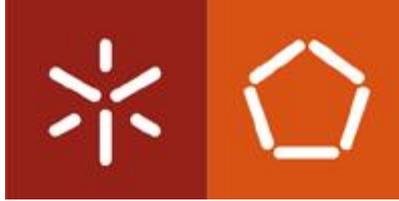


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Grigório Ribeiro Soares Neto

**Aplicação de fibras no reforço  
de misturas betuminosas**

Março 2022



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Grigório Ribeiro Soares Neto

**Aplicação de fibras no reforço  
de misturas betuminosas**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Urbana

Trabalho realizado sob a orientação do

**Professor Doutor Jorge Carvalho Pais**

Março 2022

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### ***Licença concedida aos utilizadores deste trabalho***



**Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgal**  
**CC BY-NC-SA**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho foi feita com muito apoio, disposição e dedicação de vários participantes, a quem gostaria de desejar os meus mais profundos e sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor Jorge Carvalho Pais expresso o meu agradecimento por todo o apoio e orientação prestada no desenvolvimento do trabalho. Agradeço imensamente pela paciência, disponibilidade, interesse e incentivo.

Ao Engenheiro Carlos Palha, responsável do laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho agradeço pelos ensinamentos, disponibilidade e esclarecimentos.

Aos técnicos do laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho, expresso o meu agradecimento pelo apoio e esclarecimentos.

Aos meus pais e irmãos agradeço o investimento na minha formação, o constante incentivo e apoio, paciência e compreensão demonstrados ao longo destes anos.

Aos meus amigos agradeço pelo apoio e ajuda prestada em todos os momentos.

A todos os que me apoiaram expresso os meus sinceros agradecimentos e sentimentos de gratidão.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## **Aplicação de fibras no reforço de misturas betuminosas**

### **Resumo**

As infraestruturas rodoviárias constituem um sistema de grande importância para o desenvolvimento de um país, pois abre oportunidades para deslocamentos e conexão entre cidades. Como tal, tem-se realizado estudos para melhorar o desempenho dos pavimentos afim de aumentar a vida a fadiga e apresentar menores deformações permanentes. Por esse fato, a utilização de fibras na modificação das misturas betuminosas e nos ligantes betuminosos é de grande importância para contribuir para uma maior diversidade nos materiais que podem ser utilizados para esse fim e gerar pesquisas para uso de fibras eficientes e sustentáveis.

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho das misturas betuminosas e dos ligantes betuminosos com a adição de fibras sintéticas. Foram utilizadas fibras nos comprimentos de 20, 25, 38 e 50 mm e com 13% de fibras do tipo A. Nas misturas betuminosas foram realizados os ensaios de módulo de rigidez, fendilhamento à fadiga e deformação permanente. Com o betume modificado foram realizados os seguintes ensaios de reologia: Fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR), Varredura linear de amplitude (LAS) e Módulo de rigidez complexo ( $|G^*|$ ) com variação de 4 temperaturas.

Os resultados demonstram a viabilidade técnica da incorporação das fibras com comprimento de 38 e 50 mm (F1338 e F1350) para o melhoramento do módulo de rigidez aumento a resistência a fadiga, prolongando a vida do pavimento. No ensaio de rodeira esses mesmos comprimentos tiveram bons resultados, mas acrescenta-se também o tamanho de 25 mm, tendo assim essas amostras com bom desempenho a deformação permanente. Os ensaios de reologia foram realizados com uma gama maior de provetes, por conta da variação da percentagem (12, 14, 17 e 20%) juntamente com a variação do comprimento. No ensaio MSCR o melhor desempenho foi obtido com 17% e 50 mm, melhorando o desempenho na deformação permanente, no ensaio LAS obteve-se o melhor resultado em 17% com 25 mm, melhorando o desempenho da rigidez. No ensaio do Módulo de rigidez complexo ( $|G^*|$ ) o melhor desempenho para altas temperaturas foi obtido em 20% com 20 mm e para baixas temperaturas em 12% com 25 mm, proporcionando bons resultados para a deformação permanente e fendilhamento a fadiga.

**Palavras-Chave:** Misturas betuminosas, Fibras sintéticas, Betumes modificados

## **Fiber application in the reinforcement of bituminous mixtures**

### **Abstract**

Road infrastructure follows a system of great importance for the development of a country, as it opens up opportunities for displacement and connection between cities. As such, studies have been carried out to improve the performance of pavements in order to increase fatigue life and present less permanent deformations. For this reason, the use of fibers in the modification of bituminous mixtures and bituminous binders is of great importance to contribute to a greater diversity in the materials that can be used for this purpose and to generate research into the use of efficient and sustainable fibers.

This study aims to evaluate the performance of bituminous mixtures and bituminous binders with the addition of synthetic fibers. Fibers in lengths of 20, 25, 38 and 50 mm and with 13% of type A fibers were used. The bituminous mixtures were carried out in the tests of stiffness modulus, fatigue cracking and permanent deformation. With the modified bitumen, the following rheology tests were carried out: Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR), Linear amplitude sweep (LAS) and Complex modulus stiffness ( $|G^*|$ ) with 4 temperature variations.

The results demonstrate the technical feasibility of incorporating fibers with lengths of 38 and 50 mm (F1338 and F1350) to improve the stiffness modulus and increase fatigue resistance, prolonging the life of the pavement. No rounding tests of these same lengths had good results, but the size of 25 mm is also added, thus having these members with good performance in permanent deformation. The rheology tests were carried out with a wider range of specimens, due to the percentage variation (12, 14, 17 and 20%) together with the length variation. In the MSCR test the best performance was complemented with 17% and 50 mm, improving the performance in permanent deformation, in the LAS test the best result was obtained in 17% with 25 mm, better stiffness performance. In the Complex modulus stiffness test ( $|G^*|$ ) the best performance for high temperatures was obtained at 20% with 20 mm and at low temperatures by 12% with 25 mm, providing good results for permanent deformation and fatigue cracking.

**Key Words:** Asphalt mixtures, Synthetic fibers, Modified bitumens

## ÍNDICE

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento temático.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Organização da dissertação .....	2
<b>2. Estado da Arte .....</b>	<b>4</b>
2.1. Introdução.....	4
2.1.1. Pavimentos rodoviários .....	4
2.1.2. Comportamento das misturas betuminosas.....	7
2.2. Uso de fibras nas misturas betuminosas.....	11
2.2.1. Tipos de fibras .....	11
2.2.2. Uso dessas técnicas de introdução das fibras pelo mundo.....	14
2.2.3. Condições à incorporação das fibras na mistura betuminosa .....	14
2.2.4. Problemas da introdução de fibras nas misturas betuminosas .....	16
2.2.5. Influência do comprimento das fibras.....	17
2.3. Betumes modificados com fibras.....	18
<b>3. Métodos e materiais .....</b>	<b>19</b>
3.1. Materiais utilizados.....	19
3.1.1. Materiais utilizados nas misturas betuminosas .....	19
3.1.2. Materiais utilizados no betume modificado .....	21
3.2. Produção de misturas betuminosas e betumes modificados .....	21
3.2.1. Misturas betuminosas.....	21
3.2.2. Betumes modificados com fibras .....	22
3.3. Métodos de ensaios utilizados .....	23
3.3.1. Caracterização mecânica das misturas betuminosas.....	23
3.3.2. Ensaios realizados no betume modificado .....	28
<b>4. Resultados .....</b>	<b>41</b>

4.1. Caracterização mecânica das misturas betuminosas.....	41
4.1.1. Módulo de rigidez.....	41
4.1.2. Fendilhamento por fadiga.....	49
4.1.3. Deformação permanente .....	50
4.2. Estudo de betumes .....	52
4.2.1. MSCR.....	52
4.2.2. LAS .....	66
4.2.3. Ensaio do módulo de rigidez complexo $ G^* $ .....	87
<b>5. Considerações Finais .....</b>	<b>98</b>
5.1. Conclusões.....	98
5.2. Trabalhos futuros .....	99
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>101</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Deformação de tracção e compressão em pavimentos flexíveis (Huang, 1993) .....	6
Figura 2.2 - Deformações num pavimento flexível (Reis, 2009) .....	8
Figura 2.3 - Fendilhamento térmico em um pavimento semi-rígido (Vaitkus <i>et al.</i> , 2012) .....	9
Figura 2.4 - Deformação permanente na mistura betuminosa (Franco, 2007).....	9
Figura 2.5 - Esquema das rodeiras por deformação permanente nas camadas de misturas betuminosas (Santucci, 2001).....	10
Figura 2.6 - Representação esquemática das Rodeiras ocasionadas por deformação permanente nas camadas granulares no pavimento rodoviário (Santucci, 2001).....	10
Figura 2.7 - Processo seco (a) e processo húmido (b) (Torres, 2014) .....	15
Figura 3.1 - Peneiração mecânica dos agregados .....	20
Figura 3.2 - Processo de execução das lajes e vigas .....	22
Figura 3.3 - Processo de produção de provete de betume modificado .....	23
Figura 3.4 - Variação do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas com a temperatura a que se encontram e com a velocidade (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	25
Figura 3.5 - Equipamento utilizado no ensaio de pista.....	28
Figura 3.6 – Esquematização da aplicação da tensão de cisalhamento em uma amostra de ligante betuminoso (Bernucci <i>et al.</i> 2007).....	29
Figura 3.7 - Representação da defasagem entre a tensão e a deformação em um provete ensaiado no DSR (Bernucci <i>et al.</i> 2007).....	29
Figura 3.8 - Diagrama vetorial dos parâmetros reológicos.....	30
Figura 3.9 - Reómetro utilizado nos ensaios de reologia .....	31
Figura 3.10 - Varredura de frequência de uma amostra .....	32
Figura 3.11 - Varredura de amplitude de amostra de ligante betuminoso (Hintz, 2012) .....	33
Figura 3.12 - Representação gráfica do ensaio de MSCR.....	35
Figura 3.13 - Curva limite entre zonas de baixa e alta elasticidade de ligantes betuminosos.....	37
Figura 3.14 - Representação gráfica das curvas mestras obtidas para cada temperatura (Hintz, 2012).....	38
Figura 3.15 – Representação gráfica das curvas mestras em uma única temperatura (Hintz, 2012) .....	39
Figura 4.1 - Variação do módulo de rigidez em função da frequência .....	42

Figura 4.2 - Módulo de rigidez em função da frequência no intervalo de 9 a 10 Hz. ....	42
Figura 4.3 - Variação do ângulo de fase em função da frequência .....	43
Figura 4.4 - Variação do ângulo de fase em função da frequência no intervalo de 9 a 10 Hz.....	44
Figura 4.5 – <i>Black Diagram</i> do módulo de rigidez em função do ângulo de fase .....	45
Figura 4.6 - <i>Black Diagram</i> em um trecho ampliado .....	45
Figura 4.7 - <i>Cole-Cole diagram</i> do módulo de viscosidade em função do módulo de elasticidade...	46
Figura 4.8 - <i>Cole-cole digram</i> em um trecho ampliado .....	46
Figura 4.9 - Representação do módulo elástico e viscoso em função da frequência.....	47
Figura 4.10 - Módulo elástico em função da frequência no intervalo de 9 a 10 Hz .....	48
Figura 4.11 - Módulo viscoso em função da frequência no intervalo de 9 a 10 Hz.....	48
Figura 4.12 - Módulo de rigidez em função dos ciclos .....	49
Figura 4.13 - Evolução da deformação das misturas betuminosas .....	51
Figura 4.14 - Amostras ensaiadas no ensaio de rodeira .....	52
Figura 4.15 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para fibras de 20 mm .....	54
Figura 4.16 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para fibras de 20 mm .....	54
Figura 4.17 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para fibras de 25 mm .....	56
Figura 4.18 -Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para fibras de 25 mm .....	56
Figura 4.19 -Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para fibras de 38 mm .....	57
Figura 4.20 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para fibras de 38 mm .....	58
Figura 4.21 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para fibras de 50 mm .....	59
Figura 4.22 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para fibras de 50 mm .....	59
Figura 4.23 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para percentagem de fibras de 12 % .....	60
Figura 4.24 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para percentagem de fibras de 12 % .....	61
Figura 4.25 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para percentagem de fibras de 14 % .....	62
Figura 4.26 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para percentagem de fibras de 14 % .....	62
Figura 4.27 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para percentagem de fibras de 17 % .....	63
Figura 4.28 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para percentagem de fibras de 17 % .....	64
Figura 4.29 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para percentagem de fibras de 20 % .....	65
Figura 4.30 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para percentagem de fibras de 20 % .....	65
Figura 4.31 - Módulo de rigidez em função da frequência de fibras de 20 mm .....	68
Figura 4.32 - Ângulo fase em função da frequência de fibras de 20 mm .....	68

Figura 4.33 - Tensão de cisalhamento em função da deformação das fibras de 20 mm .....	69
Figura 4.34 - Integridade do material em função do dano com fibras de 20 mm .....	69
Figura 4.35 - Módulo de rigidez em função da frequência de fibras de 25 mm .....	70
Figura 4.36 - Ângulo fase em função da frequência de fibras de 25 mm .....	71
Figura 4.37 - Tensão de cisalhamento em função da deformação das fibras de 25 mm .....	71
Figura 4.38 - Integridade do material em função do dano com fibras de 25 mm .....	72
Figura 4.39 - Módulo de rigidez em função da frequência de fibras de 38 mm .....	73
Figura 4.40 - Ângulo fase em função da frequência de fibras de 38 mm .....	73
Figura 4.41 - Tensão de cisalhamento em função da deformação das fibras de 38 mm .....	74
Figura 4.42 - Integridade do material em função do dano com fibras de 38 mm .....	74
Figura 4.43 - Módulo de rigidez em função da frequência de fibras de 50 mm .....	75
Figura 4.44 - Ângulo fase em função da frequência de fibras de 50 mm .....	76
Figura 4.45 - Tensão de cisalhamento em função da deformação das fibras de 50 mm .....	76
Figura 4.46 - Integridade do material em função do dano com fibras de 50 mm .....	77
Figura 4.47 - Módulo de rigidez em função da frequência com percentagem de 12 % de fibras.....	78
Figura 4.48 - Ângulo fase em função da frequência com percentagem de 12 % de fibras.....	78
Figura 4.49 - Tensão de cisalhamento em função da deformação com percentagem de 12 % de fibras .....	79
Figura 4.50 - Integridade do material em função do dano com percentagem de fibras de 12 %.....	79
Figura 4.51 - Módulo de rigidez em função da frequência com percentagem de 14 % de fibras.....	80
Figura 4.52 - Ângulo fase em função da frequência com percentagem de 14 % de fibras.....	81
Figura 4.53 - Tensão de cisalhamento em função da deformação com percentagem de 14 % de fibras .....	81
Figura 4.54 - Integridade do material em função do dano com percentagem de fibras de 14 %.....	82
Figura 4.55 - Módulo de rigidez em função da frequência com percentagem de 17 % de fibras.....	83
Figura 4.56 - Ângulo fase em função da frequência com percentagem de 17 % de fibras.....	83
Figura 4.57 - Tensão de cisalhamento em função da deformação com percentagem de 17 % de fibras .....	84
Figura 4.58 - Integridade do material em função do dano com percentagem de fibras de 17 %.....	84
Figura 4.59 - Módulo de rigidez em função da frequência com percentagem de 20 % de fibras.....	85
Figura 4.60 - Ângulo fase em função da frequência com percentagem de 20 % de fibras.....	85

Figura 4.61 - Tensão de cisalhamento em função da deformação com percentagem de 20 % de fibras .....	86
Figura 4.62 - Integridade do material em função do dano com percentagem de fibras de 20 % .....	86
Figura 4.63 - Curvas mestras das amostras SF, C12L20, C14L20, C17L20 e C20L20 .....	88
Figura 4.64 - Curvas mestras das amostras SF, C12L25, C14L25, C17L25 e C20L25 .....	89
Figura 4.65 - Curvas mestras das amostras SF, C12L38, C14L38, C17L38 e C20L38 .....	90
Figura 4.66 - Curvas mestras das amostras SF, C12L50, C14L50, C17L50 e C20L50 .....	91
Figura 4.67 - Curvas mestras das amostras SF, C12L20, C12L25, C12L38 e C12L50 .....	93
Figura 4.68 - Curvas mestras das amostras SF, C14L20, C14L25, C14L38 e C14L50 .....	94
Figura 4.69 - Curvas mestras das amostras SF, C17L20, C17L25, C17L38 e C17L50 .....	95
Figura 4.70 - Curvas mestras das amostras SF, C20L20, C20L25, C20L38 e C20L50 .....	96

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	5
Tabela 2.2 - Recomendações finlandesas para a adição de fibras em misturas betuminosas tipo SMA em relação à massa total da mistura (Pank, 1995) .....	12
Tabela 2.3 - Vantagens de desvantagens de alguns tipos de fibras (NCHRP, 2015).....	13
Tabela 2.4 - Vantagens e Desvantagens do processo seco e húmido (Musa et. al, 2019).....	16
Tabela 2.5 – Principais modificadores de ligantes betuminosos (NCHRP, 2015).....	18
Tabela 3.1 - Granulometria dos agregados minerais .....	20
Tabela 3.2 - Configuração dos provetes de betume.....	23
Tabela 3.3 - Pesos de betume e fibras.....	23
Tabela 3.4 - Valores estimados de Jnr para tensão de 3,2kPa e percentual de recuperação mínimo (AASHTO M320, 2016).....	36
Tabela 3.5 - Valores estimados de Jnr para tensão de 3,2 KPa e percentual de recuperação mínimo (FHWA, 2010).....	36
Tabela 4.1- Valores dos módulos de rigidez a frequência de 10 Hz .....	43
Tabela 4.2 - Valores dos ângulos na frequência de 10 Hz.....	44
Tabela 4.3 - Vida a fadiga das misturas betuminosas.....	50
Tabela 4.4 - Parâmetros do ensaio de pista .....	51
Tabela 4.5 – Variando a percentagem com o mesmo comprimento de fibra .....	53
Tabela 4.6 – Variando o comprimento com a mesma percentagem de fibra .....	53
Tabela 4.7 - Resultados do MSCR para fibras de 20 mm com percentagens 12, 14, 17 e 20 %....	55
Tabela 4.8 - Resultados do MSCR para fibras de 25 mm com percentagens 12, 14, 17 e 20 %....	57
Tabela 4.9 - Resultados do MSCR para fibras de 38 mm com percentagens 12, 14, 17 e 20 %....	58
Tabela 4.10 - Resultados do MSCR para fibras de 50 mm com percentagens 12, 14, 17 e 20 %..	60
Tabela 4.11 - Resultados do MSCR para fibras de 12 % com tamanhos de 20, 25, 38 e 50 mm...	61
Tabela 4.12 - Resultados do MSCR para fibras de 14 % com tamanhos de 20, 25, 38 e 50 mm...	63
Tabela 4.13 - Resultados do MSCR para fibras de 17 % com tamanhos de 20, 25, 38 e 50 mm...	64
Tabela 4.14 - Resultados do MSCR para fibras de 20 % com tamanhos de 20, 25, 38 e 50 mm...	66
Tabela 4.15 - Variando a percentagem com o mesmo comprimento de fibra .....	67
Tabela 4.16 - Variando o comprimento com a mesma percentagem de fibra .....	67

Tabela 4.17 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com fibras de 20 mm .....	70
Tabela 4.18 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com fibras de 25 mm .....	72
Tabela 4.19 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com fibras de 38 mm .....	75
Tabela 4.20 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com fibras de 50 mm .....	77
Tabela 4.21 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com percentagem de 12 % de fibras .....	80
Tabela 4.22 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com percentagem de 14 % de fibras .....	82
Tabela 4.23 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com percentagem de 17 % de fibras .....	85
Tabela 4.24 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com percentagem de 20 % de fibras .....	87
Tabela 4.25 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas .....	88
Tabela 4.26 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas .....	90
Tabela 4.27 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas .....	91
Tabela 4.28 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas .....	92
Tabela 4.29 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas .....	93
Tabela 4.30 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas .....	94
Tabela 4.31 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas .....	96
Tabela 4.32 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas .....	97

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

°C - Graus Celsius

E\* – Módulo complexo de rigidez misturas betuminosas (MPa)

G\* - Módulo de rigidez complexo (Pa) (*Complex shear modulus*)

Jnr – Conformidade não recuperável (%)

WTSair – Variação da profundidade da rodeira (mm/10<sup>3</sup> ciclos)

PRDAIR – Profundidade média proporcional da rodeira

RDAIR – Profundidade do cavado da rodeira

$\omega$  - Frequência (Hz)

AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials

B35/50 – Betume de penetração entre 35/50 dmm

DSR – Reómetro dinâmico de corte (*Dinamic Shear Rheometer*)

EN – Norma europeia (*European Norm*)

FRAC – Fibras no reforço do betão betuminoso (*Fibre-reinforced asphalt concrete*)

HMA – Mistura betuminosa a quente (*Hot Mix Asphalt*)

LAS – Ensaio de Varredura Linear de Amplitude (*Linear Amplitude Sweep*)

MSCR – Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (*Multiple Stress Creep and Recovery*)

WTT – Ensaio de Pista (*Wheel Tracking Test*)

## **1. Introdução**

### **1.1. Enquadramento temático**

O sistema rodoviário é uma infraestrutura de grande importância para o progresso socioeconómico de um país. É de extrema importância que a rede rodoviária se mantenha conservada atendendo os critérios mínimos de qualidade, cujo são alcançados obedecendo uma rigorosa manutenção e controlo. De forma acompanhar esses requisitos, vários estudos e métodos têm sido realizados para a introdução de materiais na mistura betuminosa, como as fibras sintéticas. Desta forma, visa diversificar uso de materiais disponíveis e encontrar novas soluções (Branco *et al.*, 2008).

O uso do reforço de fibras já foi utilizado na construção civil na antiguidade. Existe registro há mais de 4000 anos na construção de obras, como um arco feito de mistura de fibras com argila na China. Na engenharia de pavimentos o registro mais antigo é no uso de palhas nas especificações das construções egípcias (Button e Epps, 1981). No início dos anos 1900, patenteado nos Estados Unidos o uso de fibras de amianto em lajes betuminosas, deixando em 1960 de serem usadas esse tipo de fibra devido aos riscos a saúde e questões ambientais (Kietzman, 1960). A utilização de fibras no reforço do betão betuminoso (FRAC) começaram por volta dos anos 1960 em várias partes do mundo (Abtahi *et al.*, 2010). Assim, começou os estudos de fibras sintéticas para fins de reforço por conta de seu alto desempenho em propriedades de resistência à tração e durabilidade dos pavimentos.

Os pavimentos betuminosos estão constantemente sujeitos ao impacto da passagem de automóveis. Essa ação pode provocar o fendilhamento do pavimento através de esforços de tração por conta do efeito da flexão. Isso surge na parte inferior propagando-se até a superfície ocasionando sua rutura. A estrutura também está sujeita a algumas falhas prematuras, como sulcos (principalmente no verão) e rachaduras (principalmente no inverno). Para reduzir esse impacto, a aplicação de fibras sintéticas tem sido utilizada em diferentes partes do mundo pelo seu excelente efeito de melhoria fornecendo aumento a resistência a tração de uma mistura betuminosa.

Alguns estudos mostram a influência do comprimento e do diâmetro da fibra nas misturas betuminosas. Foi observado que o efeito do comprimento das fibras é mais significativo em relação ao diâmetro. Dependendo do tamanho, por exemplo, em fibras com comprimento muito grande podem provocar efeito negativo na estabilidade e no reforço. Assim, para elaboração de uma mistura betuminosa reforçada com fibras, o comprimento delas é de fundamental importância (Guo, 2020).

A avaliação do desempenho das misturas betuminosas pode ser realizada através dos ensaios de Módulo de rigidez, Resistência a fadiga, Resistência à deformação permanente e Resistência à fratura. Um dos

métodos de ensaio do Módulo de Rigidez e Resistência a Fadiga é com provetes prismáticos com flexão em quatro pontos (Palha *et al.*, 2009). No ensaio para avaliar a resistência à fadiga, o material sofre rotura no momento em que a sua rigidez atinge metade da rigidez inicial (Pais e Palha, 2010).

As fibras que ficam dispersas fornecem uma grande quantidade de área superficial por unidade de peso, desta forma aumenta a área de contato com o betume, com isso são capazes de agir como materiais de enchimento (García, *et al.*, 2013).

Assim, as fibras sintéticas afiguram como aditivos de fácil aplicação nas misturas betuminosas (Ziari e Moniri, 2019). No mecanismo de produção das misturas as fibras podem ser adicionadas na tolva ou nos silos do filer sem muitas dificuldades (Ferreira, 2012). No entanto, a partir de suas propriedades físicas, cada tipo de fibra potencializa algumas características mecânicas nas misturas mais do que que outras. Por exemplo, as fibras de aço melhoram a estabilidade Marshall, a resistência à tração indireta, mas apresenta pouca resistência na perda de partículas, as fibras orgânicas dificultam o escoamento do ligante na mistura, mas reduz a aderência com o agregado (Acevedo *et al.*, 2019).

## **1.2. Objetivos**

O principal objetivo deste presente trabalho é melhorar o desempenho dos pavimentos rodoviários com a inclusão de fibras sintéticas nas misturas betuminosas com o intuito de tirar um melhor aproveitamento das propriedades que conferem a essas novas misturas, bem como aprimorar a resistência ao fendilhamento e a deformação permanente. Complementando isso, pretende-se estudar o comportamento das fibras em que elas formam uma suspensão no betume.

Objetivos específicos

- Estudar o comportamento mecânico da mistura betuminosa de acordo com desempenho nos ensaios de Módulo de rigidez, Resistência à fadiga e Resistência à deformação permanente;
- Determinar o percentual e o comprimento de fibras ideais a serem utilizado nas misturas betuminosas e nos betumes modificados, a fim de obter uma melhoria no desempenho;
- Estudar o comportamento do betume modificado com fibras.

## **1.3. Organização da dissertação**

A presente dissertação é apresentada em cinco capítulos distintos para além deste capítulo onde se faz a introdução com o enquadramento temático, definindo-se os principais objetivos e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo Estado da Arte apresenta-se sobre uma revisão bibliográfica de vários autores sobre este tipo de material em estudo e sobre as técnicas existentes.

No terceiro capítulo Materiais e Métodos inicia-se com a apresentação dos materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho, bem como dos métodos utilizados nas diversas fases do projeto.

No quarto capítulo Resultados apresenta-se os resultados obtidos dos ensaios laboratoriais inserindo-se uma análise sobre os mesmos.

No quinto e último capítulo Considerações Finais realiza-se uma conclusão sobre os resultados obtidos nesta dissertação, assim como os trabalhos futuros que possam ser realizados no domínio desta temática.

## **2. Estado da Arte**

Este capítulo inicialmente apresentará uma introdução em que abordará o conceito e sobre os tipos de pavimentos rodoviários e as suas características. Em seguida é abordado sobre o comportamento das misturas betuminosas no pavimento durante sua vida útil, bem como as solicitações a que estão sujeitos e as consequências e danos que podem sofrer.

Aborda o uso de fibras sintéticas nas misturas betuminosas. São apresentados as vantagens e desvantagens dos tipos de fibras existentes, bem como as condições utilizadas para inseri-las nas misturas betuminosas.

Por fim, refere-se à introdução das fibras no betume, com intuito de modifica-lo, apresentando-se suas principais características.

### **2.1. Introdução**

Desde meados da década de 1960, os pesquisadores vêm refinando e avançando novos estudos nas infraestruturas rodoviárias em busca da qualidade dos níveis de serviço e do desempenho dos pavimentos, buscando-se alternativas e métodos capazes de assegurar os acréscimos das cargas dos veículos e do aumento do tráfego. A utilização de aditivos capazes de fornecer resultados satisfatórios ao dimensionamento com novos materiais e técnicas na pavimentação pode-se obter uma economia nos projetos e um melhoramento no desempenho dos pavimentos.

#### **2.1.1. Pavimentos rodoviários**

Os pavimentos rodoviários são estruturas concebidas por cima da terraplenagem no traçado da via, que recebe o carregamento dos veículos e transmite as cargas para o solo de fundação da infraestrutura viária, proporcionando condições adequadas de conforto e segurança de utilização para os usuários. O desempenho é determinado pelas ações climáticas e do tráfego que atuam sobre ele, por sua organização em que envolve o número e espessura de cada camada, juntamente com os materiais utilizados, e pela constituição do solo de fundação (Branco *et al.*, 2008).

Em uma análise de um perfil de pavimento rodoviário, observa-se que são compostos basicamente por três tipos de secção. As camadas superiores, camadas granulares e pelo solo de fundação. Nessa sequência, da face superior ao solo natural, a qualidade e a resistência dos materiais vão diminuindo, bem como também as solicitações dos esforços vão se reduzindo com a profundidade (Francisco, 2012).

De acordo com Branco *et al.* (2008), os pavimentos podem ser classificados de acordo com os materiais que são constituídos, a que correspondem desempenhos diferentes dependendo da situação em que são requisitados de carregamento na via juntamente com determinados tipos de clima. Além dos materiais que são formados, eles podem ser categorizados de acordo com sua deformabilidade. O Manual de Concepção de Pavimentos (MACOPAV) para a Rede Rodoviária Nacional, da Junta Autónoma de Estradas, apresenta a classificação dos pavimentos em três tipos: flexíveis, rígidos e semirrígidos como mostra na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco *et al.*, 2008)

Tipo de Pavimento	Materiais (Ligantes)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonados e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semirrígido	Hidrocarbonados, hidráulicos e granulares	Reduzida

### **Pavimentos flexíveis**

Os pavimentos flexíveis são estruturas estratificadas por camadas superiores de misturas betuminosas, ou seja, como mostrado na Tabela 2.1 são formados por elementos estabilizados com ligantes hidrocarbonados em que se apoiam em camadas inferiores constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos.

Esse tipo de pavimento normalmente é projetado em camadas mais espessas ou camadas mais finas. Na primeira situação refere-se ao facto de a estrutura ser composta por camadas de misturas betuminosas com uma profundidade maior, abaixo da camada de desgaste de aproximadamente de 0,15 a 0,40 m, já nos pavimentos flexíveis dimensionados com uma profundidade pequena, onde ocorre o maior uso por ligeiros, a camada betuminosa é inferior a 0,15 m, sendo esta última situação destinada a uso de vias com baixa circulação de veículos (InIR, I.P. 2009).

Em relação aos pavimentos flexíveis, os critérios de falhas atuais usados são a tensão de compressão no plano vertical, cujo o valor máximo está na superfície, a tensão de tração horizontal na parte inferior da camada betuminosa, cujo nesse ponto ela atinge um valor máximo devido a flexão da camada e a deformação vertical no topo da camada granular e no solo de fundação, em que sofrem esforços de compressão (Figura 2.1).

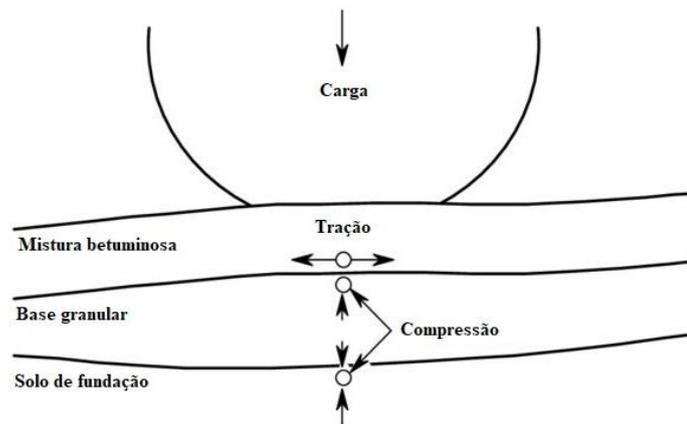


Figura 2.1 - Deformação de tração e compressão em pavimentos flexíveis (Huang, 1993)

As forças atuantes nos pavimentos flexíveis são determinantes para gerarem os estados últimos de ruína. A deformação permanente e o fendilhamento das camadas betuminosas são determinantes para o estudo de dimensionamento.

### **Pavimentos rígidos**

Os pavimentos rígidos em geral são associados ao betão de cimento de elevada resistência. São compostos por uma camada superficial de betão de cimento Portland, ou seja, são formados por placas de materiais granulares estabilizados com ligantes hidráulicos com ou sem armação, sobrepostas sobre camada inferior composta de material granular estabilizado com ligante hidráulico ou somente uma camada de elementos granulares (Branco *et al.*, 2008).

Neste caso, a laje de betão satisfaz as funções da camada de desgaste e da camada de base. Normalmente a camada de betão de cimento é dimensionada em aproximadamente de 0,15 a 0,40 m de espessura. As tensões provocadas pelo carregamento distribuem-se por através de uma grande área em relação a área de contato da carga, minimizando as forças reproduzidas para as camadas inferiores (InIR, I.P. 2009).

### **Pavimentos semirrígidos**

Os pavimentos semirrígidos possuem aspetos dos dois tipos de pavimentos mostrados anteriormente. São compostos por camadas betuminosas e por camadas de base ou sub-base com materiais cimentados, ou seja, são compostas por agregados estabilizados com ligantes hidráulicos, que também sofrem esforços de tração (Bernucci *et al.*, 2007). Normalmente possuem uma espessura total de 0.20 a 0.50 m. Neste tipo de execução podem ser consideradas estruturas do tipo “diretas” e estruturas “inversas”. Na primeira situação as camadas betuminosas descarregam as cargas diretamente sobre a

camada de base e na segunda situação existe uma camada de base granular intercalando a camada betuminosa e a camada de betão pobre (Branco *et al.*, 2008).

No facto dos pavimentos rígidos, por conta da elevada rigidez da laje de betão frente as camadas inferiores, o carregamento da face superior do pavimento é distribuído por uma grande área comparado com a área de contacto pneu-pavimento, reduzindo as tensões repassadas as demais camadas. Já os pavimentos revestidos por misturas betuminosas, essa rigidez é transmitida proporcionalmente de acordo com o material e geometria das camadas inferiores, nesta situação o carregamento é feito numa área bem reduzida (Bernucci *et al.*, 2007).

### **2.1.2. Comportamento das misturas betuminosas**

As misturas betuminosas são um material que consistem basicamente em ligante betuminoso e agregados, sendo um dos elementos mais utilizados na construção de pavimentos rodoviários. Eles têm sido utilizados como componentes da primeira camada dos pavimentos flexíveis por conta de diversas vantagens, como grande adesão dos agregados de ligação aos ligantes, são comumente chamados como HMA (*Hot Mix Asphalt*). Os benefícios desse tipo de pavimento é que proporciona uma excelente estabilidade, propriedades mecânicas aprimoradas, um excelente conforto de condução, durabilidade e resistência a água (Davar *et al.*, 2017; Zhi *et al.*, 2012).

O comportamento das misturas betuminosas está definido pelas ações, das cargas e das condições climáticas, que atuam sobre elas, pela sua constituição da camada e pelas características dos materiais. No pavimento rodoviário as camadas inferiores também influenciam no desempenho da camada composta pelas misturas betuminosas.

Quanto as ações das cargas no pavimento, elas estão relacionadas com o peso dos veículos e com as tensões tangencias na superfície do pavimento que são geradas no decorrer da movimentação dos veículos, ou seja, nas partidas e frenagens. Em relação as ações das condições climáticas estão caracterizadas pela ação da temperatura, em que a rigidez é inversamente proporcional a temperatura do ar (Branco *et al.*, 2008).

Em relação aos fatores ambientais, várias patologias podem aparecer desfavorecendo a estrutura do pavimento. As propriedades mecânicas do betume mostram-se pouco dúctil em temperaturas baixas favorecendo a formação de rachaduras através do fendilhamento térmico, a camada superior também está suscetível a altas temperaturas tornando-se fluido, provocando a deformação permanente (*rutting* e fendilhamento por fadiga em temperaturas médias (Wu *et al.*, 2008).

Destaca-se que uma das desvantagens dos pavimentos flexíveis é a fragilidade do material em relação às tensões. Dessa maneira, a aplicação de reforço nas misturas betuminosas é uma das medidas projetadas para melhorar a resistência à tração e propriedades mecânicas, principalmente quando os métodos tradicionais não funcionam de acordo com a solicitação das cargas, fatores ambientais e exigências estruturais. A aplicação de fibras como componente de reforço é uma das formas de tentar mitigar as desvantagens em relação a tração (Bonica *et al.*, 2016).

### Fendilhamento por fadiga

O fendilhamento por fadiga (Figura 2.2) é um dos danos que ocorrem com mais frequência nos pavimentos betuminosos. Ocorre uma rotura devido ao carregamento cíclico na passagem dos veículos a longo prazo e a tensão necessária para isso ocorrer é inferior aquela necessária para um rompimento instantâneo. Esse mecanismo pode ocorrer na forma longitudinal ou transversal (Gallegos e García-Morales *et al.*, 2011).

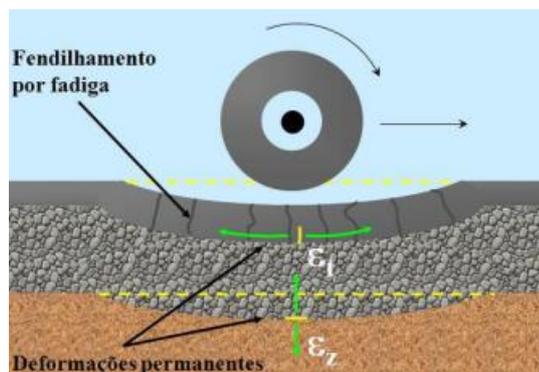


Figura 2.2 - Deformações num pavimento flexível (Reis, 2009)

O fendilhamento por fadiga é o mecanismo de destruição mais comum nos pavimentos betuminosos. Portanto, a vida útil de um pavimento rodoviário é influenciada de forma significativa pela sua suscetibilidade ao fendilhamento por fadiga.

### Fendilhamento térmico

Nos pavimentos o fendilhamento térmico (Figura 2.3) é uma rotura frágil que acontece em baixas temperaturas de serviço, ou em locais que possuem uma ampla variação térmica. Observa-se a formação desse fenômeno originando-se na face superior do pavimento prolongando-se para as camadas inferiores.

