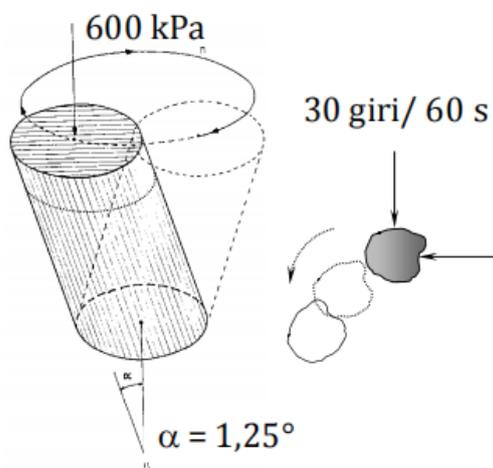


Figura 43. Schema geometrico della giratoria.



Figura 44. Macchina della pressa a taglio giratoria.

Questa macchina è collegata a un software dove si registrano le altezze di compattazione al crescere del numero di giri necessarie per costruire la retta di lavorabilità.

Il diametro dei provini può essere da 100 o da 150 mm a seconda delle prove meccaniche che si vogliono effettuare. Nel caso in esame, per il mix design, si è deciso di ottenere campioni da 100 mm per le prove di resistenza a trazione indiretta (RTI), spiegate più in avanti.

In più, gli input della macchina sono il numero di giri o l'altezza desiderati. Per conoscere prima di tutto la volumetria è fondamentale sapere la compattazione finale, per cui si considererà il numero di giri (180).

In maniera dettagliata, si descrive il processo di costipamento a partire dalla preparazione dei campioni di prova:

1. *Preparazione del quantitativo di materiale da inserire nella fustella.* Prima di iniziare la vera e propria compattazione, è necessario conoscere la massa della miscela da inserire all'interno della fustella cilindrica. Essa è calcolata attraverso la relazione normata da EN 12697-31 (dry mixture):

$$M = 10^{-3} \pi \frac{D^2}{4} h_{min} \rho_M \quad (4.9)$$

dove:

- M è la massa della miscela da inserire nella fustella, in g .
 - D è il diametro interno della fustella, in mm .
 - h_{min} è l'altezza minima di costipamento del campione corrispondente a vuoti nulli, in mm .
 - ρ_M è la massima massa volumica teorica (MMVT), ottenuta da (4.3), in Mg/m^3 .
2. *Riscaldamento di fustelle e materiali.* La procedura richiede più tempo poiché include il riscaldamento del materiale per 2 h in forno alla temperatura di invecchiamento di $135^\circ C$, come detto in precedenza, e necessita l'utilizzo di due forni, uno per l'invecchiamento di breve termine dei campioni, l'altro per il riscaldamento di fustelle alla temperatura di compattazione desiderata, $150^\circ C$. Una volta invecchiato, si aumenta la temperatura del materiale finché non raggiunge $155^\circ C (+20^\circ C)$, essenziale per inserirlo nelle fustelle calde della quantità calcolata da (4.9), previo posizionamento di un filtro cartaceo per separare la base della fustella dal materiale. Molto spesso, la temperatura del campione scende durante il suo versamento nella fustella, per cui è consigliabile rimettere in seguito le fustelle nel forno finché non raggiunge nuovamente la temperatura di compattazione.
 3. *Compattazione.* Raggiunta la temperatura target, si inserisce un secondo filtro su cui si poggia il piattino in acciaio che andrà a contatto con il pistone della pressa giratoria. Si mette la fustella all'interno della macchina con precedente lubrificazione dei punti di contatto tra il disco e il pistone, e si fa partire il costipamento mettendo come input 180 giri.

A fine prova, si estrae il campione finale dalla fustella e lo si lascia raffreddare.



Figura 45. Versamento del materiale nella fustella



Figura 46. Riscaldamento di fustelle da 100 mm in forno a 150°C.



Figura 47. Fase di compattazione.



Figura 48. Campioni finali post-compattazione.

Per conoscere l'altezza reale finale, si fa una misura dell'altezza di compattazione su 4 punti del provino, facendo, alla fine, la media delle 4.

Grazie ai dati registrati dal software, si costruiscono curve di compattazione su scala semi-logaritmica dove sull'asse delle ascisse si riportano i logaritmi del numero di giri e sull'asse delle ordinate il grado di costipamento. A tale scopo, è sostanziale conoscere:

- V_x , il volume geometrico del campione, dato da:

$$V_x = \pi \frac{D^2}{4} h(n_G) \quad (4.10)$$

con D il diametro della fustella e $h(n_G)$ l'altezza di compattazione al giro n .

- C_{ux} , il grado di compattazione in cui non si considera l'effetto parete:

$$C_{ux} = \frac{\frac{M_{eff}}{V_x}}{MMVT} \cdot 100 \quad (4.11)$$

dove $MV_{geo} = \frac{M_{eff}}{V_x}$ è la massa volumica geometrica del campione compattato, come rapporto tra massa effettiva del campione e il volume geometrico.

- c , il fattore correttivo, in quanto abbiamo superfici irregolari del campione cilindrico (quindi volume reale minore di quello geometrico) e, di conseguenza, si considera l'effetto parete dovuto alla non perfetta aderenza campione-fustella:

$$c = \frac{\rho_{SSD}}{M_{eff}/V_X} \quad (4.12)$$

con ρ_{SSD} la massa volumica reale, misurata dopo la compattazione con il metodo spiegato nel paragrafo successivo.

- C_x , il grado di compattazione considerando l'effetto parete:

$$C_x = C_{ux} \cdot c \quad (4.13)$$

L'equazione della retta è la seguente:

$$C_x(n_G) = C_1 + k \log(n_G) \quad (4.14)$$

dove:

- $C_x(n_G)$ è il grado di compattazione in funzione del numero di giri, in %.
- C_1 è l'autoaddensamento (intercetta), ovvero, il grado di compattazione registrato al primo giro, in %.
- k è la pendenza e rappresenta la misura della lavorabilità.
- n_G è il numero di giri.

4.3.6. Volumetria

La percentuale di vuoti svolge un ruolo di fondamentale importanza in quanto influenzano le proprietà meccaniche del conglomerato bituminoso. Questa proprietà volumetrica è determinata attraverso la massa volumica del campione compattato, secondo lo standard EN 12697-6, in cui si applica la procedura B. Questa metodologia consente di calcolare la massa volumica con campione saturo a superficie asciutta (*bulk density, saturated surface dry – SSD*), cioè, tenendo conto del campione con una superficie asciutta e con vuoti interni completamente riempiti dall'acqua.

Il metodo è abbastanza semplice:

1. *Pesatura in aria*. Il campione raffreddato (generalmente si aspetta un giorno dalla compattazione) a temperatura ambiente viene pesato sulla bilancia.
2. *Immersione e pesatura in acqua*. Si mette il campione in una vasca di acqua per almeno 40 minuti, con scuotimento ogni 10 minuti, in modo tale che l'acqua riempia gli interstizi tra le particelle. Grazie alla bilancia presente nella vasca di acqua, si pesa il provino.
3. *Pesatura SSD*. Si rimuove il campione dalla vasca e si asciuga con un panno umido (non troppo bagnato) tutta la sua superficie, il più veloce possibile per l'ultima pesatura, ottenendo la massa del campione saturo a superficie asciutta (SSD).

A fine prova, si misura la temperatura dell'acqua presente nella vasca.



Figura 49. Pesatura in aria m_1 .



Figura 50. Pesatura in acqua, m_2 .



Figura 51. Asciugatura della superficie del campione per SSD, m_3 .

La massa volumica (bulk density) ρ_{SSD} (o MV_{SSD}) del campione cilindrico è determinato con la seguente formula:

$$\rho_{SSD} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (4.15)$$

dove

- m_1 è la massa del campione in aria, in g .
- m_2 è la massa del campione in acqua, in g .
- m_3 è la massa del campione saturo a superficie asciutta, in g .
- ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova, in Mg/m^3 ottenuta con la stessa formula (4.4).

Infine, dalla massa volumica, si è in grado di calcolare il contenuto di vuoti reali sia a 180 giri, indicativo della compattazione finale secondo:

$$v_{180} = \frac{MMVT - \rho_{SSD}}{MMVT} \times 100 \quad (4.16)$$

che a n giri tramite C_x , come complemento a 100:

$$v_x = 100 - C_x \quad (4.17)$$

4.3.7. Resistenza a Trazione Indiretta (RTI)

I campioni cilindrici sono stati testati con una prova distruttiva in grado di misurare la resistenza a trazione indiretta (RTI), una delle proprietà meccaniche delle miscele bituminose. Il parametro fornisce informazioni sulla resistenza a trazione e alla fessurazione dei conglomerati, sotto condizioni di carico indiretto. È il massimo sforzo di trazione ottenuto dalla forza massima applicato al campione cilindrico caricato diametralmente finché questo non si rompe a certe condizioni.

La norma che descrive il test è la EN 12697-23 in cui i provini devono essere testati alla temperatura desiderata, posizionati nella macchina di compressione tra due piastre metalliche

di carico e caricato diametralmente lungo l'asse del cilindro con una deformazione costante di 50 mm/min finché non arriva a rottura. Si considereranno anche la linea di rottura a fine test.

A priori, i campioni vengono conservati a temperatura ambiente per 48 ore dalla compattazione (2 giorni) e seguentemente messi in camera climatica alla temperatura di prova, di 10°C per almeno 2 ore, come sottolineati dallo standard.

A test concluso, tramite il software che collega la prova, si ottengono i valori di carico e spostamento nel tempo e i loro valori massimi.



Figura 52.
Configurazione del
provino per RTI.

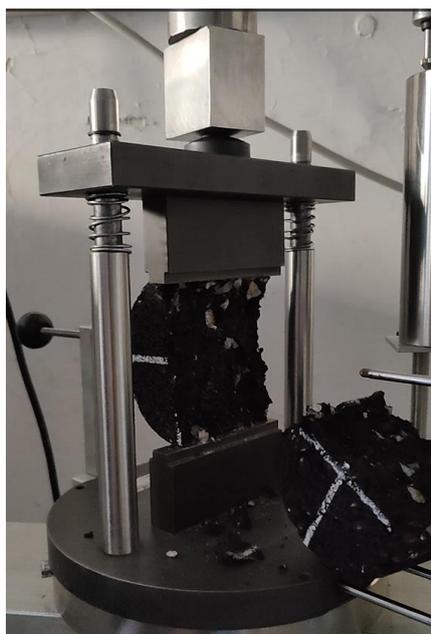


Figura 53. Rottura del provino
da RTI test.



Figura 54. Esempio fessura
del provino dopo RTI test.

La RTI è data da:

$$RTI = \frac{2P}{\pi DH} \cdot 1000 \quad (4.18)$$

dove

- RTI (o ITS , in inglese, *Indirect Tensile Strength*), in kPa .
- P è il carico di picco, in N .
- D è il diametro del campione, in mm .
- H è l'altezza del campione, in mm .

4.4. *Miscelazione e proprietà volumetriche*

Con tali dosi ottenute si passa alla miscelazione meccanica per ottenere una maggiore quantità di conglomerato, abbastanza da avere diversi campioni per i prossimi test.

4.4.1. Miscelazione meccanica

Analogamente alla miscelazione manuale, si preparano i materiali a quantità maggiori.

Si riscaldano aggregati, fibre e bitume nel forno a 170°C per almeno 3 ore. Dopo si accende la macchina da riscaldare alla stessa temperatura e, quando è pronta per la miscelazione, si procede con i seguenti step.

1. *Versamento di aggregati* nel miscelatore meccanico, partendo dalla classe più grossolana a quella più fine, da 5-15 a 0-5.
2. *Miscelazione* per 30 secondi a bassa velocità per avere una distribuzione omogenea dello scheletro litico.
3. *Versamento di 1/3 di bitume*.
4. *Miscelazione* per 30 secondi a bassa velocità per coprire il più possibile gli aggregati di bitume.
5. *Aggiunta di 1/3 di bitume e miscelazione lenta per 30 secondi*.
6. *Aggiunta di 1/2 di filler e miscelazione lenta per 30 secondi*.
7. *Eventuale aggiunta di 1/2 di fibre e miscelazione lenta per 30 secondi*. Il filler non è altro che la classe “polvere”.
8. *Aggiunta di 1/3 di bitume e miscelazione lenta per 30 secondi*.
9. *Aggiunta di 1/2 di filler e dell’eventuale 1/2 di fibre, e miscelazione lenta per 30 secondi*.
10. *Miscelazione* per 3 minuti a bassa velocità.
11. *Miscelazione finale* per 1 minuto ad alta velocità.



Figura 55. Mixer meccanico.



Figura 56. Preparazione materiali per
miscelazione meccanica.



Figura 57. Miscelazione di soli aggregati.



Figura 58. Versamento di
aggregati grossolani.



Figura 59. Versamento di
bitume vergine.



Figura 60. Versamento
di filler (polvere).



Figura 61. Versamento di fibre.

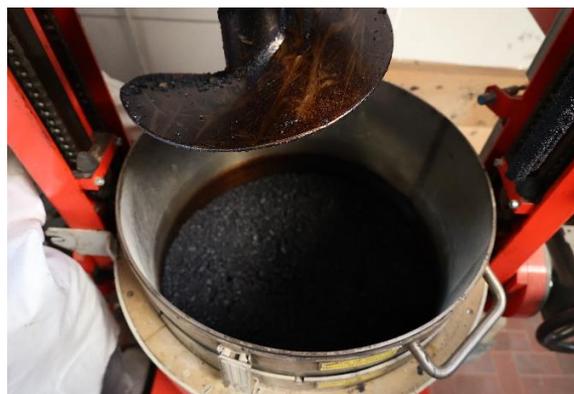


Figura 62. Miscelazione finale.



Figura 63. Le due miscele ottenute, di riferimento e con 0.5%Fibre.

La miscela finale viene messa nei sacchi di cartone e, finché è ancora calda, sono prelevati dei campioni e messi su piatti/teglie per la composizione e la volumetria.

4.4.2. Composizione

Si ripetono le misure per la percentuale di bitume e per la curva granulometrica, come funzionalità di controllo, e le misure per la MMVT per le compattazioni di campioni cilindrici.

Le procedure sono le medesime, spiegate nei paragrafi 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4.

4.4.3. Compattazione e proprietà volumetriche

I campioni realizzati tramite pressa a taglio giratoria sono di forma cilindrica, di diametro 100 mm, per il calcolo della volumetria e della lavorabilità, ricordando comunque di fare invecchiare il materiale per 2 h in forno a 135°C, prima del costipamento.

Al termine della compattazione, con la stessa metodologia del paragrafo 4.3.5, si determinano le proprietà volumetriche, il contenuto di vuoti, come sottolineato in 4.3.6.

4.5. Prove meccaniche

L'obiettivo dell'attuale tesi è di valutare il comportamento a fatica e il comportamento di fronte alla fessurazione. A tale scopo si effettuano le seguenti prove meccaniche:

- Modulo di rigidità (*IT-CY*).
- Resistenza a fatica (*CIT-CY*).
- Flessione a tre punti (*SCB*).
- Resistenza a trazione indiretta (*RTI*).

4.5.1. Modulo di rigidità (*IT-CY*)

La rigidità è uno dei parametri meccanici chiave del conglomerato bituminoso. Essa è legata alla risposta tenso-deformativa e, quindi, rappresenta la capacità di resistere alle deformazioni sotto carico ed influisce sulle prestazioni strutturali e funzionali della pavimentazione stradale. Poiché il conglomerato è un materiale visco-elastico, il modulo non è dato dalla relazione lineare tra sforzo e deformazione, ma dipende fortemente dalla temperatura, dalla frequenza di carico e/o tempi di carico, dallo stato tensionale e deformativo. Dipende anche dalla configurazione di prova, se applicare una flessione a n-punti, una tensione indiretta o una tensione diretta, su diversi tipi di campioni, prismatici, cilindrici o trapezoidali.

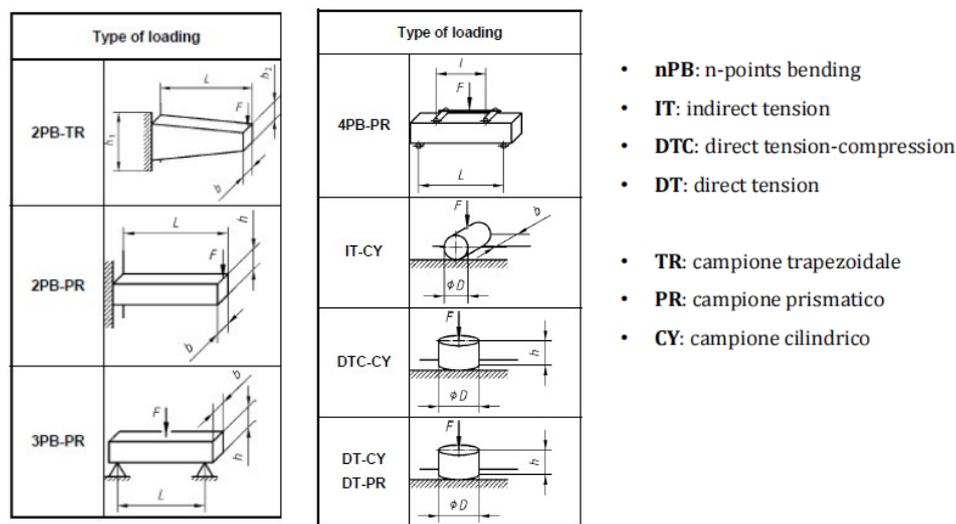


Figura 64. Diverse configurazioni di prova per il modulo (da *EN 12697-26*).

Il parametro usato, rappresentativo della rigidità del materiale, è il modulo resiliente determinato facendo riferimento alla norma *EN 12697-26*, Annex C.

In laboratorio vi è la macchina UTM-30 (Universal Testing Machine), una macchina di prova universale servo-idraulica con carico massimo di 30 kN che permette la caratterizzazione dei materiali. Tale macchina è stata utilizzata per la prova di rigidità su campioni cilindrici (CY), detta prova di trazione indiretta (da qui il simbolo *IT-CY*: *Indirect Tension – Cylindrical samples*).

Il test è di tipo impulsivo e non distruttivo che valuta la componente resiliente del modulo elastico del provino, la componente recuperabile durante i cicli di carico e scarico.

I campioni da testare sono 6 per miscela, e vanno messi in camera climatica per il condizionamento alle temperature desiderate di prova, 10°C, 20°C e 30°C, dopo averli conservati a temperatura ambiente su superficie piana per 14 giorni dalla compattazione. La geometria dei provini cilindrici dipende dalla dimensione massima dell'aggregato, elencati nella seguente tabella dalla normativa.

Tabella 5. Geometria dei provini cilindrici in funzione della dimensione massima dell'aggregato (da EN12697-26).

| 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 |

Si è consultato tale tabella prima della compattazione: i campioni cilindrici da testare hanno il diametro di 100 mm, con altezza fissata a 60 mm.

L'equipaggiamento della macchina consiste nell'avere un pistone idraulico, un attuatore di carico capace di applicare una forza verticale di tipo impulsiva con il tempo di riposo. Il carico ha come forma d'onda, l'haversine, come mostrato in figura sotto.

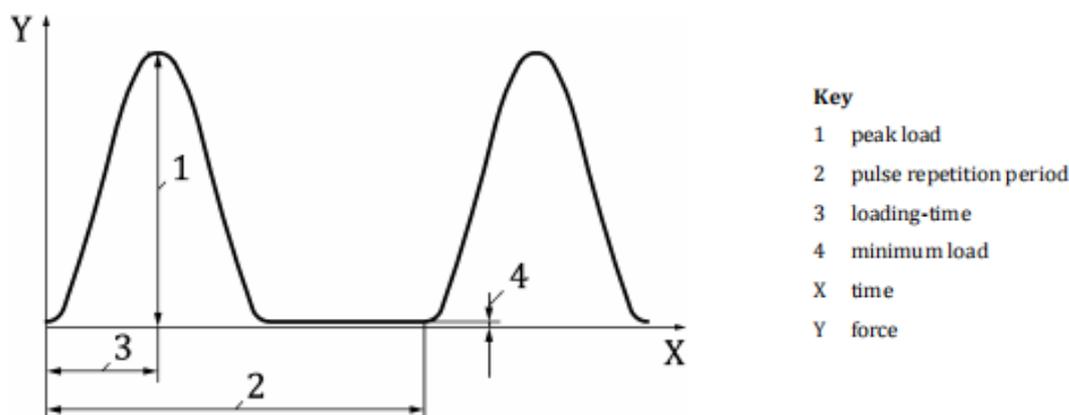


Figura 65. Haversine di carico (da EN 12697-26).

Il tempo di carico da inizio test al raggiungimento del picco deve essere compreso tra 50 e 125 ms ± 5 ms. Altro input da inserire è la deformazione massima orizzontale, dipendente dalla temperatura, per campioni di 100 mm di diametro:

Tabella 6. Deformazione orizzontale massima in funzione della temperatura (EN 12697-26).

| Temperature | Recommended maximum horizontal deformation |
|-------------|--|
| °C | µm |
| -5 | 2,5 |
| 10 | 5,0 |
| 15 | 6,5 |
| 20 | 7,5 |
| 25 | 9,0 |

La deformazione deve essere misurata monitorando quella diametrica transitoria orizzontale del provino. Ciò può essere fatto mediante trasduttori differenziali variabili lineari (LVDT) montati su entrambi i lati, e questi LVDT dovranno essere fissati simmetricamente ma non eccessivamente serrati, applicando con un apposito cacciavite una coppia torcente costante di 25 cNm. La configurazione finale del campione inserito nel castelletto è mostrata nella seguente figura.

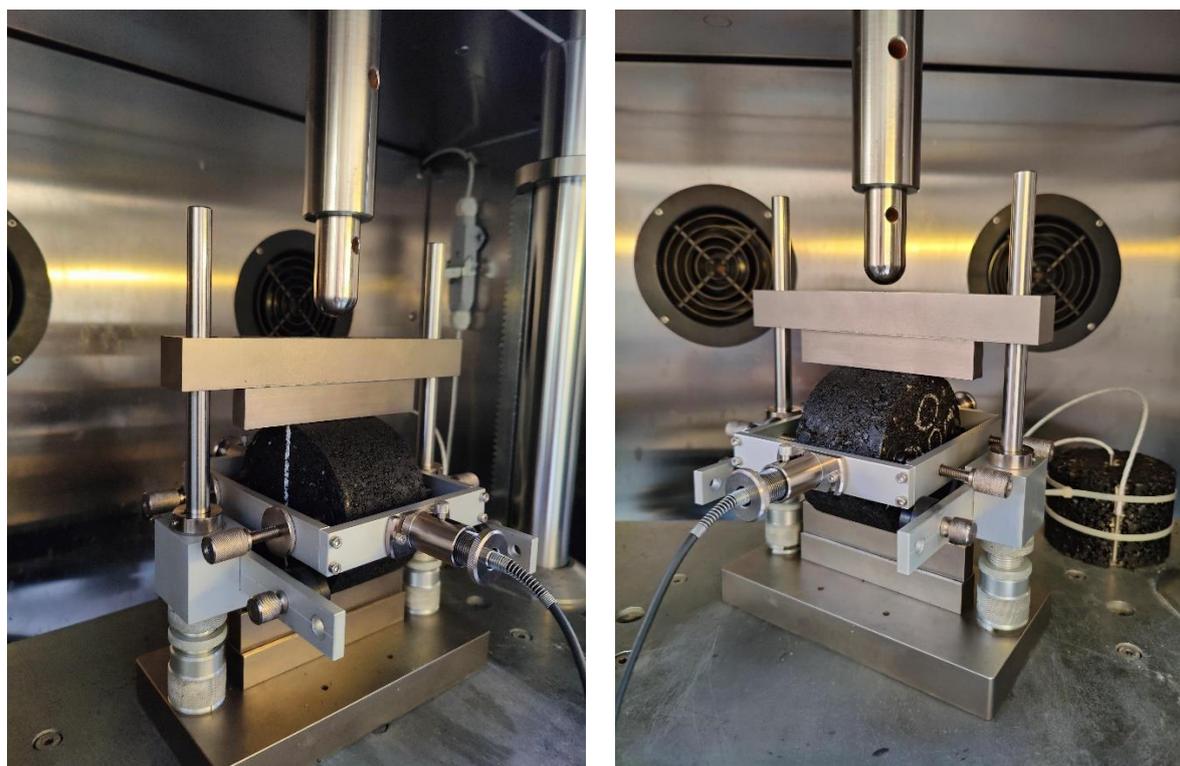


Figura 66. Configurazioni di prova per il modulo IT-CY.

Nel corso del test, al campione devono essere applicati un minimo di 10 impulsi di condizionamento, per consentire alla macchina di regolare il carico richiesto per raggiungere la deformazione target e il tempo. Dopo il condizionamento, sono stati applicati 5 impulsi e il modulo sarà determinato come media dei 5. Dopo la prima media, si effettua la rotazione del campione di $90^{\circ} \pm 10^{\circ}$ intorno all'asse orizzontale del provino, e si rifà il test, come fase di

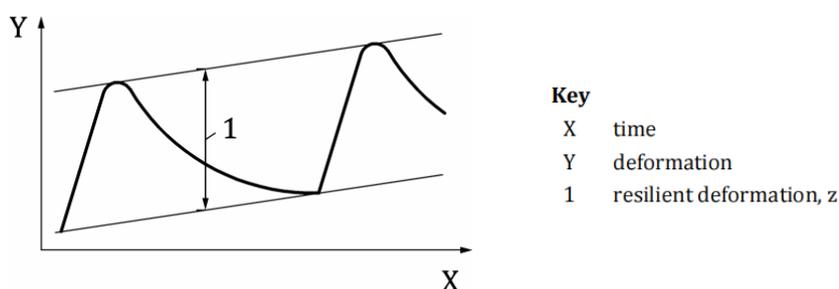
controllo, ovvero, per verificare se la seconda media rientra nell'intervallo tra +10% e -20% della prima media calcolata al primo test, altrimenti il provino verrà scartato.

Il modulo di rigidezza è calcolato, secondo la norma, come:

$$E = \frac{F \cdot (\nu + 0.27)}{z \cdot h} \quad (4.19)$$

dove

- E è il modulo di rigidezza, o modulo resiliente, in MPa .
- F è la forza applicata, in N .
- ν è il coefficiente di Poisson, assunto pari a 0.35 per i conglomerati bituminosi.
- h è l'altezza (o spessore) di compattazione media (su 4 punti), in mm .
- z è l'ampiezza della deformazione orizzontale resiliente ottenuto durante la fase di carico (mostrato in figura sotto dallo standard), in mm .



Key
 X time
 Y deformation
 1 resilient deformation, z

Figura 67. Ampiezza di deformazione (EN 12697-26).

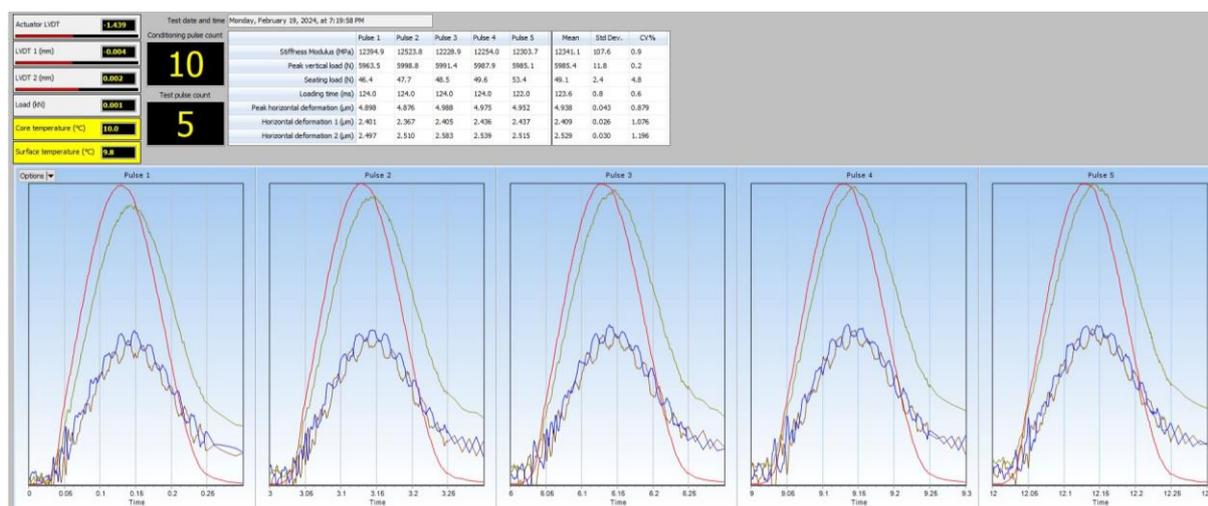


Figura 68. Risultati per 5 impulsi di carico e deformazioni durante il test di modulo IT-CY.

4.5.2. Resistenza a fatica (CIT-CY)

Il comportamento a fatica del conglomerato bituminoso svolge un ruolo importante, dal punto di vista strutturale, di fronte alla resistenza alla fessurazione nel corso del traffico veicolare. Vi sono diversi test per valutare la resistenza a fatica, quello interessato nel caso di studio è la prova CIT-CY, cioè la prova a trazione indiretta ciclica (CIT – *Cyclic Indirect Tensile*) su campioni cilindrici (CY), i medesimi testati per il modulo, seguendo lo standard EN 12697-24, Annex F. Tale prova è distruttiva e non impulsiva come per la rigidità, ma ciclica.

La norma suggerisce di applicare un carico di compressione ciclico (sinusoidale) verticalmente sul campione, senza tempo di riposo. Si genera uno sforzo di trazione, relativamente uniforme, perpendicolare alla direzione del carico applicato e lungo il diametro verticale, che provocherà la rottura del campione con una fessurazione lungo il diametro. Lo spostamento orizzontale sarà misurato e tramite il coefficiente di Poisson, assunto pari a 0.35, si ottiene la deformazione di trazione al centro del provino. Ci sono diversi criteri di rottura per valutare la curva di fatica, e generalmente il numero di cicli di carico, corrispondente a quando il modulo complesso iniziale diminuisce della metà del suo valore iniziale, è considerato come criterio di rottura convenzionale. Il criterio utilizzato, in questo caso, è quello basato sulla dissipazione di energia.

Tramite UTM-30, il test di fatica è stato effettuato a sforzo costante (stress controlled), grazie al quale dal carico applicato si registra la deformazione del campione. La frequenza di carico è stata impostata a 10 Hz, per la simulazione di passaggi veicolari.

Riguardante la temperatura del test, è stata impostata a 10°C, per cui i campioni sono stati inseriti in camera climatica a 10°C per almeno 4 ore prima del test, in modo da raggiungere tale temperatura nel cuore del campione.

I campioni testati sono 6, necessari per avere una curva di fatica, immettendo diversi valori di sforzo tenendo conto della deformazione iniziale, detta teorica, per garantire che essa rientri nel range compreso tra $25\mu\text{m}/\text{m}$ e $100\mu\text{m}/\text{m}$. I numeri di cicli a rottura devono essere compresi tra 10^3 e 10^6 cicli.

La configurazione di prova è mostrata sotto:



Figura 69. Dispositivo per l'incollaggio delle barrette di acciaio per LVDT.



Figura 70. Configurazione di prova di fatica CIT-CY.

Dove, a priori, si incollano le barrette di metallo ai lati del campione per inserire i trasduttori in grado di registrare le deformazioni (LVDT).

In maggiore dettaglio, si calcolano i seguenti parametri del test CIT-CY, normati dallo stesso standard EN 12697-24:

1. *Forza verticale, $F(t)$, in kN , applicata al campione in forma sinusoidale senza tempo di riposo:*

$$F(t) = F_m + F_a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (4.20)$$

$$F_m = F_l + F_a \quad (4.21)$$

dove:

- F_m è la forza verticale media, in kN .
- F_a è l'ampiezza della forza verticale, in kN .
- F_l è la minima forza verticale, con un livello di stress orizzontale di 0.035 MPa, in kN .
- f è la frequenza di carico, in Hz .
- t è il tempo di prova, in s .

I parametri di F sono determinati mediante analisi di regressione.

2. *Massimo sforzo orizzontale, σ_a , dovuto alla forza verticale, in MPa :*

$$\sigma_a = \frac{2F_a}{\pi \cdot h \cdot D} \quad (4.22)$$

dove:

- h è l'altezza media del campione, in mm .
- D è il diametro del campione, in mm .

3. *I parametri di spostamento orizzontale:*

$$u(t) = u_m + u_a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi) + u_d \cdot t \quad (4.23)$$

con:

- $u(t)$, la legge di spostamento orizzontale, in mm .
- u_m , lo spostamento orizzontale medio, in mm .
- u_a , l'ampiezza spostamento orizzontale, in mm .
- u_d , la velocità di spostamento orizzontale (spostamenti viscoplastici), in mm/s .
- φ , l'angolo di fase tra la forza verticale e la funzione spostamento orizzontale, in $^\circ$.

4. *Ampiezza massima di deformazione di trazione e la differenza di deformazione, importanti per la curva di fatica:*

$$\varepsilon_a = \left(\frac{2u_a}{D} \right) \cdot \left[\frac{1 + 3\nu}{4 + \pi \cdot \nu - \pi} \right] \cdot 10^6 \quad (4.24)$$

$$\Delta\varepsilon = 2 \cdot \varepsilon_a \quad (4.25)$$

5. *Modulo di rigidità, in MPa :*

$$S_{mix} = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \cdot (1 + 3\nu) \cdot 10^6 \quad (4.26)$$

Tale formula è utile per inserire il valore di sforzo come input, conoscendo il modulo, ottenuto dalla prova IT-CY, ipotizzando diverse deformazioni iniziali, come teorici.

6. *Indice di energia, o energy ratio, ER(n), per numero di cicli di carico (adimensionale):*

$$ER(n) = n \cdot S_{mix,n} \quad (4.27)$$

Ottenute le curve di modulo, di deformazione (entrambi su scala semi-logaritmica) e di energia in funzione del numero di cicli, si applica il metodo energetico per determinare il numero di cicli a rottura che corrisponde al massimo dell'ER, calcolato tramite derivata prima dell'equazione polinomiale di grado massimo, con intercetta nulla.

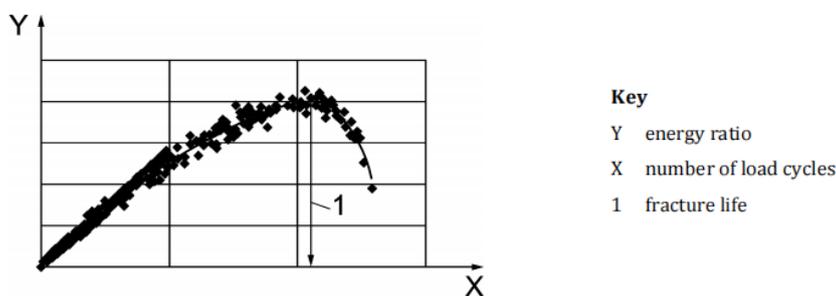


Figura 71. Numero di cicli a rottura (*fracture life*) corrispondente al massimo della curva ER (EN 12697-24 Annex F).

Effettuato il test su 6 campioni, si ottiene la curva di fatica, alla temperatura di prova fissata di 10°C, considerando il coefficiente di correlazione R^2 , non inferiore a 0.95, e le seguenti equazioni:

$$\log(N_{f,W}) = \log(k_\varepsilon) + n_\varepsilon \cdot \log(\Delta\varepsilon) \quad (4.28)$$

$$N_{f,W} = k_\varepsilon \cdot \left(\frac{1}{\Delta\varepsilon}\right)^{n_\varepsilon} \quad (4.29)$$

dove:

- $N_{f,W}$ è il numero di cicli a rottura, secondo il criterio energetico, (-).
- k_ε è una costante del materiale della funzione di fatica, (-).
- n_ε è una costante del materiale della funzione di fatica, (-).



Figura 72. Fine test CIT-CY.



Figura 73. Rottura per fatica del campione con fibre.

4.5.3. Flessione a tre punti su campioni semicircolari (SCB)

L'ultimo test per lo studio del comportamento del materiale di fronte alla propagazione della fessura è quello di flessione su campioni semicircolari (in inglese *Semi-circular Bending*). Esso determina l'energia a rottura e la tenacità a frattura, a basse temperature. Sono state prese in conto le due norme di riferimento, sia quella europea, EN 12697-44, che quella americana, AASHTO T 394-22.

La geometria del provino è di tipo semicircolare con un intaglio al centro del diametro per osservare se il provino resiste o meno alla rottura sotto carico massimo. Per la creazione di tale provino è necessario effettuare la compattazione e successivo taglio, seguendo:

1. *Compattazione tramite pressa a taglio girevole.* Il metodo del costipamento è il medesimo spiegato nel paragrafo 4.3.5, cambiando le fustelle e quindi cambiando il diametro passando da 100 mm a 150 mm. In più, l'altezza finale che si vuole ottenere è di circa 115 mm, secondo AASHTO, per avere però uno spessore di 50 mm da EN 12697-44.
2. *Determinazione del contenuto di vuoti tramite massa volumica (o bulk density).* Si calcola la volumetria con la stessa procedura del paragrafo 4.3.6.
3. *Tagli mediante lama circolare.* Per mezzo della macchina dotata di laser e contenente la lama circolare dentata, si effettuano tre tagli sul campione bagnato per ricavare i provini semicircolari, due alle basi del campione compattato e uno lungo il diametro.



Figura 74. Campione compattato $150 \times 115 \text{ mm}^2$ per SCB test.



Figura 75. Campione prima del taglio.



Figura 76. Configurazione taglio tramite sega circolare.



Figura 77. Secondo taglio del provino.



Figura 78. Provini SC finali.

4. *Contenuto di vuoti.* Si rivaluta la volumetria per provini semicircolari così realizzati, previa misura della loro geometria (per lo spessore si fa la media su 3 punti).
5. *Intaglio dei provini semicircolari.* Tramite un'apparecchiatura dotata di una piccola lama dentata, si effettua un piccolo intaglio con una profondità desiderata (nello standard, in inglese è definito come *notch*).

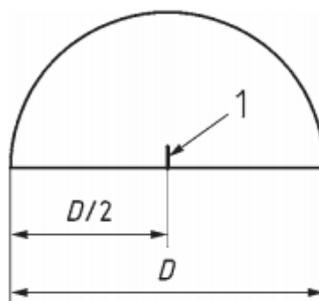


Figura 79. Esempio geometrico del notch.



Figura 80. Notch su campioni semicircolari per SCB test.

6. *Condizionamento in camera climatica alla temperatura di prova di 0°C per almeno 4 ore.*

La prova è stata effettuata a diversi livelli di velocità di deformazione: 5 mm/min, 1 mm/min e 0.5 mm/min. I dati sperimentali verranno riportati per una velocità di deformazione più bassa, di 0.5 mm/min.

Si riportano infine il grafico forza-spostamento e i seguenti valori:

1. *Deformazione massima, corrispondente alla forza massima:*

$$\varepsilon_{max,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \times 100 \quad (4.30)$$

con

- $\varepsilon_{max,i}$, la deformazione massima del campione i , in %.
- ΔW_i , lo spostamento verticale sotto la forza massima del campione i , in mm .
- W_i , l'altezza del campione i , in mm .

2. *Sforzo massimo alla rottura:*

$$\sigma_{max,i} = \frac{F_{max,i}}{D_i t_i} \quad (4.31)$$

dove

- $\sigma_{max,i}$ è lo sforzo alla rottura del campione i , in N/mm^2 o MPa .
- $F_{max,i}$ è la forza massima del campione i , in N .
- D_i è il diametro del campione i , in mm .
- t_i è lo spessore del campione i , in mm .

3. *Tenacità a frattura:*

$$K_{Ic,i} = \sigma_{max,i} Y_1 \sqrt{\pi a_i} \quad (4.32)$$

dove

- $K_{Ic,i}$ è la tenacità a frattura del campione i , in $N/mm^{1.5}$.
- a_i è la profondità di intaglio (notch depth) del campione i , in mm .
- Y_1 è il fattore geometrico riferito al modo 1 di propagazione della cricca, (-) attraverso:

$$Y_1 = 4.782 - 1.219 \left(\frac{a_i}{r_i} \right) + 0.063 \exp \left(7.045 \left(\frac{a_i}{r_i} \right) \right) \quad (4.33)$$

con r_i il raggio del campione i , in mm .

4. *Lavoro di rottura*, se vogliamo considerare pure il metodo energetico, ottenuto come area sottesa dalla curva forza-spostamento, cioè secondo la regola del trapezio:

$$W = \sum_{i=1}^n (u_{i+1} - u_i) \times P_i + \frac{1}{2} \times (u_{i+1} - u_i) \times (P_{i+1} - P_i) \quad (4.34)$$

dove

- W è il lavoro, inteso come area sottesa dalla curva, in J .
 - P_i è il carico applicato al tempo i , in N (o kN).
 - P_{i+1} è il carico applicato al tempo $i+1$, in N (o kN).
 - u_i è lo spostamento medio al tempo i , in m (o mm).
 - u_{i+1} è lo spostamento medio al tempo $i+1$, in m (o mm).
5. *Propagazione della fessura*, a partire dall'intaglio.



Figura 81. Configurazione di prova SCB.



Figura 82. Applicazione del carico sul provino SC con fibre.

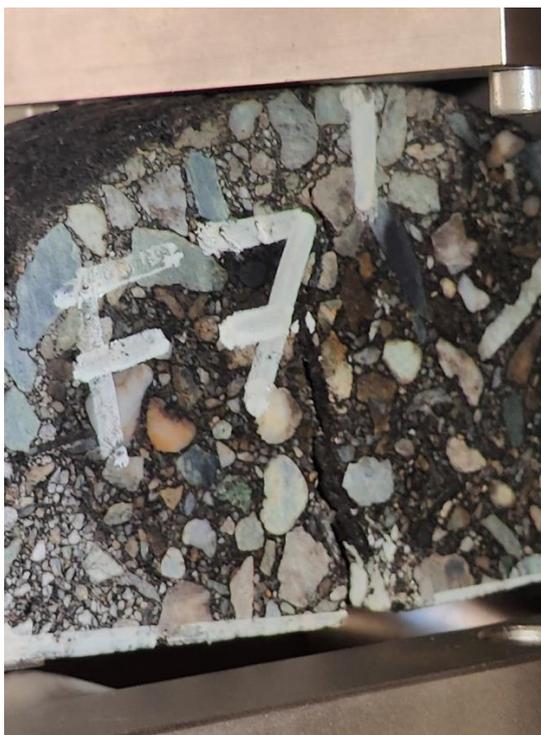


Figura 83. Propagazione della fessura del provino con fibre.



Figura 84. Fessurazione dei provini SC.

4.5.4. Indice di trazione indiretta N_{flex}

Come nel mix design, si effettua la prova di RTI, come in 4.3.7.

Oltre alla RTI, si è considerato anche un parametro che valuta la resistenza alla fessurazione delle miscele bituminose.

Questo è basato sulla curva sforzo-deformazione, dove si definiscono i valori della pendenza, tenacità e punto di flesso, il tutto preso dalla norma americana AASHTO TP 141-20.

La curva è correlata con i valori ottenuti da RTI, di carico e spostamento, laddove sull'asse delle ascisse si riporta la deformazione di trazione, registrata al centro del campione:

$$\varepsilon' = \frac{\mu Y}{D} \cdot 100\% \quad (4.35)$$

dove

- ε' è la deformazione di trazione stimata, in %.
- μ è il coefficiente di Poisson, assunto pari a 0.35 per i conglomerati bituminosi a 25°C.
- Y è lo spostamento verticale, da RTI, in *mm*.
- D è il diametro del campione, in *mm*.

e sull'asse delle ordinate lo sforzo di trazione dato da:

$$S_t = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (4.36)$$

dove

- S_t è lo sforzo di trazione, in kPa .
- P è il carico verticale, in N .
- D è il diametro del campione, in mm .
- t è lo spessore del campione, in mm .

Si disegna perciò la curva su Excel, e tramite il medesimo software, si inserisce la linea di tendenza di tipo polinomiale di grado massimo (5 o 6) e il coefficiente di determinazione, R^2 . Se R^2 non supera 0.95, i dati vanno scartati. Per la valutazione della fessurazione:

1. *Determinazione del punto di flesso dopo il picco.* Matematicamente, il punto di flesso è ottenuto facendo la derivata seconda dell'equazione polinomiale e ponendola uguale a zero, prendendo il primo valore dopo il picco (La derivata seconda di grado 4 ha 4 soluzioni, per cui si cercherà quella vicina al picco).
2. *Determinazione della pendenza di fragilità, m .* La pendenza (*brittleness slope*) è quella corrispondente al punto di flesso, ed è ricavata tramite la derivata prima dell'equazione polinomiale con ascissa il punto di flesso. Espresso in J/m^3 .
3. *Determinazione della tenacità, T .* La tenacità (o *toughness*) è l'area sottesa dalla curva sforzo-deformazione in un determinato punto di interesse, in questo caso, il punto di flesso. La si ottiene, sempre matematicamente, integrando l'equazione polinomiale dall'inizio del test, dal punto 0, al punto di flesso dopo il picco. Espresso in J/m^3 .
4. *Determinazione del coefficiente di flesso, N_{flex} .* Esso rappresenta un indice del conglomerato che è correlato con la resistenza alla fessurazione e lo si ottiene dalla semplice formula:

$$N_{flex} = \frac{T}{|m|} \quad (4.37)$$

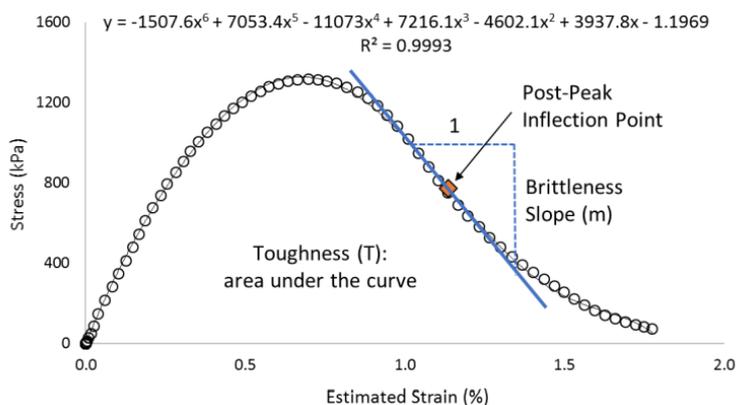


Figura 85. Esempio curva con equazione polinomiale (da AASHTO TP 141-20).



5. Analisi dei risultati

In questo nuovo capitolo, si riportano e si analizzano dei risultati sperimentali, dalle prove effettuate sulla miscela interessata, confrontandola con quella di controllo.

I provini sono stati denominati con la lettera R per la miscela di riferimento, mentre quelli con la lettera F per la miscela con 0.5% fibre. In più, per le prove di fatica, la denominazione H60 si fa riferimento al valore dell'altezza dei campioni cilindrici.

5.1. Materiali (aggregati)

A seguito sono riportati i valori delle proprietà volumetriche di ciascuna classe di aggregati.

5.1.1. Densità delle particelle

Tabella 7. Densità delle particelle di classi di aggregati.

| Classe | $\rho_{p,avg}$ [Mg/m³] |
|-------------------------------|---|
| Polvere | 2.886 |
| 5 | 2.733 |
| 3-8 | 2.870 |
| 5-15 | 2.820 |
| RA | 2.503 |
| RA_{Extracted} | 2.770 |

5.1.2. Granulometria

Tabella 8. Analisi granulometrica delle classi di aggregati.

| D [mm] | Passante (%) | | | | | |
|------------------|---------------------|------------|------------|-------------|-----------|-------------------------------|
| | Polvere | 0-5 | 3-8 | 5-15 | RA | RA_{Extracted} |
| 20 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 16 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 12.5 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 95.7 | 100.0 | 100.0 |
| 10 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 74.5 | 99.6 | 99.8 |
| 8 | 100.0 | 100.0 | 99.7 | 47.3 | 98.8 | 99.0 |
| 4 | 99.9 | 95.1 | 55.8 | 9.3 | 75.4 | 81.3 |
| 2 | 99.7 | 72.9 | 23.8 | 4.0 | 42.9 | 58.1 |
| 0.5 | 70.9 | 32.5 | 2.7 | 1.7 | 8.4 | 27.9 |
| 0.25 | 54.1 | 17.5 | 1.9 | 1.4 | 3.9 | 19.5 |
| 0.063 | 30.4 | 5.1 | 1.5 | 1.0 | 2.0 | 11.0 |

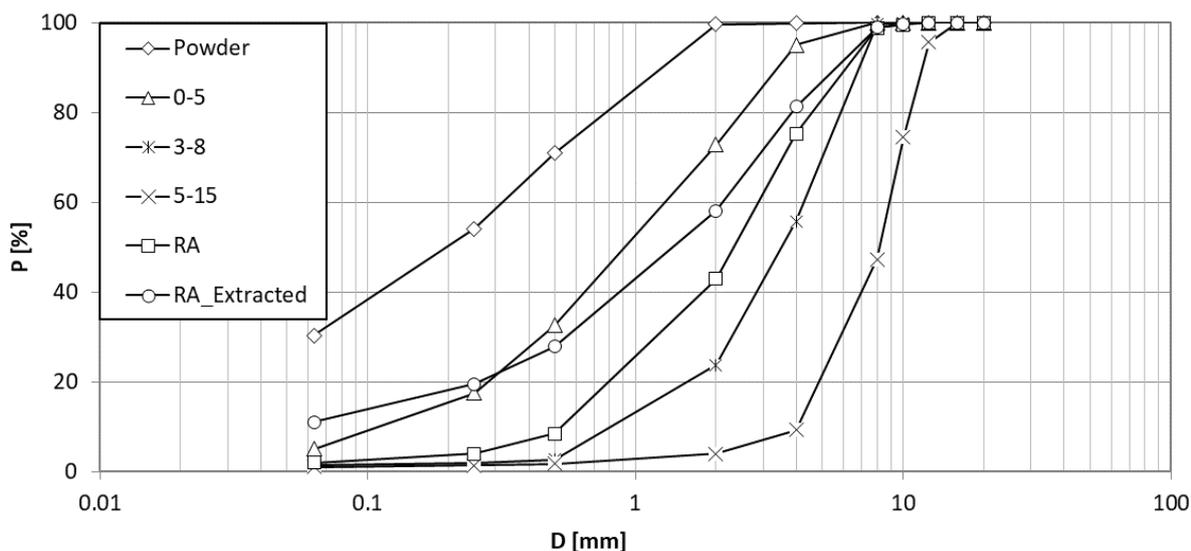


Figura 86. Granulometria di ciascuna classe di aggregati.