Em relação ao ligante, a baixas temperaturas ocorre um efeito vítreo e o seu volume específico diminui, favorecendo a ocorrência de fendas na direção perpendicular ao tráfego. Essa condição da temperatura ocasiona uma transição do estado viscoelástico do betume para um estado sólido e quebradiço. Neste caso a baixas temperaturas, quando as tensões ultrapassam a resistência do betume, ocorre o surgimento do fendilhamento transversal (Gallegos e Garcia-Morales, 2011).



Figura 2.3 - Fendilhamento térmico em um pavimento semi-rígido (Vaitkus *et al.*, 2012)

### **Deformação permanente**

No pavimento rodoviário a deformação permanente pode ocorrer no solo de fundação, nas camadas granulares e nas camadas betuminosas. Neste tipo de deformação ocorre uma deformação plástica em que o pavimento se deforma permanentemente sem voltar a forma original, passando da fase elástica para plástica. A aplicação contínua de cargas resulta em uma deformação permanente e normalmente está presente em zonas com climas quentes. Com isso ocorre uma redução da viscosidade do ligante e nesse cenário o comportamento viscoso apresenta-se superior à recuperação da elasticidade. Uma das características desse fato é possível ser visualizada na camada superficial a presença de rodeiras, em que se identifica pelos rodados marcados em um perfil transversal, representado na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Deformação permanente na mistura betuminosa (Franco, 2007)

A deformação permanente formada através de rodeiras pode ocorrer devido as camadas betuminosas, camadas granulares e solo de fundação. Elas podem ser de grande raio quando possui influência da deformação nas camadas inferiores, e de pequeno raio quando possui influência da deformação nas camadas superiores (Pereira e Miranda, 1999). O esquema das rodeiras de pequeno raio é representado na Figura 2.5.

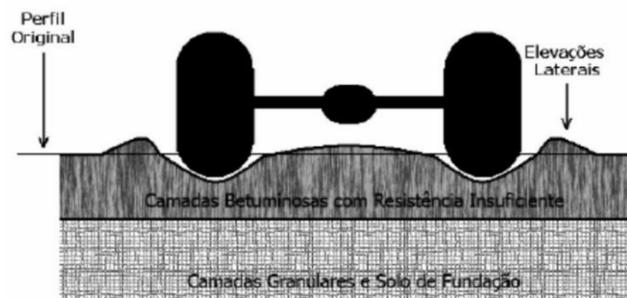


Figura 2.5 - Esquema das rodeiras por deformação permanente nas camadas de misturas betuminosas (Santucci, 2001)

As deformações de grande raio, representada na Figura 2.6, é considerada a pior situação para efeitos de dimensionamento, por conta da menor resistência em solos de fundação. As camadas granulares podem apresentar problemas também, quando possuem baixa capacidade estrutural, deforma-se quando está sujeito a solicitações elevadas. O teor de umidade no solo e a drenagem da via também podem prejudicar a estrutura da fundação, reduzindo seu módulo.

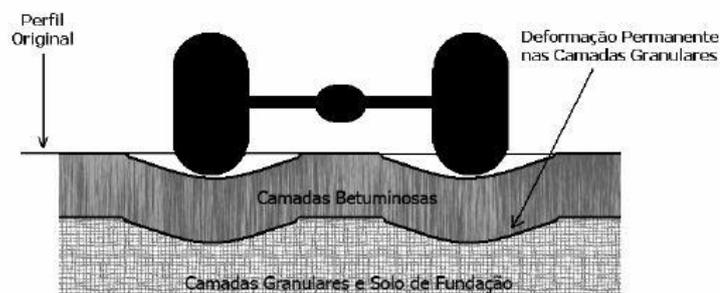


Figura 2.6 - Representação esquemática das Rodeiras ocasionadas por deformação permanente nas camadas granulares no pavimento rodoviário (Santucci, 2001)

A deformação permanente das misturas betuminosas em relação a quantidade de betume, verifica-se que as misturas com mais betume apresentam um desempenho pior à deformação permanente. As fibras são usadas principalmente para aumentar a resistência na deformação permanente, em que as fibras não só aumentam a estabilidade Marshall reduzindo os vazios nos agregados como também aumentam a viscosidade e a rigidez (Xu *et al.*, 2014).

Em termos de quantificação da deformação permanente em rodeiras de pequeno raio e de grande raio são medidas em milímetros.

## **2.2. Uso de fibras nas misturas betuminosas**

As misturas betuminosas têm sido consideradas na maior parte dos projetos de pavimentos flexíveis por conta das suas amplas vantagens em relação a aderência do betume aos agregados, bem como sua boa estabilidade. Em um pavimento rodoviário as cargas de tráfego causam danos graves como fissuras e deformações permanentes, que podem ser intensificadas com a presença de água e temperatura (Abtahi *et al.* 2010). Com a finalidade de mitigar falhas em estradas e aumentar sua durabilidade, engenheiros e cientistas estão em busca de novas técnicas e aditivos para melhorarem o desempenho das misturas betuminosas. Nesta perspectiva, as fibras podem fornecer um adicional na resistência a tração e energia de deformação quando as misturas são submetidas a processos de fratura e fadiga pelo carregamento das vias (Mahrez *et al.* 2005; Ge *et al.* 2014).

### **2.2.1. Tipos de fibras**

Muitos tipos e formas de fibras têm sido usados nas misturas betuminosas, experimental ou rotineiramente. As fibras de celulose, minerais e poliméricas são as mais comuns. O mais comumente usados em fibras de polímero são poliéster, polipropileno, aramida e combinações de polímeros. Cada tipo de fibra possui seu ponto de fusão, portanto a temperatura durante o processo de execução da adição delas juntamente com os outros materiais deve ser considerada, para que não ocorra o derretimento das mesmas. A produção de fibras sintéticas normalmente envolve estiramento de um polímero, derrete através de pequenos orifícios (Busching *et al.* 1970).

Segundo Yin e Wu (2018), foram investigados o desempenho mecânico de diferentes tipos de fibras, como amianto, poliéster, poliácrlonitrila, náilon e polipropileno. Relataram um aumento do número de ciclos para falha por fadiga ao adicionar 0,3% de fibras de poliéster à mistura. No mesmo sentido, estudos

realizados por Chen (2009) sugere uma introdução de 0,35% de quantidade de fibras de poliéster em peso da mistura betuminosa.

Em relação às fibras minerais, Xiong *et al.* (2015) estudaram os efeitos da adição de fibras de basalto e brucita na mistura betuminosa. Foi obtida estabilidade significativa em alta temperatura, resistência à fratura em baixa temperatura e suscetibilidade à umidade. Já para as fibras de polipropileno, um aumento de 58% no índice de estabilidade de Marshall da mistura betuminosa foi alcançado por Tapkın (2008) ao adicionar 1,0% de fibras. Além disso, o autor indicou que 1% de polipropileno estende a vida à fadiga em 27%.

Segundo Lee *et al.* (2005), concluíram que a adição de 1% de peso, em relação a massa da mistura betuminosa, de fibras de náilon de 12 mm de comprimento aumentou a energia de fratura da mistura betuminosa. Já o betão betuminoso reforçado com fibras com fibras de náilon apresentou uma redução de 18% em sua resistência à tração indireta.

A seguir são apresentadas algumas fibras de origem orgânica, inorgânica e mineral. A percentagem de fibras de celulose ou minerais na Europa é geralmente 0,3% da massa total da mistura betuminosa. De acordo com a Tabela 2.2 mostra a percentagem ótima de adição de fibras às misturas, representado pelas especificações finlandesas (Pank, 1995).

Tabela 2.2 - Recomendações finlandesas para a adição de fibras em misturas betuminosas tipo SMA em relação à massa total da mistura (Pank, 1995)

Origem	Tipos de fibra	Exemplo	Percentagem de fibra em relação a massa total da mistura (%)
Orgânica	Fibra de celulose	Algodão	0,3 – 0,5
Inorgânica	Fibra de vidro	PRFV	0,4 – 0,6
Mineral	Fibra Mineral	Fibras metálicas	0,7 – 0,9

A maioria dos tipos de fibras comumente usados estão resumidas na Tabela 2.3, mostrando as vantagens e as desvantagens.

Tabela 2.3 - Vantagens de desvantagens de alguns tipos de fibras (NCHRP, 2015)

Fibras	Vantagens	Desvantagens
Celulose	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estabiliza aglutinante em matriz de pedra graduada com abertura e lacuna misturas de betume (SMA);</li> <li>- Absorve o aglutinante, permitindo um alto teor de aglutinante para uma mistura mais durável;</li> <li>- Relativamente barato.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não é forte no modo de tração;</li> <li>- A alta absorção de betume, aumenta os custos.</li> </ul>
Mineral	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estabiliza o aglutinante em misturas de SMA com graduação aberta e lacuna;</li> <li>- Não é tão absorvente quanto a celulose;</li> <li>- Fibras eletricamente condutoras têm sido usadas para indução aquecimento para fins de degelo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alguns podem corroer ou degradar por causa das condições de umidade;</li> <li>- Pode criar misturas agressivas que são difíceis de compactar, causando danos aos pneus se usado em superfícies.</li> </ul>
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resiste a fraturas, sulcos e buracos;</li> <li>- Aumenta a estabilidade e a resistência da mistura;</li> <li>- Maior ponto de fusão do que polipropileno;</li> <li>- Alta resistência à tração.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior gravidade específica significa menos fibras por unidade de peso adicionado;</li> </ul>
Polipropileno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduz as fraturas.</li> <li>- Forte adesão ao betume.</li> <li>- Dispersa-se facilmente no betume.</li> <li>- Resistente a ácidos e sais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ponto de fusão mais baixo do que alguns outros materiais de fibra requerem controle das temperaturas de produção.</li> <li>- Começa a encurtar a 148°C;</li> </ul>
Aramida	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resiste a fraturas;</li> <li>- Aumenta a estabilidade e a resistência da mistura;</li> <li>- Alta resistência à tração;</li> <li>- Pode contrair em temperaturas mais altas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo e efetividade não comprovada / varia.</li> </ul>
Fibra de vidro	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta resistência à tração;</li> <li>- Baixo alongamento;</li> <li>- Alta recuperação elástica;</li> <li>- Alto ponto de amolecimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frágil;</li> <li>- As fibras podem quebrar onde se cruzam;</li> <li>- Pode quebrar durante a mistura e compactação;</li> </ul>

### **2.2.2. Uso dessas técnicas de introdução das fibras pelo mundo**

Um projeto realizado pela Thiagarajar College of Engineering Madurai em Nova Deli na Índia utilizou polímeros (polietileno, polipropileno e poliestireno) na mistura betuminosa através do processo seco para execução de vias em zonas rurais. Neste estudo verificou-se um melhoramento no desempenho em relação as misturas convencionais, como a ausência de fendilhamento. O material polimérico foi introduzido sobre os agregados quentes, criando-se um filme em torno deles, em que se melhorou a adesividade com o betume que foi adicionado posteriormente. Dessa maneira, a mistura atingiu valores altos na estabilidade Marshall e a percentagem de betume foi reduzida.

Algumas instituições já usam fibras em misturas betuminosas, como por exemplo o Departamento de Transporte do Estado de Ohio nos Estados Unidos, em que possui um padrão com as instruções detalhadas para a utilização de fibras de polipropileno. Elas podem ser introduzidas na mistura betuminosa em uma proporção que pode ser modificada de acordo com os resultados desejados. As fibras e os agregados devem ser misturados a seco por mais de 10 segundos logo após a introdução delas, sendo que esse tempo pode ser aumentado caso os resultados satisfatórios não sejam atingidos (ITEM 400HS, 1998).

### **2.2.3. Condições à incorporação das fibras na mistura betuminosa**

A introdução de fibras às misturas betuminosas pode melhorar significativamente a qualidade dos pavimentos. Esse processo pode acontecer de duas maneiras, pelo método húmido, em que ocorre a adição das fibras diretamente sobre o betume, ou pelo método seco, em que as fibras são adicionadas como um agente modificador diretamente no misturador da produção betuminosa.

O método húmido consiste em modificar o betume com a introdução de materiais, depois dos aditivos serem classificados de acordo com o tipo, eles são misturados com o betume no período de digestão. Depois desse procedimento de modificação do betume é que ele será utilizado na mistura com os agregados. Este é o procedimento mais estudado por mostrar várias vantagens, de modo que amplia o tempo de serviço e melhora o desempenho do pavimento, bem como ter um maior controlo das especificações do aglomerante na execução da estrada (Jan *et al.*, 2017; Vila-Cortavitate *et al.*, 2018). Nessa modificação possui algumas desvantagens como o elevado custo de execução e em temperaturas de aplicação e na compactação do ligante ele apresenta viscosidade alta, outro ponto negativo está na instabilidade quando armazenados (Miranda, 2014).

No método húmido uma das formas de avaliar as propriedades do betume modificado é através de ensaios de reologia, podendo verificar a eficiência da modificação. A análise reológica pode ser realizada uma caracterização através de um reómetro, como o comportamento do betume (EN 14770) (Costa *et al.*, 2018; Miranda, 2014).

No método seco os aditivos são incorporados aos agregados secos e quentes e só depois é introduzido o betume. As vantagens que o processo seco possui em relação ao húmido é de ser um processo mais simples, podendo ser realizado em qualquer usina de betume sem modificações importantes e é economicamente mais barato pois não há necessidade de modificar o ligante, já que as fibras são adicionadas diretamente aos agregados.

De acordo com a Figura 2.7 (a), apresenta o processo seco em que mistura as fibras com os agregados que funcionam como aglutinante da mistura. Na Figura 2.7 (b) apresenta o processo húmido, em que dependendo do tipo de aditivo e da sua natureza, no processo os agregados são misturados com o aditivo antes de adicionar o ligante ou adicionado após a mistura o ligante e os agregados. Normalmente os trabalhos de campo que utilizam o reforço das fibras em misturas betuminosas preferem o processo seco, por conta dos eventuais problemas que causam o processo húmido quando ocorre a introdução das fibras diretamente no betume (Musa *et. al.*, 2019).



(a)



(b)

Figura 2.7 - Processo seco (a) e processo húmido (b) (Torres, 2014)

No entanto, alguns pesquisadores modificaram os métodos de mistura para obter melhores dispersão de fibra. Eles reconheceram que o método seco é adequado para fibras devido à sua dispersão homogênea e colocação dela na mistura. As vantagens e desvantagens entre os processos estão resumidos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Vantagens e Desvantagens do processo seco e húmido (Musa et. al, 2019)

	Vantagens	Desvantagens
Processo seco	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilidade na dispersão e introdução nas misturas;</li> <li>- Comumente utilizado nos trabalhos de campo;</li> <li>- Os aditivos recobrem as faces dos agregados melhorando as propriedades das superfícies;</li> <li>- Diminui os problemas em relação ao embolamento e aglomeração das fibras na mistura;</li> <li>- A temperatura necessária utilizada na mistura é a mesma de assentamento de estradas;</li> <li>- Duplica a propriedade de ligação dos agregados;</li> <li>- Nenhum novo equipamento é necessário;</li> <li>- Nenhuma evolução de quaisquer gases tóxicos já que a temperatura máxima é de 180° C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adesão do agregado ao aglutinante pode ficar comprometida por conta de que uma parte das fibras podem derreter quando adicionadas aos agregados quentes.</li> </ul>
Processo húmido	<ul style="list-style-type: none"> <li>- São apropriados para plásticos como polietileno de baixa e alta densidade e polipropileno (PP) em que atingem temperaturas de fusão abaixo de 160° C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não derrete no betume;</li> <li>- As fibras grudam umas nas outras;</li> <li>- Durante o processo de mistura consome-se mais tempo e energia;</li> <li>- É necessária uma mecânica poderosa;</li> <li>- A adição inadequada de betume pode causar bolsas de ar nas estradas, por conta disso é necessário um resfriamento adicional.</li> </ul>

#### 2.2.4. Problemas da introdução de fibras nas misturas betuminosas

A utilização de fibra para melhorar as propriedades do material tem aumentado na base científica nos últimos anos em engenharia civil. Teoricamente, as tensões podem ser transmitidas às fibras fortes, reduzindo assim as tensões na mistura betuminosa relativamente fraca. A existência de boa adesão entre as fibras e o aglutinante de betume ajuda a transferir com eficiência as tensões em uma área de

superfície maior no que a fibra pode suportar essa adesão (McDaniel, 2015). Fibra muito longa pode criar o problema de formação de bolas em que parte da fibra pode ficar grudada e pode não atingir um adequado desempenho na mistura betuminosa, enquanto a fibra muito curta pode não fornecer um efeito de reforço adequado na mistura (Jahromi, 2015). Além disso, a fibra precisa ser distribuída homogeneamente na mistura para prevenir as concentrações de tensões (Busching *et al.*, 1968). Teor de fibra muito baixo pode aumentar a probabilidade de criar uma seção transversal fraca para a propagação de fraturas na superfície, enquanto teor de fibra muito alta o conteúdo pode reduzir a coesão entre os agregados e encolher todas as fibras em um só lugar (Alidadi *et al.*, 2016). Portanto, é essencial selecionar uma quantidade adequada de fibra e otimizar a fibra característica na mistura.

Fibras são geralmente adicionadas para evitar que o ligante escoe quando a mistura betuminosa estiver quente. Mastiques que consiste em fibras e betume pode ser considerado como o meio que liga o agregado, tornando-se assim uma parte essencial da mistura betuminosa. O mecanismo da fibra que afeta o betume é complexo e os efeitos no desempenho do pavimento são intensos. A deterioração do pavimento ocorrerá quando houver muito enrijecimento e envolve a desintegração e fratura sob a influência do clima e carregamento de tráfego. Portanto, a compreensão das propriedades dos mastiques de fibra de betume é essencial a fim de ter um melhor controle no desempenho de pavimentos betuminosos (Chen, 2005).

### **2.2.5. Influência do comprimento das fibras**

As fibras devem ter uma cor única uniforme e deve atender aos requisitos do tipo do material, comprimento, resistência a tração e temperatura de fusão. No que respeita ao comprimento das fibras, foram desenvolvidos vários experimentos, como o trabalho realizado por Wang (2019), que examinou o efeito das fibras com diferentes comprimentos (sem fibra, 3 mm, 6 mm, 9 mm e 12 mm). Foram realizados diversos testes para descobrir o comprimento ideal, como o teste de rastreamento de roda, teste de resistência a fraturas em baixa temperatura e teste de feixe de flexão em quatro pontos.

Quanto ao efeito do comprimento da fibra, com o aumento do comprimento da fibra, os ciclos de falha primeiro aumentaram e depois diminuíram. E os corpos de prova com 9 mm apresentaram os maiores valores de fadiga. Portanto, indica que a mistura asfáltica com 9 mm de comprimento das fibras de basalto apresenta o melhor desempenho em fadiga.

Ainda de acordo com o estudo de Wang (2019), no ensaio de pista (*Wheel Tracking Test* ou WTT), na tensão destrutiva o comprimento que obteve o melhor desempenho foram as de 9 mm. Da mesma forma, no teste de resistência a fratura em baixa temperatura obteve-se o melhor desempenho.

### 2.3. Betumes modificados com fibras

Os betumes modificados com a introdução de fibras são misturados juntamente com o betume aquecido para obter-se uma melhor homogeneidade. Essa interação traz duas funcionalidades, as fibras possuem uma grande superfície de contato com o betume, favorecendo uma maior fixação de betume nas suas interfaces, melhorando a resistência à tração, a outra característica seria pelo facto do seu perfil alongado (ter um comprimento muito maior em relação ao seu diâmetro) reforça todo o ligante que envolve os agregados, obtendo-se um melhor desempenho das misturas betuminosas (Branco *et al.*, 2008).

A Tabela 2.5 apresenta alguns tipos de fibras utilizados em betumes e suas contribuições no comportamento destes.

Tabela 2.5 – Principais modificadores de ligantes betuminosos (NCHRP, 2015)

Fibra	Efeito		
	Deformação Permanente	Fendilhamento por Fadiga	Fendilhamento em baixas temperaturas
Polipropileno	X	X	X
Poliéster	X		X
Aço	X	X	X
<i>Reinforcement</i>	X	X	X
Celulose	X		
Mineral	X		

### **3. Métodos e materiais**

Neste capítulo apresenta os materiais utilizados no desenvolvimento do estudo, nomeadamente os agregados, o filler, as fibras sintéticas, o betume, assim como também as próprias misturas betuminosas. Esta secção tem como objetivo também de apresentar todas diferentes etapas e diferentes atividades que foram feitas na realização dessa dissertação para o estudo do melhoramento do desempenho das misturas betuminosas com a adição de fibras sintéticas e sobre o estudo do comportamento do betume com a introdução de fibras.

De seguida descreve-se os ensaios realizados para este trabalho. Assim são apresentados os experimentos utilizados nas misturas betuminosas: módulo de rigidez, resistência à fadiga, resistência à deformação permanente e a resistência a fratura. Bem como os ensaios executados com o betume com adição de fibras: Módulo  $G^*$  (Complex shear modulus), LAS (Linear Amplitude Sweep) e o MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery).

Descreve-se também o procedimento utilizado na introdução das fibras nas misturas betuminosas e ao betume.

#### **3.1. Materiais utilizados**

##### **3.1.1. Materiais utilizados nas misturas betuminosas**

###### **Agregados**

Neste trabalho foram utilizados agregados de origem granítica para fabricação das misturas betuminosas. Seguindo essas especificações, a seleção dos agregados a serem utilizados é de grande relevância para obtenção de uma mistura satisfatória. Eles podem corresponder até 80% de todo o volume da mistura betuminosa.

De acordo com a norma NP 13043, define-se as condições dos agregados a serem utilizados, em que um bom imbricamento das partículas pode ser obtido através de uma boa granulometria, resultando em uma boa distribuição das cargas.

A matriz de agregados é responsável pela porosidade, resistência à deformação e rugosidade das misturas betuminosas, entre outras propriedades. Utilizou-se sempre os mesmos agregados minerais para produção de todas as misturas betuminosas, nomeadamente, agregados britados de origem

granítica e filer calcário. Os agregados minerais foram fornecidos nas frações 0/4, 0/6, 2/6 e 6/10. Apresenta-se em seguida a composição granulométrica dos agregados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Granulometria dos agregados minerais

Peneiro (mm)	Fração de agregados minerais			
	0/4	2/6	6/10	Filler
14	100.0	100.0	100.0	100.0
10	100.0	100.0	94.0	100.0
6.3	100.0	87.0	10.0	100.0
4	99.0	19.0	1.0	100.0
2	91.0	4.0	0.0	100.0
0.5	55.0	2.0	0.0	100.0
0.125	19.0	1.0	0.0	100.0
0.063	10.0	1.0	0.0	100.0
Percentagem	23.1	27.6	45.5	3.9
		100.0		



Figura 3.1 - Peneiração mecânica dos agregados

## Betume

O material betuminoso preenche as faces dos agregados e enche parcialmente os espaços vazios (Gallegos e García-Morales, 2011). O betume utilizado nas misturas betuminosas foi o 35/50, por ser um dos mais utilizado em Portugal em todas as misturas betuminosas, preferencialmente na rede principal.

## **Fibras**

Foram utilizadas fibras A com percentagem nas amostras de 13%, utilizando tamanhos de 20, 25, 38 e 50 mm.

### **3.1.2. Materiais utilizados no betume modificado**

#### **Betume**

Betume 35/50 aquecido a 150° C.

#### **Fibras**

Fibras A com comprimentos de 20, 25, 38 e 50 mm de comprimento.

## **3.2. Produção de misturas betuminosas e betumes modificados**

### **3.2.1. Misturas betuminosas**

Depois que foram definidos os tipos de fibras e seus comprimentos, o tipo de betume e os agregados a serem utilizados, segue-se com a execução das lajes de misturas betuminosas em laboratório.

As lajes de misturas betuminosas foram nomeadas de acordo com o comprimento (20, 25, 38 e 50 mm).

F1300 – Mistura de controlo sem fibras

F1320 – Mistura betuminosa com fibras com comprimento de 20 mm

F1325 – Mistura betuminosa com fibras com comprimento de 25 mm

F1338 – Mistura betuminosa com fibras com comprimento de 38 mm

F1350 - Mistura betuminosa com fibras com comprimento de 50 mm

A Figura 3.2 apresenta alguns trechos da execução das lajes para o fabrico dos provetes utilizados para os ensaios de desempenho mecânico.



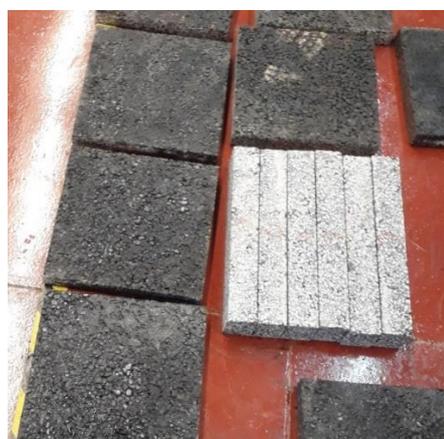
Introdução do betume



Preparação para compactação



Laje compactada



Lajes e vigas

Figura 3.2 - Processo de execução das lajes e vigas

### 3.2.2. Betumes modificados com fibras

O betume utilizado nesse experimento foi o 35/50, juntamente com as fibras A. As placas de betumes foram nomeadas de acordo com a percentagem e o comprimento, em que ambas as características variavam.

A produção de betumes com fibras foi executada da seguinte forma: espalhou-se uma camada de betume a 150° C em cima de uma folha de papel vegetal com uma área de 15 x 15 cm<sup>2</sup>, obtendo-se uma camada de 3 mm de espessura. Em seguida, dispersou-se de forma homogênea sobre a área do betume as fibras A, de acordo com a especificação das percentagens de fibras para cada placa (12 %, 14%, 17% e 20%) e tamanho de fibra (20, 25, 38 e 50 mm).

A seguir tem-se a configuração das placas de betume na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Configuração dos provetes de betume

		Comprimento das fibras (mm)				
		20	25	38	50	Sem fibras
Teor de	12	C12L20	C12L25	C12L38	C12L50	SF
fibras (%)	14	C14L20	C14L25	C14L38	C14L50	
	17	C17L20	C17L25	C17L38	C17L50	
	20	C20L20	C20L25	C20L38	C20L50	

Os pesos, em gramas, de betume e fibras são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Pesos de betume e fibras

PC	Betume (gramas)	Fibras por placa (gramas)
12	67,5	0,08
14	67,5	0,10
17	67,5	0,12
20	67,5	0,14

Depois de executar as placas, esperou-se arrefecer e estabilizar o betume com as fibras, em seguida foram realizados cortes de provetes com 25 mm de diâmetro para serem utilizados nos ensaios de reómetro.

A Figura 3.3 apresenta alguns trechos da execução dos provetes para os ensaios de reologia com betume modificado.



Figura 3.3 - Processo de produção de provete de betume modificado

### 3.3. Métodos de ensaios utilizados

#### 3.3.1. Caracterização mecânica das misturas betuminosas

No que respeita aos modelos para avaliar a melhoria do desempenho das misturas betuminosas no pavimento foram analisados vários ensaios.

### **Módulo de Rigidez**

Uma das formas de avaliar a deformação das misturas betuminosas é através do módulo de rigidez. As características da rigidez são estudadas em termos de módulo complexo e de ângulo de fase. O dimensionamento da rigidez é analisado por ensaios de carregamentos cíclicos, sinusoidais, da mesma forma que os experimentos da caracterização de fadiga. As misturas betuminosas são viscoelásticas, logo as características mecânicas dependem da temperatura e do período de carregamento.

A deformação está associada com a razão da tensão exercida e a extensão resultante. A análise da Equação 01 mostra que o módulo de rigidez está relacionado com um carregamento sinusoidal a uma mistura betuminosa.

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (01)$$

A deformação do material é determinada pela forma da Equação 02, em que na mesma frequência, apresenta-se um desfasamento em relação ao carregamento, nomeadamente de ângulo de fase ( $\varphi$ ).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (02)$$

De acordo com a Equação 03 obtém-se o módulo complexo da mistura betuminosa.

$$E^* = |E^*|. (\cos\varphi + i. \sin\varphi) \quad (03)$$

A parte que possui o módulo complexo é representado por um elemento real de acordo com a Equação 04, que relaciona a energia armazenada e por um elemento imaginário representado na Equação 05, que representa a parte viscosa, caracterizando a energia perdida através do atrito interno no meio do material.

$$E_1 = |E^*|. \cos\varphi \quad (04)$$

$$E_2 = |E^*|. \sin\varphi \quad (05)$$

A forma mais frequente de demonstrar as características mecânicas de uma mistura betuminosa, levando em consideração uma determinada temperatura e periodicidade de carregamento, decorre da apresentação do módulo complexo descrito pelo seu valor em módulo na Equação 06.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (06)$$

e através do ângulo de fase,  $\varphi$ , através da Equação 07.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (07)$$

O módulo de rigidez aumenta à medida que a velocidade de circulação dos veículos aumenta e reduz com o aumento da temperatura. A Figura 3.4 mostra o módulo de rigidez para um macadame betuminoso.

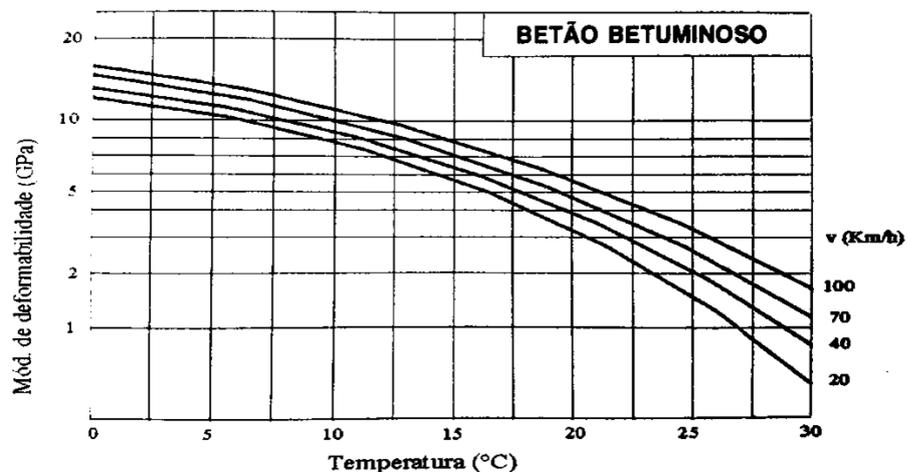


Figura 3.4 - Variação do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas com a temperatura a que se encontram e com a velocidade (Branco *et al.*, 2008)

Uma mistura betuminosa pode ter seu módulo de rigidez variando de acordo com vários fatores. Um deles é o tipo de betume utilizado, dependendo do grau de dureza, quanto mais duro maior o módulo de rigidez. Outro fator é a dimensão dos agregados, em que quanto maior a utilização de agregados com a máxima dimensão, menor será a superfície específica e menor será a quantidade de betume utilizada na mistura, aumentando o módulo de rigidez (Ferreira, 2012).

### **Resistência à fadiga**

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é a capacidade relacionada a resistência a esforços de flexão repetidos sem atingir a rotura. O fendilhamento por fadiga do pavimento devido ao carregamento contínuo do tráfego é uma das formas de colapso da estrutura.

A resistência a fadiga de uma mistura betuminosa é apresentada geralmente por meio de ligações entre tensão e extensão inicial com o número de vezes do carregamento que ocasiona a ruína da estrutura. Vários ensaios laboratoriais podem mostrar essas ligações para determinados níveis de extensão ou de tensão, ensaios estes com características repetitivas, de flexão, tração direta e indireta, através de métodos diametrais e triaxiais (Ferreira, 2012).

Nesta dissertação foi realizado o ensaio de flexão em 4 pontos para o ensaio de resistência à fadiga, a temperatura de ensaio é de 20°C e a frequência com que a carga é aplicada ao provete é de 10 Hz.

Durante o ensaio de resistência a fadiga as cargas podem exercer em um estado de tensão controlada, em que o carregamento ou a amplitude da tensão mantem-se constante, ou podem exercer em um estado de extensão controlada, em que a deformação ou a amplitude da extensão continuam constante (Ferreira, 2012).

De acordo com a Equação 08 que associa a resistência a fadiga com o nível de extensão e com a rigidez da mistura betuminosa, os ensaios com extensão controlada, a apresentação da resistência a fadiga fica em função do nível de extensão aplicado e pela rigidez inicial da mistura betuminosa determinado por Monismith *et al.* (1985).

$$N_f = a * \left( \frac{1}{\varepsilon_0} \right)^b * \left( \frac{1}{S_0} \right)^c \quad (08)$$

Em que:  $N_f$  = resistência à fadiga

$\epsilon_0$  = extensão de tracção

$S_0$  = rigidez inicial da mistura betuminosa

a, b, c = coeficientes determinados experimentalmente

Na Resistência à fadiga as características que diminuem o seu efeito nas misturas betuminosas são a percentagem de betume, a porosidade, tamanho dos agregados, a percentagem e o tamanho das fibras. A relação da percentagem do betume é que quanto maior for a quantidade, a capacidade da resistência a fadiga será maior também. Nas misturas reforçadas com fibras o comprimento pode ter efeito no reforço da tração onde as fibras podem ajudar na resistência ao fendilhamento prolongando a vida a fadiga.

### **Resistência à deformação permanente**

Os ensaios da resistência a deformação permanente das misturas betuminosas podem ser realizados de forma real, recolhendo-se um provete do pavimento, ou experimentalmente em laboratório. Os estudos são feitos através de cargas fixas ou carregamento móvel. Um dos ensaios é o de pista (*Wheel Tracking Test* ou WTT) é realizado de acordo com a EN 12697-22 (CEN, 2007), através dele determina-se a suscetibilidade que o pavimento pode apresentar diante dos esforços sofridos através de um carregamento, como mostra a Figura 3.5.

A suscetibilidade à deformação permanente do pavimento é analisada através da profundidade provocada pela passagem sucessiva da rodeira no provete. O provete do ensaio WTT é afixado em um molde no formato da laje de mistura betuminosa, em uma temperatura constante por volta dos 60°C, com força de 700 N, frequência de 0,44 Hz e aplicação de 10.000 ciclos de carregamento. O ensaio é finalizado com a passagem de 10000 ciclos ou quando a profundidade da rodeira atinge 20 mm

Os dados necessários obtidos deste ensaio são: a taxa de deformação em saio de pista ( $WTS_{AIR}$ ); percentagem de profundidade da rodeira ( $PRD_{AIR}$ ) quando atingir os 10.000 ciclos e profundidade de rodeira ( $RD_{AIR}$ ) quando atingir os 10.000 ciclos também.



Figura 3.5 - Equipamento utilizado no ensaio de pista

### 3.3.2. Ensaios realizados no betume modificado

Os estudos reológicos dos betumes foram desenvolvidos com o objetivo de caracterizar os parâmetros mecânicos, bem como mitigar os possíveis erros dos ensaios empíricos, uma vez que estes não relacionam de forma satisfatória os resultados das misturas betuminosas produzidas em laboratório das produzidas em campo. As análises reológicas dos betumes permitem obter resultados que podem ser associados a deformação permanente, como nos ensaios em que apresentam resultados em alta temperatura apresentado no MSCR e no Módulo  $G^*$ , fendilhamento por fadiga nos ensaios que apresentam resultados em temperatura em torno dos 20°C como o LAS e o Módulo  $G^*$  e fratura em baixas temperaturas que é obtido no ensaio do Módulo  $G^*$ .

A reologia pode ser definida como o estudo das deformações e fluxo da matéria. O estudo da reologia pode ser estendido para o entendimento de propriedades e comportamentos de materiais poliméricos e.g. ligantes betuminosos, lubrificantes, tintas, plásticos e borrachas (Barnes *et al.*, 1993).

Segundo Roberts (1996), as características reológicas dos ligantes betuminosos interferem o desempenho dos pavimentos e essas características podem sofrer alteração durante o processo produtivo das misturas betuminosas e com o decorrer da vida útil do pavimento.

A análise das características reológicas dos ligantes betuminosos podem ser realizadas através do equipamento reómetro de cisalhamento dinâmico (DSR). Ele examina as propriedades de elasticidade e rigidez dos ligantes betuminosos, desde baixas até altas temperaturas.

O aparelho possui um sistema que é formado por duas placas paralelas que atuam aplicando um esforço ao provete de ligante betuminoso, em que cada oscilação completa da placa superior corresponde a um ciclo como apresenta na Figura 3.6.

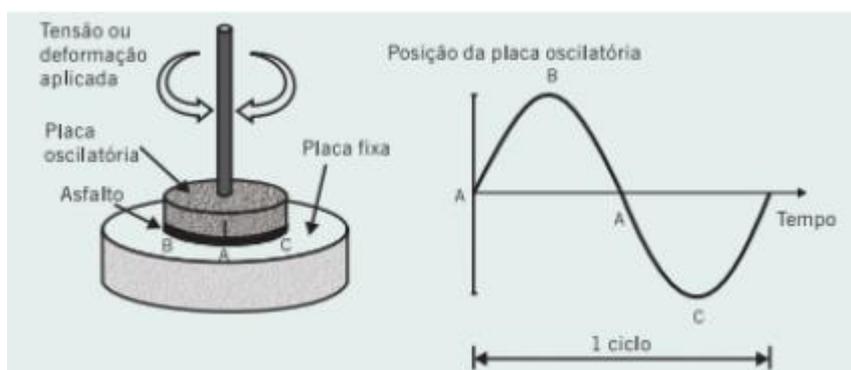


Figura 3.6 – Esquemática da aplicação da tensão de cisalhamento em uma amostra de ligante betuminoso (Bernucci *et al.* 2007)

A relação entre o nível de defasagem no decorrer do tempo o esforço imposto e a resposta do ligante representa o ângulo fase, esta propriedade pode ser utilizada para indicar o nível de elasticidade da amostra. A Figura 3.7 mostra o ciclo de tensão, deformação e cálculo do ângulo de fase.