Si noti che nell'analisi granulometrica si è studiata anche la classe freato fine dopo ignizione, ottenendo solo aggregati che costituiscono tale materiale (RA_extracted).

5.2. Mix design dei CB

5.2.1. Ottimizzazione AC16

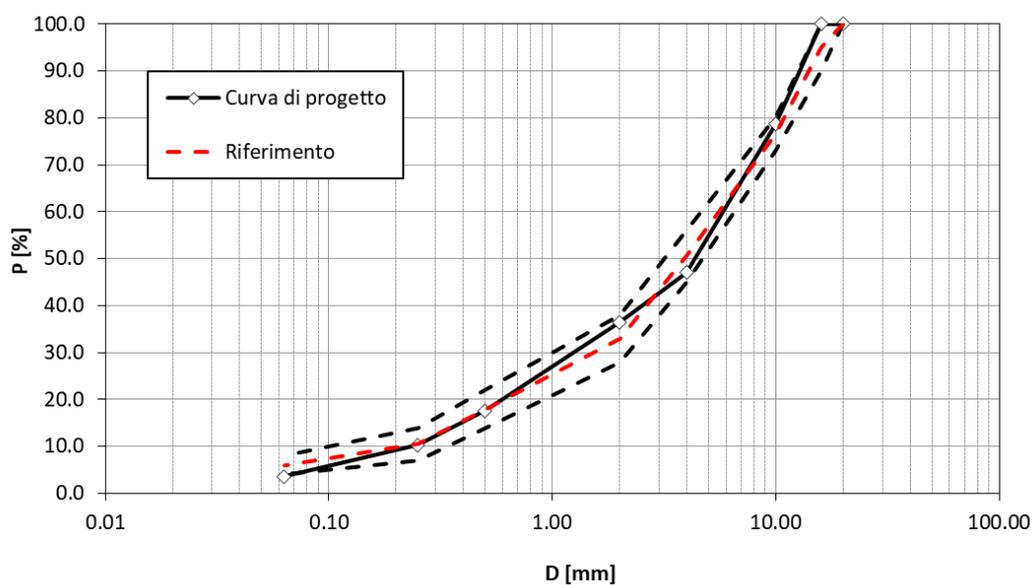


Figura 87. Ottimizzazione strato AC16.

Si noti, dalla **Figura 87**, come la curva di progetto (in nero) si avvicini alla curva di riferimento (in rosso), ottenuto dalla media dei due fusi (in tratteggiato).

5.2.2. Miscelazione manuale

Nel corso del mix design, è stata fatta la miscelazione manuale con certi quantitativi di aggregati. Sono state create tre miscele con contenuto di fibre diversi rispetto alla massa degli aggregati, 1.0%, 0.5% e 0.3%, più una miscela in assenza di fibre, come riferimento. Ciascun CB ha diverso dosaggio di bitume che va da 4.5% a 6.0%, con intervallo di 0.5%.

La tabella sottostante mostra il quantitativo della classe di aggregati inserito nei CB del mix design:

Tabella 9. Percentuale di aggregati nella miscela

| Classe | % |
|----------------|------|
| Polvere | 5.0 |
| 0-5 | 39.0 |
| 5-15 | 56.0 |

5.2.3. Compattazione, volumetria e bitume ottimale

Le miscele sono state compattate a 180 giri per studiare la volumetria, ottenendo campioni cilindrici con altezza minima 70 mm e diametro 100 mm, mediante metodo volumetrico del mix design (**Tabella 3**). In particolare, si riportano i risultati del contenuto di vuoti a 100 giri (10 e 180 giri verranno messi tra allegati):

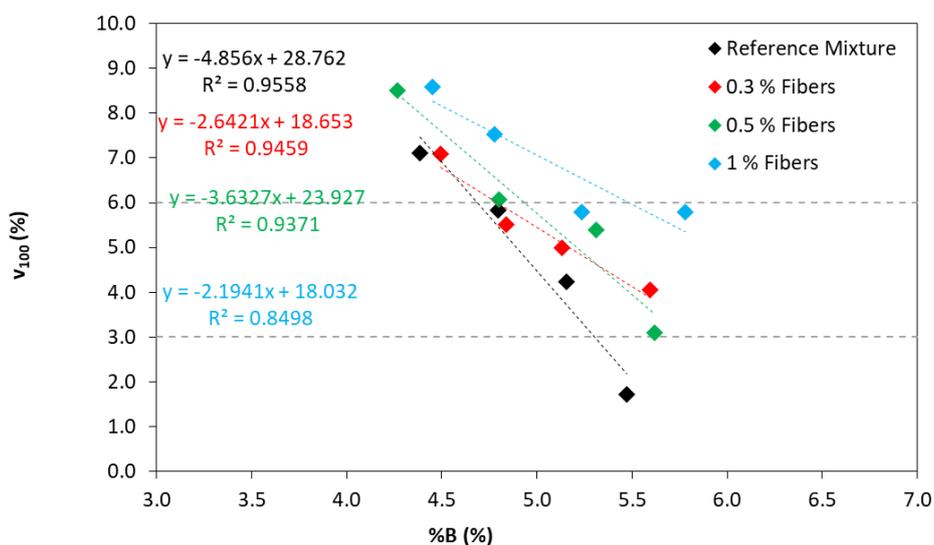


Figura 88. Contenuto di vuoti a 100 giri nel mix design.

Si può notare una certa disomogeneità delle miscele con fibre, probabilmente dovuto alla difficile e non accurata miscelazione manuale, e al fatto che in fase di compattazione il materiale non riusciva più ad addensarsi.

Si riassumono pure i dati sperimentali dalla prova RTI:

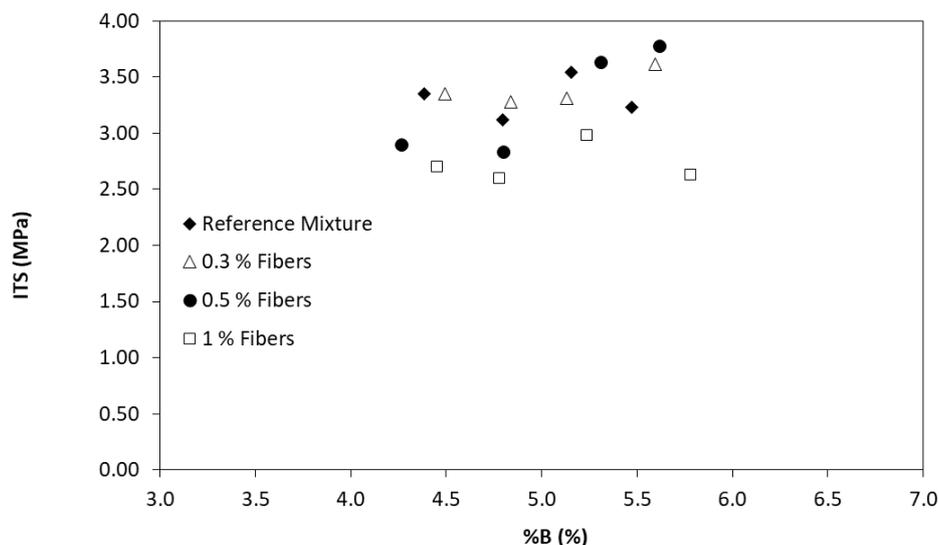


Figura 89. Valori di RTI a 10°C di diverse miscele.

Si prenderà il contenuto di bitume ottimale corrispondente al valore medio dei limiti del contenuto di vuoti a 100 giri, cioè il 4.5%:

Tabella 10. Dosaggio di bitume ottimale

| Miscela | %B |
|-------------------|------------|
| Reference Mixture | 5.0 |
| 1 % Fibers | 6.2 |
| 0.5 % Fibers | 5.3 |
| 0.3 % Fibers | 5.4 |

Dopo il costipamento si è notato un'espansione in altezza del campione cilindrico contenente fibre, c'è stata pure un'espansione diametrale ma è irrilevante.

All'aumentare del contenuto di fibre, durante il costipamento, il materiale, ad un certo punto, non riusciva più ad addensarsi nonostante l'aumento del dosaggio del legante, si è deciso di trascurare la miscela con 1% di fibre. Tra gli altri due contenuti, si è scelto il 0.5%, rispetto agli aggregati, per massimizzare la dose. Pertanto, ad esso corrisponde 5.3% di contenuto di bitume ottimale, mentre per la miscela di riferimento, si adotterà 5.0% B_{opt} .

5.3. Miscelazione, compattazione e volumetria

Per la miscelazione meccanica, con lo scopo di ottenere quantità maggiori di CB e di eseguire diverse compattazioni di campioni con dimensioni differenti, si è scelti di adottare 60 kg per miscela rispetto agli aggregati.

Nella seguente tabella si riscrive i dati di dosaggio.

Tabella 11. Dosaggio di materiali per la miscelazione.

| Materiale (-) | Miscela di riferimento | | Miscela con fibre | |
|------------------|------------------------|------|-------------------|------|
| | (%) | (kg) | (%) | (kg) |
| 5-15 | 56.0 | 33.6 | 56.0 | 33.6 |
| 0-5 | 39.0 | 23.4 | 39.0 | 23.4 |
| Polvere | 5.0 | 3.0 | 5.0 | 3.0 |
| Fibre | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.3 |
| Bitume | 5.0 | 3.0 | 5.3 | 3.2 |
| Miscela | - | 63.0 | - | 63.5 |

5.3.1. Composizione

Granulometria

Dai pacchetti bituminosi sono stati prelevati dei campioni per la composizione, cioè il contenuto di legante, la curva granulometrica e la MMTV per ciascuna miscela:

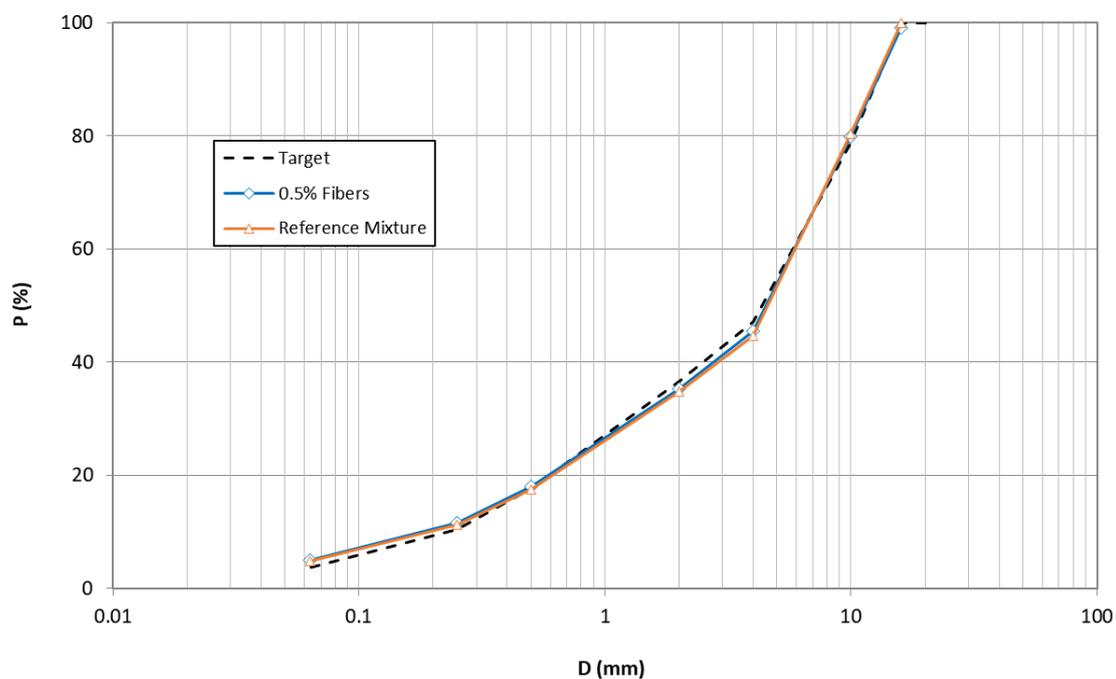


Figura 90. Analisi granulometrica delle due miscele. Riferimento e 0.5% Fibre.

Entrambe le miscele presentano un assortimento granulometrico vicino alla curva di progetto, con un piccolo scostamento nella parte centrale e in quella fine.

Contenuto di bitume e MMVT

Tramite ignizione e metodo dei picnometri sono stati ottenuti rispettivamente il contenuto di legante e la massima massa volumica teorica (MMVT):

Tabella 12. Composizione delle miscele. Riferimento e 0.5% Fibre.

| Miscela | B _{mix} (%) | B _{agg} (%) | MMVT (Mg/m ³) |
|-------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Riferimento | 4.5 | 4.8 | 2.527 |
| 0.5% Fibre | 4.8 | 5.0 | 2.514 |

La MMVT della miscela con fibre è inferiore rispetto a quella di riferimento dovuto alla presenza di fibre che non sono state fuse e che di conseguenza svolgono il ruolo di aggregati.

Nonostante entrambi i conglomerati presentano un contenuto di bitume inferiore, rientrano nei limiti riferiti allo strato di binder AC16 dalla **Tabella 1**.

5.3.2. Compattazione e volumetria

Sono stati realizzati dapprima due campioni cilindrici per miscela, con l'obiettivo studiare la percentuale dei vuoti (come media):

Tabella 13. Volumetria delle due miscele.

| Miscela | V ₁₀₀ (%) |
|-------------|-------------------------|
| Riferimento | 4.0 |
| 0.5% Fibre | 3.9 |

Per ottenere un certo numero di campioni per le prove meccaniche, si è deciso di compattare i due materiali puntando alla percentuale di vuoti del 4%.

5.4. Modulo di rigidezza IT-CY

Da 6 campioni per miscela si mostrano i moduli di rigidezza medi dalla prova IT-CY a tre diverse temperature, 10°C, 20°C e 30°C.

Tabella 14. Valore medio del modulo di rigidezza dei campioni con diverso contenuto di vuoti a tre temperature.

| | | Temperatura (°C) | | 10 | | 20 | | 30 | |
|----------------|-------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|--|
| | | Target strain (µm) | | 5.0 | | 7.5 | | 9.0 | |
| ID | v (%) | v _{medio} (%) | E ₁₀ (MPa) | E _{10,avg} (MPa) | E ₂₀ (MPa) | E _{20,avg} (MPa) | E ₃₀ (MPa) | E _{30,avg} (MPa) | |
| R_1_H60 | 4.62 | | 11424 | | 6332 | | 2645 | | |
| R_2_H60 | 3.70 | | 13558 | | 7456 | | 3094 | | |
| R_G_100 | 3.78 | 4.11 | 11904 | 13302 | 6897 | 6823 | 2712 | 2959 | |
| R_3_H60 | 4.53 | | 14702 | | 6687 | | 2960 | | |
| R_4_H60 | 3.87 | | 13519 | | 6928 | | 3123 | | |
| R_5_H60 | 4.16 | | 14702 | | 6635 | | 3220 | | |
| F_1_H60 | 3.50 | | 11905 | | 5695 | | 2304 | | |
| F_2_H60 | 3.87 | | 13217 | | 6338 | | 2586 | | |
| F_3_H60 | 2.68 | | 14239 | | 7285 | | 3114 | | |
| F_4_H60 | 4.24 | 3.95 | 11943 | 12389 | 5249 | 5823 | 2242 | 2386 | |
| F_5_H60 | 4.05 | | 13499 | | 6247 | | 2422 | | |
| F_6_H60 | 3.85 | | 12461 | | 5799 | | 2509 | | |
| F_7_H60 | 4.16 | | 11310 | | 5608 | | 2251 | | |

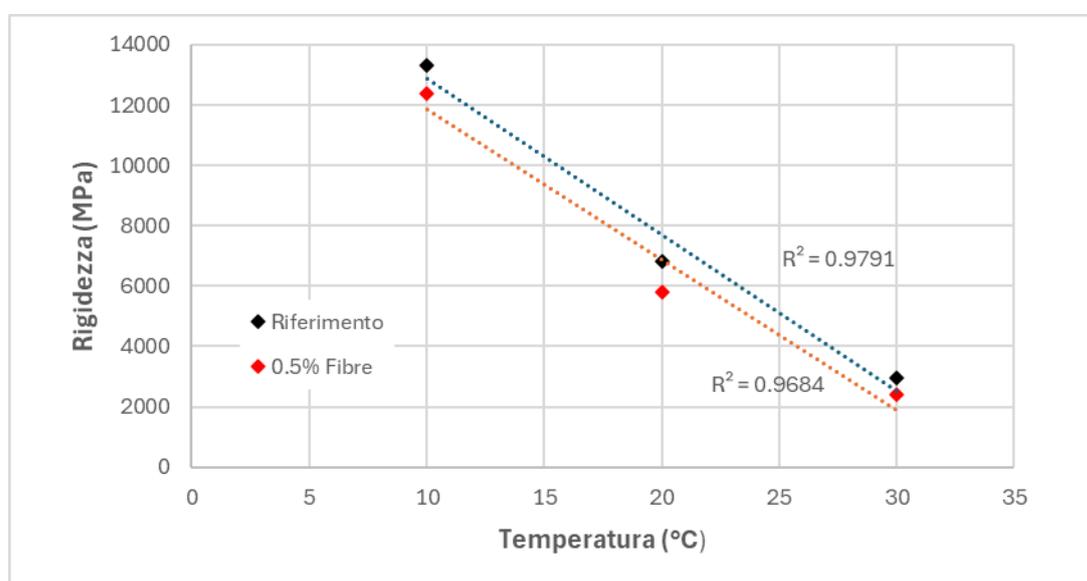


Figura 91. Risultati sperimentali. Modulo di rigidezza medio in funzione della temperatura.

Si noti come il modulo decresce all'aumentare della temperatura per entrambe le miscele, come ci si aspetta, con una diminuzione intorno all'80% rispetto al valore a 10°C.

Tuttavia, per una certa temperatura, le due miscele, con vuoti simili (differenza del 0.2%), mostrano rigidezze differenti, con variazioni che vanno dal 5 al 15% circa.

5.5. Resistenza a fatica CIT-CY

Conoscendo i moduli di rigidezza per ogni campione, è possibile calcolare i valori di sforzo, come input, per le prove cicliche a trazione indiretta, alla temperatura di 10°C. Il criterio di rottura applicato è quello energetico considerando come cicli a rottura il valore massimo di ER.

Si riportano i grafici delle curve di fatica, le loro equazioni e i coefficienti di correlazione R^2 , l'ampiezza di deformazione ε^6 (μm) corrispondente a 10^6 cicli a rottura per il criterio energetico, i parametri di regressione k_ε e n_ε (parametri dipendenti dal materiale).

Tabella 15. Prova di fatica CIT-CY. Numero di giri a rottura della miscela di riferimento (R) applicando il criterio energetico.

| ID | σ_0 | ε_a | $\Delta\varepsilon$ | N_f |
|----------|------------|-----------------|---------------------|--------|
| | (kPa) | (mm/m) | (mm/m) | (-) |
| R_2_H60 | 580 | 75 | 151 | 5504 |
| R_1_G100 | 400 | 49 | 98 | 31720 |
| R_3_H60 | 300 | 38 | 77 | 123738 |
| R_4_H60 | 650 | 92 | 184 | 2184 |
| R_5_H60 | 250 | 31 | 62 | 352485 |

Tabella 16. Prova di fatica CIT-CY. Numero di giri a rottura della miscela con 0.5% fibre (F) applicando il criterio energetico.

| ID | σ_0 | ε_a | $\Delta\varepsilon$ | N_f |
|---------|------------|-----------------|---------------------|--------|
| | (kPa) | (mm/m) | (mm/m) | (-) |
| F_2_H60 | 570 | 91 | 182 | 2094 |
| F_3_H60 | 450 | 65 | 130 | 18674 |
| F_4_H60 | 200 | 37 | 74 | 393333 |
| F_5_H60 | 500 | 83 | 166 | 5736 |
| F_6_H60 | 270 | 42 | 84 | 139826 |
| F_7_H60 | 300 | 46 | 91 | 60064 |

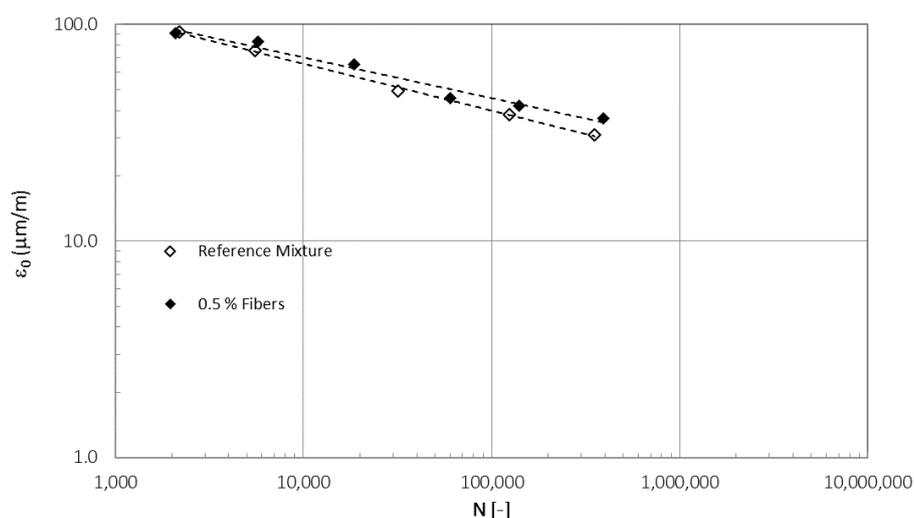


Figura 92. Curva di fatica delle due miscele con il criterio energetico.

Tabella 17. Dati sperimentali dalla prova di fatica CIT-CY. Equazione, coefficiente di correlazione, parametri di regressione ed ε^6 .

| Miscela | v (%) | Equazione | R ² (-) | k _ε | n _ε |
|---------|-------|---|--------------------|----------------|----------------|
| R | 4.1 | $2.447 \cdot 10^{12} \left(\frac{1}{\Delta\varepsilon}\right)^{-4.616}$ | 0.9979 | 2.447E+12 | -4.616 |
| F | 4.0 | $3.840 \cdot 10^{13} \left(\frac{1}{\Delta\varepsilon}\right)^{-5.184}$ | 0.9751 | 3.840E+13 | -5.184 |

Durante il test si è osservato un andamento più o meno costante ai primi cicli di carico ad eccezione a bassi valori di sforzo che determinavano oscillazioni del modulo di rigidezza (come mostrato in allegato). Si è vista, poi, una progressiva diminuzione dapprima lenta e poi accelerata una volta raggiunto, generalmente, il 50% del modulo iniziale.

Dalla **Figura 92**, i punti sono ben allineati con coefficienti di correlazione R^2 superiori a 0.95, il che dimostra che ciascun materiale è omogeneo.

Si considera il parametro ε^6 , tipicamente usato in letteratura per confrontare i comportamenti a fatica dei materiali. Dall'applicazione dei coefficienti dipendenti dal materiale, k_ε e n_ε , si ricava la deformazione corrispondente al numero di cicli a rottura pari a 10^6 : si può evidenziare che la miscela con le fibre mostra un aumento della resistenza a fatica del 20%, circa, rispetto al valore di quella di riferimento.



Figura 93. Rottura per fatica, confronto tra miscela di riferimento (a destra) e miscela con 0.5% fibre (a sinistra).



Figura 94. Vista dall'alto dei campioni. Fibre sotto, Rif sopra.



Figura 95. Vista da vicino. Fibre nel campione rotto dopo il test di fatica.

Ad occhio, si può notare, dalle figure sopra, che la propagazione della fessura è più o meno simile con quella di riferimento. Tuttavia, si potrebbe pensare che la presenza delle fibre e la loro posizione, come mostrato in **Figura 89.**, siano in grado di rallentare la fessurazione per fatica, in quanto queste cercherebbero di tenere integra la miscela. Sono necessari ulteriori studi sul comportamento delle fibre monofilamento.

5.6. SCB

Riguardante la resistenza alla fessurazione, sono stati analizzati i valori della tenacità a rottura e di energia, su campioni semicircolari soggetti a flessione su 3 punti, per una velocità di deformazione di 0.5 mm/min (per 5 mm/min e 1 mm/min sono riportati nella sezione allegati).