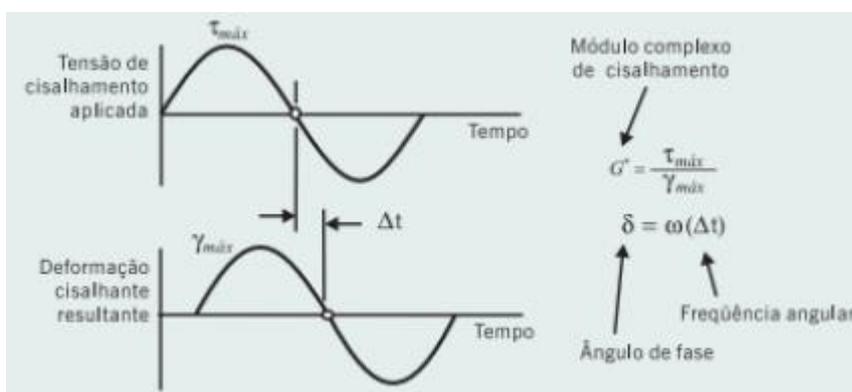


Figura 3.7 - Representação da defasagem entre a tensão e a deformação em um provete ensaiado no DSR (Bernucci *et al.* 2007)

Segundo Fernandes (2013), através dos ensaios do reômetro DSR, é possível obter os parâmetros viscoelásticos como módulo dinâmico de cisalhamento,  $|G^*|$ , módulo de armazenamento,  $G'$ , módulo de perda,  $G''$ , ângulo de fase ( $\delta$  - delta) e viscosidade. O módulo dinâmico é apresentado como a razão entre a máxima tensão de cisalhamento e a máxima deformação, em que é decomposto em duas equações, (09) ( $G'$ ) referente ao módulo elástico e (10) ( $G''$ ) referente ao módulo viscoso. A Figura 3.8 representa o diagrama vetorial dos parâmetros reológicos.

$$G' = G * \cos\delta \quad (09)$$

$$G'' = G * \sin\delta \quad (10)$$

Em que:

- $G^*$ : módulo dinâmico;
- $G'$ : módulo de elasticidade;
- $G''$ : módulo de viscosidade;
- $\delta$ : ângulo de fase.

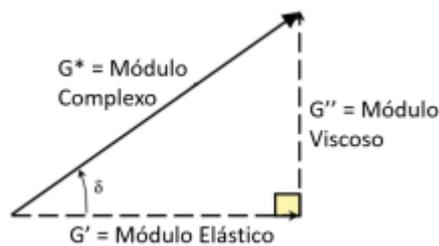


Figura 3.8 - Diagrama vetorial dos parâmetros reológicos

Quando o ângulo de fase é zero, o material apresenta resposta imediata aos esforços impostos, característico do comportamento totalmente elástico. No que diz respeito quando o ângulo de fase é de  $90^\circ$ , o material apresenta comportamento semelhante a um líquido, ocorrendo maior defasagem entre a solicitação e a resposta. O ligante betuminoso mostra resultados intermediários do ângulo de fase, entre  $0$  e  $90^\circ$ , sendo denominado material viscoelástico por nunca apresentar comportamento totalmente elástico ou viscoso.

A caracterização do betume modificado foi realizada através de três ensaios. Nesta fase do estudo, dado ao número elevado de amostra em análise, utilizou-se um único betume (35/50) para modificação com os diversos tamanhos de fibra. Desta forma, a única variável em análise foram os comprimentos de fibras e a percentagem delas na amostra, assim obtém-se uma comparação direta entre todas elas.

O processo inicial envolveu a introdução de fibras ao betume manualmente de forma manter de forma homogênea sobre toda a placa.

Em termos de propriedades reológicas foram analisados o ensaio para estimar a tolerância a danos dos ligantes usando o método linear de varredura de amplitude (LAS ou *Linear Amplitude Sweep*), ensaios de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR ou *Multiple Stress Creep Recovery*) e também foram realizados ensaios do módulo de rigidez complexo ( $|G^*|$ ).

A Figura 3.9 apresenta o reômetro utilizado nos ensaios de reologia dessa dissertação. Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), modelo MCR 100.

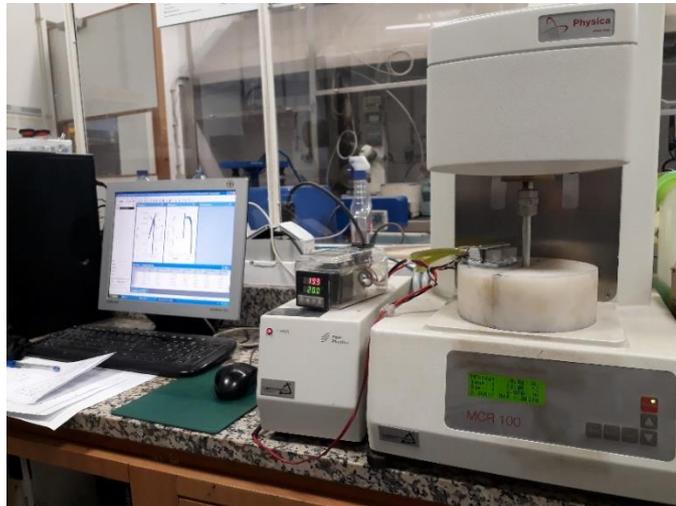


Figura 3.9 - Reômetro utilizado nos ensaios de reologia

### **Ensaio *Linear Amplitude Sweep* - LAS**

De acordo com a AASHTO TP 101-14 o ensaio de LAS estuda a resistência ao dano de ligantes betuminosos por meio da aplicação de carregamentos cíclicos com amplitudes de carga linearmente crescentes. Investigações realizadas por Hintz & Bahia (2013) e Johnson & Bahia (2010) conduziram a elaboração dos métodos de ensaio, medindo a resistência ao dano de ligantes betuminosos através da geração de torções cíclicas nas placas do DSR com um aumento do carregamento de amplitude para estimular o dano. Logo, o valor da taxa de dano acumulada é utilizado como indicador de desempenho quanto à fadiga do ligante betuminoso.

A realização deste ensaio é feita em duas etapas. Na etapa inicial é realizada uma varredura de frequência de 0,2 a 30 Hz, utilizando amplitude de deformação de 0,1% na aplicação ao provete em regime de viscoelasticidade linear, para obtenção das propriedades de reologia da amostra e do parâmetro  $\alpha$ , que são características do provete sem danos.

A Figura 3.10 representa a realização da primeira etapa do ensaio, com a variação do módulo dinâmico de cisalhamento e ângulo de fase em função da frequência.

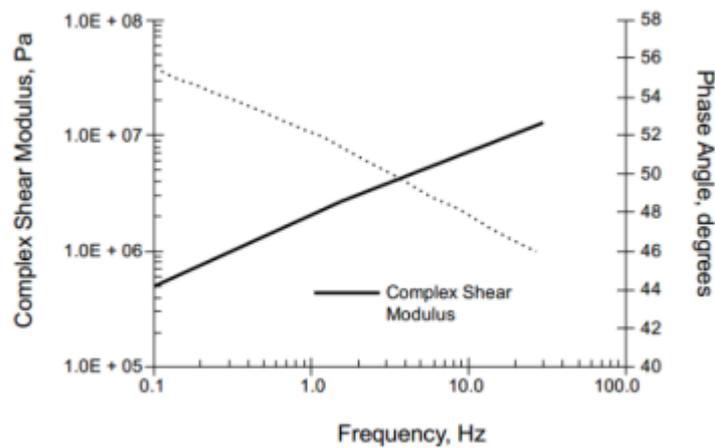


Figura 3.10 - Varredura de frequência de uma amostra

O cálculo  $\alpha$  é feito através da teoria do dano viscoelástico contínuo. Os dados do módulo dinâmico  $[|G^*|(\omega)]$  e ângulo de fase  $[\delta(\omega)]$  de cada frequência é transformado para módulo de armazenamento  $[G'(\omega)]$  representado na Equação 11.

$$G'(\omega) = |G^*|(\omega) \cdot \cos \delta(\omega) \quad (11)$$

Em seguida, obtém-se um gráfico em escala logarítmica, de  $G'$  em função de  $\omega$  em que resulta em uma curva de tendência apresentada na Equação 12.

$$\log G'(\omega) = m (\log \omega) + b \quad (12)$$

Em que,

m: coeficiente angular

b: coeficiente linear

O valor de m é calculado através da Equação 12 e usando-se a Equação 13 obtém-se o valor de  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{1}{m} \quad (13)$$

A segunda etapa do ensaio é realizada com uma varredura de amplitude de deformação, com deformações de 0,1% até 30% com carregamentos na frequência de 10 Hz. A Figura 3.11 mostra as medidas de deformações induzidas em função do número de ciclos aplicados para aumentar o dano ao provete.

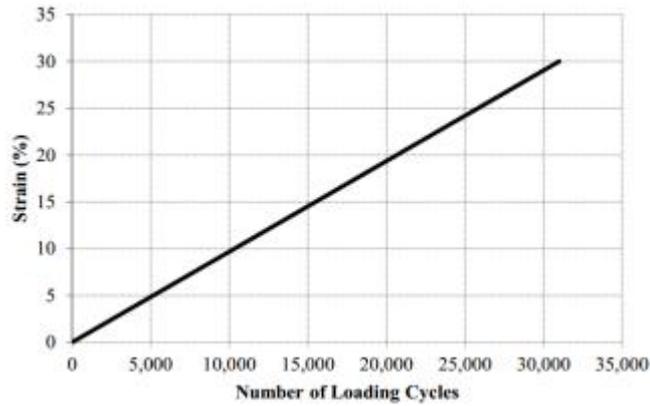


Figura 3.11 - Varredura de amplitude de amostra de ligante betuminoso (Hintz, 2012)

A intensidade de dano  $[D(t)]$  ao provete é obtida através da Equação 14.

$$D(t) = \sum_{i=1}^n [\pi y_0^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} [(C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (14)$$

Em que,

$$C(t) = \frac{|G^*|(t)}{|G^*|_{inicial}}$$

$|G^*|$  = módulo dinâmico de cisalhamento (MPa)

t = tempo de teste (segundos)

A partir do ponto inicial realiza-se a soma do dano acumulado. Em seguida os valores incrementais de  $D(t)$  para cada ponto subsequente são somados ao resultado de  $D(t)$  anterior. Desta forma, é calculado até o ponto final, em que a deformação aplicada atinge 30%.

Assim, o ponto de cada tempo t, os valores de  $C(t)$  e  $D(t)$  são gerados, supondo que  $C$  em  $D(0)$  é 1, e  $D(0) = 0$ . A relação entre  $C(t)$  e  $D(t)$  são obtidos pela Equação 15.

$$C_t = C_0 C_1 (D)^{C_2} \quad (15)$$

Onde:  $C_0 = 1$ , o valor inicial de  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de ajuste da curva através da linearização da equação adaptado de Hintz *et al.* (2011), representado na equação 16.

$$\log(C_0 - C_t) = \log(C_1) + C_2 \times \log(D_t) \quad (16)$$

Através da equação acima,  $C_1$  é encontrado pelo anti-log e  $C_2$  é obtido com a declividade da linha formada pelo  $\log(C_0 - C_t)$  versus  $\log(D(t))$ .

Este método determina-se a resistência dos ligantes betuminosos a danos por meio de carregamento cíclico empregando amplitudes de carga crescentes linearmente. Determina-se o módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase do ligante betuminoso.

Uma amostra é preparada de acordo com as normas do (DSR) usando a geometria de placa paralela de 8 mm com configuração de *gap* de 2 mm. A amostra é testada em cisalhamento usando uma varredura de frequência para determinar as propriedades reológicas. A amostra é então testada usando uma série de ciclos de carga oscilatória em amplitudes crescentes lineares em uma frequência constante para causar dano por fadiga acelerada. A abordagem de dano contínuo é usada para calcular a fadiga resistência de propriedades reológicas e resultados de varredura de amplitude. O ensaio foi realizado com a temperatura de 20° C e frequências entre 0,01 e 100 Hz. O primeiro teste, uma frequência varredura, é projetado para obter informações sobre as propriedades reológicas, e o segundo teste, uma varredura de amplitude, destina-se a medir as características de dano do material.

A fim de realizar a análise de danos, informações em relação às propriedades do material não danificado (representado pelo parâmetro  $\alpha$ ) deve ser determinado. O procedimento de varredura de frequência é usado para determinar o parâmetro alfa.

Os varrimentos em frequências medidos ao longo do eixo das frequências formam gráficos contínuos de módulo complexo (Pa) e ângulo de fase (°) em função da frequência (Hz).

### **Ensaio *Multi Stress Creep Recovery* - MSCR**

O ensaio de MSCR é definido com uma metodologia na identificação da existência de resposta elástica do ligante asfáltico e a troca desta resposta sob dois níveis de tensão distintos a temperatura específica. Ainda pode ser verificada a compatibilidade da fluência não recuperável, ou da conformidade não recuperável, sendo um indicador de resistência do material a deformações permanentes.

Assim são submetidos ao ligante betuminoso 20 ciclos de tensão, sendo os 10 primeiros ciclos com tensão de 0,1 kPa e os demais com tensão de 3,2 kPa. Os ciclos duram 10 segundos cada um, em que ocorre para 1 segundo uma aplicação de carregamento e um relaxamento de 9 segundos. A fase de menor carregamento avalia os resultados da elasticidade do provete para tráfego normal e a outra fase os resultados para o tráfego intenso.

A Figura 3.12 apresenta uma representação do comportamento do provete durante o ensaio em função do tempo de aplicação do carregamento.

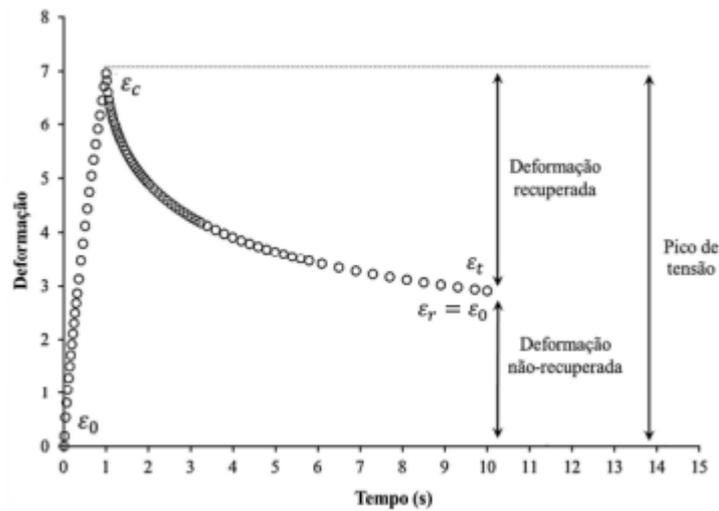


Figura 3.12 - Representação gráfica do ensaio de MSCR

Com base no gráfico da Figura 3.12 obtém-se os valores de deformações para o cálculo da conformidade não-recuperável  $Jnr(\sigma, N)$  e a percentagem de recuperação  $\%Rec(\sigma, N)$ , de acordo com as Equações 17 e 18.

$$Jnr(\sigma, N) = \frac{\text{deformação não-recuperada}}{\text{tensão aplicada}} \quad (17)$$

$$\%Rec(\sigma, N) = \frac{\text{Deformação recuperada} \times 100}{\text{pico de tensão}} \quad (18)$$

Dessa forma, são calculados de maneira individualizada para cada ciclo, e em seguida, calculada a média para os 10 ciclos aplicados pelo carregamento, sendo  $\sigma$  a tensão aplicada e  $N$  o número do ciclo para o cálculo de cada parâmetro. Gama (2016) mostra que o parâmetro  $Jnr$  representa um indicador de resistência à deformação permanente, quanto menor o seu valor, maior a sua resistência à deformação permanente. Enquanto que  $\%Rec$  indica a resposta elástica do material, de forma que quanto maiores estes valores, mais elástico é o comportamento do material. O ensaio de MSCR é realizado a temperatura de  $60^\circ C$ , em que este teste é utilizado para identificar a presença de resposta elástica em dois níveis de tensões diferentes. Essa resposta elástica é avaliada em relação a deformação não-recuperável ( $Jnr$ ) ambos a 3,2KPa.

De acordo com Federal Highway Administration (FHWA) para determinados níveis de tráfego relaciona-se com o Jnr (3,2KPa) para cada ligante betuminoso. Essa classificação é representada na norma AASHTO M320, como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Valores estimados de Jnr para tensão de 3,2kPa e percentual de recuperação mínimo (AASHTO M320, 2016)

Propriedade	Jnr (KPa <sup>-1</sup> )	Tipo de tráfego	Número de passadas em um eixo padrão
Jnr a 3,2 KPa na temperatura máxima de PG	2,0 – 4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
	1,0 – 2,0	Pesado (H)	> 10 milhões
	0,5 – 1,0	Muito pesado (V)	> 30 milhões
	0 – 0,5	Extremamente pesado (E)	> 100 milhões

De acordo com os dados da FHWA, para a deformação são apresentadas as percentagens mínimas para recuperação de ligantes betuminosos para Jnr de 3,2 kPa, como mostra a Tabela 3.5. Através da equação, gera uma curva limite dos ligantes betuminosos de alta e baixa elasticidade como apresentado na Figura 3.13. Os valores se limitam até a percentagem de recuperação de 2,00 KPa<sup>-1</sup> mostrando que não há recomendação do percentual mínimo de recuperação para os ligantes betuminosos com valores de Jnr superiores a 2,0 kPa-1 (Domingos, 2013).

Tabela 3.5 - Valores estimados de Jnr para tensão de 3,2 KPa e percentual de recuperação mínimo (FHWA, 2010)

Conformidade não-recuperável (Jnr) para tensão de 3,2 KPa (KPa <sup>-1</sup> )	Percentual de recuperação mínimo (%)
1,01 a 2,00	30
0,51 a 1,00	35
0,251 a 0,50	45
0,125 a 0,25	50

Além das propriedades de resistência mostrados resultantes dos valores de Jnr de 3,2 kPa, os valores de Jnr de 0,1 kPa também são utilizados na análise da sensibilidade do provete na alteração dos níveis de tensão. Para tanto, deve ser calculada a relação entre as conformidades não-recuperáveis de 3,2 kPa e 0,1 kPa de acordo com a Equação 19, sendo utilizado valores menores que 75%.

$$Jnr\ diff = \left( \frac{Jnr\ 3200 - Jnr\ 100}{Jnr\ 100} \right) \times 100 \quad (19)$$

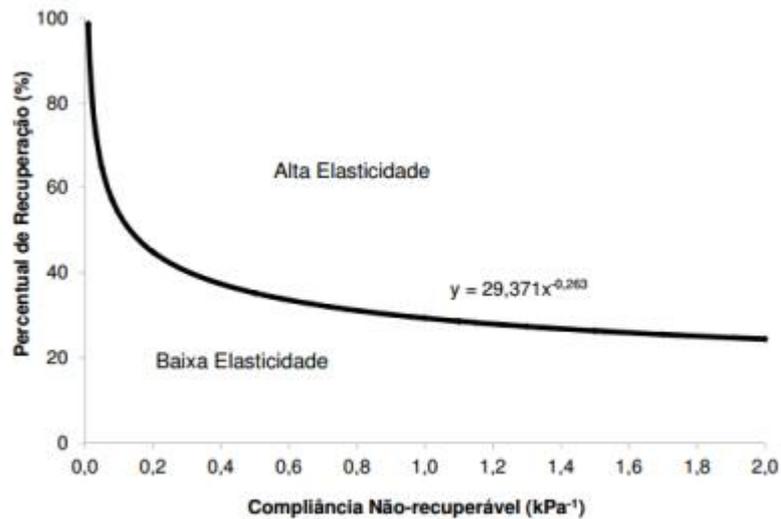


Figura 3.13 - Curva limite entre zonas de baixa e alta elasticidade de ligantes betuminosos

Segundo Domingos (2013), as condições de analisar com controlo da temperatura e verificar aplicações dos esforços no sistema, de forma mais ampla do que ocorre na forma real, ao invés de aproximações ou ajustes para a obtenção de propriedades intrínsecas dos ligantes betuminosos é um dos benefícios deste ensaio.

Além disso, apresenta parâmetros de analisar a capacidade de recuperação elástica e ductilidade de um polímero na matriz betuminosa, bem como analisar as características dos ligantes betuminosos mais usuais, sem modificação por fibras. Ao realizar ensaios com betumes não modificados, espera-se que eles apresentem valores de deformação muito maiores em relação ao betume modificado.

Para análise principal desse estudo, foram utilizados os valores de  $Jnr$  e  $Jnr\ diff$ , de acordo com Soenen *et al.* (2013), a análise de ligantes não modificados e modificados por polímero, comparou-se seu desempenho frente aos resultados do MSCR. Foram observados que nas tensões aplicadas, os betumes convencionais tiveram valores reduzidos de recuperação elástica, aproximadamente de 10%, já os betumes com polímeros tiveram um aumento de 90% nos resultados. Contudo, os valores de  $Jnr$ , para os ligantes modificados e alguns ligantes convencionais apresentaram baixos valores deste parâmetro, indicando resistência a deformações permanentes.

O ensaio MSCR foi executado para analisar o comportamento de fluência e recuperação dos ligantes betuminosos. Este ensaio permite determinar a variação da resposta elástica e da dependência da tensão que os polímeros em estudo transitem ao betume, o que está relacionado com a resistência à deformação

permanente dos pavimentos rodoviários. Foram utilizados geometria de pratos paralelos (25 mm de diâmetro e 1 mm de gap). O procedimento do ensaio foi o preconizado na norma AASHTO TP 70-11 (AASHTO, 2011).

No ensaio foram realizados 10 ciclos para tensão de baixa (100 Pa) e 10 ciclos para tensão de alta (3200 Pa). Para cada ciclo foram determinados os valores  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_{10}$ , da curva de deformação versus tempo. Com os valores foram calculados a porcentagem de recuperação elástica (%R), conformidade não recuperável (Jnr) e sensibilidade a níveis de deformações (Jnr diff).

### Ensaio do módulo de rigidez complexo – ( $|G^*|$ )

Os ligantes betuminosos apresentam comportamentos viscoelásticos em que possui características que variam ao longo do tempo e da temperatura. Desta forma, a avaliação da caracterização em relação ao módulo de rigidez em função da frequência ao longo da variação das temperaturas ajuda a perceber o comportamento das misturas betuminosas.

De acordo com Faxina (2006), as propriedades de reologia são estudadas através da variação do módulo complexo ( $G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) em função da frequência sob temperatura constante, este modelo de representação é denominado de curva mestra.

A elaboração de uma curva mestra é realizada com uma varredura de frequência para uma gama de temperaturas. A geração do gráfico é feita trasladando na escala tempo os dados obtidos das curvas geradas para se organizarem a uma única curva de função suavizada para a temperatura estabelecida. De acordo com Lima (2008), o resultado da curva mestra permite uma melhor avaliação do desempenho do ligante com relação aos níveis de frequência das cargas aplicadas sob determinadas temperaturas. A Figura 3.14 mostra uma representação gráfica da geração das curvas mestras no ensaio de reologia de varredura de frequência.

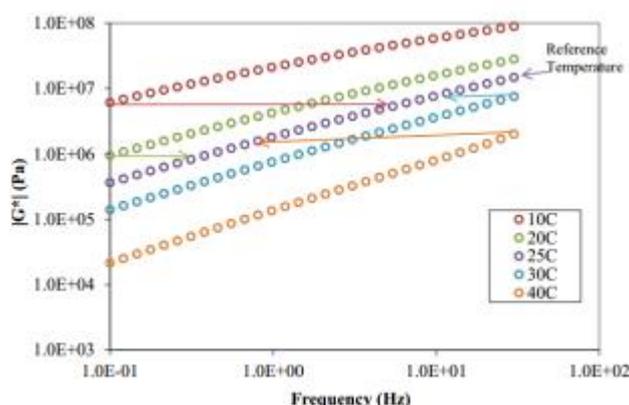


Figura 3.14 - Representação gráfica das curvas mestras obtidas para cada temperatura (Hintz, 2012)

A Figura 3.15 mostra uma curva mestra no formato de sigmoide depois de passarem pelo processo de translação, apresentando o comportamento do material em temperaturas baixas com frequências altas e temperaturas altas e frequências baixas. Segundo Lakes (2009), o princípio da superposição tempo temperatura afirma que a mudança em uma propriedade do material, neste caso o módulo  $G^*$  em relação a temperatura, é equivalente a um deslocamento horizontal no tempo de log ou escala de frequência logarítmica. Este princípio implica que o aumento da temperatura é equivalente a aumentar o tempo de carregamento (ou diminuir a frequência de carregamento). Da mesma forma, diminuindo a temperatura é equivalente a diminuir o tempo de carregamento (ou aumentar a frequência de carregamento). Sob o princípio da superposição tempo temperatura, o conceito de tempo reduzido (ou frequência reduzida) pode ser usado para formar uma curva mestra para uma dada temperatura. Uma curva mestra consiste de mudar os dados de diferentes temperaturas de teste horizontalmente no tempo de registro ou frequência de registro escala (para formar uma escala de tempo ou frequência "reduzida") para alinhar com os dados em uma temperatura de referência. O conceito de superposição tempo temperatura foi desenvolvido para caracterização de materiais viscoelásticos no regime viscoelástico linear. No entanto, pesquisadores demonstraram que a superposição tempo temperatura permanece válida para misturas betuminosas com micro danos crescentes (Daniel e Kim 2002) e propagação de macro fissuras (Seo 2003). Este é um importante conceito, pois permite prever o desempenho de fadiga em qualquer temperatura usando dados de teste de fadiga em uma única temperatura de referência acoplada com o fator de mudança de tempo temperatura correspondente para a temperatura de interesse.

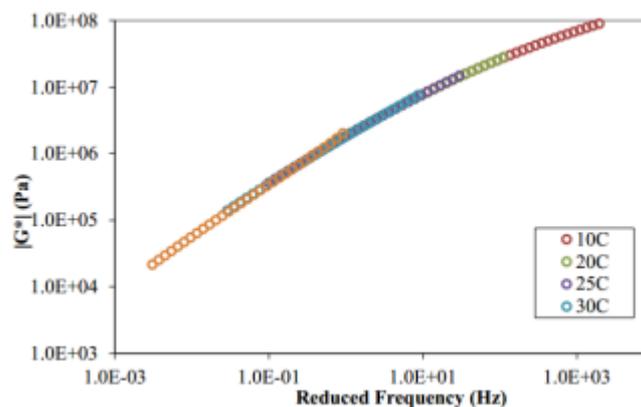


Figura 3.15 – Representação gráfica das curvas mestras em uma única temperatura (Hintz, 2012)

O ensaio de Curva Mestra foi realizado utilizando-se provetes de 8 mm e 25 mm de diâmetro e configuração de *gap* 1 mm, usando a geometria de placa paralela do reômetro. Foram medidos a frequência de aplicação de tensão e o módulo complexo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ).

As curvas mestras são utilizadas para expressar o comportamento viscoelástico dos ligantes betuminosos em função da temperatura e da taxa de carregamento em uma ampla faixa de frequência baseada no princípio da superposição tempo-temperatura. Uma temperatura de referência foi escolhida e os dados coletados em várias temperaturas foram transportados considerando a frequência de carga até que as curvas se fundissem em uma única curva (Wang *et al.* (2011)).

## **4. Resultados**

### **4.1. Caracterização mecânica das misturas betuminosas**

#### **4.1.1. Módulo de rigidez**

O módulo de rigidez é um dos parâmetros que caracterizam uma mistura betuminosa. As misturas betuminosas têm na sua constituição um esqueleto pétreo de comportamento elástico e um ligante betuminoso com comportamento viscoelástico. Desta forma o comportamento das misturas é fortemente influenciado pela reologia do betume, tanto quanto maior for a percentagem de betume presente na mistura (Neves e Correia, 2006).

Dadas as características viscoelásticas do betume, a relação entre as tensões aplicadas e as extensões medidas não é um valor constante, sendo função da temperatura, do tempo de carregamento e da forma de carregamento. Geralmente este valor é denominado módulo complexo, módulo de rigidez ou simplesmente de rigidez (Neves e Correia, 2006).

Dado o comportamento viscoelástico das misturas betuminosas, é importante ainda o conhecimento do ângulo de fase, expresso pelo desfasamento entre a solicitação imposta e a resposta do material (Pais *et al*, 2000).

Todos os ensaios ao módulo de rigidez foram realizados no equipamento servo-hidráulico, o qual realiza os ensaios com quatro pontos de flexão. As frequências utilizadas em todos os ensaios de módulo de rigidez foram: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 8 e 10 Hz.

De seguida são apresentados os gráficos com os resultados dos ensaios ao módulo de rigidez, em que, o módulo de rigidez é apresentado em função do ângulo de fase. É também apresentado o gráfico do módulo viscoso em função do módulo elástico. Cada gráfico apresenta a comparação dos resultados das misturas F1300, F1320, F1325, F1338 e F1350.

Na Figura 4.1 pode ver-se o gráfico do módulo de rigidez em função da frequência de todas as misturas no ensaio com temperatura de 20°C. Pode ver-se que todas as misturas apresentam valores muito similares.

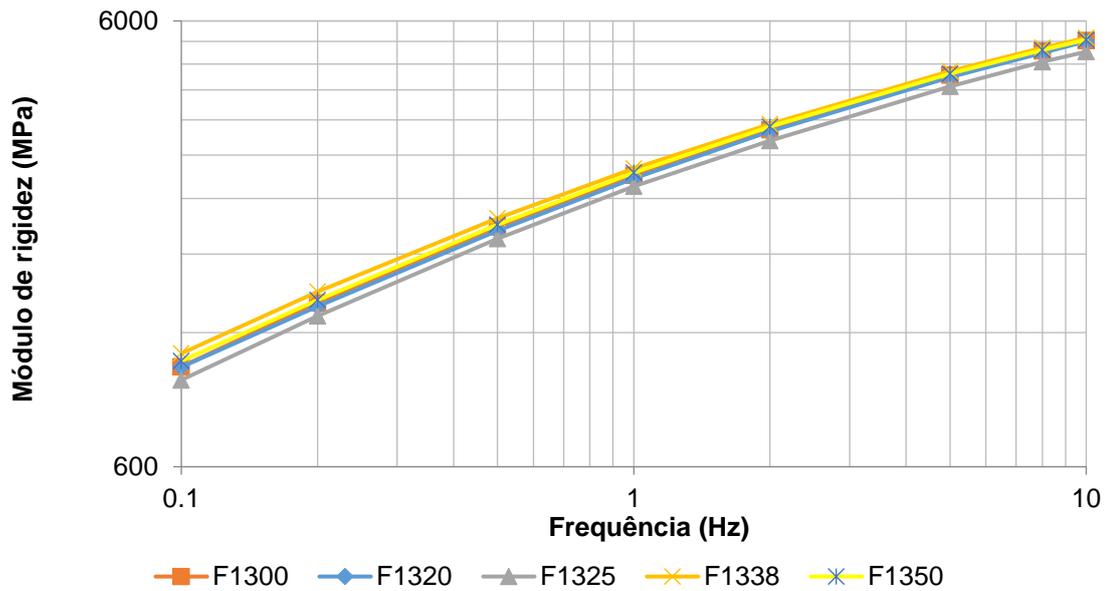


Figura 4.1 - Variação do módulo de rigidez em função da frequência

Representando-se de forma mais ampliada na Figura 4.2, observa-se que apenas as amostras F1338 e F1350 apresentam módulo de rigidez superior a amostra F1300 que é a mistura de controlo. Como tal, o comportamento dessas amostras pode apresentar uma maior resistência à fadiga. Pode ver-se na Tabela 4.1 os valores dos módulos de rigidez na frequência de 10 Hz.

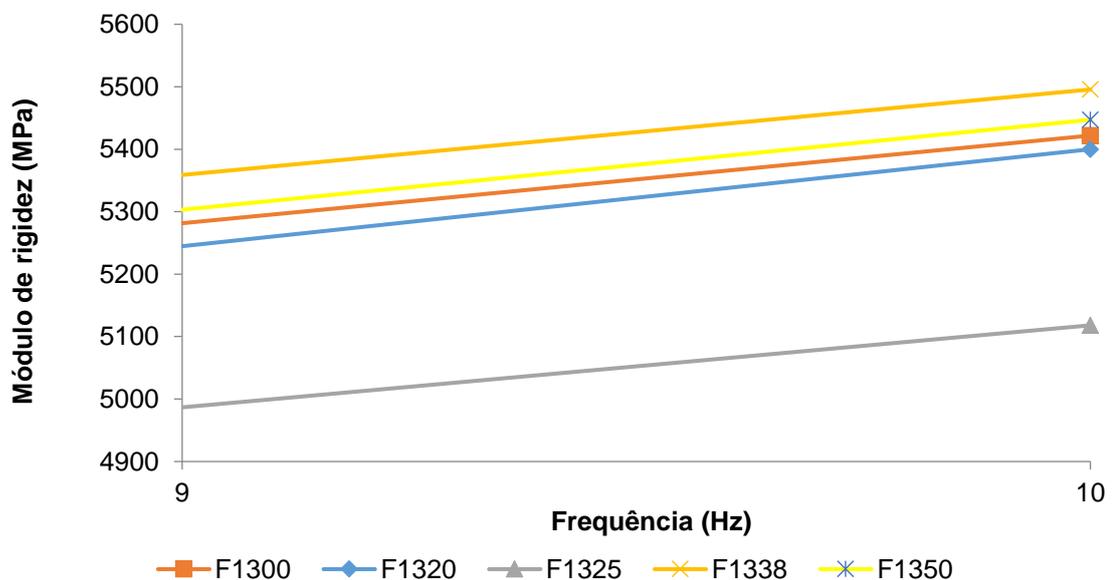


Figura 4.2 - Módulo de rigidez em função da frequência no intervalo de 9 a 10 Hz.

Tabela 4.1- Valores dos módulos de rigidez a frequência de 10 Hz

Frequência a 10 Hz	
Amostra	Módulo de rigidez (MPa)
F1300	5422
F1320	5400
F1325	5118
F1338	5496
F1350	5447

Na Figura 4.3 apresenta o gráfico do ângulo de fase em função da frequência. As misturas possuem tendências similares, mas com algumas com valores menores que a mistura de controle, que podem ser observadas mais a frente.

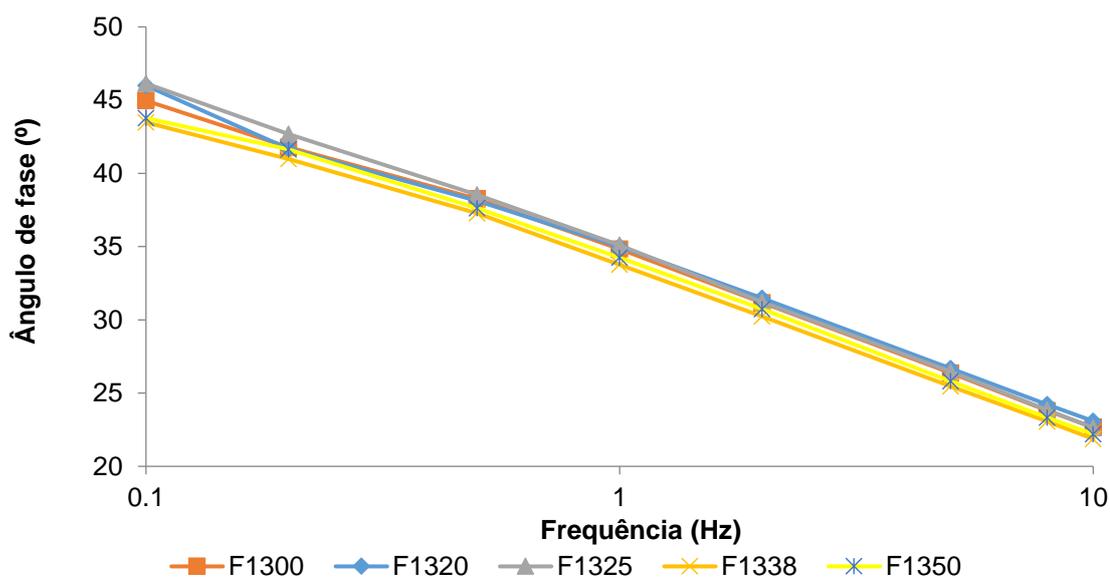


Figura 4.3 - Variação do ângulo de fase em função da frequência

Representando-se de forma mais ampliada na Figura 4.4, observa-se que apenas as amostras F1325, F1338 e F1350 apresentam ângulo de fase inferiores a amostra de controle F1300. Pode ver-se na Tabela 4.2 os valores dos ângulos de fase na frequência de 10 Hz.

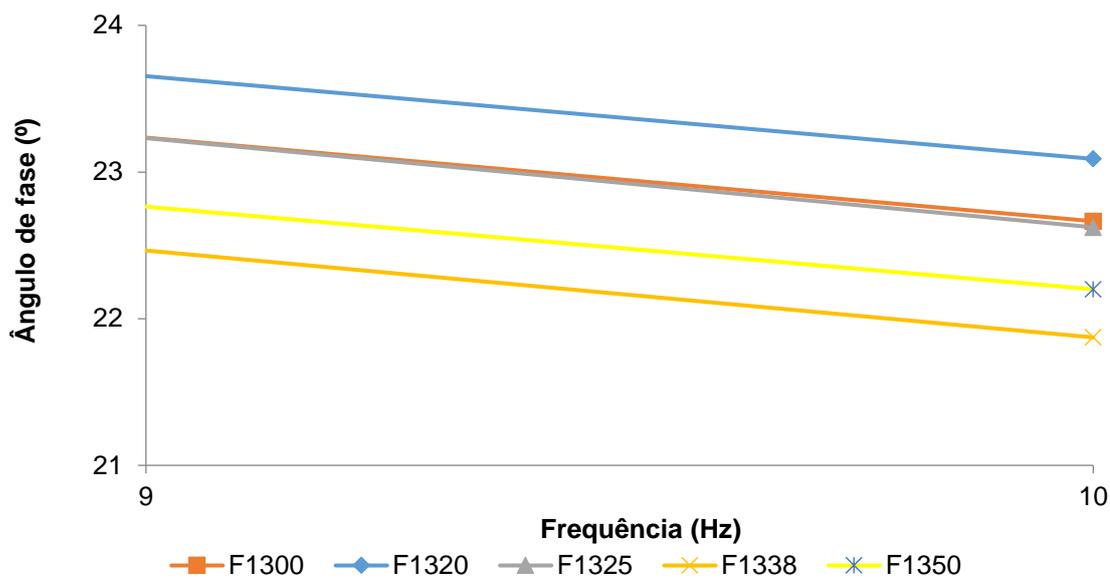


Figura 4.4 - Variação do ângulo de fase em função da frequência no intervalo de 9 a 10 Hz

Tabela 4.2 - Valores dos ângulos na frequência de 10 Hz

Frequência a 10 Hz	
Amostra	Ângulo de fase (°)
F1300	22.7
F1320	23.1
F1325	22.6
F1338	21.9
F1350	22.2

A Figura 4.5 mostra o *Black Diagram* das misturas betuminosas em estudo. Este gráfico representa o módulo de rigidez em função do ângulo de fase. As misturas possuem tendências similares, que podem ser observadas mais a frente uma comparação mais ampliada.

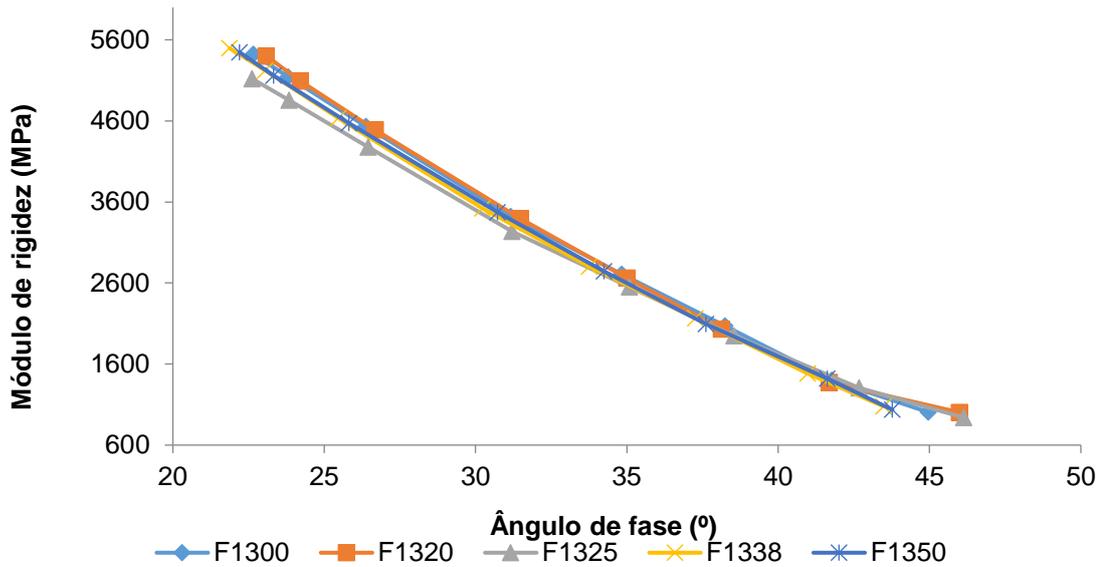


Figura 4.5 – *Black Diagram* do módulo de rigidez em função do ângulo de fase

Na Figura 4.6 mostra de forma mais ampliada o *Black Diagram*, ver-se que para um mesmo valor de módulo de rigidez, com temperatura em média de 20°C e com baixas frequências, as misturas F1338 e F1350 possuem valores de ângulo de fase mais baixos que a mistura de controlo F1300, demonstrando um comportamento mais elástico que as outras misturas com a presença das fibras com comprimentos maiores.

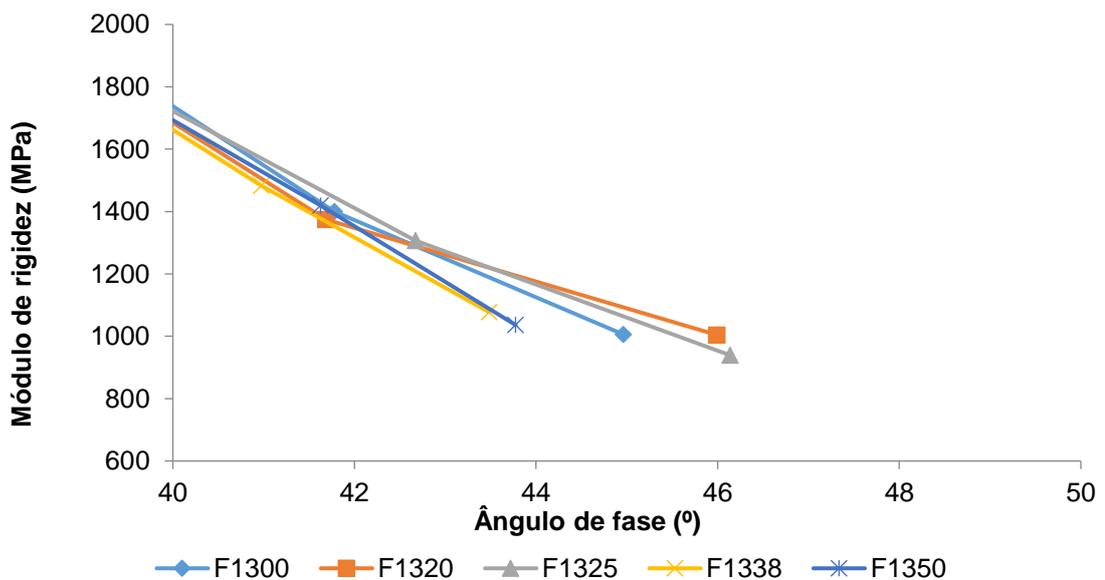


Figura 4.6 - *Black Diagram* em um trecho ampliado

Observa-se na Figura 4.7 o *Cole-cole Diagram* das misturas betuminosas em estudo. Este gráfico representa o módulo de viscosidade em função do módulo de elasticidade. As misturas possuem tendências similares, que podem ser observadas mais a frente uma comparação mais ampliada.

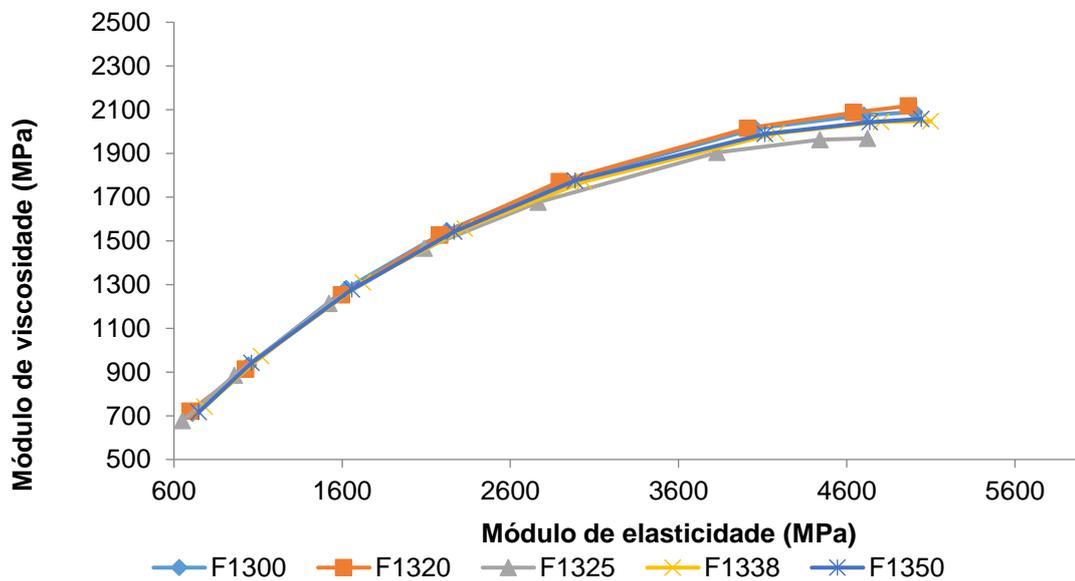


Figura 4.7 - *Cole-Cole diagram* do módulo de viscosidade em função do módulo de elasticidade

Na Figura 4.8 mostra de forma mais ampliada o *Cole-Cole Diagram*, em uma zona com frequências altas e temperaturas baixas, ver-se que para um mesmo valor de módulo de elasticidade, as misturas F1325, F1338 e F1350 possuem valores de módulo de viscosidade mais baixos que a mistura de controle F1300, demonstrando um comportamento mais elástico que as outras misturas na presença de fibras com comprimentos maiores.

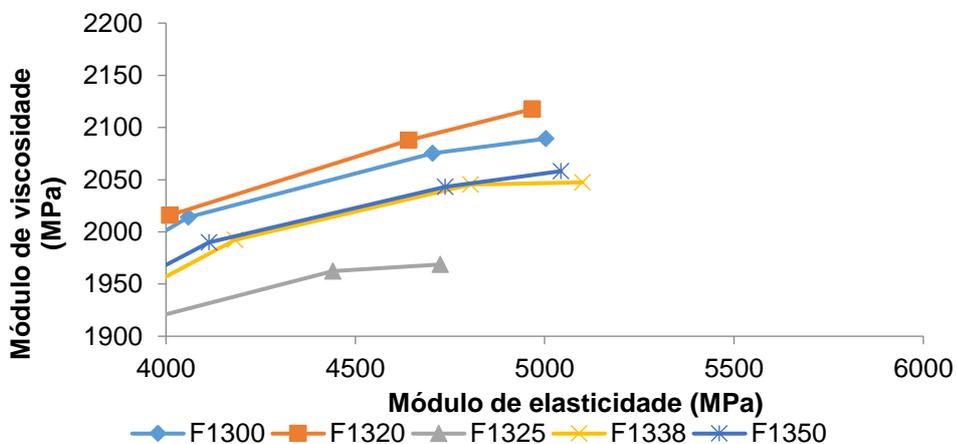


Figura 4.8 - *Cole-cole digram* em um trecho ampliado

A Figura 4.9 mostra o gráfico do módulo elástico e viscoso em função da frequência das misturas betuminosas em estudo. As misturas possuem tendências similares, que podem ser observadas mais a frente uma comparação mais ampliada.

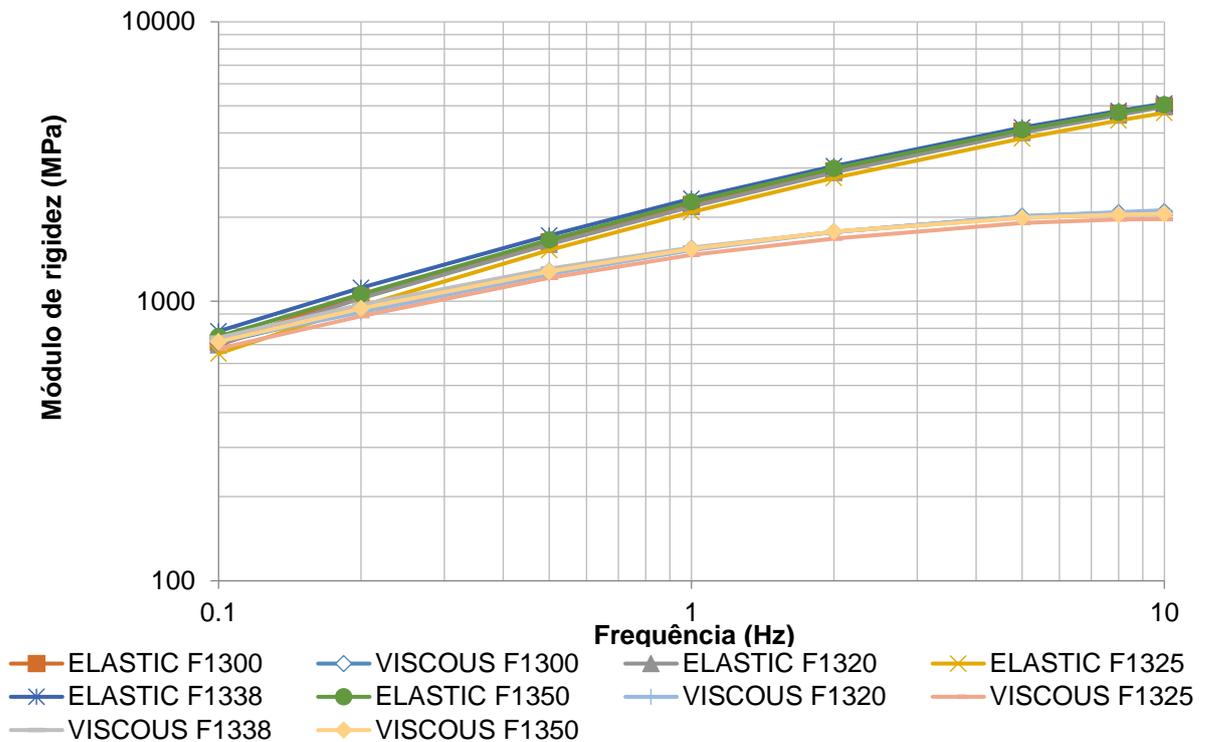


Figura 4.9 - Representação do módulo elástico e viscoso em função da frequência

Na Figura 4.10 pode ver-se o gráfico do módulo elástico em função da frequência para as misturas betuminosas. Observa-se valores mais altos para as misturas F1350 e F1338, de demonstrando características mais elásticas para essas amostras com fibras com comprimentos maiores. Esse resultado pode estar relacionado pelo fato das fibras com comprimentos maiores terem uma maior área de contacto e conseqüentemente uma maior ligação dentro da mistura.

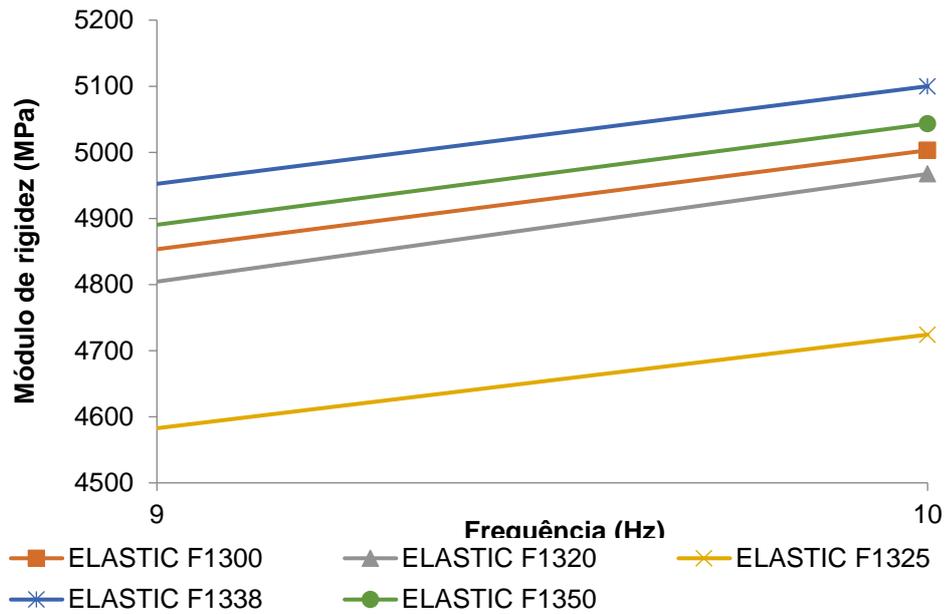


Figura 4.10 - Módulo elástico em função da frequência no intervalo de 9 a 10 Hz

Na Figura 4.11 pode ver-se o gráfico do módulo viscoso em função da frequência para as misturas betuminosas. Observa-se valores mais baixos para as misturas F1325, F1350 e F1338, de demonstrando características menos viscosas para essas amostras.

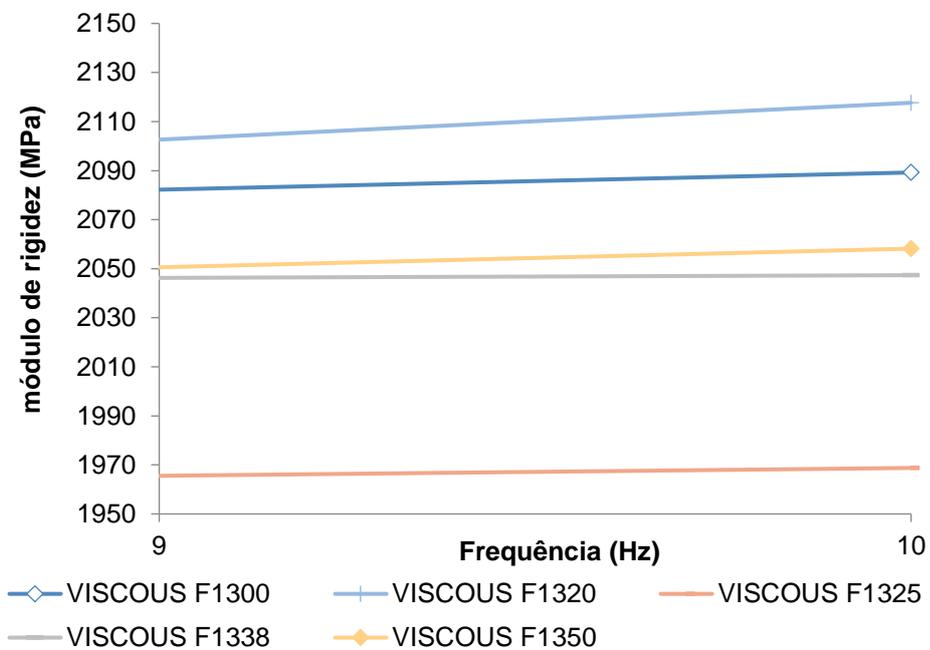


Figura 4.11 - Módulo viscoso em função da frequência no intervalo de 9 a 10 Hz

### 4.1.2. Fendilhamento por fadiga

O fendilhamento por fadiga contribui para que o pavimento perca sua capacidade de carga até que eventualmente atinge o fim da vida do pavimento.

Nos ensaios de fadiga os provetes do pavimento são sujeitos à flexão, sendo este contabilizados por ciclos. Quando o módulo de rigidez atinge metade do valor do módulo de rigidez ao ciclo 100 é determinada a vida do pavimento. Todos os ensaios de fadiga foram realizados à frequência de 10 Hz, 15 vigas no total, 3 vigas para cada mistura. A extensão de tração para uma resistência ao fendilhamento por fadiga é de  $1 \times 10^6$  ciclos ( $\epsilon_6$ ) e o número de ciclos que a mistura consegue suportar para uma extensão de tração é de  $100 \times 10^{-6}$  ( $N_{100}$ ).

Por volta dos 10000 ciclos apenas as misturas F1338 e F1350 atingem valores maiores que a mistura de controlo F1300, como mostra a Figura 4.12 e a Tabela 4.3.

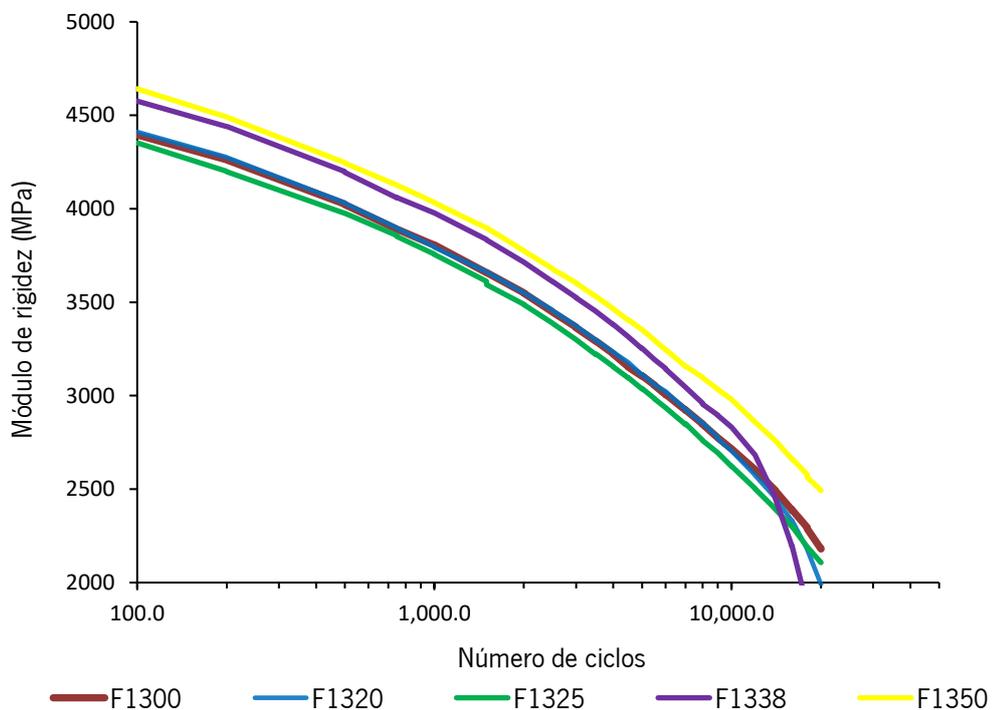


Figura 4.12 - Módulo de rigidez em função dos ciclos

Tabela 4.3 - Vida a fadiga das misturas betuminosas

Mistura	Vida a fadiga (ciclos)
F1300	18234
F1320	15884
F1325	18188
F1338	18722
F1350	22029

A análise a estes parâmetros demonstra que a mistura com fibras de 50 mm (F1350) aumenta em 20% a vida a fadiga em relação a mistura de sem fibras F1300 e a mistura com fibras no comprimento de 38 mm (F1338) aumenta a vida a fadiga em 2% em relação a mistura de controlo (F1300). Diante disso, pode-se levantar uma questão da dispersão das fibras. Neste ensaio fibras maiores podem ter se dispersado mais homogeneamente e com isso ter obtido melhores resultados.

#### **4.1.3. Deformação permanente**

Os ensaios realizados para a caracterização da deformação permanente foram feitos através do ensaio de pista. Essa deformação plástica é mais comum em países com climas quentes, em que estão sujeitos a altas temperaturas de serviço, ocasionando a diminuição da viscosidade do ligante e conseqüentemente a densificação no sentido dos rodados.

Neste ensaio a deformação é resultante da passagem constante da roda sobre o provete de mistura betuminosa, em que se aumenta com o passar do tempo. A Figura 4.13 mostra a evolução da deformação ao longo dos ciclos de carga. No início da execução do ensaio observa-se um aumento grande na deformação ocasionado pelo adensamento do provete, em que os agregados sofrem um reajuste e uma acomodação entre eles. Por conta disso, as deformações permanentes das misturas betuminosas são analisadas entre os 5000 e 10000 ciclos de carga.

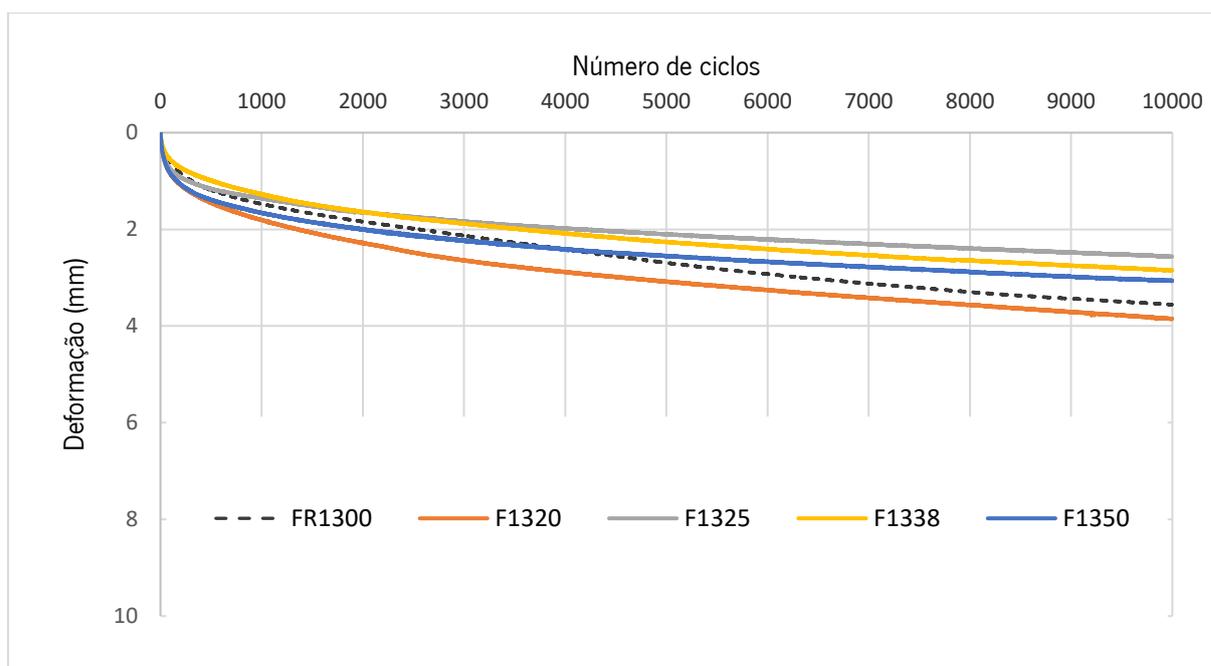


Figura 4.13 - Evolução da deformação das misturas betuminosas

No estudo deste ensaio, foram analisados também outras características da deformação permanente, como a variação da profundidade da rodeira ( $\text{mm}/10^3$  ciclos) (WTSair), a percentagem da profundidade de rodeira máxima (PRDair) e a profundidade máxima do cavado da rodeira (RDair). Na Tabela 4.5 são representados esses dados.

Tabela 4.4 - Parâmetros do ensaio de pista

Mistura	WTSair ( $\text{mm}/10^3$ ciclos)	RDair (mm)	PRDair (%)
FR1300	0,17	3,5	8,8
F1320	0,16	3,9	9,6
F1325	0,09	2,6	6,4
F1338	0,12	2,8	7,0
F1350	0,10	3,1	7,6

Os resultados demonstram que a maioria das misturas apresentam um bom desempenho à deformação permanente em relação a mistura de controlo (FR1300). Apenas a mistura F1320, a que possui o menor comprimento de fibra em relação as outras, que obteve a profundidade máxima da rodeira acima da mistura de controlo.

Em relação a taxa de deformação, constata-se que a mistura F1325 possui o menor valor, seguindo-se a mistura F1350, F1338 e por último a mistura F1320, sendo esta com taxa muito próxima ao valor da mistura de referência. De acordo com a Tabela 4.4, observa-se dentro todos os parâmetros analisados,

a mistura que possui o melhor desempenho é a F1325, por possuir a menor taxa de deformação, menor profundidade máxima do cavado da rodeira e menor percentagem da profundidade da rodeira. Na Figura 4.14, apresenta-se algumas amostras das dez lajes ensaiadas no ensaio de rodeira. Neste ensaio observa-se que a fibra com 25 mm obteve um ganho maior em relação a resistência. Neste caso, pode-se levantar questões deste ensaio e no ensaio anterior sobre a forma de execução na introdução das fibras. Como a separação realizada de forma manual em um material que possui diâmetro em micrômetros, pode-se ter executado de forma que não ficasse visível a quantidade de fibras em cada parte.



Figura 4.14 - Amostras ensaiadas no ensaio de rodeira

## 4.2. Estudo de betumes

### 4.2.1. MSCR

De acordo com Domingos *et al.* (2013), os resultados obtidos nos ensaios de MSCR representam uma caracterização da suscetibilidade à deformação permanente. As propriedades analisadas foram a deformação não recuperável e a deformação recuperável pelo betume sob tensões de cisalhamento aplicadas.

De acordo com D'angelo *et al.* (2007) explicam que o  $J_{nr}$  é utilizado na avaliação das propriedades reológicas de ligantes modificados sob altas temperaturas, relacionando este parâmetro à deformação permanente do ligante. Altos valores de  $J_{nr}$  indicam elevada suscetibilidade do ligante à deformação permanente, enquanto que menores valores indicam maior resistência do ligante a este defeito.

Foram realizados dois tipos de comparações de resultados para este ensaio. Comparou-se variando a percentagem de fibras para o mesmo tipo de tamanho e comparou-se para a mesma percentagem a variação do tamanho das fibras.

As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram os resultados das fibras com os melhores desempenhos de forma resumida dos ensaios de MSCR. De acordo com esse ensaio os melhores resultados foram obtidos com o comprimento de fibra maior e com uma tendência em maior concentração de fibras. Observa-se que não foi possível encontrar uma tendência geral para todas as fibras, mas é possível encontrar as amostras que obtiveram os maiores resultados. Na variação da percentagem com o mesmo comprimento de fibra a amostra C17L50 teve o melhor resultado. Na variação do comprimento com a mesma percentagem de fibra a amostra C17L50 também teve o melhor desempenho. Observa-se também que não ocorre uma grande variação em relação aos valores de %R e de Jnr entre as amostras com fibras.

Tabela 4.5 – Variando a percentagem com o mesmo comprimento de fibra

Quantidade de vezes o resultado melhorou em relação a amostra de controle					
Comprimento	Amostra	%R 0.1KPa	%R3.2KPa	Jnr0.1KPa	Jnr3.2KPa
20 mm	C20L20	2,2	2,6	1,6	1,5
25 mm	C20L25	1,7	1,9	1,5	1,4
38 mm	C12L38	2,1	2,3	1,6	1,5
50 mm	C17L50	1,9	2,8	1,8	1,6

Tabela 4.6 – Variando o comprimento com a mesma percentagem de fibra

Quantidade de vezes o resultado melhorou em relação a amostra de controle					
Percentagem	Amostra	%R 0.1KPa	%R3.2KPa	Jnr0.1KPa	Jnr3.2KPa
12%	C12L38	2,1	2,3	1,6	1,5
14%	C14L20	1,6	1,7	1,4	1,4
17%	C17L50	1,9	2,8	1,8	1,6
20%	C20L50	2,2	2,6	1,7	1,6

A seguir é descrito os resultados de forma mais detalhada todas as interações realizadas neste ensaio para obter uma melhor configuração entre as amostras.

### Variando a percentagem com o mesmo comprimento de fibra

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam o gráfico da tensão aplicada de 0,1 kPa e de 3,2 kPa, respectivamente, em função do tempo. Comparando-se para o tamanho de fibras de 20 mm, as percentagens de 12 %, 14 %, 17 % e 20%.

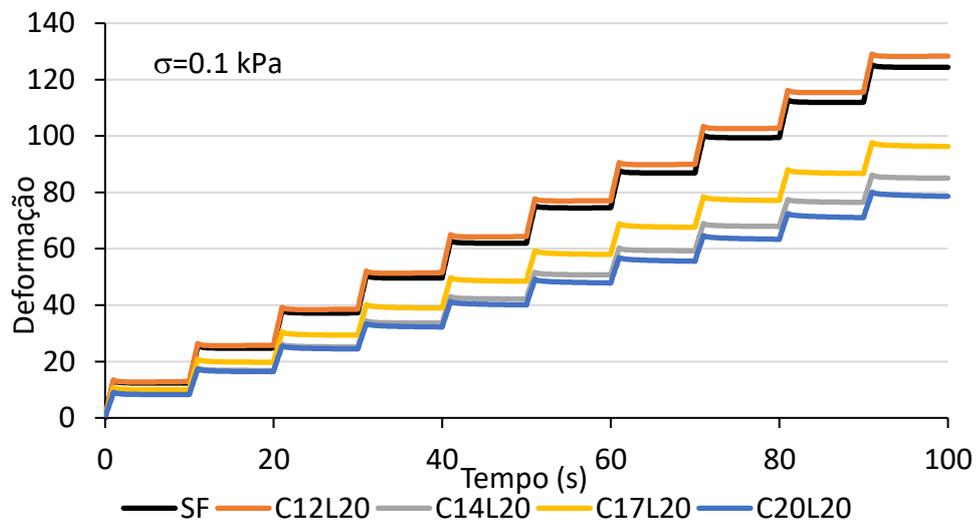


Figura 4.15 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para fibras de 20 mm

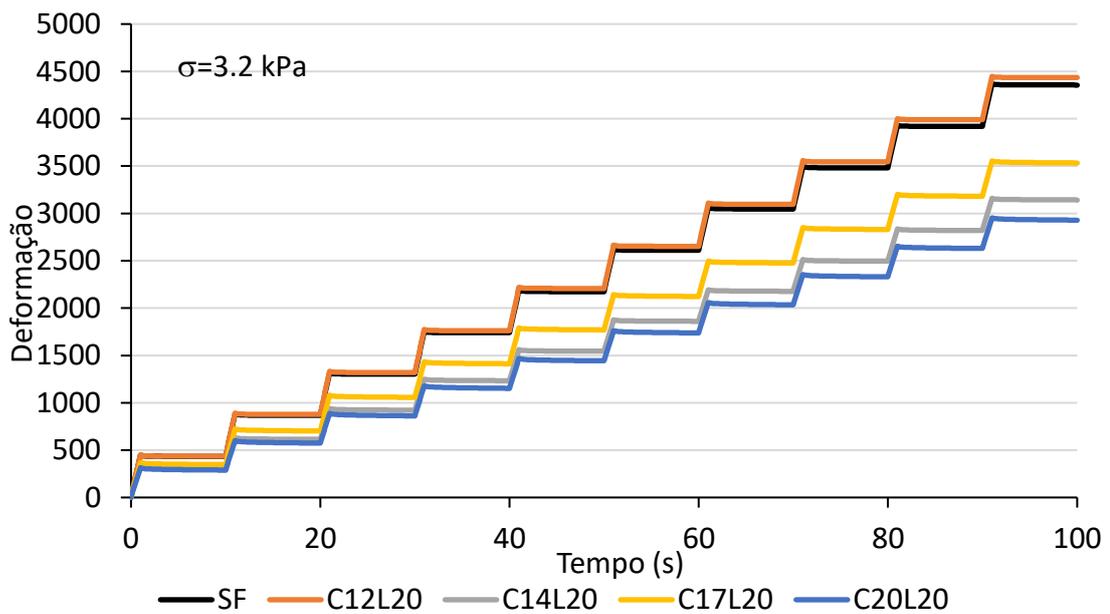


Figura 4.16 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para fibras de 20 mm

A Tabela 4.7 apresenta os valores das percentagens de recuperação (%R) nas tensões aplicadas de 0,1 kPa e 3,2 kPa, assim como a diferença percentual na recuperação (Rdiff) entre 0,1 kPa e 3,2 kPa. Apresenta também os valores para as conformidades não-recuperáveis (Jnr) nas tensões aplicadas de 0,1 kPa e 3,2 kPa, assim como a diferença percentual na conformidade não-recuperável (Jnr-diff) entre 0,1 kPa e 3,2 kPa.

Para os valores de percentagens de recuperação (%R), apenas a amostra C12L20 obteve resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste ensaio quanto maior o valor da recuperação, melhor a elasticidade do ligante, portanto o melhor desempenho para recuperação foi obtido para a amostra C20L20 em que obteve um aumento de 2,2 vezes na tensão de 0,1 kPa e um aumento de 2,6 vezes na tensão de 3,2 kPa em relação a amostra de controlo.

Para os valores de conformidade não-recuperável (Jnr) apenas a amostra C12L20 obteve valores superiores a amostra de controlo (SF), em que neste caso quanto menor o valor, maior será a resistência a deformação permanente, portanto o melhor desempenho nesta comparação foi da amostra C20L20 em que reduziu em 1,6 vezes na tensão de 0,1 kPa e 1,5 vezes na tensão de 3,2 kPa.

Tabela 4.7 - Resultados do MSCR para fibras de 20 mm com percentagens 12, 14, 17 e 20 %

Amostra	%R0.1kPa	%R3.2kPa	Rdiff	Jnr0.1kPa	Jnr3.2kPa	Jnr-diff
SF	6.2	3.1	50.7	124.41	136.13	9.4
C12L20	4.7	2.8	40.6	128.35	138.58	8.0
C14L20	9.9	5.3	46.9	85.03	98.19	15.5
C17L20	11.2	5.7	49.1	96.28	110.41	14.7
C20L20	13.6	8.0	41.3	78.57	91.53	16.5

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam o gráfico da tensão aplicada de 0,1 kPa e de 3,2 kPa, respectivamente, em função do tempo. Comparando-se para o tamanho de fibras de 25 mm, as percentagens de 12 %, 14 %, 17 % e 20%.