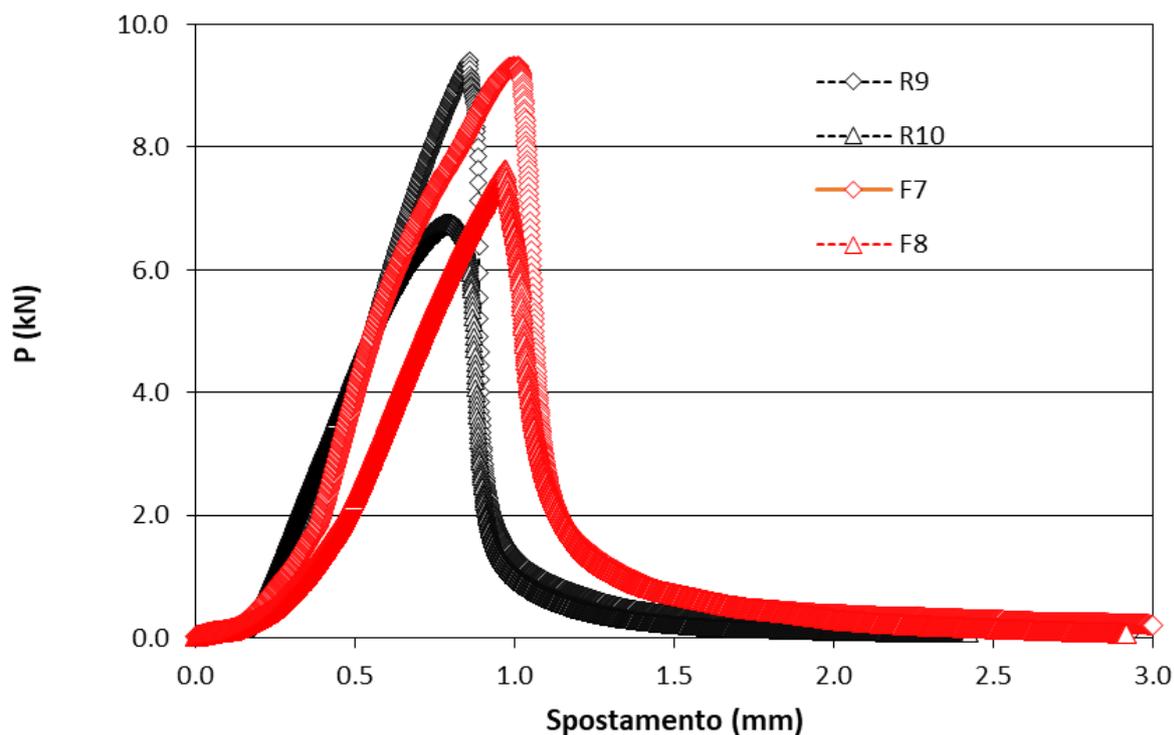


Figura 96. Prova SCB. Diagramma forza-spostamento dei due campioni SC per miscela.

Tabella 18. Valori medi di tenacità a rottura K_{Ic} e U della miscela di riferimento.

| ID | ν (%) | F_{max} (kN) | ΔW_i (mm) | $\epsilon_{max,i}$ (%) | $\sigma_{max,i}$ (MPa) | K_{Ic} (N/mm ^{1.5}) | U (J) |
|--------------------|--------------|-------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|------------|
| R9 | 3.49 | 9.415 | 0.858 | 1.1 | 1.3 | 33.9 | 3.09 |
| R10 | 3.18 | 6.768 | 0.790 | 1.1 | 0.9 | 24.4 | 2.47 |
| Valori medi | 3.34 | 8.0915 | 0.824 | 1.1 | 1.1 | 29.2 | 2.78 |

Tabella 19. Valori medi di tenacità a rottura K_{Ic} e U della miscela con 0.5% fibre.

| ID | ν (%) | F_{max} (kN) | ΔW_i (mm) | $\epsilon_{max,i}$ (%) | $\sigma_{max,i}$ (MPa) | K_{Ic} (N/mm ^{1.5}) | U (J) |
|--------------------|--------------|-------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|------------|
| F7 | 3.36 | 9.316 | 0.996 | 1.3 | 1.2 | 32.8 | 4.11 |
| F8 | 3.41 | 7.626 | 0.971 | 1.3 | 1.0 | 25.6 | 2.81 |
| Valori medi | 3.39 | 8.471 | 0.983 | 1.3 | 1.1 | 29.2 | 3.86 |

Tabella 20. Riassunto risultati da SCB.

| Miscela | v (%) | K_{Ic} ($N/mm^{1.5}$) | U (J) |
|---------|------------|------------------------------|------------|
| R | 3.34 | 29.2 | 2.78 |
| F | 3.39 | 29.2 | 3.86 |

Nel corso della prova si è osservato che la presenza di fibre rallenta la propagazione delle fessure.

Dal punto di vista analitico, non si evidenzia alcun cambiamento tra le due miscele sulla tenacità a rottura, K_{Ic} . Graficamente, le curve presentano andamenti che sembrano abbastanza differenti, per cui si è cercato di valutare il comportamento dal punto di vista energetico.

Considerando in dettaglio l'approccio energetico, come da normativa americana AASHTO, i campioni SC con fibre effettivamente mostrano un incremento di energia di circa il 40%.



Figura 97. Campioni SC con fibre, dopo la rottura a flessione.



Figura 98. SCB. Riferimento sopra e fibre sotto.



Figura 99. Sopra: Rottura del provino con fibre. Sotto: Vista da vicino. Fibre all'interno del campione F7 SCB dopo la frattura.

Come per la fatica, l'andamento della fessura per SCB delle miscele con fibre, a partire dall'intaglio alla base, è simile a quello di riferimento, ma con minore velocità di propagazione della cricca, per lo stesso motivo spiegato nella fatica.

5.7. Resistenza a trazione indiretta RTI ed indice N_{flex} .

Si è studiato anche il comportamento del materiale sottoposto alla prova di trazione indiretta alla temperatura di prova di 10°C.

In seguito, i risultati.

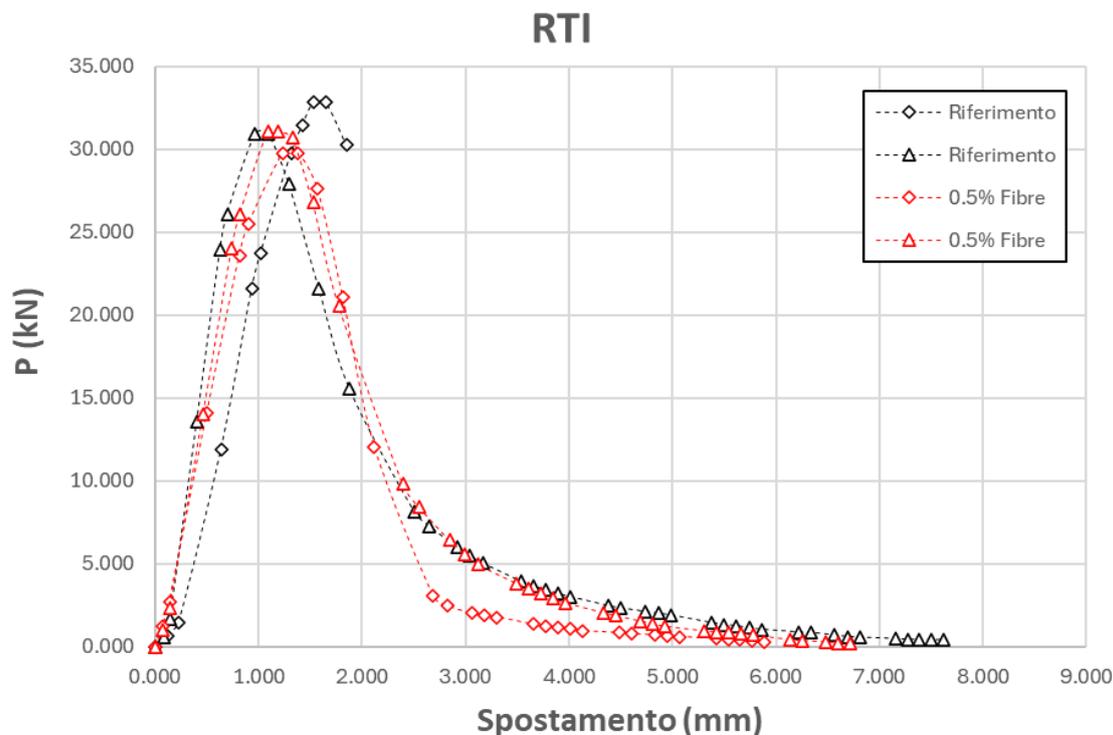


Figura 100. Curve RTI delle due miscele.

Tabella 21. Risultati RTI di due miscele.

| Miscela | v (%) | P_{max} (kN) | S_{max} (mm) | RTI (MPa) |
|---------|-------|----------------|----------------|-----------|
| R_6 | 3.7 | 33.966 | 1.530 | 3.59 |
| R_7 | 3.2 | 32.078 | 0.862 | 3.39 |
| F_8 | 4.1 | 30.624 | 1.109 | 3.22 |
| F_9 | 4.2 | 31.960 | 1.088 | 3.35 |

Si può osservare che la RTI diminuisce con le fibre, però c'è da tener conto che i contenuti di vuoti sono diversi, per cui bisogna indagare con vuoti simili.

Come in letteratura, si studia anche un altro parametro sintetico che è un indice della resistenza a trazione indiretta, detto *indice di flessione*, N_{flex} , per considerare come resistenza a rottura:

Tabella 22. Risultati di indice di flesso delle due miscele.

| Miscela | m (J/m ³) | T (J/m ³) | N_{flex} (-) |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| R_6 | - | - | - |
| R_7 | -10339 | 867 | 0.08 |
| F_8 | -8475 | 1525 | 0.18 |
| F_9 | -7882 | 1353 | 0.17 |

Tramite i dati della prova RTI, si vede come l'indice di trazione indiretta, o di flesso, della miscela contenente fibre aumenta rispetto a quella di riferimento. Si è trascurato il campione di riferimento R_6 poiché non era possibile prevedere una curva polinomiale di grado massimo, cioè manca il punto di flesso dopo il picco (arriva subito a rottura).



6. Conclusioni

La presente indagine riguarda lo studio del comportamento a fatica del conglomerato bituminoso contenente fibre da corde da tennis esauste, facendo paragone con una miscela di controllo, in assenza di fibre.

A tale scopo, si è partito con la fase preliminare, sulla caratterizzazione dei materiali costituenti la miscela bituminosa, quali aggregati e fibre (il bitume è stato caratterizzato come 50/70 da Iplom Busalla).

È stata fatta l'osservazione sperimentale sulle fibre tramite il loro comportamento termico: sono materiali in poliestere con una elevata temperatura di fusione (circa 275°C); infatti, rimanevano intatti e non subivano processi di rammollimento alle temperature di miscelazione e compattazione. Di conseguenza, sono state utilizzate fibre, non come modificante del legante bituminoso, ma come aggregati all'interno della miscela. In più, in base alla letteratura, le corde sono state tagliate ottenendo una lunghezza media di 1 cm (comunque inferiore a 2 cm).

Riguardante gli aggregati, sono stati raccolti dall'impianto Brillada (Borgaro Torinese – TO) diverse classi di aggregati che successivamente sono stati testati in laboratorio per determinare la densità delle particelle e l'assortimento granulometrico.

È stato eseguito il mix design dei CB applicando l'approccio volumetrico. Sono stati miscelati, mediante metodo dry, conglomerati con diverso dosaggio di bitume e fibre con un totale di 16 miscele (4 miscele e 4 dosi di B), con l'obiettivo di ottenere il bitume ottimale per le prove meccaniche. Nel corso del mix design, tramite compattazione sono stati creati campioni cilindrici per determinare la composizione, volumetria e la resistenza a trazione indiretta (RTI).

Una volta ottenuto i dati del mix design, sono state create miscele di grande quantità (60 kg di massa rispetto agli aggregati) che sono state compattate realizzando campioni cilindrici di diverse dimensioni, previa determinazione di composizione e volumetria.

Per le prove di modulo di rigidezza e di fatica, sono stati ottenuti 6 campioni cilindrici di diametro 100 mm ed altezza minima 60 mm. Per SCB test, sono stati creati campioni anch'essi cilindrici ma con diametro maggiore, 150 mm, e diversa altezza, con l'intento di ottenere sottocampioni semicircolari di spessore desiderato, attraverso la lama dentata.

Riassumendo ciò che è stato emerso dall'indagine sperimentale:

- Le fibre da corde da tennis esauste hanno una temperatura di fusione elevata, non si rammolliscono alla temperatura di miscelazione e compattazione, per cui queste possono essere trattate come aggregati nel CB.
- All'aumentare del contenuto di fibre, l'addensamento è via via più difficile.
- La presenza di fibre provoca un'espansione in altezza del campione cilindrico, ed un'espansione trascurabile in diametro.
- La MMVT diminuisce a causa della presenza delle corde come frazione di aggregati.
- Il modulo di rigidezza, calcolato a diverse temperature, diminuisce del 5-15%, avendo vuoti medi simili.
- La resistenza a fatica aumenta del 30%, circa.

- La resistenza alla fessurazione, dalla prova SCB, caratterizzata dal valore K_{IC} rimane invariata, ma considerando l'approccio energetico, come in letteratura, si nota un aumento in termini di energia.
- La propagazione della fessura dei campioni semicircolari con fibre è più lenta a partire dall'intaglio al centro del diametro.
- RTI diminuisce, ma con vuoti diversi (circa 1% di differenza). Bisognerebbe fare medesime prove con vuoti simili.
- Il parametro N_{flex} , che caratterizza la resistenza alla fessurazione come da letteratura, è incrementato.

Raccomandazioni:

- Avere certezze sulla composizione e morfologia delle corde monofilamento tramite osservazione microscopica.
- Testare le due miscele con stesso contenuto di vuoti per eliminare l'effetto della variazione dei vuoti sull'analisi del modulo di rigidezza, della fatica e della fessurazione.
- Eseguire altri test di fatica a temperature più alte, data la forte dipendenza del CB alla temperatura.
- Effettuare altri test di fatica come, ad esempio, quello di flessione su 4 punti per avere maggiori informazioni su tale comportamento.
- Vi è una grande varietà di parametri per definire la resistenza alla fessurazione nelle prove SCB, quali il contenuto di vuoti, la geometria del campione, la dimensione dell'intaglio del provino, la temperatura, la velocità di deformazione.... È necessario testare campioni con simili caratteristiche per avere dati più precisi.
- Studiare ulteriori comportamenti dei CB contenenti fibre di fronte alle deformazioni permanenti o ormaiamento, e alla rottura di origine termica.

Bibliografia e sitografia

Infrastructure Australia. *Replacement Materials. Understanding the market for replacement materials across major infrastructure road projects.*

Jianmin Ma, Simon A.M. Hesp. *Construction and Building Materials, CBM (2022). Effect of recycled polyethylene terephthalate (PET) fiber on the fracture resistance of asphalt mixtures.*

Pasetto, M.; Baliello, A; Pasquini, E; Poulidakos, L. Dry Addition of Recycled Waste Polyethylene in Asphalt Mixtures: A Laboratory Study. *Materials 2022, 15, 4739.* <https://doi.org/10.3390/ma15144739>

Ballester-Ramos, M; Miera-Dominguez, H; Lastra-González, P.; Castro-Fresno, D. Second Life for Plastic Fibre Waste Difficult to Recover: Partial Replacement of the Binder in Asphalt Concrete Mixtures by Dry Incorporation. *Materials 2023, 16, 948.* <https://doi.org/10.3390/ma16030948>

National Academies. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). *Fiber Additives in Asphalt Mixtures (2015).* <http://nap.nationalacademies.org/22191>

National Academies. *Recycled Plastics in Infrastructure: Current Practices, Understanding, and Opportunities (2023).* <http://nap.nationalacademies.org/27172>

Alnadish, A.M.; Singh, N.S.S.; Alawag, A.M. Applications of Synthetic, Natural, and Waste Fibers in Asphalt Mixtures: A Citation-Based Review. *Polymers 2023, 15, 1004.* <https://doi.org/10.3390/polym15041004>

L.D. Poulidakos et al. *RILEM interlaboratory study on the mechanical properties of asphalt mixtures modified with polyethylene waste.*

M. Tušar et al. *RILEM TC 279 WMR round robin study on waste polyethylene modified bituminous binders: advantages and challenges.*

Anoushka Ghosh. Conference of Singapore. *The Plausibility of Recycling Used Tennis Strings As 3D Printing Filament.*

R.C. West et al. *Relationships between simple asphalt mixture cracking tests using N_{design} specimens and fatigue cracking at FHWA's accelerated loading facility.* <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389083>

Tennis string construction. <https://www.forbes.com/sites/timnewcomb/2022/12/05/understanding-tennis-string-construction-and-why-it-matters/?sh=569ffdbf214a>

Tennis-warehouse https://www.tennis-warehouse.com/learning_center/gear_guides/tennis_string/material_gauge_tension_explained.html

Runrepeat <https://runrepeat.com/tennis-equipment-statistics>

Racketpedia. Corde da tennis. <https://www.racketpedia.com/it-IT/corde-da-tennis>

Tennis player in the world [How Many People Play Tennis in the World? | 2024 Report \(tennisracketball.com\)](https://www.tennisracketball.com)

Wilson [How to Choose a Tennis String | Wilson Sporting Goods](https://www.wilson.com/tennis)

Tennis corner [Scelta delle corde - TENNIS CORNER \(tenniscorner.com\)](https://www.tenniscorner.com)

Tennisplanet.uk <https://www.tennisplanet.co.uk/stringing/tennis-string-thickness>

Tennisplanet.uk <https://www.tennisplanet.co.uk/stringing/lifespan-of-a-tennis-string>

Tennisplanet.uk [Types of Tennis Strings | Tennisplanet.co.uk](https://www.tennisplanet.co.uk/stringing/types-of-tennis-strings)

The British Standard Institution (2022). *BS EN 1097-6:2022 Tests for mechanical and physical properties of aggregates Part 6: Determination of particle density and water absorption.*

The British Standard Institution (2012). *BS EN 933-1:2012 Test for geometrical properties of aggregates Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method.*

The British Standard Institution (2020). *BS EN 12697-28:2020 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 28: Preparation of samples for determining binder content, water content and grading.*

The British Standard Institution (2015+A1). *BS EN 12697-2:2015+A1:2019 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 2: Determination of particle size distribution.*

The British Standard Institution (2016). *BS EN 12697-35:2016 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 35: Laboratory Mixing.*

The British Standard Institution (2020). *BS EN 12697-39:2020 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 39: Binder content by ignition.*

The British Standard Institution (2018). *BS EN 12697-5:2018 Bituminous mixtures – Test methods Part 5: Determination of the maximum density.*

American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO Designation R 30-22 Standard Practice for Laboratory Conditioning of Asphalt Mixtures.*

The British Standard Institution (2019). *BS EN 12697-31:2019 Bituminous mixtures – Test methods Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor.*

The British Standard Institution (2020). *BS EN 12697-6:2020 Bituminous mixtures – Test methods Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.*

The British Standard Institution (2017). *BS EN 12697-23:2017 Bituminous mixtures – Test methods Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.*

The British Standard Institution (2018). *BS EN 12697-26:2018 Bituminous mixtures – Test methods Part 26: Stiffness.*

The British Standard Institution (2018). *BS EN 12697-24:2018 Bituminous mixtures – Test methods Part 24: Resistance to fatigue.*

The British Standard Institution (2019). *BS EN 12697-44:2019 Bituminous mixtures – Test methods Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test.*

American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO Designation T 394-22 Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB).*

American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO Designation TP 141-20 Standard Method of Test for Determining the Indirect Tensile N_{flex} Factor to Assess the Cracking Resistance of Asphalt Mixtures.*



Allegati

A. Mix design

Tabella 23. Curva di progetto dello strato AC16.

| D [mm] | Passante [%] | | | |
|-----------|--------------|-------|-------|--------|
| | Powder | 0-5 | 5-15 | Design |
| 20 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 16 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 10 | 100.0 | 100.0 | 61.9 | 78.6 |
| 4 | 99.9 | 93.7 | 10.0 | 47.0 |
| 2 | 99.7 | 70.9 | 7.1 | 36.5 |
| 0.5 | 68.0 | 31.2 | 3.8 | 17.6 |
| 0.25 | 51.3 | 15.8 | 3.0 | 10.3 |
| 0.063 | 28.3 | 3.0 | 1.8 | 3.6 |

Tabella 24. Dosaggio di bitume per ogni miscela e MMVT.

| | Bitumen dosage | ρ_{mv} |
|-----------|----------------|----------------------|
| | (%) | (Mg/m ³) |
| Reference | 4.39 | 2.585 |
| | 4.79 | 2.555 |
| | 5.15 | 2.547 |
| | 5.47 | 2.512 |
| 1.0%F | 4.45 | 2.548 |
| | 4.78 | 2.530 |
| | 5.24 | 2.507 |
| | 5.78 | 2.494 |
| 0.5%F | 4.27 | 2.572 |
| | 4.80 | 2.538 |
| | 5.31 | 2.533 |
| | 5.62 | 2.514 |
| 0.3%F | 4.49 | 2.572 |
| | 4.84 | 2.551 |
| | 5.13 | 2.532 |
| | 5.59 | 2.514 |

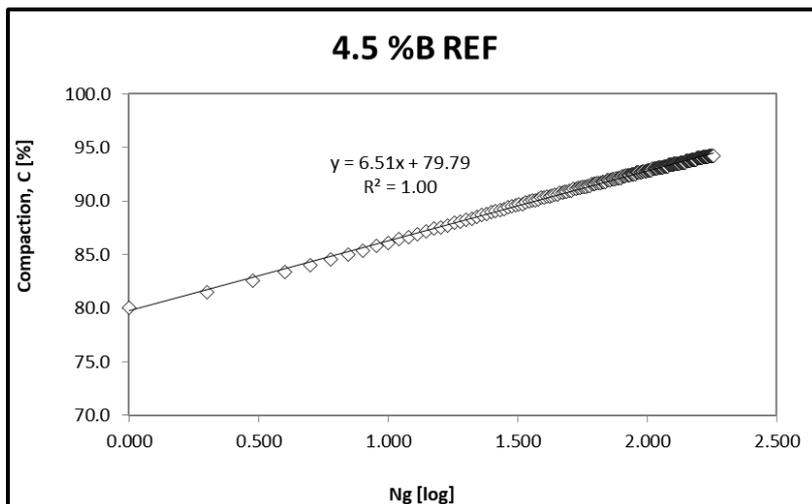


Figura 101. Lavorabilità della miscela di riferimento con 4.5%B.

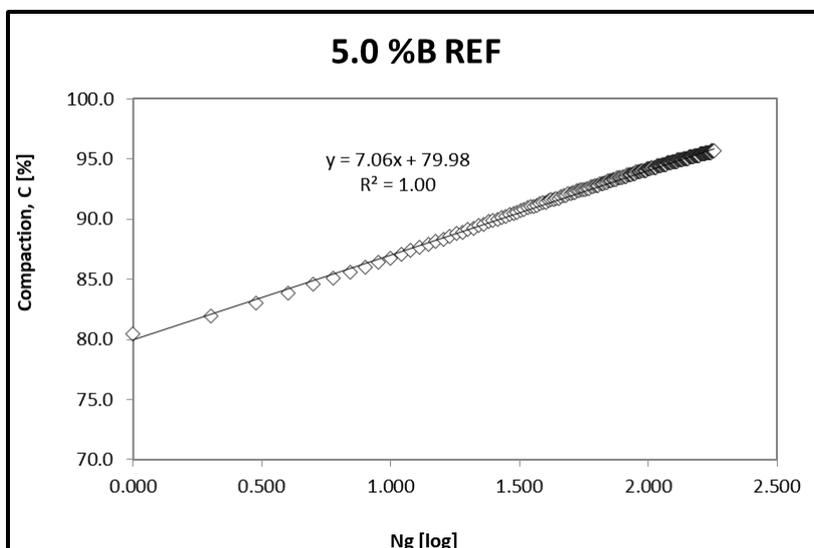


Figura 102. Lavorabilità della miscela di riferimento con 5.0%B.

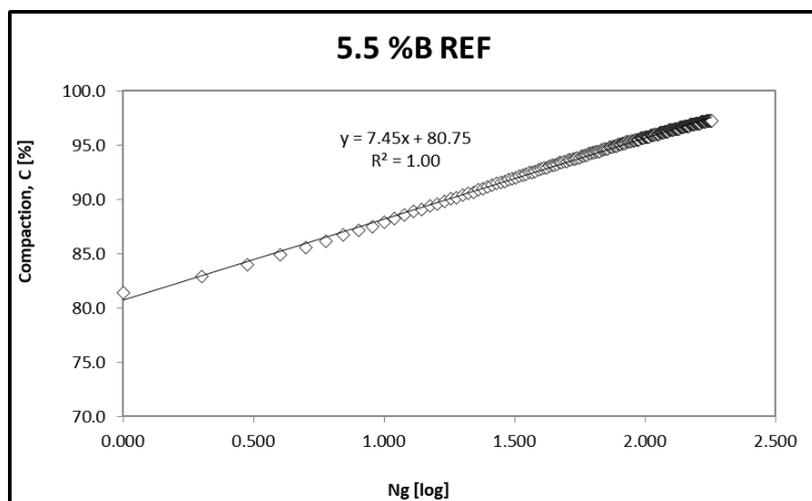


Figura 103. Lavorabilità della miscela di riferimento con 5.5%B.