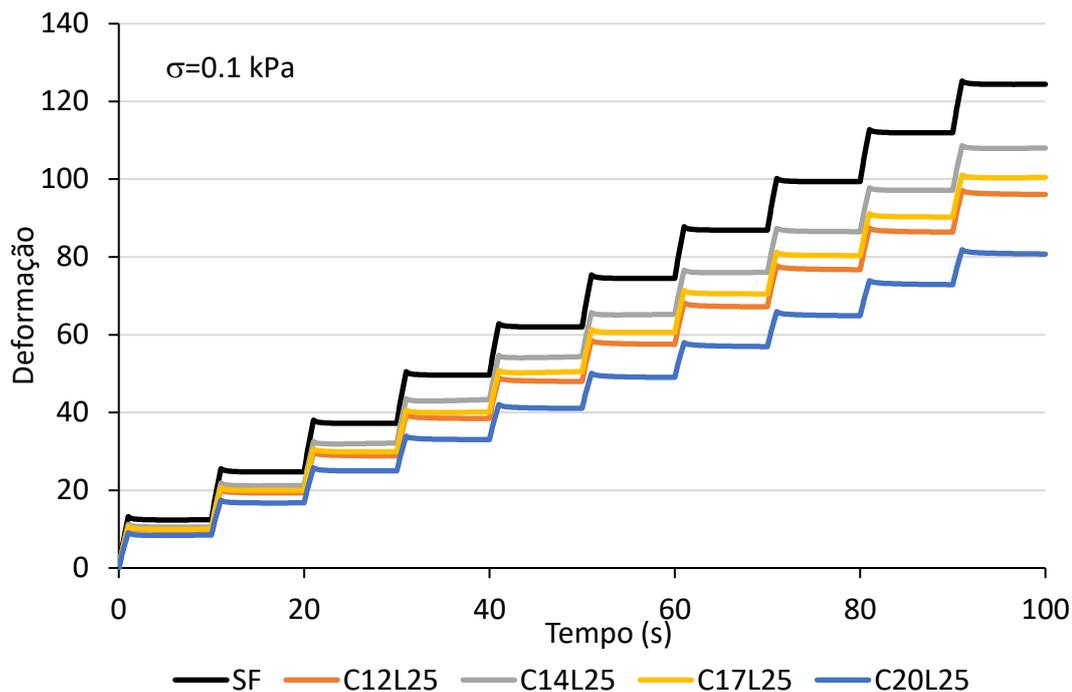


Figura 4.17 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para fibras de 25 mm

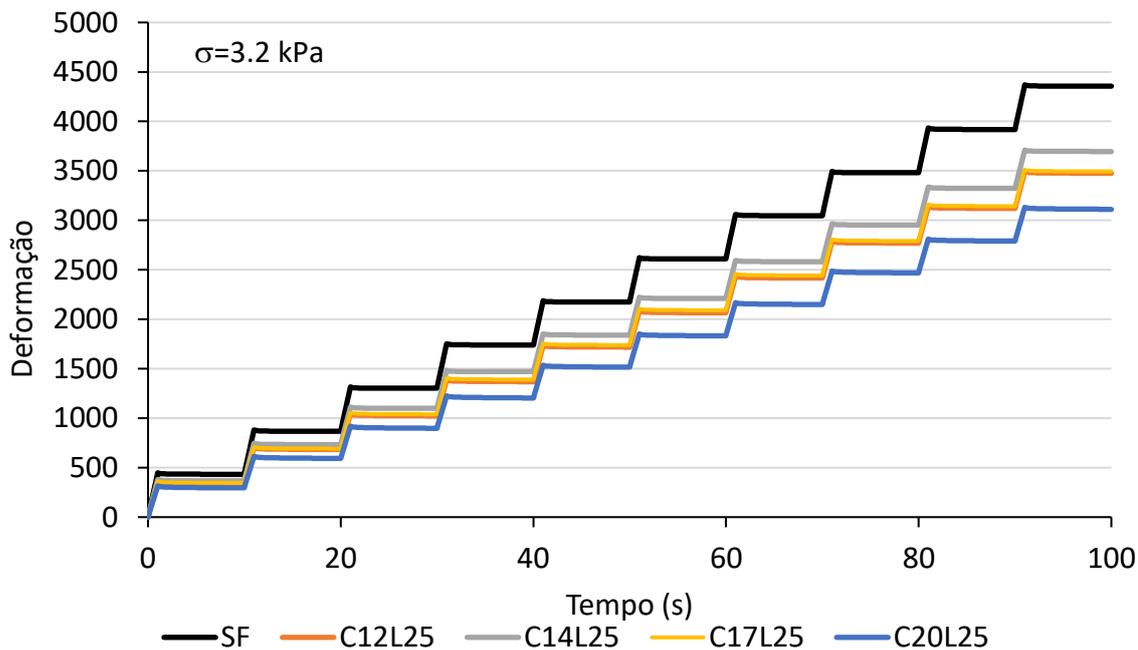


Figura 4.18 -Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para fibras de 25 mm

Na Tabela 4.8 para os valores de percentagens de recuperação (%R), apenas a amostra C14L25 obteve resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste ensaio quanto maior o valor da recuperação, melhor a elasticidade do ligante, portanto o melhor desempenho para recuperação foi

obtido para a amostra C20L25 em que obteve um aumento de 1,7 vezes na tensão de 0,1 kPa e um aumento de 1,9 vezes na tensão de 3,2 kPa em relação a amostra de controlo.

Para os valores de conformidade não-recuperável (Jnr) todas as amostras tiveram resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste caso quanto menor o valor, maior será a resistência a deformação permanente, portanto o melhor desempenho nesta comparação foi da amostra C20L25 em que reduziu em 1,5 vezes na tensão de 0,1 kPa e 1,4 vezes na tensão de 3,2 kPa.

Tabela 4.8 - Resultados do MSCR para fibras de 25 mm com percentagens 12, 14, 17 e 20 %

Amostra	%R0.1kPa	%R3.2kPa	Rdiff	Jnr0.1kPa	Jnr3.2kPa	Jnr-diff
SF	6.2	3.1	50.7	124.41	136.13	9.4
C12L25	9.2	4.7	49.0	96.07	108.62	13.1
C14L25	4.9	3.6	26.4	108.00	115.51	7.0
C17L25	6.4	4.6	27.7	100.44	109.18	8.7
C20L25	10.4	6.0	42.2	80.77	97.24	20.4

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam o gráfico da tensão aplicada de 0,1 kPa e de 3,2 kPa, respectivamente, em função do tempo. Comparando-se para o tamanho de fibras de 38 mm, as percentagens de 12 %, 14 %, 17 % e 20%.

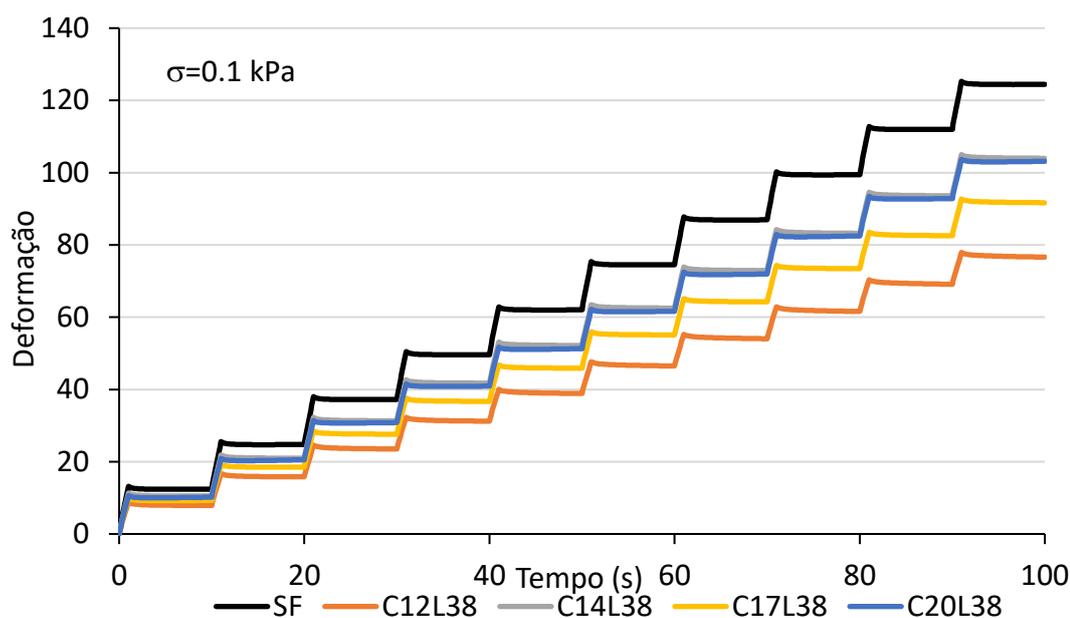


Figura 4.19 -Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para fibras de 38 mm

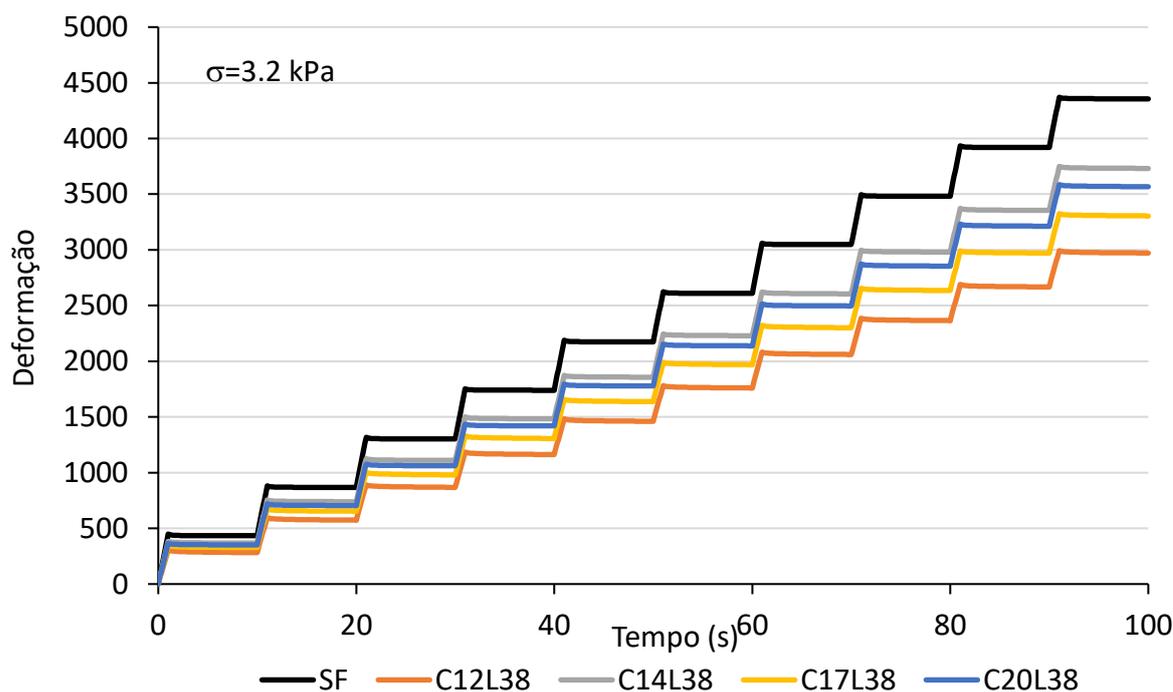


Figura 4.20 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para fibras de 38 mm

Na Tabela 4.9 para os valores de percentagens de recuperação (%R), apenas a amostra C20L38 obteve resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste ensaio quanto maior o valor da recuperação, melhor a elasticidade do ligante, portanto o melhor desempenho para recuperação foi obtido para a amostra C12L38 em que obteve um aumento de 2,1 vezes na tensão de 0,1 kPa e um aumento de 2,3 vezes na tensão de 3,2 kPa em relação a amostra de controlo.

Para os valores de conformidade não-recuperável (Jnr) todas as amostras tiveram resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste caso quanto menor o valor, maior será a resistência a deformação permanente, portanto o melhor desempenho nesta comparação foi da amostra C12L38 em que reduziu em 1,6 vezes na tensão de 0,1 kPa e 1,5 vezes na tensão de 3,2 kPa.

Tabela 4.9 - Resultados do MSCR para fibras de 38 mm com percentagens 12, 14, 17 e 20 %

Amostra	%R0.1kPa	%R3.2kPa	Rdiff	Jnr0.1kPa	Jnr3.2kPa	Jnr-diff
SF	6.2	3.1	50.7	124.41	136.13	9.4
C12L38	13.0	7.0	46.3	76.62	92.86	21.2
C14L38	8.6	4.4	49.1	103.97	116.61	12.2
C17L38	8.8	6.1	31.2	91.68	103.27	12.6
C20L38	4.5	4.6	-0.9	103.15	111.47	8.1

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam o gráfico da tensão aplicada de 0,1 kPa e de 3,2 kPa, respectivamente, em função do tempo. Comparando-se para o tamanho de fibras de 50 mm, as percentagens de 12 %, 14 %, 17 % e 20%.

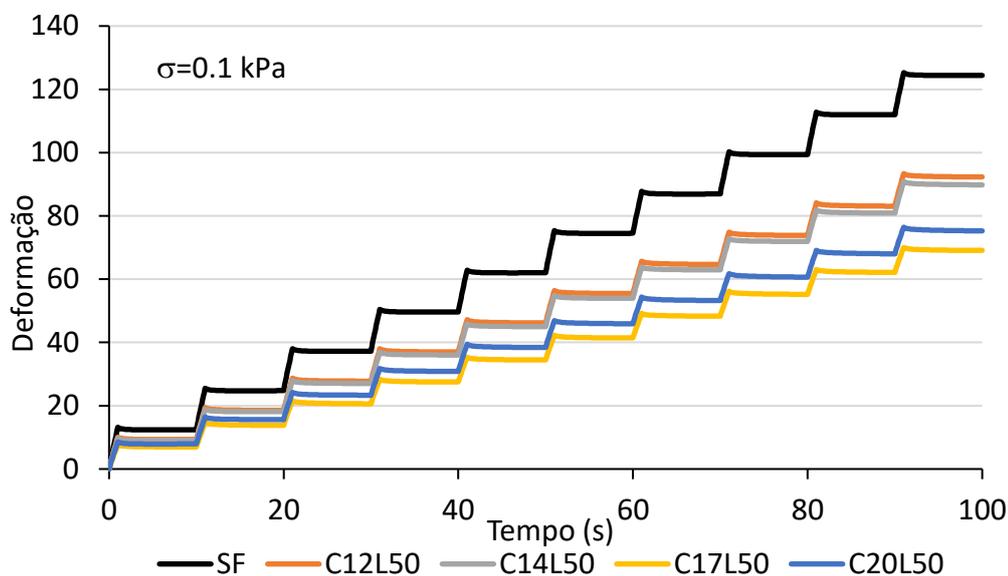


Figura 4.21 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para fibras de 50 mm

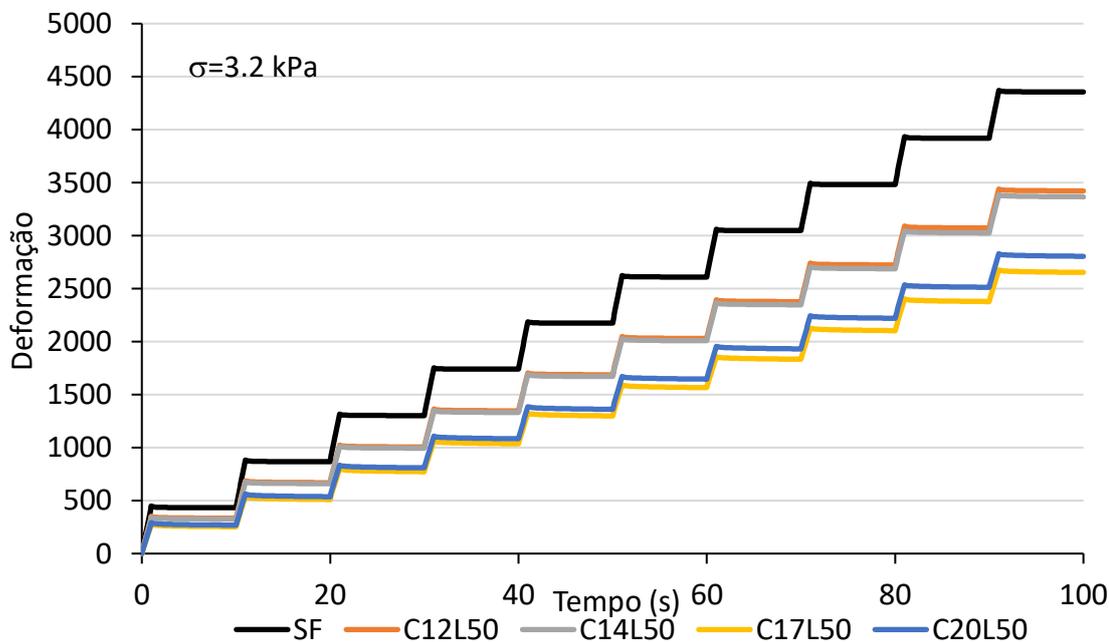


Figura 4.22 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para fibras de 50 mm

Na Tabela 4.10 para os valores de percentagens de recuperação (%R), todas as amostras tiveram resultados superiores a amostra de controlo (SF), em que neste ensaio quanto maior o valor da

recuperação, melhor a elasticidade do ligante, portanto o melhor desempenho para recuperação foi obtido para a amostra C17L50 em que obteve um aumento de 1,9 vezes na tensão de 0,1 kPa e um aumento de 2,8 vezes na tensão de 3,2 kPa em relação a amostra de controlo.

Para os valores de conformidade não-recuperável (Jnr) todas as amostras tiveram resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste caso quanto menor o valor, maior será a resistência a deformação permanente, portanto o melhor desempenho nesta comparação foi da amostra C17L50 em que reduziu em 1,8 vezes na tensão de 0,1 kPa e 1,6 vezes na tensão de 3,2 kPa.

Tabela 4.10 - Resultados do MSCR para fibras de 50 mm com percentagens 12, 14, 17 e 20 %

Amostra	%R0.1kPa	%R3.2kPa	Rdiff	Jnr0.1kPa	Jnr3.2kPa	Jnr-diff
SF	6.2	3.1	50.7	124.41	136.13	9.4
C12L50	9.6	4.9	48.5	92.27	106.93	15.9
C14L50	9.0	5.2	41.7	89.81	105.19	17.1
C17L50	11.5	8.8	22.9	69.07	82.88	20.0
C20L50	11.5	8.2	28.7	75.25	87.66	16.5

### Variando o comprimento com a mesma percentagem de fibra

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam o gráfico da tensão aplicada de 0,1 kPa e de 3,2 kPa, respectivamente, em função do tempo. Comparando-se para a mesma percentagem de fibras de 12%, os comprimentos de 20 mm, 25 mm, 38 mm e 50 mm.

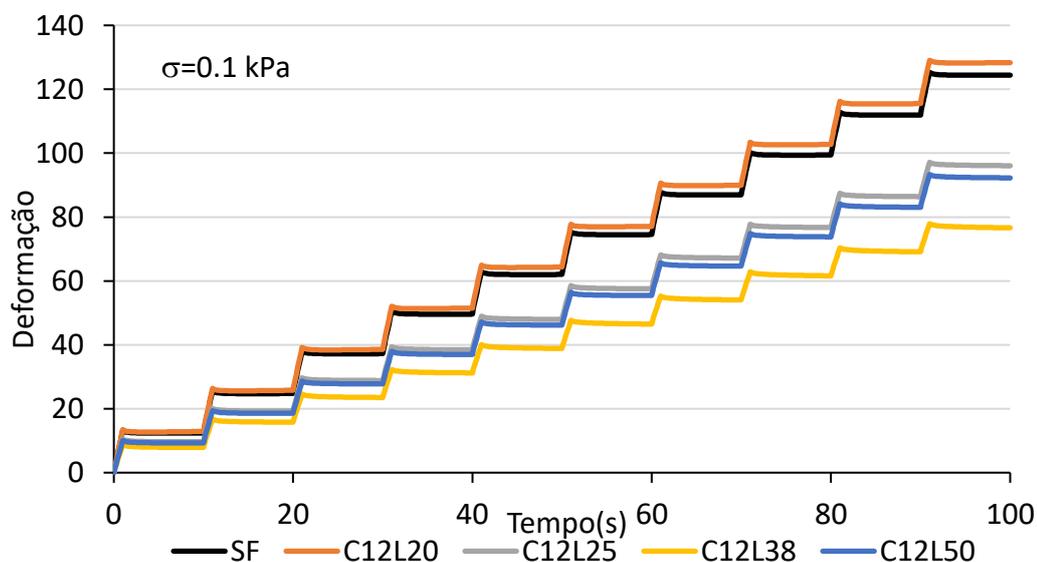


Figura 4.23 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para percentagem de fibras de 12 %

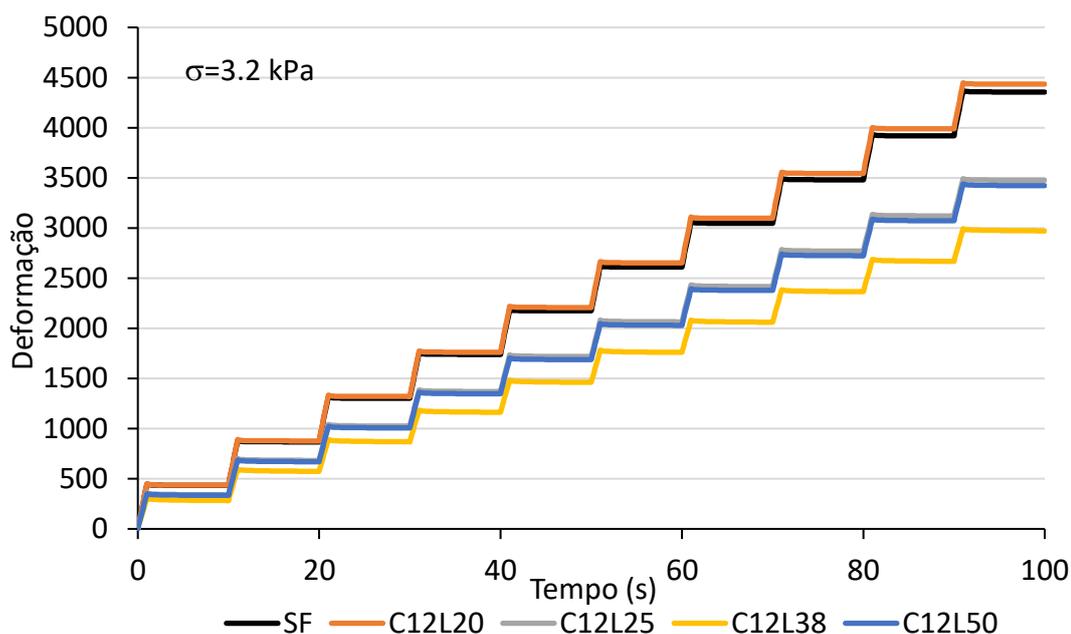


Figura 4.24 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para percentagem de fibras de 12 %

Na Tabela 4.11 para os valores de percentagens de recuperação (%R), apenas a amostra C12L20 obteve resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste ensaio quanto maior o valor da recuperação, melhor a elasticidade do ligante, portanto o melhor desempenho para recuperação foi obtido para a amostra C12L38 em que obteve um aumento de 2,1 vezes na tensão de 0,1 kPa e um aumento de 2,3 vezes na tensão de 3,2 kPa em relação a amostra de controlo.

Para os valores de conformidade não-recuperável (Jnr) apenas a amostra C12L20 teve resultados superiores a amostra de controlo (SF), em que neste caso quanto menor o valor, maior será a resistência a deformação permanente, portanto o melhor desempenho nesta comparação foi da amostra C12L38 em que reduziu em 1,6 vezes na tensão de 0,1 kPa e 1,5 vezes na tensão de 3,2 kPa.

Tabela 4.11 - Resultados do MSCR para fibras de 12 % com tamanhos de 20, 25, 38 e 50 mm

Amostra	%R0.1kPa	%R3.2kPa	Rdiff	Jnr0.1kPa	Jnr3.2kPa	Jnr-diff
SF	6.2	3.1	50.7	124.41	136.13	9.4
C12L20	4.7	2.8	40.6	128.35	138.58	8.0
C12L25	9.2	4.7	49.0	96.07	108.62	13.1
C12L38	13.0	7.0	46.3	76.62	92.86	21.2
C12L50	9.6	4.9	48.5	92.27	106.93	15.9

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam o gráfico da tensão aplicada de 0,1 kPa e de 3,2 kPa, respectivamente, em função do tempo. Comparando-se para a mesma percentagem de fibras de 14%, os comprimentos de 20 mm, 25 mm, 38 mm e 50 mm.

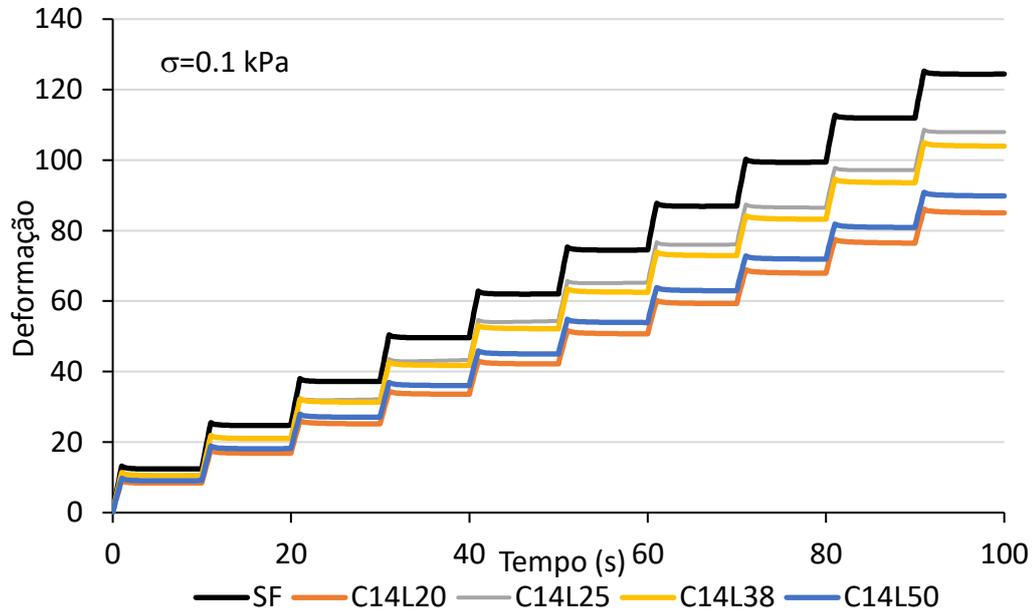


Figura 4.25 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para percentagem de fibras de 14 %

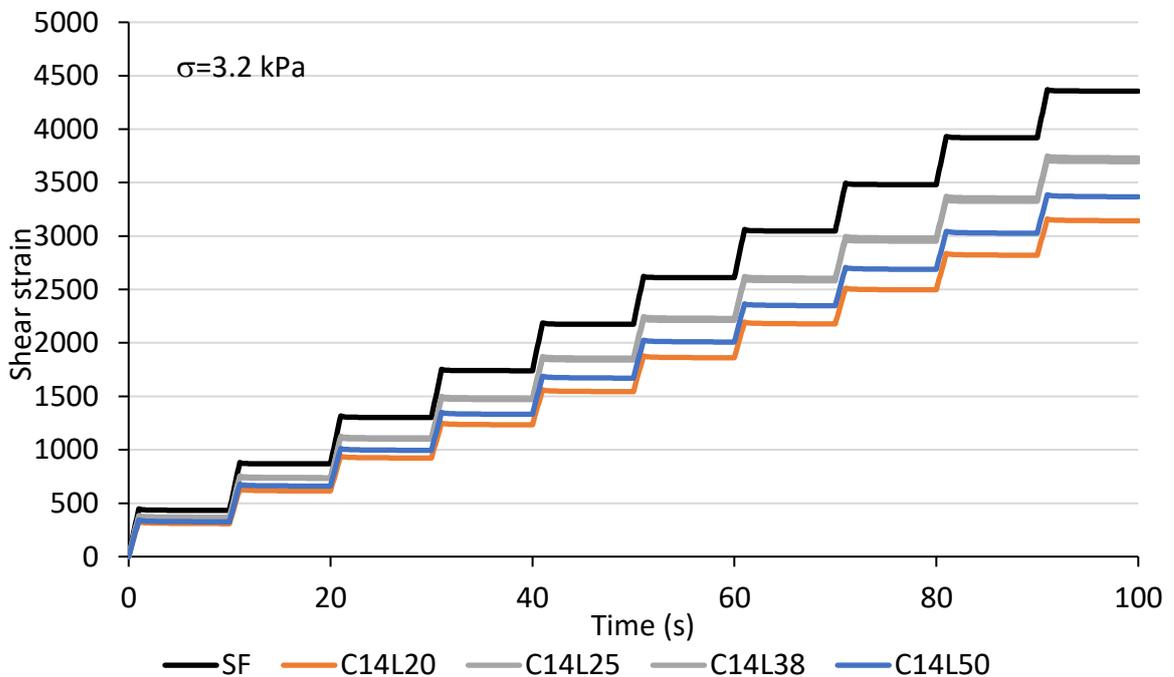


Figura 4.26 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para percentagem de fibras de 14 %

Na Tabela 4.12 para os valores de percentagens de recuperação (%R), apenas a amostra C14L25 obteve resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste ensaio quanto maior o valor da recuperação, melhor a elasticidade do ligante, portanto o melhor desempenho para recuperação foi obtido para a amostra C14L20 em que obteve um aumento de 1,6 vezes na tensão de 0,1 kPa e um aumento de 1,7 vezes na tensão de 3,2 kPa em relação a amostra de controlo.

Para os valores de conformidade não-recuperável (Jnr) todas as amostras tiveram resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste caso quanto menor o valor, maior será a resistência a deformação permanente, portanto o melhor desempenho nesta comparação foi da amostra C14L20 em que reduziu em 1,4 vezes na tensão de 0,1 kPa e 1,4 vezes na tensão de 3,2 kPa.

Tabela 4.12 - Resultados do MSCR para fibras de 14 % com tamanhos de 20, 25, 38 e 50 mm

Amostra	%R0.1kPa	%R3.2kPa	Rdiff	Jnr0.1kPa	Jnr3.2kPa	Jnr-diff
SF	6.2	3.1	50.7	124.41	136.13	9.4
C14L20	9.9	5.3	46.9	85.03	98.19	15.5
C14L25	4.9	3.6	26.4	108.00	115.51	7.0
C14L38	8.6	4.4	49.1	103.97	116.61	12.2
C14L50	9.0	5.2	41.7	89.81	105.19	17.1

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam o gráfico da tensão aplicada de 0,1 kPa e de 3,2 kPa, respectivamente, em função do tempo. Comparando-se para a mesma percentagem de fibras de 17%, os comprimentos de 20 mm, 25 mm, 38 mm e 50 mm.

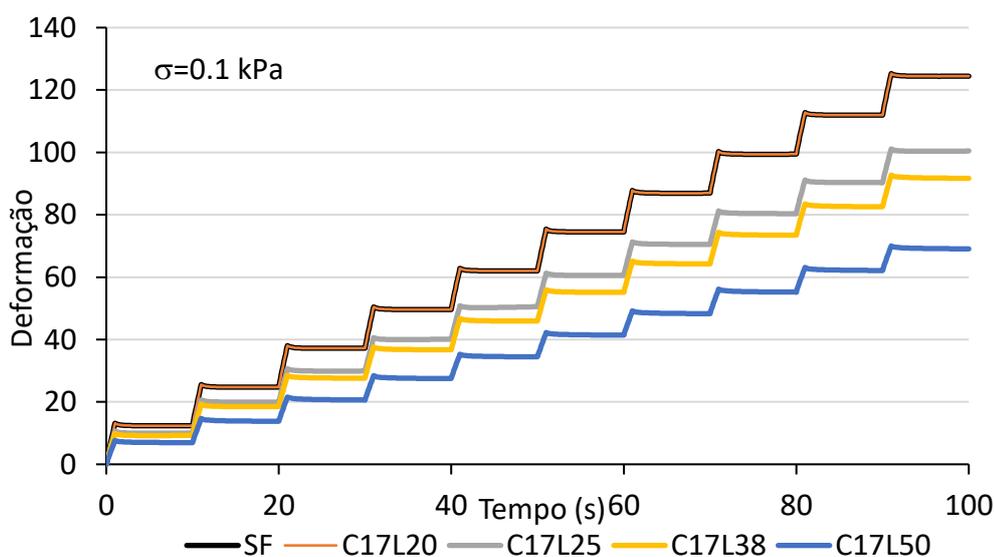


Figura 4.27 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para percentagem de fibras de 17 %

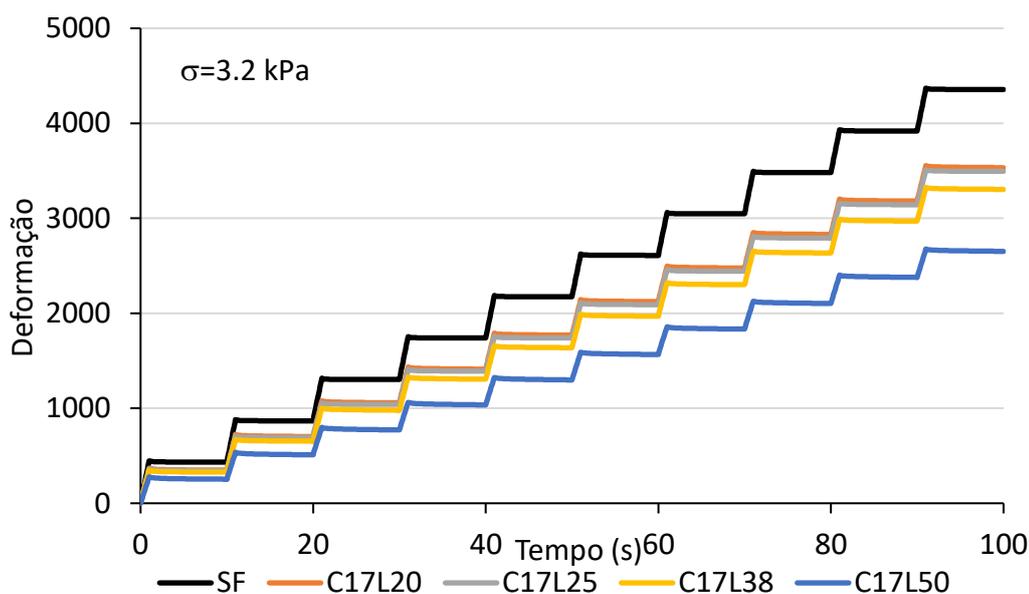


Figura 4.28 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para percentagem de fibras de 17 %

Na Tabela 4.13 para os valores de percentagens de recuperação (%R), todas as amostras tiveram resultados superiores a amostra de controlo (SF), em que neste ensaio quanto maior o valor da recuperação, melhor a elasticidade do ligante, portanto o melhor desempenho para recuperação foi obtido para a amostra C17L50 em que obteve um aumento de 1,9 vezes na tensão de 0,1 kPa e um aumento de 2,8 vezes na tensão de 3,2 kPa em relação a amostra de controlo.

Para os valores de conformidade não-recuperável (Jnr) todas as amostras tiveram resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste caso quanto menor o valor, maior será a resistência a deformação permanente, portanto o melhor desempenho nesta comparação foi da amostra C17L50 em que reduziu em 1,8 vezes na tensão de 0,1 kPa e 1,6 vezes na tensão de 3,2 kPa.

Tabela 4.13 - Resultados do MSCR para fibras de 17 % com tamanhos de 20, 25, 38 e 50 mm

Amostra	%R0.1kPa	%R3.2kPa	Rdiff	Jnr0.1kPa	Jnr3.2kPa	Jnr-diff
SF	6.2	3.1	50.7	124.41	136.13	9.4
C17L20	11.2	5.7	49.1	96.28	110.41	14.7
C17L25	6.4	4.6	27.7	100.44	109.18	8.7
C17L38	8.8	6.1	31.2	91.68	103.27	12.6
C17L50	11.5	8.8	22.9	69.07	82.88	20.0

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam o gráfico da tensão aplicada de 0,1 kPa e de 3,2 kPa, respectivamente, em função do tempo. Comparando-se para a mesma percentagem de fibras de 20%, os comprimentos de 20 mm, 25 mm, 38 mm e 50 mm.

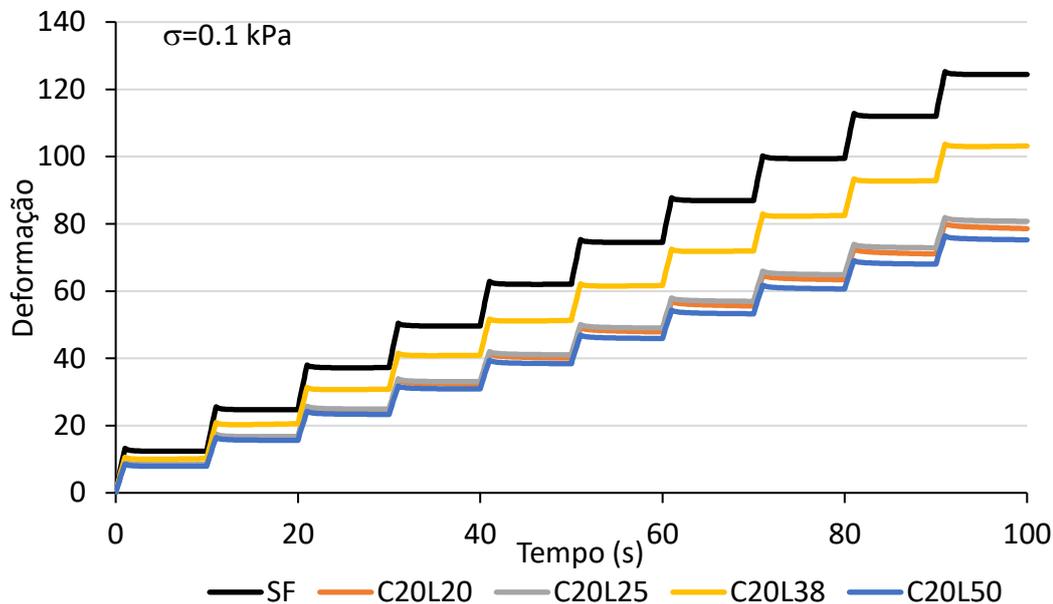


Figura 4.29 - Ensaio MSCR com tensão de 0,1 kPa para percentagem de fibras de 20 %

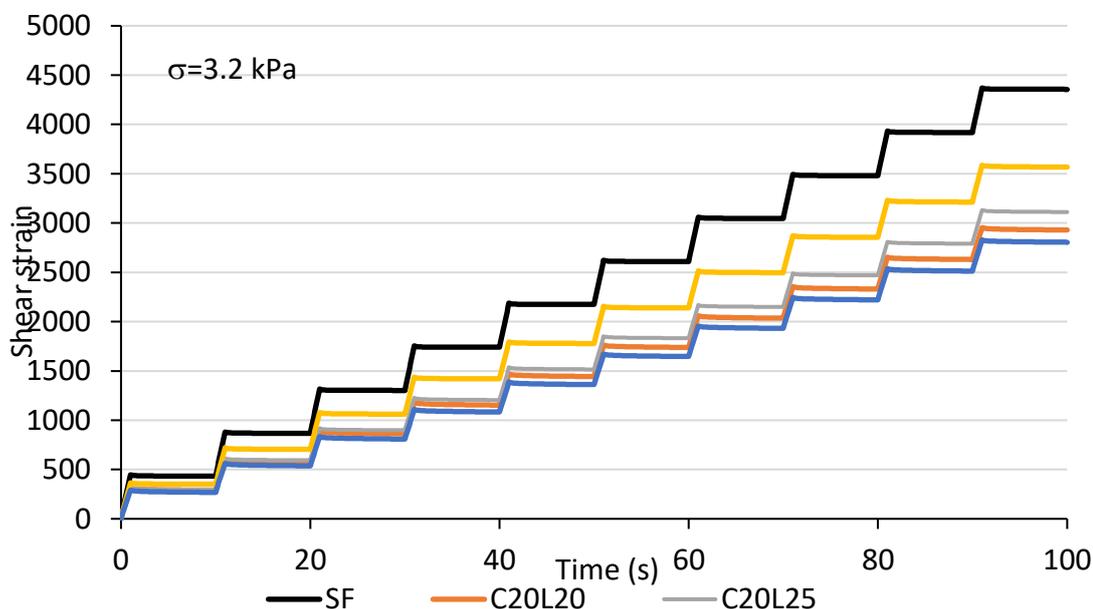


Figura 4.30 - Ensaio MSCR com tensão de 3,2 kPa para percentagem de fibras de 20 %

Na Tabela 4.14 para os valores de percentagens de recuperação (%R), apenas a amostra C20L38 obteve resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste ensaio quanto maior o valor da recuperação, melhor a elasticidade do ligante, portanto o melhor desempenho para recuperação foi

obtido para a amostra C20L20 em que obteve um aumento de 2,2 vezes na tensão de 0,1 KPa e um aumento de 2,6 vezes na tensão de 3,2 KPa em relação a amostra de controlo.

Para os valores de conformidade não-recuperável (Jnr) todas as amostras tiveram resultados inferiores a amostra de controlo (SF), em que neste caso quanto menor o valor, maior será a resistência a deformação permanente, portanto o melhor desempenho nesta comparação foi da amostra C20L50 em que reduziu em 1,7 vezes na tensão de 0,1 KPa e 1,6 vezes na tensão de 3,2 KPa.

Tabela 4.14 - Resultados do MSCR para fibras de 20 % com tamanhos de 20, 25, 38 e 50 mm

Amostra	%R0.1kPa	%R3.2kPa	Rdiff	Jnr0.1kPa	Jnr3.2kPa	Jnr-diff
SF	6.2	3.1	50.7	124.41	136.13	9.4
C20L20	13.6	8.0	41.3	78.57	91.53	16.5
C20L25	10.4	6.0	42.2	80.77	97.24	20.4
C20L38	4.5	4.6	-0.9	103.15	111.47	8.1
C20L50	11.5	8.2	28.7	75.25	87.66	16.5

#### 4.2.2. LAS

Na análise dos resultados do ensaio do LAS foram realizadas comparações com o aumento da percentagem de fibras para o mesmo tamanho de fibra e também para as mesmas percentagens a variação do comprimento das fibras.

Em relação ao comportamento reológico dos vários provetes, a adição de fibras mostrou aumentar de forma geral a rigidez dos ligantes modificados.

Para este ensaio, as interações obtidas nas Tabela 4.15 e 4.16 mostram os resultados das amostras com os melhores desempenhos de forma resumida. Foram classificadas de acordo com os gráficos que mostram de forma mais detalhada ao longo dos resultados deste ensaio. A amostra que aparece mais vezes nas interações é a C17L25, portanto ela é classificada como o melhor desempenho nos quesitos de módulo de rigidez, ângulo de fase e dano para o ensaio do LAS.

Tabela 4.15 - Variando a percentagem com o mesmo comprimento de fibra

Amostras com os melhores desempenhos			
Comprimento	Módulo de rigidez	Ângulo fase	Dano
20 mm	C20L20	C17L20	C20L20
25 mm	C17L25	C17L25	C17L25
38 mm	C17L38	C14L38	C14L38
50 mm	C17L50	C20L50	C12L50

Tabela 4.16 - Variando o comprimento com a mesma percentagem de fibra

Amostras com os melhores desempenhos			
Percentagem	Módulo de rigidez	Ângulo fase	Dano
12%	C12L25	C12L38	C12L50
14%	C14L25	C14L38	C14L38
17%	C17L25	C17L38	C17L25
20%	C20L20	C20L50	C20L50

A seguir é descrito os resultados de forma mais detalhada todas as interações realizadas neste ensaio para obter uma melhor configuração entre as amostras.

### **Comparação no aumento da percentagem de fibras no betume**

#### **Fibra comprimento 20mm**

Na Figura 4.31 apresenta o gráfico do módulo de rigidez em função da frequência, todas as amostras apresentam valores superiores da amostra de controlo sem fibras (SF), mas a amostra C20L20 apresenta um melhor desempenho.

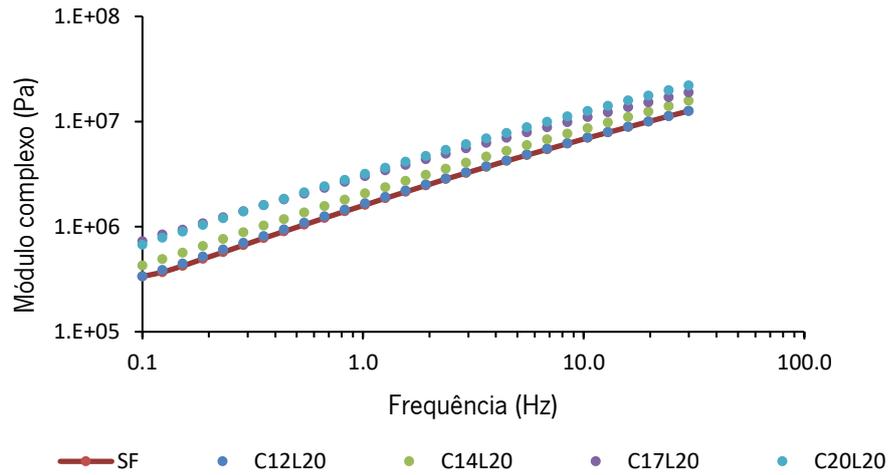


Figura 4.31 - Módulo de rigidez em função da frequência de fibras de 20 mm

Em relação aos resultados da Figura 4.32 do gráfico de ângulo de fase em função da frequência, os valores do ângulo de fase mais inferiores demonstram uma resposta mais elástica do ligante, portanto para essa comparação a amostra C17L20 obteve um melhor desempenho em relação a amostra de controle (SF).

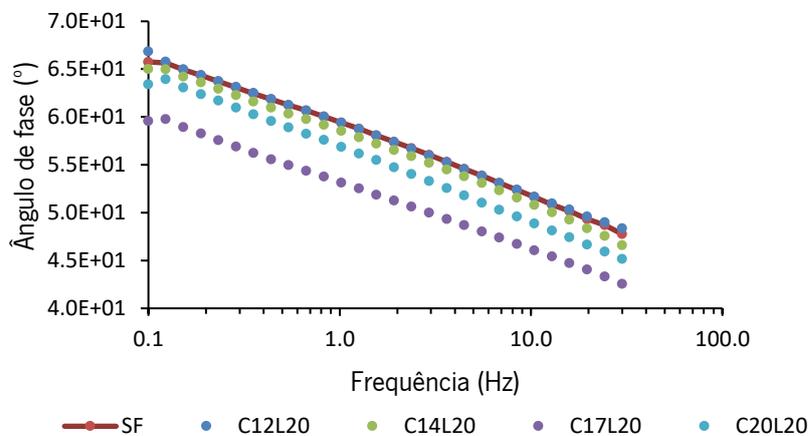


Figura 4.32 - Ângulo fase em função da frequência de fibras de 20 mm

A Figura 4.33 apresenta o gráfico da tensão de cisalhamento em função da deformação obtida através do ensaio de varredura linear de amplitude com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C12L20, C14L20, C17L20 e C20L20). Observa-se que as curvas apresentam uns comportamentos variáveis, em que até os 10% de deformação apresentam picos superiores dos ligantes modificados em relação a amostra de controle, assim demonstram que suportam uma tensão maior de cisalhamento, e conseqüentemente uma maior rigidez.

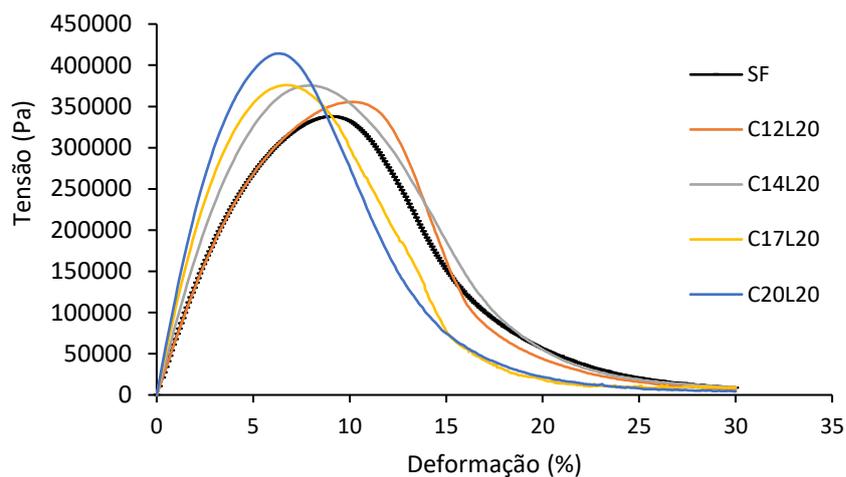


Figura 4.33 - Tensão de cisalhamento em função da deformação das fibras de 20 mm

A Figura 4.34 apresenta o gráfico da integridade do material (C) em função ao dano (S) com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C12L20, C14L20, C17L20 e C20L20). O parâmetro C está relacionado com os valores de  $G^* \cdot \text{sen} \delta_{\text{inicial}}$  e  $G^* \cdot \text{sen} \delta$  para as amplitudes de deformações aplicadas. Desta forma verifica-se a integridade do material, bem como o dano gerado ao provete.

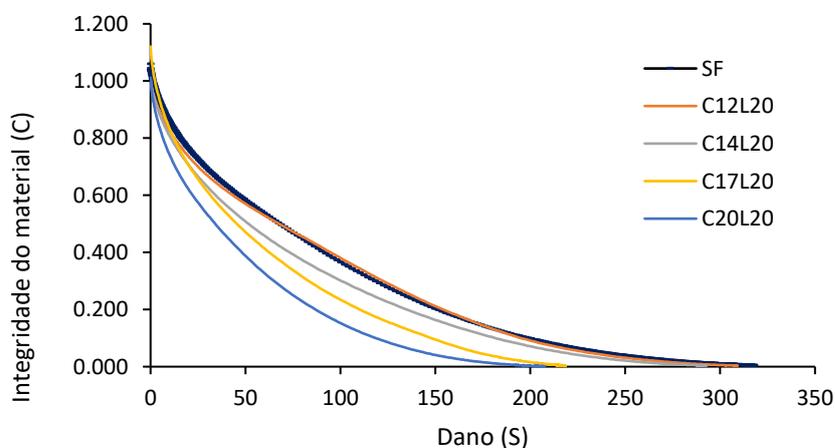


Figura 4.34 - Integridade do material em função do dano com fibras de 20 mm

A Tabela 4.13 apresenta os coeficientes VECD (*Viscoelastic Continuum Damage*) gerados através das curvas da Figura 4.34, em que o parâmetro  $C_0$  representa o estado inicial do material e o seu dano é zero, logo a integridade do material inicia em 100 %,  $C_0$  igual a 1.

Segundo o estudo de Jafari & Babazadeh (2016) é desejável que os valores de  $C_1$  sejam maximizados e os valores de  $C_2$  sejam minimizados, o que indicaria que houve pequenas variações no valor de  $G^* \cdot \text{sen} \delta$  ao longo do teste. Ligantes com menores reduções do  $G^* \cdot \text{sen} \delta$  indicam que são mais resistentes ao

dano.

A Tabela 4.13 apresenta os valores dos parâmetros C para a comparação da amostra de controle (SF) com as amostras C12L20, C14L20, C17L20, C20L20. Todas as amostras com fibras nessa comparação apresentam valores de C1 superiores e valores de C2 inferiores a amostra sem fibras (SF), portanto os desempenhos a resistência ao dano aumentaram. A amostra C20L20 obteve o melhor desempenho.

Tabela 4.17 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com fibras de 20 mm

Amostra	C0 (MPa)	C1 (MPa)	C2 (MPa)
SF	1,000	0,050	0,534
C12L20	1,000	0,060	0,501
C14L20	1,000	0,078	0,460
C17L20	1,000	0,068	0,507
C20L20	1,000	0,115	0,415

### Fibra comprimento 25mm

Na Figura 4.35 apresenta o gráfico do módulo de rigidez em função da frequência, todas as amostras apresentam valores superiores da amostra de controle sem fibras (SF), mas a amostra C17L25 apresenta um melhor desempenho.

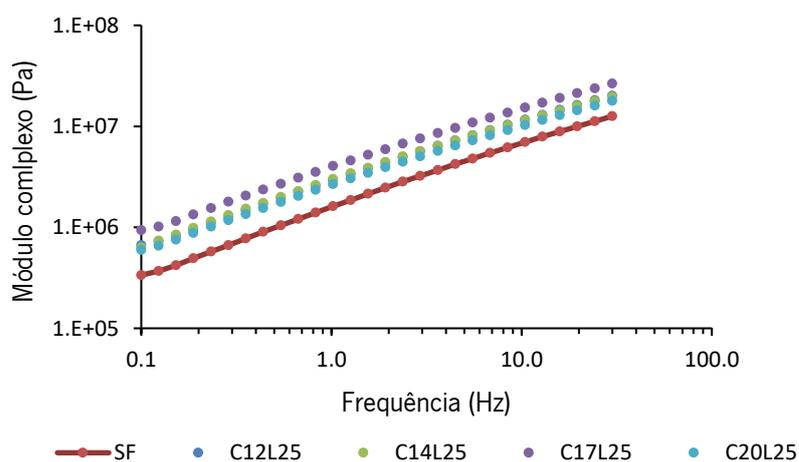


Figura 4.35 - Módulo de rigidez em função da frequência de fibras de 25 mm

Em relação aos resultados da Figura 4.36 do gráfico de ângulo de fase em função da frequência, os valores do ângulo de fase mais inferiores para essa comparação resultaram na amostra C17L25, obtendo um melhor desempenho em relação a amostra de controle (SF).

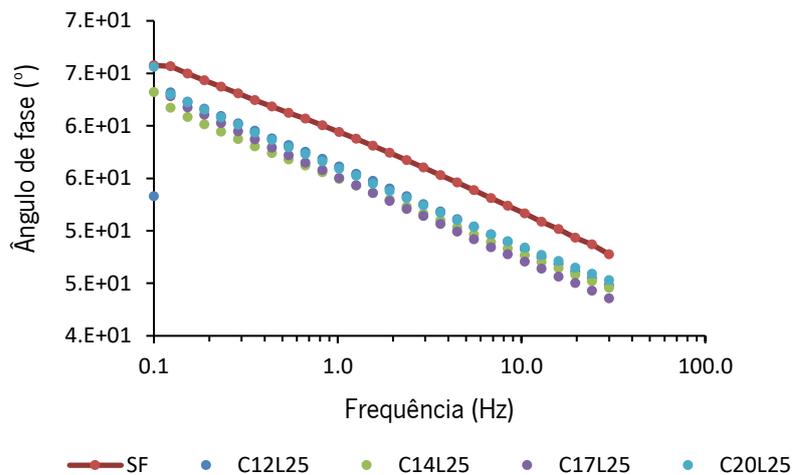


Figura 4.36 - Ângulo fase em função da frequência de fibras de 25 mm

A Figura 4.37 apresenta o gráfico da tensão de cisalhamento em função da deformação obtida através do ensaio de varredura linear de amplitude com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C12L25, C14L25, C17L25 e C20L25). Observa-se que as curvas apresentam uns comportamentos variáveis, em que até quase os 10% de deformação apresentam picos superiores dos ligantes modificados em relação a amostra de controlo, assim demonstram que suportam uma tensão maior de cisalhamento, e conseqüentemente uma maior rigidez.

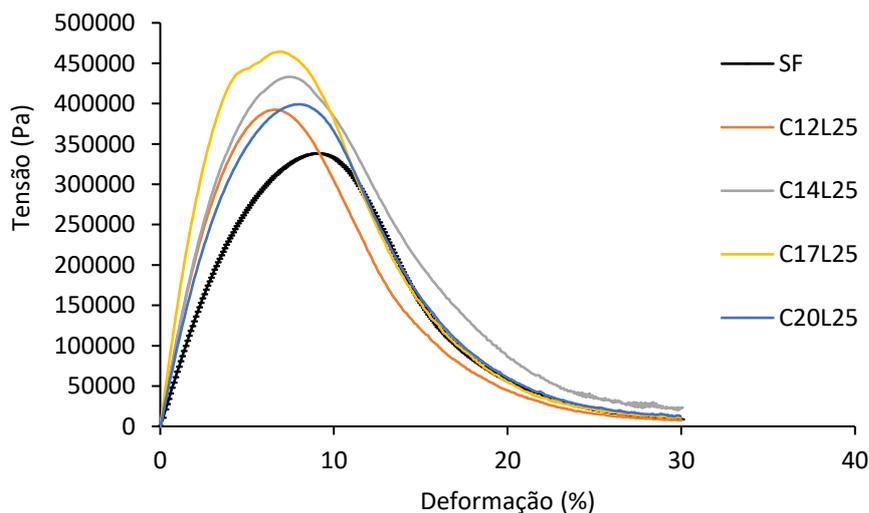


Figura 4.37 - Tensão de cisalhamento em função da deformação das fibras de 25 mm

A Figura 4.38 apresenta o gráfico da integridade do material (C) em função ao dano (S) com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C12L25, C14L25, C17L25 e C20L25).

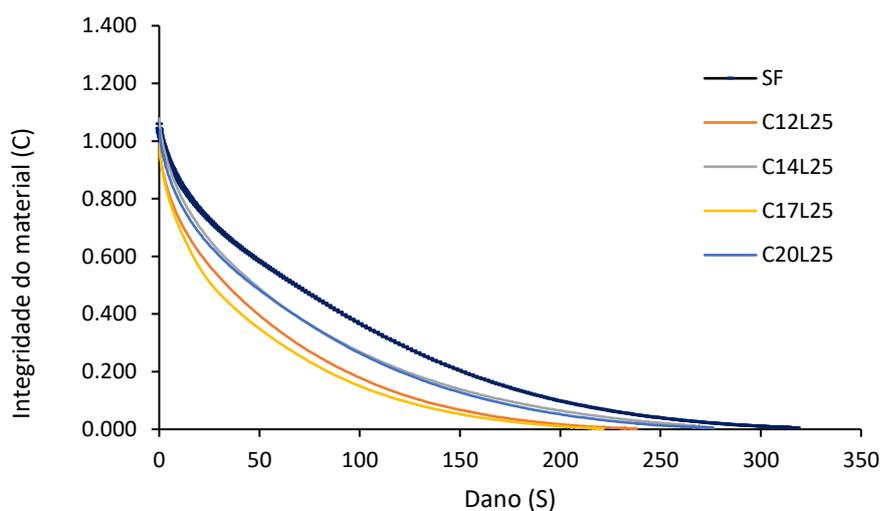


Figura 4.38 - Integridade do material em função do dano com fibras de 25 mm

A Tabela 4.14 apresenta os valores dos parâmetros C para a comparação da amostra de controlo (SF) com as amostras C12L25, C14L25, C17L25, C20L25. Todas as amostras com fibras nessa comparação apresentam valores de C1 superiores e valores de C2 inferiores a amostra sem fibras (SF), portanto os desempenhos a resistência ao dano aumentaram. A amostra C17L25 obteve o melhor desempenho.

Tabela 4.18 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com fibras de 25 mm

Amostra	C0 (MPa)	C1 (MPa)	C2 (MPa)
SF	1,000	0,050	0,534
C12L25	1,000	0,129	0,385
C14L25	1,000	0,079	0,463
C17L25	1,000	0,162	0,345
C20L25	1,000	0,089	0,442

### Fibra comprimento 38mm

Na Figura 4.39 apresenta o gráfico do módulo de rigidez em função da frequência, todas as amostras apresentam valores superiores da amostra de controlo sem fibras (SF), mas a amostra C17L38 apresenta um melhor desempenho.

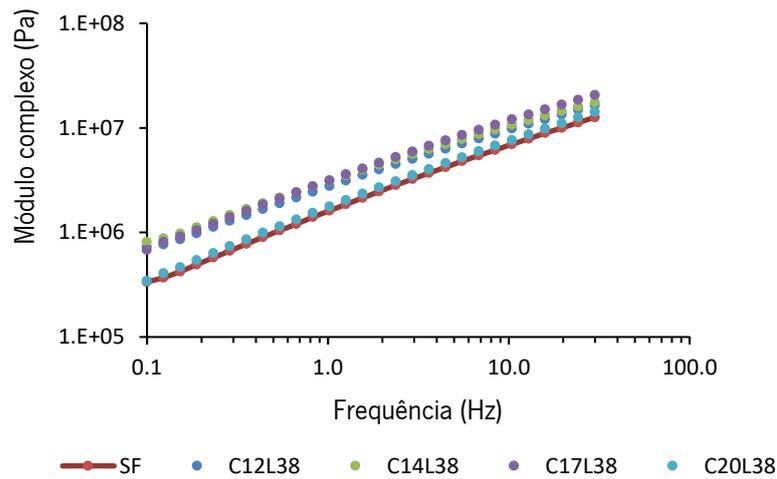


Figura 4.39 - Módulo de rigidez em função da frequência de fibras de 38 mm

Em relação aos resultados da Figura 4.40 do gráfico de ângulo de fase em função da frequência, os valores do ângulo de fase mais inferiores para essa comparação resultaram na amostra C14L38, obtendo um melhor desempenho em relação a amostra de controle (SF).

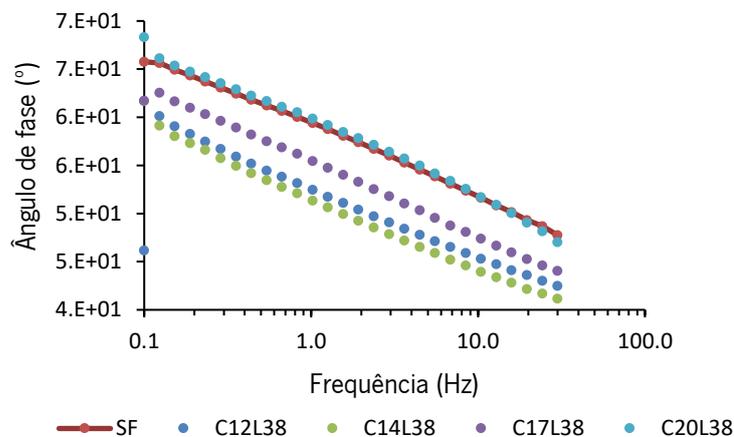


Figura 4.40 - Ângulo fase em função da frequência de fibras de 38 mm

A Figura 4.41 apresenta o gráfico da tensão de cisalhamento em função da deformação obtida através do ensaio de varredura linear de amplitude com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C12L38, C14L38, C17L38 e C20L38). Observa-se que as curvas apresentam uns comportamentos variáveis, ocorrendo um desfasamento com a amostra C14L38, podendo ter ocorrido algum erro de leitura no ensaio ou na amostra. Neste caso a amostra C17L38 obteve o melhor desempenho, assim demonstra que suporta uma tensão maior de cisalhamento, e conseqüentemente uma maior rigidez.

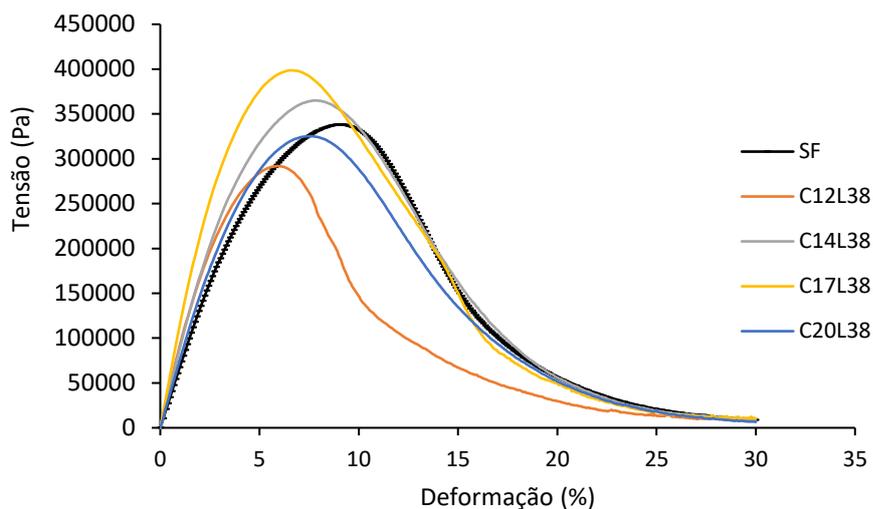


Figura 4.41 - Tensão de cisalhamento em função da deformação das fibras de 38 mm

A Figura 4.42 apresenta o gráfico da integridade do material (C) em função ao dano (S) com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C12L38, C14L38, C17L38 e C20L38).

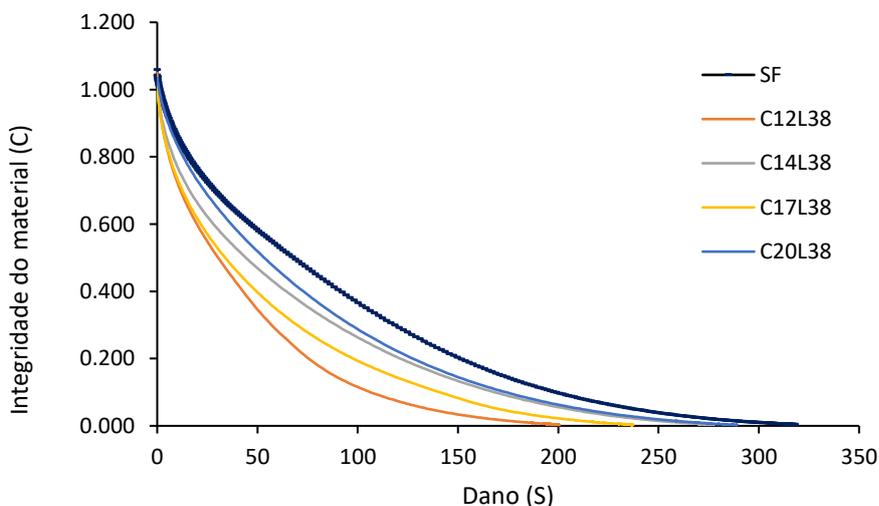


Figura 4.42 - Integridade do material em função do dano com fibras de 38 mm

A Tabela 4.15 apresenta os valores dos parâmetros C para a comparação da amostra de controle (SF) com as amostras C12L38, C14L38, C17L38, C20L38. Todas as amostras com fibras nessa comparação apresentam valores de C1 superiores e valores de C2 inferiores a amostra sem fibras (SF), portanto os desempenhos a resistência ao dano aumentaram. A amostra C14L38 obteve o melhor desempenho.

Tabela 4.19 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com fibras de 38 mm

Amostra	C0 (MPa)	C1 (MPa)	C2 (MPa)
SF	1,000	0,050	0,534
C12L38	1,000	0,133	0,392
C14L38	1,000	0,253	0,277
C17L38	1,000	0,128	0,384
C20L38	1,000	0,066	0,495

### Fibra comprimento 50mm

Na Figura 4.43 apresenta o gráfico do módulo de rigidez em função da frequência, todas as amostras apresentam valores superiores da amostra de controle sem fibras (SF), mas a amostra C17L50 apresenta um melhor desempenho.

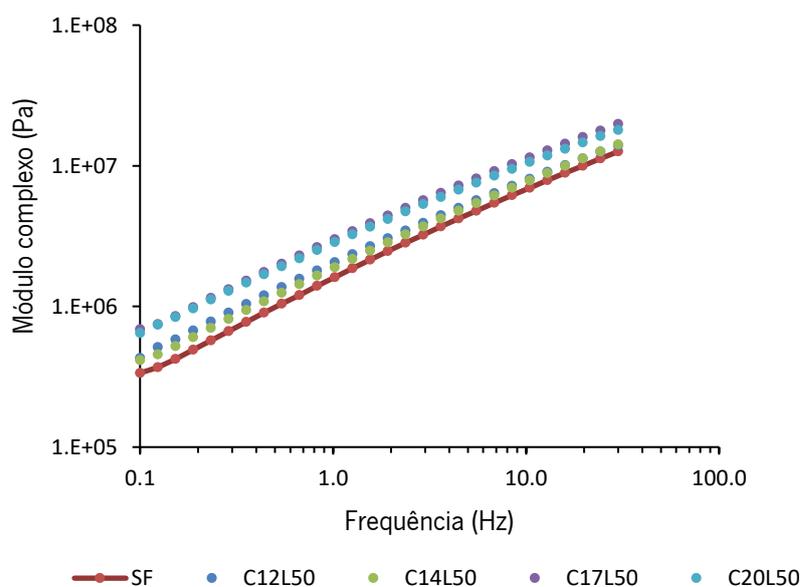


Figura 4.43 - Módulo de rigidez em função da frequência de fibras de 50 mm

Em relação aos resultados da Figura 4.44 do gráfico de ângulo de fase em função da frequência, os valores do ângulo de fase mais inferiores para essa comparação resultaram na amostra C20L50, obtendo um melhor desempenho em relação a amostra de controle (SF).

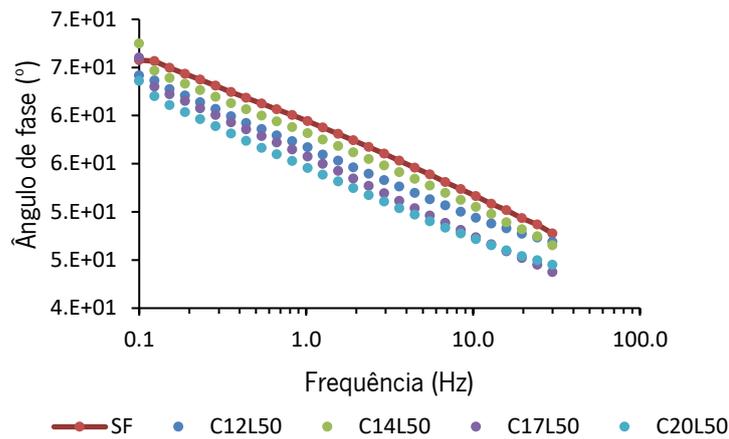


Figura 4.44 - Ângulo fase em função da frequência de fibras de 50 mm

A Figura 4.45 apresenta o gráfico da tensão de cisalhamento em função da deformação obtida através do ensaio de varredura linear de amplitude com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C12L50, C14L50, C17L50 e C20L50). Observa-se que as curvas apresentam uns comportamentos variáveis, em que a amostra com o melhor desempenho é C17L50 seguida da C20L50 até quase os 10% de deformação, pois apresentam picos superiores em relação a amostra de controlo, assim demonstram que suportam uma tensão maior de cisalhamento, e conseqüentemente uma maior rigidez.

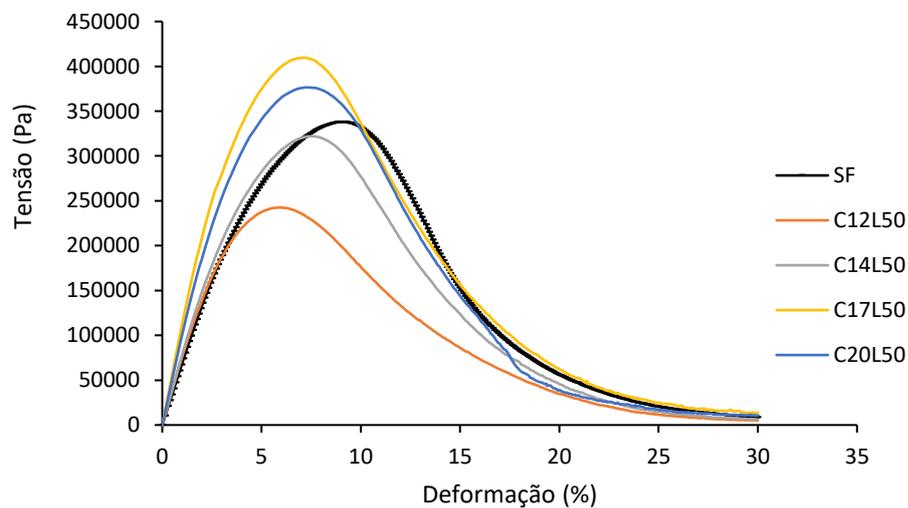


Figura 4.45 - Tensão de cisalhamento em função da deformação das fibras de 50 mm

A Figura 4.38 apresenta o gráfico da integridade do material (C) em função ao dano (S) com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C12L50, C14L50, C17L50 e C20L50).

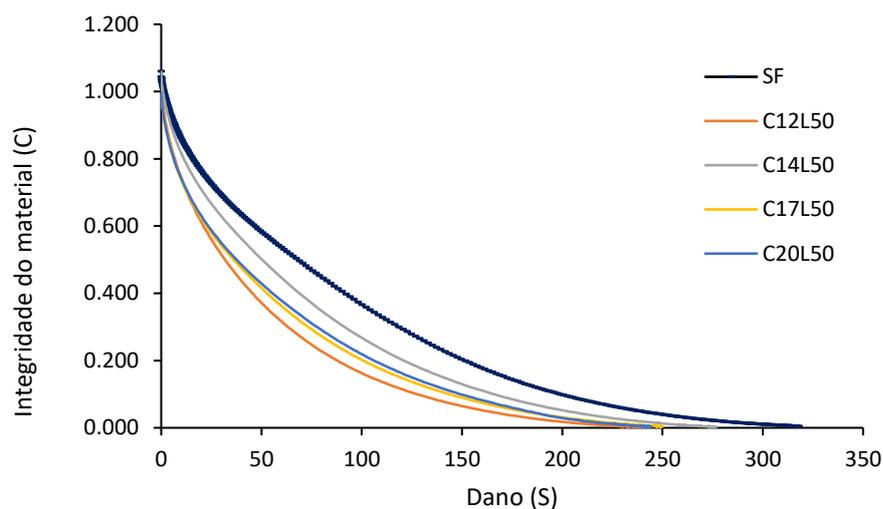


Figura 4.46 - Integridade do material em função do dano com fibras de 50 mm

A Tabela 4.16 apresenta os valores dos parâmetros C para a comparação da amostra de controlo (SF) com as amostras C12L50, C14L50, C17L50, C20L50. Todas as amostras com fibras nessa comparação apresentam valores de C1 superiores e valores de C2 inferiores a amostra sem fibras (SF), portanto os desempenhos a resistência ao dano aumentaram. A amostra C12L50 obteve o melhor desempenho.

Tabela 4.20 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com fibras de 50 mm

Amostra	C0 (MPa)	C1 (MPa)	C2 (MPa)
SF	1,000	0,050	0,534
C12L50	1,000	0,134	0,379
C14L50	1,000	0,075	0,473
C17L50	1,000	0,123	0,389
C20L50	1,000	0,117	0,399

### Comparação da mesma percentagem com variação do comprimento das fibras

#### Percentagem 12%

Na Figura 4.47 apresenta o gráfico do módulo de rigidez em função da frequência, todas as amostras apresentam valores superiores da amostra de controlo sem fibras (SF), mas a amostra C12L25 apresenta um melhor desempenho.

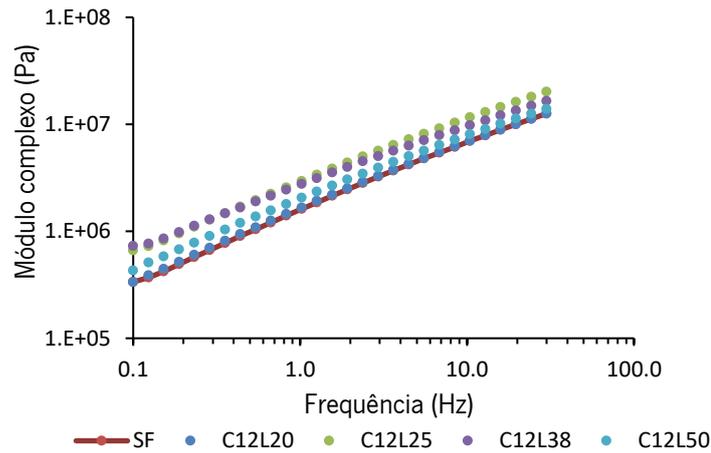


Figura 4.47 - Módulo de rigidez em função da frequência com percentagem de 12 % de fibras

Em relação aos resultados da Figura 4.48 do gráfico de ângulo de fase em função da frequência, os valores do ângulo de fase mais inferiores para essa comparação resultaram na amostra C12L38, obtendo um melhor desempenho em relação a amostra de controlo (SF).