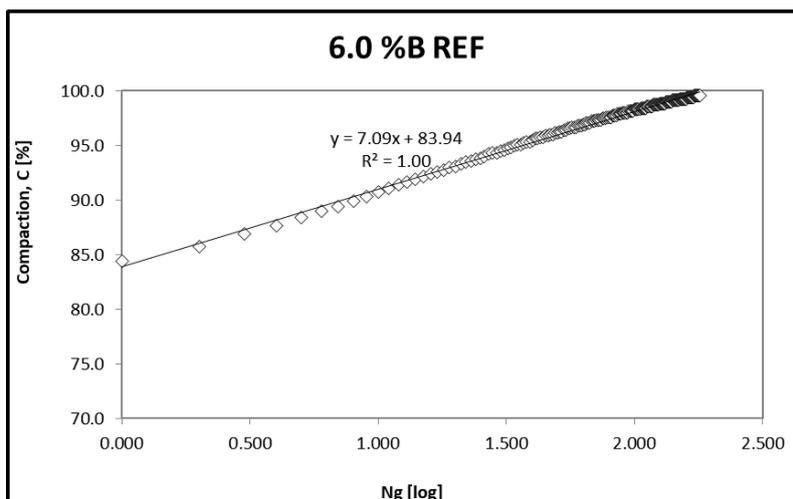


Figura 104. Lavorabilità della miscela di riferimento con 6.0%B.

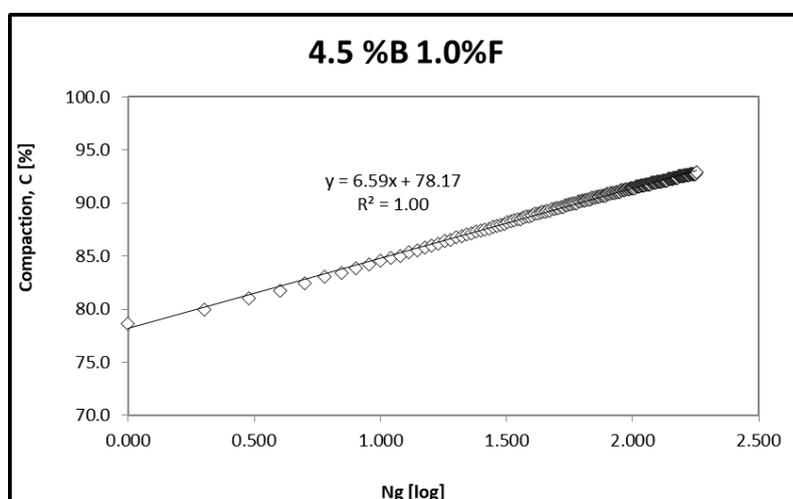


Figura 105. Lavorabilità della miscela 1.0% Fibre con 4.5%B.

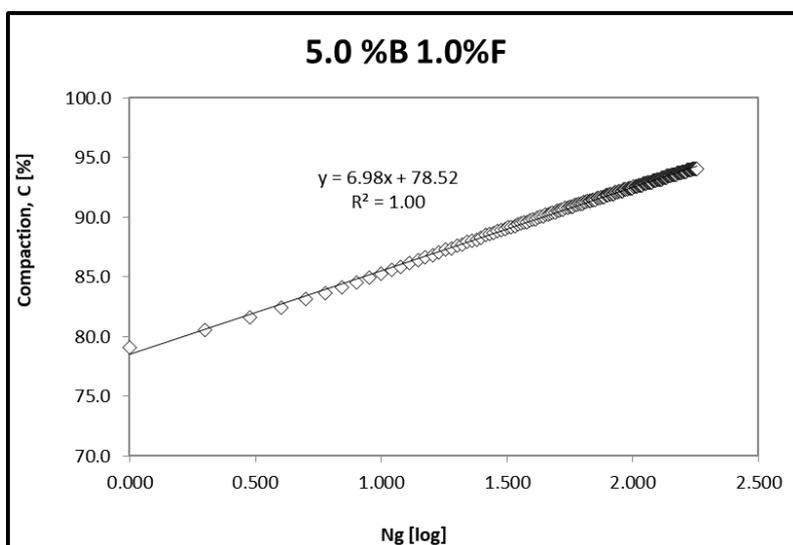


Figura 106. Lavorabilità della miscela 1.0% Fibre con 5.0%B.

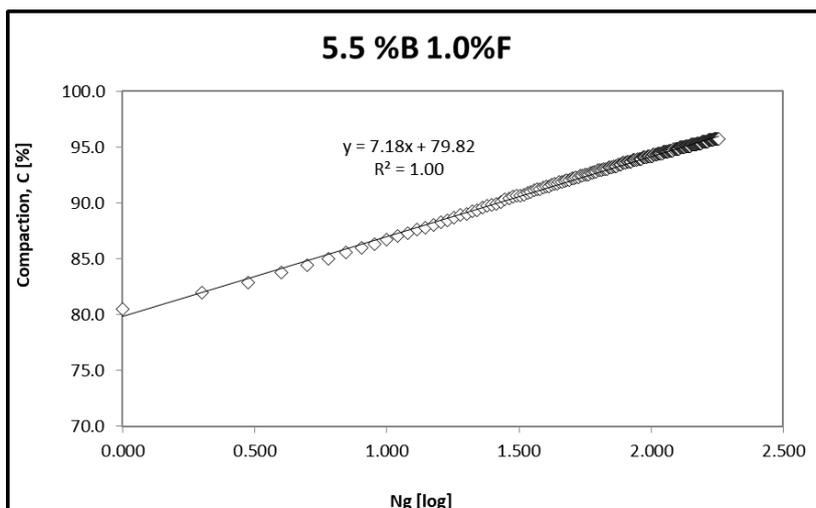


Figura 107. Lavorabilità della miscela 1.0% Fibre con 5.5%B.

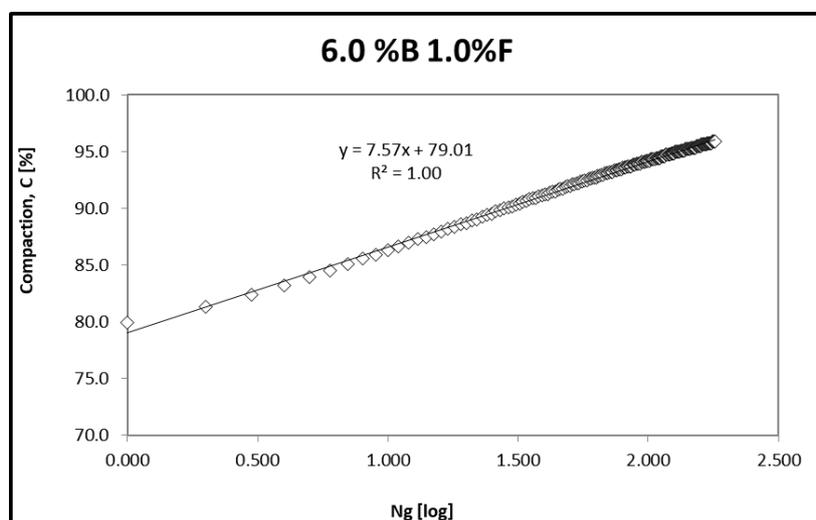


Figura 108. Lavorabilità della miscela 1.0% Fibre con 6.0%B.

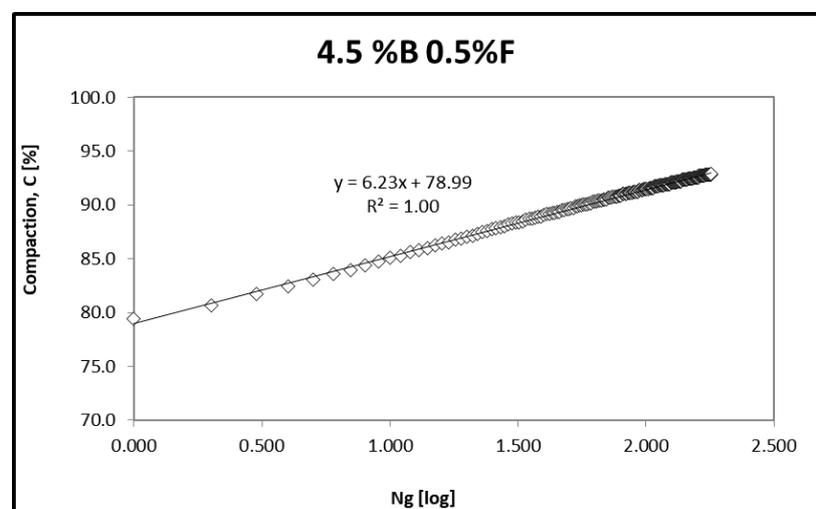


Figura 109. Lavorabilità della miscela 0.5% Fibre con 4.5%B.

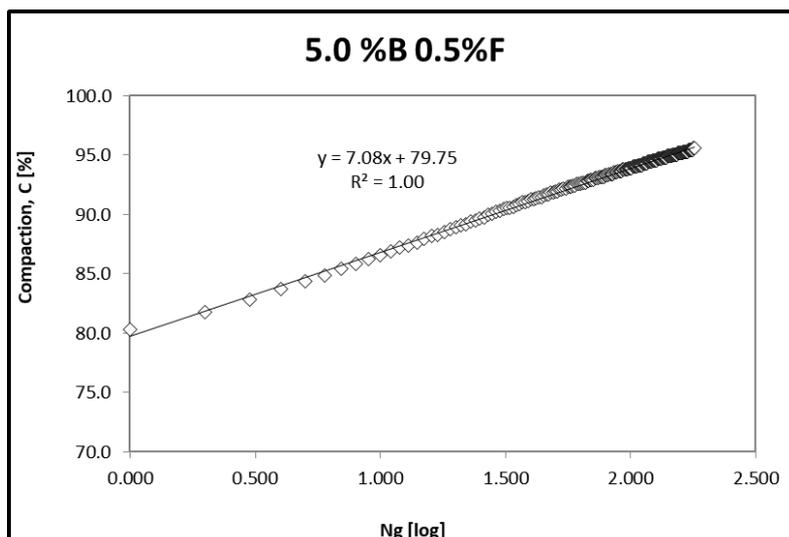


Figura 110. Lavorabilità della miscela 0.5% Fibre con 5.0%B.

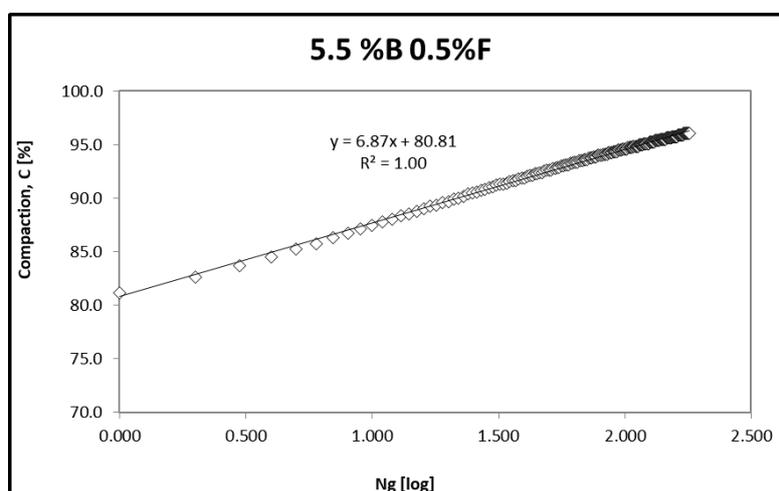


Figura 111. Lavorabilità della miscela 0.5% Fibre con 5.5%B.

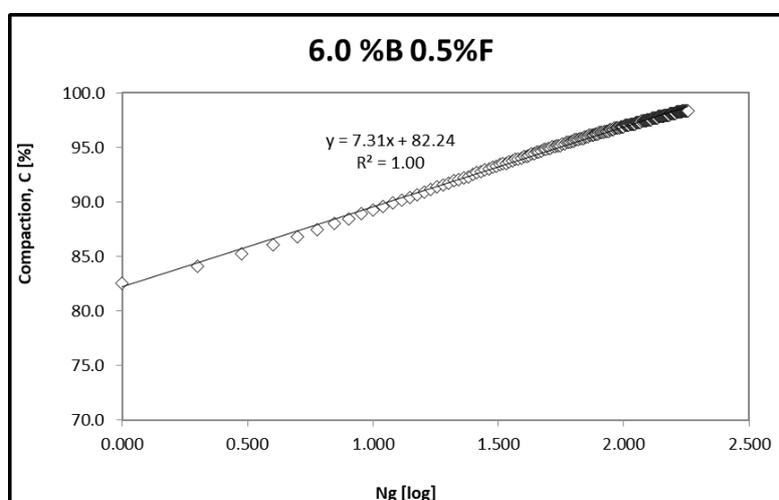


Figura 112. Lavorabilità della miscela 0.5% Fibre con 6.0%B.

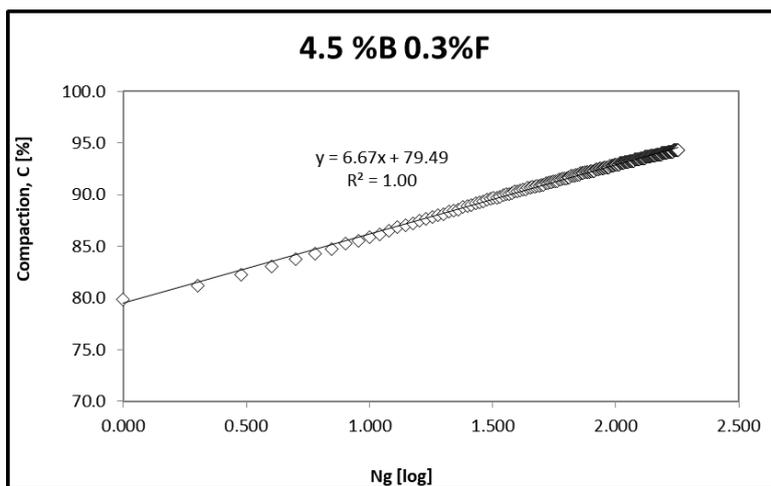


Figura 113. Lavorabilità della miscela 0.3% Fibre con 4.5%B.

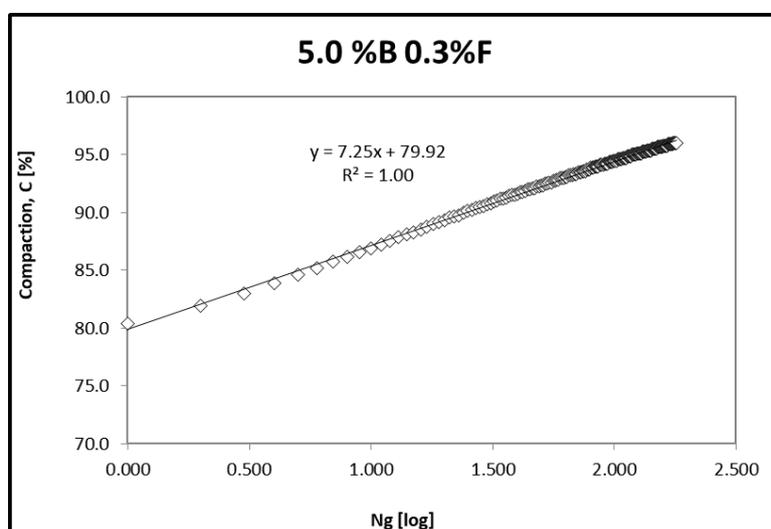


Figura 114. Lavorabilità della miscela 0.3% Fibre con 5.0%B.

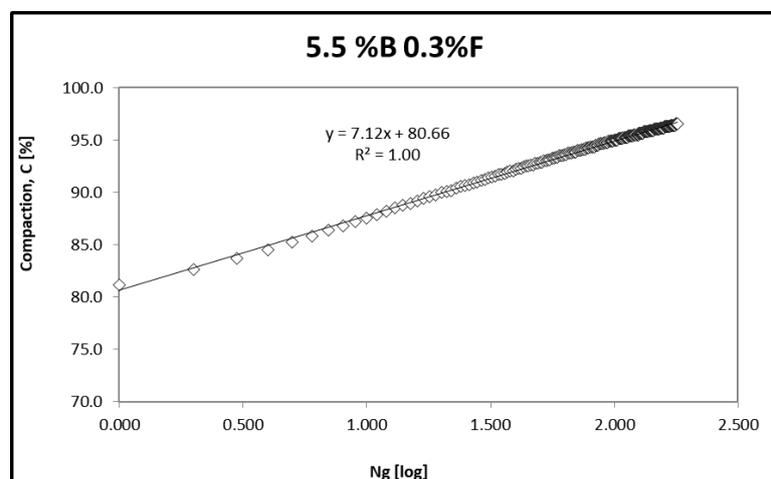


Figura 115. Lavorabilità della miscela 0.3% Fibre con 5.5%B.

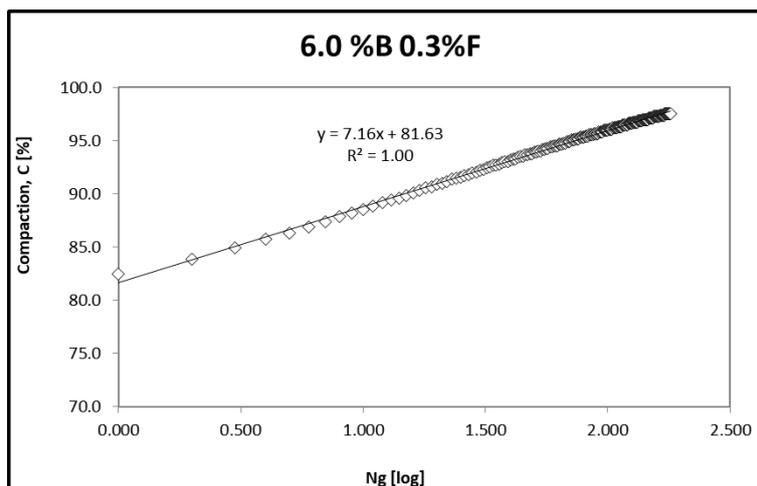


Figura 116. Lavorabilità della miscela 0.3% Fibre con 6.0%B.

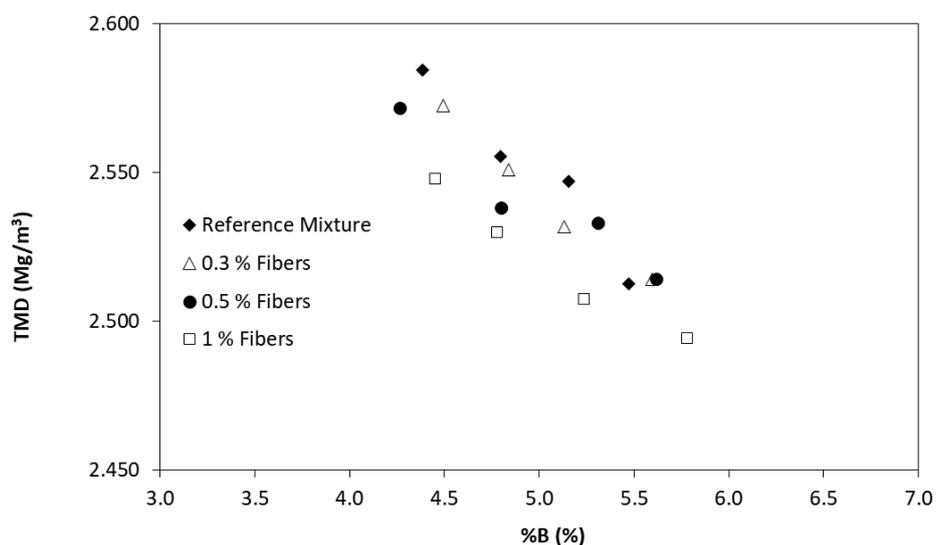


Figura 117. MMVT delle miscele in funzione di %B.

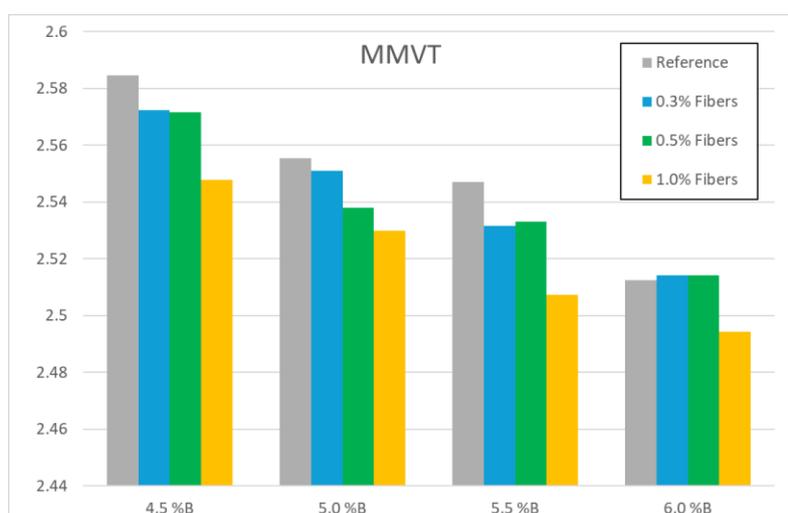


Figura 118. Istogramma MMVT delle miscele in funzione di %B.

Tabella 25. Contenuto di vuoti delle miscele a 3 diversi giri.

| Mixture | Bitumen dosage (%) | V ₁₈₀ (%) | V ₁₀₀ (%) | V ₁₀ (%) |
|-----------|--------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Reference | 4.39 | 5.7 | 7.1 | 13.9 |
| | 4.79 | 4.3 | 5.8 | 13.3 |
| | 5.15 | 2.7 | 4.2 | 12.1 |
| | 5.47 | 0.5 | 1.7 | 9.3 |
| 1.0%F | 4.45 | 7.1 | 8.6 | 15.5 |
| | 4.78 | 5.9 | 7.5 | 14.7 |
| | 5.24 | 4.2 | 5.8 | 13.3 |
| | 5.78 | 4.1 | 5.8 | 13.7 |
| 0.5%F | 4.27 | 7.1 | 8.5 | 14.9 |
| | 4.80 | 4.4 | 6.1 | 13.4 |
| | 5.31 | 4.0 | 5.4 | 12.5 |
| | 5.62 | 1.6 | 3.1 | 10.7 |
| 0.3%F | 4.49 | 5.7 | 7.1 | 14.1 |
| | 4.84 | 4.0 | 5.5 | 13.1 |
| | 5.13 | 3.4 | 5.0 | 12.5 |
| | 5.59 | 2.5 | 4.1 | 11.5 |

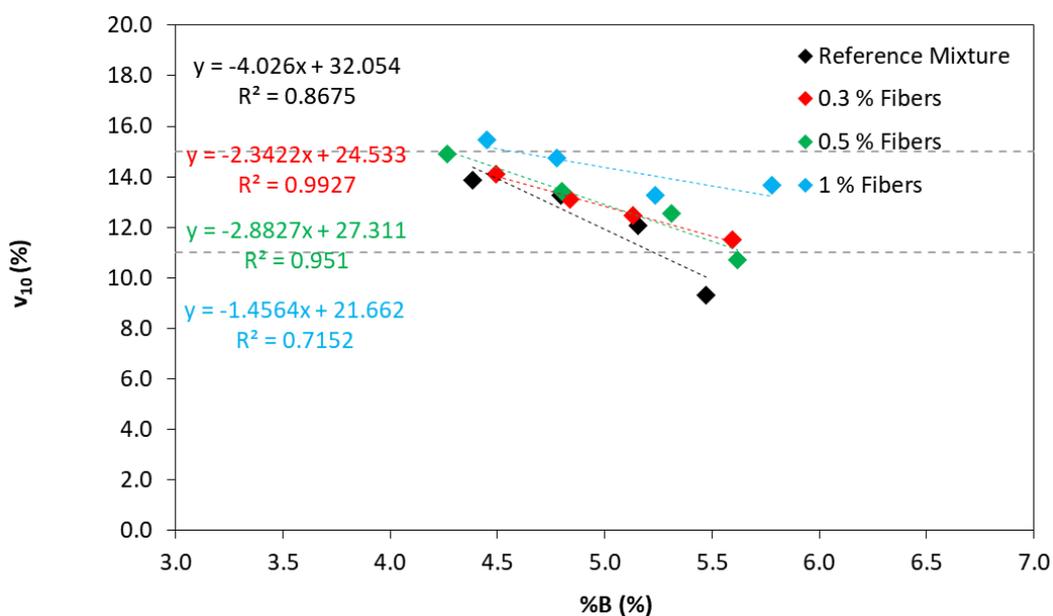


Figura 119. Contenuto di vuoti a 10 giri (N_{ini}) delle miscele.