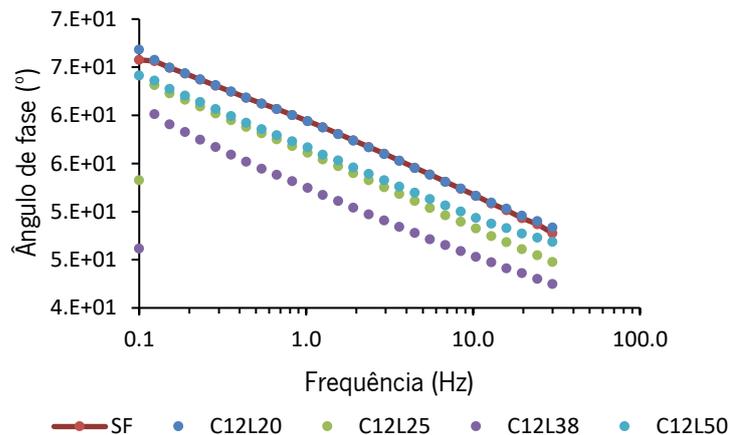


Figura 4.48 - Ângulo fase em função da frequência com percentagem de 12 % de fibras

A Figura 4.49 apresenta o gráfico da tensão de cisalhamento em função da deformação obtida através do ensaio de varredura linear de amplitude com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C12L20, C12L25, C12L38 e C12L50). Observa-se que as curvas apresentam uns comportamentos variáveis, em que a amostra com o melhor desempenho é C12L25 seguida da C12L20 até quase os 10% de deformação, pois apresentam picos superiores em relação a amostra de controlo, assim demonstram que suportam uma tensão maior de cisalhamento, e conseqüentemente uma maior rigidez.

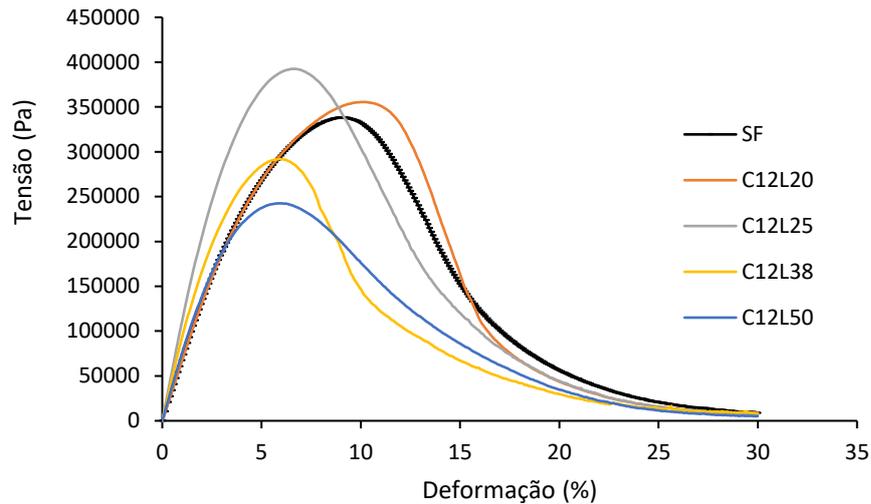


Figura 4.49 - Tensão de cisalhamento em função da deformação com percentagem de 12 % de fibras

A Figura 4.50 apresenta o gráfico da integridade do material (C) em função ao dano (S) com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C12L20, C12L25, C12L38 e C12L50).

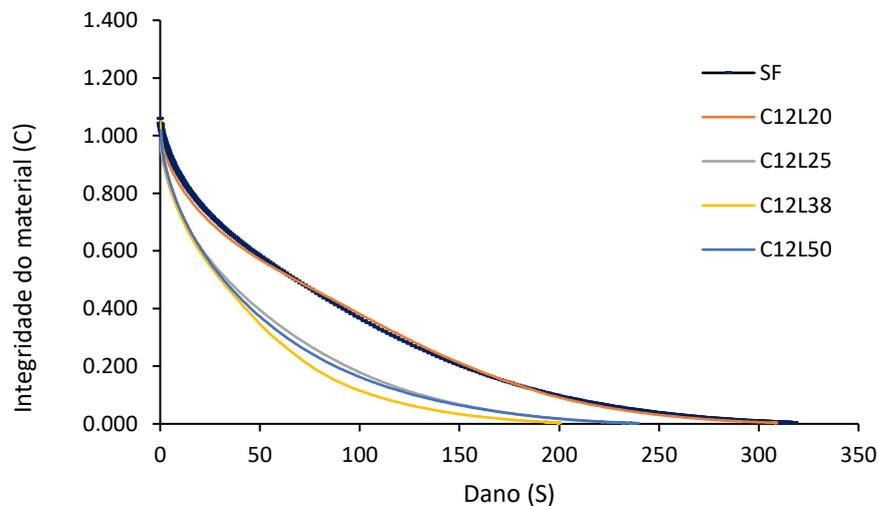


Figura 4.50 - Integridade do material em função do dano com percentagem de fibras de 12 %

A Tabela 4.17 apresenta os valores dos parâmetros C para a comparação da amostra de controlo (SF) com as amostras C12L20, C12L25, C12L38, C12L50. Todas as amostras com fibras nessa comparação apresentam valores de C1 superiores e valores de C2 inferiores a amostra sem fibras (SF), portanto os desempenhos a resistência ao dano aumentaram. A amostra C12L50 obteve o melhor desempenho.

Tabela 4.21 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com percentagem de 12 % de fibras

Amostra	C0 (MPa)	C1 (MPa)	C2 (MPa)
SF	1,000	0,050	0,534
C12L20	1,000	0,060	0,501
C12L25	1,000	0,129	0,385
C12L38	1,000	0,133	0,392
C12L50	1,000	0,134	0,379

### Percentagem 14%

Na Figura 4.51 apresenta o gráfico do módulo de rigidez em função da frequência, todas as amostras apresentam valores superiores da amostra de controlo sem fibras (SF), mas a amostra C14L25 apresenta um melhor desempenho na frequência de 10 Hz.

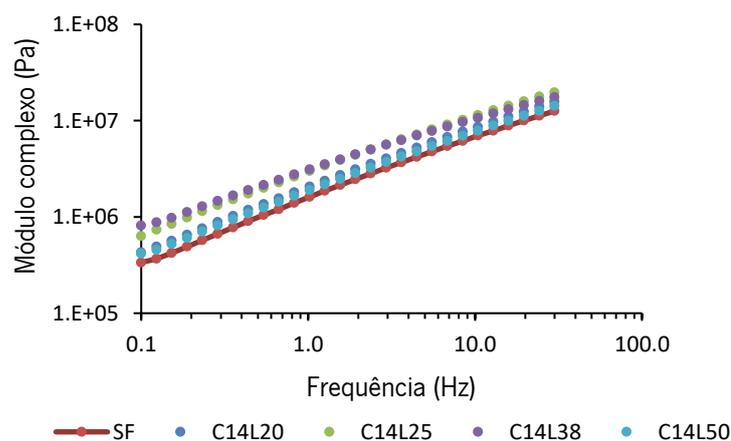


Figura 4.51 - Módulo de rigidez em função da frequência com percentagem de 14 % de fibras

Em relação aos resultados da Figura 4.52 do gráfico de ângulo de fase em função da frequência, os valores do ângulo de fase mais inferiores para essa comparação resultaram na amostra C14L38, obtendo um melhor desempenho em relação a amostra de controlo (SF).

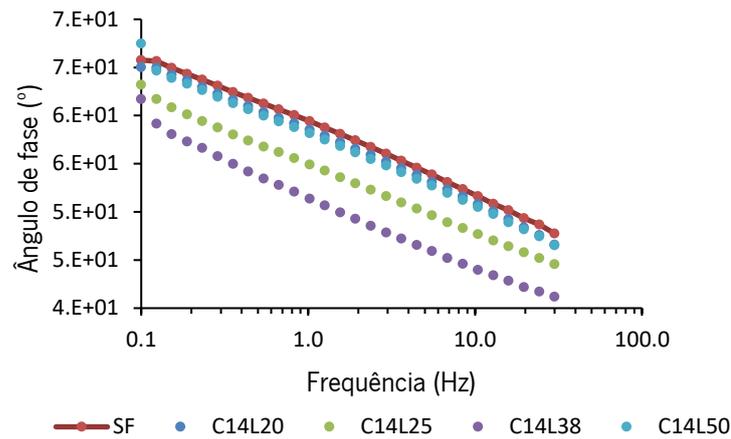


Figura 4.52 - Ângulo fase em função da frequência com percentagem de 14 % de fibras

A Figura 4.53 apresenta o gráfico da tensão de cisalhamento em função da deformação obtida através do ensaio de varredura linear de amplitude com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C14L20, C14L25, C14L38 e C14L50). Observa-se que as curvas apresentam uns comportamentos variáveis, em que a amostra com o melhor desempenho é C14L25 seguida da C14L20, pois apresentam picos superiores em relação a amostra de controlo, assim demonstram que suportam uma tensão maior de cisalhamento, e conseqüentemente uma maior rigidez. A amostra C14L38 pode ter acontecido algum erro de leitura ou erro da amostra.

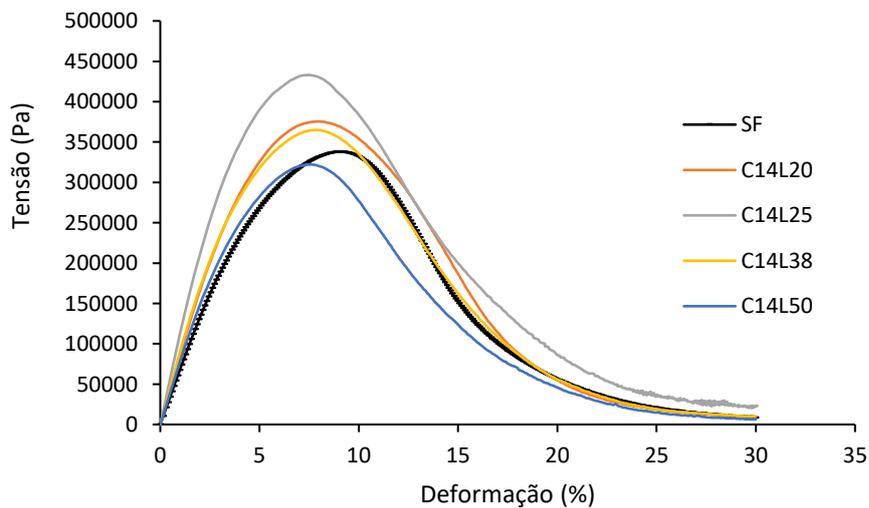


Figura 4.53 - Tensão de cisalhamento em função da deformação com percentagem de 14 % de fibras

A Figura 4.38 apresenta o gráfico da integridade do material (C) em função ao dano (S) com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C14L20, C14L25, C14L38 e C14L50).

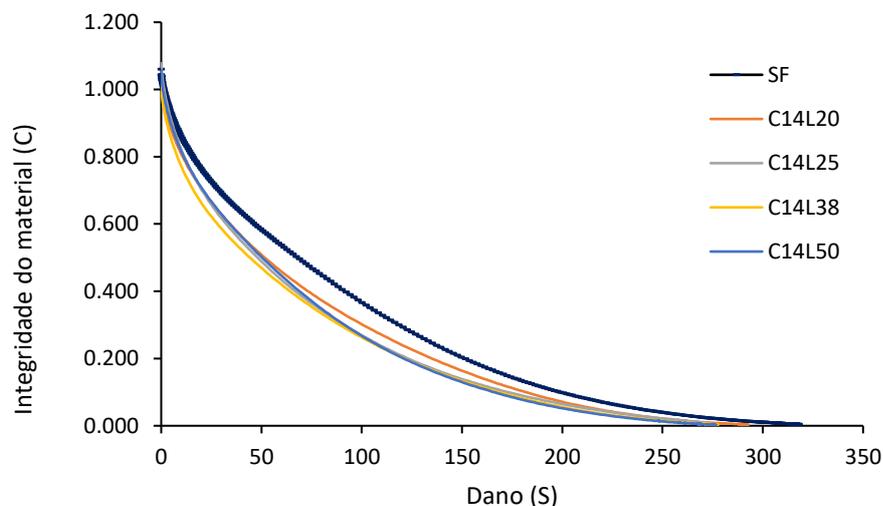


Figura 4.54 - Integridade do material em função do dano com percentagem de fibras de 14 %

A Tabela 4.18 apresenta os valores dos parâmetros C para a comparação da amostra de controlo (SF) com as amostras C14L20, C14L25, C17L38, C14L50. Todas as amostras com fibras nessa comparação apresentam valores de C1 superiores e valores de C2 inferiores a amostra sem fibras (SF), portanto os desempenhos a resistência ao dano aumentaram. A amostra C14L38 obteve o melhor desempenho.

Tabela 4.22 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com percentagem de 14 % de fibras

Amostra	C0 (MPa)	C1 (MPa)	C2 (MPa)
SF	1,000	0,050	0,534
C14L20	1,000	0,078	0,460
C14L25	1,000	0,079	0,463
C14L38	1,000	0,253	0,277
C14L50	1,000	0,075	0,473

### Percentagem 17%

Na Figura 4.55 apresenta o gráfico do módulo de rigidez em função da frequência, todas as amostras apresentam valores superiores da amostra de controlo sem fibras (SF), mas a amostra C17L25 apresenta um melhor desempenho.

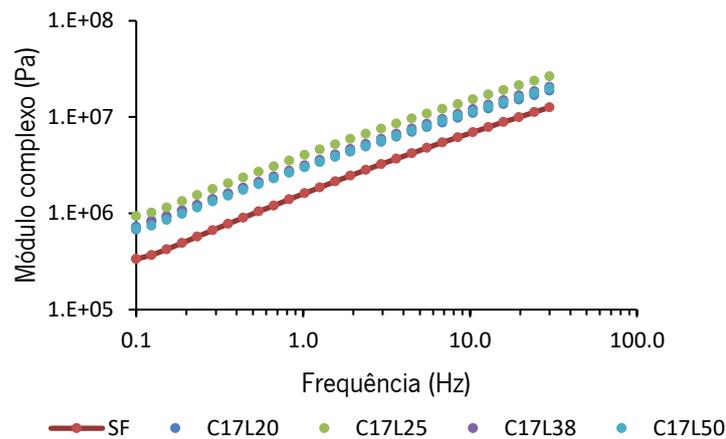


Figura 4.55 - Módulo de rigidez em função da frequência com percentagem de 17 % de fibras

Em relação aos resultados da Figura 4.56 do gráfico de ângulo de fase em função da frequência, os valores do ângulo de fase mais inferiores para essa comparação resultaram na amostra C17L38, obtendo um melhor desempenho em relação a amostra de controlo (SF).

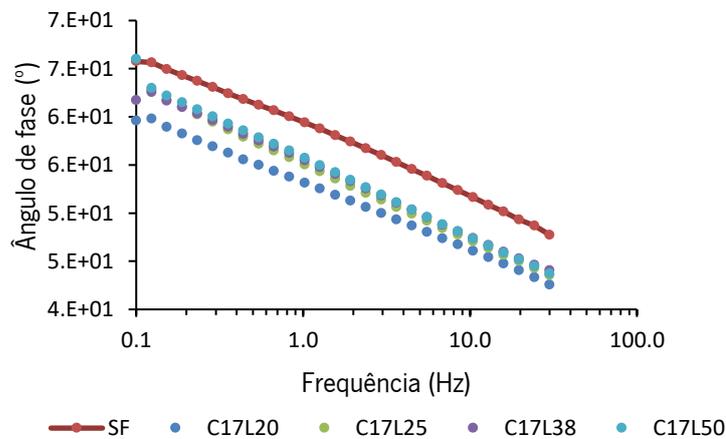


Figura 4.56 - Ângulo fase em função da frequência com percentagem de 17 % de fibras

A Figura 4.57 apresenta o gráfico da tensão de cisalhamento em função da deformação obtida através do ensaio de varredura linear de amplitude com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C17L20, C17L25, C17L38 e C17L50). Observa-se que as curvas apresentam uns comportamentos variáveis, em que até quase os 10% de deformação apresentam picos superiores dos ligantes modificados em relação a amostra de controlo, assim demonstram que suportam uma tensão maior de cisalhamento, e consequentemente uma maior rigidez.

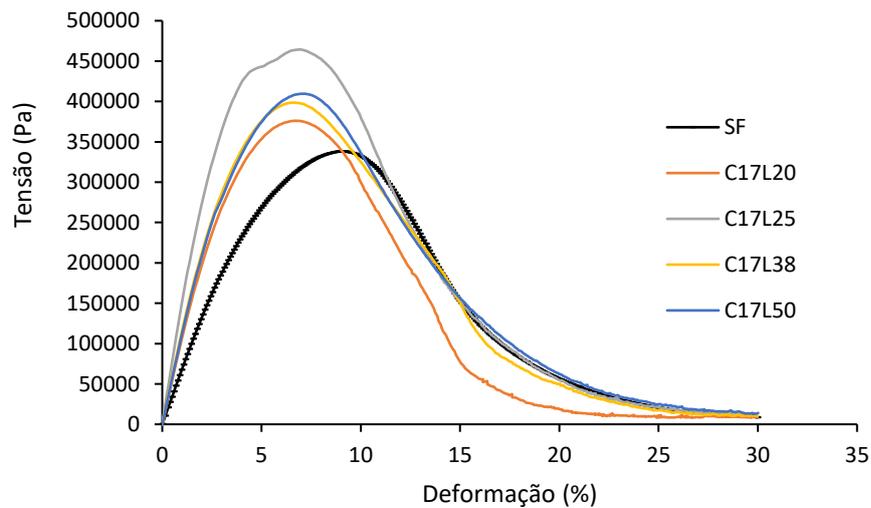


Figura 4.57 - Tensão de cisalhamento em função da deformação com percentagem de 17 % de fibras

A Figura 4.38 apresenta o gráfico da integridade do material (C) em função ao dano (S) com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C17L20, C17L25, C17L38 e C17L50).

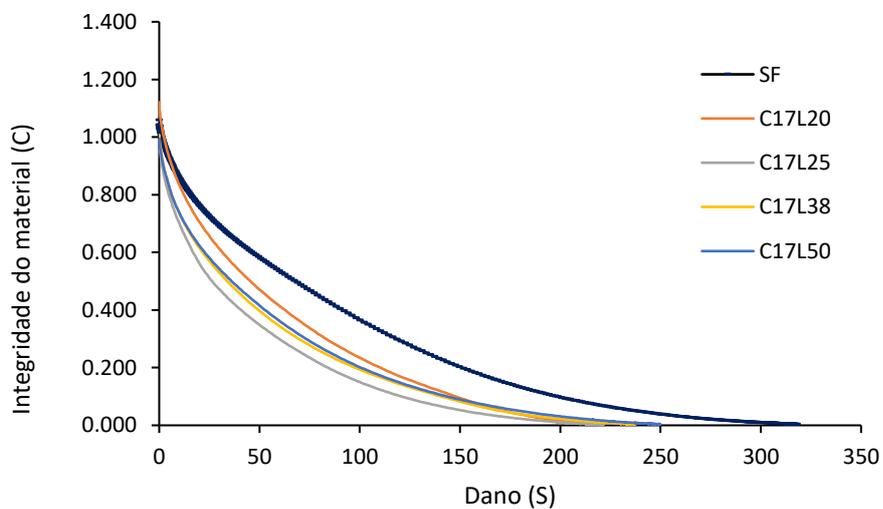


Figura 4.58 - Integridade do material em função do dano com percentagem de fibras de 17 %

A Tabela 4.19 apresenta os valores dos parâmetros C para a comparação da amostra de controlo (SF) com as amostras C17L20, C17L25, C17L38, C17L50. Todas as amostras com fibras nessa comparação apresentam valores de C1 superiores e valores de C2 inferiores a amostra sem fibras (SF), portanto os desempenhos a resistência ao dano aumentaram. A amostra C17L25 obteve o melhor desempenho.

Tabela 4.23 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com percentagem de 17 % de fibras

Amostra	C0 (MPa)	C1 (MPa)	C2 (MPa)
SF	1,000	0,050	0,534
C17L20	1,000	0,068	0,507
C17L25	1,000	0,162	0,345
C17L38	1,000	0,128	0,384
C17L50	1,000	0,123	0,389

### Percentagem 20%

Na Figura 4.59 apresenta o gráfico do módulo de rigidez em função da frequência, todas as amostras apresentam valores superiores da amostra de controlo sem fibras (SF), mas a amostra C20L20 apresenta um melhor desempenho.

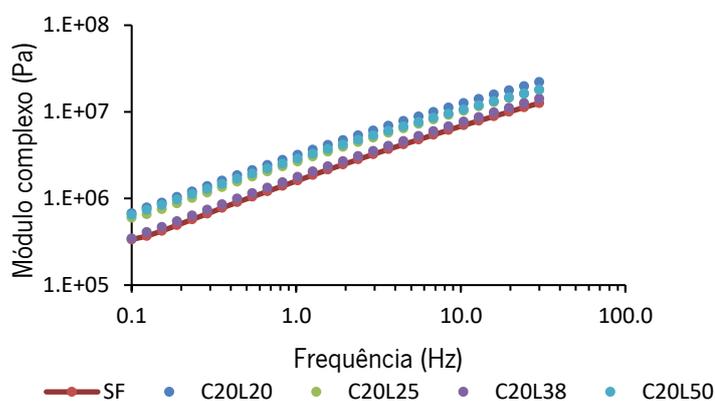


Figura 4.59 - Módulo de rigidez em função da frequência com percentagem de 20 % de fibras

Em relação aos resultados da Figura 4.60 do gráfico de ângulo de fase em função da frequência, os valores do ângulo de fase mais inferiores para essa comparação resultaram na amostra C20L50, obtendo um melhor desempenho em relação a amostra de controlo (SF).

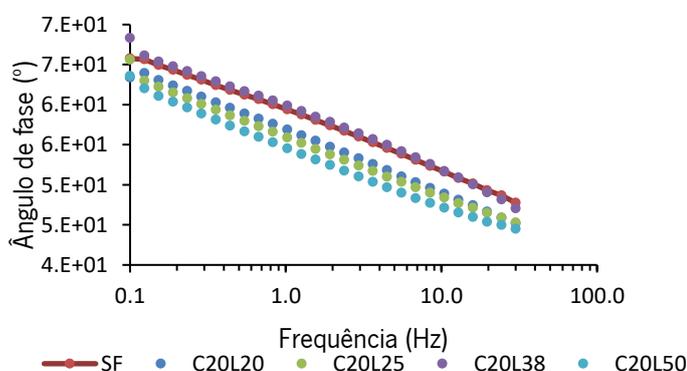


Figura 4.60 - Ângulo fase em função da frequência com percentagem de 20 % de fibras

A Figura 4.61 apresenta o gráfico da tensão de cisalhamento em função da deformação obtida através do ensaio de varredura linear de amplitude com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C20L20, C20L25, C20L38 e C20L50). Observa-se que as curvas apresentam uns comportamentos variáveis, a amostra C20L25 apresenta uma maior estabilidade acima da amostra de controlo, em que até quase os 10% de deformação ela apresenta pico superior em relação aos ligantes modificados assim demonstram que suportam uma tensão maior de cisalhamento, e conseqüentemente uma maior rigidez.

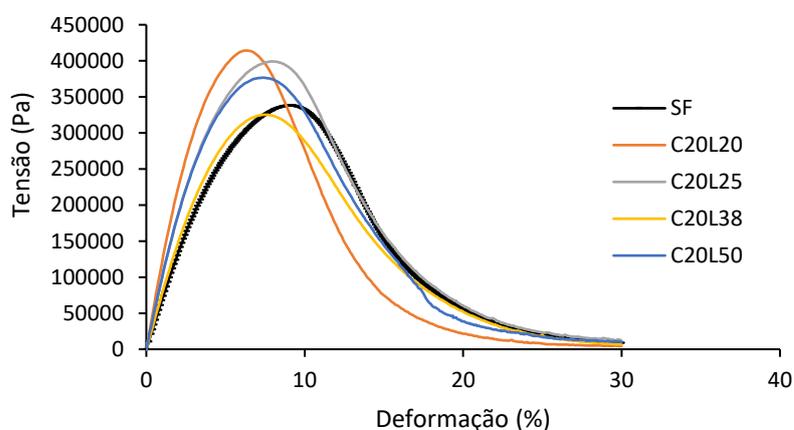


Figura 4.61 - Tensão de cisalhamento em função da deformação com percentagem de 20 % de fibras

A Figura 4.38 apresenta o gráfico da integridade do material (C) em função ao dano (S) com os provetes sem fibras (SF) e com fibras (C20L20, C20L25, C20L38 e C20L50).

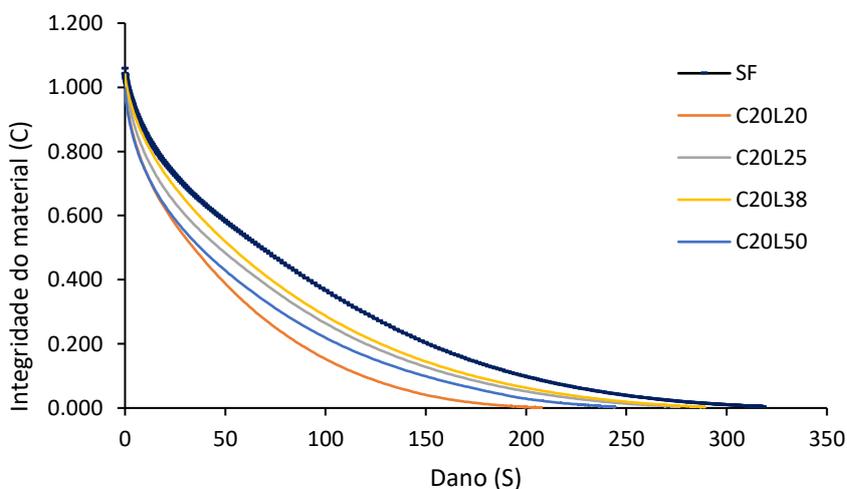


Figura 4.62 - Integridade do material em função do dano com percentagem de fibras de 20 %

A Tabela 4.20 apresenta os valores dos parâmetros C para a comparação da amostra de controle (SF) com as amostras C20L20, C20L25, C20L38, C20L50. Todas as amostras com fibras nessa comparação apresentam valores de C1 superiores e valores de C2 inferiores a amostra sem fibras (SF), portanto os desempenhos a resistência ao dano aumentaram. A amostra C20L50 obteve o melhor desempenho.

Tabela 4.24 - Parâmetros C gerados da curva de intensidade do dano com percentagem de 20 % de fibras

Amostra	C0 (MPa)	C1 (MPa)	C2 (MPa)
SF	1,000	0,050	0,534
C20L20	1,000	0,115	0,415
C20L25	1,000	0,089	0,442
C20L38	1,000	0,066	0,495
C20L50	1,000	0,117	0,399

### 4.2.3. Ensaio do módulo de rigidez complexo $|G^*|$ .

A construção da curva mestra foi realizada com auxílio da função Solver do Excel. Esta função é utilizada para realizar a otimização de dados com técnicas de regressão de mínimos quadrados não lineares. O procedimento consiste em minimizar a soma do erro quadrático entre o  $|G^*|$  medido durante o ensaio e o valor de  $|G^*|$  modelado.

#### Variando a percentagem com o mesmo comprimento de fibra

A Figura 4.63 mostra a curva mestra de módulo dinâmico de cisalhamento no domínio de frequência reduzida para o betume 35/50 com a percentagem de fibras indicadas. Amostra de controle SF (sem fibras), C12L20 (12%), C14L20 (14%), C17L20 (17%) e C20L20 (20%). Neste caso, os provetes possuem o mesmo comprimento de fibra, variando-se apenas a percentagem.

O modelo de sigmoide utilizado neste estudo é normalmente utilizado para a geração de curva mestra de misturas betuminosas, e, mais especificamente, para a determinação da curva mestra em relação do módulo dinâmico com a frequência.

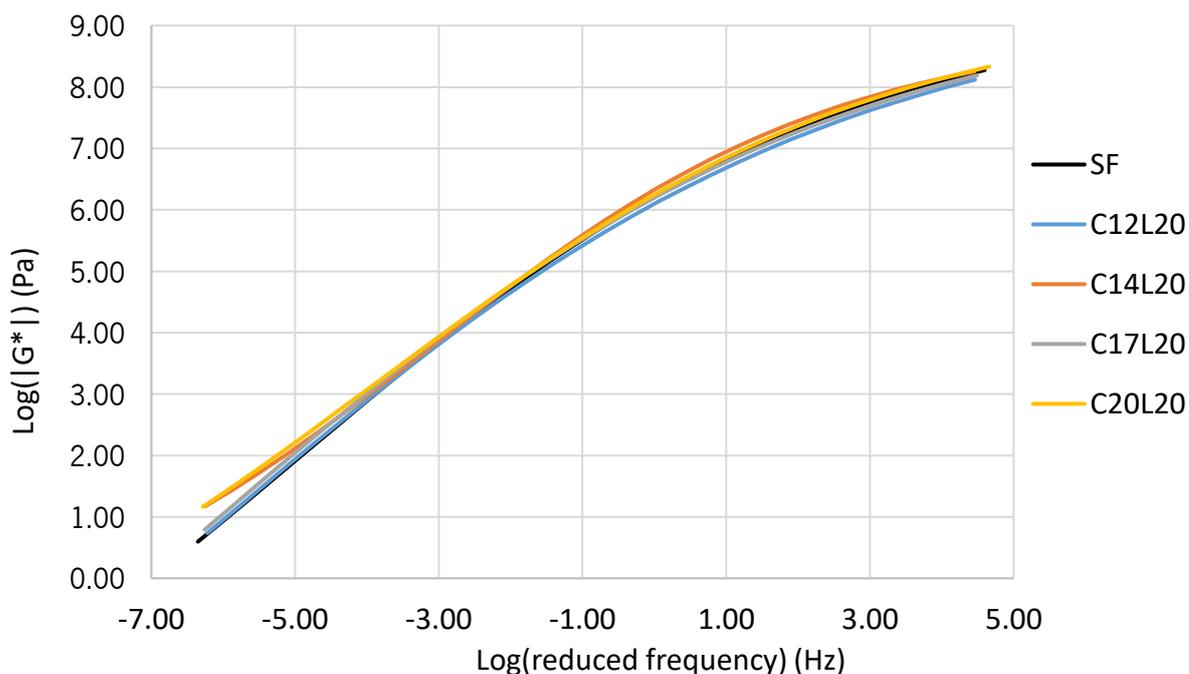


Figura 4.63 - Curvas mestras das amostras SF, C12L20, C14L20, C17L20 e C20L20

Analisando o gráfico da Figura 4.63, observa-se que na zona de baixa frequência os módulos de rigidez das amostras com fibras tendem a serem superiores a amostra de controlo (SF), como mostra na Tabela 4.25, os valores são superiores para todos os provetes, destacando-se a amostra C20L20, em que possui uma maior percentagem de fibras, obtendo-se o maior ganho de rigidez. Para altas temperaturas e baixas frequências exibem um valor maior de rigidez, isso favorece uma maior resistência a deformação permanente.

Já na zona de altas frequências e baixas temperaturas os módulos de rigidez de algumas amostras com fibras alcançaram valores inferiores a amostra de controlo (SF), apenas as amostras C14L20 e C20L20 alcançaram valores maiores, sendo a C20L20 com o melhor desempenho, como mostra na Tabela 4.21.

Tabela 4.25 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas

Amostras	Módulo de rigidez Log ( G* ) (Pa)	
	Frequência reduzida (Hz)	
	-5 Hz	3 Hz
SF	2,07	7,79
C12L20	2,18	7,62
C14L20	2,30	7,83
C17L20	2,26	7,70
C20L20	2,40	7,85

A Figura 4.64 mostra a curva mestra de módulo dinâmico de cisalhamento no domínio de frequência reduzida para o betume 35/50 com a percentagem de fibras indicadas. Amostra de controlo SF (sem fibras), C12L25 (12%), C14L25 (14%), C17L25 (17%) e C20L25 (20%).

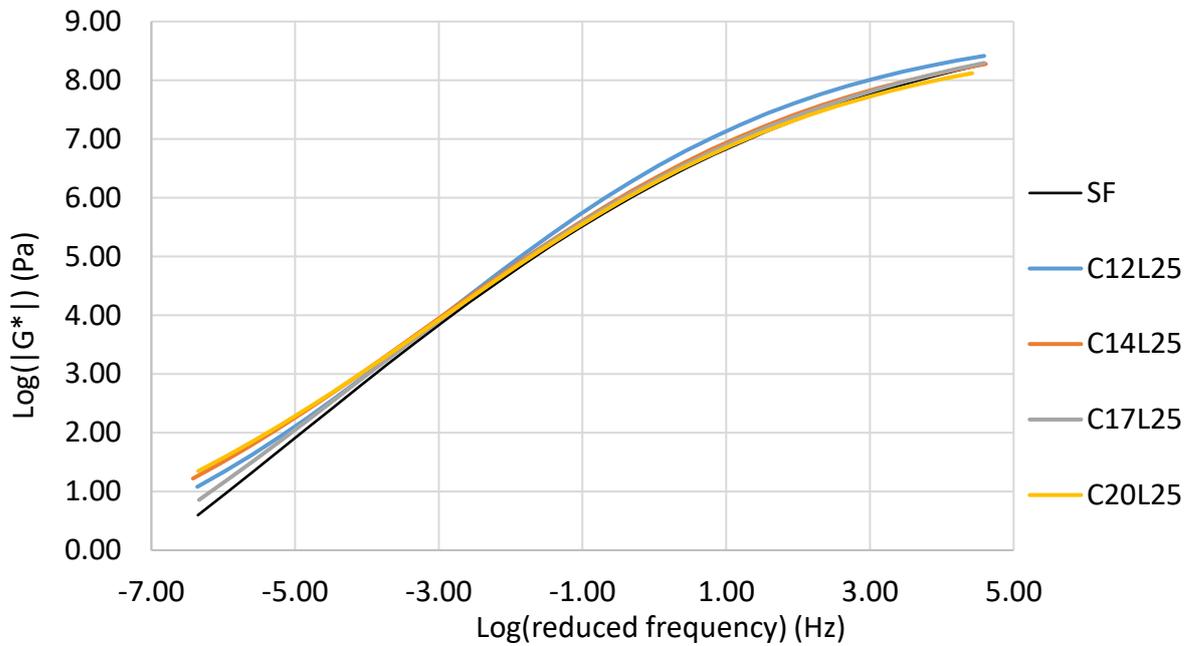


Figura 4.64 - Curvas mestras das amostras SF, C12L25, C14L25, C17L25 e C20L25

Analisando o gráfico da Figura 4.64, observa-se que na zona de baixa frequência os módulos de rigidez das amostras com fibras são superiores a amostra de controlo (SF), como mostra na Tabela 4.22, os valores são superiores para todos os provetes, destacando-se a amostra C20L25, em que possui uma maior percentagem de fibras, obtendo-se o maior ganho de rigidez. Para altas temperaturas e baixas frequências exibem um valor maior de rigidez, isso favorece uma maior resistência a deformação permanente.

Já na zona de altas frequências e baixas temperaturas os módulos de rigidez na maioria das amostras com fibras alcançaram valores superiores a amostra de controlo (SF), apenas a amostra C20L25 alcançou valor menor que SF, como mostra na Tabela 4.26. A amostra C12L25 obteve o melhor desempenho para baixas temperaturas.

Tabela 4.26 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas

Amostras	Módulo de rigidez $\text{Log}( G^* )$ (Pa)	
	Frequência reduzida (Hz)	
	-5 Hz	3 Hz
SF	2,07	7,79
C12L25	2,24	8,03
C14L25	2,33	7,86
C17L25	2,21	7,84
C20L25	2,39	7,78

A Figura 4.65 mostra a curva mestra de módulo dinâmico de cisalhamento no domínio de frequência reduzida com a percentagem de fibras indicadas. Amostra de controlo SF (sem fibras), C12L38 (12%), C14L38 (14%), C17L38 (17%) e C20L38 (20%).

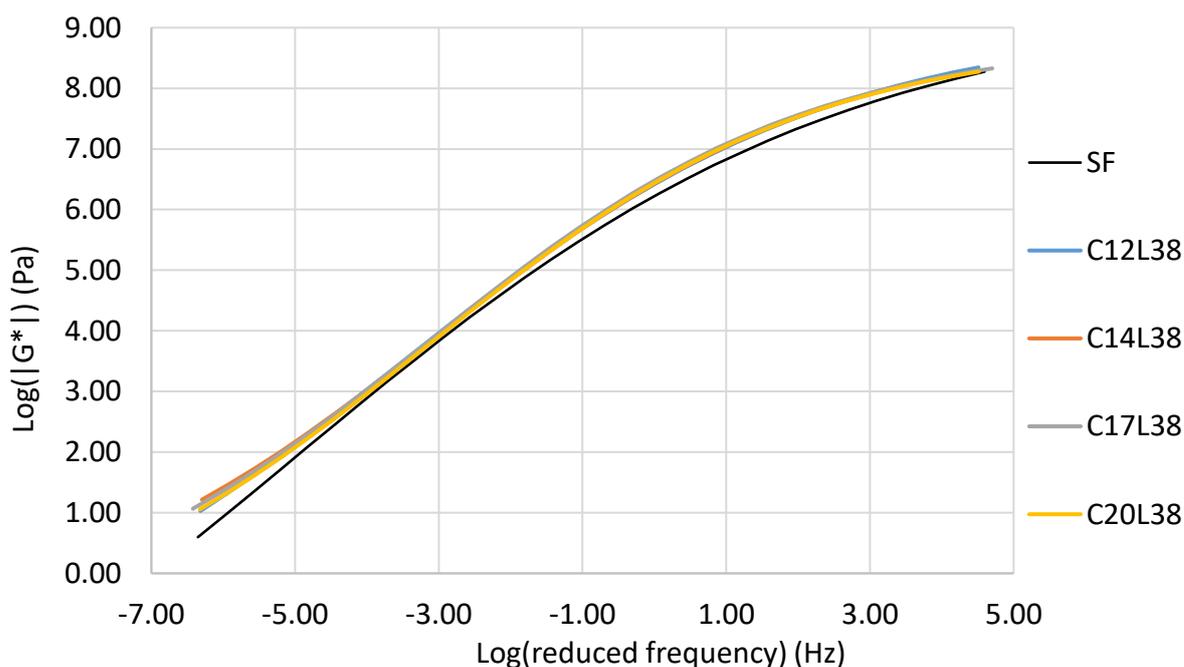


Figura 4.65 - Curvas mestras das amostras SF, C12L38, C14L38, C17L38 e C20L38

Analisando o gráfico da Figura 4.65, observa-se que na zona de baixa frequência os módulos de rigidez das amostras com fibras são superiores a amostra de controlo (SF), como mostra na Tabela 4.27, os valores são superiores para todos os provetes, destacando-se a amostra C14L38, obtendo-se o maior ganho de rigidez. Para altas temperaturas e baixas frequências exibem um valor maior de rigidez, isso favorece uma maior resistência a deformação permanente.