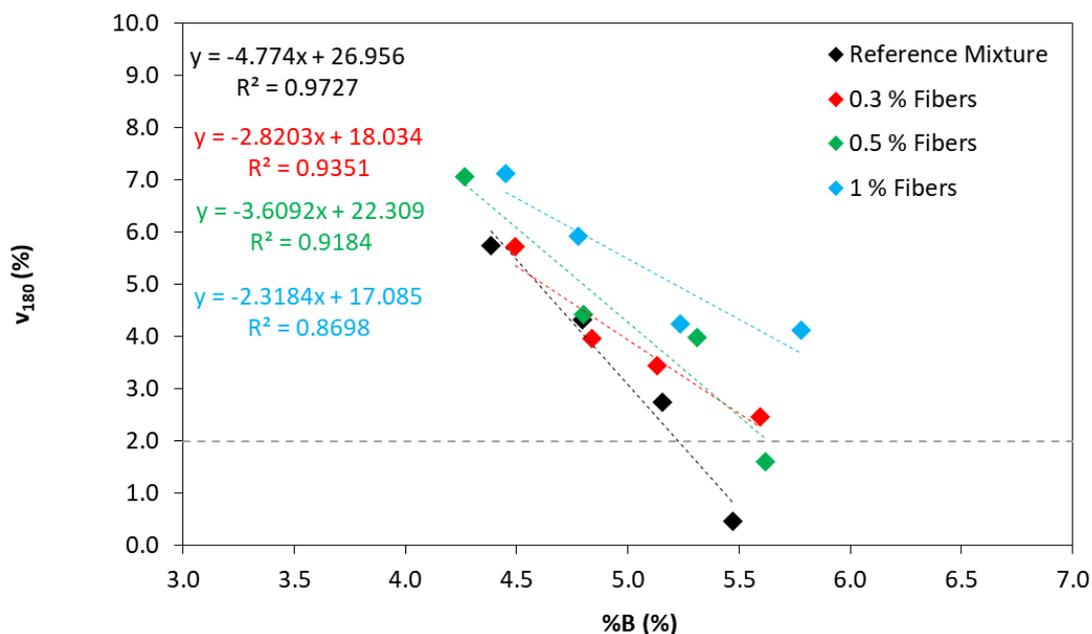


Figura 120. Contenuto di vuoti a 180 giri (N_{fin}) delle miscele.

Tabella 26. Risultati RTI delle miscele (CTI, Coefficiente di Trazione Indiretta)

| Mixture | Bitumen dosage (%) | RTI (MPa) | CTI (MPa) | S_v (mm) |
|-----------|--------------------|-----------|-----------|------------|
| Reference | 4.39 | 3.35 | 397.8 | 1.32 |
| | 4.79 | 3.11 | 249.6 | 1.96 |
| | 5.15 | 3.54 | 376.2 | 1.48 |
| | 5.47 | 3.23 | 378.5 | 1.34 |
| 1.0%F | 4.45 | 2.71 | 312.3 | 1.36 |
| | 4.78 | 2.60 | 255.4 | 1.60 |
| | 5.24 | 2.98 | 247.5 | 1.89 |
| | 5.78 | 2.63 | 239.5 | 1.73 |
| 0.5%F | 4.27 | 2.90 | 331.9 | 1.37 |
| | 4.80 | 2.83 | 279.8 | 1.59 |
| | 5.31 | 3.63 | 363.2 | 1.57 |
| | 5.62 | 3.77 | 469.8 | 1.26 |
| 0.3%F | 4.49 | 3.35 | 505.7 | 1.04 |
| | 4.84 | 3.28 | 430.6 | 1.20 |
| | 5.13 | 3.31 | 703.9 | 0.74 |
| | 5.59 | 3.62 | 367.4 | 1.55 |

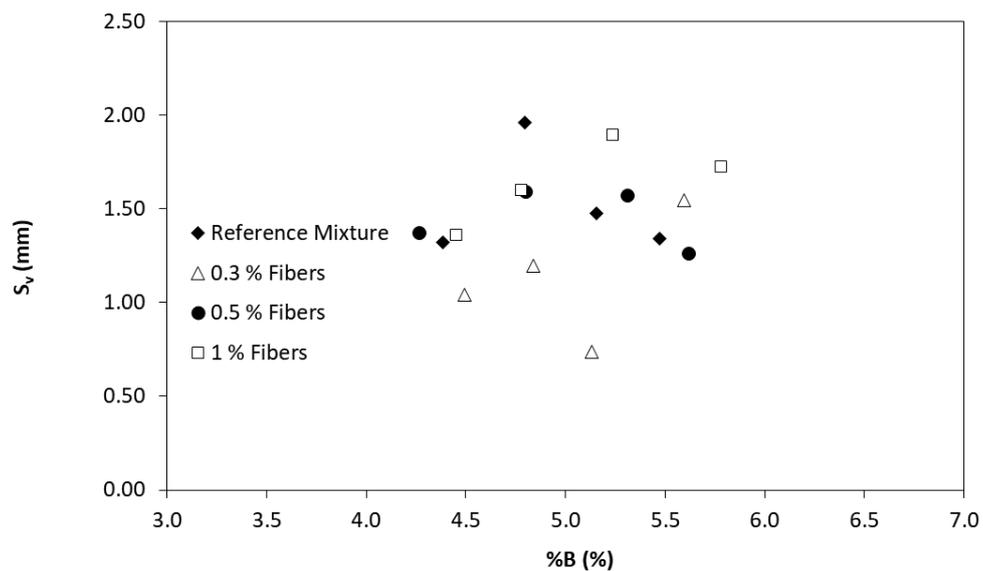


Figura 121. Spostamento verticale da RTI delle miscele.

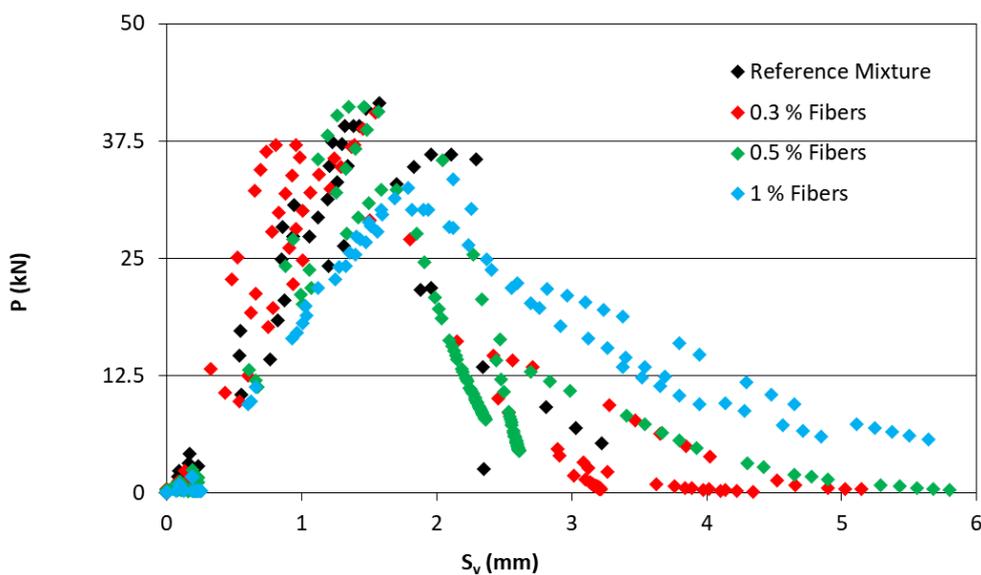


Figura 122. Curva carico-spostamento da RTI delle miscele.

B. Compattazione e volumetria

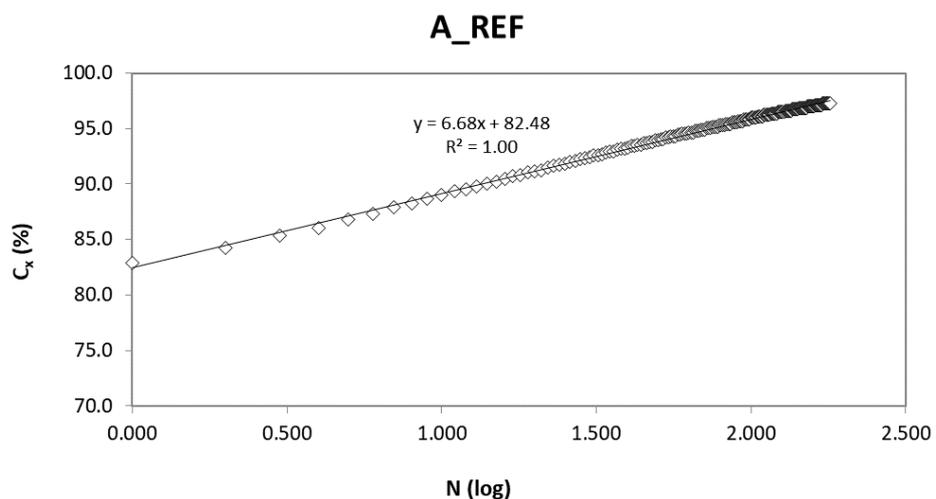


Figura 123. Lavorabilità della miscela A di riferimento a 180 giri.

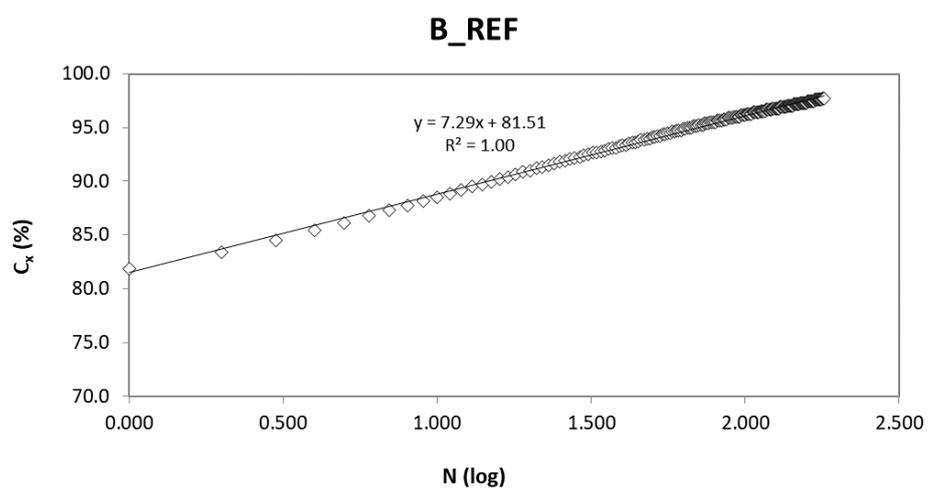


Figura 124. Lavorabilità della miscela B di riferimento a 180 giri.

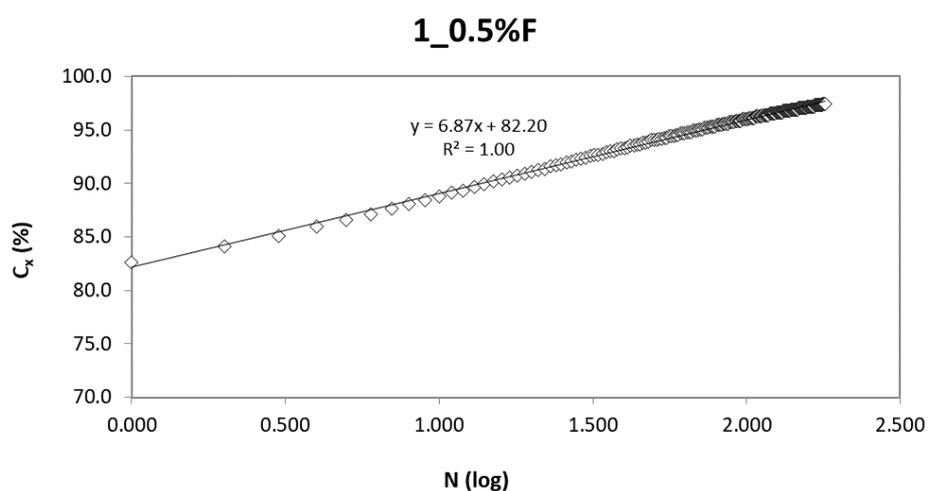


Figura 125. Lavorabilità della miscela 1 con 0.5% Fibre a 180 giri.

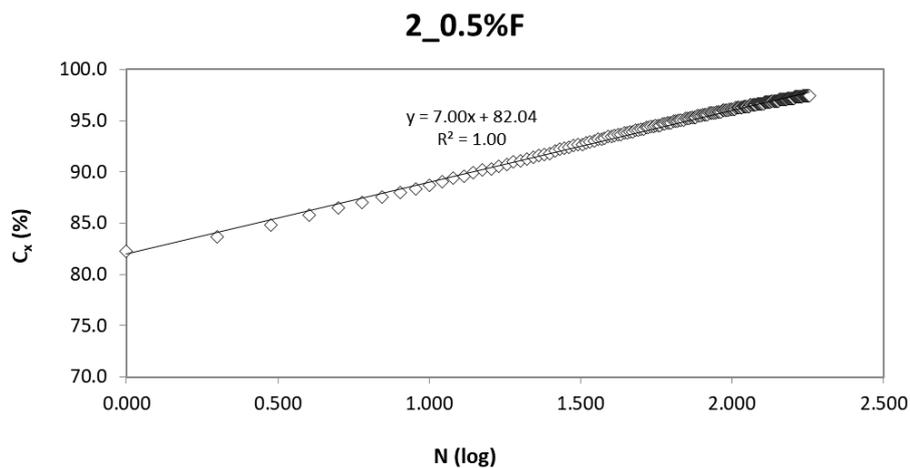


Figura 126. Lavorabilità della miscela 2 con 0.5% Fibre a 180 giri.

Tabella 27. Contenuto di vuoti delle due miscele a diversi giri.

| | REF | 0.5%F |
|------------------|------|-------|
| V ₁₀ | 11.3 | 11.3 |
| V ₁₀₀ | 4.0 | 3.9 |
| V ₁₈₀ | 2.5 | 2.5 |

C. Resistenza a fatica

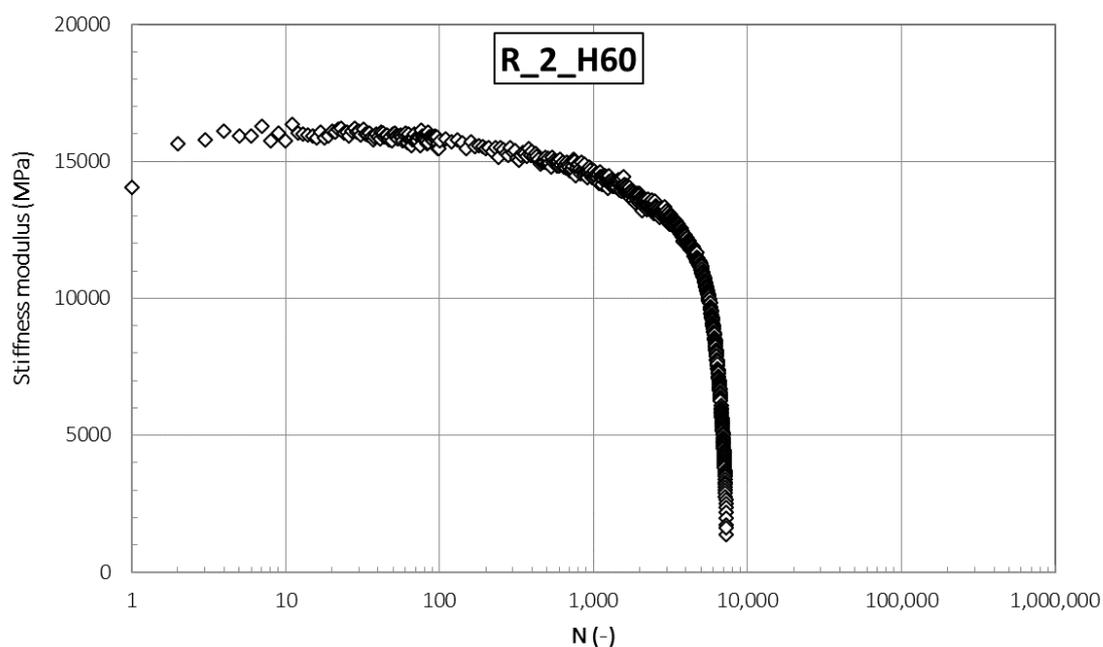


Figura 127. Prova di fatica. Modulo R₂H60 per 10³-10⁴ numero di cicli.

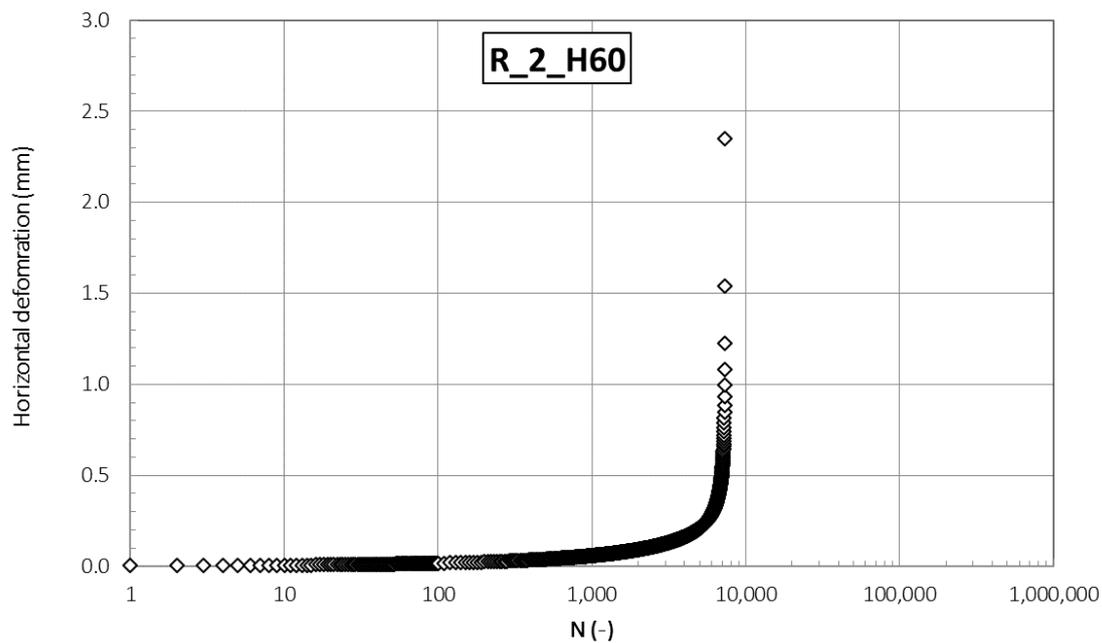


Figura 128. Prova di fatica. Deformazione orizzontale R_2_H60 per 10^3 - 10^4 numero di cicli.

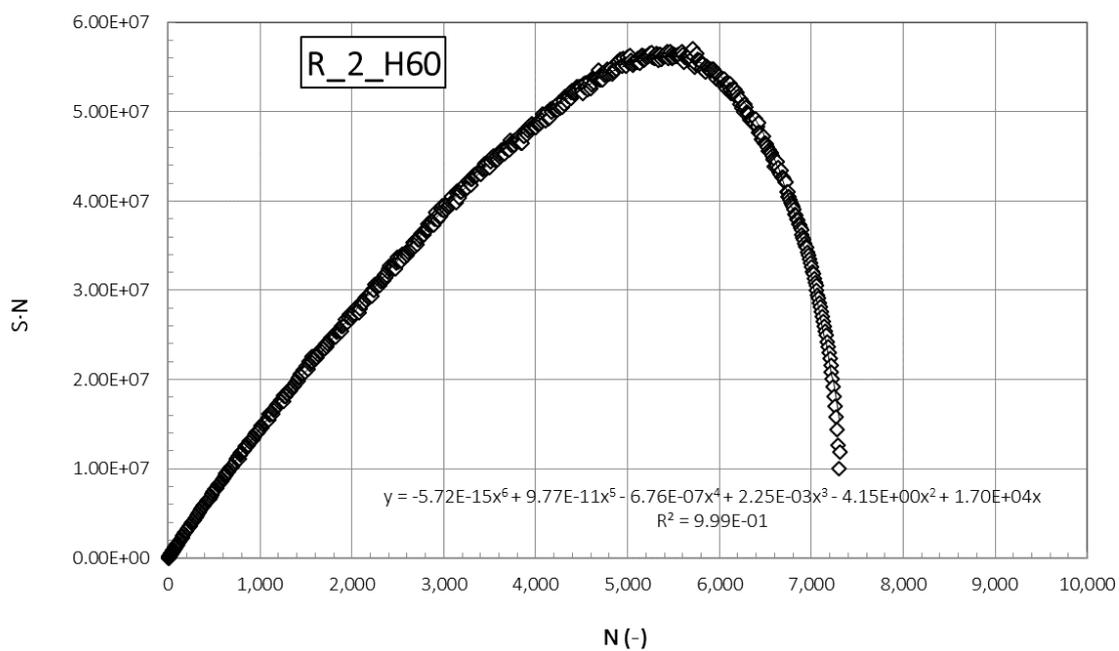


Figura 129. Prova di Fatica. Energy Ratio R_2_H60 per 10^3 - 10^4 numero di cicli.

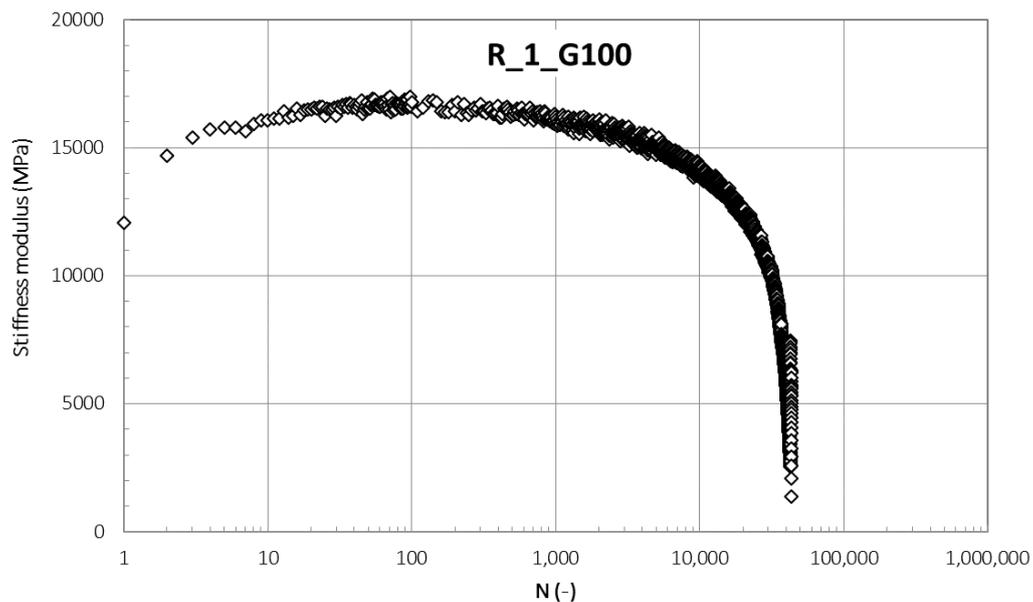


Figura 130. Prova di fatica. Modulo R_1_G100 per 10^4 - 10^5 numero di cicli.

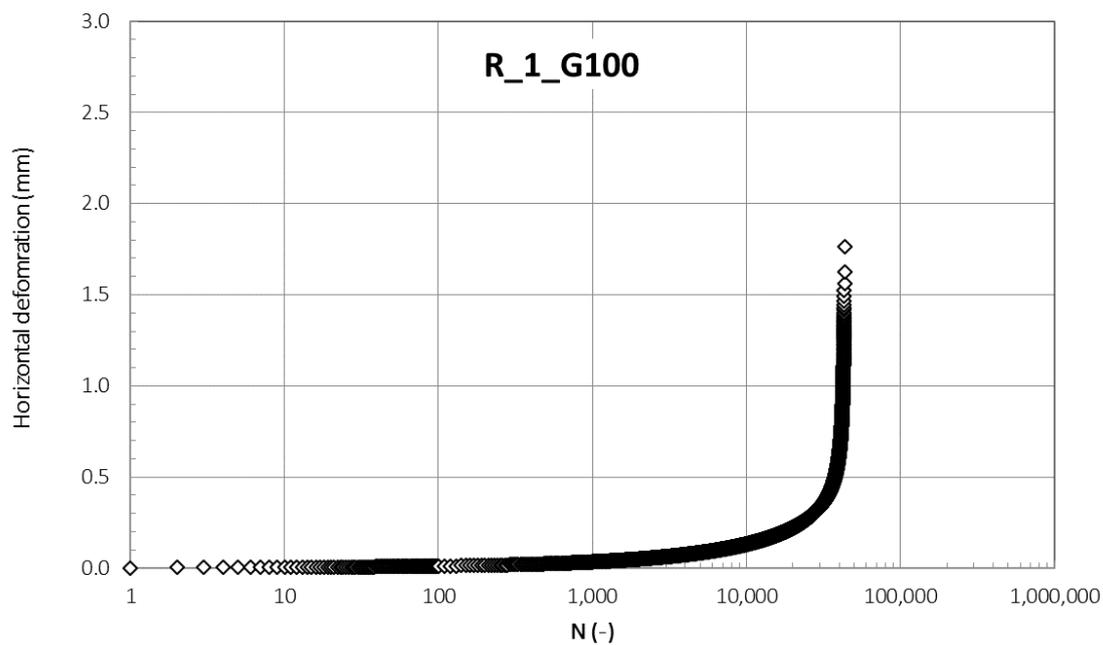


Figura 131. Prova di fatica. Deformazione orizzontale R_1_G100 per 10^4 - 10^5 numero di cicli.

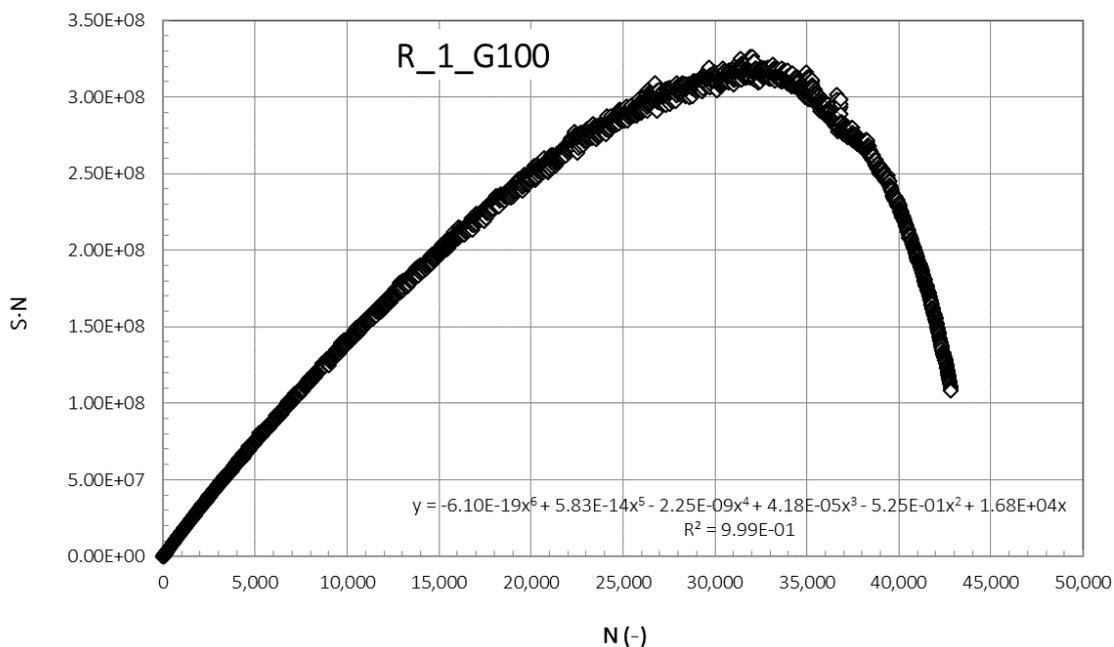


Figura 132. Prova di fatica. Energy Ratio R_1_G100 per 10^4 - 10^5 numero di cicli.

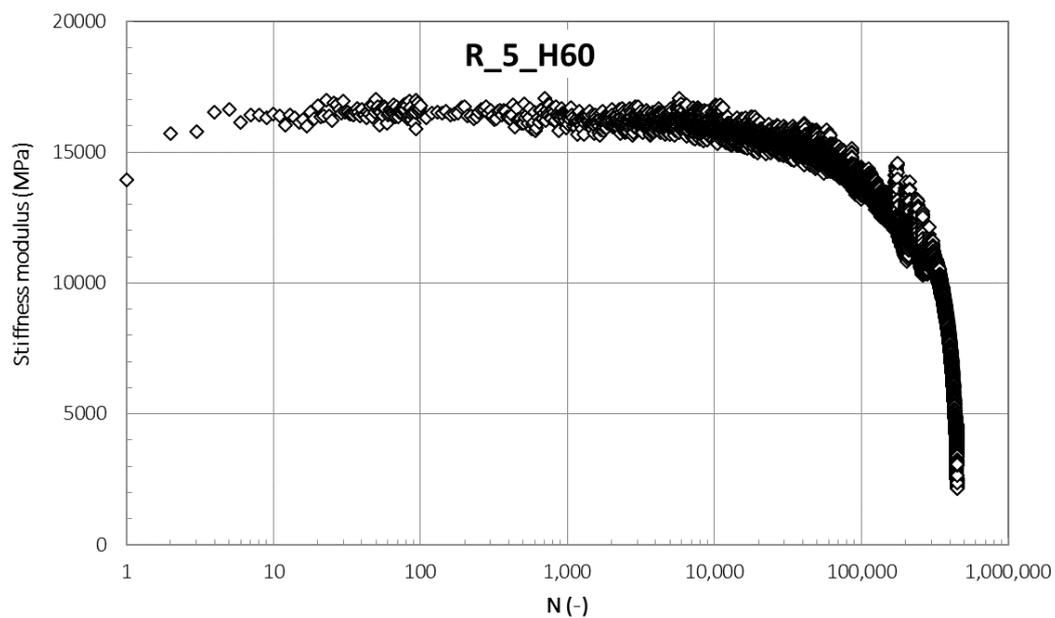


Figura 133. Prova di fatica. Modulo R_5_H60 per 10^5 - 10^6 numero di cicli.

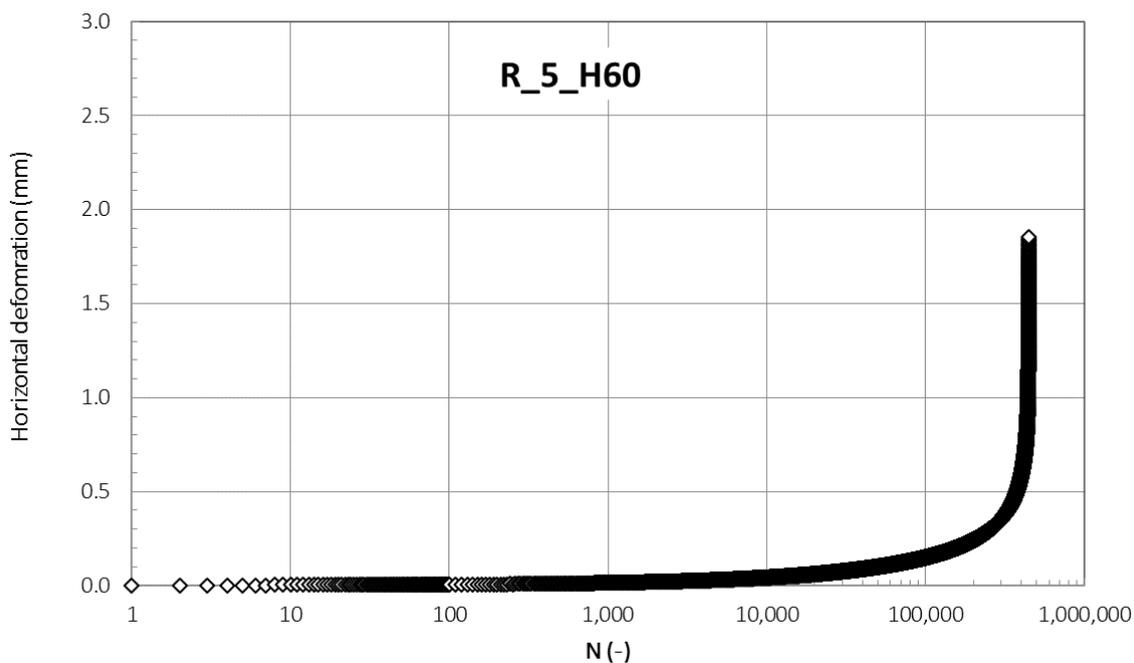


Figura 134. Prova di fatica. Deformazione orizzontale R_5_H60 per 10^5 - 10^6 numero di cicli.

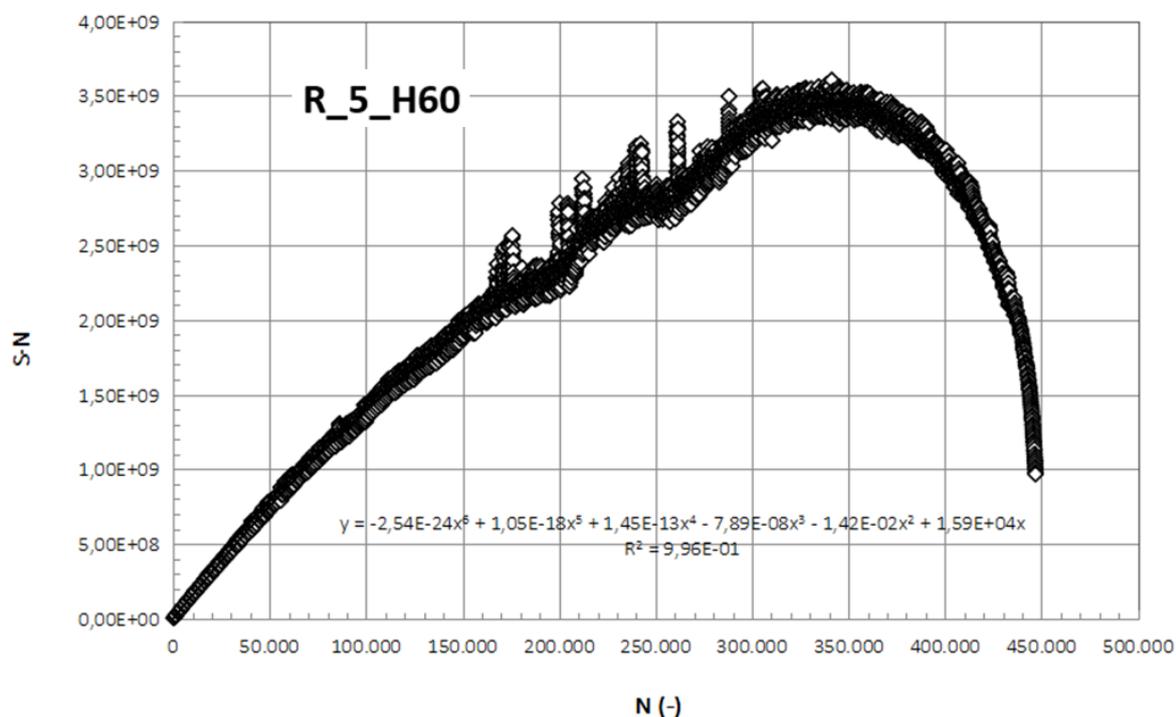


Figura 135. Prova di fatica. Energy Ratio R_5_H60 per 10^5 - 10^6 numero di cicli.

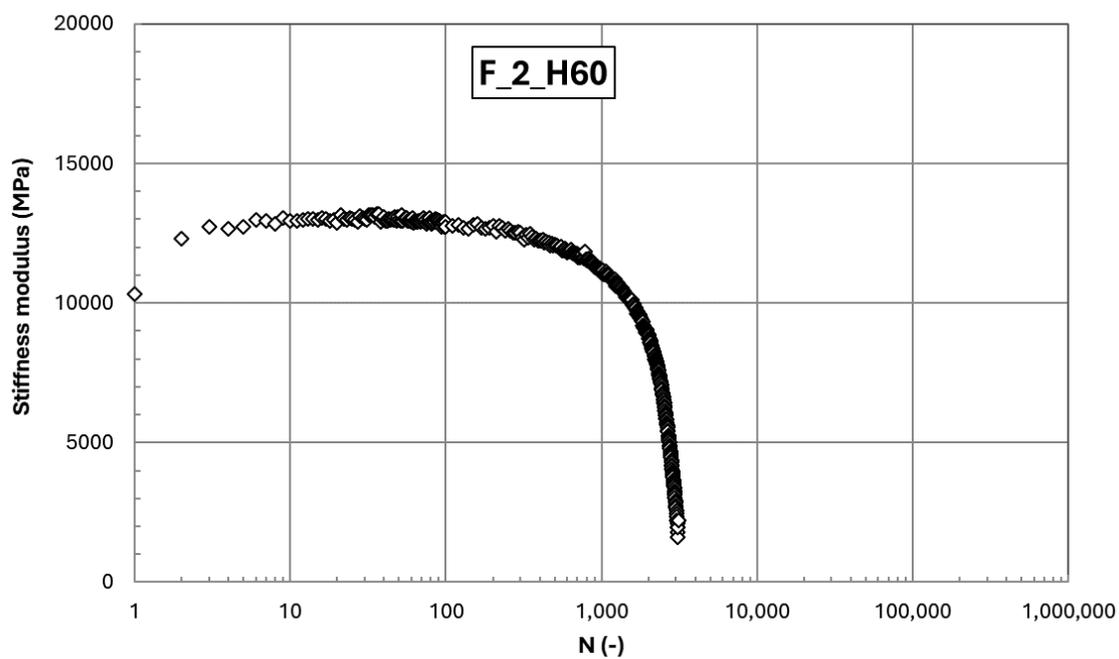


Figura 136. Prova di fatica. Modulo F_2_H60 per 10^3 - 10^4 numero di cicli.

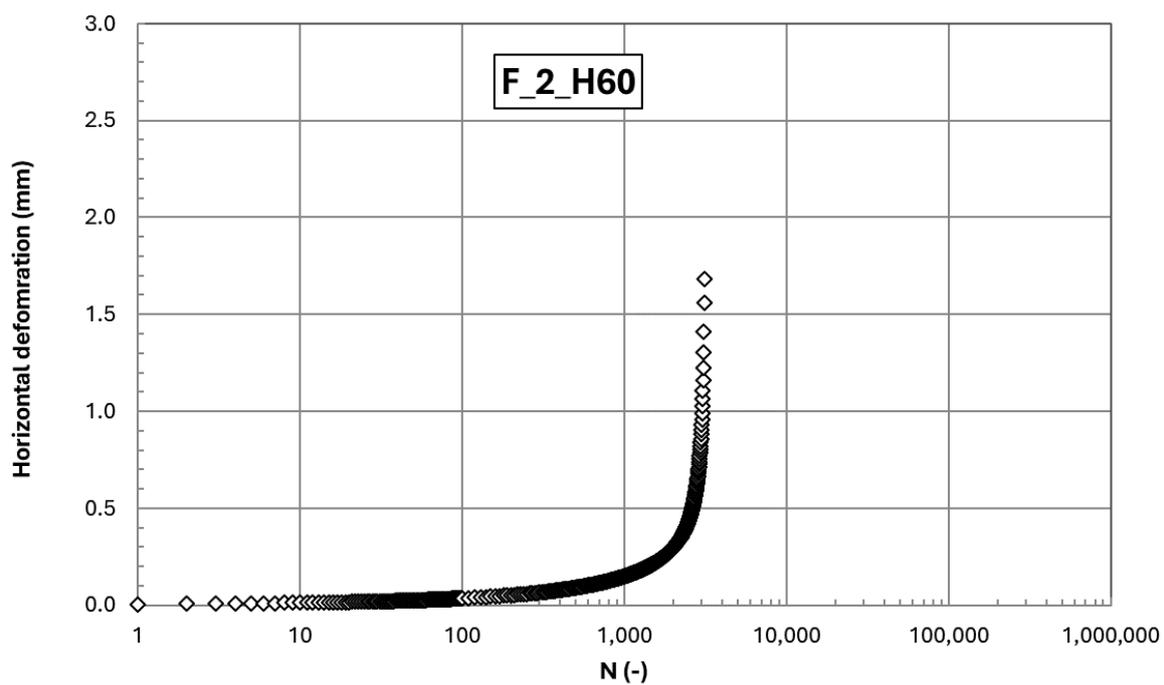


Figura 137. Prova di fatica. Deformazione orizzontale F_2_H60 per 10^3 - 10^4 numero di cicli.

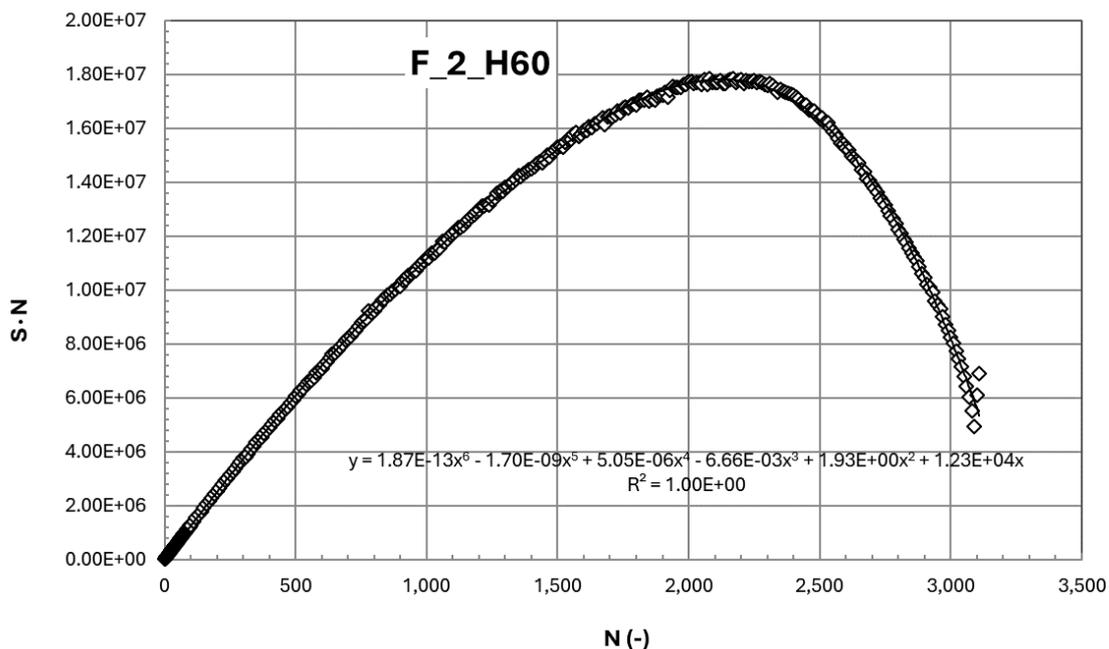


Figura 138. Prova di fatica. Energy Ratio F_2_H60 per 10^3 - 10^4 numero di cicli.

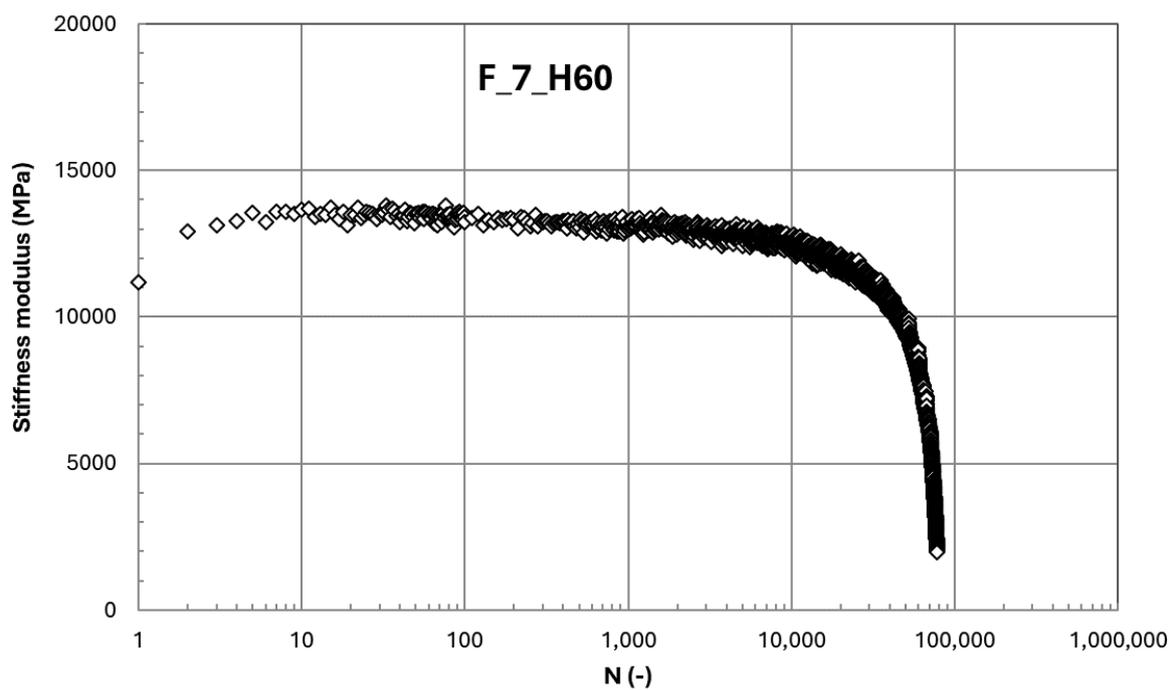


Figura 139. Prova di fatica. Modulo F_7_H60 per 10^4 - 10^5 numero di cicli.

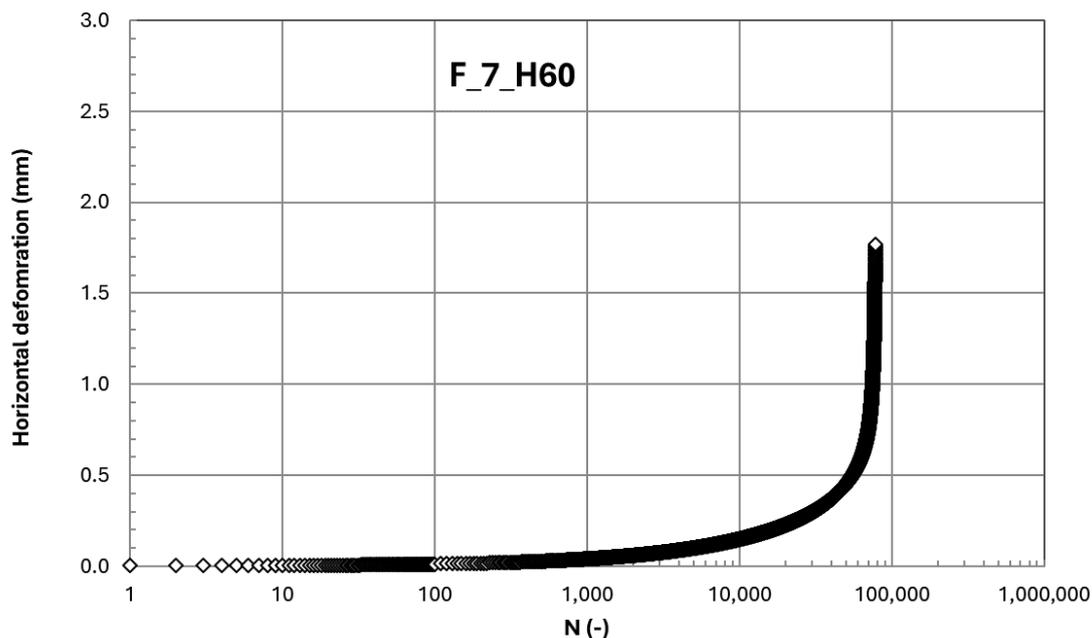


Figura 140. Prova di fatica. Deformazione orizzontale F_7_H60 per 10^4 - 10^5 numero di cicli.

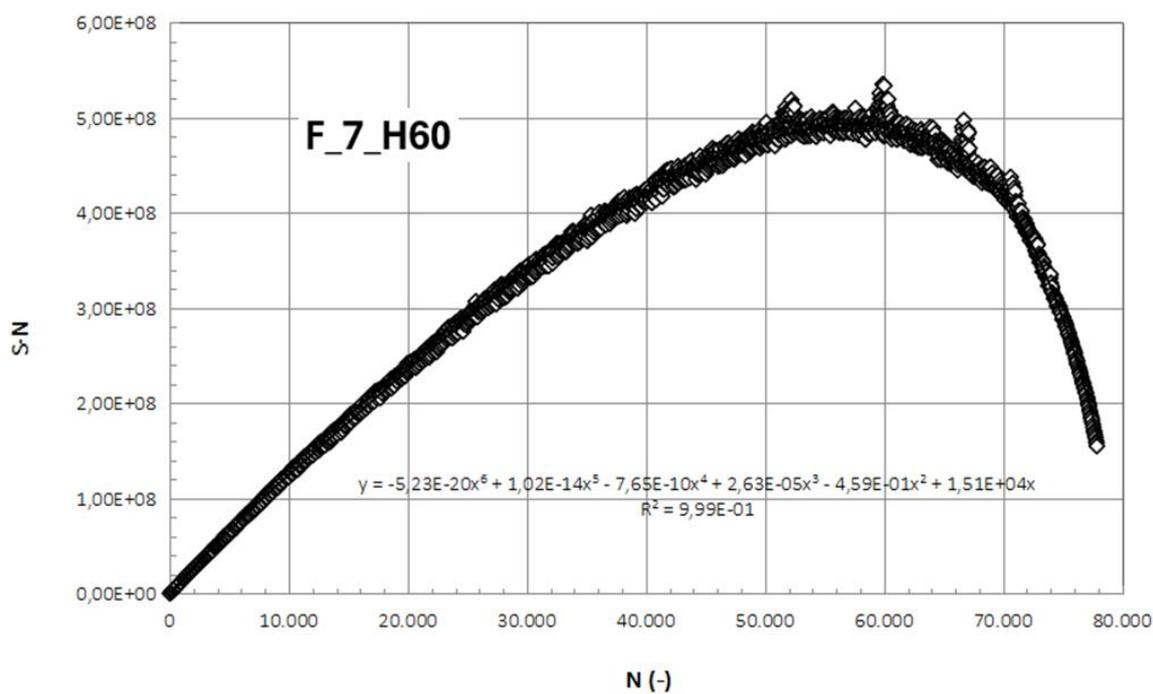


Figura 141. Prova di fatica. Energy Ratio F_7_H60 per 10^4 - 10^5 numero di cicli.