Já na zona de altas frequências e baixas temperaturas os módulos de rigidez de todas as amostras com fibras alcançaram valores superiores a amostra de controlo (SF), como mostra na Tabela 4.23. A amostra C17L38 obteve o melhor desempenho para baixas temperaturas.

Tabela 4.27 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas

Amostras	Módulo de rigidez Log ( $ G^* $ ) (Pa)	
	Frequência reduzida (Hz)	
	-5 Hz	3 Hz
SF	2,07	7,79
C12L38	2,28	7,92
C14L38	2,33	7,91
C17L38	2,24	7,97
C20L38	2,22	7,90

A Figura 4.66 mostra a curva mestra de módulo dinâmico de cisalhamento no domínio de frequência reduzida com a percentagem de fibras indicadas. Amostra de controlo SF (sem fibras), C12L50 (12%), C14L50 (14%), C17L50 (17%) e C20L50 (20%).

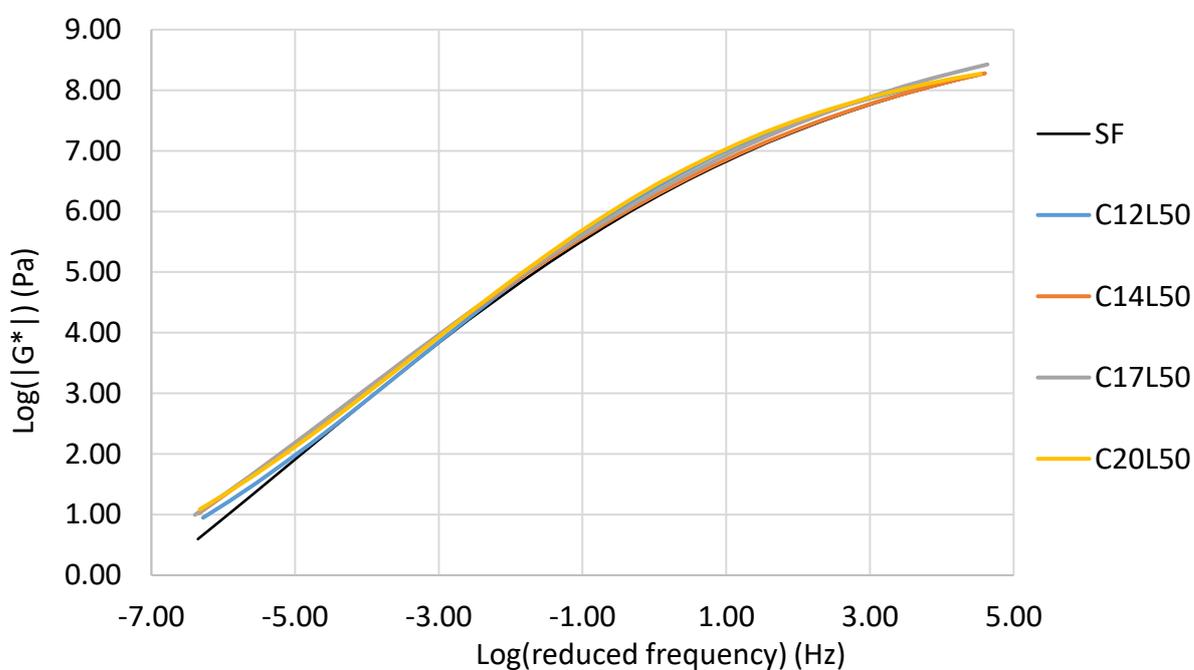


Figura 4.66 - Curvas mestras das amostras SF, C12L50, C14L50, C17L50 e C20L50

Analisando o gráfico da Figura 4.66, observa-se que na zona de baixa frequência os módulos de rigidez das amostras com fibras são superiores a amostra de controle (SF), como mostra na Tabela 4.24, os valores são superiores para todos os provetes, destacando-se a amostra C14L50, obtendo-se o maior ganho de rigidez. Para altas temperaturas e baixas frequências exibem um valor maior de rigidez, isso favorece uma maior resistência a deformação permanente.

Já na zona de altas frequências e baixas temperaturas os módulos de rigidez de todas as amostras com fibras alcançaram valores superiores a amostra de controle (SF), como mostra na Tabela 4.28. A amostra C17L50 obteve o melhor desempenho para baixas temperaturas.

Tabela 4.28 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas

Amostras	Módulo de rigidez Log ( $ G^* $ ) (Pa)	
	Frequência reduzida (Hz)	
	-5 Hz	3 Hz
SF	2,07	7,79
C12L50	2,16	7,87
C14L50	2,33	7,81
C17L50	2,30	7,93
C20L50	2,26	7,89

### Variando o comprimento das fibras com a mesma percentagem

A Figura 4.67 mostra a curva mestra de módulo dinâmico de cisalhamento no domínio de frequência reduzida com a percentagem de 12% de fibras, variando-se o comprimento. Amostra de controle SF (sem fibras), C12L20 (20mm), C12L25 (25mm), C12L38 (38mm) e C12L50 (50mm).

Analisando o gráfico da Figura 4.67, observa-se que na zona de baixa frequência os módulos de rigidez das amostras com fibras são superiores a amostra de controle (SF), como mostra na Tabela 4.25, os valores são superiores para todos os provetes, destacando-se a amostra C12L38, obtendo-se o maior ganho de rigidez.

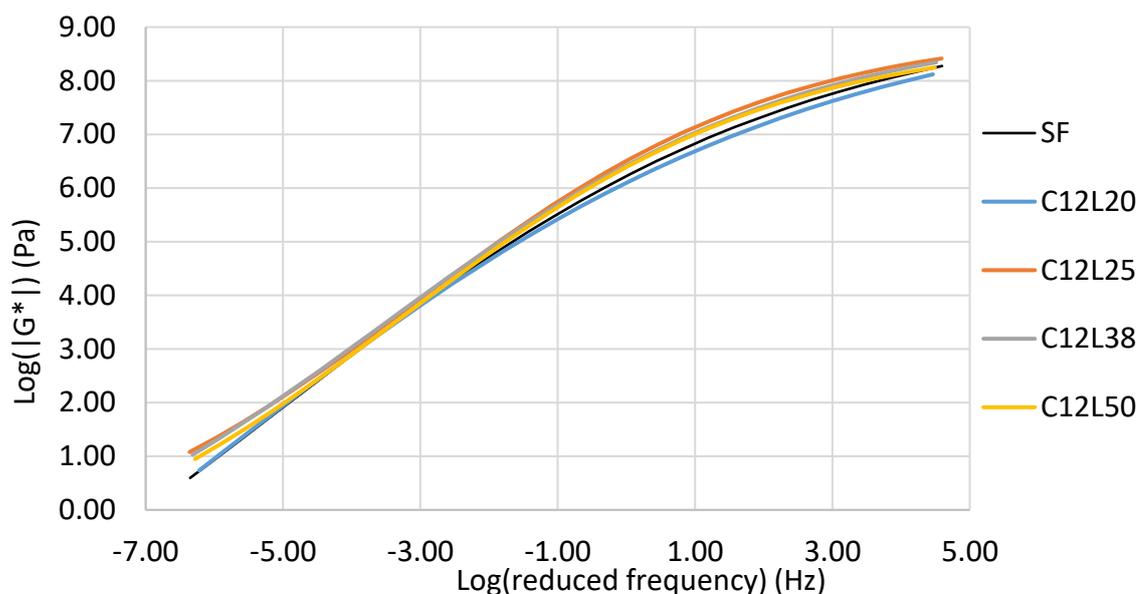


Figura 4.67 - Curvas mestras das amostras SF, C12L20, C12L25, C12L38 e C12L50

Para altas temperaturas e baixas frequências exibem um valor maior de rigidez, isso favorece uma maior resistência a deformação permanente.

Já na zona de altas frequências e baixas temperaturas os módulos de rigidez a maior parte das amostras com fibras alcançaram valores superiores a amostra de controle (SF), como mostra na Tabela 4.29. A amostra C12L25 obteve o melhor desempenho para baixas temperaturas.

Tabela 4.29 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas

Amostras	Módulo de rigidez Log (  G*   ) (Pa)	
	Frequência reduzida (Hz)	
	-5 Hz	3 Hz
SF	2,07	7,79
C12L20	2,18	7,62
C12L25	2,24	8,03
C12L38	2,28	7,92
C12L50	2,16	7,87

A Figura 4.68 mostra a curva mestra de módulo dinâmico de cisalhamento no domínio de frequência reduzida com a percentagem de 14% de fibras, variando-se o comprimento. Amostra de controle SF (sem fibras), C14L20 (20mm), C14L25 (25mm), C14L38 (38mm) e C14L50 (50mm).

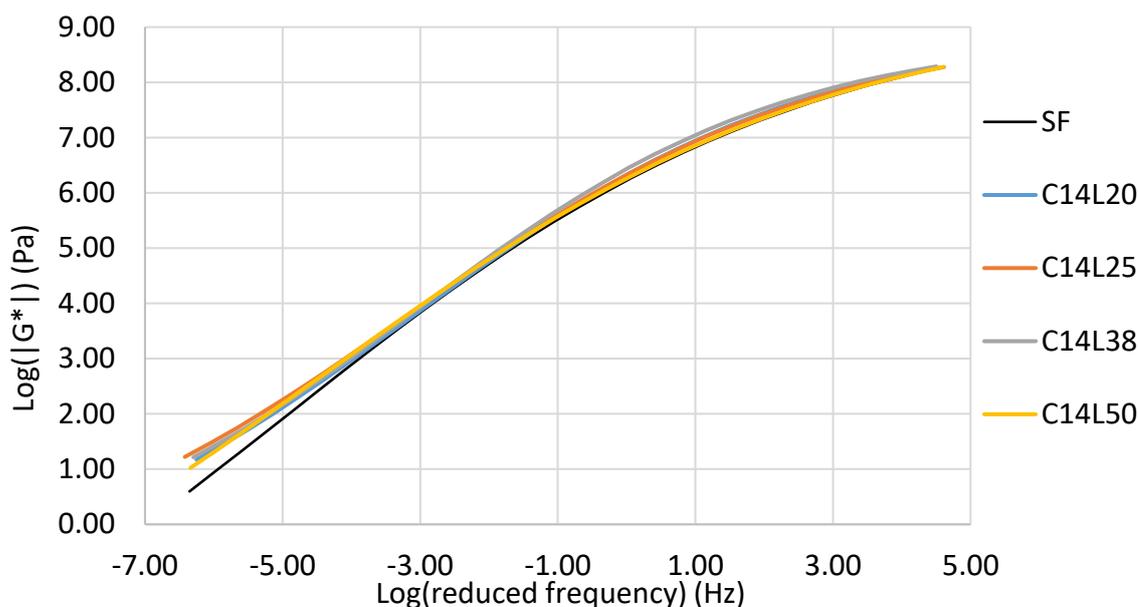


Figura 4.68 - Curvas mestras das amostras SF, C14L20, C14L25, C14L38 e C14L50

Analisando o gráfico da Figura 4.68, observa-se que na zona de baixa frequência os módulos de rigidez das amostras com fibras são superiores a amostra de controlo (SF), como mostra na Tabela 4.26, os valores são superiores para todos os provetes, em que as linhas do gráfico se sobrepõem gerando valores iguais para as amostras C14L25, C14L38 e C14L50, obtendo-se o maior ganho de rigidez. Para altas temperaturas e baixas frequências exibem um valor maior de rigidez, isso favorece uma maior resistência a deformação permanente.

Já na zona de altas frequências e baixas temperaturas os módulos de rigidez todas as amostras com fibras alcançaram valores superiores a amostra de controlo (SF), como mostra na Tabela 4.30. A amostra C14L38 obteve o melhor desempenho para baixas temperaturas.

Tabela 4.30 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas

Amostras	Módulo de rigidez Log ( $ G^* $ ) (Pa)	
	Frequência reduzida (Hz)	
	-5 Hz	3 Hz
SF	2,07	7,79
C14L20	2,30	7,83
C14L25	2,33	7,86
C14L38	2,33	7,91
C14L50	2,33	7,81

A Figura 4.69 mostra a curva mestra de módulo dinâmico de cisalhamento no domínio de frequência reduzida com a percentagem de 17% de fibras, variando-se o comprimento. Amostra de controlo SF (sem fibras), C17L20 (20mm), C17L25 (25mm), C17L38 (38mm) e C17L50 (50mm).

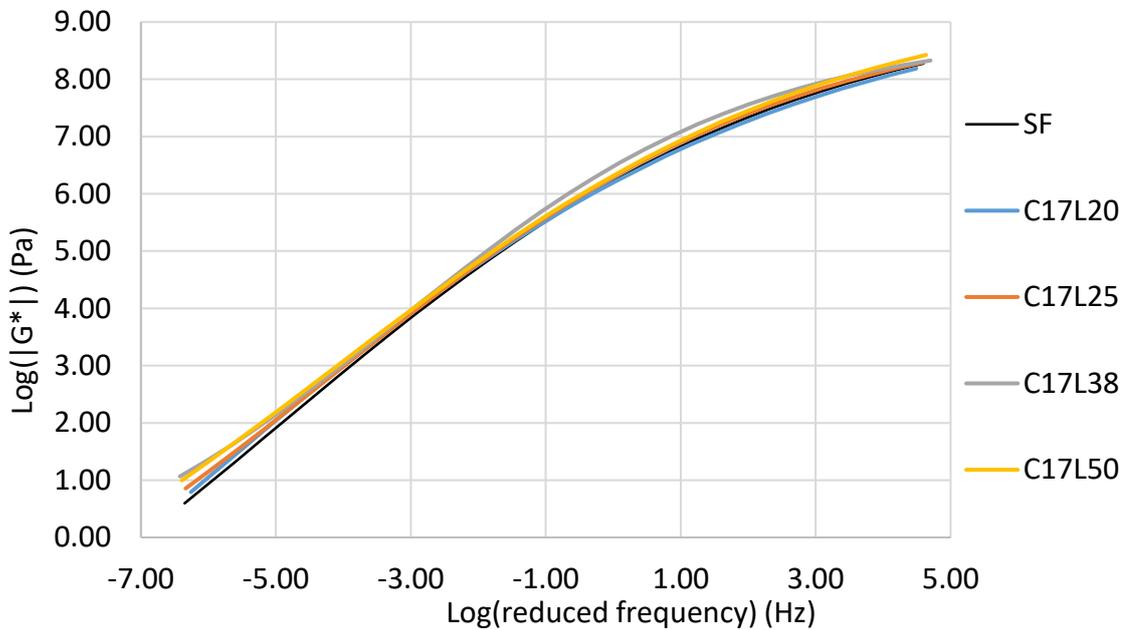


Figura 4.69 - Curvas mestras das amostras SF, C17L20, C17L25, C17L38 e C17L50

Analisando o gráfico da Figura 4.69, observa-se que na zona de baixa frequência os módulos de rigidez das amostras com fibras são superiores a amostra de controlo (SF), como mostra na Tabela 4.27, os valores são superiores para todos os provetes, destacando-se a amostra C17L50, obtendo-se o maior ganho de rigidez. Para altas temperaturas e baixas frequências exibem um valor maior de rigidez, isso favorece uma maior resistência a deformação permanente.

Já na zona de altas frequências e baixas temperaturas os módulos de rigidez a maioria das amostras com fibras alcançaram valores superiores a amostra de controlo (SF), como mostra na Tabela 4.31. A amostra C17L38 obteve o melhor desempenho para baixas temperaturas.

Tabela 4.31 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas

Amostras	Módulo de rigidez $\text{Log}( G^* )$ (Pa)	
	Frequência reduzida (Hz)	
	-5 Hz	3 Hz
SF	2,07	7,79
C17L20	2,26	7,70
C17L25	2,21	7,84
C17L38	2,24	7,97
C17L50	2,30	7,93

A Figura 4.70 mostra a curva mestra de módulo dinâmico de cisalhamento no domínio de frequência reduzida com a percentagem de 20% de fibras, variando-se o comprimento. Amostra de controlo SF (sem fibras), C20L20 (20mm), C20L25 (25mm), C20L38 (38mm) e C20L50 (50mm).

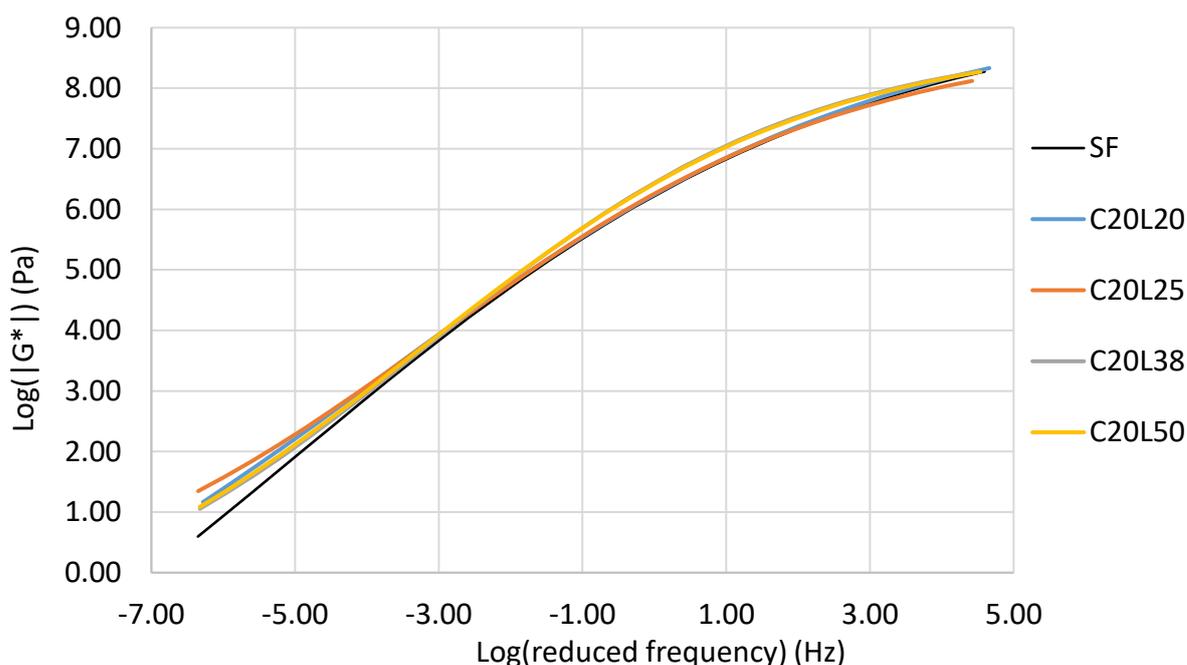


Figura 4.70 - Curvas mestras das amostras SF, C20L20, C20L25, C20L38 e C20L50

Analisando o gráfico da Figura 4.70, observa-se que na zona de baixa frequência os módulos de rigidez das amostras com fibras são superiores a amostra de controlo (SF), como mostra na Tabela 4.28, os valores são superiores para todos os provetes, destacando-se a amostra C20L20, obtendo-se o maior ganho de rigidez. Para altas temperaturas e baixas frequências exibem um valor maior de rigidez, isso favorece uma maior resistência a deformação permanente.

Já na zona de altas frequências e baixas temperaturas os módulos de rigidez a maioria das amostras com fibras alcançaram valores superiores a amostra de controlo (SF), como mostra na Tabela 4.32. A amostra C20L38 obteve o melhor desempenho para baixas temperaturas.

Tabela 4.32 - Módulo de rigidez no ensaio do Módulo de rigidez complexo para altas e baixas temperaturas

Amostras	Módulo de rigidez Log ( $ G^* $ ) (Pa)	
	Frequência reduzida (Hz)	
	-5 Hz	3 Hz
SF	2,07	7,79
C20L20	2,40	7,85
C20L25	2,39	7,70
C20L38	2,22	7,90
C20L50	2,26	7,89

Em geral, a maioria dos resultados mostra-se favorável com um aumento do módulo de rigidez para temperaturas altas. Isto pode-se ser levantado vários fatores que podem ter influenciado na realização do método de produção utilizado ou na quantidade de fibras utilizadas. Foi utilizado um método de dispersão manual e o diâmetro das fibras são em tamanhos de micrômetros, isso pode ter ocasionado umas dificuldades na dispersão e na distribuição uniforme em cada provete.

## 5. Considerações Finais

Este capítulo apresenta as principais conclusões sobre essa dissertação, bem como algumas sugestões para os trabalhos futuros que venham a ser realizados como essa mesma temática.

### 5.1. Conclusões

A adição de polímeros nas misturas betuminosas e na modificação dos ligantes betuminosos podem melhorar o desempenho dos pavimentos, como a ampliação da vida a fadiga, redução da deformação permanente. Assim, estudou-se a incorporação de fibras no reforço das misturas betuminosas e na modificação do betume.

Os estudos das misturas betuminosas demonstraram que a utilização de fibras pode melhorar o desempenho dos pavimentos. A viabilidade para esse estudo foi realizada através dos ensaios de módulo de rigidez, resistência à fadiga, deformação permanente, LAS, MSCR e Módulo de rigidez complexo ( $|G^*|$ ).

Os ensaios das misturas betuminosas e dos ligantes foram realizados com os mesmos comprimentos de fibras, porém com percentagens diferentes. Portanto, uma relação em quantidades de ganho entre ambos não é possível ser determinado para este caso.

Os resultados para o módulo de rigidez demonstram que as amostras com 13 % de fibras F1338 e F1350 com comprimentos de fibras de 38 mm e 50 mm respectivamente, apresentam o melhor desempenho quando comparadas com a amostra de controlo sem fibras F1300. Neste caso, elas tiveram um aumento no módulo de rigidez.

Na análise do fendilhamento à fadiga, as amostras F1350 obteve o melhor desempenho, com um aumento em 20% na vida à fadiga, seguida pela amostra F1338 que obteve um incremento de 2%.

Já para os ensaios de deformação permanente as amostras com os maiores tamanhos de fibra obtiveram os melhores desempenhos, neste caso as amostras F1325, F1338 e F1350. Para altas temperaturas o comprimento das fibras pode influenciar no aumento no módulo de rigidez e conseqüentemente na redução da profundidade das rodeiras no pavimento.

No ensaio de reologia MSCR em relação ao comprimento de fibras, a amostra que obteve o melhor resultado foi com 50 mm, portanto o maior comprimento de fibra resultou em um melhoramento a deformação permanente. Já em relação a percentagem de fibras a amostra que obteve o melhor desempenho foi com 17 %, uma concentração maior de fibra obteve-se um melhor resultado.

O ensaio do LAS é realizado a 20° C, nessa temperatura avalia-se o fendilhamento a fadiga das misturas. Neste ensaio a amostra que obteve o melhor desempenho no aumento da rigidez, redução do ângulo de fase e diminuição da intensidade do dano foi o provete C17L25, em que possui concentração de 17% e comprimento de 25mm. Este resultado está relacionado apenas ao estudo do ligante, não podendo ser relacionado com o estudo das misturas.

No ensaio do módulo de rigidez complexo ( $|G^*|$ ) os melhores desempenhos foram obtidos com o provete C20L20 para altas temperaturas, em que possui a maior concentração de fibras e o menor comprimento, melhorando a rigidez para a deformação permanente. Já para as baixas temperaturas o melhor resultado foi obtido com a amostra C12L25, aumentando o módulo de rigidez para fendilhamento à fadiga. Neste ensaio, observa-se que as fibras menores tiveram os melhores resultados, isso pode estar relacionado com o arranjo das fibras durante a execução do reómetro, ocorre um comportamento melhor em tamanhos menores.

Assim, foi possível concluir que as fibras nas misturas betuminosas podem melhorar o desempenho das propriedades mecânicas e uma maior vida útil as propriedades reológicas dos ligantes. Desta forma, foi desenvolver um levantamento das percentagens e tamanhos para serem utilizadas. Isso favorece também para o estudo de fibras similares que possuem as mesmas propriedades.

## **5.2. Trabalhos futuros**

O trabalho apresentado nesta dissertação já é uma contribuição para o estudo da utilização de fibras em misturas betuminosas. No entanto, a abrangência do tema fez com que algumas variáveis não fossem investigadas no intervalo de desenvolvimento dos estudos.

Assim, um dos trabalhos mais importante seria a realização do método da dispersão das fibras de uma forma mais tecnológica, para obter uma maior precisão da quantidade nas amostras. Bem como, investigar e desenvolver procedimentos de dosagem mais adequados tanto para as misturas, quanto para os ligantes.

Seria interessante analisar as vantagens ambientais e económicas para utilização de fibras na adição das misturas betuminosas, incrementando parâmetros de sustentabilidade baseado na análise do ciclo de vida dos pavimentos.

As propriedades de fibras sintéticas motivam seu uso em diversas aplicações. O destino incorreto ao fim da vida útil desses materiais pode acarretar um impacto ambiental. A realização de estudos com uso de fibras inservíveis sem alteração das propriedades para aplicação nas misturas betuminosas seria de grande importância

Por fim, utilizar ligantes distintos dos utilizados nessa pesquisa e avaliar a interação entre eles, podendo ser aplicado em um trecho experimental de estrada.

## Referências Bibliográficas

- \_\_\_\_. AASHTO TP 101: Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012.
- Abtahi, S.M., Sheikhzadeh, M., e Hejazi, S.M., 2010. Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 2010, pp. 871-877.
- Acevedo, C.J.S., Muñoz, P.P., González, P.L. e Fresno, D.C. 2019. A multi-criteria decision-making analysis for the selection of fibres aimed at reinforcing asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*.
- Alidadi, M. and Khabiri, M. M. Experimental study on the effect of glass and carbon fibers on physical and micro-structure behavior of asphalt. *International Journal of Integrated Engineering*, 8(3), 2016, pp. 1-8.
- Ameri, M., Mansourian, A., Pirmohammad, S., Aliha, M.R., Ayatollahi, M.R., 2012. Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures. *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 93, 2012, pp.153-167.
- Barnes, H. A., J. F. Hutton, E F. R. S. K. Walters. *An Introduction to Rheology*. Amsterdam: Elsevier, 1993.
- Becker, Y.M., Maryro, P., Méndez, P.M., Rodríguez, Y. (2001). *Polymer Modified Asphalt*, *Vision Tecnología*, Vol. 9, pp. 39-50.
- Bernucci, L. B., L. M. G. Motta, J. A. P. Ceratti, E J. B. Soares. *Pavimentação asfáltica - formação básica para engenheiros*. 1. Rio de Janeiro: ABEDA, 2007.
- Bonica, C., Toraldo, E., Andena, L., Marano, C. and Mariani, E. The effects of fibers on the performance of bituminous mastics for road pavements. *Composites Part B*, 95, 2016, pp. 76-81.
- Branco, F., Pereira, P. e Picado Santos, L., 2008. *Pavimentos Rodoviários*. Almedina. Coimbra.
- Button, J.W. and J.A. Epps, *Mechanical Characterization of Fiber-Reinforced Bituminous Concrete*, Report 4061-1, Texas Transportation Institute, College Station, Feb. 1981, 99 pp.
- Busching, H. W. and Antrim, J. D. Fiber reinforcement of bituminous mixtures. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 37, 1968, pp. 629-659.
- Busching, H.W., E.H. Elliott, and N.G. Reyneveld, "A State-of-the-Art Survey of Reinforced Asphalt Paving," *Proceedings of the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 39, 1970, pp. 766–798.

- CEN, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2007). EN 12697-22:2003+A1 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking.
- Chen, H., *et al.*, 2009. Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures. *Materials and Design*, 30 (7), 2595–2603.
- Chen, J. S. and Lin, K. Y. Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers. *Journal of materials science*, 40, 2005, pp. 87-95.
- Cleven, M., 2000. Investigation of the properties of carbon fiber modified asphalt mixtures. Michigan Technological University Houghton.
- D'Angelo, J.; Kluttz, R.; Dongre, R.; Stephens, K.; Zanzotto, L. Revision of the superpave high temperature binder specification: The multiple stress creep recovery test. *J. Assoc. Asphalt Pavement Technol.*, v. 76, 123-162. 2007.
- Davar, A., Tanzadeh, J. and Fadaee, O. Experimental evaluation of the basalt fibers and diatomite powder compound on enhanced fatigue life and tensile strength of hot mix asphalt at low temperatures. *Construction and Building Materials*, 153, 2017, pp. 238- 246.
- Daniel, J. S., Kim, Y. R., 2002. "Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic continuum damage model." *Journal of the Asphalt Paving Technologists*, 71, pp.619-650.
- Domingos, M. D. I.; Faxina, A. L. Avaliação do Comportamento Fluência- Recuperação de Ligantes Asfálticos com SBS e Ácido Polifosfórico. *Revista Transportes*, v. 21, p. 51-58. 2013.
- Faxina, A. L. Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, São Paulo, SP. 286 p. 2006.
- Fernandes, M. R. S. Efeitos de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de asfaltos modificados com SBS. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 118 f. 2013.
- Ferreira, A.P.A., 2012. Incorporação de fibras da reciclagem de pneus em misturas betuminosas. Tese submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Urbana pela Universidade do Minho.
- FHWA. Superpave Binder Specification. Federal Highway Administration. Washington. 2002
- Francisco, A.P.S. (2012). Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis, Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança.
- Franco, F.A.C.P. Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

- Freire, A. C. F. O. R., 2002. Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários, Tese de Doutoramento da FCTUC, Coimbra.
- Fu, S.Y., *et al.*, 2000. Tensile properties of short glass fiber and short carbon fiber reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31 (10), 1117–1125.
- Gallegos, C., García-Morales, M. (2011). Rheology of polymer-modified bitumens, *Polymer Modified Bitumen: Properties and Characterisation*, p. 197-237, Woodhead Publishing.
- Gama, D. A. Efeito da Adição de Polímeros Reativo, Não-Reativo e Ácido Polifosfórico e Suas Combinações nas Propriedades de Ligantes Asfálticos. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. F. 167. 2016.
- García, A., Norambuena-Contreras, J., Partl, M.N., Schuetz, P. 2013. Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers. *Construction and Building Materials*, Vol 43, 2010, pp. 107 – 117.
- Ge, Z., Huang, M., and Wang, Y, 2014. Fatigue behaviour of asphalt concrete beams reinforced by glass fibre-reinforced plastics. *International Journal of Pavement Engineering*, 15 (1), 36–42.
- Guo, F., Li, R., Lu, S., Bi, Y. e He, Haiqi. 2020. Evaluation of the Effect of Fiber Type, Length, and Content on Asphalt Properties and Asphalt Mixture Performance. *Materials*, 13, 1556.
- Hintz, C. Understanding mechanics leading to asphalt binder fatigue. Dissertation. University of Wisconsin-Madison. 2012.
- Hintz, C.; Bahia, H. Simplification of Linear Amplitude Sweep Test and Specification Parameter. *Transportation Research*. V. 2370, p. 10-16. 2013.
- Huang, YH (1993). *Pavement Analysis and Design*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- InIR, I.P. (2009c). Directivas para a concepção de pavimentos - Critérios de dimensionamento, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, Lisboa
- ITEM 400HS. Standard specification for asphalt concrete-high stress using polypropylene fibers. Ohio Department of Transportation, Construction and Materials Specifications; 1998
- Jan, H., Aman, M., Khan, S., Karim, F. (2017). “Performance of Hot Asphalt Mixtures Containing Plastic Bottles as Additive”. *MATEC Web Conferences*, Vol. 103, p.09006.
- Johnson, C.; Bahia, H. Evaluation of an accelerated procedure for fatigue characterization of asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*, 2010.

- Kaloush, K.E., K.P. Biligiri, W.A. Zeiada, M.C. Rodenzo, and J.X. Reed, "Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Materials Characterization Tests," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 38, No. 4, July 2010, pp. 1–12.
- Kietzman, J. H. Effect of Short Asbestos Fibers on Basic Physical Properties of Asphalt Pavement Mixes. Highway Research Board Bulletin, no. 270, National Research Council, Washington, DC, USA, 1960.
- Lakes, R. Viscoelastic Materials. New York, NY: Cambridge Press, 2009.
- L. Santucci, "Rut Resistant Asphalt Pavements", Technology Transfer Program and Pavement Specialists, Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies: University of California, Berkeley, 2001
- Lee, S.J., *et al.*, 2005. Fatigue cracking resistance of fiber-reinforced asphalt concrete. *Textile Research Journal*, 75 (2), 123–128.
- Mahrez, A., Karim, M.R., and Katman, H.Y., 2005. Fatigue and deformation properties of glass fiber reinforced bituminous mixes. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 997–1007.
- McDaniel, R. S. Fiber Additives in Asphalt Mixtures. A Synthesis of Highway Practice. Washington: National Academic of Science, 2015.
- Miranda, R. (2014). "Estudo da Modificação de Betumes com Polímeros Reciclados". Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- Moghaddam, A.M., Ziaee, S.A., and Mollashahi, H.F., 2014. Effects of waste fibers stabilizers on the draindown and moisture damage sensitivity properties of SMA mixtures. *International Journal of Transportation Engineering*, 2 (2), 155–165.
- Musa, N.F.A.A., Aman, M.Y., Shahadan, Z., Taher, M.N.M., Noranai, Z. 2019. Utilization of Synthetic Reinforced Fiber in Asphalt Concrete -A Review. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. Vol. 10, 2019, pp. 678-694.
- NCHRP. National Cooperative Highway Research Program. 2015. Fiber Additives in Asphalt Mixtures. WASHINGTON, D.C.
- Neves, J. M., Correia, A. G., 2006. Caracterização da rigidez de misturas betuminosas em ensaios de tracção indirecta por compressão diametral de provetes cilíndricos. Publicação n°26. Universidade do Minho. Guimarães.
- Nunes, L.C. (2017). Fadiga de misturas asfálticas descontínuas com asfalto-borracha de 4 geração. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília.

- Pais, J.C., 1999. Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Universidade do Minho. Braga, Portugal.
- Pais, J.C. e Palha, C.A.F., 2010. Resistência à fadiga em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários.
- Pais, J. C., Pereira, P. A. A., Azevedo, M. C. M., 2000. Ensaio mecânicos para a caracterização de misturas betuminosas. 1º Congresso Rodoviário Português. Lisboa.
- Palha, C.A.F., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J., 2009. Comparação de diferentes métodos de ensaio normalizados para avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga das misturas betuminosas.
- Paris, P.C. e Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Series D, 85, No. 3, 1963.
- Pereira, P., Miranda, C., 1999. Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários. Universidade do Minho. Braga, Portugal.
- Read, J., e C. D. Whiteoak. The shell bitumen handbook. Fifth edition. London: Thomas Telford Publishing, 2003.
- Reis, N. F. S. 2009. Análise estrutural de pavimentos rodoviários aplicação a um pavimento reforçado com malha de aço. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa.
- Roberts, F. L.; Kandhal, P. S.; Brown, E. R.; Lee, D.; Kennedy, T. W. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996.
- Seo, Y.G. A comprehensive study of crack growth in asphalt concrete using fracture mechanics. PhD Thesis, Raleigh, NC: North Carolina State University, 2003.
- Soenen, H.; Blomberg, T.; Pellinenc, T.; Laukkanenc, O., The Multiple Stress Creep-Recovery Test: A Detailed Analysis of Repeatability and Reproducibility. Road Materials and Pavement Design. V. 14, p. 2-11. 2013.
- Tapkin, S., 2008. The effect of polypropylene fibers on asphalt performance. Building and Environment, 43 (6), 1065–1071.
- Torres, H. P., 2014. Utilização de betimes modificados na regeneração de misturas com elevadas percentagens de reciclagem. Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade do Minho, Universidade do Minho.

- Vaitkus, A., Laurinavičius, A., Oginskas, R., Motiejūnas, A., Paliukaitė, M., Survilė, O. (2012). "The road of experimental pavement structures: Experience of five years operation". *The Baltic Journal of road and bridge engineering*, 7(3), pp. 220-227.
- Vila-Cortavitarte, M., Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M., Indacochea-Vega, I. (2018). "Analysis of the influence of using recycled polystyrene as a substitute for bitumen in the behaviour of asphalt concrete mixtures". *Journal of cleaner production*, Vol. 170, pp. 1279-1287.
- Wang, L. S.; Hong, R. Y., *Advances in Nanocomposites - Synthesis, Surface Modification and Characterization of Nanoparticles*. 2011.
- Wang, S., Kang, A., Xiao, P., Li, B., Fu, W. 2019. Investigating the Effects of Chopped Basalt Fiber on the Performance of Porous Asphalt Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2019, 2019, 12 pages.
- Wu, S., Ye, Q. and Li, N. Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers. *Construction and Building Materials*, 22, 2008, pp. 2111-2115.
- Wu, S., Ye, Q., Li, N., Yue, H., 2007. Effects of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 22, pp.733-736.
- Xiong, R., *et al.*, 2015. Laboratory investigation on the brucite fiber reinforced asphalt binder and asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 83, 44–52.
- Xu, T., Huang, X. (2012) Investigation into causes of in-place Rutting in Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*. V. 28, p. 525-530.
- Xu, T., Wang, H., Li, Z., Zhao, Y. (2014). Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using different laboratory performance tests. *Construction and Building Materials*, vol. 53, pp. 561-567.
- Ye Z., Jian L. The Effect of Fiber on the Performance of Open Graded Friction Course (An Environmental Survey) *Ekoloji*. 2019; 28:4891–4895.
- Yin, J., Wu, W. 2018. Utilization of waste nylon wire in stone matrix asphalt mixtures. *Waste Management*. Vol. 78, 2018, pp.948-954.
- Zhi, S., Gun, W. W., Hui, L. X., Bo, T. (2012) Evaluation of fatigue crack behavior in asphalt concrete pavements with different polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 27, pp. 117-125.
- Ziari, H., Moniri, A. (2019). Laboratory evaluation of the effect of synthetic Polyolefin-glass fibers on performance properties of hot mix asphalt, Vol. 213, pp.459-468.