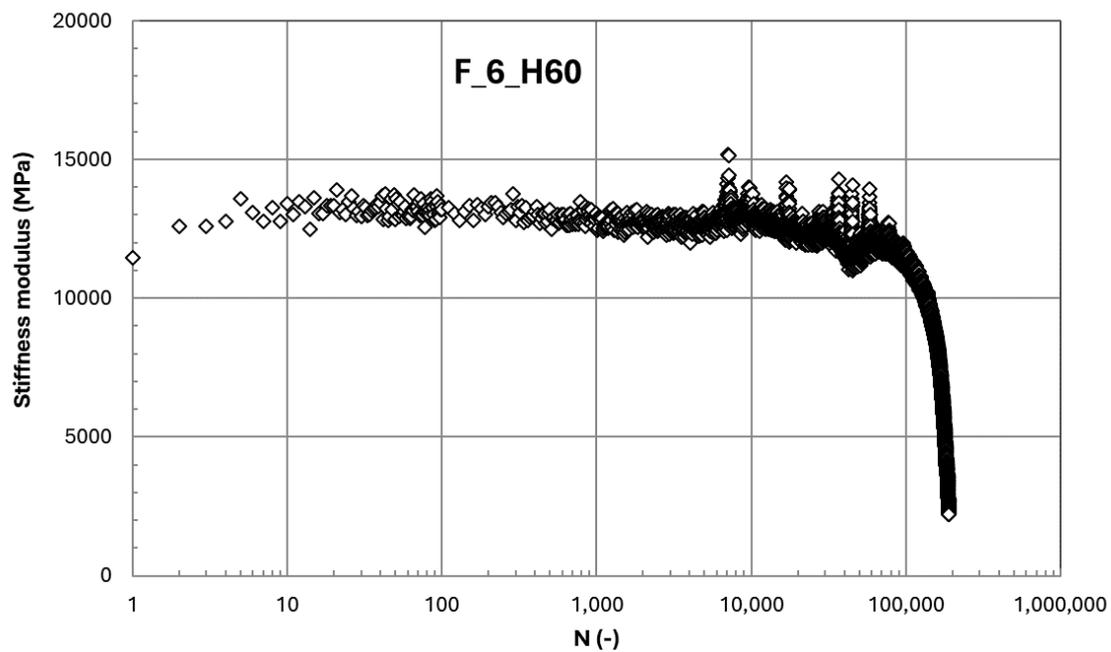


Figura 142. Prova di fatica. Modulo F_6_H60 per 10^5 - 10^6 numero di cicli.

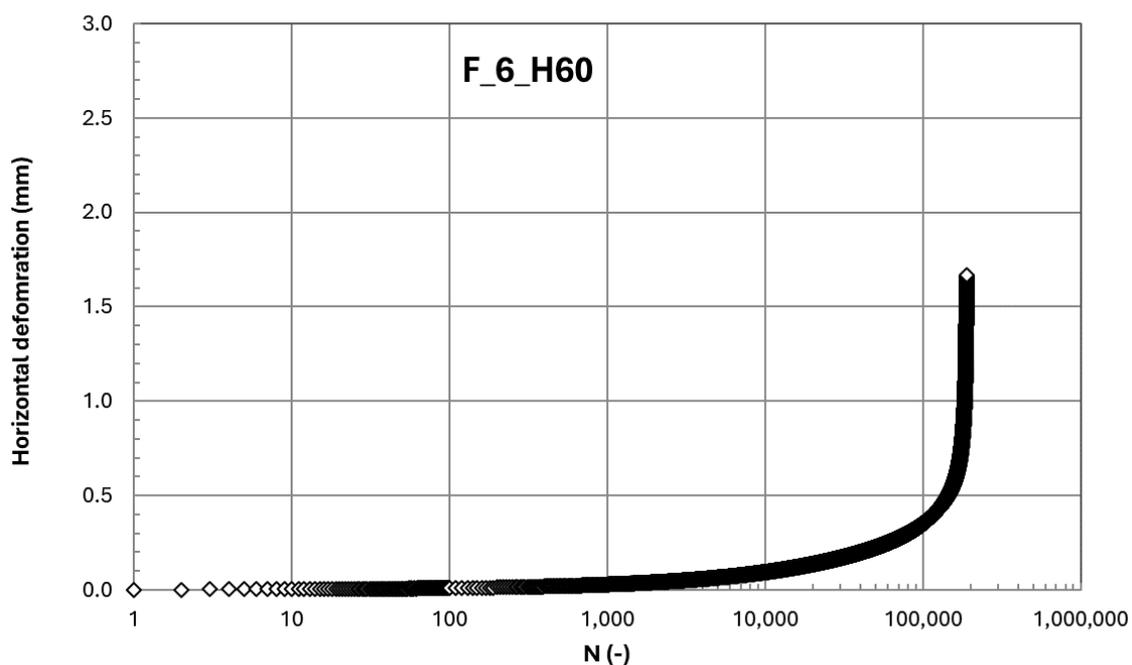


Figura 143. Prova di fatica. Deformazione orizzontale F_6_H60 per 10^5 - 10^6 numero di cicli.

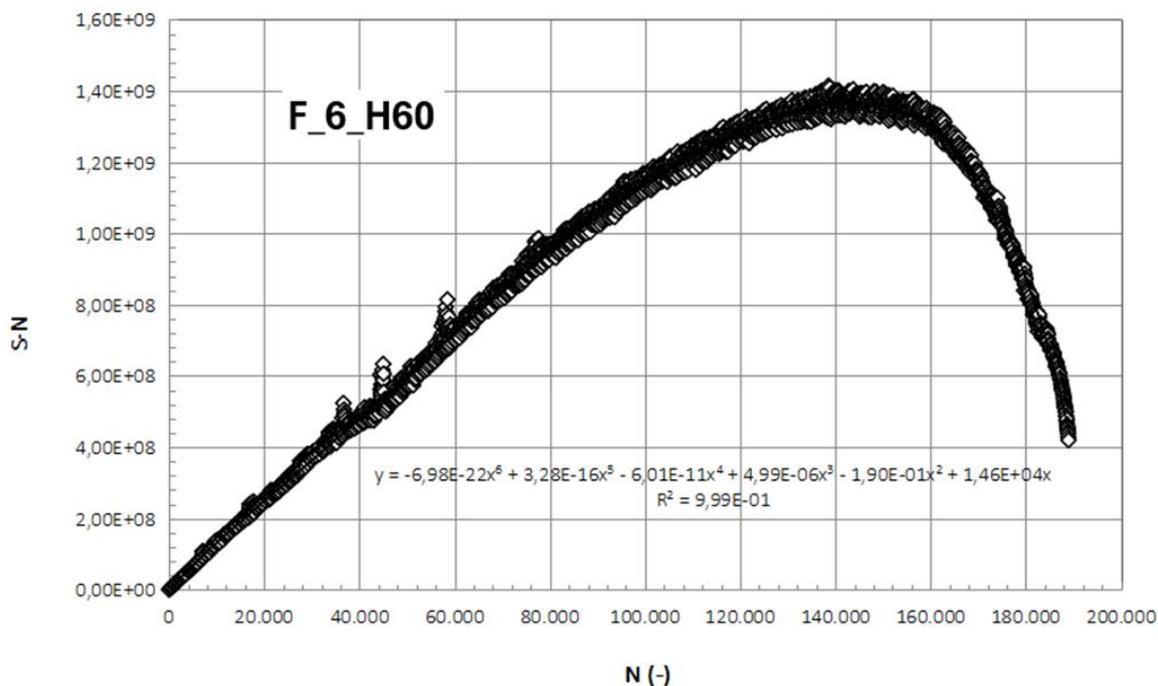


Figura 144. Prova di fatica. Energy Ratio F_6_H60 per 10^5 - 10^6 numero di cicli.

D. Resistenza alla fessurazione – prova SCB

Tabella 28. Contenuto di vuoti e geometria dei campioni SCB (R=Riferimento, F=Fibre).

| ID (-) | v (%) | h (mm) | t _{avg} (mm) | D (mm) | Cycle (-) |
|-----------|----------|-----------|--------------------------|-----------|--------------|
| R5 | 1.48 | 71.00 | 52.92 | 149.45 | 87 |
| R6 | 1.44 | 75.00 | 51.37 | 150.00 | 87 |
| R7 | 2.62 | 73.30 | 49.00 | 150.00 | 57 |
| R8 | 2.26 | 73.10 | 48.90 | 150.00 | 57 |
| R9 | 3.49 | 77.00 | 49.57 | 150.00 | 51 |
| R10 | 3.18 | 69.40 | 49.53 | 149.35 | 51 |
| F5 | 3.37 | 72.00 | 48.60 | 150.10 | 74 |
| F6 | 2.84 | 75.60 | 48.38 | 150.40 | 74 |
| F7 | 3.36 | 75.85 | 50.68 | 151.00 | 72 |
| F8 | 3.41 | 72.00 | 53.20 | 150.70 | 72 |

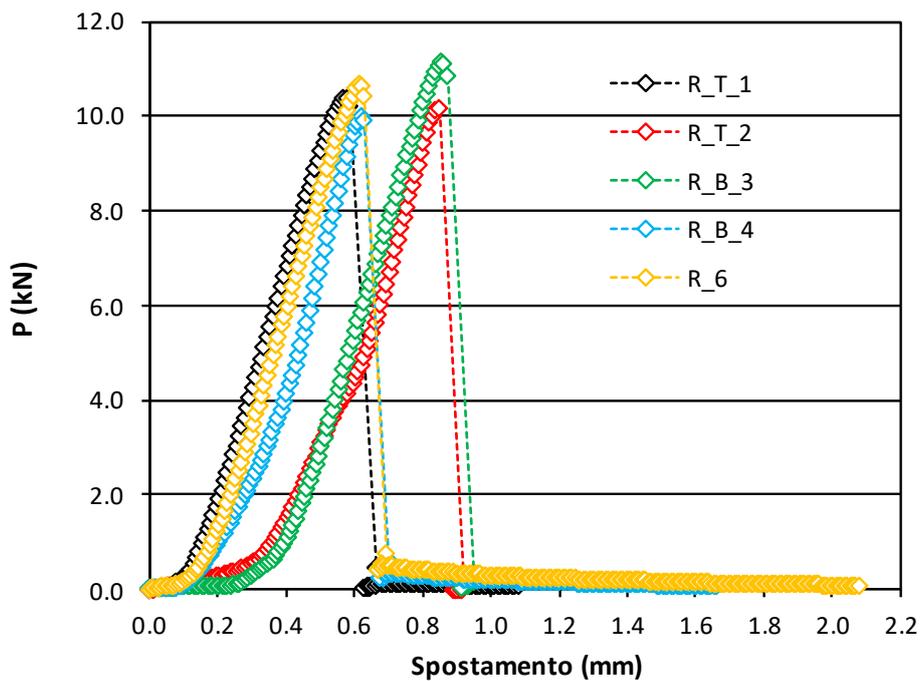


Figura 145. Prova SCB. 5 mm/min per Riferimento.

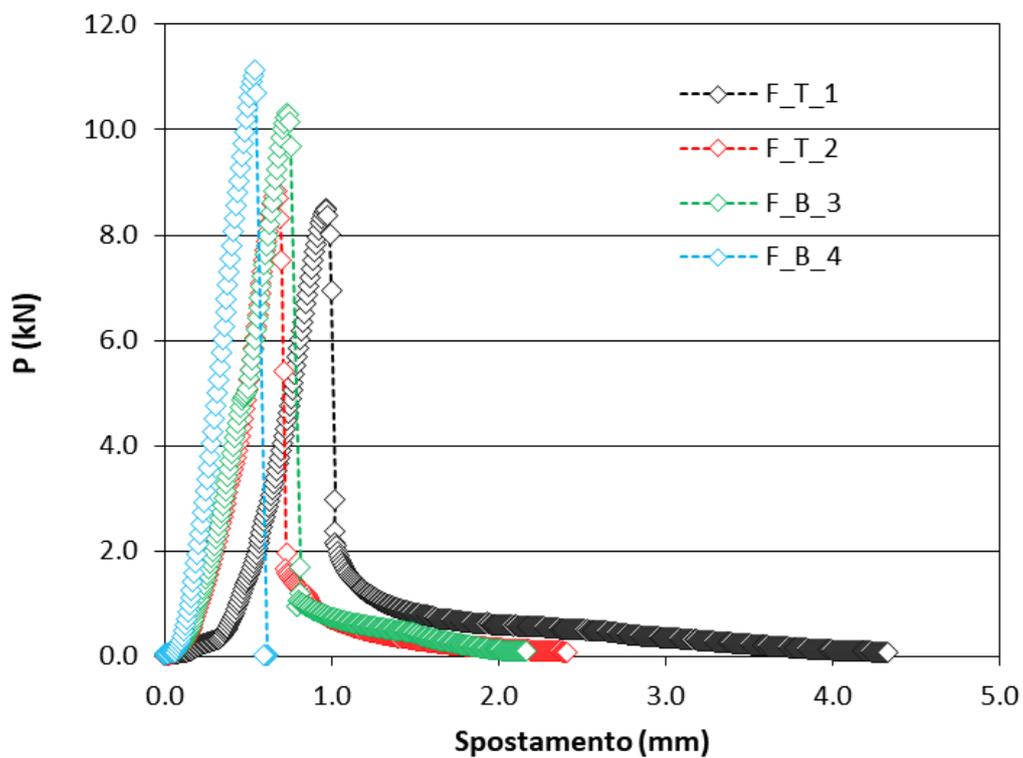


Figura 146. Prova SCB. 5 mm/min per 0.5% Fibre.

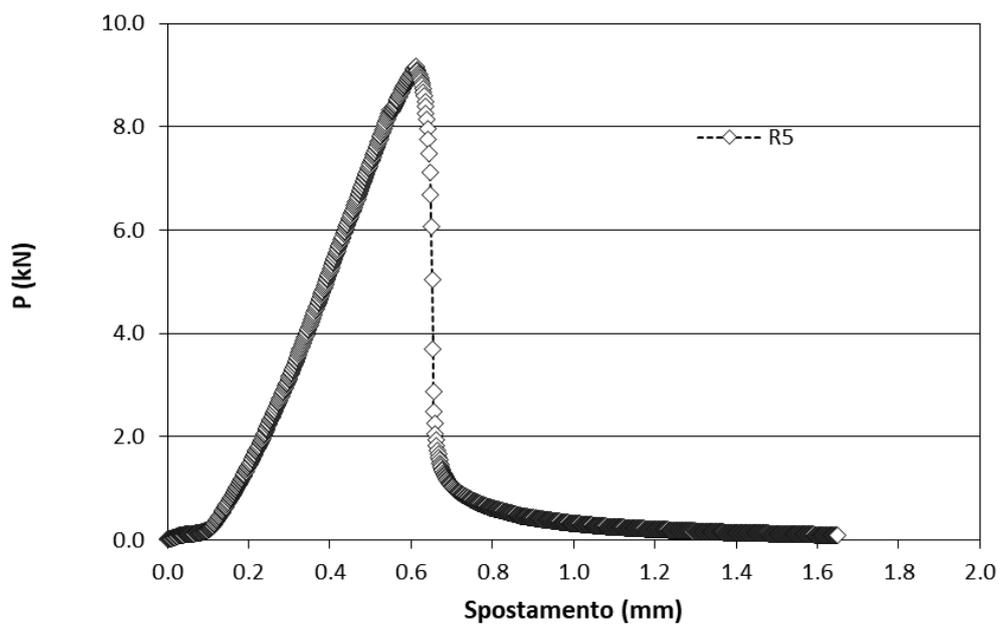


Figura 147. Prova SCB. 1 mm/min per Riferimento.

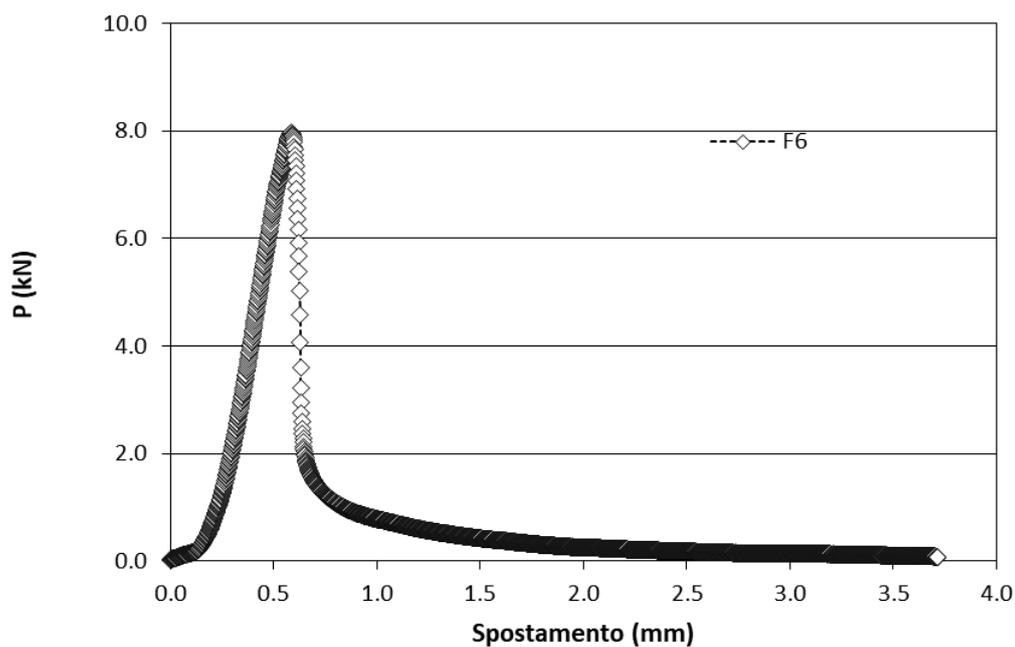


Figura 148. Prova SCB. 1 mm/min per 0.5% Fibre.

E. Resistenza alla fessurazione – Indice di fesso N_{flex}

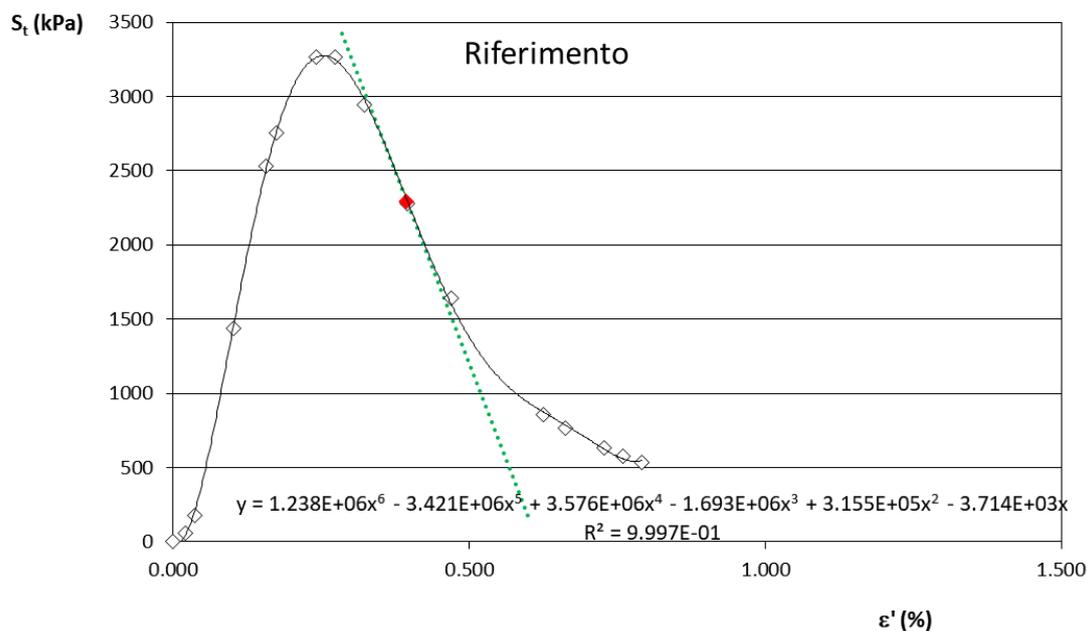


Figura 149. Prova RTI. Punto di flesso della miscela di riferimento.

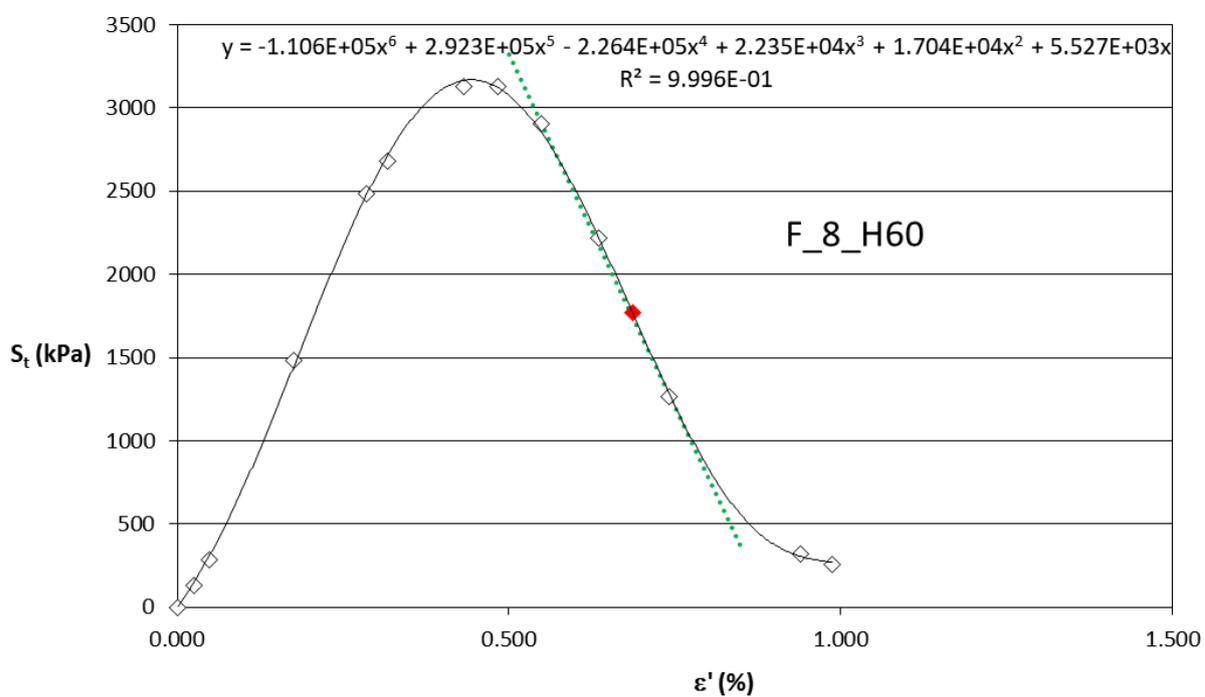


Figura 150. Prova RTI. Punto di flesso della miscela 0.5% Fibre.

Ringraziamenti

A conclusione di questo lavoro di tesi, e della mia carriera universitaria, è doveroso porre un sincero ringraziamento a tutti coloro che, in momenti diversi e in vari modi, mi hanno prestato il loro aiuto e la loro assistenza nella realizzazione di questo lavoro.

Un sentito ringraziamento va al mio relatore Pier Paolo Riviera che mi ha seguito, con disponibilità e gentilezza, in ogni step della realizzazione dell'elaborato, fin dalla scelta dell'argomento.

Ho desiderio di ringraziare con affetto i miei genitori che sono stati e sono ancora il pilastro della mia vita dandomi supporto anche nei momenti più bui e difficili. Ringrazio anche i miei fratelli che mi sono stati vicini dandomi buoni consigli sui miei piani futuri.

Ringrazio anche i miei vecchi amici Salvatore Falla, Giovanni Grimaldi e Giorgio Lorefice che, nonostante la lunga distanza, mi davano coraggio nel continuare la mia carriera studentesca e spero che continueranno a farlo.

Un altro speciale ringraziamento va ai miei colleghi con i quali mi sono trovato davvero bene.

I must also thank to my colleague Mozghan Hajiali who is mostly available during my thesis, and I will never forget few persian words she taught to me.

And finally, I must thank to my colleague, now 'compare', Shrokruxh Ochilov for working hard with me during the mix design phase and for supporting me in the last period.